T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİ BİR KANAT YAPISINA SAHİP DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ GELİŞTİRİLMESİ

MAHMUT GÜR

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. ETHEM TOKLU

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YENİ BİR KANAT YAPISINA SAHİP DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ GELİŞTİRİLMESİ

Ekrem SEZİCİ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ethem TOKLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ethem TOKLU
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nedim SÖZBİR
Sakarya Üniversitesi
_____

Prof. Dr. Kemal ERMİŞ
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 14/12/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

14 Aralık 2022

Mahmut GÜR

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Ethem Toklu'ya en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, ENT Makina Enerji Müh. San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından desteklenmiştir.

14 Aralık 2022 **Mahmut GÜR**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ vii
ÇİZELGE LİSTESİ x
KISALTMALAR xi
SİMGELER xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
EXTENDED ABSTRACT xv
1. GİRİŞ 1
1.1. ENERJİ KAVRAMI ? 1
1.2. ENERJİ KAYNAKLARI 1
1.2.1. Yenilenebilir Olmayan Enerji Kaynakları 2
1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları 2
2. LİTERATÜRDE RÜZGAR ENERJİSİ 4
2.1. RÜZGAR ENERJİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 4
2.1.1. İyi Yanları 4
2.1.2. Kötü Yanları 6
2.2. RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHÇESİ 6
2.3. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BAKIŞ 10
2.3.1. Dünya'nın Sahip Olduğu Rüzgâr Enerji Potansiyeli 10
2.3.2. Türkiye'nin Rüzgâr Enerji Potansiyeli 16
3. RÜZGAR TÜRBİN ÇEŞİTLERİ 26
3.1. GÜÇLERİNE GÖRE SINIFLANDIRMA 26
3.2. RÜZGÂR İLE KANAT ETKİLEŞİMİNE GÖRE SINIFLANDIRMA 26
3.3. KONTROL SİSTEMLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI 26
3.4. DÖNME EKSENİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI 27
3.4.1. Yatay Eksenli Türbinler 27
3.4.1.1. *Rüzgârı Önden Alan Rüzgâr Türbinleri* 27
3.4.1.2. *Rüzgârı Arkadan Alan Rüzgâr Türbinleri* 28
3.4.1.3. *Tek Kanatlı Rüzgâr Türbinleri* 28
3.4.1.4. *Çift Kanatlı Rüzgâr Türbinleri* 29
3.4.1.5. *Üç Kanatlı Rüzgâr Türbini* 30
3.4.1.6. *Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini* 31
3.4.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT) 31
3.4.2.1. *Savonious Rüzgâr Türbinleri* 33
3.4.2.2. *Darrieus Rüzgâr Türbinleri* 37
3.4.2.3. *H-Darrieus Rüzgâr Türbinleri* 37
3.4.3. Eğik Eksenli Rüzgâr Türbinleri 38
3.5. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN BİRBİRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI 38
3.6. RÜZGÂR TÜRBİNİ BİLEŞENLERİ 40
3.6.1. Dişli Kutusu 42

3.6.2. Rotor 43
3.6.3. Anemometre 44
3.6.4. Otomatik Yöneltme Düzeneği 45
3.6.5. Frenleme Düzeneği 45
3.6.6. YAW Mekanizması 46
3.6.7. Elektronik Kontrolcü 47
3.6.8. Jeneratör 47
3.6.9. Soğutma Sistemi 47
3.6.10. Platform ve Kule 47
3.7. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN MALZEMESİ, ÖMRÜ, BAKIMI VE GÜVENLİĞİ 49
3.7.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Malzemeler 49
3.7.2. Rüzgâr Türbinlerinin Ömrü 49
3.7.3. Rüzgâr Türbinlerinin Bakımı 49
3.7.4. Güvenlik 50
4. MATERYAL VE YÖNTEM 51
4.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİĞİ 51
4.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN VERİMLİLİĞİ 56
4.3. TÜRBİN PERFORMANS HESAPLAMASI 58
5. PROTOTİP RÜZGAR TÜRBİNİ 63
5.1. RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI 63
5.2. PROTOTİP İMALAT AŞAMALARI 68
5.2.1. Kanat İmalatı 68
5.3. RÜZGAR TÜRBİNİ ANA TASARIMI 70
5.3.1. Türbin İmalatı 71
5.4. DERT PROTOTİP DENEMELERİ 72
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 74
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
8. KAYNAKÇA 85
ÖZGEÇMİŞ 1

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması [2]. 3
Şekil 2.1. 2012-2020 Arası Yenilenebilir Enerji Sektörü İstihdam Rakamları [6]..... 5
Şekil 2.2. Nil Nehri'nde rüzgârdan yardım alarak hareket eden yelkenli [7]. 7
Şekil 2.3. Su pompalamada kullanılan Çin rüzgâr mili [7]. 7
Şekil 2.4. Perslerde kullanılmış dikey eksenli yel değirmenleri [7]. 8
Şekil 2.5. Tasarımını Charles F. Brush'ın yaptığı ilk rüzgâr türbini [9]..... 9
Şekil 2.6. Putnam rüzgâr türbini [7]. 10
Şekil 2.7. NASA tarafından oluşturulmuş yeryüzü rüzgâr bölgeleri 11
Şekil 2.8. 2050 'ye kadar Avrupa'da elektrik üretim yöntemleri 12
Şekil 2.9. Toplam rüzgâr kurulum kapasitelsi 2001-2020 [16]. 13
Şekil 2.10. 2030 'a Kadar Öngörülen Yeni Küresel Rüzgâr Kurulumları [16]. 13
Şekil 2.11. Dünya kara rüzgâr kapasitesi değişimi [17]. 14
Şekil 2.12. 2010 -2020 arası bölgelere göre DRES güçleri [17]. 14
Şekil 2.13. Ülkeler bazında yeni ve var olan rüzgâr kurulumları [16]. 15
Şekil 2.14. 2020 'de üretim kapasitesi en fazla artırmış on ülke [17]. 16
Şekil 2.15. Türkiye rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güce göre değişimi. 17
Şekil 2.16. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı [15]. 17
Şekil 2.17. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı [15]..... 18
Şekil 2.18. Türkiye'nin kapasite faktörü dağılımı, 100 metre [15]. 18
Şekil 2.19. Türkiye rüzgâr santralleri atlası 2019 [34]. 19
Şekil 2.20. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için toplam kurulum [35]. 19
Şekil 2.21. Türkiye'deki RES için yılık kurulum [35]. 20
Şekil 2.22. Türkiye 'deki RES'lerin aylık elektrik üretimi [35]..... 20
Şekil 2.23. Türkiye'deki RES'lerin elektrik üretimindeki payı [35]. 21
Şekil 2.24. İşletmedeki RES'lerin türbin markalarına göre dağılımı [35]. 22
Şekil 2.25. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [35]..... 23
Şekil 2.26. İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı [35]. 23
Şekil 2.27. 2021 İşletmede RES verileri. 24
Şekil 2.28. 2021 İnşa halindeki RES verileri. 24
Şekil 2.29. 2021 Lisans halindeki RES verileri. 25
Şekil 2.30. 2021 En Son güncel işletmedeki santrallerin listesi ve konumları [36]. 25
Şekil 3.1. Önden güç beslemeli rüzgâr türbini [20]. 28
Şekil 3.2. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbini [20]. 28
Şekil 3.3. Tek kanatlı rüzgâr türbini. 29
Şekil 3.4. Çift kanatlı rüzgâr türbini. 30
Şekil 3.5. Üç kanatlı rüzgâr türbini [21]. 31
Şekil 3.6. Çok kanatlı bir rüzgâr türbini [20]. 31
Şekil 3.7. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini Modelleri 32
Şekil 3.8. Hibrit model [39]. 34
Şekil 3.9. Wind Booster tasarımı [38]. 35
Şekil 3.10. Yapılandırılmış Wind Booster'ın akışkan analizi [38]. 35
Şekil 3.11. Yüzey çukurlukları ve ek kanatçıkları olmayan blade savonius rüzgâr türbini ve akışkan analizi [40]. 36
Şekil 3.12. Demiryolu taşımacılığında Savonius Rüzgâr Türbini Uygulaması [40]. 36
Şekil 3.13. Darrieus tipli bir rüzgâr türbini [4]. 37
Şekil 3.14. Eğik eksen örneği [37]. 38

Şekil 3.15. Bir Rüzgâr Türbini Cephe Görünüşü..... 41
Şekil 3.16. Rüzgâr türbininin iç görünümü..... 41
Şekil 3.17. Rüzgâr türbini elemanları [26]. 42
Şekil 3.18. Dişli kutusu..... 43
Şekil 3.19. Rotor Kanadı imalatı [44]..... 44
Şekil 3.20. Yaygın olarak kullanılan tipik anemometre. 45
Şekil 3.21. Otomatik yöneltme düzeni [27]..... 45
Şekil 3.22. Yaw mekanizması..... 46
Şekil 3.23. Kule tipleri [23]. 48
Şekil 4.1. Rüzgâr Türbininin Aerodinamik kaldırması..... 52
Şekil 4.2. Hücum açısının değişimi. 52
Şekil 4.3. Kanat profilinde basınç dağılımı 53
Şekil 4.4. Bileşke kuvvet Fa. 53
Şekil 4.5. Kanat şekli. 54
Şekil 4.6. Kanat şekli 54
Şekil 4.7. Kanatların Sabit birleştirilerek yarım kanadın oluşturulması..... 55
Şekil 4.8. Kanatların Simetrik ikizinin konumu ve Ana kanadın oluşması..... 55
Şekil 4.9. Ana kanadın Ana Aks üzerindeki konumu..... 55
Şekil 4.10. Rüzgâr Hızının Yükseklikle Değişimi..... 57
Şekil 4.11. Yatay eksenli Rüzgâr Türbini için Süpürülen Alan..... 59
Şekil 4.12. Lamda kanat uç hız hesabı..... 60
Şekil 4.13. Betz limiti grafiği..... 60
Şekil 4.14. Türbin performans karşılaştırması..... 61
Şekil 4.15. Prototip Süpürme Alanı 61
Şekil 4.16. Hesaplanan Güç katsayısı Karşılaştırılması. 62
Şekil 5.1. Kaldırma kuvveti F1..... 63
Şekil 5.2. Devirme kuvveti F2..... 64
Şekil 5.3. İki Kanadın Dönme Ekseni..... 65
Şekil 5.4. İki Kanat bağlantı elemanı..... 65
Şekil 5.5. İki kanat dönme yönleri..... 66
Şekil 5.6. Kanatların konum değiştirmesi sonrası yatay eksende dönme yönü..... 67
Şekil 5.7. Tam Kanat Modülü..... 67
Şekil 5.8. Tasarlanan üç modullü DERT. 68
Şekil 5.9. Kanat kalıpları. 69
Şekil 5.10. Kanatlar. 69
Şekil 5.11. DERT tasarımı son hali. 70
Şekil 5.12. DERT tasarımı teknik çizim..... 70
Şekil 5.13. Prototipi yapılan DERT tasarımı. 71
Şekil 5.14. Türbin prototipinin tamamlanması. 71
Şekil 5.15. Türbinin test düzeneği. 72
Şekil 6.1. Kepçe kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı..... 74
Şekil 6.2. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı. 75
Şekil 6.3. Özgün kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı. 75
Şekil 6.4. Kepçe kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı..... 76
Şekil 6.5. Kepçe kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı. 77
Şekil 6.6. Özgün kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı. 77
Şekil 6.7. Özgün kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı..... 78
Şekil 6.8. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı..... 78
Şekil 6.9. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı..... 79
Şekil 6.10. Prototip süpürme alanı..... 80

Şekil 6.11. Prototip teorik Betz süpürme alanı güç grafiği. 81
Şekil 6.12. Teorik prototip süpürme alanı güç grafiği. 81
Şekil 6.13. Prototip süpürme alanında testlerde elde edilen güç grafiği 82
Şekil 6.14. Rüzgâr hızına göre hesaplanan güç katsayısı 82
Şekil 6.15. Devir sayısına göre hesaplanan güç katsayısı 83

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Fiziki Ölçülerine Göre Türbinlerin Karşılaştırılması 38
Çizelge 3.2. Türbinlerin güç besleme yönüne göre değerlendirilmesi. 39
Çizelge 3.3. Türbinlerin Kanat sayısı ve Formuna Göre değerlendirilmesi. 39
Çizelge 3.4. Rağbet gören Türbinler ve çalıştırıldıkları yerler. 40
Çizelge 4.1. Pürüzlülük sınıfları. 56

KISALTMALAR

BNEF	Bloomberg New Energy Finance
BM	Birleşmiş Milletler
DERT	Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri
DRES	Deniz üstü Rüzgâr Enerji Santrali
DRT	Deniz üstü Rüzgâr Türbini
EDS	Enerji Dönüşüm Senaryosu
ENSİA	Enerji Sanayicileri ve İş adamları Derneği
EVYT	Enerji Verimliliği Yasa Tasarısı
GRP	Cam yünü güçlendirilmiş plastikler
GW	Giga watt
GWEC	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPA	Katılım öncesi yardım aracı
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
HAWT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri
JERKY	Japon Enerjinin Rasyonel Kullanım Yasası
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
MW	Mega watt
MWh	Mega watt saat
NREL	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
TUREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
VAWT	Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri

SİMGELER

C	Kanat Sabiti
V	Kanat yüzeyini yalayan havanın hızı
P	Havanın yoğunluğu
S	Kanat yüzey alanı
vt	Hesaplanan yükseklikteki rüzgâr hızı
vö	Ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızı
Ht	Türbin yüksekliği
Hö	Ölçüm yüksekliği
Z0	Pürüzlülük uzunluğu katsayısını
α	Yüzey pürüzlülük katsayısı
H_1	V_1 hızının ölçüldüğü yükseklik
H_2	Rüzgâr hızının hesaplanacağı (V_2) yükseklik
V_1	H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızı
V_2	H_2 yüksekliğindeki rüzgâr hızı
P_{rmax}	Güç
ρ	Havanın yoğunluğu
A_T	Çarkın süpürme alan
c_p	Güç katsayısı
λ_0	Kanat uç hızı
R	Çark yarıçapı
F1	Kaldırma kuvveti
F2	Devirme kuvveti
Fa	Bileşke kuvvet

ÖZET

YENİ BİR KANAT YAPISINA SAHİP DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mahmut GÜR
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Ethem TOKLU
Kasım 2022, 88 sayfa

Artan ihtiyaçlar ve artan üretim kapasiteleri sonucunda enerjiye olan ihtiyaç da artmış, talep yoğunluğu nedeniyle enerji tedariki de zorlaşmıştır. Yer katmanlarında depolanmış olan sınırlı enerjinin kullanımının birçok çevre sorununa sebep olması ve tabiatın döngüsüne olumsuz etkilerinin günden güne artması, yetkililerin yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgisini artırmıştır. Bu ilginin yönü, kullanımı kolay, teknolojisi olgunlaşmış ve en hızlı gelişen enerji kaynakları doğrultusundadır. Ülkeler kendilerine ait devamlı bulunabilecek, hammadde maliyeti olmayan enerji kaynaklarına yatırımlarını yapmaktadırlar. Ülkeler enerjide ithalatı azaltması, çevre dostu olması, tesis kurulumunun kolay ve hızlı olması gibi nedenlerle rüzgâr enerjisini tercih etmektedirler. Bu çalışmada, alternatif enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi ve rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üreterek veya mekanik enerji olarak faydalanmamızı sağlayacak rüzgâr türbinleri incelenmiştir. İlerleyen safhada dikey eksenli rüzgâr türbini geliştirilerek prototip tasarımı ve imalatı yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Düşey eksenli, Elektrik üretimi, Kanat, Rüzgâr türbini.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH A NEW WING STRUCTURE

Mahmut GÜR
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ethem TOKLU
November 2022, 88 pages

As a result of increasing needs and increasing production capacities, the need for energy has increased, and energy supply has become difficult due to demand intensity. The use of limited energy stored in the ground layers causes many environmental problems and the negative effects on the cycle of nature increase day by day, increasing the interest of the authorities in renewable energy sources. The direction of this interest is in the direction of energy sources that are easy to use, mature in technology, and developing the fastest. Countries direct their investments to their own energy resources that can be found continuously and that do not have the cost of raw materials. Countries prefer wind energy for reasons such as reducing imports in energy, being environmentally friendly, and easy and fast facility installation. In this study, wind energy, which is one of the alternative energy sources, and wind turbines that will enable us to use wind energy as electrical energy or mechanical energy are examined. In the following stage, a vertical axis wind turbine was developed and prototype design and manufacturing were made.

Keywords: Electricity production, Vertical axis, Wind turbine, Wing.

EXTENDED ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH A NEW WING STRUCTURE

Mahmut GÜR
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ethem TOKLU
November 2022, 88 pages

INTRODUCTION

Energy, which is generally a difficult concept to understand, is tried to be explained by giving examples from time to time. Sometimes it can simply be defined as the safe use of power in nature. In law, it may be specified separately. E.g; In the "Energy Efficiency Draft Law (EVYT)", energy; is defined as the ability of a system to produce activity outside of itself. In the Japanese Law for the Rational Use of Energy (JERKY), energy is defined as fuel forms such as liquid fuel, combustible natural gas, and coal, as well as the heat and electricity obtained from them. In addition to these, Naoto Shinkawa has received three awards for energy saving in Japan. According to this definition, energy is expressed as "money needed to (purchase) a comfortable and comfortable (appropriate) livelihood" and is also emphasized as "cash " by the UK Energy Efficiency Office. These definitions mean "energy = money".

MATERIAL AND METHODS

Wind Energy advantages and disadvantages are discussed in detail. The evolution of Wind Energy with an overall view of wind energy in the world and Turkey is explained. The types of Wind Turbines according to their powers, control systems, how wind interacts with the blades, and according to the rotation of the turbine are explained. The two main types of turbines are Horizontal-axis Turbines (HAWT) and Vertical-axis turbines (VAWT). HAWT has a rotating axis oriented horizontally. They typically feature 3-blades and are designed to face the wind. VAWT has the rotating axis aligned vertically and is designed to harness kinetic energy in the opposite direction.

The efficiency of the Turbines is discussed and The design of VAWT with a prototype production is examined in detail. Betz law calculations and comparison of performance

coefficients for different types of turbines are discussed in detail.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Vertical axis wind turbine blades were designed and modeled; turbine power generation tests were carried out. Performance tests of the VAWT were tested on a car at different speeds due to the absence of a wind tunnel. This turbine can generate electricity from the wind in rivers, lakes, and the sea, or the power of the turbine can be used as a source of mechanical motion. Design improvements can be made to improve performance.

CONCLUSION AND OUTLOOK

In this thesis, a new vertical axis wind turbine is developed with a new design from a new idea. It has a structure that minimizes the wind resistance with its self-opening wing structure according to the wind speed and the wind welcome situation. In this way, the conversion of kinetic energy to mechanical energy increases. The wind turbine idea was turned into a prototype product. Mechanical tests and wind tests were carried out and the operability of the turbine was tested. Wind speed and turbine rotation speed information were collected and mechanical power calculations were made. The power coefficient (cp) was found to be approximate to the most efficient turbines when compared to the wind turbines currently available in the literature and applications.

This prototype confirms the working principle of the vertical axis wind turbine, which is the subject of the thesis. It has been observed that the generation capacity is low at low wind speeds. Protorip can continue to produce uninterrupted energy at high wind speeds and storms. The center of gravity of the turbine components is on the ground and does not require costly foundation construction if desired. It is possible to take it from one place and transport it as assembled to another place. Improvements can and shouldalways be made

1. GİRİŞ

1.1. ENERJİ KAVRAMI

Yasal metinlerde, enerjiye farklı tanımlar getirilmektedir. Bu tanımlayan kişilere göre değiştiği gibi ülkeden ülkeye de farklılıklar arz etmektedir. Örneğin; "Enerji Verimliliği Yasa Tasarısı (EVYT)"nda enerji; bir sistemin kendi dışında etkinlik üretme yeteneği iken, Japon Enerjinin Rasyonel Kullanımı Yasası (JERKY)"nda, enerji; sıvı yakıt, yanabilir doğal gaz ve kömür gibi yakıt şekilleriyle bunlardan elde edilen ısı ve elektrik olarak tanımlanmıştır. Bunların yanı sıra, Japonya'da üç defa enerji tasarrufu konusunda ödül almış Naoto Shinkawa'nın enerji tarifi ; "konforlu ve rahat (uygun) geçimi sağlamak için (satın almak için) gerekli olan para" 'dır. İngiltere'deki Enerji Verimlilik Ofisi'nce enerji "peşin para" olarak görülmektedir. Sonuç olarak enerji paraya eşitlenirken insanlara doymak istiyorsanız para kazanmanız lazım, para kazanmak içinde enerji üretmeniz gerekiyor denmektedir [1].

1.2. ENERJİ KAYNAKLARI

İhtiyaç duyulan enerjinin elde edilebileceği kaynakları itibarıyla; Tabiattan el edildiği haliyle ve elde edilen kaynaktan sonra işlenerek oluşturulan enerji kaynakları olarak iki sınıfta toplanmaktadır.

Tabiattan elde edildiği haliyle kullanılan enerji kaynakları; yer kürenin oluşumunda meydana gelen her türlü doğal afetler, depremler , volkanik faaliyetler sonucunda alt üst olan yer katmanlarının içinde depolanmış enerjinin odun, kömür, ham petrol, doğalgaz, doğal uranyum (U-238, U-235, U-234 karışımı) olarak, veya atmosferik olaylar sonucunda oluşan rüzgâr, yağmurlar ve fırtınalar , potansiyel enerjisi değiştirilen hidrolik (su gücü) ve yaşam kaynağımız olan güneş ışığı gibi doğal enerji kaynaklarından oluşmaktadır.

Birincil enerji kaynakları, atmosferik ve yerküre ısısı nedeniyle oluşan yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenebilir olmayan yer küre katmanlarında depolanmış nihayeti olan enerji kaynakları olarak iki sınıfta toplanmaktadır. Birincil enerji kaynaklarından

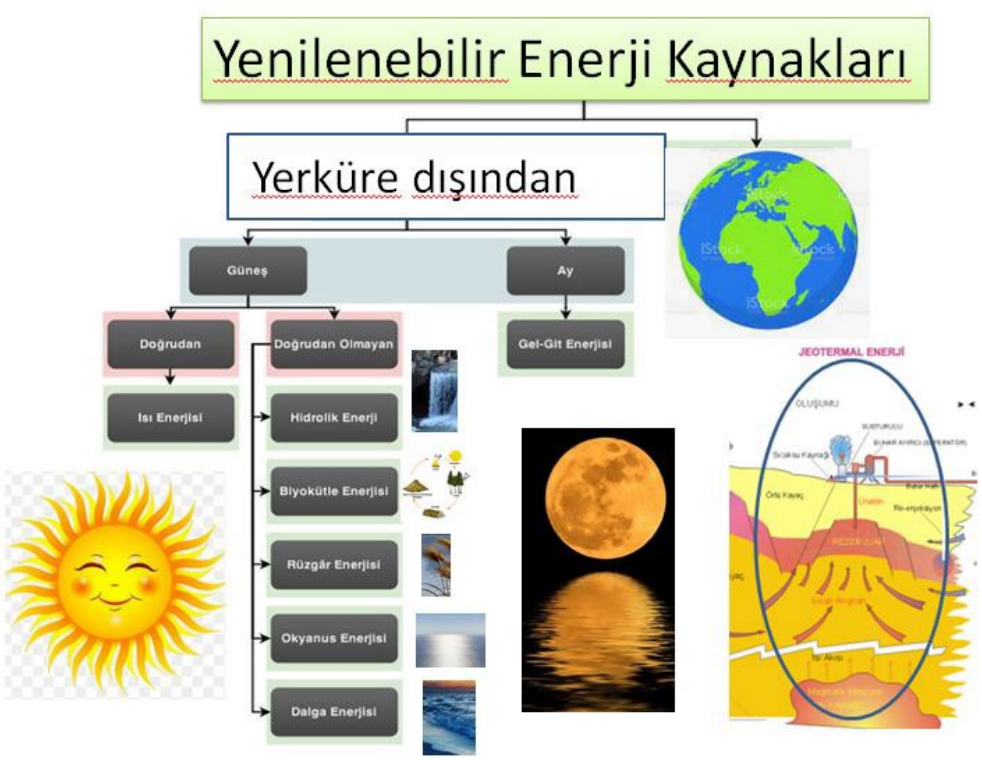
dönüştürülerek elde edilen elektrik ve petrol işlenmesiyle elde edilen ürünler gibi ikincil enerji kaynaklarıdır.

1.2.1. Yenilenebilir Olmayan Enerji Kaynakları

Kullanıldığında tekrar yerine konulamayan ikinci bir defa daha kullanılamayan maddeler yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarıdır. Nükleer enerji kaynağı atomlar, doğal gaz, taş kömürü, linyit, petrol yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar yeryüzüne eşit dağılmış değillerdir. Bir yerde çok var iken başka bir yerde hiç bulunmamakta veya çok az miktarda olmaktadır. İnsan yerkürenin her yerinde yaşamakta ve yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarından uzak kalabilmektedir [2].

1.2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Enerjiye ihtiyaç duyulduğu yerde yeraltı zenginlikleri olmadığından, az olduğundan veya var olanların da tükenme ihtimali olduğundan, fosil yakıtların kullanımıyla oluşan çevre kirliliğinden kaçınmak için; insanlar temiz ve tükenmeyen enerji kaynağı arayışına yönelmişlerdir. Her türlü enerjinin çıkış noktası olan Güneş, canlılara yaşam olanaklarını sunan Dünya ve Dünyanın uydusu Ay yenilenebilir enerji kaynakları olarak Şekil 1.1'de görüldüğü gibi gruplara ayrılabilir. Şekil 1.1'de yenilenebilir enerji kaynakları gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması [2].

Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılması planlanan yenilenebilir enerji kaynakları hem teknolojik gelişmelerin yeniliği hem de kurulum ve işletme maliyetinin yüksek olmasından dolayı geleneksel enerji kaynağı olan fosil yakıtlarla rekabet etme aşamasında hidroelektrik enerji haricinde halen daha arzulanan seviyeye getirilememiştir. Bununla birlikte güneş, jeotermal, rüzgâr ve biokütle teknolojileri dünya enerji pazarında yeni yeni boy göstermeye başlamışlardır. Yine enerji kaynağı olarak hidrojenden yararlanılması konusunda son zamanlarda çok yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin elektrik üretiminde kullanılmaya başlanması ise daha eskilere dayanmaktadır ve rüzgârdan elektrik üretimi 100 yıl önce başlamıştır. 1950li yıllardan önce daha çok 20-100 kW'lık nispeten küçük çaplı makineler üzerinde çalışılmış olsa da 1250 kW'lık türbinlerin yapılması da bu tarihlere dayanmaktadır. 1980li yıllarda ise yeni teknoloji ve malzemelerle yeniden geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜRDE RÜZGAR ENERJİSİ

Havanın yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak değişir. Isınan hava kütleleri genleşerek birim normal hacmindeki yoğunluğu azalır. Yoğunluğu azalan hava daha yoğun hava kütleleri arasından yükselmeye başlar. Yükselen hava kütlesi atmosferin belli katmanlarında çevresiyle ısıl denge sağlandığında yükselişi durur, dünyanın hareketi nedeniyle hareketine yatay yönde devam eder. Isınan havanın yer değiştirmesiyle basınç dağılımı da değişir. Bu durum da atmosferin yaptığı basıncın dünya üzerinde farklılıklar göstermesine sebep olur. Bulunduğu yerde eşit dağılma eğiliminde olan hava yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eder ve rüzgâr diye adlandırdığımız tabiat olayının meydana gelmesine vesile olur.

Rüzgârlar, alçak basınç alanına ulaştığında yükselen havanın oluşturduğu hortum çeperine teğet hareket etme eğilimine girer ve bir merkez etrafında dairesel hareket ederler. Dairesel harekete başlayan hava akımı her molekülünde merkezden dışa doğru savurmaya çalışan bir kuvvete maruz kalır. Bu kuvvet, Newton mekaniğinde eylemsizlik kuvveti olarak adlandırılır. Bu kuvvetin büyüklüğü hava akımının hızıyla doğru orantılı olarak değişir. Rüzgârın meydana getirilmesinde etkili olmayan, rüzgâra karşı direnç gösteren kuvvete ise sürtünme kuvveti denir. Türbülanslar tarafından yukarıya taşınan bu kuvvet, yer yakınında en büyük değerine ulaşır. Rüzgârın doğal olmayan veya doğal engellere takılmasıyla oluşan bu kuvvet, yerden 450-600 m yüksekliğe kadar etkili olabilmektedir. Hava kütlelerinin içerdiği enerjinin bir kısmı kullanılabilir mekanik veya elektriksel olarak enerjiye dönüştürülebilir. Bu fikrin ihtiyaçların artmasıyla eski çağlardan beri kullanmaya çalışma gayreti günümüzde de artarak devam etmektedir.

2.1. RÜZGAR ENERJİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

2.1.1. İyi Yanları

- Kullanıldığında çevreye zararlı atık üretmeyen bir kaynaktır.
- Kendini tekrar eden, güneş enerjisi olduğu sürece kendini yenileyecek bir kaynaktır. Asit yağmuruna neden olacak hiçbir atık maddeye sahip değildir.

- Zararlı atık bırakan enerji kaynaklarına olan ihtiyacı azaltır.
- Kurulumundan itibaren enerji kaynağı temini problemi olmayıp işletme bakım giderleri diğer kaynaklara göre oldukça azdır.
- Enerji dağıtım hatlarına uzak ve ulaşımı zor olan ve enerjiye ihtiyaç duyulan yerlerde ideal çözüm üretirler.
- Toplu üretim alanları diğer tarımsal ve hayvansal üretim faaliyetleri için de kullanıma açıktır.
- Gelecek nesillerin sağlıklı bir çevreye sahip olabilmeleri, çevresel ve ekonomik faydaları nedeniyle geliştirilmesine yatırım yapmaya değer bir enerji kaynağı olması verimliliğinin artması yönünde gelişmelere sebep olmaktadır.
- Eskiyen türbinlerin yenilenmesi ekonomik ve kolaydır. [3]-[4]-[5].
- İstihdam oluşturma gücü sayesinde önemli bir sektördür.

Şekil 2.1'de yıllara göre yenilenebilir enerji sektörünün sağlamış olduğu istihdam rakamları verilmiştir.



Şekil 2.1. 2012-2020 Arası Yenilenebilir Enerji Sektörü İstihdam Rakamları [6].

Dünya genelinde 2012 yenilenebilir enerji sektöründe toplam 7 300 000 kişi, 2020 yılında 12 000 000 kişiye ulaşmıştır. Rüzgâr sektörün de ise çalışan sayısı 2012 yılında 750 000 kişiden 2020 yılında 1 250 000 çalışan sayısına ulaşmıştır. IRENA iş veri tabanından alınan bu değerler rüzgâr istihdamı ile birlikte yenilenebilir enerji sektöründe sürekli bir artışı göstermektedir [6].

2.1.2. Kötü Yanları

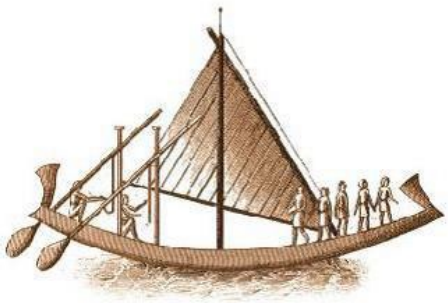
- Düzenli olmayan rüzgâr üretim ve ihtiyaç arasındaki fark sürekli dalgalıdır. Bu dalgalanma nedeniyle yüksek ihtiyaç dönemi ile yüksek üretimin bir araya getirilmesi mümkün olmaz. Arz – talep ilişkisindeki bu uyumsuzluk rüzgârdan elede edilen enerjinin en büyük olumsuzluğudur. İhtiyaç fazlası enerjinin depolanması şimdilik ekonomik değildir. Depolama alternatiflerinin geliştirilmesi konunda tüm dünyada çalışmalar devam etmekle birlikte, halen elle tutulur bir sonuç elde edilememiştir.
- Çok büyük etkisi olmasa da türbinler gürültülü çalışmaktadır. Nufusun yoğun olduğu yerleşim yerlerinde uzak mesafelere kurulması bu rahatsızlık nedenini hafifletmektedir. Gürültü probleminin etkisinin azaltılması üretim teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak bir çözüme kavuşturulabilir.
- Haberleşme ve İletişim teknolojilerine (radyo, TV vb.) olumsuz etkileri yerleşim yerlerinin yakın çevrelerinde tespit edilmiştir.
- Türbin tarlalarında, türbinlerin birbirini rüzgâr açısından gölgelemeleri daha büyük arazinin bu tarlalara ayrılmasına sebebiyet vermektedir. Ortaya çıkan daha büyük arazilerin farklı amaçlar için değerlendirilebilmesi konusunda yapılacak araştırmaların arazinin faydalı kullanılama oranını artıracaktır.
- Kuşların göç yollarında bulunan türbin tarlaları kuş ölümlerine sebep olmakta, dolayısıyla yer seçiminde bu konulara da dikkat edilmelidir [3]-[4]-[5].

2.2. RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHÇESİ

Tabii olarak var olan ve her zaman kendini yenileyen bir enerji türü olan rüzgâr, insanlar tarafından çok eski çağlarda dahi kullanılmıştır. Endüstriyel manada kullanımı konusunda yeni araştırmaların yapılması gerekmektedir.

Araştırmalar Rüzgâr enerjisi kullanımının, M.Ö. 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başladığını ortaya çıkarmıştır. M.Ö. 17. yüzyılda rüzgar enerjisinin Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanıldığı ve yine aynı dönemde Çin'de de rüzgar enerjisinin kullanıldığına dair bulgulara rastlanmaktadır. İlk yel değirmenleri Nil delta ağzında konumlanmış olan İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. M.S. 7. yüzyılda Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini kullanmaya başlamalarına karşın, haçlı seferleri

sonrasında Avrupalılar da yel değirmenleriyle tanışmışlardır. Fransa ve İngiltere ise yel değirmenlerini ancak 12. Yüzyıl başlarında kullanmaya başlamışlardır. Şekil 2.2'de yelkenli gemi örneği verilmiştir.



Şekil 2.2. Nil Nehri'nde rüzgârdan yardım alarak hareket eden yelkenli [7].

Şekil 2.3'te su pompalarında kullanılan mil gösterilmiştir. Şekil 2.4'te ise dikey eksenli yel değirmeni gösterilmiştir.

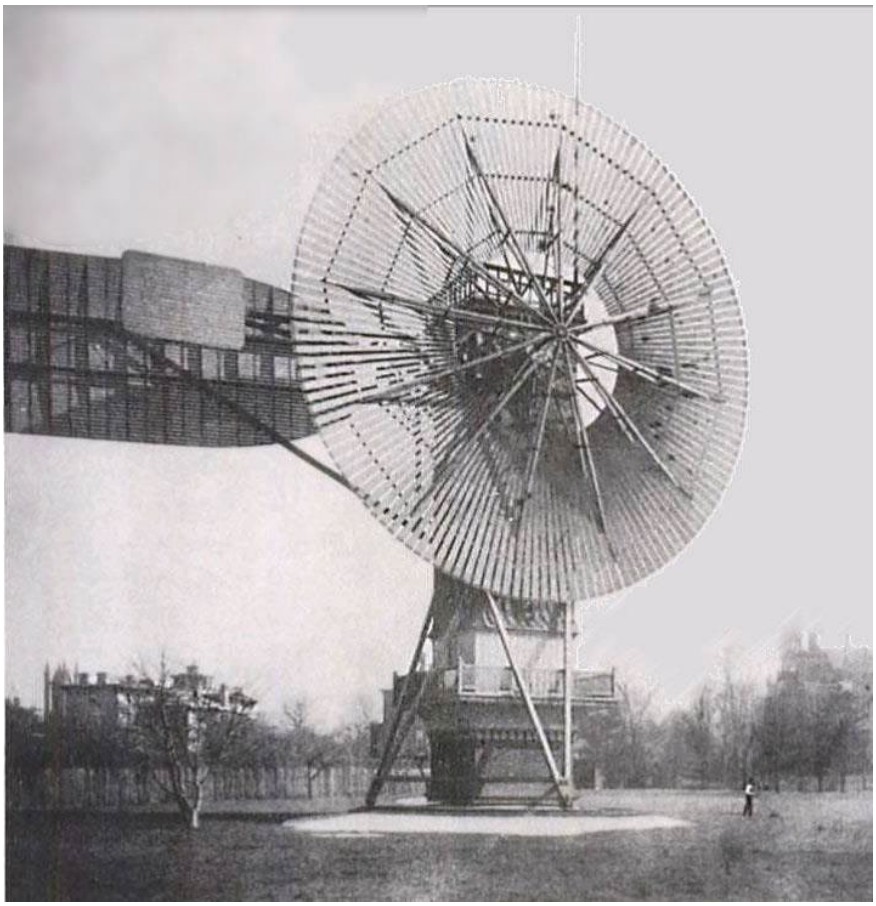


Şekil 2.3. Su pompalamada kullanılan Çin rüzgâr mili [7].



Şekil 2.4. Perslerde kullanılmış dikey eksenli yel değirmenleri [7].

Ormancılık alanında hızar çalıştırmak, su pompalamak, tarımsal ürünleri öğütmek, gibi amaçlarla tasarlanan yel değirmenleri Avrupa'da Endüstri Devrimi'ne kadar birçok alanda hızlı gelişimini sürdürmüştür. Tek başına Hollandalılar 18. yüzyılın sonunda 10.000 yel değirmeni kurmuşlardır. Bununla beraber, düzensiz de olsa rüzgâr enerjisine ulaşımın kolay olması, tedarik maliyetinin olmaması rüzgâr türbinlerinin inşasını cazip halde tutmuştur. İlk makine modern aerodinamiğin öncülerinden olan Paul la Cour tarafından Danimarka'da 1891'de kurulmuştur [8]. Bununla beraber, 19. yüzyılda geliştirilen ilk rüzgâr türbinlerinin verimlerinin oldukça düşük olduğu kayıt altına alınmıştır. Şekil 2.5'te ilk rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tasarımını Charles F. Brush'ın yaptığı ilk rüzgâr türbini [9].

Danimarka'da 1918 yılında rüzgâr enerjisi kullanılarak elde edilen elektriğin kırsal bölgelere ulaştırılması için yatırımlar yapılmaya başlamıştır. Bu amaç çerçevesinde belirlenen yüzden fazla kırsal alanda elektrik üretimi 20-30 kW'lık rüzgâr türbinlerinin kullanımı ile sağlanmıştır. Rusya'da ise 1931 yılında 100 kW'lık rüzgâr türbini kurularak elektrik üretilmeye çalışılmıştır. ABD'de 1941 yılında 1250 kW gücü ile dönemin en büyük rüzgâr türbini olan Putnam rüzgâr türbini kurulmuştur. İki kanatlı rotorunun (çarkının) çapı 53 m idi. Şekil 2.6'da görülen Putnam türbini, modern rüzgâr makinelerinin öncüsü olarak kabul edilir. Çok yüksek yatırım maliyeti ile birlikte (yaklaşık 1 milyon USD) ile üretilen santralin toplam ağırlığı 250 ton civarında olup, titreşim ve malzeme yorulmasından dolayı, 26 Mart 1945'te yaklaşık 8 tonluk kanatlarından biri kopmuş ve 230 m uzağa düşmüştür. Şekil 2.6'da Putnam rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Putnam rüzgâr türbini [7].

Savaş sonrası 1945'de İngiltere'de, 1947 yılında Danimarka'da başlatılan yeni tarz deneysel çalışmalar sonucunda, İngiltere Enfeld'da 10 kW gücünde ve 15 metre çapında üç kanatlı Andreu makinesi, Danimarka'da ise 1959 yılında 200 kW'lık 24 metre çaplı rotoru üç kanatlı Gedser türbini, Fransa'da aynı dönemde 300 kW'lık Noeget Le Roi'deki rüzgâr türbini kurulmuştur [2].

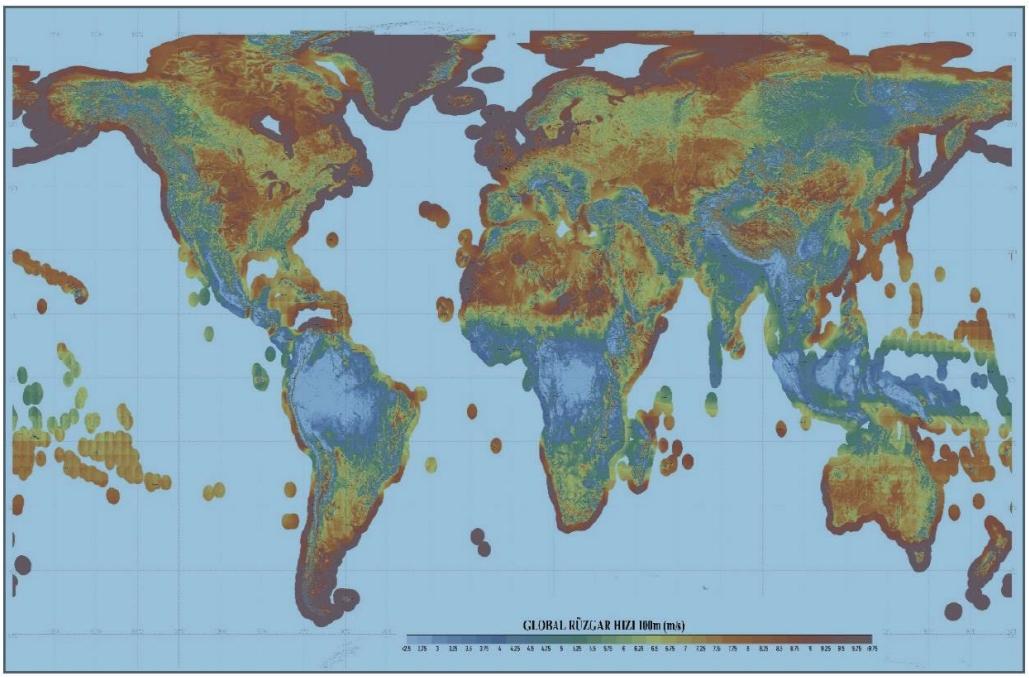
2.3. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BAKIŞ

2.3.1. Dünya'nın Sahip Olduğu Rüzgâr Enerji Potansiyeli

Çok yönlü araştırma gerektiren Dünyanın rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesi oldukça zordur. Bu zorluklara rağmen bilimsel çalışmalar, göstermiştir ki, dünya rüzgâr enerji kapasitesinin %10'unun kullanılmasıyla elektrik ihtiyacının tamamı karşılanabilir. Toplam enerji potansiyelin 53000 TWh/yıl olduğu tahmin edilen çalışmalar küresel ölçekte olup üretilebilme potansiyeli olan rüzgâr enerji miktarını vermektedir. Bu potansiyelin ancak 1/3'ünün ekonomik, görsel ve fiziksel planlama limitleri açısından

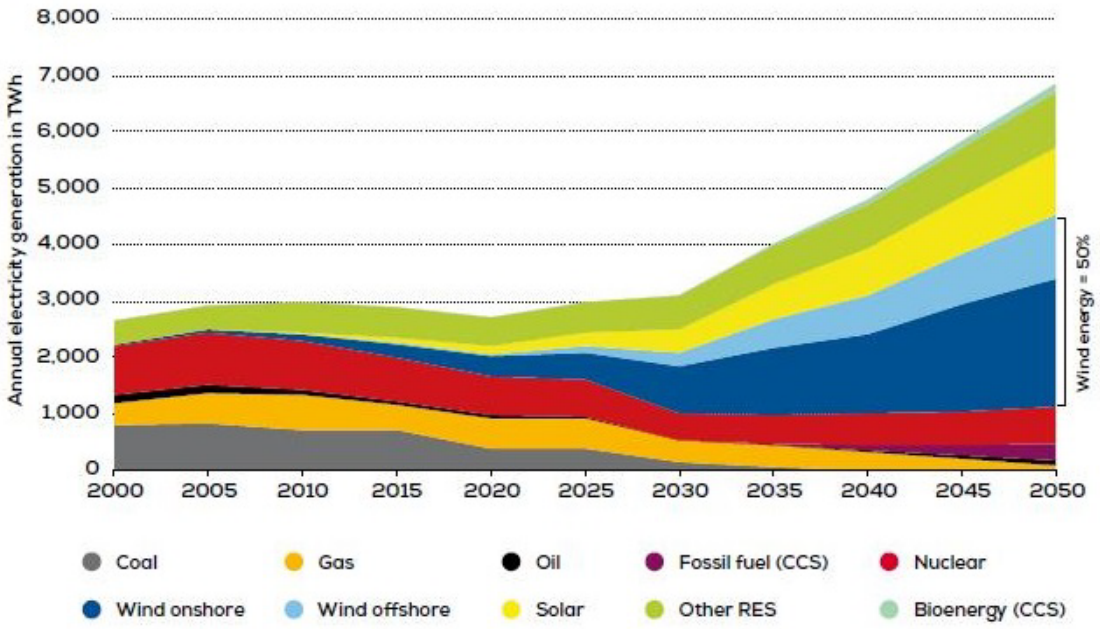
kullanılabilir olduğu belirtilmektedir.

Rüzgârı engelleyici doğal pürüzlülük göz önüne alındığında; rüzgâr enerjisi potansiyeline göre denizler, karasal alanlardan daha büyük enerji potansiyeline sahiptir [10]. Şekil 2.7'de yeryüzü rüzgar bölgeleri verilmiştir.



Şekil 2.7. NASA tarafından oluşturulmuş yeryüzü rüzgâr bölgeleri

Avrupa Birliği kapsamında 1990lı yıllarda, kıyıdan uzaklığa ve su derinliğine bağlı olarak deniz üstü rüzgâr türbinlerinin kurulması için potansiyel belirleme çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen bulgular kıyıdan uzaklaşıldıkça elde edilebilecek rüzgâr enerjisi miktarının çok daha yüksek oranda artacağını ortaya çıkarmıştır. Örneğin kıyıdan uzaklığı 10 km ve su derinliği 10 m olan bölgenin enerji potansiyeli 700 Twh/yıl iken, kıyıdan uzaklığı 30 km ve su derinliği 40 m olan bölgenin enerji potansiyeli 3500 Twh/yıl düzeyine yükselmektedir. Dünya'da GWEC, Türkiye de ise TUREB düzenli olarak rüzgâr istatistiklerini yayınlamaktadırlar [10]. Şekil 2.8'de elektrik üretim yöntemleri verilmiştir.



Şekil 2.8. 2050'ye kadar Avrupa'da elektrik üretim yöntemleri.

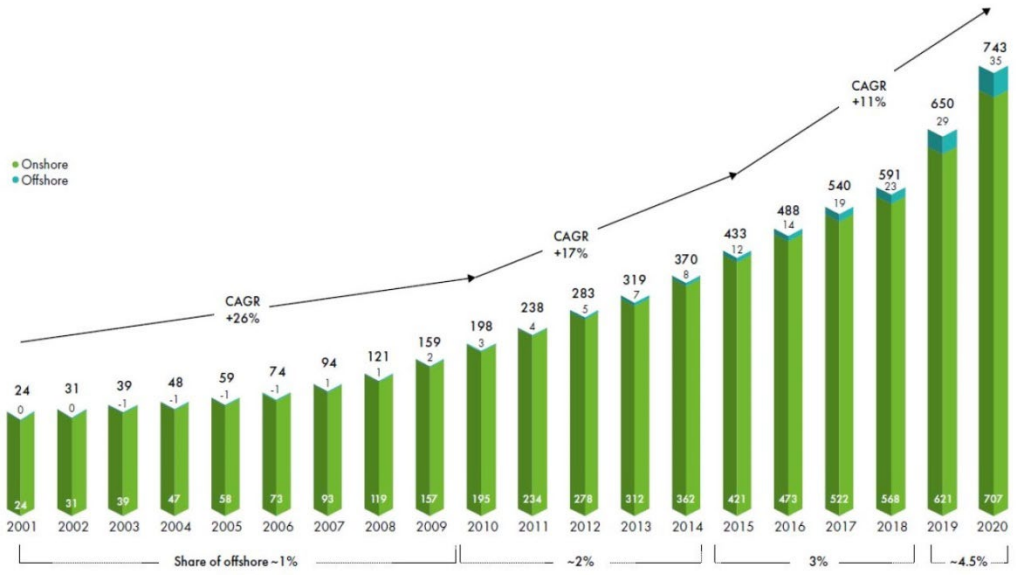
Şekil 2.8 incelendiğinde genel olarak Avrupa'da kömür ve nükleer enerjiden elde edilen enerjinin yapılan projeksiyonlarda kaynak olarak çeşitlendiği ve de bazı yeni kaynakların devreye alınırken bazı kaynaklarında terkedildiği görülmektedir. İlerleyen yıllarda Alternatif enerji kaynaklarına yönelimin gittikçe artacağı tahmin edilmekte günümüzdeki çalışma ve gayretlerde bu tahmini doğrulamaktadır. Şekil 2.8'de Wind Europe'un 2050 yılına kadar olabilecek gelişmeler de gösterilmiştir. Avrupa'da yıllık elektrik üretiminin 2000'li yıllarda yaklaşık %87'si kömür, doğal gaz ve nükleer santrallerden elde edilirken, 2050'li yılara doğru üretimdeki paylarının yaklaşık %20'lere düşeceği öngörülmektedir. Bu alternatif enerji kaynaklarının çok daha fazla öne çıkacağı anlamına gelmektedir.

Rüzgârın enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi 4 kategoride yapılmaktadır.

- Meteorolojik Potansiyel, var olan rüzgâr kaynağına eşdeğer bir potansiyeldir.
- Saha Potansiyeli, meteorolojik potansiyelin ortaya koyduğu bir değerlendirmedir ve güç üretimi için coğrafi olarak mevcut olabilecek sahalarla sınırlandırılmaktadır.
- Teknik Potansiyel, kullanılan materyal gelişmeleri ve mevcut teknolojiyi de dikkate alarak saha potansiyelinden hesaplanan değerlerdir.

Uygulanabilir Potansiyel, yıllık plan ve ileriye dönük projelerde, belli bir zaman içinde devreye alınabilecek rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için teşvik ve

kısıtlamalar da dikkate alınarak elde edilmektedir [11]. Şekil 2.9'da rüzgar kurulum kapasitesinin yıllara göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.9. Toplam rüzgâr kurulum kapasitesi 2001-2020 [16].

2020 yılı yıllık %53 büyüme ile rüzgar enerjisi sektörü için tarihteki en iyi yıl olmuş ve 93 GW'tan fazla rüzgâr enerjisi kurulumuyla bu endüstrisinin muhteşem dayanıklılığı kanıtlanmıştır. Bu kurulum ile küresel kümülatif rüzgâr enerjisi kapasitesi 743 GW'a çıkarılmıştır.

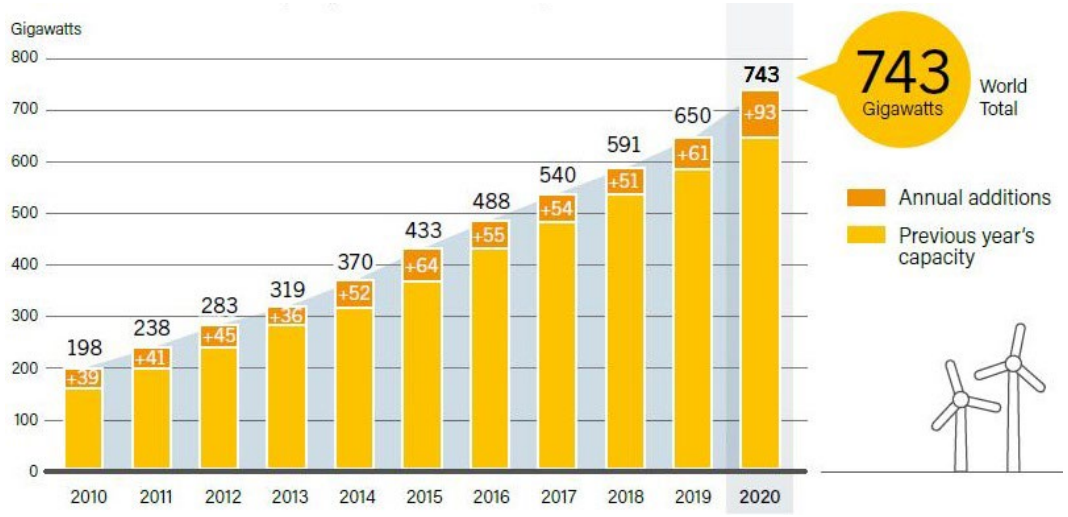
Kara rüzgâr santrallerinde (Onshore) kurulan yeni kapasite 2019'a göre %59 artış (86,9 GW) göstermiştir. Çin ve ABD bu pazarın önemli bir payına sahiptirler.

Şekil 2.10'da öngörülen küresel rüzgar kurumları verilmiştir.



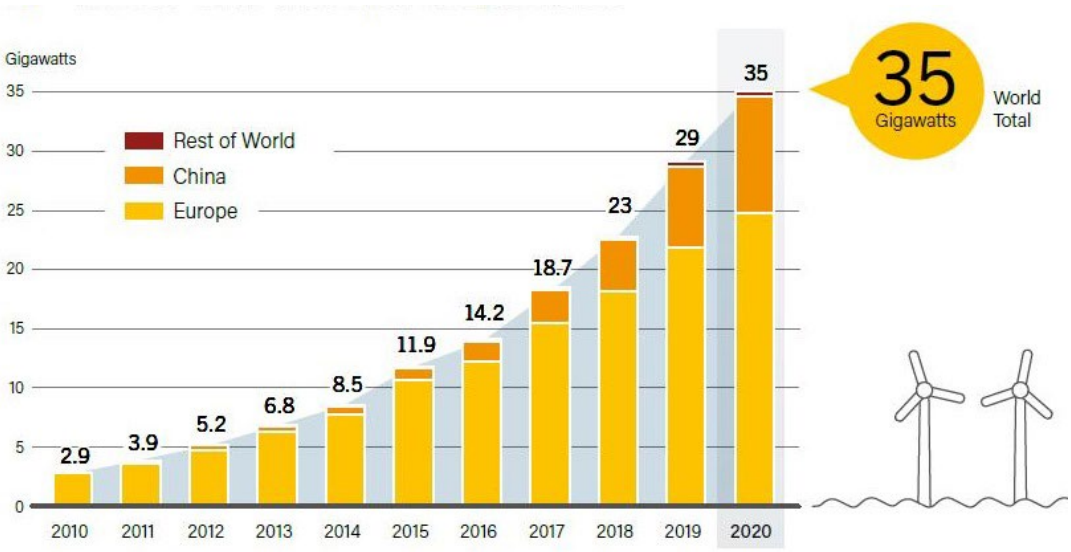
Şekil 2.10. 2030'a Kadar Öngörülen Yeni Küresel Rüzgâr Kurulumları [16].

Küresel çapta bakıldığında rüzgârdan sağlanan enerji, son 10 yılda dört katına çıkmış ve rüzgar enerjisi dünya genelinde en rekabetçi ve dayanıklı enerji kaynakları arasına girmiştir. Bölgesel düzeyde, Asya Pasifik, Kuzey Amerika ve Latin Amerika, 2020 yılında toplamda 74 GW yeni kara rüzgâr kapasitesi veya bir önceki yıla göre %76 daha fazla artış sağlamıştır. Avrupa, Afrika ve Orta Doğu'da ise yaşanan aksilikler neticesinde yeni kara rüzgâr kurulumlarında bir önceki yıla nazaran kayda değer bir büyüme görülmemiş, Avrupa'da büyüme %0,6 mertebesinde kalmıştır. Afrika ve Orta Doğu'da ise bir önceki yıla göre aynı seviyede kurulum gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.11'de kara rüzgar değişimi verilmiştir.



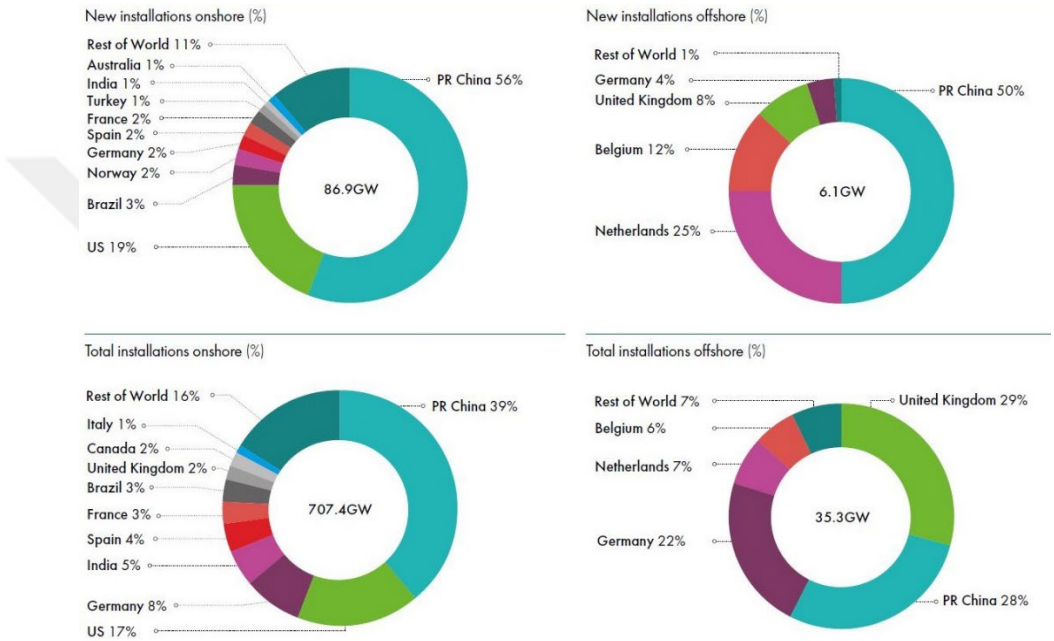
Şekil 2.11. Dünya kara rüzgâr kapasitesi değişimi [17].

Şekil 2.12'de DRES güçlerinin yıllara göre değişimi verilmiştir.



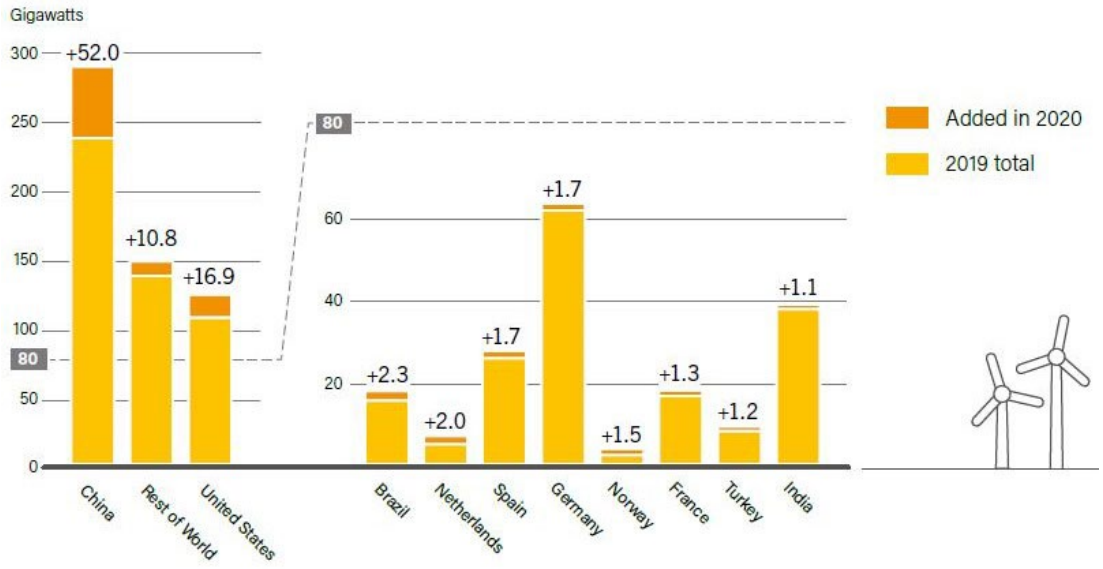
Şekil 2.12. 2010 -2020 arası bölgelere göre DRES güçleri [17].

Açık deniz pazarında, 2020 de dünya çapında 6,1 GW'lık kapasite devreye alınarak 2020'yi şimdiye kadarki en iyi ikinci yıl yapmıştır. Çin, rekor kırarak tüm yeni küresel açık deniz rüzgâr kapasitesinin yarısını kurmuştur. Avrupa'da genel olarak istikrarlı büyüme kaydedilirken Hollanda başta olmak üzere Belçika, İngiltere, Almanya ve Portekiz izlemiştir. 2020'de kalan yeni açık deniz rüzgâr kurulumları ABD ve Güney Kore tarafından paylaşılmıştır. Toplam açık deniz rüzgâr kapasitesi şu anda 35 GW'ı geçerek, toplam küresel kümülatif rüzgâr kapasitesinin %4,8'ini temsil etmektedir [17]. Şekil 2.13'te yeni ve var olan rüzgar kurumları verilmiştir.



Şekil 2.13. Ülkeler bazında yeni ve var olan rüzgâr kurulumları [16].

Market Intelligence verilerine göre önümüzdeki beş yıl içinde 469 GW'ın üzerinde yeni kara ve deniz rüzgâr kapasitesinin eklenmesi beklenmektedir. Başka bir deyişle de 2025 yılına kadar yılda yaklaşık 94 GW yeni kurulum olacağı tahmin edilmektedir. Şekil 2.14'te üretim kapasitesini artıran ülkeler verilmiştir.



Şekil 2.14. 2020'de üretim kapasitesi en fazla artırmış on ülke [17].

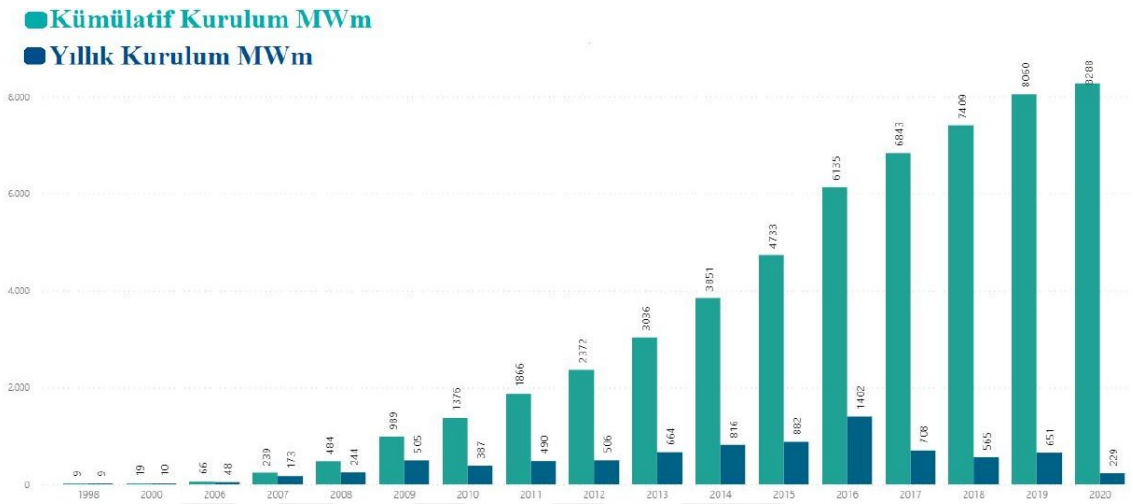
2.3.2. Türkiye'nin Rüzgâr Enerji Potansiyeli

Ticari dengelerini bozan ve sürekli ödemeler dengesinde açık vermesine sebep olan enerji ithalatı Türkiye'yi diğer dünya ülkelerinde olduğu gibi yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak Rüzgâr enerjisine giderek artan oranda yönlendirmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisinden ticari olarak yararlanılması çabaları oldukça yakın zamanda başlamıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2006 yılında açıkladığı "Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)'nda Türkiye'nin karasal rüzgâr enerji potansiyeli 48.000 MW, deniz üstü rüzgâr enerji potansiyeliyse 11.000 MW olarak açıklanmıştır. Dünya Bankası ise 2019 yılında yayınladığı raporunda ülkemizin deniz üstü rüzgâr enerji potansiyeli 50 metreden az derinliğe sahip yerlerde 12.000 MW, 50-1000 metre arasında olan yerlerde 57.000 MW olmak üzere toplamda yaklaşık 70.000 MW olarak belirtmiştir. Bu raporda kullanılan haritalarda ülkemizin deniz yetki ve münhasır ekonomik alanlarının tartışmalı şekilde kullanılmasının özellikle yerel basında ciddi yankılar meydana getirdiği tüm kamuoyunda malum olmakla birlikte, söz konusu haritaların gerçeği yansıtacak şekilde hazırlanması sonucunda ülkemiz DRES potansiyelinin teorik olarak 59 GW ile 118 GW arasında olduğu söylenebilir.

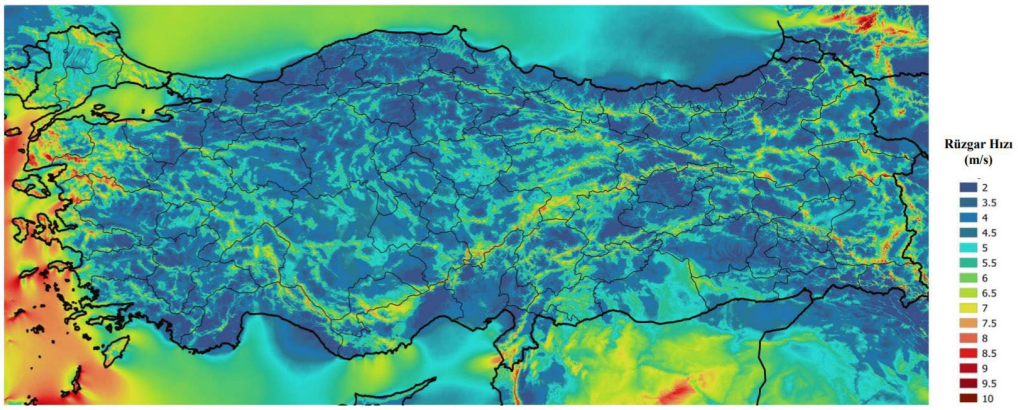
2017 yılından beri Türkiye ilk defa rüzgâr kapasitelerini artırmış ilk on ülke arasına dokuzuncu sıradan girmiştir. 2019 yılına göre santral kapasitesini 1,2 GW ile neredeyse iki katına çıkararak toplamda 9,3 GW değerine ulaşmıştır.2021 yılının başlarında yaklaşık olarak 5 GW'lık yeni kapasite yatırımlarının inşasına başlanmıştır. Türkiye

dışa bağımlı enerji yükünü azaltmak, yeni işler yaratmak ve ulusal karbon ayak izini azaltmak için yenilebilir enerji konusunda yatırımlarını hızlandırmıştır. 2020 yılında Türkiye'nin elektrik üretim ihtiyacının %8,4'ü rüzgâr santrallerinden karşılanmıştır (Şekil 2.14). Şekil 2.15'te kurulu güce göre rüzgar enerji santrallerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 2.15. Türkiye rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güce göre değişimi.

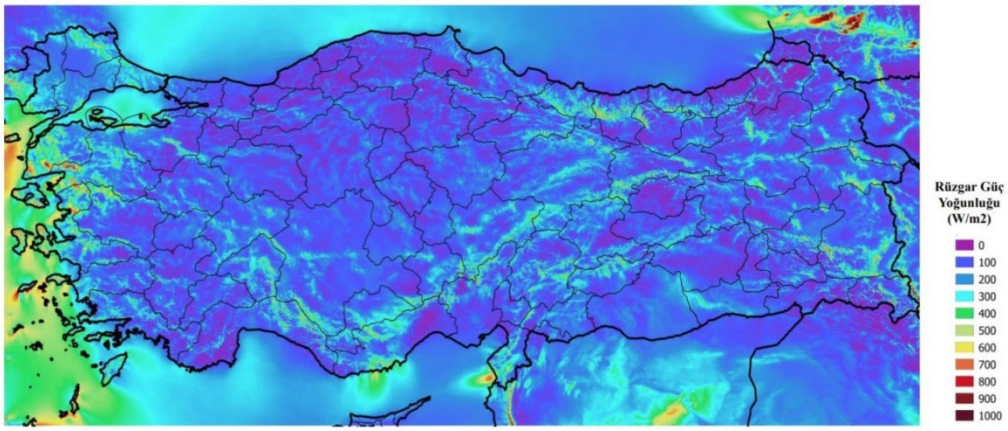
Türkiye'de yıllık 53000 MW Rüzgâr enerjisi potansiyelinden yaklaşık %9,5 lik bölümü rüzgâr hızı 8,5 m/s ve üzerinde olan yörelerde olurken, kalanı 7 m/s'nin üzerindeki bölgelerde bulunduğu ifade edilmektedir. Şekil 2.16'da Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.16. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı [15].

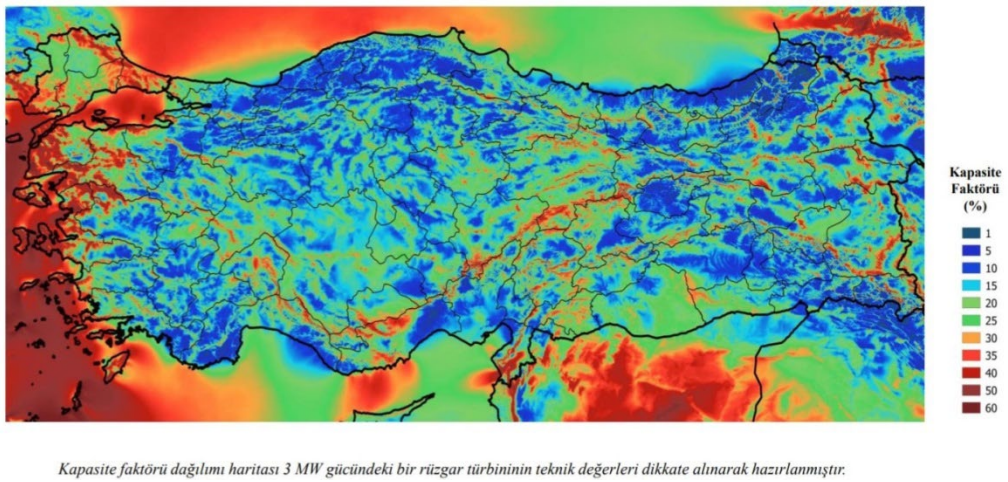
Türkiye genelinde Rüzgâr hızının 6 m/s üzerindeki hızların Marmara bölgesi, Ege bölgesi, Akdeniz bölgesinde denizde ve yüksek vadilerde oluştuğu Şekil 2.16 ve dolayısı ile Rüzgâr enerjisine bağlı güç dağılımı yoğunluğu Şekil 2.17'de

görülmektedir.



Şekil 2.17. Türkiye'nin yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılımı [15].

Şekil 2.18'de Türkiye'deki kapasite faktörünün dağılımı verilmiştir.



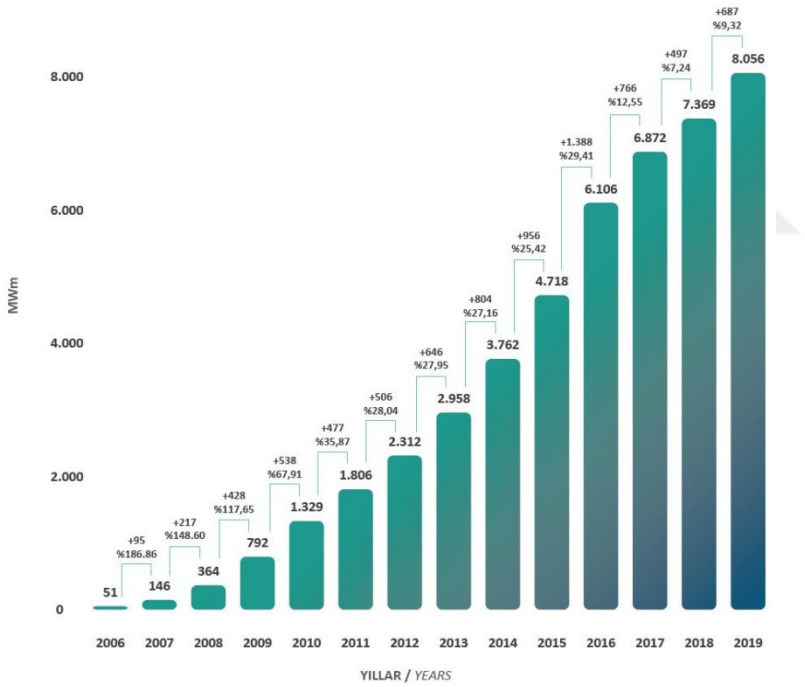
Şekil 2.18. Türkiye'nin kapasite faktörü dağılımı, 100 metre [15].

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin 2019 yılı verilerine göre , Türkiye'de faal halde olan 180 adet Rüzgar enerjisi tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin her birinde ortalama 46 MW enerji üretilmektedeir. Toplamda 8.288,00 MW enerji üreten bu tesislerin dağılımı Şekil 2.19'da görülmektedir. Bu tesislerin büyük bir bölümü Marmara kıyılarıyla, Ege, ve Hatay bölgelerinde bulunmaktadır. İleriye dönük olarak faaliyete geçmesi planlanan Rürgar türbinleri trakyada tekirdağ çorlu bölgelerinde, Marmara bölgesinin kuzey deniz kıyılarında ve Sakarya bölgesinde olduğu görülmektedir. Şekil 2.19'da Türkiye'de bulunan rüzgar santralleri verilmiştir.



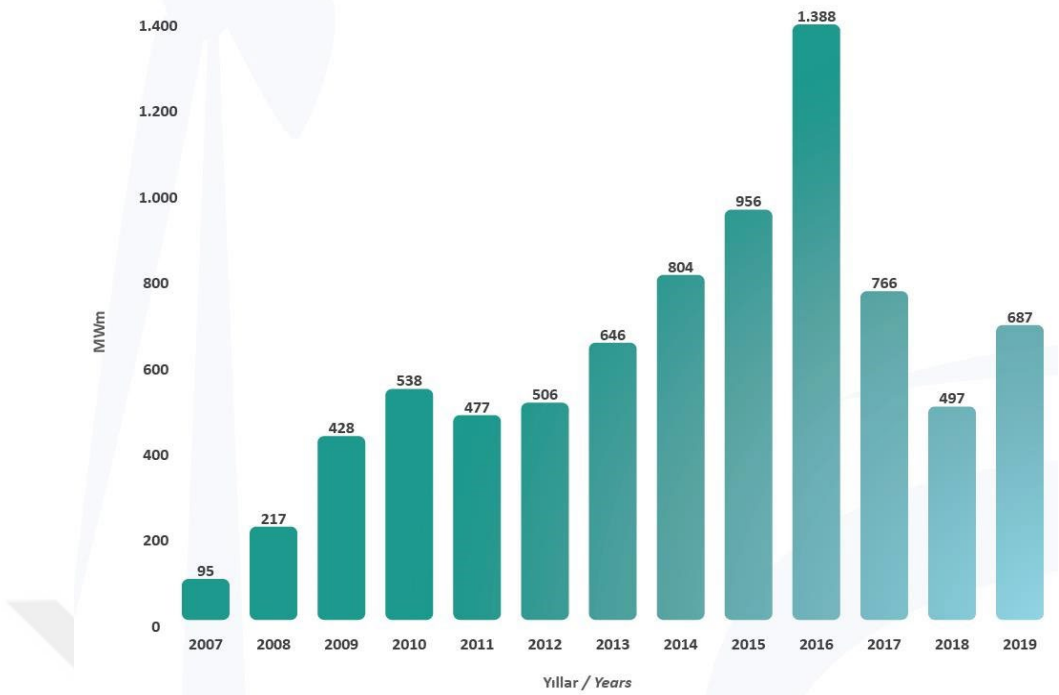
Şekil 2.19. Türkiye rüzgâr santralleri atlası 2019 [34].

Şekil 2.20'de Türkiye'de bulunan rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulumu gösterilmiştir.



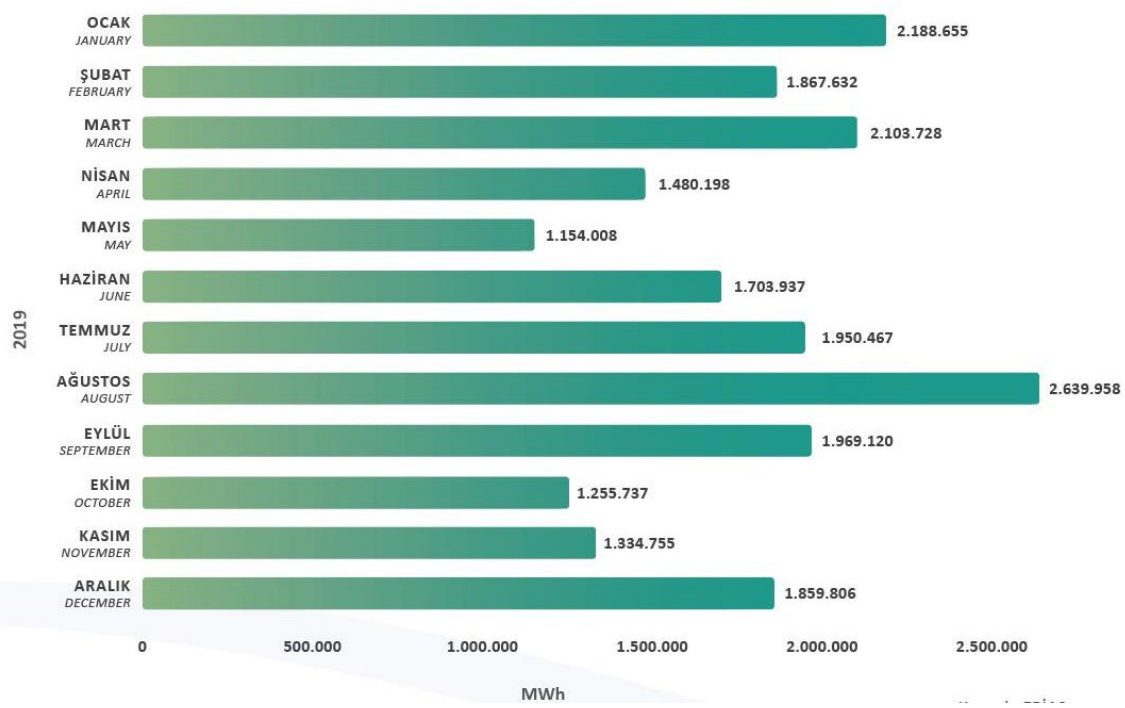
Şekil 2.20. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için toplam kurulum [35].

Şekil 2.21'de RES için Türkiye'deki yıllık kurulumu verilmiştir.



Şekil 2.21. Türkiye'deki RES için yılık kurulum [35].

Şekil 2.22'de RES'lerin aylık elektrik üretimi verilmiştir.



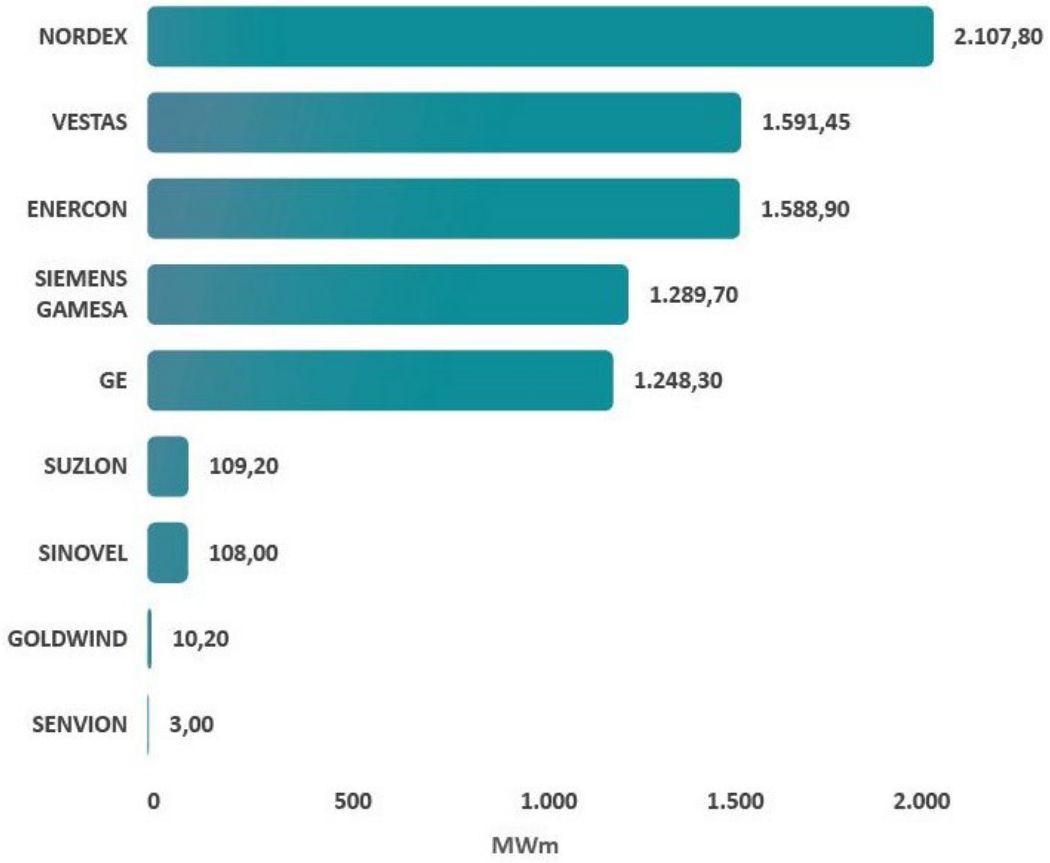
Şekil 2.22. Türkiye'deki RES'lerin aylık elektrik üretimi [35].

Şekil 2.23'te RES'lerin elektrik üretimindeki payı verilmiştir.



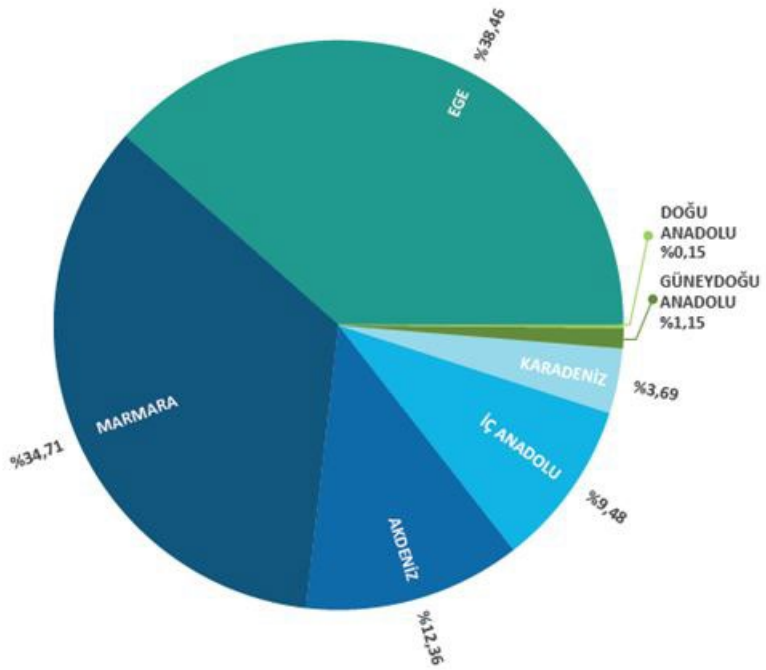
Şekil 2.23. Türkiye'deki RES'lerin elektrik üretimindeki payı [35].

TÜREB Ocak 2019'da yayınlamış olduğu Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporunda; "2018 yılına ait yıllık ortalama payı %6,78 olan rüzgâr enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki aylara göre payı; Ocak %6,97, Şubat %7,30, Mart %8,45, Nisan %5,09, Mayıs %5,23, Haziran %5,43, Temmuz %5,04, Ağustos %8,78, Eylül %7,02, Ekim %6,59, Kasım %8,74, Aralık %6,63 olarak belirtilmektedir (TÜREB, 2019: 7). Bu oranlara bakıldığında bazı aylarda düşüşler yaşansa da en fazla elektrik üretilen ay ağustos ayı, en az ise Nisan ayında olmuştur. 2019 yılına bakıldığında ise Şekil 2.30 da görüldüğü üzere en fazla elektrik Ağustos %10,01 ile en az %4,9 ile mayıs ayında olmuştur. Toplamda ise 2016 yılında rüzgâr santrallerinden elektrik üretimi "%5,6" 2018 yılında %6,78' e 2019 yılında ise %7.42'e yükselmiştir. Bu durum ülkede rüzgâr santrallerinden elektrik üretiminin yıllara göre geliştiğini göstermektedir [34]. Şekil 2.24 ile Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da 2019 yılına ait dağılımlar verilmiştir. Şekil 2.24'te işletmelerdeki RES'lerin türbin markalarına göre dağılımı gösterilmiştir.

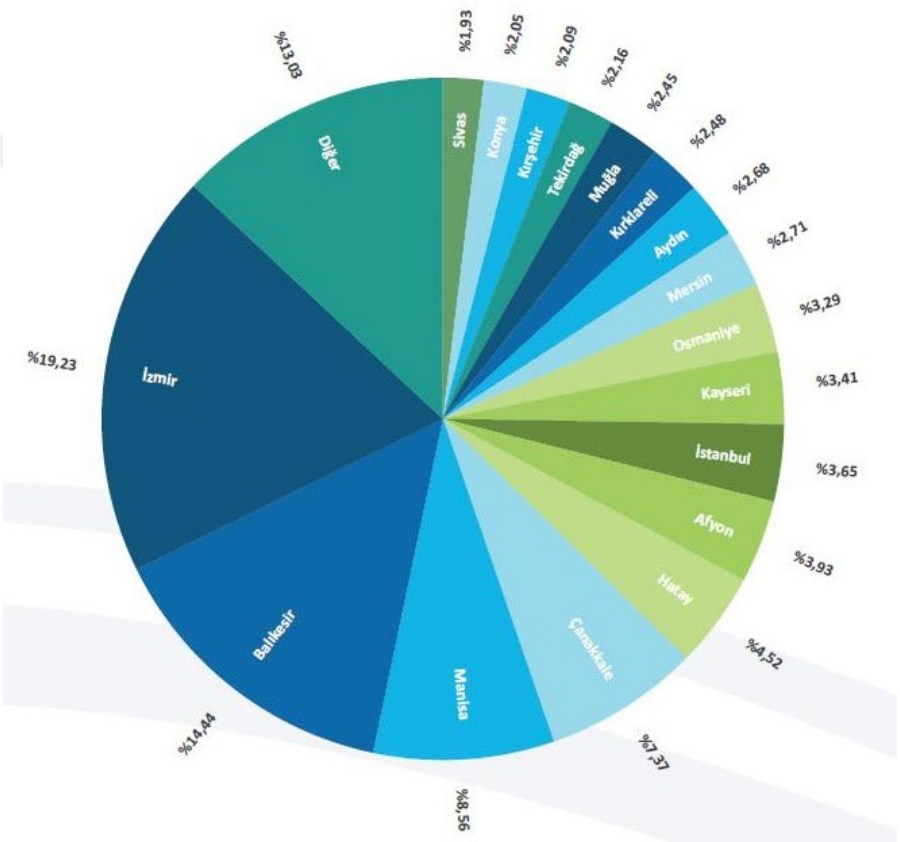


Şekil 2.24. İşletmedeki RES'lerin türbin markalarına göre dağılımı [35].

Şekil 2.25'te bölgelere göre RES dağılımı gösterilmiştir. Şekil 2.26'da illere göre RES dağılımı verilmiştir.

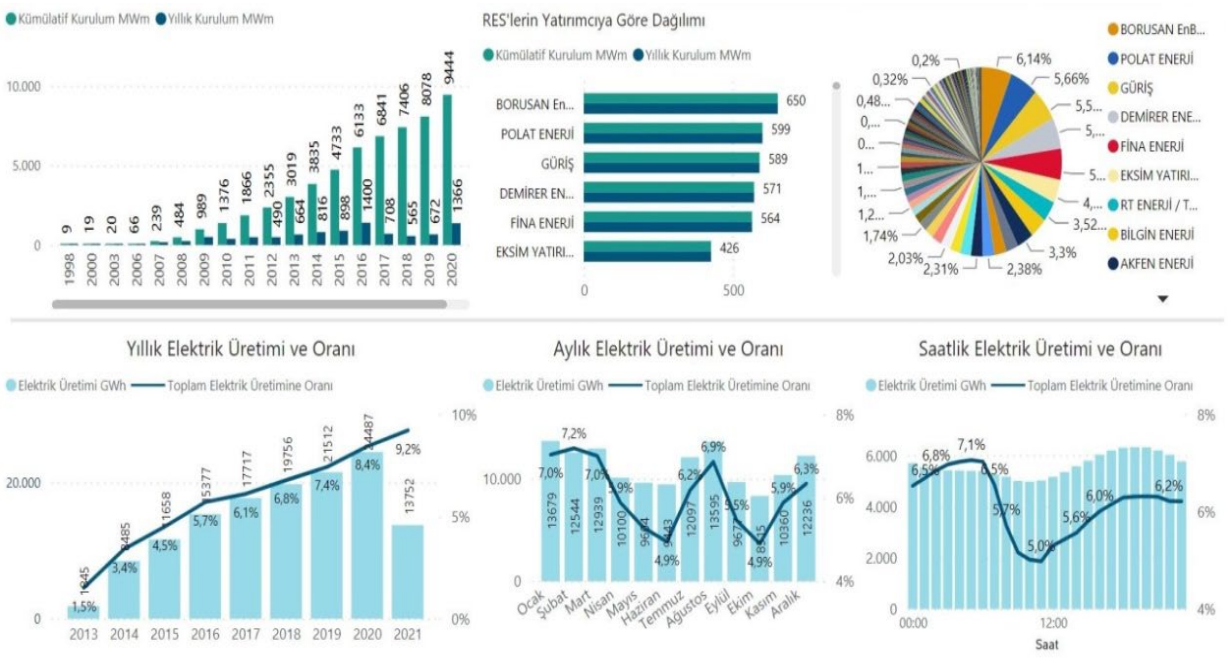


Şekil 2.25. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı [35].



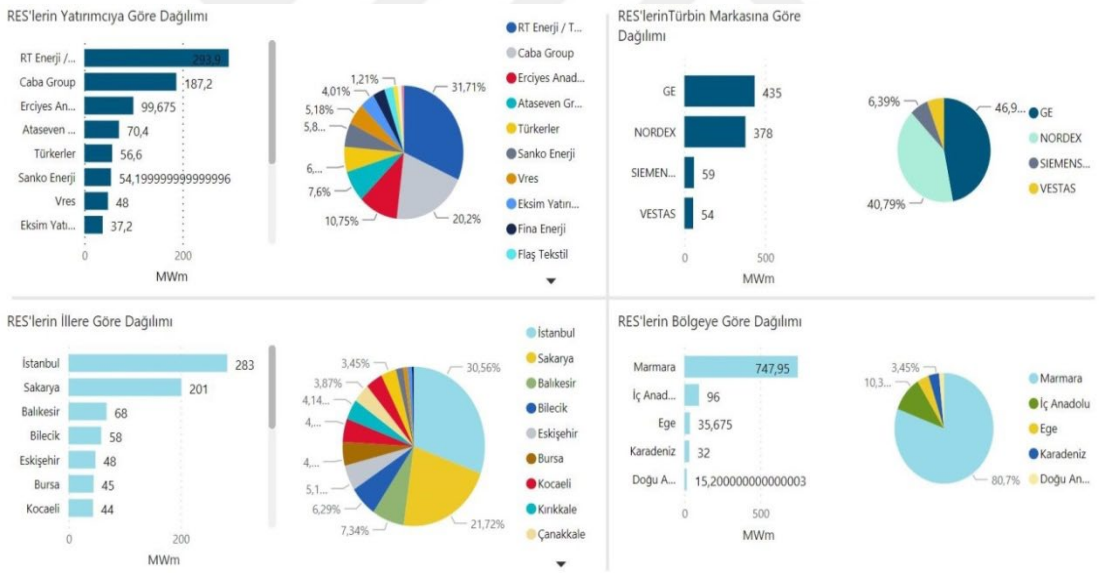
Şekil 2.26. İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı [35].

Şekil 2.27'de 2021 yılına ait RES verileri gösterilmiştir.



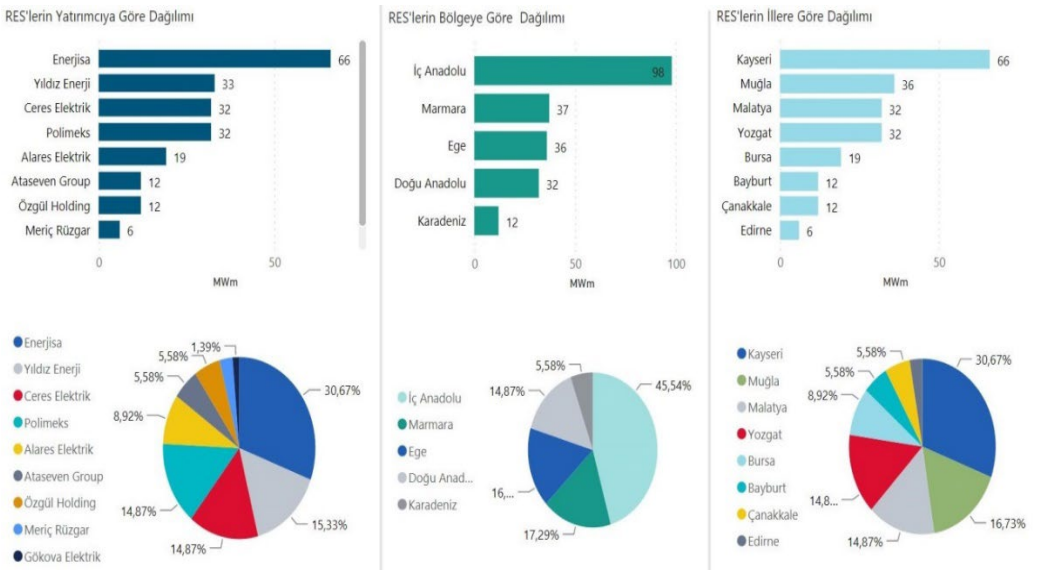
Şekil 2.27. 2021 İşletmede RES verileri.

Şekil 2.28'de 2021 yılına ait inşa halindeki RES verileri gösterilmiştir.

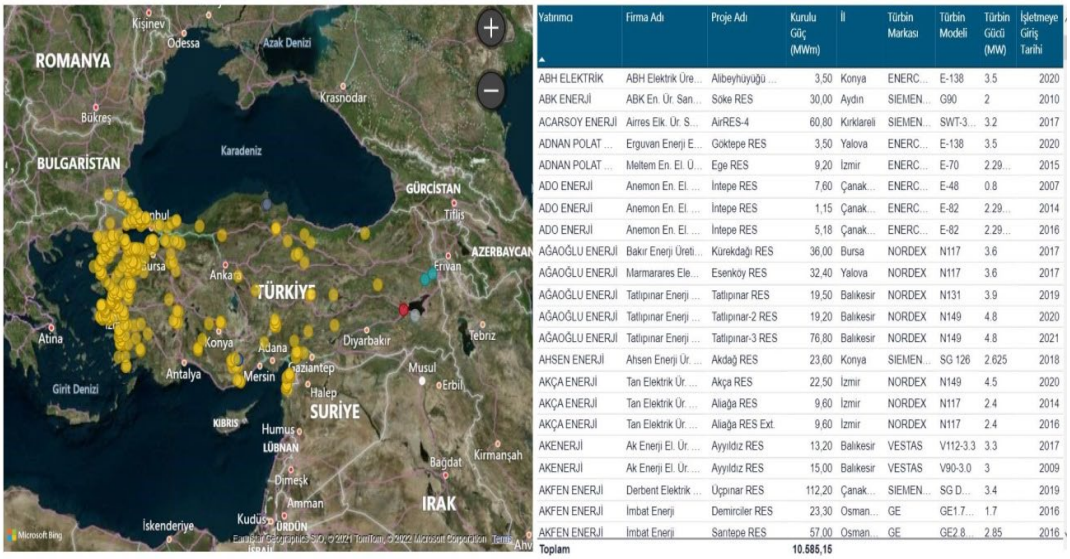


Şekil 2.28. 2021 İnşa halindeki RES verileri.

Şekil 2.29'da lisans halinde olan RES verileri gösterilmiştir. Şekil 2.30'da ise santrallerin listesi ve konumları verilmiştir.



Şekil 2.29. 2021 Lisans halindeki RES verileri.



Yatırımcı	Firma Adı	Proje Adı	Kurulu Güç (MWm)	İl	Türbin Markası	Türbin Modeli	Türbin Gücü (MW)	İşletmeye Giriş Tarihi
ABH ELEKTRİK	ABH Elektrik Üre...	Alibeyhüyüğü ...	3,50	Konya	ENERC...	E-138	3.5	2020
ABK ENERJİ	ABK En. Ür. San...	Söke RES	30,00	Aydın	SIEMEN...	G90	2	2010
ACARSOY ENERJİ	Airres Elk. Ür. S...	AirRES-4	60,80	Kırklareli	SIEMEN...	SWT-3...	3.2	2017
ADNAN POLAT ...	Erguvan Enerji E...	Göktepe RES	3,50	Yalova	ENERC...	E-138	3.5	2020
ADNAN POLAT ...	Meltem En. El. Ü...	Ege RES	9,20	İzmir	ENERC...	E-70	2.29...	2015
ADO ENERJİ	Anemon En. El. ...	İntepe RES	7,60	Çanak...	ENERC...	E-48	0.8	2007
ADO ENERJİ	Anemon En. El. ...	İntepe RES	1,15	Çanak...	ENERC...	E-82	2.29...	2014
ADO ENERJİ	Anemon En. El. ...	İntepe RES	5,18	Çanak...	ENERC...	E-82	2.29...	2016
AĞAOĞLU ENERJİ	Bakır Enerji Üreti...	Kürekdağı RES	36,00	Bursa	NORDEX	N117	3.6	2017
AĞAOĞLU ENERJİ	Marmarares Ele...	Esenköy RES	32,40	Yalova	NORDEX	N117	3.6	2017
AĞAOĞLU ENERJİ	Tatlıpınar Enerji ...	Tatlıpınar RES	19,50	Balıkesir	NORDEX	N131	3.9	2019
AĞAOĞLU ENERJİ	Tatlıpınar Enerji ...	Tatlıpınar-2 RES	19,20	Balıkesir	NORDEX	N149	4.8	2020
AĞAOĞLU ENERJİ	Tatlıpınar Enerji ...	Tatlıpınar-3 RES	76,80	Balıkesir	NORDEX	N149	4.8	2021
AHSEN ENERJİ	Ahsen Enerji Ür. ...	Akdağ RES	23,60	Konya	SIEMEN...	SG 126	2.625	2018
AKÇA ENERJİ	Tan Elektrik Ür. ...	Akça RES	22,50	İzmir	NORDEX	N149	4.5	2020
AKÇA ENERJİ	Tan Elektrik Ür. ...	Aliağa RES	9,60	İzmir	NORDEX	N117	2.4	2014
AKÇA ENERJİ	Tan Elektrik Ür. ...	Aliağa RES Ext.	9,60	İzmir	NORDEX	N117	2.4	2016
AKENERJİ	Ak Enerji El. Ür. ...	Ayyıldız RES	13,20	Balıkesir	VESTAS	V112-3.3	3.3	2017
AKENERJİ	Ak Enerji El. Ür. ...	Ayyıldız RES	15,00	Balıkesir	VESTAS	V90-3.0	3	2009
AKFEN ENERJİ	Derbent Elektrik ...	Üçpınar RES	112,20	Çanak...	SIEMEN...	SG D...	3.4	2019
AKFEN ENERJİ	İmbat Enerji	Demirciler RES	23,30	Osman...	GE	GE1.7...	1.7	2016
AKFEN ENERJİ	İmbat Enerji	Saritepe RES	57,00	Osman...	GE	GE2.8...	2.85	2016
Toplam			10.585,15					

Şekil 2.30. 2021 En son güncel işletmedeki santrallerin listesi ve konumları [36].

İnternet sitesinden Türkiye'nin en son güncel RES verilerine ulaşılmaktadır Şekil 2.27 den Şekil 2.29 kadar olan şekillerde en güncel 2021 verilerine ulaşılmaktadır.

3. RÜZGAR TÜRBİN ÇEŞİTLERİ

Rüzgârdan hareket alarak dönen kanatları sayesinde Rüzgâr türbini, mekanik enerjiyi daha sonra da jeneratör üzerinden elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir.

Rüzgâr türbini 4 ana bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümler toprağa yerleştirilen kule, üzerindeki bir odaya yerleştirilmiş jeneratör ve hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik elektronik elamanlar ve bu odaya dışarın şaftla bağlanan pervaneden oluşmaktadır. Hava kütlesi içerdiği güçle pervane üzerinden mekanik hareket enerjisine yol açar. Rotor milinin dönme hareketi vites kutusunda hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre güç akışını sağlar. Jeneratörde üretilen enerji akülerde depolanır veya direkt olarak kullanıcılara iletilir.

3.1. GÜÇLERİNE GÖRE SINIFLANDIRMA

- Mikro Türbinler = 3 kW'tan az üretim gücü olan türbinler,
- Küçük RT'ler = 30kW"dan az üretim gücü olan türbinler,
- Büyük RT'ler = 200kW ile 1.5MW arası üretim yapan türbinler,
- Çok Büyük RT'ler = 5-10MW arasında üretim yapan türbinler,

şeklinde sınıflandırılırlar [18].

3.2. RÜZGÂR İLE KANAT ETKİLEŞİMİNE GÖRE SINIFLANDIRMA

- Sürükleme kuvvetinin etkili olduğu ve kaldırma kaldırma kuvvetinin etkili olduğu türbinler, şeklinde sınıflandırılırlar [18].

3.3. KONTROL SİSTEMLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

- Açı kontrollu türbinler
- Fren kontrollü türbinler
- Aktif fren kontrollü türbinler, şeklinde sınıflandırılırlar [18].

3.4. DÖNME EKSENİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Eksenin durumuna göre,

- Yatay,
- Dikey,
- Yatay veya dikey eksenli olmayan rüzgâr türbinleri, şeklinde kategorize edilirler [18].

3.4.1. Yatay Eksenli Türbinler

Rüzgâr yönüne paralel eksene sahiptirler. Kanatlar rüzgâr la 90 derece açı yaparken rotorun yüzü rüzgâra bakar. Artan kanat sayısı arttıkça rotorunda daha hızlı dönmesine sebep olur. Verimleri yaklaşık %45 olan bu tip türbinler çoğunlukla gücüne bağlı olarak yerden 20-100 metre yüksekliğe kurulurlar. Kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı Rotorların ayırt edilmesinde bir ayraç olarak kullanılır.

Rotorlar; $\lambda = 1$ ile 5 arası olduğunda çok kanatlı rotor,
$\lambda = 6$ ile 8 arası olduğunda üç kanatlı rotor ,
$\lambda = 9$ ile 15 arası olduğunda iki kanatlı rotor ,
$\lambda = 15$ olduğunda tek kanatlı rotor olarak adlandırılmaktadır

Rüzgâr hızının rotor kanadı uç hızına bölünmesiyle λ belirlenir [19].

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı önden veya arkadan alış yönüne ve kanat sayısının bir-iki-üç veya çok kanatlı olmasına bağlı olarak farklılık arz eder [19].

3.4.1.1. *Rüzgârı Önden Alan Rüzgâr Türbinleri*

Rotoru rüzgâra dönük olan türbinlerdir. Rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanmışlardır. Kulenin kanatların arkasında kalması nedeniyle kuleden güç bakımından etkilenmeleri yok denecek kadar azdır. Kuleyi arkada bırakabilmek ve rotor yüzünün sürekli rüzgâr a bakabilmesi için dümen sistemine ihtiyaç duymaları dezavantajlarıdır. Kanatlar kule önünden geçerken uğradıkları güç düşmesi kanatların çok sağlan ve stabil malzemelerden yapılmasını gerektirmektedir. Bu tür türbinlerin düzgün ve verimli çalışabilmeleri için YAW sistemine ihtiyaçları ardır [18, 19]. Şekil 3.1'de önden güç beslemeli rüzgar türbini verilmiştir.



Şekil 3.1. Önden güç beslemeli rüzgâr türbini [20].

3.4.1.2. *Rüzgârı Arkadan Alan Rüzgâr Türbinleri*

Kule arkasına yerleştirilen Rotorun yüzü rüzgâra bakmaz. Bu tür türbinlerde YAW sistemine ihtiyaç duyulmaz. Rüzgârı önden alan türbinlere nazaran esnek kanatları nedeniyle daha hafiftirler ve kuleye binen yük daha azdır. Kanatların rüzgârın arkasında olması, kanadın kuleden geçişi sırasında meydana gelen güç dalgalanmaları bu tip türbinlerin tercih edilmemelerinin en önemli sebebidir. Bu dalgalanma rüzgârı önden alan türbinlere nazaran türbine daha fazla zarar vermektedir. [18,19]. Şekil 3.2'de arkadan rüzgar alan türbin verilmiştir.

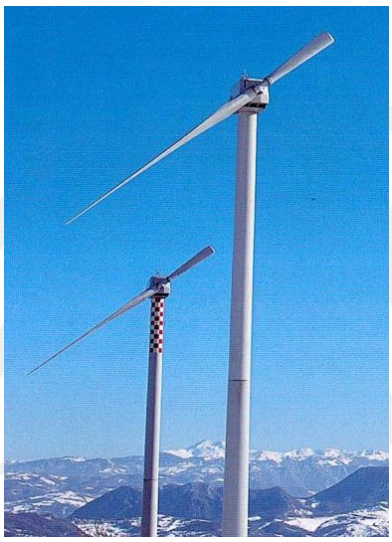


Şekil 3.2. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbini [20].

3.4.1.3. *Tek Kanatlı Rüzgâr Türbinleri*

Bu türbinlerde yüksek hız düşük moment üretimine sebep olmaktadır. Tasarımın simetrik kütle dağılımına müsaade etmemesi nedeniyle türbin parçalarının birbiriyle uyumlu hareket edebilmesi için göbek tasarımı çok önemlidir. Gürültü açısından

değerlendirildiğinde üç kanatlı türbinlere nazaran kanat ucu hızı nedeniyle çok daha gürültülü oldukları görülmektedir. Üç kanatlı türbinlerin üç kanadına karşılık bir kanadın kullanılıyor olması başlarda ekonomik açıdan çok büyük bir avantaj olarak kabul edildiyse de yüksek kanatucu hızları dengesiz kütle dağılımını büyük problem haline getirmesi, yüksek gürültü seviyesi ve kanadı dengelemek için karşı ağırlığa ihtiyaç duyulması tek kanatlı türbinlerin gelişmesinde en büyük engeller olarak ortaya çıkmıştır [19]. Gürültü nedeniyle MBB firması tarafından tasarlanan, 630kW güce sahip olan ve rotor çapı 56 m rüzgâr türbini yakınındaki kurulumlarıyla yetinilmiş yenileri kurulmamıştır. Şekil 3.3'te tek kanatlı türbin verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek kanatlı rüzgâr türbini.

3.4.1.4. *Çift Kanatlı Rüzgâr Türbinleri*

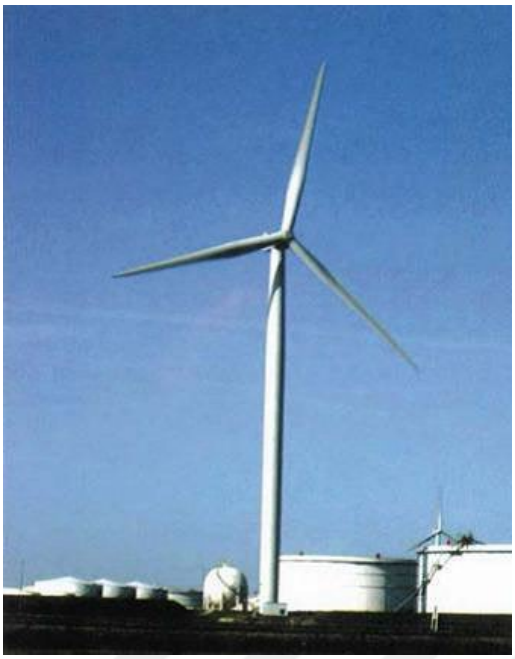
Üçten az kanat sayısı nedeniyle tek kanatlı türbinler gibi ekonomik olacağı düşünülmüştür. Kütle dağılımı tek kanatlılara göre daha iyi olmasına rağmen artan titreşimleri önlemek için artan güç ihtiyacı maliyeti artırmıştır. Dinamik hareketleri kontrol edebilmek için kadran sistemi ilave edilmiştir. Yüksek kanat ucu hızı üç kanatlı türbinler karşısında avantaj olarak görülse de güç üretiminde düşük rüzgâr hızlarında (3 m/s) çalışmaları ve çok gürültü yapmaları istenmeyen özellikleridir. Tek ve çift kanatlı türbinlerin tasarımı da üç kanatlılara göre çok daha zor ve karmaşık olmaları nedeniyle kullanımda kendilerine yer bulamamışlardır [19]. Rotor çapı 10 ila 100 m ölçülerde rüzgâr türbinleri üretilip, Avrupa ve ABD'de deneme amaçlı kullanılmıştır. Bunlardan pek azı prototip aşamasını geçip ticari olarak seri üretilebilmiştir. Şekil 3.4'te çift kanatlı türbin verilmiştir.



Şekil 3.4. Çift kanatlı rüzgâr türbini.

3.4.1.5. *Üç Kanatlı Rüzgâr Türbini*

Rüzgârı önden alan üç kanatlı türbinler Danimarka konsepti olarak isim yapmışlardır. Dünyada en çok kullanılan, rüştünü ispat etmiş üç kanatlı türbinlerin dönme momenti düzgün olup göbek titreşim problemi yoktur. 70 m/s'nin altında olan kanat uç hızlarıyla kabul edilebilir bir seviyede sessizdirler. Estetik görünümleriyle öne çıkmaktadırlar. Mini rüzgâr türbinlerinde üç kanat yeterinde moment üretemezler. Düşük momentte enerji üretiminin yolu, hızı 1/n oranında artıran dişliler sayesinde, türbin istenilen hıza gelene kadar boşta çalıştırmak olarak görülmüştür [19]. Şekil 3.5'te üç kanatlı türbin verilmiştir.



Şekil 3.5. Üç kanatlı rüzgâr türbini [21].

3.4.1.6. *Çok Kanatlı Rüzgâr Türbini*

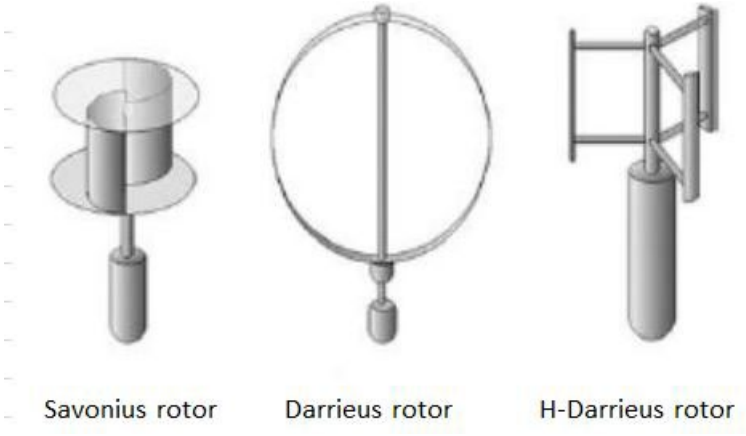
Şekil 3.6'da Çok Kanatlı rüzgâr türbinlerinden biri tasvir edilmektedir. Bunlar rüzgâr türbinlerinin gelişmemiş öncüleridir. Çok kanatlı üretilerek su pompalamada gereken yüksek momenti yakalamak amaçlanmıştır. Düşük rüzgâr hızlarında çalışan türbinin kanatları göbek bölgesinden kanat uçlarına doğru genişleyerek ilerler. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri düşük hızda çalışırlar. Araçlarda da kullanılan jeneratör, kanat devrini yükselten dişli kutusu üzerinden Pervane miline bağlanıp enerji üretir. Bu türbinler rüzgârı her zaman dik açıda almaları için kuyruk tarafında bir yönlendirici ile donatılmışlardır.



Şekil 3.6. Çok kanatlı bir rüzgâr türbini [20].

3.4.2. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT)

Şekil 3.7'de dikey eksenli rüzgar türbin modelleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Dikey eksenli rüzgar türbini modelleri.

Dönme milleri yer yüzüne ve hava akım yönüne dik olan bu türbinlerin kanatları da yer yüzüne ve rüzgâr yönüne diktirler. DERT türbinlerinde rüzgâr ın yönü önemli olmayıp hep aynı yönde dönme üstünlüğüne sahiptir. Rüzgâr bu türbin kanatlarına hem sürükleme hem de kaldırma kuvveti uygular. Rüzgâr hızının belirlediği ilk harekete geçme anı stabil değildir. Bu türbinler enerji dönüşümünü yaklaşık %35 seviyesinde gerçekleştirebilirler. Türbinlerin enerji üretim aksamları yer yüzeyine yerleştirilebildiğinden kule inşasına ihtiyaç yoktur. Toprak seviyesinde alçak rüzgâr hızlarında enerji üretmek zorundadırlar. Rüzgârı her yönden alabildiklerinden "YAW" düzeneği gerektirmezler. Geçmişteki tasarımları alçak rüzgâr hızlarına göre yapılmış olup çoğunlukla su pompalamak için kullanılmışlardır. Elde edilen gücü artırmak için kanat sayısını artırmak istendiğinde malzeme ağırlığının da dönmeye başlangıç seviyesini yükseltmekte, verimi düşürmektedir. Yüksek hızlarda da çok kanat verimi düşürmektedir. Örnek vermek gerekirse 5 metre rotor çapına sahip bir türbinden ancak 0.5 kW güç elde edilebilir. Bu türbinleri çalışabilmesi için halatlarla dik bir şekilde bağlanmaları gerekmektedir [22].

Bu türbinlerin pozitif yönleri şöyle sıralanabilir:

- Türbinin ağır aksamları tabanda olduğu için kurulum kolaylığına sahip tir ve kuleye ihtiyaç duymaz.
- Türbin rüzgâr yönünden bağımsız çalışır, başkaca bir çaba gerektirmez.
- Bakım ve onarımı kolaydır.

- Enerji nakil bağlantıları yer seviyesinde ulaşılabilir durumdadır.

Bu türbinlerin negatif yönleri şöyle sıralanabilir:

- Yere yakınlık düşük rüzgâr hızlarda çalışmayı zorunlu kılmaktadır.
- Düşük rüzgâr hızları nedeniyle verimi düşüktür.
- İlk hareketin motorla verilmesi gerekir.
- Konumlandırılmak istenildiği yerde pek pratik olmayan tellerle bağlamak gerekir.
- Bakım onarım esnasında mil yataklamaları değişimi için tüm türbin yatırılmalıdır [2]

Bu tip türbinlerin 1) Savonious, 2) Darrieus ve 3) H-Darrieus olmak üzere üç farklı tipi mevcuttur [23]. Hibrit türleri de geliştirilmektedir.

3.4.2.1. *Savonious Rüzgâr Türbinleri*

Savonius RT'nin Mucidi, mühendis Sigurd J. Savonius'tür. 1925 yılında Finlandiya'da keşfedilmiştir [47]. Kanatları bir silindirin ortadan ikiye bölünmesiyle elde edilmektedir. Yarım silindirler kesik yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde silindir çapı kadar birbiri üzerinde kaydırılarak çakışan kenarları dönme eksenini meydana getirmektedir. Rüzgârı farklı yüzeylerinden alan kanatlar üzerinde pozitif ve negatif momentler oluşmaktadır. Moment farkı, dönme hareketini pozitif moment yönünde oluşturmaktadır.

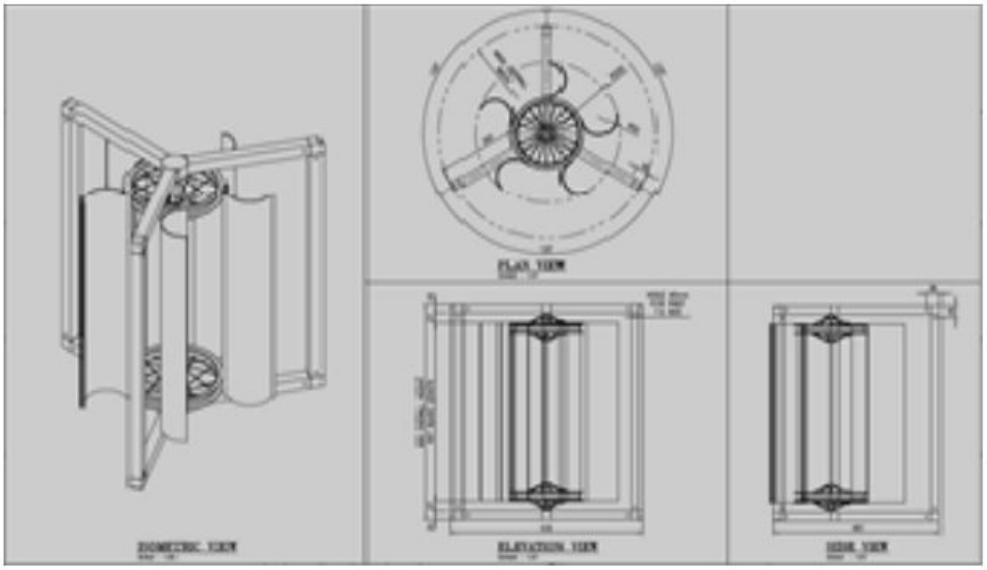
Düşük Rüzgâr hızlarında desteksiz stabil dönme hareketi yapabilmesi diğer Rüzgâr türbinlerden ayrışmasına sebep olmaktadır. Tasarım ve imalatını kolay olması ve ucuz olması kullanım alanlarının çeşitliliğini artırmıştır. Kanatlardaki moment farkının düşük olması hafif işlerde (havalandırma, az da olsa su pompalama) kullanılmasını getirmiştir. Aerodinamik performansın artırılması yönünde son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır.

Aerodinamik performansın artırılmasına, Aldoss ve Najjar [48] deneysel çalışmalarında negatif momentin değerini düşürmek için kanatların; rüzgârın önünde ve arkasında form değiştirmelerine müsaade ederek ulaşmışlardır.

Reupke ve Probert, ise Savonius rüzgâr türbinlerinin çalışma yeteneğini artırmak için menteşelenmiş kanatçıklardan yararlanmak isteyerek negatif momentin dahada düşürülmesini sağlamışlardır. Rüzgâr basıncı kanatcıkların otomatik olarak açılmasını

sağlamış karşı direnci düşürmüştür. Kanatçıkların tekrar kapanma hareketini ilk konuma gelirken yapmişlardır. Bu özellik eski Savonius RT'lerine göre daha yüksek güç elde edilmesini sağlamıştır [24].

2019 Güç ve Gelişmiş Bilgi İşlem Teknolojilerinde Yenilikler (i-PACT) kapsamında yayınlanan makale, otoyolda hızlı hareket eden araçlar tarafından oluşturulan türbülanslı rüzgar esintilerini kullanan ve daha sonra bunları faydalı elektrik enerjisine dönüştüren, otoyol boyunca kademeli olarak uygulanan bir VAWT'yi (Dikey Eksenli Rüzgar Türbini) uygulaması anlatılmaktadır [39]. Şekil 3.8'de hibrit model gösterilmiştir.

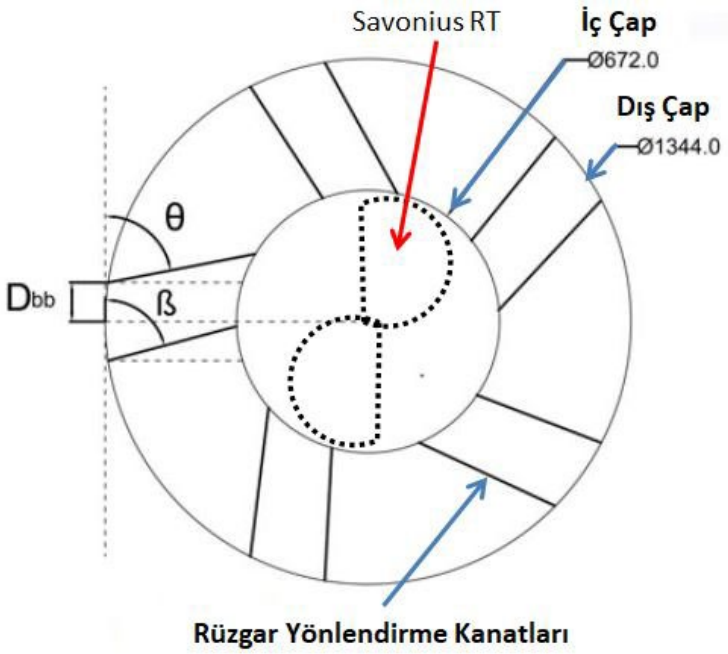


Şekil 3.8. Hibrit model [39].

Şekil 3.8'de tasvir edildiği gibi Düz kanatlı (H – Kanatlı) rotor alınarak mevcut tek şafta S-blade Savonius rotor takılarak hibrit tip dikey eksenli rüzgâr türbininin tasarımı test edilerek performans iyileştirilmesi sağlanmıştır [39].

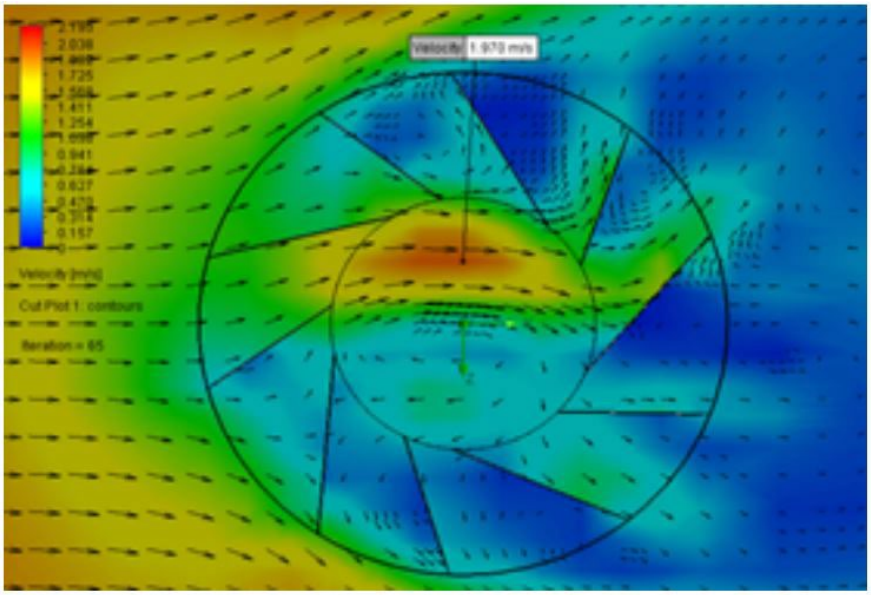
Mexico City'deki evlerin ve binaların çatılarına kurulmaya uygun küçük bir VAWT kullanılmak istenen Savonius modeline rüzgâr ı kanatlara yönlendirecek bir düzenek ekleyerek verimliliğini artırmayı amaçlayan bilim insanları çalışmalarının sonuçlarını 2021 yılında açıklamışlardır.

Savonius, şehirlerde ve düşük rüzgâr bölgelerinde kullanımı için gerekli temel özelliklere sahip olsa da düşük rüzgâr hızlarında düşük tork üretmektedir. Rüzgârı kanatlara yönlendirerek hızını artırmanın yolunu aramışlar Wind Booster tasarımını geliştirmişlerdir. Şekil 3.9'da Wind Booster'ın tasarımı verilmiştir.



Şekil 3.9. Wind Booster tasarımı [38].

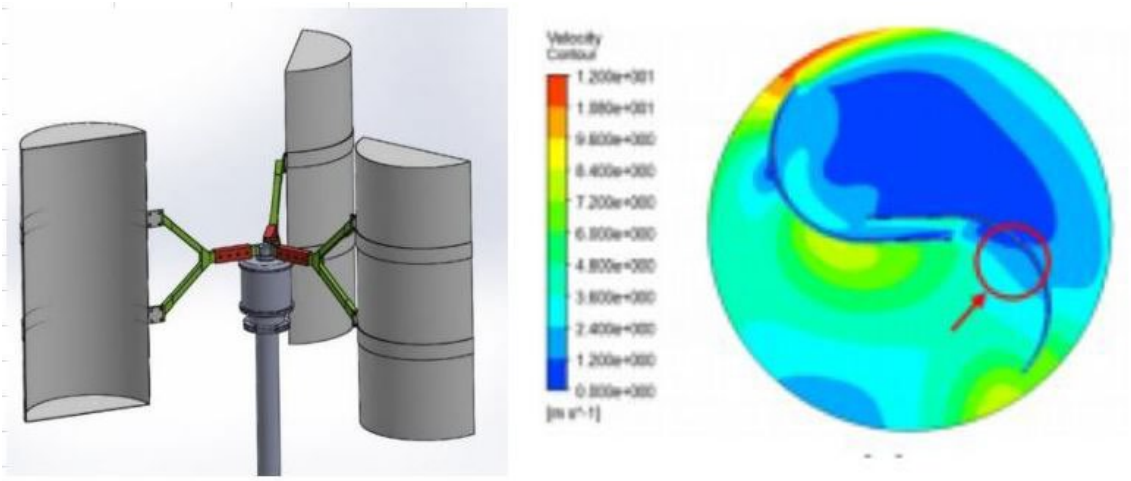
Optimize edilmiş Wind Booster konfigürasyonu ile torkta %35,23 artış elde edilerek Mexico City koşullarında test edilmiştir [38]. Şekil 3.10'da Wind Booster'ın akış analizi verilmiştir.



Şekil 3.10. Yapılandırılmış Wind Booster'ın akışkan analizi [38].

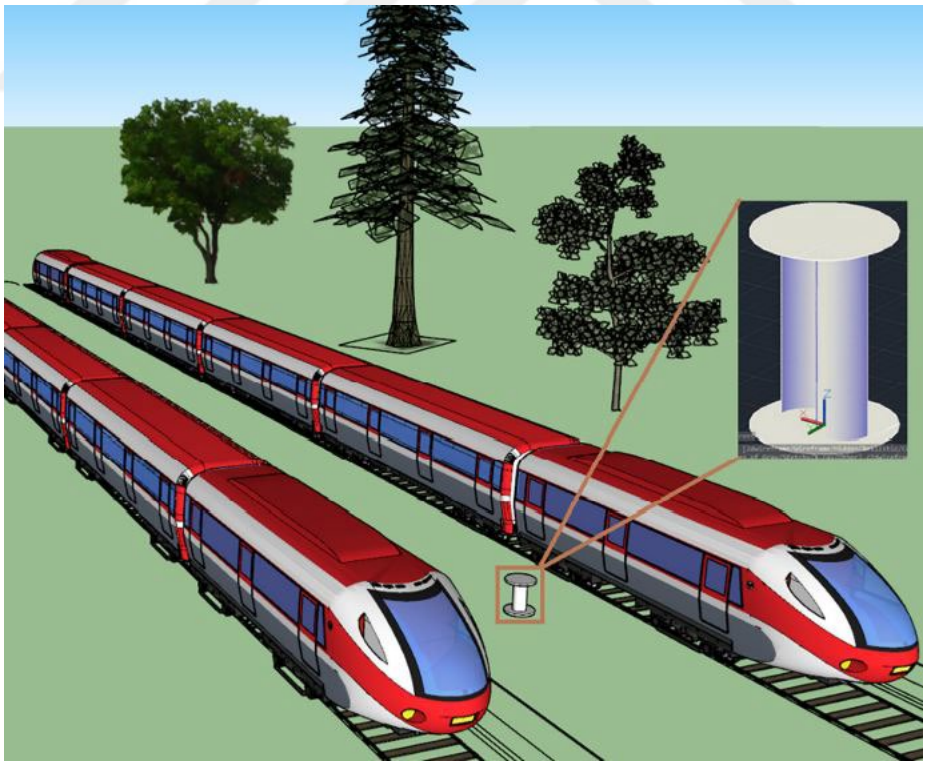
J. Ramarajan ve S. Jayavel de diğer araştırmacılar gibi yardımcı kanatlar kullanarak bir Savonius türbininin performansının iyileştirilmesi çalışmalarını yürüterek ilerleme sağlamışlardır [40]. Şekil 3.11'de blade savonius rüzgar türbini ve akış analizi

verilmiştir.



Şekil 3.11. Yüzey çukurlukları ve ek kanatçıkları olmayan blade savonius rüzgâr türbini ve akışkan analizi [40].

Malezya'da yapılan araştırmada Demiryolu taşımacılığında Rüzgâr enerjisinin kullanılması için dikey eksenli Türbin tasarımı incelenmiştir [44]. Şekil 3.12'de savonius rüzgar türbini uygulaması gösterilmiştir.

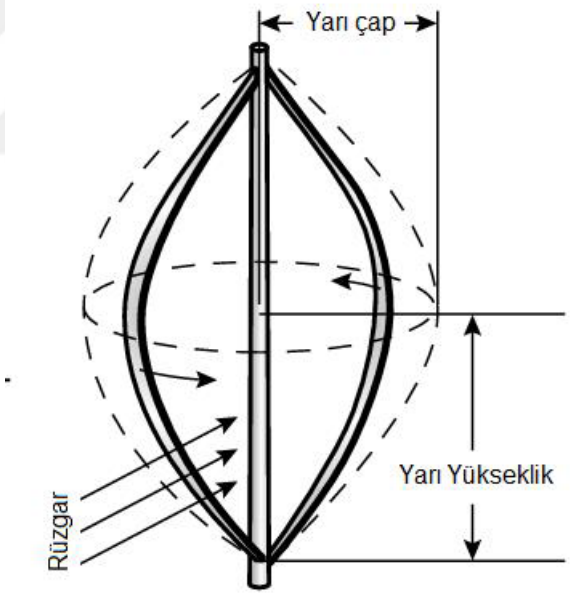


Şekil 3.12. Demiryolu taşımacılığında savonius rüzgâr türbini uygulaması [40].

Hızlı Trenlerin geçişlerinde 50 m/s'lik rüzgâr hızları tespit edilmiş Saonius RT'lerle elle tutulur enerji üretimi sağlanmıştır.

3.4.2.2. *Darrieus Rüzgâr Türbinleri*

Fransa'da 1931 yılında Mühendis George Jean Darrieus tarafından geliştirilmiştir. 70 ile 80'li yıllarda Amerika ve Kanada "da yapılan Ar-Ge çalışmaları kanat tasarımında istenilen verim bir türlü ortaya çıkmamıştır. Kanatların şekli akışkanlar mekaniğine uygun olması veriminin yüksek olmasına sebep olmuştur. Farklı kanat sayılarıyla tasarlanan türbin kanatların eğimli olmasıyla stabil bir çalışma mekaniğine sahiptir. İlk hareketi bir motorla veya benzer bir vasıtasıyla da yapılabilir. Kanatlar iç bükey ve dış bükey yüzeylere sahiptir. İki yüzey arasında farklı çekme kuvvetleri oluşur. Kuvvetler arasındaki fark dönme hareketini başlatıp devam ettirir. Kanatların tasarımda kullanıldığı şekliyle tur başına iki misli yüksek moment elde edilir. Ancak elde edilen güç sinüs grafiğine benzer bir performans üretir. Yoğun çalışmalara rağmen istenilen düzeyde verim artışı sağlanamaması, türbinin oldukça başarısız bir tasarım olduğu görüşü genel kanı haline gelmiştir [3-5]. Şekil 3.13'te Darrieus tipli rüzgar türbini verilmiştir.



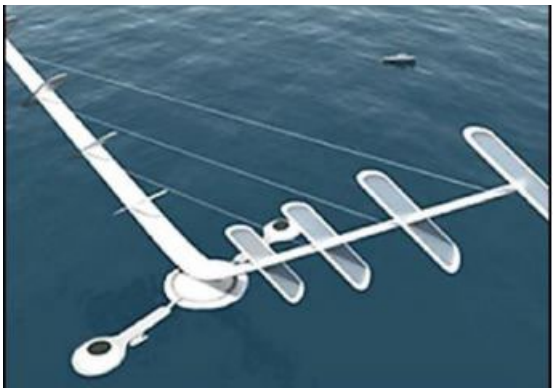
Şekil 3.13. Darrieus tipli bir rüzgâr türbini [4].

3.4.2.3. *H-Darrieus Rüzgâr Türbinleri*

Bu türbin düşey eksenlidir. Darrieus türbini geliştirme çalışmalarının yan ürünü olarak ortaya çıkmış, aerodinamik yapısı Darrieus'tan daha karmaşık olan bir rüzgâr türbinidir. Hızı kontrol edebilmek için kanatlar sürmeye (pitch kontrol) uygundur.

3.4.3. Eğik Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Şekil 3.14'te örneği verilmiş olan türbin çeşidinde dönme ekseni yerçekimi doğrultusuyla, rüzgâr yönünde açı yaparlar. Kanatlarda dönme eksenine belli bir açıda yerleştirilmişlerdir. Kompleks olmaları nedeniyle yaygın değillerdir.



Şekil 3.14. Eğik eksen örneği [37].

3.5. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN BİRBİRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Çizelge 3.1'de Büyük Rüzgâr Türbinleri ile Küçük Rüzgâr Türbinleri; Kullanım Alanları, Bir Tek Türbin Gücü, Üretilen Enerjinin Verildiği Yer, Akü İhtiyacı, Kurulum ve Bakım Masrafları bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Fiziki ölçülerine göre türbinlerin karşılaştırılması.

	Kullanım Alanları	Bir Tek Türbin Gücü	Üretilen Enerjinin Verildiği Yer	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafları	Kurulum Masrafları
Büyük RT"ler	Endüst-riyel	50kW-2MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük RT"ler	Kişisel	50W-20kW	Çiftlik evleri, Telekomünikasyon alanları, şebekeden uzak yerler vb..	Var	Yok	Düşük

Çizelge 3.2'de rüzgârı önden alan ile rüzgârı arkadan alan türbinlerin; yaw mekanizma ihtiyacı, kanat malzeme yapısı, kuleye binen yük, rüzgâr türbinine verdiği zararlar bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.2. Türbinlerin güç besleme yönüne göre değerlendirilmesi.

	Yönlendirme düzeneği İhtiyacı	Kanat Malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	Rüzgâr Türbinine Verdiği Zarar
Rüzgârı Önden Alan	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgârı Arkadan Alan	Yok	Esnek	Hafif	Çok

Çizelge 3.3'te Kanat Çeşitlerine Göre Yatay ve dikey eksenli Türbinlerin; Kanat sayısına göre, Savonious veya Darrieus tipi RT olmalarına göre; Maliyet, Estetik Görünüm, Gürültü, Çalışma hızı, Kule ihtiyacı, Kullanım amacı, Rotorun Dönmesi İçin Rüzgârı kanada etkisi ve Günümüzdeki kullanım alanları bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.3. Türbinlerin kanat sayısı ve formuna göre değerlendirilmesi.

	YERT				DERT	
	1 Kanatlı	2 Kanatlı	3 Kanatlı	3'ten fazla Kanatlı	Savonious	Darrieus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım Amacı	Elektr.	Elektr.	Elektr.	Az Elektr. ve Su pompalama	Az Elektr. ve Su Pompalama	Az Elektr. ve Su Pompalama

Günümüzde kullanım	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgârın etkisi	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler

Çizelge 3.4'te Kullanılmakta olan rüzgâr türbinleri Rotor tipleri; Cp[Güç Katsayısı], Devir Sayıları, Üretebildikleri Güç ve Kullanım yerleri bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

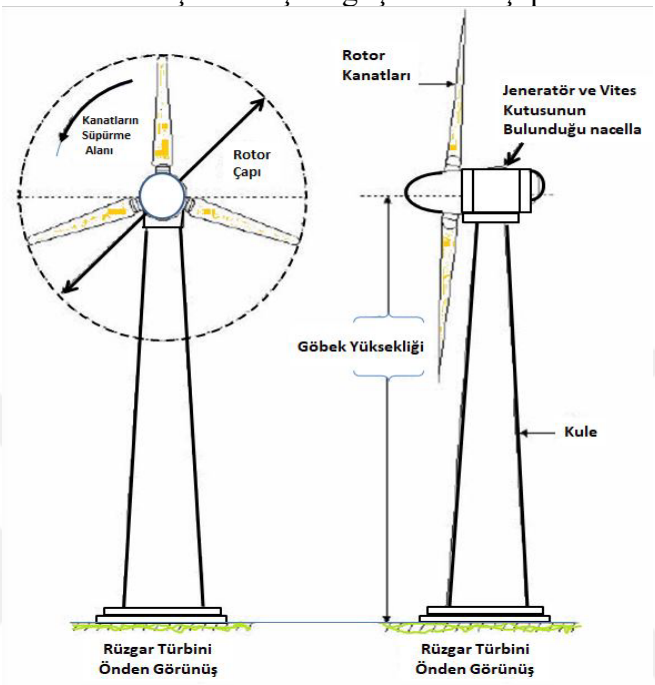
Çizelge 3.4. Rağbet gören türbinler ve çalıştırıldıkları yerler.

Rotor tipi		Güç Katsayısı	Devir	Güç	Kullanım Yeri
Pervane Tipi		0.42	Yüksek	Alçak	Elektr. Üret.
Darrieus Tipi		0.40	Yüksek	Alçak	Elektr. Üret.
Çok Kanatlı Tip		0.35	Orta	Orta	Elektr. Üret. veya Su pompalama
Yelken Kanat Tipi		0.35	Orta	Orta	Elektr. Üret. veya Su pomp.
Savonious Tipi		0.15	Alçak	Yüksek	Su pomp.
Hollanda Tipi		0.17	Alçak	Yüksek	Su pomp. veya değirmen

3.6. RÜZGÂR TÜRBİNİ BİLEŞENLERİ

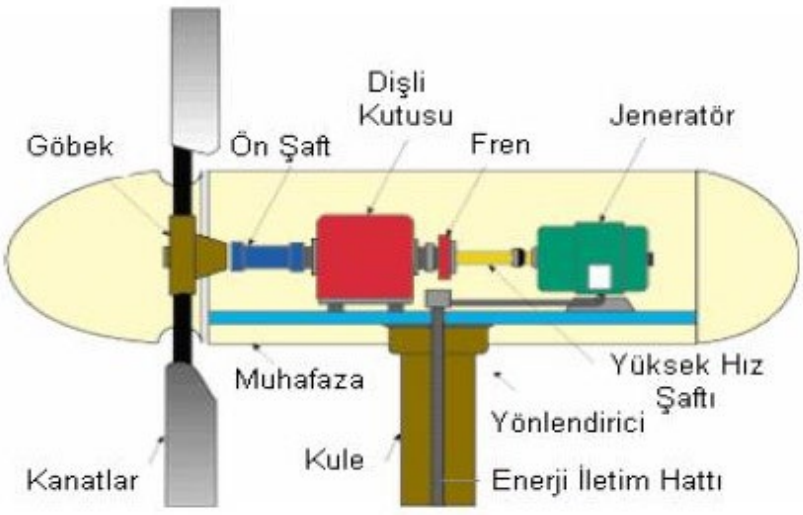
Şekil 3.15'te rüzgâr türbinlerinin genel bileşenleri gösterilmiştir. Bunlardan birkaçının açıklaması aşağıdaki gibi yapılabilir.

- Göbek yüksekliği: Rotor merkezinin topraktan mesafesini ifade eder.
- Süpürme alanı : Rotor kanatlarının dönerken süpürdüğü alanı ifade edilir.
- Uç hız oranı λ : Kanat ucu hızının ile rüzgâr hızına oranıdır.
- Cp[Güç Katsayısı] : Elektriksel çıkış verimini ifade eder.
- Rotor Çapı : Kanat Uçlarının çizdiği çemberin çapını ifade eder.

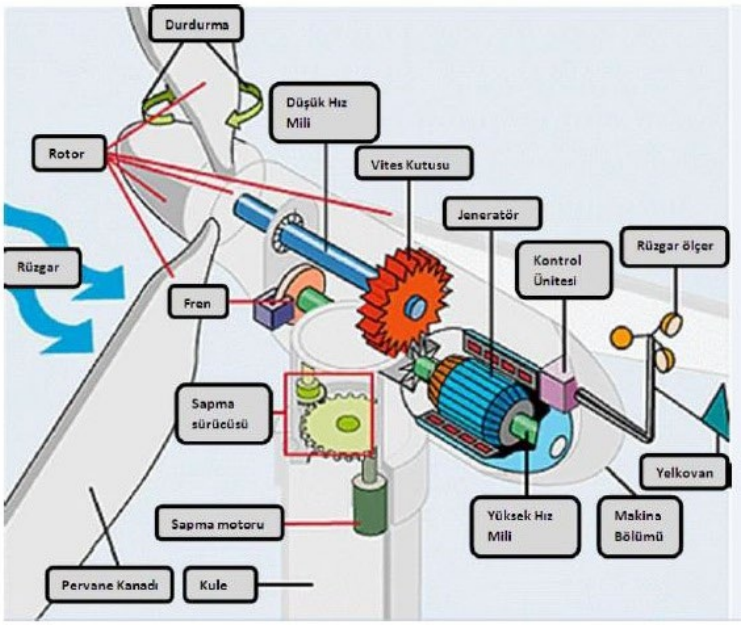


Şekil 3.15. Bir rüzgâr türbini cephe görünüşü.

Şekil 3.16'da rüzgar türbininin iç görünümü verilmiştir. Şekil 3.17'de rüzgâr türbininin elemanları verilmiştir.



Şekil 3.16. Rüzgâr türbininin iç görünümü.



Şekil 3.17. Rüzgâr türbini elemanları [26].

3.6.1. Dişli Kutusu

Rüzgâr türbinlerinde Rüzgâr dan devşirdiği gücü jeneratöre aktaran güç ünitesi vardır. Bu ünite ana şaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından oluşmaktadır. Rüzgâr türbini rotoru jeneratör miline oranla düşük hızlarda yüksek tork gücüyle dönmektedir. Jeneratörde enerji üretimi için çok yüksek hızlara ihtiyaç vardır. Jeneratörde hız arttığı için düşük tork gücü oluşur. Rotor ve Jeneratörü istenilen teknik özelliklerde birbirine bağlayan dişli kutusudur. Elde edilen yavaş dönme hızı ve yüksek tork, dişli kutusuyla jeneratör için kullanılan yüksek hız ve düşük tork gücüne dönüştürülür. Burada tek bir dönüştürme oranı vardır. Bu oran elde edilmek istenen güce bağlı olarak değişir. 1/50 seviyelerindeki bir oran, gücü 600 ya da 750 kW'lık bir türbin için yeterlidir [27]. Şekil 3.18'de dişli kutusu gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Dişli kutusu.

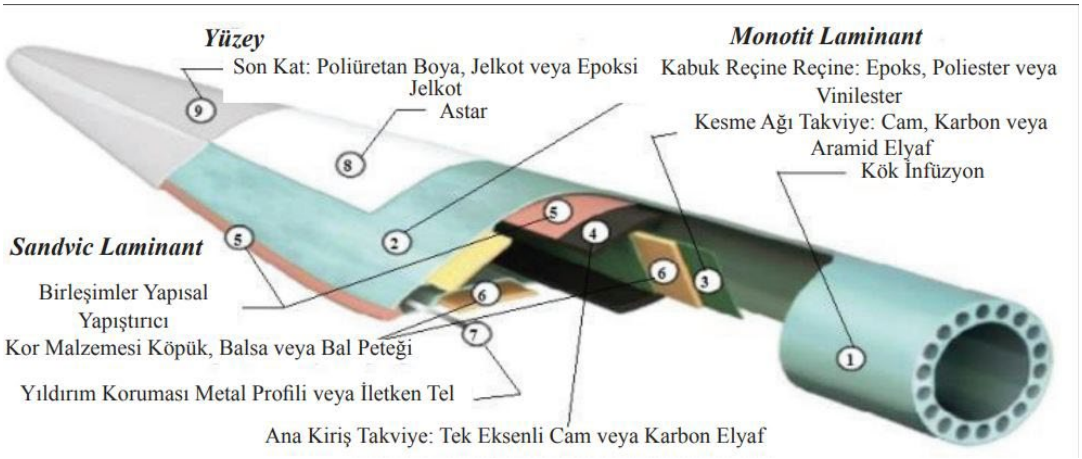
3.6.2. Rotor

Rüzgâr Türbinlerinde Rotor (pervane); Rüzgâr enerjisini soğurulmaya başladığı en dış elemandır. Elde edilen güç şaft üzerinden dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderilir. Rüzgâr kütleleri kanat ucundan başlayarak rotor merkezine yaklaşıldıkça kanata daha dik açılarla gelmeye başlar. Bu durum rüzgâr kütlelerinin gücünün kanadın her noktasında kanat tarafından en verimli bir şekilde emerek rotora aktarmayı sağlar. Rotor kanadının her yerinde yüzeyin rüzgâr a karşı dik durması kaldırma kuvvetinin sıfır olmasına sebep olur. Kaldırma kuvvetini koruyabilmek için rotor kanadı uçtan burulmaya başlayarak rotora bağlanır. Bu sayede, kanadın arka ucu esen rüzgâr yönüne doğru itilir.

Şekil 3.19'da GRP (glass-fibre reinforced plastics) yani cam elyaf plastikten yapılan türbin rotor kanatlarının imalat atölyesi resmedilmiştir. Alternatif kanat imalatında kullanılan malzemeler karbon fiber veya aramid olabilir. Büyük türbinlerin inşasında kullanılan malzemenin ekonomik olması tercih sebebidir.

Kanat imalatında hafif metallerde kullanılabilmekte ancak büyük türbinlerde büyük ağırlıklar oluşması sebebiyle tercih edilmemektedir. Çelik veya alüminyum malzemeler küçük türbin imalatında tercih edilebilir [27].

Yüksek performans aktarımlarında alüminyum malzemeler mukavemet problemleri ortaya çıkarmaktadır. Cam elyafı ve çeliğim yüksek kopma mukavemetleri sebebiyle tercih edilmektedirler. Cam elyafının kopma mukavemeti 420 N/mm^2 ile, St 52 çeliğinin kopma mukavemeti ise 520 $N/mm^{2'}$ye yakındır. Şekil 3.19'da rotor kanadı gösterilmiştir.

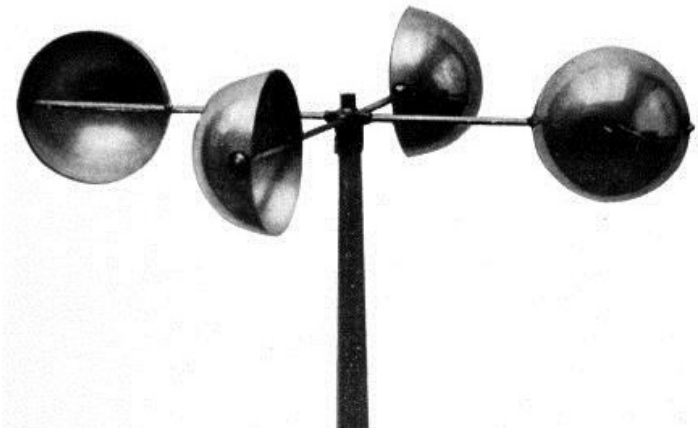


Şekil 3.19. Rotor kanadı imalatı [44].

3.6.3. Anemometre

Anemometre; Şekil 3.20'de de görüldüğü gibi, bir dikey eksen üzerine monte edilmiş rüzgârı tutan dört fincana sahiptir. Sabit mıknatıslı küçük bir jeneratörü çeviren fincanların dakikadaki hızı elektronik olarak belli periyotlarda (ayarlanabilir) kaydedilmektedir. Kullanılan Anemometreler arasında fincanlar yerine pervanelerin olduğu pek yaygın olmayan tiplerde vardır.

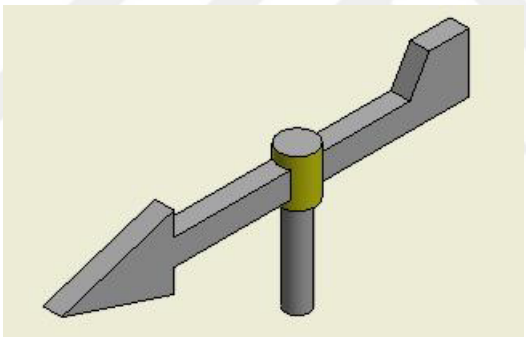
Rüzgâr hızını ölçmede başka teknolojileri kullanan anemometreler de vardır. Sesin fazla yükselmesi ve hava moleküllerinden faydalanan tiplerde, moleküllerden yansıyan coherent ışığını tespit eden ses üstü ve lazer anemometreleri klasik olmayan anemometrelerdir. Bunların dışında sıcak kablo anemometreleri, rüzgâr akımının içine ve rüzgâr altına döşenen kabloların arasında meydana gelen dakikalık sıcaklık farkından yola çıkarak rüzgâr hızını tespit ede anemometrelerde kullanımda yer bulmaktadır. Elektronik anemometrelerin hava şartlarından pek etkilenmezler. Fincanlı anemometreler en çok kullanılan tiplerdir. Donmalara karşı milleri elektrikle ısıtılarak fincanlı anemometrelerin kutuplarda dahi kullanılması sağlanmaktadır [27]. Şekil 3.20'de anemometre verilmiştir.



Şekil 3.20. Yaygın olarak kullanılan tipik anemometre.

3.6.4. Otomatik Yöneltme Düzeneği

Türbin kanatlarının rüzgâr a karşı devamlı olarak dik durması enerji verimi için çok önemlidir. Bu yönlendirmeyi yapan düzenek Şekil 3.21'de tasvir edilmiştir [28]. Şekil 3.21'de otomatik yönelme düzeni verilmiştir.



Şekil 3.21. Otomatik yöneltme düzeni [27].

3.6.5. Frenleme Düzeneği

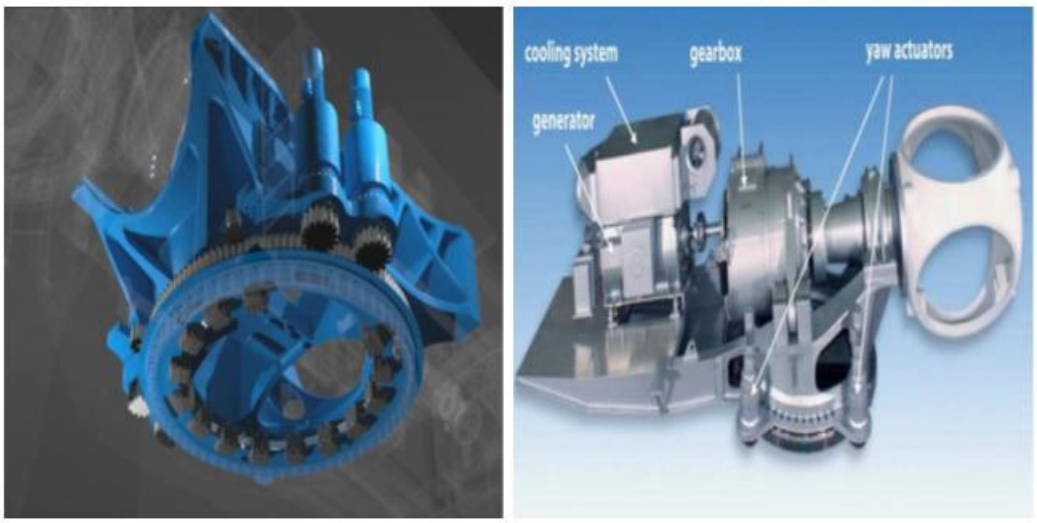
Rüzgâr türbinlerinde rotorun dönme hızının sınırlandırılması üç sebepten dolayı gerekli olmaktadır. Birincisi; bakım onarım sırasında türbinin durdurulması ve sabit kalmasını sağlamak için Fren mekanizmasına ihtiyaç vardır. İkincisi ise fırtına ve benzeri durumlarda türbin bileşenlerinin aşırı merkezkaç kuvveti altında zarar görmemesi için fren mekanizmasına ihtiyaç vardır. Üçüncü olarak da Üretilen elektrik enerjisinin kalitesini korumak için frenleme mekanizmasına ihtiyaç vardır. Jeneratörün kutup sayısına bağlı olarak üretilen elektrik enerjisinin frekansının sabit tutulması gerekmektedir. Bu işlemler elektronik olarak yapılabildiği gibi türbin hızının ayarlanması yoluyla da yapılabilmektedir [28].

3.6.6. YAW Mekanizması

Şekil 3.21'de gösterilen yönlendirici mikro türbinler için tasarlanmıştır. Büyük türbinlerde Kanatlar, rotor, nacella tümüyle hareket ettirilerek kanatların rüzgâr a karşı dik konuma getirilmesi gerekmektedir. Bu işlen rüzgâr rotasından çıkan türbini tekrar aynı rotaya yani kanatları rüzgâra dik konuma getirme işlemi Yaw mekanizmalarıyla sağlanabilmektedir. Bir yaw hatası, düşük verimin birinci sebebidir. Rüzgâr türbin rotorunun güç giriş kontrolü en iyi şekilde Yaw mekanizmasıyla elde edilebilir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin hemen hemen hepsinde yaw döndürme mekanizması kullanılır. Şekil 3.22'de bir türbinin yaw mekanizması resmedilmiştir. Mekanizma en dışında yaw taşıyıcısı daha içte yaw motoru tekerlekleri ve en içte yaw frenleri bulunur. Türbin üreticilerinin tercih ettikleri çoğunlukla frenli yaw sistemleridir.

Yaw mekanizmasını süren elektronik kontrol devresi vardır. Türbinde mevcut olan rüzgâr vanasından alınan rüzgâr yön bilgisi elektronik kontrolcü tarafından bir önceki ölçüm bilgisi ile karşılaştırılarak yeni konuma nasel, yaw motorları maharetiyle döndürülür. Dönme açısı, elektronik sistemin yaw konumunu saniyede birkaç kez kontrol etmesi nedeniyle birkaç derece olacaktır.

Türbin Jeneratöründe üretilen elektrik enerjisi iletileceği yere gidebilmesi için kablolarla kuleden aşağıya indirilmesi gerekir. Yav hareketi kablolarda mekanik burulmalara sebep olur. Bu burulmalar aynı zamanda elektriksek zorlamaları da ortaya çıkarır. Bütün bu problemlerin üstesinden gelebilmek için türbinlerde burulmayı önleyici mekanizmalara ihtiyaç duyulmuştur [27]. Şekil 3.22'de yaw mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Yaw mekanizması.

3.6.7. Elektronik Kontrolcü

Türbinlerin güvenli çalışmasını garanti eden Elektronik kontrolcü, türbin verilerini sürekli takip ederek yaw mekanizmasını kontrol eden bilgisayar programıdır. Olağanüstü bir durum ortaya çıktığında (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) türbini kontrollü bir şekilde devreden çıkarır ve operasyon merkezinde ilgili birime modem hattı ile bilgi mesajı gönderir [27].

3.6.8. Jeneratör

Rüzgâr enerjisi tesislerinde hem alternatif akım hemde doğru akım jeneratörleri kullanılabilir. Rüzgarın düzensizliğinden doğan eretim problemleri nedeniyle elde edilen elektrik akımı, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle akım düzensizlikleri ortadan kaldırılır ve şebekeye uygun hale getirilip öyle verilir. Bu işlem hem kalitesiz alternatif akım veya kalitesiz doğru akım için de gerçekleştirilir. Doğru akım jeneratörleri, sık bakım gereksinimi ve pahalı olmaları nedeniyle büyük güçlü rüzgâr enerjisi tesislerinde tercih edilmezler. Küçük güçlü rüzgâr enerji tesislerinde doğru akım jeneratörleri, günümüzde akülere enerji depolamak için kullanılır. Şebeke beslemelerinde, alternatif akım jeneratörleri (senkron veya asenkron jeneratörler) kullanılmaktadır [29].

3.6.9. Soğutma Sistemi

Türbin enerji üretimi sırasında dişli kutusunda ve jeneratörde ısınma problemiyle karşılaşır. Soğutma işleminde çoğunlukla hava kanalları kullanılmaktadır. Soğutma birimi fanı vasıtasıyla hava sirkülasyonu sağlanır, elektrik jeneratörü soğutulur. Dişli kutusunun sürtünmeyi azaltan yağını soğutmak için ayrı bir soğutma birimini bulunur. Birkaç üretici firma türbinleri su soğutmalı jeneratörlere sahiptir. Su ile soğutulan jeneratörler daha sorunsuz çalışmaları ve ebatlarının küçük olması verimlerinin yüksek olması tercih sebebidir. Ancak Su soğutmalı sistem elemanlarına (su tankı ve radyatör) için Nacellede yer bulmak zor olmaktadır [27].

3.6.10. Platform ve Kule

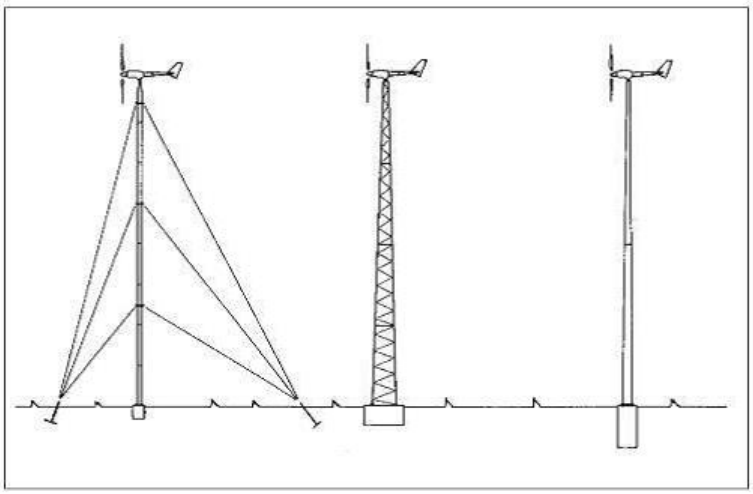
Şekil 3.23'te kullanılan kule tipler gösterilmiştir. Sistemin hareketli bölümlerinin tamamı bir platformda birleştirilerek kulenin üzerine yerleştirilmektedir. Bu platformun gürültü kirliliğine karşı izolasyonu da yapılmaktadır. Hareketli bölümlerinin tümünü üzerinde bulunduran ayrıca rotor ve kanatları da taşımak zorunda olan platform, çelik konstrüksiyondan tekniği ile imal edilmektedir. Platformun kütlesi içerdiği aksamlarla

birlikte 12-82 ton arasında değişebilmektedir. Platform çevresinde dönebilecek şekilde yataklandırılarak kuleye bağlanmaktadır. Rüzgâr hızının yerden yükseldikçe arttığı göz önüne alındığında kulenin de yüksek performans elde edebilmek için uygun yükseklikte olması gerekmektedir. Tepesinde tonlarca yükü taşıyacak olan kule tüm veriler dikkate alınarak gerekli güçte inşa edilmesi kaçınılmazdır. Kule inşaatının parametresi sistemin büyüklüğüne göre değişmektedir.

Kule şekli:

- Çelik koni boru,
- Çelik kafes,
- Çelik silindir,
- Beton konik boru ya da
- Silindir biçiminde imal edilebilmektedir.

Kule yükseklikleri günümüzde 100 m'ye kadar ulaşabildiğinden, kulelerin iki ya da üç parça halinde imal edilmeleri gerekmektedir. Tabiatta en az 20 yıl kalacak olan kuleler görüntü kirliliği kriterine de tabi tutulmaktadırlar. Kafes kuleler bu nedenle pek tercih edilmezler. Bir MW'a kadar olan türbinlerin ortalama rotor ağırlığı 3-26 ton, gövde ağırlığı 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Bu parametreler güç faktörü, türbin gücü, rüzgâr hızının ve süpürme alanının fonksiyonudur. Rüzgâr türbini rotorunu ne kadar yükseğe çıkarırsak elde edilebilecek güç artmakta çünkü rüzgâr hızı da yükseklikle artmaktadır. Rotoru yükseltmek için daha fazla malzeme kullanımı dek olduğundan ekonomik ve teknik nedenlerle bir yerde durmak gerekmektedir. Şekil 3.23'te kule tipleri verilmiştir.



Şekil 3.23. Kule tipleri [23].

3.7. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN MALZEMESİ, ÖMRÜ, BAKIMI VE GÜVENLİĞİ

3.7.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Malzemeler

Türbin kanatlarının ulaşabileceği boyutlar ve karşı koymaları gereken güç değerleri dikkate alındığında inşasında mutlaka kompozit malzeme kullanımı gerekmektedir. Polimer yapıda termoset reçineler bu alanda kullanılan en önemli malzemelerdendir. Bunların içinde de öne çıkan epoksi reçinelerdir. Epoksi reçineler;

- Hacimsel çekme dayanımları ve
- Boyutsal stabilite değerleri bakımından diğer termoset reçinelere oranla tercih sebebidir.

Takviye olarak kullanılan dokumalarda genelde çok yönlü bir şekilde cam veya karbon liflerinden oluşan iplikler kullanılırken dolgu malzemesi olarak da bal peteği görünümlü malzemeler, köpükler, ağaç malzemeler kullanılmaktadır. Kaliteli rüzgâr türbini kanatları görevi;

- Uzun vadede dayanıklılığını muhafaza etmeli,
- Aerodinamik açıdan enerji verimliliğine katkı sağlamalı,
- Dış etmenlere karşı bütünlüğünü ve yüzey kalitesini kaybetmemelidir [30].

3.7.2. Rüzgâr Türbinlerinin Ömrü

Dünyada 2021 yılı itibarıyla toplam 710.517 MW Rüzgâr enerjisi üreten 100'den fazla ülke var. Ortalama 2.3 MW üretim yapan türbin olduğunu kabul edersek yaklaşık 309000 türbinin çalışıyor olması lazım [37]. Türbin ömrünün 25-35 yıl olabileceği düşünülmekle beraber gerçek ömür türbin bakım periyotlarına uyulmasına hem yerel klimatolojiye hem de türbin kapasitesine bağlıdır [31].

3.7.3. Rüzgâr Türbinlerinin Bakımı

Yeni tasarım rüzgâr türbinleri 120000 çalışma saati düşünülerek tasarlanırlar. Bir türbinin yaklaşık yıllık 6000 saat çalışabileceğini kabul edersek 20 yıllık ömre denk gelmektedir. Bu ömür, binek araçların 4000–6000 saat kullanım ömürleri dikkate alınırsa oldukça fazladır. Danimarka'da 1975'ten beri kullanılan türbinlerden binlerce tam olarak 4400 adet türbin üzerinde bir araştırma yapılmış ve yeni üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinin eskilere nazaran oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Danimarka eski ve yeni türbinlerin bakım maliyetleri yatırım maliyetlerinin %3'ünden %1,5- 2 dolaylarına gerilemiştir [31].

Bakım maliyeti rüzgâr gülü tarlalarında çok daha düşüktür. En çok bakım maliyeti türbinlerin rotor kanatları ve vites kutusunda görülür. Toplam bakım maliyetinin %15-20'sini özellikle kanatlar, vites kutusu ve üreteç oluşturmaktadır [31].

3.7.4. Güvenlik

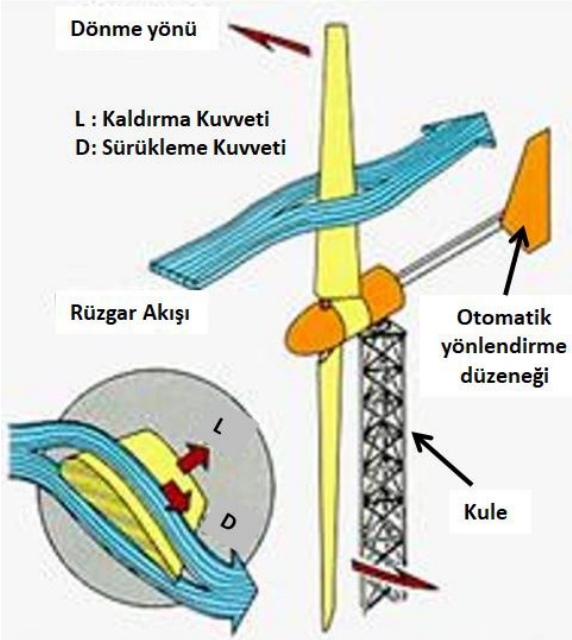
Günümüzde konik çelik boru şeklinde kuleler büyük modern rüzgâr türbinlerinde kullanılır. Konik çelik boru kuleler rüzgâr türbininin bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasının sağlanması en önemli özelliğidir. Bu kulelerin en önemli avantajı, daha güvenli olması kusuru ise pahalı olmasıdır. Kafes tipi kulelerin rüzgâr çiftliğine daha az uygun olması, estetik olmaması bakım onarım ve servis için güvenlik açısından bazı sakıncalar içermesi sayılabilecek kusurlarındandır. Yeni rüzgâr türbinlerinde her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Bakım onarım sırasında türbinin mutlaka durması gerekmektedir. Durmama ihtimalini ortadan kaldırmak için yeni modern türbinlerde olduğu gibi "aşırı hızlanma koruması" olmalıdır [31].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİĞİ

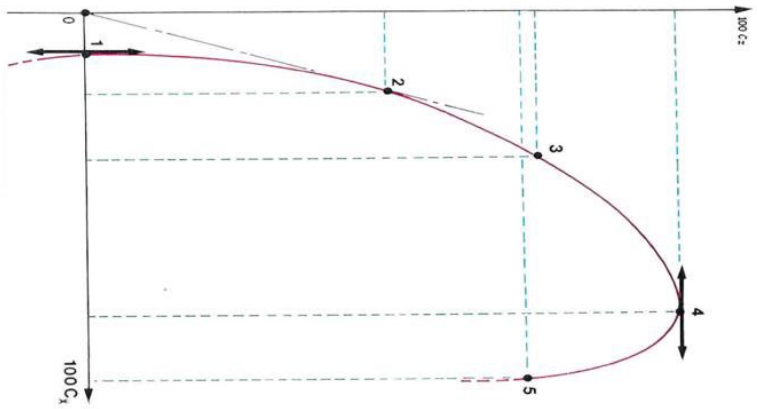
Rüzgâr türbinlerinde rotorun dönmesi rüzgâr tarafından sağlanır. Rüzgâr türbinleri normal şartlarda rüzgâr hız ve yönünün değiştiği çok farklı ortamlarda çalışır ve modern rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesinde uçak ve helikopter gibi hava araçlarının teknolojisinden yararlanılmıştır. Rüzgâr türbinlerinde kanatlara iki çeşit aerodinamik kuvvet etki etmekte ve bu sayede de türbin kanatlarının dönmesi sağlanmaktadır. Bu kuvvetlerden birincisi Kaldırma (Lift) kuvveti, bir diğeri ise Sürtünme (Drag) kuvvetidir.

Bir uçağın kanadı üzerindeki hava molekülleri, kanat geometrisinden kaynaklı olarak uçağın üst yüzeyi boyunca alt yüzeylere göre daha hızlı hareket eder. Basınç ve hız arasında ters orantı olduğundan dolayı, başka bir deyişle hızın yüksek olduğu üst yüzeylerde basınç daha düşük olacaktır. Uçağın üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farkı uçağa bir kaldırma etkisi meydana getirmektedir. Kaldırma kuvveti rüzgârın yönüne dik olup, uçağın uçmasını mümkün kılan yukarıya doğru olan bu çekme kuvvetidir. Kaldırma kuvvetine dik ve yönü kanat uçlarına doğru olan kuvvet ise Sürtünme (Drag) kuvvetidir. Bu kapsamda 3 farklı modelin aerodinamik analizleri yapılmış, basınç ve hız konturları çıkarılmış, cd ve cl katsayıları hesaplanmıştır. Bu bölüme Sonuçlar ve Öneriler bölümünde değinilecek olup, üretilmesi planlanan rüzgâr türbininin diğer modellere göre aerodinamik açıdan üstün olduğu görülmüş ve üretimine başlanmıştır. Şekil 4.1'de rüzgar türbininin aerodinamik kaldırması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Rüzgâr türbininin aerodinamik kaldırması.

Şekil 4.2'de hücum açısının değişimi verilmiştir.



Şekil 4.2. Hücum açısının değişimi.

Hücum açısı 1 ile 5 noktaları arası artmaktadır.

1 noktasında: Hücum açısı 0'dır. Kaldırma olmaz ve sürükleme minimum olur.

2 noktasında: Bu noktada maksimum sürüklenmede maksimum kaldırma olur ve burada hücum açısı maksimum kaldırma, minimum sürükleme yapar.

Kaldırma-sürükleme oranları: Cz / Cx

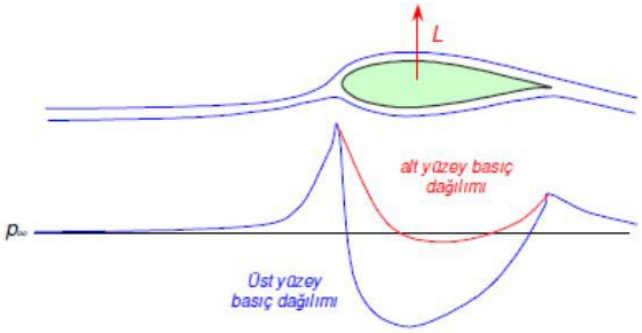
3 noktasında: Bu noktada kanat en iyi kaldırma-sürükleme oranına sahiptir.

Helikopter bıçağı için bu optimum hücum açısıdır. Bu açıda Cx^2 / Cz^3 oranı minimumdur.

4 noktasında: Kaldırma maksimumdur.1'den 4'e kadar kaldırma ve sürükleme artmakta, dört noktasının ötesinde hücum açısında artma olmamakta, kaldırma azalmaktadır.

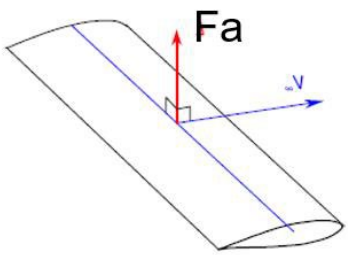
5 noktasında: Bu durma açısıdır. Sınır tabaka ayrılır ve kaldırma birden yükselir.

Şekil 4.3'te kanat profilinin basınç dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kanat profilinde basınç dağılımı.

Şekil 4.4'te bileşke kuvvet gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bileşke kuvvet Fa.

Denklem 4.1'de bileşke kuvvet gösterilmiştir.

$$F_a = C_a \frac{\rho}{2} V^2 S \quad (4.1)$$

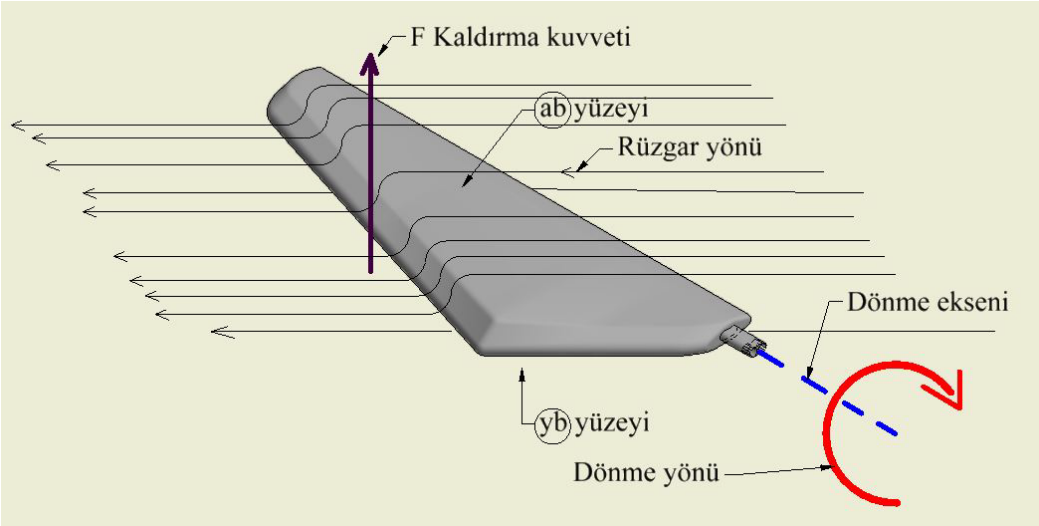
C: kanat sabiti

V: Kanat yüzeyini yalayan havanın hızı

ρ: havanın yoğunluğu

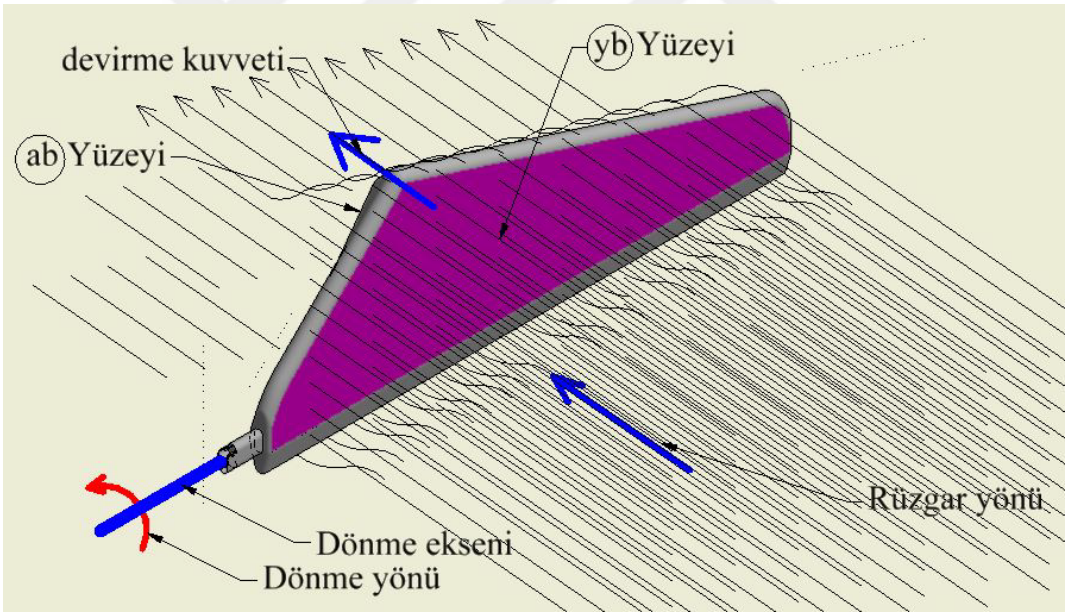
S: Kanat yüzey alanı

Şekil 4.5'te kanat şekli gösterilmiştir.



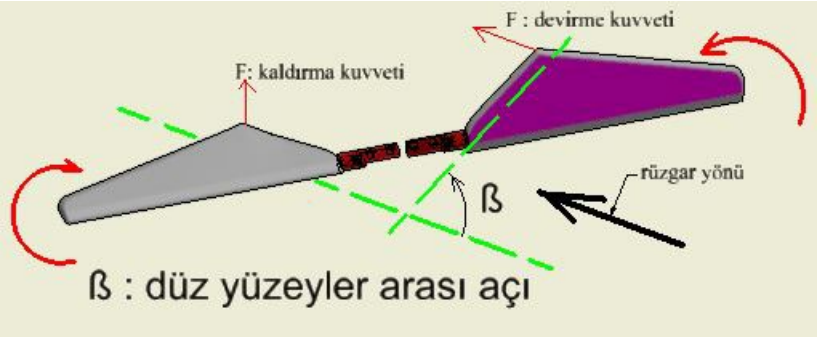
Şekil 4.5. Kanat şekli.

Şekil 4.5'te yüksek basınçtan (yb) alçak basınca (ab) kanat hareket yönünü göstermektedir. Kaldırma kuvveti bir kanat yüzeyi boyunca havanın oluşturduğu yüzeysel kuvvetlerin bileşkesidir. Şekil 4.6'da kanat şekli gösterilmiştir.



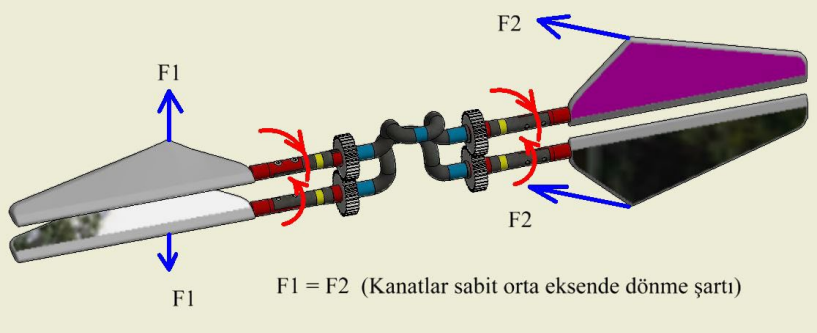
Şekil 4.6. Kanat şekli.

Şekil 4.6'da rüzgâra 90º dik duran yüzeye rüzgârın uyguladığı sürükleme dolayısıyla devir ve kuvveti tasvir edilmiştir. Şekil 4.7'de iki kanadın birbirine belli açıda konumlandırılması gösterilmiştir.



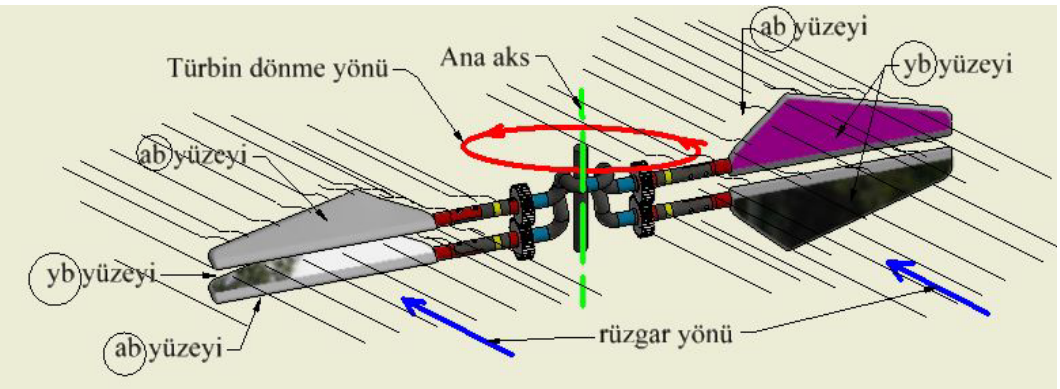
Şekil 4.7. Kanatların sabit birleştirilerek yarım kanadın oluşturulması.

Şekil 4.8'de kanatların konumu ve ana kanadın oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kanatların simetrik ikizinin konumu ve ana kanadın oluşması.

Şekil 4.9'da ana kanadın konumu gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Ana kanadın ana aks üzerindeki konumu.

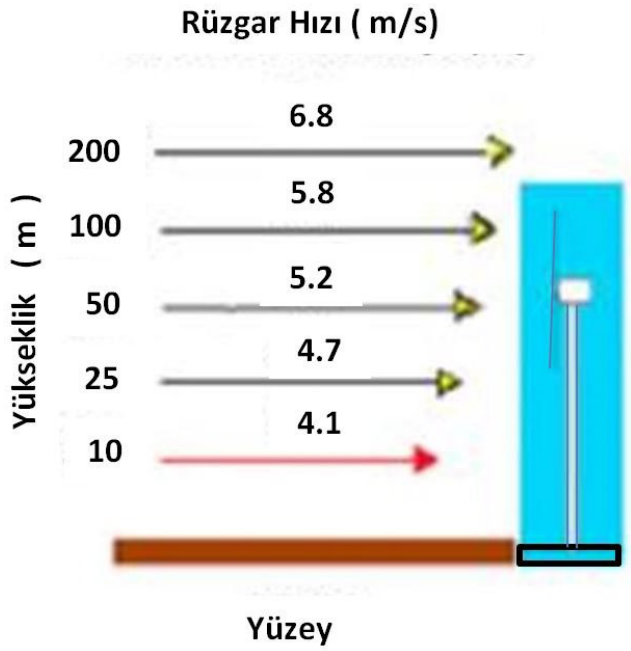
Ana kanadın yarım kanat dönme aksı hareketli olmak üzere ana aks üzerinde konumu gösterilmektedir. Rüzgâr yönüne göre alçak basınç (ab) ve yüksek basınç (yb) bölgelerinin nasıl oluştuğunu ve kanat ve aksın hareket yönü Şekil 4.9 da gösterilmektedir.

4.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN VERİMLİLİĞİ

Yer yüzeyine yakın rüzgârlar; çevredeki fiziki engellerden (ağaç, bitki örtüsü vs.) etkilenmektedir. Rüzgâr hızı yükseklik arttıkça arazi pürüzlülüğüne, arazinin topoğrafik yapısına ve atmosferik şartlara bağlı olarak üstel şekilde artmaktadır. Bu etkileri tanımlayabilmek için yer yüzeyinin pürüzlülük yapısı tanımlanır. Bunun için pürüzlülük uzunluğu denilen Z0 parametresi kullanılır. Çizelge 4.1'de pürüzlülük sınıfları verilmiştir. Şekil 4.10'da yüksekliğe bağlı rüzgârın hız değişimi verilmiştir.

Çizelge 4.1. Pürüzlülük sınıfları.

Pürüzlülük Sınıfları (Davenport)	Pürüzlülük Uzunluğu Z0
1-Deniz	0,0002m
2-Pürüzsüz Arazi	0,005m
3-Açık Arazi	0,03m
4-Açık Engebeli	0,1m
5-Engebeli	0,25m
6-Çok Engebeli	0,5m
7-Bitişik Yerleşimler	1m
8-Şehir Merkezleri	2m



Şekil 4.10. Rüzgâr hızının yükseklikle değişimi.

Rüzgâr enerjisinin hesaplanmasında pürüzlülük faktörü dikkate alındığında türbin (Rüzgâr gülü Tepesinde ki) yüksekliğindeki rüzgâr hızı hesabı iki eşitlikle ifade edilir. Denklem 4.2'de bu eşitlik verilmiştir.

$$v_t = v_{ö}\left[\ln \frac{H_t}{Z_0} / \left(\frac{H_{ö}}{Z_0}\right)\right] \qquad (4.2)$$

Formülde;

- vt : hesaplanan yükseklikteki rüzgâr hızı..... (m/s)
- vö : Ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızı..... (m/s)
- Ht : Türbin yüksekliğini ……..(m)
- Hö : Ölçüm yüksekliğini .....(m)
- Z0 : Pürüzlülük uzunluğu katsayısını .....(0,0001>=Z0 <1)

göstermektedir.

İkincisi ise; rüzgâr hızının yükseklikle değişimini veren "Hellman Bağıntısı"dır. Denklem 4.3'te bu bağıntı verilmiştir.

$$\frac{V_1}{V_2} = \left[\frac{H_1}{H_2}\right]^{\alpha} \qquad (4.3)$$

Formülde;

- α : Yüzey pürüzlülük katsayısı
- H_1 : V_1 hızının ölçüldüğü yükseklik (m)
- H_2 : Rüzgâr hızının hesaplanacağı (V_2) yükseklik (m)

- V_1 : H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızı (m/s)
- V_2 : H_2 yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)

ile gösterilmiştir.

Bir rüzgâr türbininden elde edilecek enerji miktarı; rüzgâr hızı, pervane çapı ve güç eğrisi değişkenlerinin fonksiyonuyla belirlenir. Bu fonksiyona göre üretilecek rüzgâr enerjisi, rüzgâr şiddetinin küpü ile doğru orantılı olarak değişmektedir ve dolayısıyla rüzgâr hızındaki çok küçük bir değişim üretilecek enerji miktarını çok daha önemli ölçüde etkilemektedir. Doğal şartlarda rüzgâr hızı sabit olmadığından dolayı da, kurulan rüzgâr tarlalarının yıllık enerji üretim miktarı, jeneratör üzerindeki veya hesaplama yoluyla bulunan değerlere asla eşit olmaz. Bir yıldaki gerçek üretim değeri teorik olarak maksimum değer olan kapasite faktörü olarak adlandırılır ve bu değer de %20 ile 40 arasındadır.

4.3. TÜRBİN PERFORMANS HESAPLAMASI

Bir rüzgâr türbini için ulaşılabilecek maksimum verim ilk olarak Alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919 yılında ortaya atıldığından dolayı Betz limiti olarak adlandırılır. Bu limit Albert Betz tarafından %59,3 olarak hesaplanmış olup özetle rüzgârın kinetik enerjisinin maksimum %59,3'ünün türbini döndüreceğini ve elektrik üretiminde kullanılabilineceğini ifade etmektedir. Gerçek saha koşullarında ise çeşitli düzgünsüzlüklerden dolayı rüzgâr türbinlerinin verimi bu değerin çok daha altındadır ve genel olarak bir rüzgâr türbininin verimi %35 – %45 arasındadır.

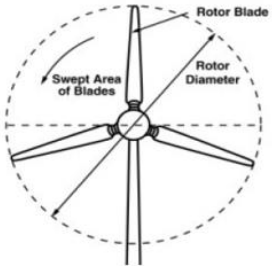
Betz yasası, momentum ve kütlenin korunumu gibi korunum denklemlerinin hava akışına uygulanmasıyla türetilmiştir. Betz yasası hiçbir türbinin rüzgârın kinetik enerjinin 16/27 (0,593) 'sinden daha fazlasını enerji üretiminde kullanamayacağını ifade etmektedir. Ticari rüzgâr türbinleri ise bu değerin maksimum %75-80'nine ulaşabilmektedir.

3 kanatlı standart yatay rüzgâr türbinlerini düşünecek olursak, bu tarz türbinler üzerlerine gelen rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürler ve enerjisi azalan rüzgâr ise türbin kanatlarının arkasında dağılarak yoluna devam eder. Türbinin teoride %100 verimle çalışabilmesi demek, rüzgârın tamamının türbin üzerinde toplanması ve tüm enerjisinin alınarak hareket edemez hale gelmesi demektir. Dolayısıyla havanın artık akışkan gibi değil de katı gibi hareket etmesi demek olurdu ki

böyle bir durumda da herhangi bir dönme hareketi gerçekleşmezdi. Bu yüzden de rüzgâr türbinlerinin %100 verimle çalışması pratik olarak da mümkün olmamaktadır.

Her yatay eksenli rüzgâr türbininin belirli bir süpürme alanı vardır. Bu alan, türbin kanatlarının taradığı alandır. Eğer türbinin tek kanadı var ise rüzgârın çoğu bu alandan geçip gider ve doğal olarak bu da verim düşüklüğüne sebep olur. Ayrıca türbin kanatlarının uzunluğu da süpürme alanını arttıran bir etkendir.

Şekil 4.11'de rüzgar türbini için süpürülen alan verilmiştir.



Şekil 4.11. Yatay eksenli rüzgâr türbini için süpürülen alan.

Denklem 4.4'te verilen bağlantı ile; V1 hızındaki rüzgâr AT alanından geçerken birim zamandaki toplam kinetik enerjisi P0 şeklinde elde edilir.

$$P_{rmax} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3 \quad (4.4)$$

Prmax : Güç (W)

ρ :Havanın Yoğunluğu (kg/m^3)

V1 : Rüzgâr Hızı (m/s)

AT : Çarkın Süpürme alanı (m^2)

Denklem 4.5'te toplam kinetik enerji hesaplaması verilmiştir.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_W \cdot V_1^3 \quad (4.5)$$

Denklem 4.6'da güç hesaplaması verilmiştir.

$$P_{rmax} = c_P \cdot P_0 \quad (4.6)$$

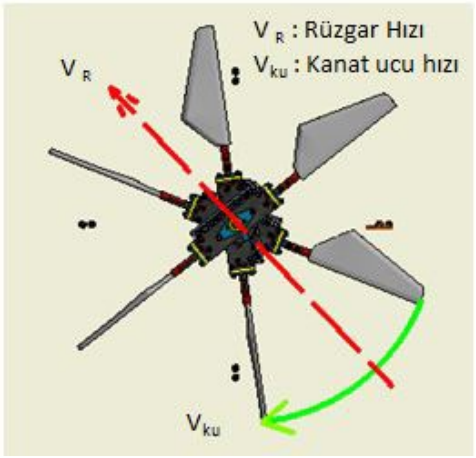
Denklem 4.7'de güç katsayısının hesaplaması verilmiştir.

$$c_P = \frac{P_{rmax}}{P_0} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (4.6)$$

c_p :Güç Katsayısı

Rüzgâr çarklarının performans katsayıları, kanadın hızının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu da uç hız oranı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

Şekil 4.12'de kanat uç hızının hesabı verilmiştir.



Şekil 4.12. Lamda kanat uç hız hesabı.

Denklem 4.7'de kanat uç hızının hesaplaması verilmiştir.

$$\lambda_0 = \frac{U}{V_1} = \frac{2\pi Rn}{60V_1} = \frac{\pi Rn}{30V_1} \tag{4.7}$$

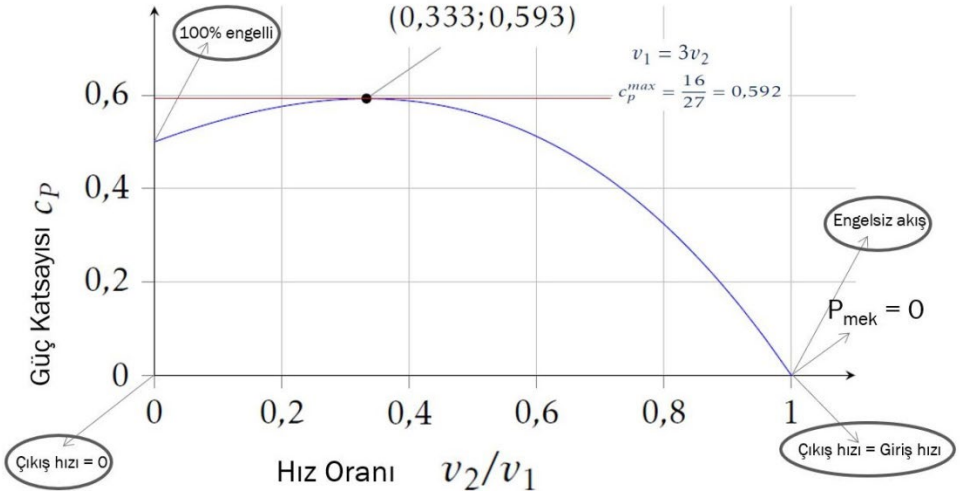
U : R yarıçaplı çemberin çevre uzunluğu

λ0 :Kanat Uç Hızı

V1 :Rüzgâr Hızı

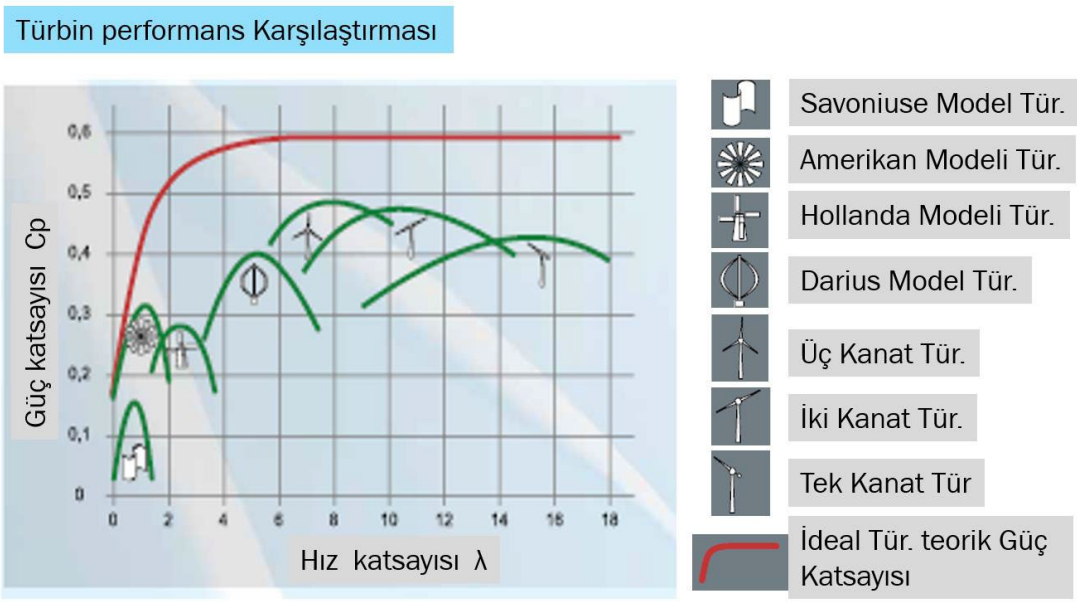
Rn :Çark Yarıçapı

Şekil 4.13'te Betz limiti grafiği verilmiştir.



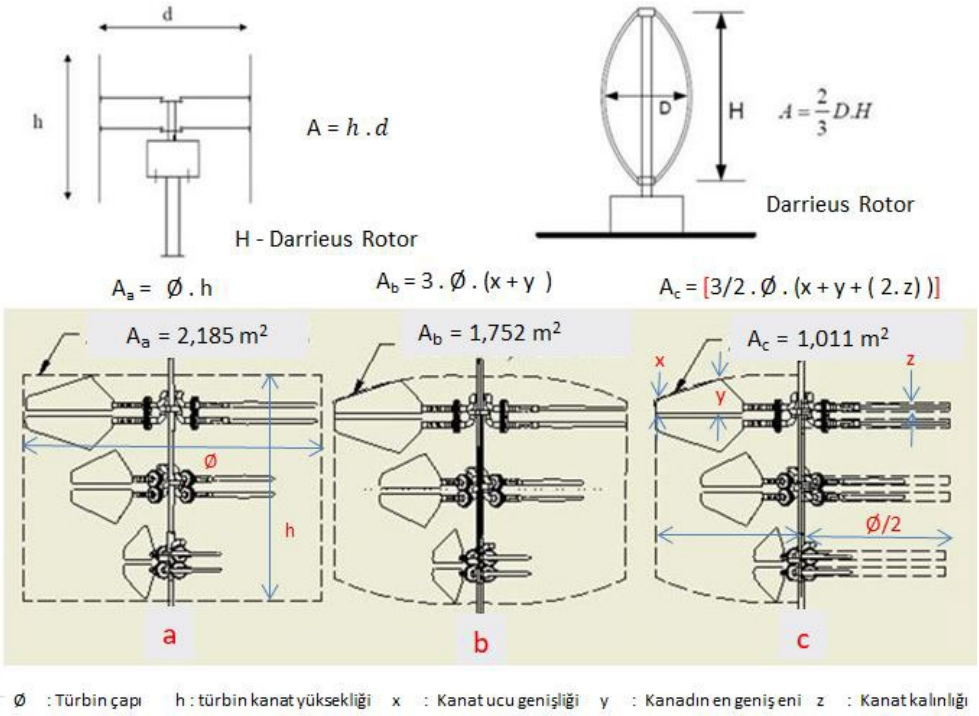
Şekil 4.13. Betz limiti grafiği.

Şekil 4.14'te türbin performans karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.14. Türbin performans karşılaştırması.

Şekil 4.15'te prototip süpürme alanı gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Prototip süpürme alanı.

Denklem 4.8'de maksimum güç hesaplaması verilmiştir.

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^3 \cdot A \qquad (4.8)$$

Rüzgâr Hızı V=10 m/s

Havanın Yoğunluğu ρ=1.223 kg/m^3

Teorik süpürme alanı a için Aa= Ø. h =2.185m^2 için Denklem (1.8) de konulursa

Pmaxb=791.78 W

Prototip teorik süpürme alanı b için Ab= 3. Ø (x + y) =1.752m^2 için denklem 4.8'de konulursa;

Pmaxb=634.87 W

Denklem 4.9'da prototip teorik süpürme alanı "b" için hesaplama verilmiştir.

$$c_{Pb} = \frac{P_{maxb}}{P_{maxa}} = \frac{634.87}{791.78} = 0.802 \quad (4.9)$$

Cpb Betz Limiti nedeniyle devre dışı kalır (Cpmax 0, 59 olabilir)

Prototip gerçek süpürme alanı c için Ac= [3/2 . Ø . (x + y + (2. z))] =1.022m2 için Denklem (1.8) de konulursa

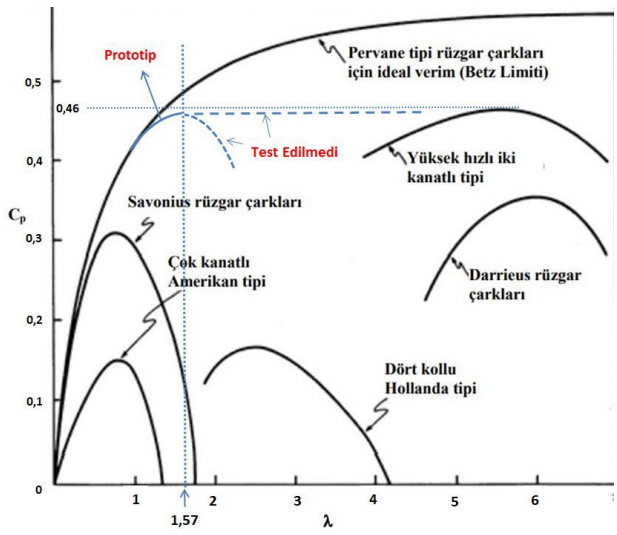
Pmaxc=370.34 W

Denklem 4.10'da prototip teorik süpürme alanı "b" için hesaplama verilmiştir.

$$c_{Pc} = \frac{P_{maxc}}{P_{maxa}} = \frac{370.34}{791.78} = 0.468 \quad (4.10)$$

Prototip türbinin λ'sını hesaplamak için rüzgâr hızı 10m/s olduğunda kanat ucunun aldığı yol PI*R/2 =2.985 m ve hava kütlesinin aldığı yol ise 1.9 m olmaktadır Kanat ucu hızı bu değerler göz önüne alındığında 15.7 m/s olmaktadır. Burada λ=15.7/10=1.57 bulunur.

Şekil 4.16'da güç katsayısının hesaplaması gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Hesaplanan güç katsayısı karşılaştırılması.

5. PROTOTİP RÜZGAR TÜRBİNİ

Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini üç ana aksamdan oluşmaktadır.

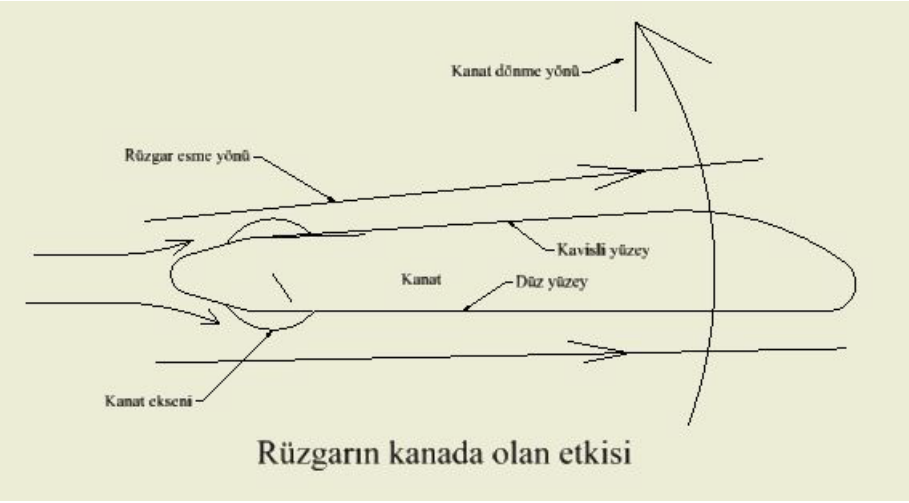
1. Fiber Kanatlar,
2. Taşıyıcı ve hareketli gövde kısmı
3. Tabanda güç aktarım ve Enerji üretim ünitesi yer almaktadır.

5.1. RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Uçak denen hava taşıtlarının nasıl ve neden uçabildikleri ve tonlarca yükü nasıl havada tutabildikleri sorularına verilen cevaplarda kavisli yüzeylerin hava akımı etkisiyle uygun açılarda çok güçlü kaldırma gücüne ulaşabilmesi kuralı sebep olarak gösterilmektedir. Bu gücün kaldırma kuvveti ve devirme kuvveti kombinasyonu; bir milin döndürülmesinde kullanılması fikrini doğurmuştur. Bu kombinasyonu oluşturabilmek için aynı eksende iki yüzeye ihtiyaç duyulmuştur.

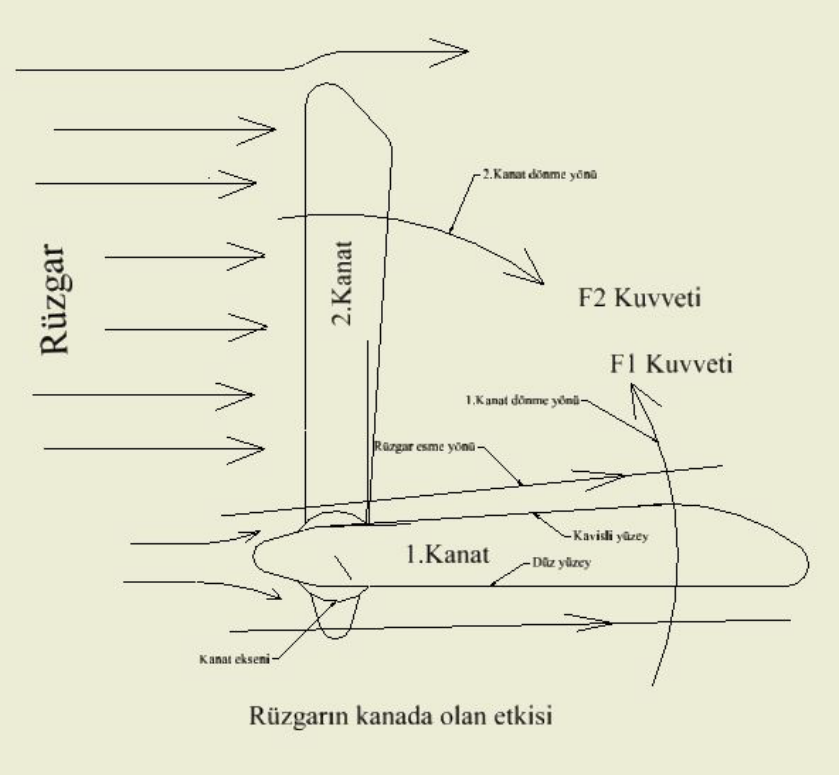
Uçak kanadının formunu koruyarak türbin için gerekli sistemin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kanadın kavisli ve düz yüzeyleri kaldırma F1 Kuvveti ve devirme F2 Kuvvet gücünün oluşması için kullanılmaktadır. Kanat ekseni etrafında kaldırma gücü kavisli yüzey (Şekil 5.1) yönünde oluşmaktadır.

Şekil 5.1'de kaldırma kuvveti verilmiştir.



Şekil 5.1. Kaldırma kuvveti F1.

Şekil 5.2’de devirme kuvveti gösterilmiştir.

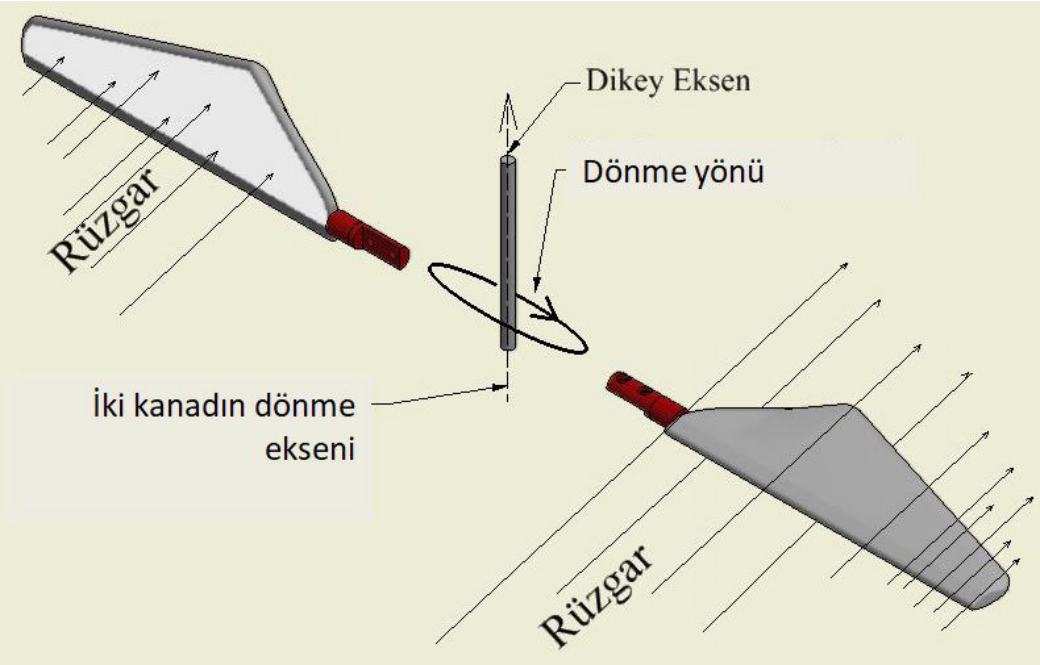


Şekil 5.2. Devirme kuvveti F2.

Aynı eksende iki adet kanat kullanıldığında ve düz yüzeyleri birbirine 90 derece konumlandırıldığında Şekil 5.2 de kanatlar fiziki olarak birbirine sabitlendiğinde oluşan kombinasyon aşağıda resimlendirilmiştir.

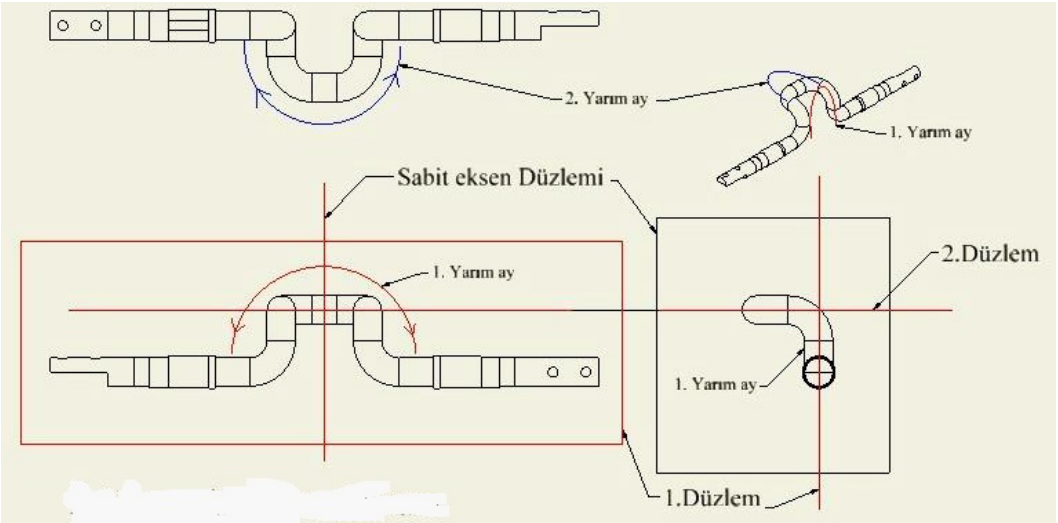
Birinci kanat rüzgârın etkisiyle F1 Kuvveti yönünde 2.Kanat ise F2 Kuvveti yönünde dönme eğilimindedir. Birbirine fiziki olarak bağlı olan kanatların gerçek dönme yönü güçlü olan kuvvet yönünde olacaktır.

Birinci kanadın kaldırma gücü ile ikinci kanadın devirme gücünü birbirine eşitlersek kanatlar dönmeyecektir. Bu iki kanadı aynı eksende bırakıp dik düzlemin her iki tarafta birer tanesi kalacak şekilde aralarını açarak konumlandırdıktan sonra (Şekil 5.3) kanatların aralarındaki bağlantının merkezinden bir eksen geçirdikten sonra bu eksende iki kanadı eşit mesafede ayıran düzlemi incelenecektir. Kanat eksenine 90 derece konumlandırılmış, birbirlerine karşı sabit açılı duran iki kanat, ortalarında oluşan yeni eksen etrafında dönme eğilimine girecektir. Şekil 5.3’te kanatların dönme ekseni verilmiştir.



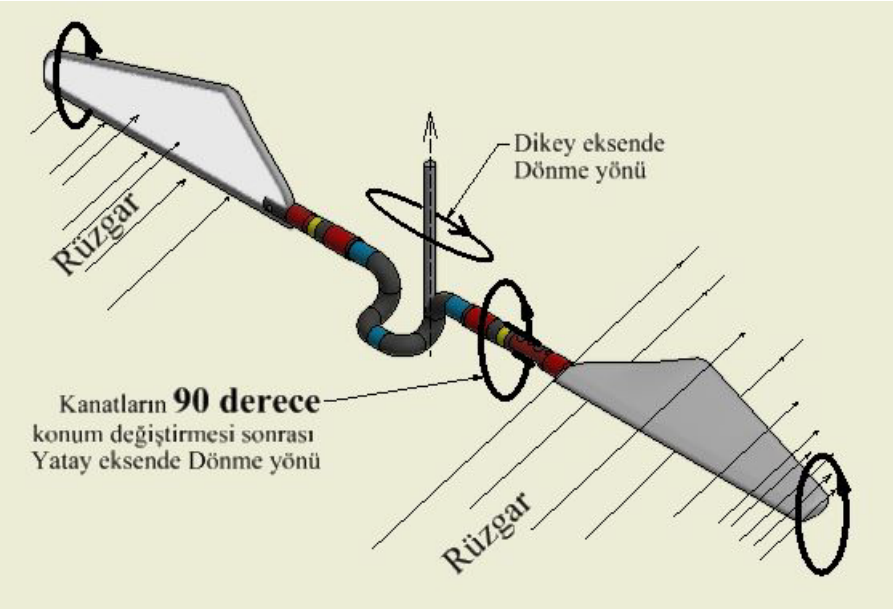
Şekil 5.3. İki kanadın dönme ekseni.

Bu iki kanat dönme eksenindeki milin sabit olması nedeniyle, bu mile değmeden birbirine fiziki olarak sabit bağlanması gerekmektedir. Bu işlem bir kanattan diğerine yarım ay bağlantısı aracılığıyla yapılacaktır. Ancak orta eksen etrafında dönen kanatlar dönme esnasında rüzgâra göre konumları değişmektedir. Bu değişiklik kanatların kendi eksenleri etrafında da dönme ihtiyacını doğurmaktadır. Yarımay bağlantısının orta yerinde sabit olan direğe çarpmaması için yarımay düzlemine 90 derece konumlu ikinci bir yarım ay bağlantısını gerektirmektedir. Şekil 5.4'te kanatların bağlantı elemanı verilmiştir.



Şekil 5.4. İki Kanat bağlantı elemanı.

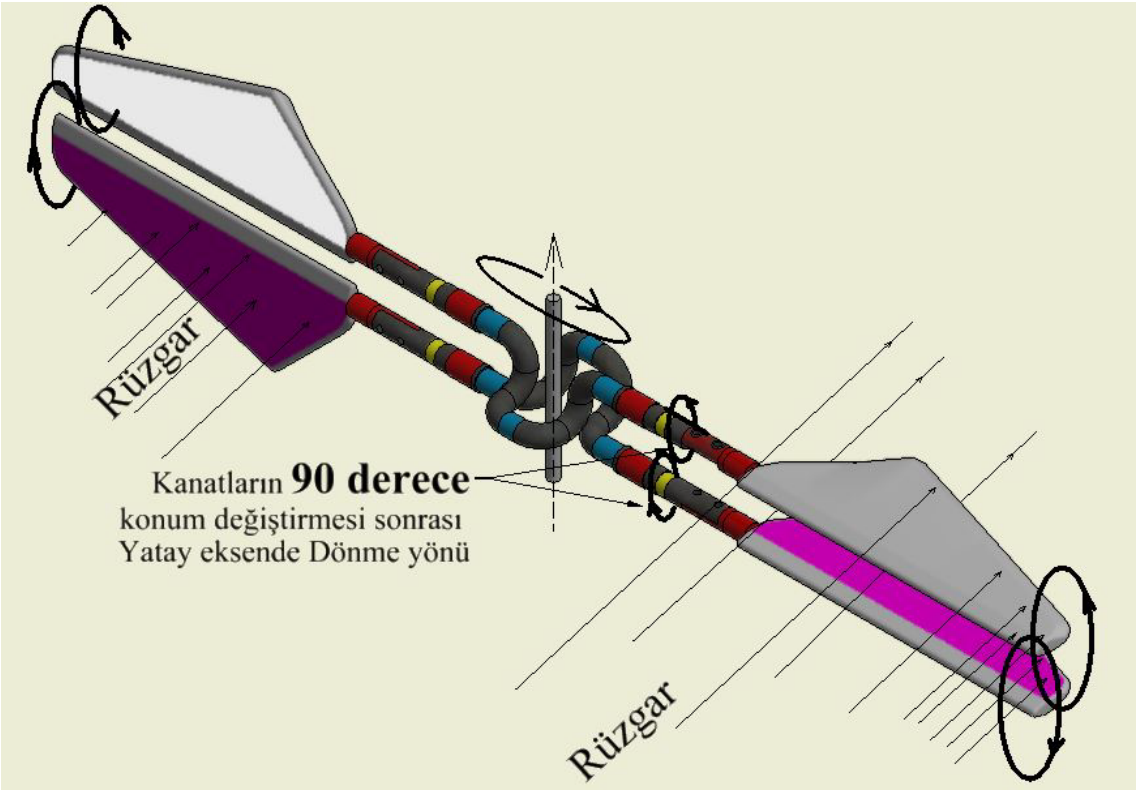
Şekil 5.5'te kanatların dönme yönleri verilmiştir.



Şekil 5.5. İki kanat dönme yönleri.

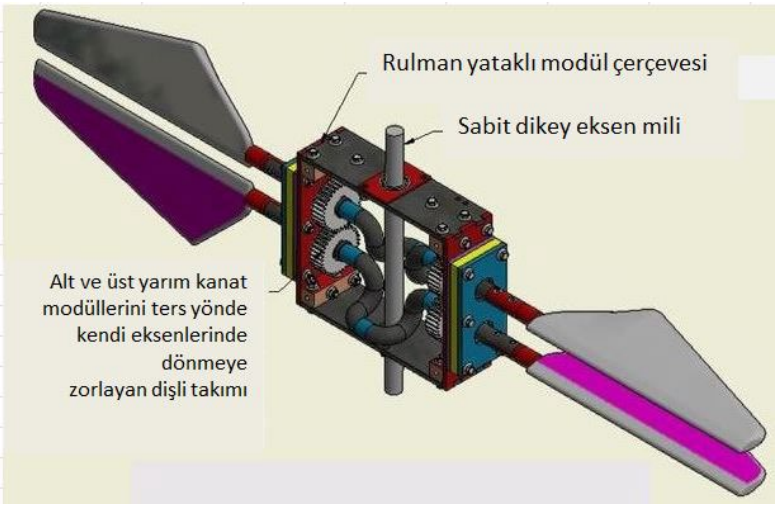
İki kanat birbirine fiziki olarak bağlı konumda iken rüzgârı alma yönü değişene kadar dikey eksen etrafında dönecektir. Dikey eksen etrafında 90 derece yer değiştirmesi sonucunda rüzgârı diğer yüzeyinden almaya başlayacak ve ani bir hareketle kendi ekseni etrafında 90 derece dönecektir. Bu hareket dikey eksen etrafında her turda 2 defa tekrar edecektir. Sistem bu haliyle türbinin yarım kanat modülünü oluşturmuştur (Şekil 5.5). Yarım kanat modülünün simetrik diğer yarısını oluşturmamız durumunda (Şekil 5.6) kanatlardan birinin rüzgârı düz yüzeyinden alırken simetrisi de aynı yüzeyden alacaktır. Kavisli yüzeyinden rüzgârı alan kanadın da simetrisini oluşturduğumuzda simetrisi de aynı yüzeyinden rüzgârı alacaktır. Oluşturulan simetri kanatlar simetrilerine ters yönde hareket edeceklerdir. Oluşan tam kanat dikey eksen etrafında dönerken rüzgâra karşı bir tarafta maksimum yüzey alanıyla mukavemet gösterirken diğer tarafta sadece iki kanadın en dar yüzeyleri rüzgâra muhatap olmaktadır.

Bu durum dikey eksenin her iki tarafında birbirinden farklı dönme kuvvetlerine sebep olmaktadır. Bu sayede oluşturulan tam kanat; rüzgârın yönünden bağımsız olarak hep aynı yönde dönmesi gözlemlenecektir. Şekil 5.6'da kanatların yatay eksende dönme yönü gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kanatların konum değiştirmesi sonrası yatay eksende dönme yönü.

Tam kanat sistemi, alt ve üst yarım kanat modüllerinin hareketlerinin ters yönde olmasını sağlayan dişli takımı ile donatılmıştır. Alt ve üst kanatları hareketli bir şekilde, bir çerçeve ile birbirine bağlayarak tasarlanan Rüzgâr türbininin döner kanat modülünü oluşturmuş oluruz. Şekil 5.7'de kanat modülü verilmiştir.

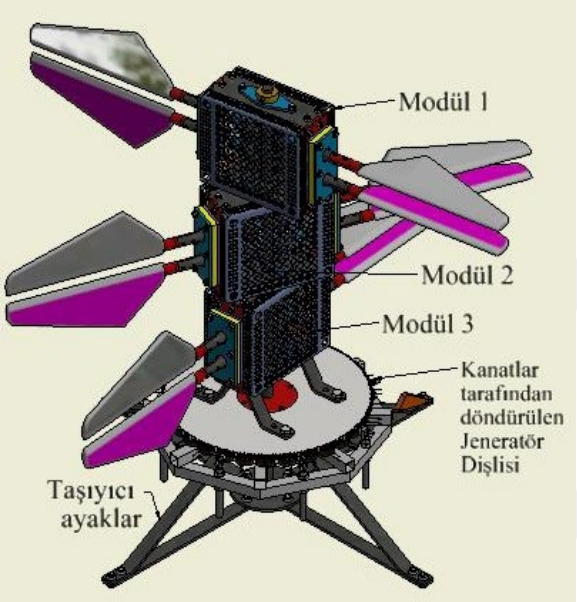


Şekil 5.7. Tam kanat modülü.

Tam Kanat Modülünü minimum üç adet olarak dikey eksen üzerinde 120 derece döndürerek montajının yapılması durumunda türbin için gerekli olan akıcı bir hareket

sağlamış oluruz.

Türbin jeneratörünü sürmek için Türbin tabanına kanatlar tarafından döndürülen Dişli Montajı gerçekleştirilmiştir. Kanatların hareket dişlileri dış etkenlere karşı korunmak üzere Modül kapaklarıyla donatılmalıdır. Jeneratör dişlisi güç aktarıcı ve devir yükseltici olarak kullanılabilir. Bu projede sadece güç aktarıcı olarak kullanılmıştır. Şekil 5.8'de tasarlanan DERT verilmiştir.



Şekil 5.8. Tasarlanan üç modüllü DERT.

5.2. PROTOTİP İMALAT AŞAMALARI

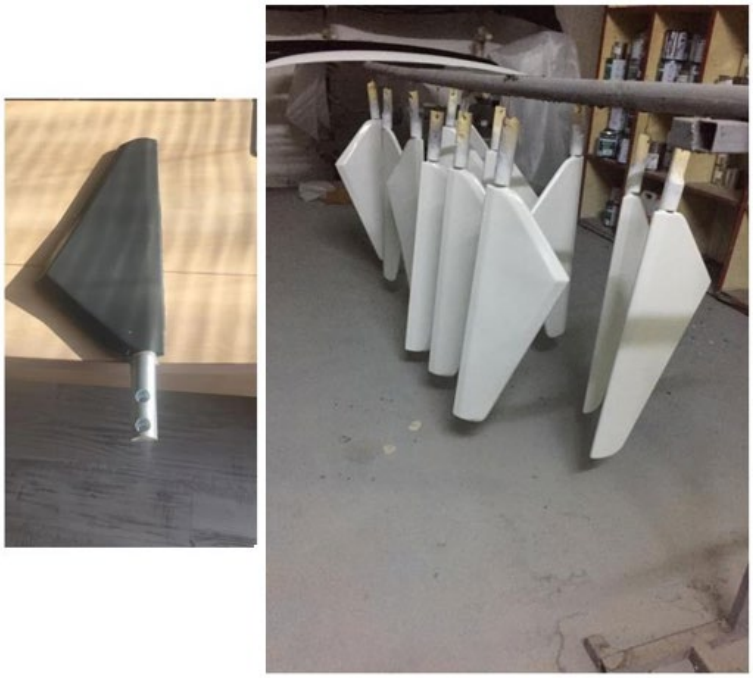
5.2.1. Kanat İmalatı

Kanat imalatı için formu tespit edilen kanadın döküm kalıbı imal edilmiştir. Kalıplar Polyester malzeme dökümüne hazırlanmıştır. Kanadın rijitliğini sağlamak için dökümden önce içine metal çubuklar yerleştirilerek kanat güçlendirilmiştir. Şekil 5.9'da kanatların kalıpları verilmiştir.



Şekil 5.9. Kanat kalıpları.

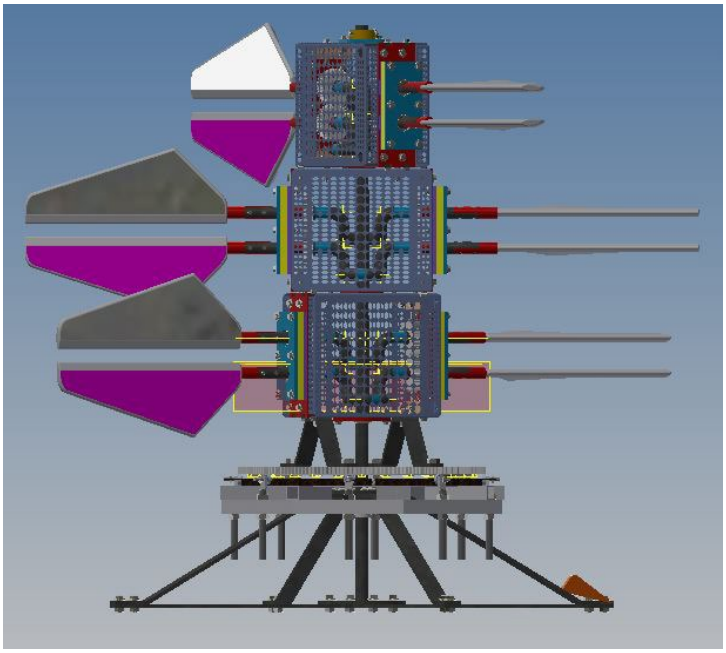
Kanatlar sağ ve sol yön diye iki ayrı kalıpta dökülmüştür. Kalıpların dökümü sonrası boyanarak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Kanat bağlantı parçaları kalıp içi demir aksamla beraber döküm öncesi yerleştirilmiştir. Şekil 5.10'da kanatlar gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Kanatlar.

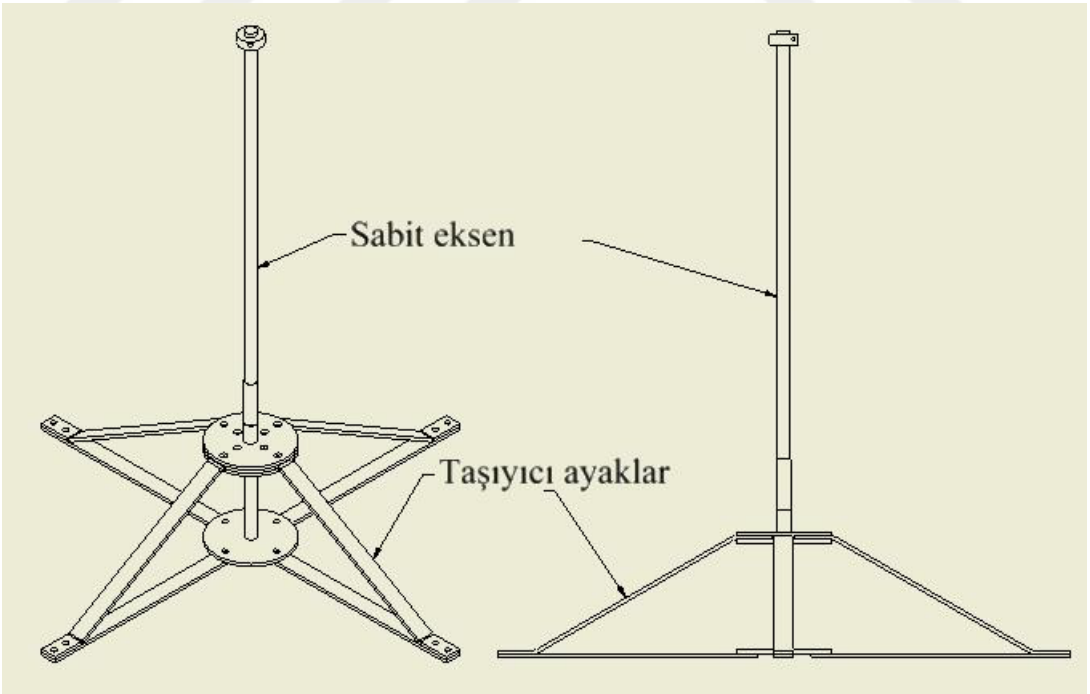
5.3. RÜZGAR TÜRBİNİ ANA TASARIMI

Şekil 5.11'de tasarımın son hali gösterilmiştir.



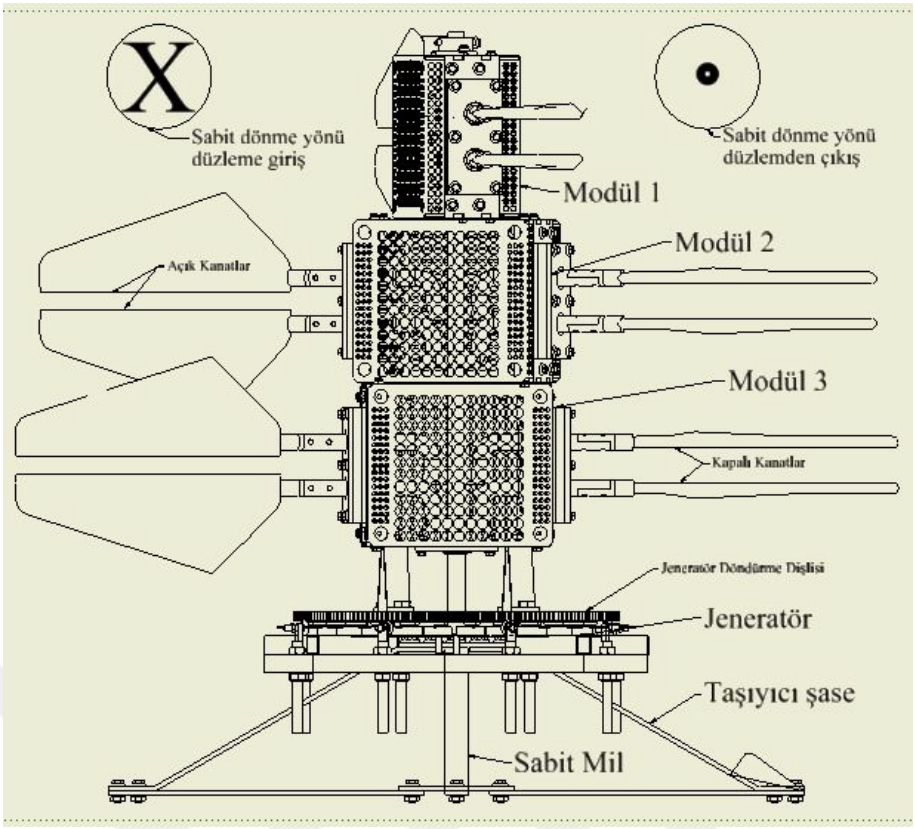
Şekil 5.11. DERT tasarımı son hali.

Şekil 5.12'de teknik çizim verilmiştir.



Şekil 5.12. DERT tasarımı teknik çizim.

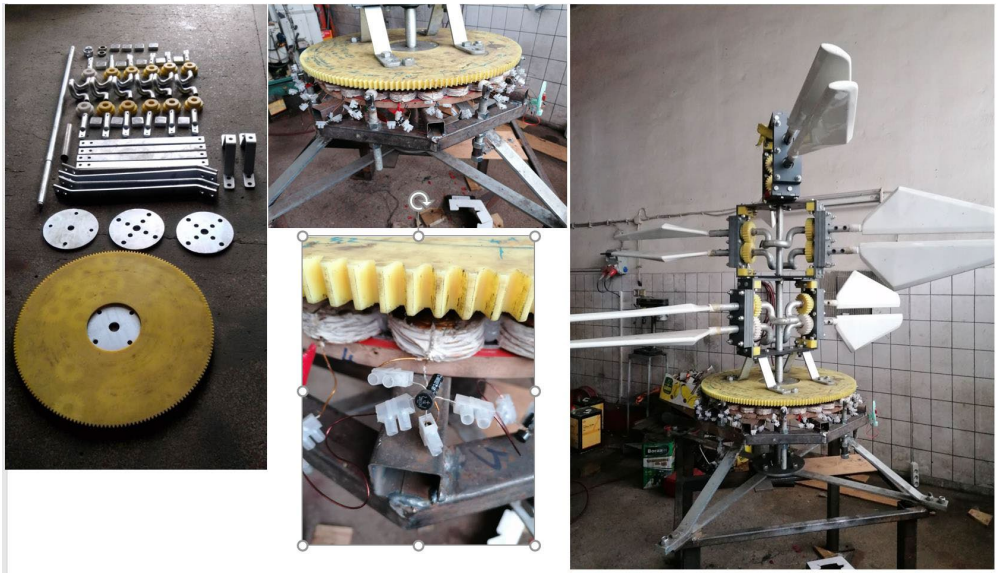
Şekil 5.13'te prototip tasarım gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Prototipi yapılan DERT tasarımı.

5.3.1. Türbin İmalatı

Prototip imalatı için gerekli olan tüm parçalar hazırlanıp bir araya getirildikten sonra prototip montajı yapılmıştır. Şekil 5.14'te prototipin tamamlanma evresi verilmiştir.



Şekil 5.14. Türbin prototipinin tamamlanması.

Ana gövde montajı yapıldıktan sonra kanatların fonksiyon testi yapılarak çalışmasından emin olunmuştur. Daha sonra jeneratör imal edilerek prototipe montajı yapılmıştır.

5.4. DERT PROTOTİP DENEMELERİ

Doktora tezine konu olan "Yeni Bir Kanat Yapısına Sahip Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini" tasarım ve imalatı gerçekleştirerek prototip üretimi yapılmıştır. Sistemin çalışırlığının tespitinin yapılabilmesi için belli hızlarda belli sürede türbinin çalıştırılması gerektiğinden uygun bir konuma koyarak rüzgârın esmesi beklenmektedir. Rüzgârın estiği varsayıldığında belli bir süre sabit hızda esmesi istenmektedir. Tespit edilen sabit hızda türbinin davranışı incelenmelidir. Daha farklı hızlarda hatta fırtınada da türbin test edilmelidir.

Yakın çevrede Rüzgâr tüneli olmaması sonucu farklı bir çözüm bulunması gerekliydi. Bu düşünceler doğrultusunda gerekli şartları sağlamak için prototip türbin bir arabanın üzerine monte edildi. Makul bir süre ve farklı hızlarda sürüş yapabilecek güzergahlar tespit edildi. Trafiğin hemen hemen hiç olmadığı zaman dilimlerinde testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.15'te test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Türbinin test düzeneği.

Bu sürüşlerde Türbin 0-120 km/h arasında farklı hızlarda ve ivmelenmeler de işlevini yerine getirmiştir. Türbin fonksiyon testini geçmiştir.

Türbinin dönmeye başlaması 3-4 m/s (10-14 km/h araç hızı) rüzgâr hızlarında olduğu görülmüştür. Rüzgâr hızı 15 m/s ve üzeri hızlarda (55 km/h ve üzeri) simetrik kanatların birbirinden ayrılma açısı 90 derecenin altına indiği tespit edilmiştir.

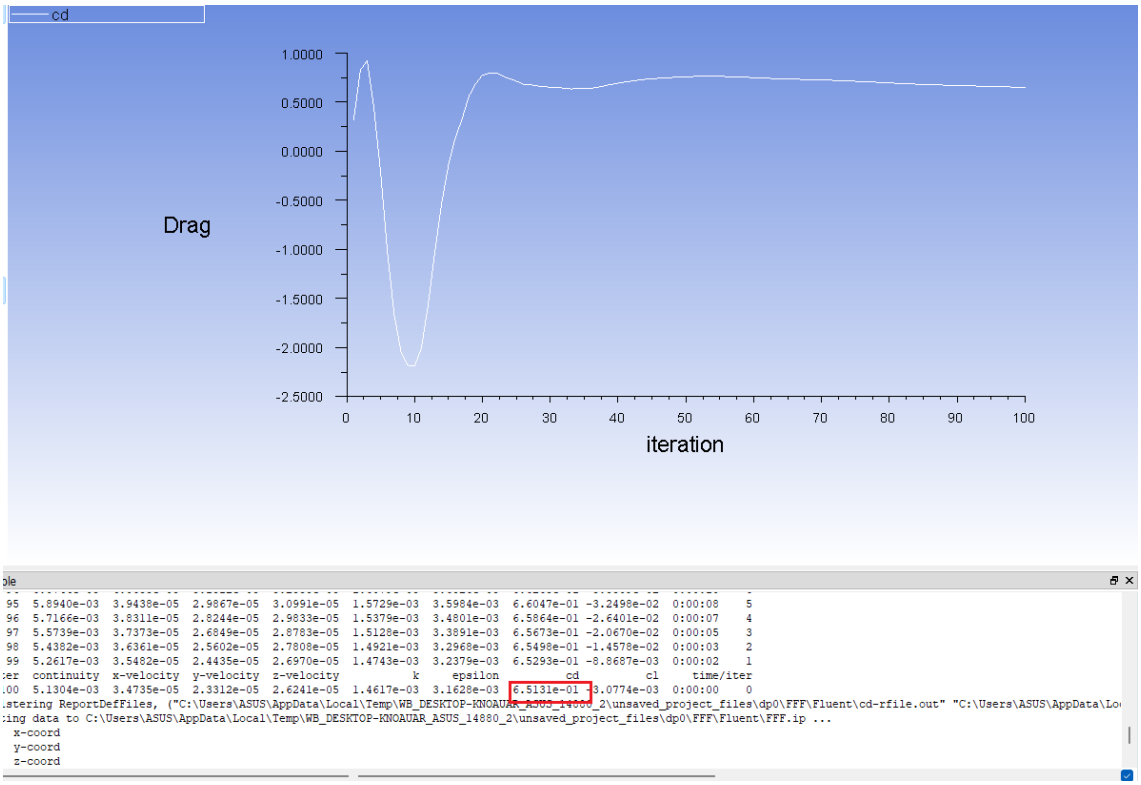
Türbin her zaman ve hızda hep aynı yönde dönmüştür. Türbinin rahat çalışması düşük rüzgâr hızlarında harekete başlamasında olumsuz katkısı olan kanatların ataletinin yüksek olduğu saptanmıştır. Testlerde ortaya çıkan olumsuzlukları iyileştirmede tasarımın parametreleriyle oynamak yeterli olacaktır.

Türbin yük altında da teste tabi tutulmuştur. Türbinin çarkına engelleyici mekanik baskı uygulandığında başlangıç rüzgâr hızı havanın durumuna bağlı olarak 7-8 m/s mertebelerine çıkmıştır. Simetrik kanatlar arasındaki açı 15-20 m/s (65-70 km/h) rüzgâr hızlarında 90 derecenin altına indiği gözlemlenmiştir. Ancak türbin hız kesmeden dönmesine devam etmiştir. Bu özellik prototip türbinden çekilen enerjiye bağlı olarak tepe hızı sınırlaması olduğunu göstermektedir. Bu hız türbin yükte dönerken Va hızında ise boşta dönerken Vb hızına erişmektedir (Vb hızı > Va hızı) ve rüzgâr hızı artsa dahi türbin hızı sınırlı kalmaktadır.

Rüzgârın saatteki hızının 40 ila 60 km arasında olması şiddetli rüzgâr, 60 km'nin üzerine çıkması ise rüzgâr fırtınası olarak nitelendirilir. Bu bilgiler ışığında imal edilmiş olan prototip fırtınada dahi enerji üretimine devam ediyor demektir.

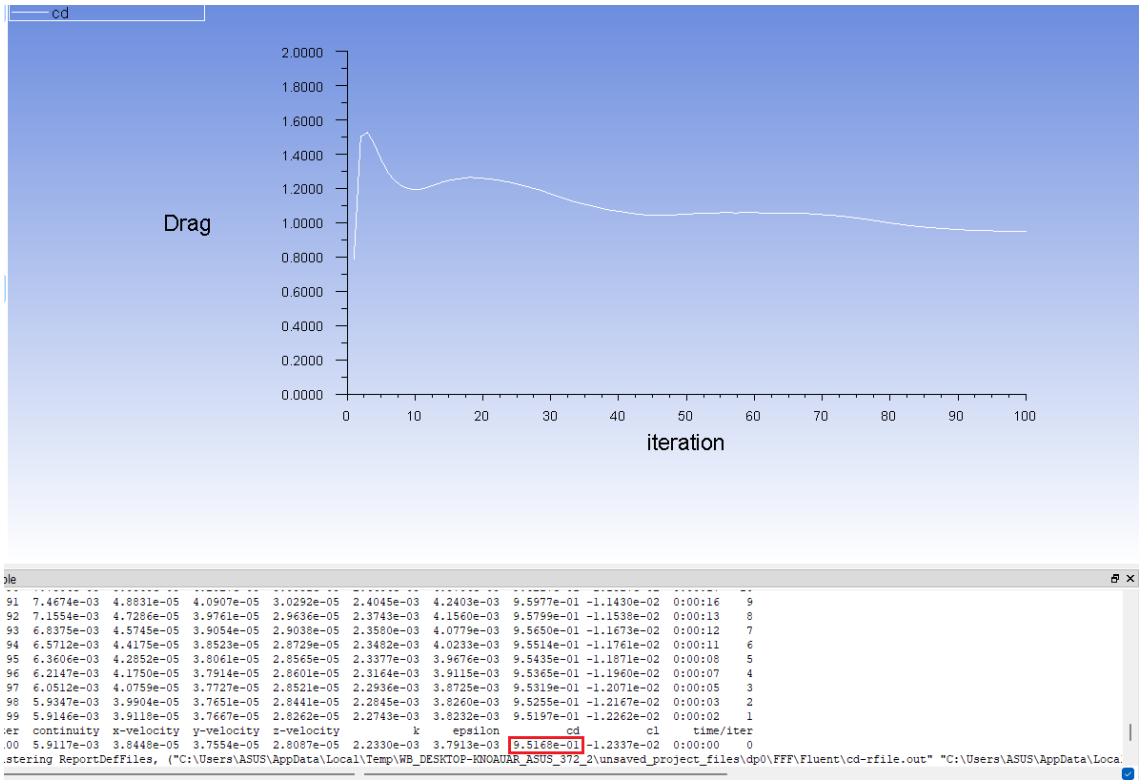
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan aerodinamik analizler neticesinde, bu tez çalışmasıyla ortaya çıkarılan özgün tasarımın piyasadaki kepçe ve yarı silindir şeklindeki tasarımlardan aerodinamik açıdan daha uygun olduğu görülmüştür. Şekil 6.1 ile Şekil 6.3 arasındaki şekillerde 3 farklı tasarıma ait analiz sonuçlarında elde edilen sürüklenme katsayıları görülmektedir. Şekil 6.1'de sürüklenme katsayısı gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Kepçe kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı.

Şekil 6.2'de yarım silindir kanat yapısına sahip türbinin sürüklenme katsayısı gösterilmiştir.

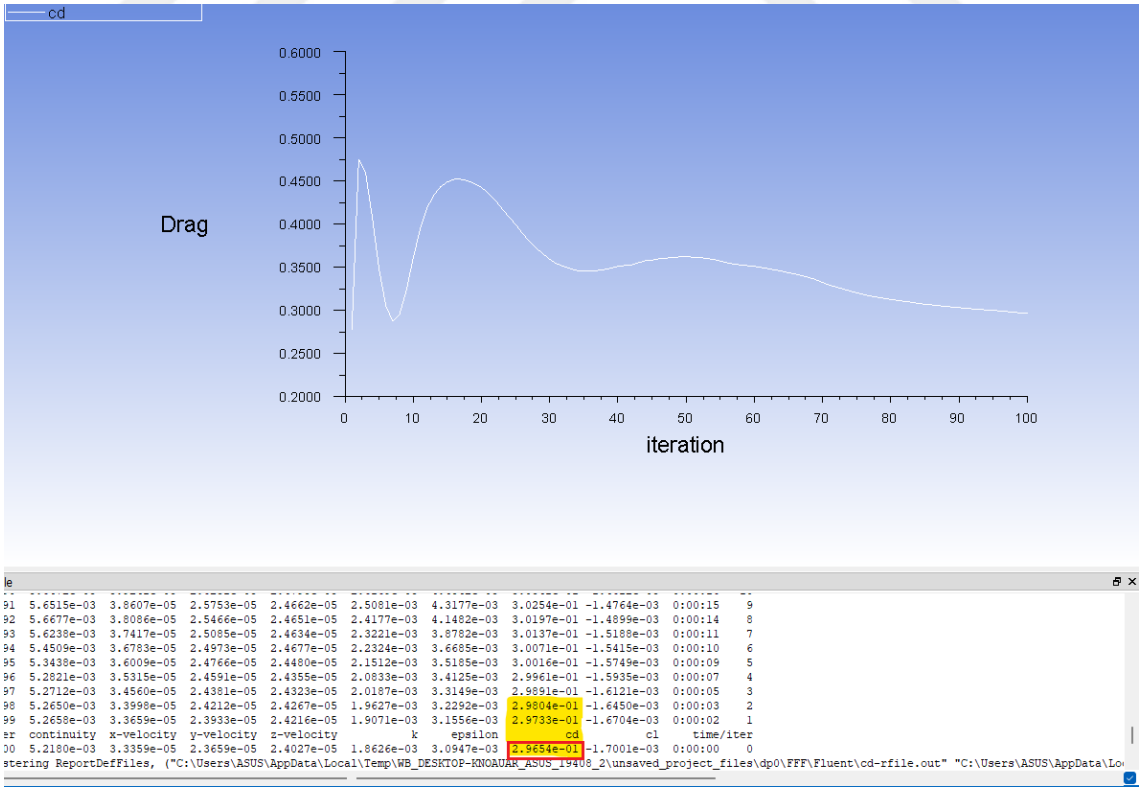


91	7.4674e-03	4.8831e-05	4.0907e-05	3.0292e-05	2.4045e-03	4.2403e-03	9.5977e-01	-1.1430e-02	0:00:16	9
92	7.1554e-03	4.7286e-05	3.9761e-05	2.9636e-05	2.3743e-03	4.1560e-03	9.5799e-01	-1.1538e-02	0:00:13	8
93	6.8375e-03	4.5745e-05	3.9054e-05	2.9038e-05	2.3580e-03	4.0779e-03	9.5650e-01	-1.1673e-02	0:00:12	7
94	6.5712e-03	4.4175e-05	3.8523e-05	2.8729e-05	2.3482e-03	4.0233e-03	9.5514e-01	-1.1761e-02	0:00:11	6
95	6.3606e-03	4.2852e-05	3.8061e-05	2.8565e-05	2.3377e-03	3.9676e-03	9.5435e-01	-1.1871e-02	0:00:08	5
96	6.2147e-03	4.1750e-05	3.7914e-05	2.8601e-05	2.3164e-03	3.9115e-03	9.5365e-01	-1.1960e-02	0:00:07	4
97	6.0512e-03	4.0759e-05	3.7727e-05	2.8521e-05	2.2936e-03	3.8725e-03	9.5319e-01	-1.2071e-02	0:00:05	3
98	5.9347e-03	3.9904e-05	3.7651e-05	2.8441e-05	2.2845e-03	3.8260e-03	9.5255e-01	-1.2167e-02	0:00:03	2
99	5.9146e-03	3.9118e-05	3.7667e-05	2.8262e-05	2.2743e-03	3.8232e-03	9.5197e-01	-1.2262e-02	0:00:02	1
er	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	cd	cl	time/iter	
00	5.9117e-03	3.8448e-05	3.7554e-05	2.8087e-05	2.2330e-03	3.7913e-03	9.5168e-01	-1.2337e-02	0:00:00	0

stering ReportDefFiles, ("C:\Users\ASUS\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-KNOAUAR_ASUS_372_2\unsaved_project_files\dp0\FFF\Fluent\cd-rfile.out" "C:\Users\ASUS\AppData\Loca

Şekil 6.2. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı.

Şekil 6.3'te özgün kanat yapısına sahip türbinin sürüklenme katsayısı verilmiştir.

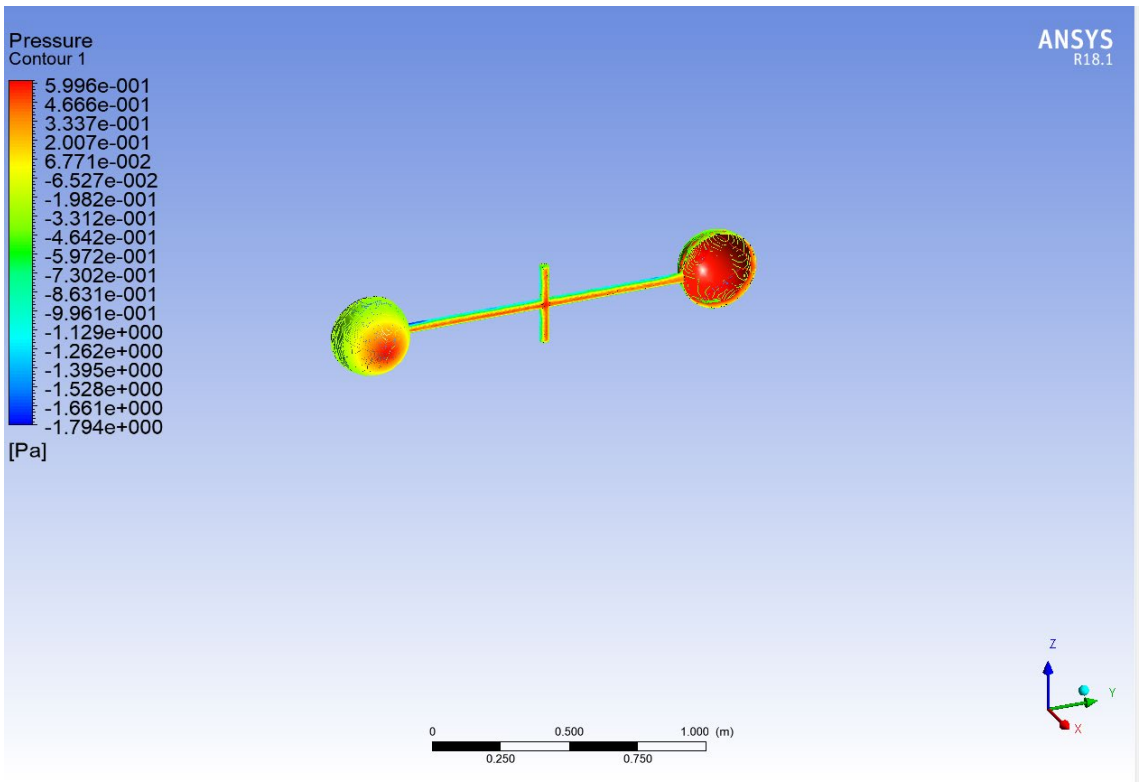


91	5.6515e-03	3.8607e-05	2.5753e-05	2.4662e-05	2.5081e-03	4.3177e-03	3.0254e-01	-1.4764e-03	0:00:15	9
92	5.6677e-03	3.8086e-05	2.5466e-05	2.4651e-05	2.4177e-03	4.1482e-03	3.0197e-01	-1.4899e-03	0:00:14	8
93	5.6238e-03	3.7417e-05	2.5085e-05	2.4634e-05	2.3221e-03	3.8782e-03	3.0137e-01	-1.5188e-03	0:00:11	7
94	5.4509e-03	3.6783e-05	2.4973e-05	2.4677e-05	2.2324e-03	3.6685e-03	3.0071e-01	-1.5415e-03	0:00:10	6
95	5.3438e-03	3.6009e-05	2.4766e-05	2.4480e-05	2.1512e-03	3.5185e-03	3.0016e-01	-1.5749e-03	0:00:09	5
96	5.2821e-03	3.5315e-05	2.4591e-05	2.4355e-05	2.0833e-03	3.4125e-03	2.9961e-01	-1.5935e-03	0:00:07	4
97	5.2712e-03	3.4560e-05	2.4381e-05	2.4323e-05	2.0187e-03	3.3149e-03	2.9891e-01	-1.6121e-03	0:00:05	3
98	5.2650e-03	3.3998e-05	2.4212e-05	2.4267e-05	1.9627e-03	3.2292e-03	2.9804e-01	-1.6450e-03	0:00:03	2
99	5.2658e-03	3.3659e-05	2.3933e-05	2.4216e-05	1.9071e-03	3.1556e-03	2.9733e-01	-1.6704e-03	0:00:02	1
er	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	cd	cl	time/iter	
00	5.2180e-03	3.3359e-05	2.3659e-05	2.4027e-05	1.8626e-03	3.0947e-03	2.9654e-01	-1.7001e-03	0:00:00	0

stering ReportDefFiles, ("C:\Users\ASUS\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-KNOAUAR_ASUS_19408_2\unsaved_project_files\dp0\FFF\Fluent\cd-rfile.out" "C:\Users\ASUS\AppData\Lo

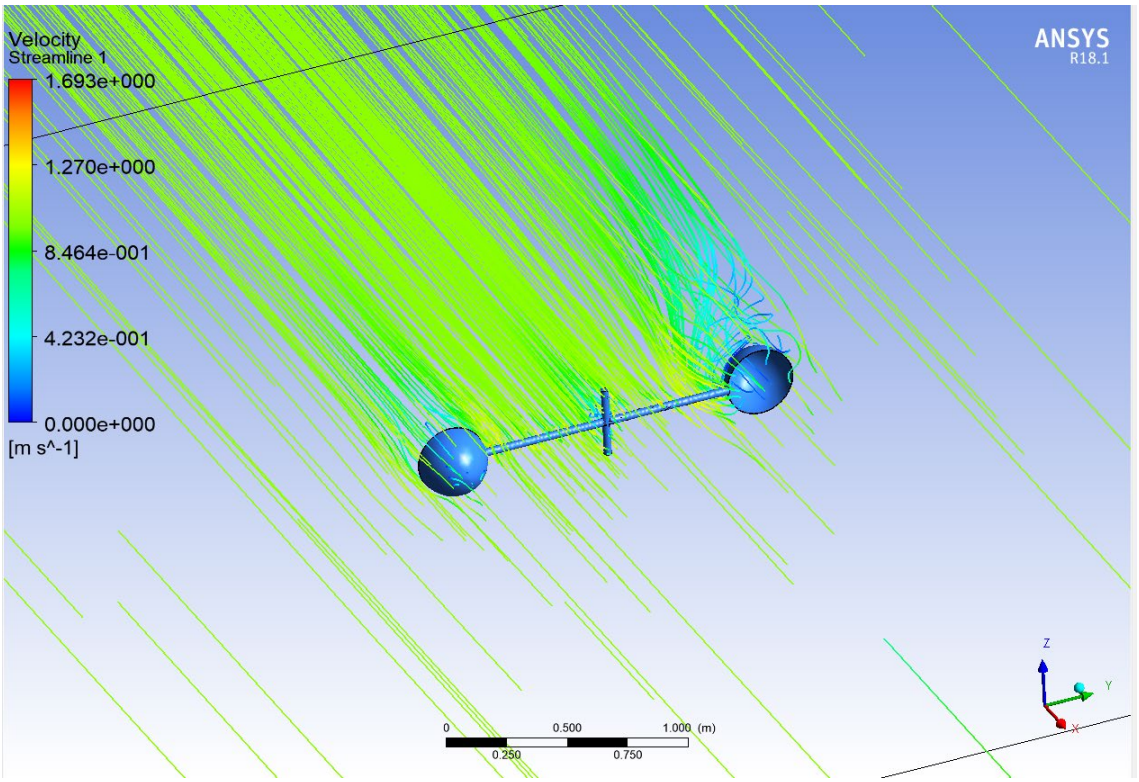
Şekil 6.3. Özgün kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı.

Ansys-Fluent programı kullanılarak yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri neticesinde, yukarıdaki şekillerde de görüleceği üzere, kepçe kanat tasarımına ait türbinin sürüklenme katsayısı 0,65, yarım silindir kanat profiline sahip türbinin sürüklenme katsayısı 0,95 ve bu çalışmada tasarımı ve üretimi yapılan türbinin sürüklenme katsayısı ise 0,29 olarak bulunmuştur. Önceki bölümlerde geçtiği üzere sürüklenme katsayısı (cd) bir tasarımın hava içerisindeki bağıl hareketi esnasında karşılaştığı direncin nicel bir ölçüsüdür ve itme gücü üreten elemanların ana görevi bu sürüklenmeyi yenmektir. Bu bağlamda özgün tasarımın diğer kanat profillerine göre daha aerodinamik olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca 3 farklı geometriye ait basınç ve hız konturları da şekil 6.4 ile şekil 6.9 arasındaki şekillerde görülmektedir. Şekil 6.4'te kepçe kanat yapısına sahip türbinin basınç dağılımı gösterilmiştir.



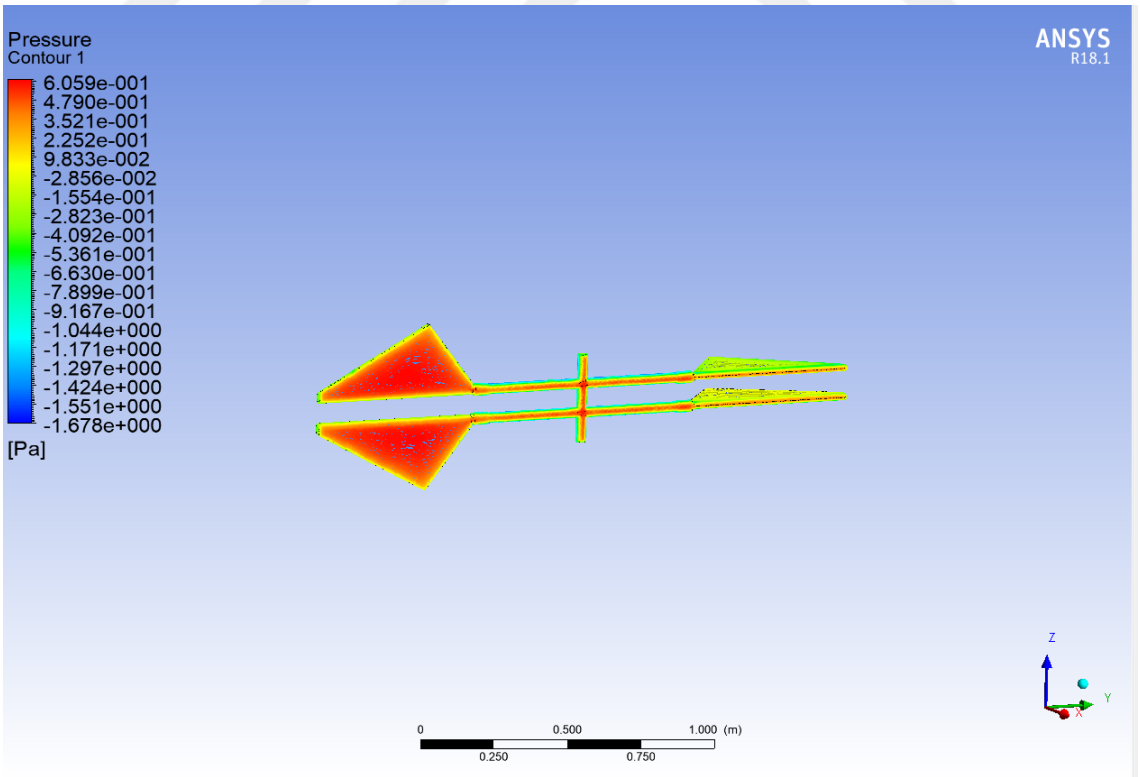
Şekil 6.4. Kepçe kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı.

Şekil 6.5'te kepçe kanat yapısına sahip türbinin hız dağılımı verilmiştir.



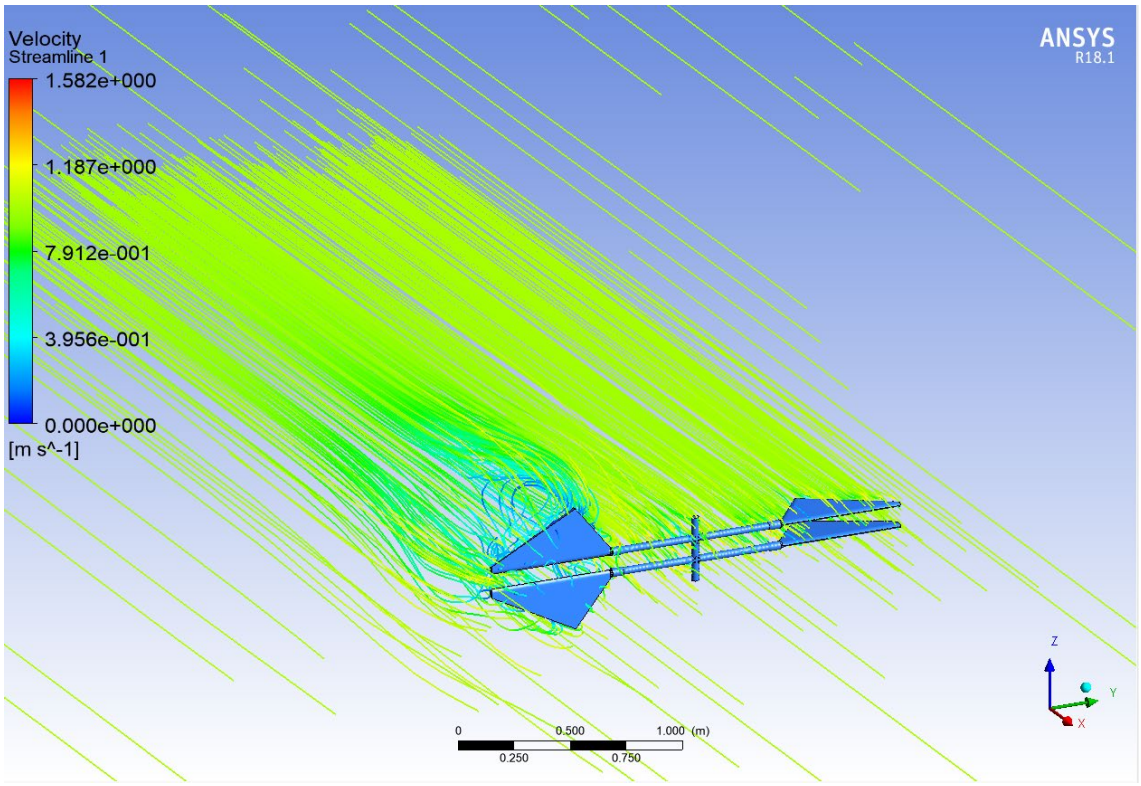
Şekil 6.5. Kepçe kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı.

Şekil 6.6'da özgün kanat yapısına sahip türbinin basınç dağılımı gösterilmiştir.



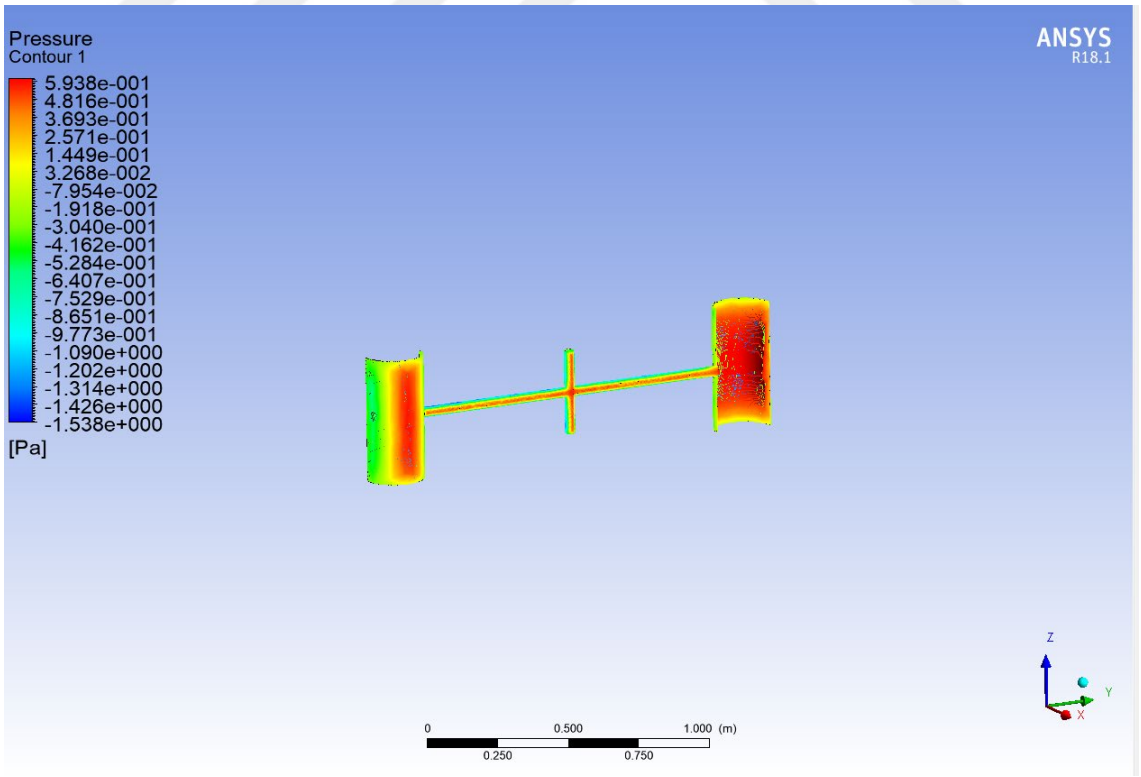
Şekil 6.6. Özgün kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı.

Şekil 6.7'de özgün kanat yapısına sahip türbinin hız dağılımı verilmiştir.



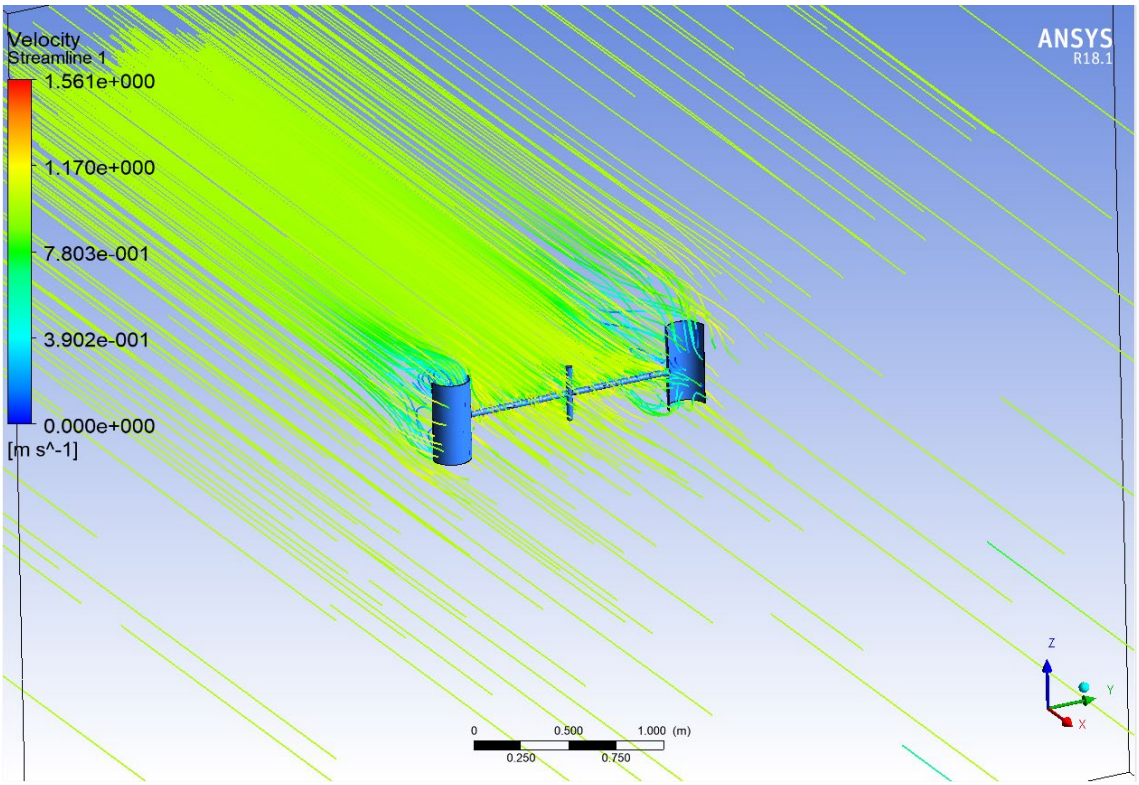
Şekil 6.7. Özgün kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı.

Şekil 6.8'de yarım silindir kanat yapısına sahip türbinin basınç dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.8. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin basınç dağılımı.

Şekil 6.9'da yarım silindir kanat yapısına sahip türbinin hız dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.9. Yarım silindir kanat profiline sahip türbinin hız dağılımı.

MW ölçülerinde üretim yapacak sistemlerin dünyada birkaç ülkede ve yine sayılı firmalar tarafından yapılıyor olması çevre sorunları etkisinin iyice hissedildiği zamanımızda ülkeler alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Bu alanda teknik şartnamelerin yerine getirilmesi durumunda üretilen sistemlere müşteri bulma ve pazarlama sıkıntısı olmayacaktır. Üzerinde çalıştığımız sistem, maliyet açısından üç kanat Türbin sisteminden %30-50 daha düşük maliyetli olacağı öngörülmektedir.

Yatay eksenli üç kanatlı türbinlerde teorik olarak tutulan rüzgârın enerji kapasitesinin maksimum %59'undan faydalanılabilir. Şu anda dünyada en verimli hali olan üç kanatlı sistemlerde verimlilik üretici firmadan firmaya farklılık göstermekle beraber, %30 ile maksimum %40-45 seviyelerinde seyretmektedir.

Var olan sistemlerin alt ve üst çalışabilme rüzgâr hızları ile yıl içerisinde çalışma süreleri kısıtlanmaktadır. Üzerinde çalışılan sistemin üst rüzgâr hızı sınırı olmadığı gibi alt sınırda 4-5 m/s rüzgâr hızlarında dahi üretim yapabilme kapasitesine sahip olmaktadır.

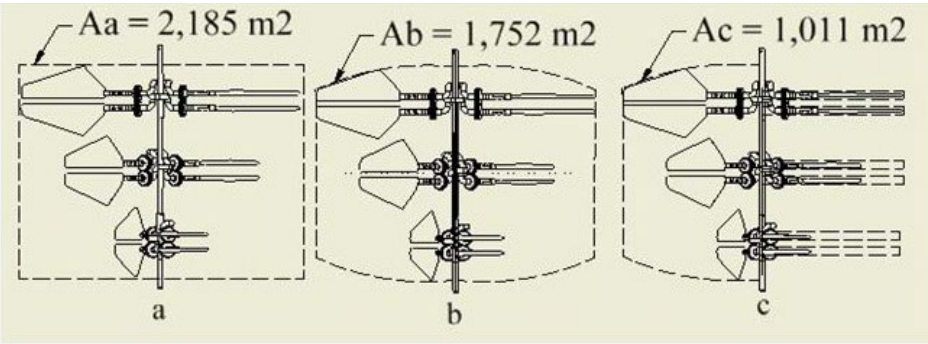
Var olan sistemlerde kurulum maliyetini yükselten etkenlerin başında: düzenli rüzgâra ulaşabilmek için ve yüksek kapasiteli sistemleri gerçekleştirebilmek için, tüm enerji üretim üniteleri yerden, coğrafi konuma göre 50-100-120 m yükseğe çıkarmak ve orada

çalışır halde tutabilmek kaygısıdır. Bu ağırlıklar, 10 ila 50 ton arasında değişebilmektedir. Bu ağırlıkların bu yüksekliklerde ve fırtınalar içinde tutabilmek için pahalı bir alt yapı inşası gereğini ortaya çıkmaktadır. Üretilen sistem dikey eksenli olup tüm ağırlık yapan üniteler yerde ve her zaman ulaşılabilir haldedir. Kanat sistemi rüzgâra karşı dönme hareketi ile karşı koyduğu için, rüzgârın devirme gücünü sıfır seviyesine yakın duruma getirmekte, sistem neredeyse hiçbir yere bağlanmadan dahi kendi ağırlığı ile ayakta kalıp üretimini devam ettirebilmektedir. İstenirse sistem bir yere bağlı olmaksızın çok kolay bir şekilde taşınabilir durumda inşa edilebilir. Sistem Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini olarak dizayn edilmiştir. Sistem "Havanın Uçakları kaldırma prensibi" kullanılarak keşfedilmiştir. Sistem kanatları, uçak kanadı formunda ve kompozit malzemeden imal edilmiştir. Kanat ebatları üretilmesi düşünülen enerji miktarına göre ölçülendirilebilir. Sistem, coğrafi konuma, hava şartlarına ve üretilmesi gereken enerji miktarına göre uyarlanma parametrelerine sahiptir.

Şekil 6.10'da a bölümü prototipin Betz teoremine göre süpürdüğü alanı temsil etmektedir. Prorotip Betz süpürme alanı 2.185 $m^{2'}$dir.

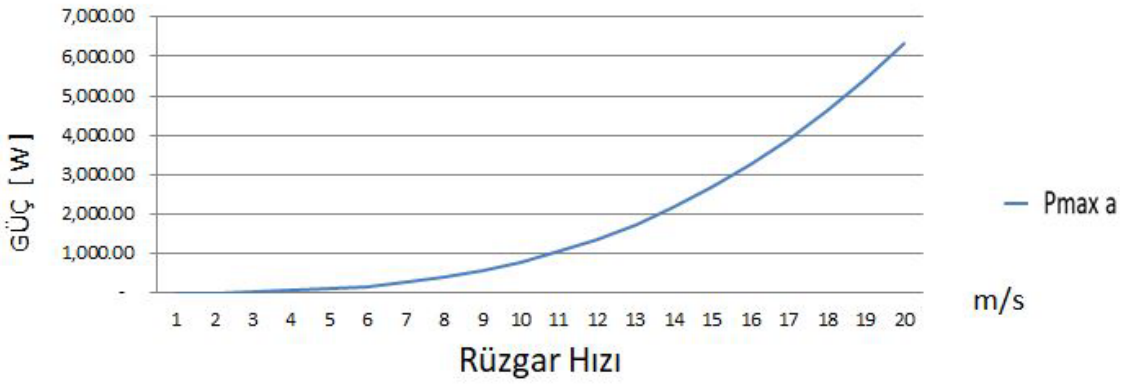
Şekil 6.10'da b bölümü prototipin tasarımına göre teorik süpürdüğü alanı temsil etmektedir. Prorotip Tasarım süpürme alanı 1.752 $m^{2'}$dir.

Şekil 6.10'da c bölümü prototipin tasarımına göre gerçek süpürdüğü alanı temsil etmektedir. Prorotip Tasarım süpürme alanı 1.022 $m^{2'}$dir.



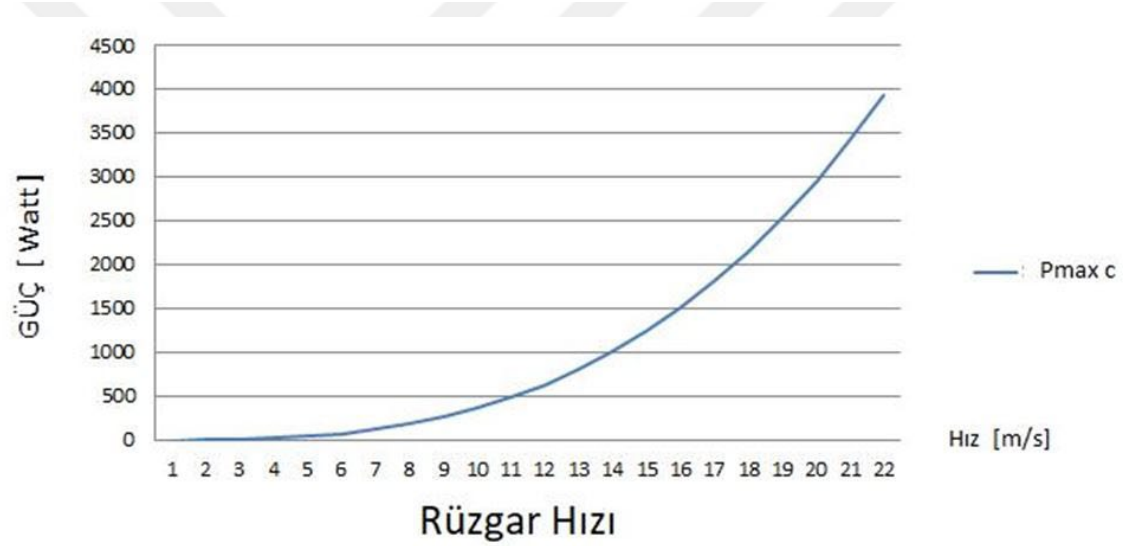
Şekil 6.10. Prototip süpürme alanı.

Gerçek süpürme alanı sistem çalışırken oluşmaktadır. Şekil 6.11'de Betz Limitine göre teorik süpürme alanından geçen rüzgârın hızına bağlı olarak sahip olduğu enerji miktarı gösterilmiştir.



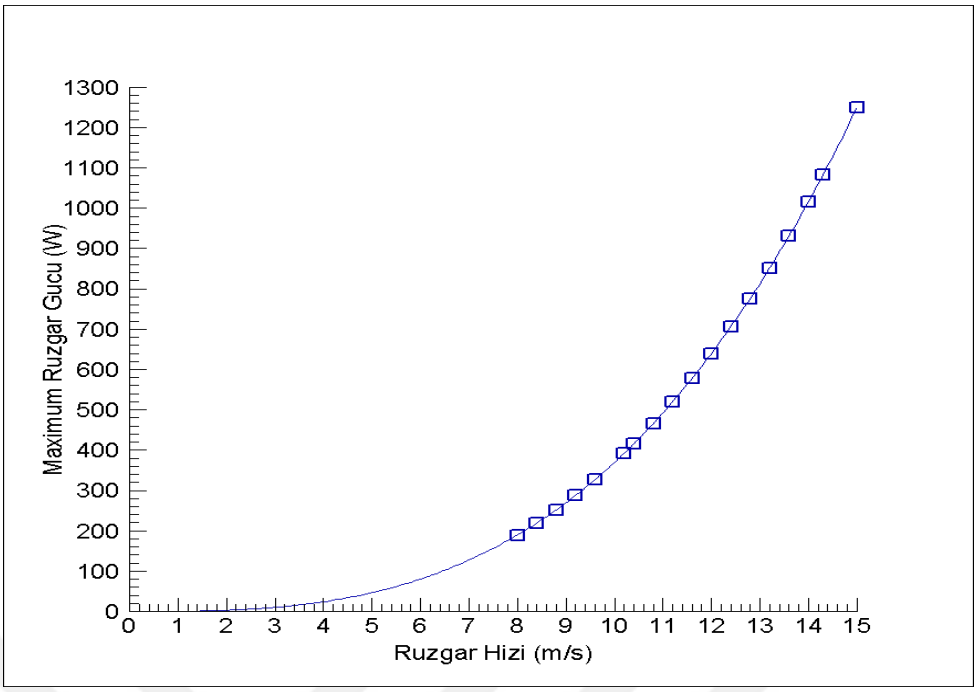
Şekil 6.11. Prototip teorik Betz süpürme alanı güç grafiği.

Şekil 6.12'de Prototip teorik süpürme alanından geçen rüzgârın hızına bağlı olarak sahip olduğu enerji miktarı gösterilmiştir.



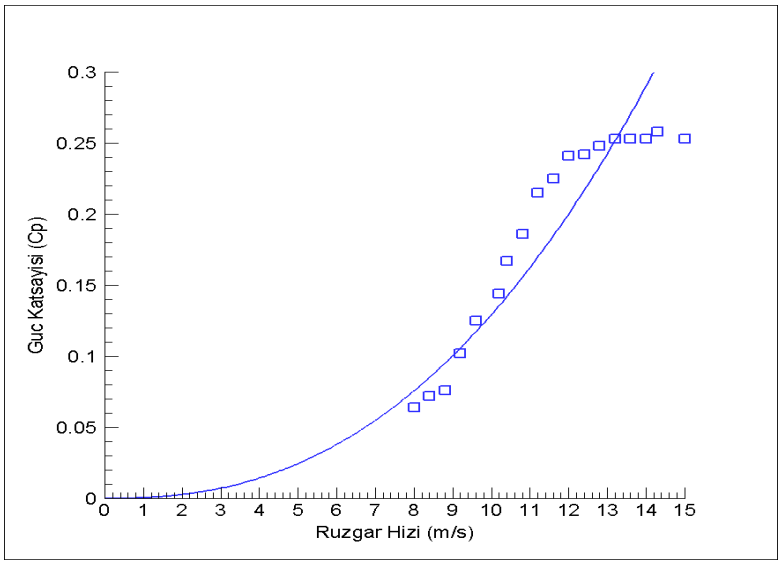
Şekil 6.12. Teorik prototip süpürme alanı güç grafiği.

Şekil 6.13'te Prototip gerçek süpürme alanından geçen rüzgârın, hızına bağlı olarak test sonucunda sahip olduğu, enerji miktarı grafik olarak gösterilmiştir. Burada Lamda değerine erişildiğinde üretilen gücün maksimum değeri korunarak yüksek hızlarda da maksimum güç üretilmeye devam edileceği, Şekil 6.1 Rüzgâr hızı arttıkça enerji üretimi "Power fit" ve "Polynomial fit" formüllerine göre arttığı görülmektedir. Türbin devir sayısı artan rüzgar hızıyla yükselmemekte sabit bir değere doğru yaklaşmaktadır.



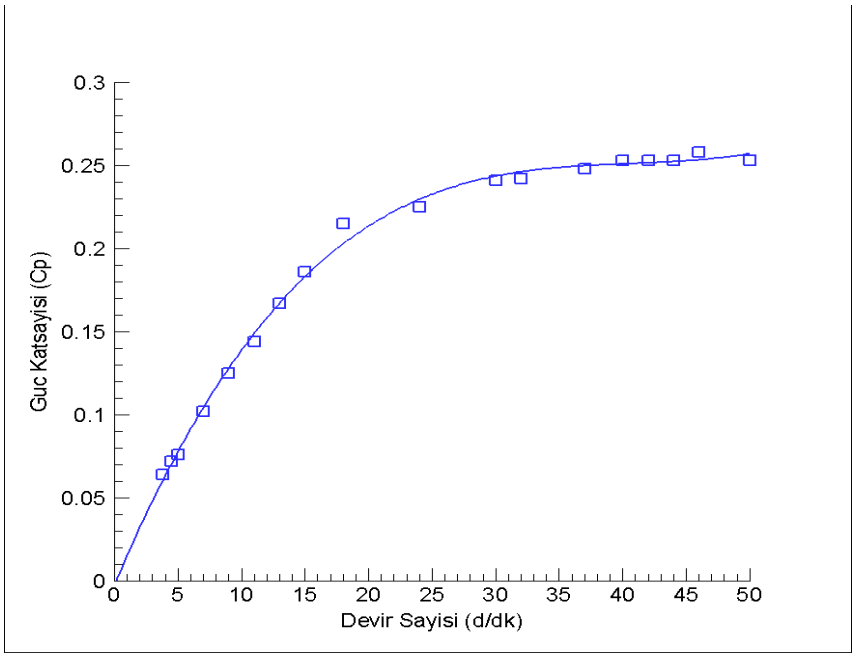
Şekil 6.13. Prototip süpürme alanında testlerde elde edilen güç grafiği.

Sistem lamda değerinin altında, hıza bağlı olarak üretilen güç devamlı ve düzenli artarken, lamda değerinin üzerindeki hızlarda sistemden çekilen güce bağlı olarak bir asimtot değerine teğet olacak şekilde devam edeceği tahmin edilmektedir. Çekilen güce bağlı olarak sabit açılarda dönen alt ve üst kanatların yüke bindiğinde türbin hızı yavaşlayacak kanatların açılmaya vakti olacak rüzgârdan daha fazla güç devşirecek yeni yükü karşılayacak durumda yeni açı ile dönmesine devam edecektir. Şekil 6.14'te Prototip Güç katsayısı rüzgâr hızına bağlı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Rüzgâr hızına göre hesaplanan güç katsayısı.

Hesaplanan güç katsayısı ile ölçülen güç katsayısı arasındaki fark prototipin imalatında kullanılan malzeme kalitesinden oluşması gerektiği kanaatine varılmıştır. Şekil 6.15'te Prototip güç katsayısı rüzgâr hızına bağlı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Devir sayısına göre hesaplanan güç katsayısı.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yeni bir fikirden yeni bir dizayn ile dikey eksenli yeni bir rüzgâr türbini geliştirilmiştir. Rüzgâr hızına ve rüzgârı karşılama durumuna göre kendiliğinden açılır kapanır kanat yapısıyla, dönme yönüne zıt rüzgâr direncini minimuma indiren bir yapıya sahiptir. Bu sayede kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü artmaktadır. Rüzgâr türbini fikri, prototip ürün haline dönüştürülmüştür. Mekanik testler, rüzgâr testleri yapılmış, türbinin çalışabilirliği ölçülmüştür. Literatürde ve uygulamalarda hali hazırda mevcut olan rüzgâr türbinleriyle karşılaştırıldığında güç katsayısı (cp) düşük rüzgar hızlarında yeterli olmadığı ancak yüksek rüzgar hızlarında ve fırtınalarda var olan sistemlerden çok daha iyi verime sahip olduğu görülmüştür.

Türbin rüzgârı enerji kaynağı olarak kullanırken, akarsular da enerji üretimi için kullanılabilir. Türbin kanatları suya daldırıldığında türbinin elektrik bileşenleri suyun dışında kalır ve bakımı kolaydır.

Bu prototip, tezin konusu olan dikey eksenli rüzgâr türbini çalışma prensibini doğrulamaktadır. İyileştirmeler her zaman yapılabilir ve yapılmalıdır. Sistem düşük rüzgâr hızlarında üretim yapabilmesi, imalat için kullanılan malzemelerin hafif olmasıyla doğru orantılıdır. Montajlı olarak bir yerden alıp başka bir yere nakletmek mümkündür.

8. KAYNAKÇA

[1] Anonim, (2022, 9 Ağustos). [Online]. Erişim: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/0feb62b69f16e02_ek.pdf

[2] Ç. Şen, "Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgâr enerjisi ile karşılanması", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2003.

[3] S. O. Amrouche, D. Rekioua, T. Rekioua, ve S. Bacha, "Overview of energy storage in renewable energy systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, c. 41, ss. 20914-20927, 2016.

[4] R. L. Busby, *Wind Power* (First Edition). Oklahama: Penn Well Corporation, 2012.

[5] H. Öztürk, *Rüzgâr Enerjisi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı*. Ankara: Teknik Yayın Evi, 2008.

[6] IRENA (International Renewable Energy Agency), *Renewable Energy and Jobs Annual Review*. (Rapor No: 978-92-9260-364-9). Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.

[7] E. Hau ve H. von Renouard, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Berlin: Springer, 2003

[8] N. Nurbay, "Türkiye'de rüzgar enerjisinin kullanımı ve İzmit'in meteorolojik şartlarına uygun optimum rüzgar türbini seçimi", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2005.

[9] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://www.yenienerji.com/arastirma-gorus/ruzgar-turbinlerinin-tarihsel-gelisimi-3#:~:text=Elektrik%20%C3%BCretimi%20amac%C4%B1yla%20r%C3%BCzgar%20t%C3%BCrbini,fazla%20say%C4%B1da%20dar%20kanattan%20olu%C5%9Fmaktayd%C4%B1.

[10] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://windeurope.org/intelligence-platform/reports/

[11] H. N. Bayraç, "Küresel rüzgâr enerjisi politikaları ve uygulamaları", *Uludağ Journal of Economy and Society*, c. 30, ss. 37-57, 2011.

[12] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-yenilenebilir-enerji

[13] M. Yerebakan, *Rüzgar Enerjisi*. İstanbul: İTO Yayınları, 2001.

[14] E. Acar, "Türkiye'deki rüzgâr ve hidroelektrik enerji potansiyellerinin karşılaştırılması ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2008.

[15] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://repa.enerji.gov.tr/REPA/

[16] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://gwec.net/global-wind-report-2021/

[17] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://www.ren21.net/

[18] H. Öztürk, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı*. Ankara: Teknik Yayınevi, 2008.

[19] M. Durak ve S. Özer, *Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama* (1.Baskı). Ankara:, İmpress Baskı, 2008.

[20] D. Chiras, *Power from the Wind-: A Practical Guide to Small Scale Energy Production*. Missouri: New Society Publishers, 2017.

[21] J. R. Fanchi ve C. J. Fanchi, *Energy in the 21st Century*. Singapore: World scientific publishing Company, 2016.

[22] O., Fakorede, Z., Feger, H., Ibrahim, A., Ilinca, J., Perron ve C., Masson, "Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 65, ss. 662-675., 2016.

[23] P., Gipe, "Wind power", *Wind Engineering*, c. 28, sayı. 5, ss. 629-631.

[24] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://docplayer.biz.tr/2475413-Turkiye-ruzgar-enerjisi-potansiyeli-ve-enerji-profilimizdeki-yeri.html

[25] M. Sathyajith, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis And Economics*. Kerala: Springer, 2006.

[26] M. S. Ataseven, "Samsun ilindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve farklı rüzgar türbinleri kullanılarak enerji analizlerinin araştırılması", Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2019.

[27] Y. Ostovan, "Rüzgar türbinleri için kanatçıklar: Aerodinamik performans ve uç girdabı davranışı üzerinde deneysel bir çalışma", Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2017.

[28] K. Özdaş, *Tarım Alet ve Makinaları*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Yayınları, 1995.

[29] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: https://docplayer.biz.tr/15947835-Ruzgar-enerj-s-nde-kullanilan-jeneratorler-n.html

[30] Anonim, (2022, 10 Ekim). [Online]. Erişim: http://www.ruzgarsempozyumu.org/wp-content/uploads/2014/08/0161.pdf

[31] Ö. Gürbüz Öger, "Pelton tipi rüzgâr türbini kullanarak elektrik enerjisi üretme", Yüksek Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.

[32] Anonim, (2022, 10 Ağustos). [Online]. Erişim: http://www.eie.gov.tr/eie-web/duyurular/YEK/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html

[33] Anonim. (2022, 24 Temmuz). [Online]. Erişim: https://tureb.com.tr/eng/lib/uploads/a894074504a33b99.pdf

[34] Anonim. (2022, 24 Temmuz). [Online]. Erişim: https://www.yenienerji.com/haberler/tureb-den-turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu#:~:text=Rapora%20g%C3%B6re%2C%20r%C3%BCzgarda%20toplam%20kurulu,g%C3%BCc%C3%BC%209.305%20MW'a%20y%C3%BCkseldi.

[35] Anonim. (2022, 24 Temmuz). [Online]. Erişim: https://www.tureb.com.tr/bilgi-bankasi/turkiye-res-durumu

[36] Anonim. (2022, 24 Temmuz). [Online]. Erişim: https://www.enerjiatlasi.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html

[37] U. Elibüyük ve İ. Üçgül, "Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri", *Yekarum*, c. 2, sayı. 3, ss. 1-14, 2014.

[38] M. A. Moreno-Armendáriz, C. A. Duchanoy, H. Calvo, E. Ibarra-Ontiveros, J. S. Salcedo-Castañeda, M. Ayala-Canseco ve D. Garcia, "Wind booster optimization for on-site energy generation using vertical-axis wind turbines", *Sensors*, c. 21, sayı. 14, ss. 4775, 2021.

[39] A. Iqbal, V. Chitturi ve K.V.L. Narayana, "A novel vertical axis wind turbine for energy harvesting on the highways", *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies*, c. 1, ss. 1-5, 2019.

[40] J. Ramarajan ve S. Jayavel, "Performance Improvement in Savonius Wind Turbine by Modification of Blade Shape", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, c. 15, sayı. 1, ss. 99-107, 2022.

[41] R. N. Jarudkar ve Y. P. Deshmukh, "Measurement and analysis for the improvement of efficiency and power of Savonius vertical axis wind turbines without dimples and fins", *Materials Today: Proceedings*, c. 62, ss. 2016-2020, 2022.

[42] D. Prabowo, D. S. Wijayanto, I. Widiastuti, "Experimental Study of Incorporating Fins on the Rotor Blades of Savonius Wind Turbine", *Materials Science and Engineering*, c. 288, sayı. 012046, 2018.

[43] J. Y. Zhu, L. Zhang, Q. L. Qu ve P. Q. Liu, "Experimental investigation of aerodynamic characteristics for three typical micro wind turbines at low reynolds number", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, c. 13, sayı. 4, ss. 1143-1148, 2020.

[44] H. L. Thadani, F. D. Zaaba, M. R. M. Shahrizal ve Y. I. Go, "Design and performance

evaluation of vertical axis wind turbine for wind energy harvesting at railway'', *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, c. 18, sayı. 2, ss. 190-217, 2021.

[45] K. Cox ve A. Echtermeyer, "Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade", *Energy Procedia*, c. 24, ss. 194-201, 2012.

[46] J. Li, J. Zhou ve B. Chen, "Review of wind power scenario generation methods for optimal operation of renewable energy systems", *Applied Energy*, c. 280, sayı. 115992, 2020.

[47] O. O. Mojola, "On the aerodynamic design of the Savonius windmill rotor", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, c. 21, sayı. 2, ss. 223-231, 1985.

[48] T. K. Aldoss ve Y. S. H Najjar, "Further Development of the Swinging Blade Savonius Rotor", *Wind Engineering*, c. 9, sayı. 3, ss. 165-170, 1985.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mahmut GÜR

Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

ÖĞRENİM DURUMU

Mezun Olunan Öğretim Kurumu	Berlin Teknik Üniversitesi
Tarih:	1989
Mezun Olunan Bölüm/Unvan	Elektroteknik (Lisans Eğitimi)
Mezun Olunan Öğretim Kurumu	Berlin Teknik Üniversitesi
Tarih	1991
Mezun Olunan Bölüm/Unvan	Elektroteknik (Yüksek Lisans Eğitimi)
Mezun Olunan Öğretim Kurumu	Berlin Teknik Üniversitesi
Tarih	1994
Mezun Olunan Bölüm/Unvan	Elektroteknik (Master Eğitimi)
Mezun Olunan Öğretim Kurumu	Anadolu Üniversitesi/Açıköğrdetim Fakültesi/
Tarih	2014
Mezun Olunan Bölüm/Unvan	Elektrik Enerjisi Üretimi, İletim ve Dağıtımı
Mezun Olunan Öğretim Kurumu	Anadolu Üniversitesi/İktisat Fakültesi
Tarih	2017
Mezun Olunan Bölüm/Unvan	Kamu Yönetimi
Tarih	1995-2002
Yer	İstanbul
Kurum/Kuruluş	Özel Kuruluş
Pozisyon	Enerji Grup Başkan Vekilliği
Açıklama: Rüzgâr Enerjisi Projelendirme ve Araştırma	