

DIKEY EKSENLI ÖRNEK RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Burcu GÜLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr.Zafer DEMİR**

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nisan 2019**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

BURCU GÜLER'in "Dikey Eksenli Örnek Rüzgar Türbini" başlıklı tezi 13/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca, "İleri Teknolojiler" Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof.Dr.Zafer Demir

Üye : Prof.Dr.Özlem Onay

Üye : Prof.Dr.Aşkın Demirkol



Prof.Dr.Ersin Yücel

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

DİKEY EKSENLİ ÖRNEK RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Burcu GÜLER

İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı

Enerji Kaynakları Ve Yönetimi Programı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan 2019

Danışman : Prof.Dr.Zafer DEMİR

Dünyanın elektrik ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Toplumların gelişmesi ile elektriğin miktarı ve sürekliliği önem kazanmaktadır. Son yıllara kadar elektrik enerji kaynağı denilince akla petrol, kömür gibi geleneksel enerji kaynaklarından fosil yakıtlar gelmekteydi. Fakat bu yakıtların dünyada miktarları azalmaya başladığı ve enerji dönüşümleri sırasında atmosfere yaydıkları gazlar sebebiyle çevremize zarar verdiği anlaşıncı insanoğlu yeni enerji arayışlarına girmiştir. Yakın gelecekte çoğunlukla araştırmalar yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli enerji eldesine, elde edilen enerjinin saklanması üzerine olacaktır.

Rüzgar enerjisinden verimli bir enerji eldesi için yüksek rüzgar hızlarına ihtiyaç vardır. Türbinin çalışmaya başlaması için gereken hız, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde; türbininin yüksek yerlere çıkarılarak çalıştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca türbin kanatlarının süpürdüğü alanın büyük olması gerekmektedir. Bu durum yapım maliyetini oldukça arttırmaktadır. Dikey Eksenli rüzgar türbinleri ise yer seviyesinde düşük rüzgar hızlarında çalışmaya başlayabilir ve maliyeti düşüktür. Bu çalışmada dikey eksenli bir rüzgar türbini ile çalışan sokak lambası yapılmış, çeşitli rüzgar hızlarında nasıl bir güç üreteceği Matlab Simulink'te kurgulanarak bulunmuştur. Türkiye'de yol aydınlatmasına harcanan miktarın toplam tüketimin %2' si kadar olduğu düşünüldüğünde, sokak aydınlatmalarının dikey eksenli rüzgar türbinleri ile yapılması, ülke ekonomisine bir katkı sağlayabilir. Her bir rüzgar türbini araştırması, yenilenebilir enerjisi kaynakları alanında yeni araştırmalara kapı açabilir.

Anahtar Sözcükler : Rüzgar enerjisi, Dikey eksenli rüzgar türbini, Yenilenebilir enerji kaynakları.

ABSTRACT

VERTICAL AXIS WIND TURBINE DESIGN

Burcu GÜLER

Department of Advanced Technologies

Programme in Enerji Kaynakları Ve Yönetimi

Eskişehir Technical University , Graduate School of Sciences, April, 2019

Supervisor: Prof.Dr.Zafer DEMİR

World's demand for electricity is increasing day by day. Amount and continuity of electricity is getting more important in development of civilisation. Until recent years, electricity was mostly obtained by fossil fuels like oil, coal etc. After decreasing amount of fossil fuels in the earth and realising harmful effect of their gases to atmosphere during energy transformation , it was started searching of new energy sources . In the near future , researches will be mostly focused on renewable energies and storing of them.

For wind energy , higher wind velocities is needed for better efficiency . For horizontal wind turbines, it is required higher altitudes for better start up of the turbine rotor . Furthermore bigger blade diameter is required which makes cost increase . Better alternative may be a turbine which can work in lower altitudes, having lower cost and turning in lower wind speeds. These outputs can be obtained by using vertical wind turbines. In this project , it was done a street lamp combined with wind turbine as an example. It is simulated in Simulink Matlab also. Considering that the electricity consumption for street lighting is 2% of the total electricity consumption in Turkey, street lamps with working vertical axis wind turbine can contribute to the national economy. A research in wind turbines will open the door to new inventions in renewable energy studies.

Keywords : Wind Energy, Vertical Axis Wind Turbine, Renewable Energy Sources.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam süresince evde bana sabreden kızlarım Buket ve Nil'e, türbinin kanatlarını yapan ve tezimin her aşamasını birlikte yorumladığımız eşim Müh.İhsan Güler'e, teknik bilgisiyle bize her zaman yol gösteren babam Müh.Gültekin Güney'e, tüm destekleri için tez danışmanım Prof.Dr.Zafer Demir'e, beni Matlab ve Simulink kullanmaya teşvik eden Prof.Dr.Aşkın Demirkol'a, çalışmamda bana yardımcı olan Prof.Dr.Özlem Önay'a teşekkürlerimi sunarım.

Burcu GÜLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Burcu GÜLER



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GÖRSELLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR	2
2.1. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	2
2.2. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretim ve Tüketim bilgileri	3
2.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi	7
2.4. Rüzgar Hızı	8
2.5. Uygun Rüzgar Enerjisi Tesis Yerleri	10
2.6. Rüzgar Potansiyeli	12
2.7. Kanatlara Etki Eden Kuvvetler	13
2.8. Rüzgar Türbin Çeşitleri	14

2.8.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
2.8.2. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	16
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ HESABI	24
3.1. Hava Yoğunluğu	26
3.1.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişmesi	27
3.1.2. Hava yoğunluğunun yükseklik ile değişmesi	28
3.2. Hellman Yükseltme Bağntısı	31
3.3. Rüzgar Hızı Dağılımı Kavramı Ve Hesaplama Teknikleri	32
3.4. Cp Güç Katsayısı (Betz Yasası)	33
3.5. Kanat Uç Hızı	38
3.6. Kanat uç hızı oranı	39
3.7. Türbin Torku	42
3.8. Yük Analizi	43
3.9. Kanat Tasarımı	44
4. TEZ SONUNDA YAPILAN DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ	48
4.1. Türbin Teknik Bilgileri	49
4.2. Sistemin Parçaları ve Kurulum Mantığı	50
4.3. Matlab Simulink Programı İle Hazırlanan Benzetim Modeli	53
4.4. Matlab Programı Kodları	58
5. SONUÇ	72
KAYNAKÇA	73
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Türkiye’de kurulu santral sayısı.....	5
Tablo 2.2. Türkiye’de tüketilen elektrik enerjisinin abone gruplarına göre dağılımı 2017	7
Tablo 2.3. 8.12.18 - 31.12.18’de günlük Danimarka’da üretilen rüzgar enerjisi bilgileri	8
Tablo 2.4. Oluşumlarına göre rüzgarlar	10
Tablo 3.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişmesi	27
Tablo 3.2. Hava yoğunluğunun yükseklik ile değişmesi	28
Tablo 3.3. Meteoroloji 3.Bölge Müdürlüğü verisi	29
Tablo 3.4. Türbinin konulduğu yerde muhtelif zamanlarda ölçülen rüzgar hız değerleri	30
Tablo 3.5. Farklı bölgelerde Hellmann katsayısı	31
Tablo 3.6. Cp değeri ve b etkileşim parametresi	37
Tablo 3.7. TSR (λ -Uç hız oranı)	41
Tablo 4.1. Deneysel Sonuçlar (Kayış kasnaksız)	54
Tablo 4.2. Deneysel Sonuçlar (Kayış kasnaklı)	56
Tablo 4.3. Eskişehir ili ortalama ve en yüksek rüzgar hızları	57
Tablo 4.4. Vrüzgar hızı - zaman grafiği	57
Tablo 4.5. Vtipkanat uç hızı – zaman grafiği	60
Tablo 4.6. Açısal hız ω - zaman grafiği	61
Tablo 4.7. Rpm – zaman grafiği	62
Tablo 4.8. Ptürbin – zaman grafiği	63

Tablo 4.9. Ct- zaman grafiği	64
Tablo 4.10. Tork türbin – zaman grafiği	65
Tablo 4.11. TSR- zaman grafiği	66
Tablo 4.12. Güç – zaman grafiği (3...15 m/sn hızlarda)	67
Tablo 4.13. TSR– zaman grafiği (3...15 m/sn hızlarda)	68
Tablo 4.14. RPM–zaman grafiği (3...15 m/sn hızlarda)	69
Tablo 4.15. Güç – zaman grafiği (3...15 m/sn hızlarda)	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Kurulu Güç Dağılımı (2018) TEİAŞ	2
Şekil 2.2. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Kurulu Güç Dağılımı (2017) TEİAŞ	4
Şekil 2.3. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretimi (2017) TEİAŞ	4
Şekil 2.4. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücün Yıllar içinde Değişimi 1970-2017	6
Şekil 2.5. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretiminin Yıllar içinde Değişimi 1970-2017	6
Şekil 2.6. Türkiye’deki rüzgarlar	11
Şekil 2.7. Dünyadaki rüzgarlar	11
Şekil 2.8. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel Atlası (REPA)	12
Şekil 2.9 Damla modeli şeklindeki kanadın alt ve üst kısımında rüzgarın dolaylı aldığı yol	13
Şekil 2.10. Bir cisme etki eden kuvvetler	14
Şekil 2.11. Yatay eksenli rüzgar türbin örnekleri (HAWT)	16
Şekil 2.12. Dikey eksenli rüzgar türbin örnekleri (VERT)	16
Şekil 2.13. Savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbini	18
Şekil 2.14. Savonius tipi rüzgar türbini (Merkez aralıklı)	18
Şekil 2.15. 2 Kanatlı Savonius tipi rüzgar türbini	19
Şekil 2.16. 3 Kanatlı Savonius tipi rüzgar türbini	20
Şekil 2.17. Dışarıdan yönlendirmeli çok kanatlı Savonius tipi rüzgar türbini.....	20
Şekil 2.18. 41 Kanatçıklı Savonius tipi türbin tasarımı	22

Şekil 2.19. 12 Kanatçıklı Savonius tipi rüzgar türbini	22
Şekil 3.1. Pervanenin kabul konumu	34
Şekil 4.1. 12 Kanatçıklı Savonius tipi rüzgar türbini	48
Şekil 4.2. Sistemin kurulum mantığı	52
Şekil 4.3. Türbin C_p ve TSR değerlerinin MATLAB Simulink’te kurgulanması	54
Şekil 4.4. Matlab Simulink te alt sistem olarak türbin hızı rpm kurgulanması (Kayış kasnaksız)	55
Şekil 4.5. RPM alt sistemi modellemesi (Kayış kasnak aktarmalı jeneratör bağlantısı).....	56
Şekil 4.6. Ana Formüllerin Matlab Simulink’ te kurgulanması	59

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Anemometre Örnekleri	9
Görsel 2.2. Bu Tezde Kullanılan Anemometre	9
Görsel 2.3. Kara Üstü Rüzgar Türbini (Onshore)	14
Görsel 2.4. Deniz Üstü Rüzgar Türbini (Offshore)	15
Görsel 2.5. İçi Savonius dışı Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbini	17
Görsel 2.6. Helis tip düşey eksenli rüzgar türbini	21
Görsel 2.7. Darrieus tipi rüzgar türbini	21
Görsel 4.1. Türbinimizin Parçaları	52
Görsel 4.2. Türbin altından jeneratör bağlantısı	53
Görsel 4.3. Kayış Kasnak Sistemi	56
Görsel 4.4. Sistemin Bahçeye Montajı	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Y_{ert}	: Yatay eksenli rüzgar türbini
D_{ert}	: Dikey eksenli rüzgar türbini
T_{sr}	: Kanat uç hızı oranı (Tip speed ratio)
λ	: T_{sr} , Kanat uç hızı oranı (Tip speed ratio)
C_p	: Güç katsayısı (Power coefficient)
E_k	: Kinetik enerji (İş)
m	: Hareket eden havanın kütlesi
v	: Hareket eden kütlenin hızı
t	: Zaman
P	: Güç
Wh	: Watt saat
$\dot{m}$	: Kütle
ρ	: Hava yoğunluğu
A	: Havanın çarptığı kesit alanı
v	: Hareket eden rüzgar kütlesinin hızı
μ	: Hellmann katsayısı
V_r	: Hesaplanacak rüzgar hızı
V_{ref}	: Ölçülmüş referans rüzgar hızı
H	: İstenilen türbin yüksekliği
H_{ref}	: Ölçülmüş referans türbin yüksekliği
V	: Hacim.... m ³

A	: Kesit alanı
R	: Türbin yarı çapı
h	: Türbin yüksekliği
d	: Türbinde hava ile süpürülen yol
b	: Etkileşim değeri (Rüzgarın türbinden çıkış hızı ile giriş hızı arasındaki oran)
V_{tip}	: Kanat uç hızı
ω	: Türbin açısal hız
f	: Dönme frekansı (Hz)
N	: RPM Türbin dönüş hızı
C_t	: Tork katsayısı (Torque coefficient)
T_t	: Türbin(Rotor) torku
T_r	: Mevcut rüzgar torku
OR	: Bindirme oranı .(Overall ratio)
e	: Açıklık (2 kanat arasındaki mesafe)
e'	: Rotor mili çapı.
d	: Kanatçık yüksekliği.
AR	: Türbin boy çap oranı. (Aspect ratio)
H	: Türbin yüksekliği
D	: Türbin çapı
r	: Kanatçık yarıçapı

1. GİRİŞ

Rüzgar, güneşin atmosferi ve yeryüzünü homojen olarak ısıtmamasından kaynaklanan bir hava akımıdır. Fosil yakıtların doğaya verdiği zararların yanında çok temiz ve sonsuz olduğundan doğal ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak anılmaktadır. Çok eski zamanlardan beri kullanılmakta olan rüzgar enerjisine ilgi, fosil yakıtların kullanımı ile azalmış; 1980 'lere yaklaşırken yaşanan petrol krizleri, fosil enerji kaynaklarının kısıtlı miktarda kalması ve enerji dönüşümleri sırasında atmosfere verdikleri zararlı gazların bilinirliğinin artması, Rio Sözleşmesi, Kyoto Protokolü gibi Birleşmiş Milletler Örgütüne üye devletlerin çevre konusuna dikkat çekmeleri, ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına teşvikler getirmeleri, ülkelerde karbon borsaları kurulma çabaları ile karbon salınım miktarlarına göre bir vergi sistemi düşünülmesi, insanoğlunun enerji eldesi konusundaki dikkatini yeniden yenilenebilir kaynaklara ve rüzgar enerjisine çevirmesine sebep olmuştur.

Enerji konusunda ülkeler kendi ihtiyaçlarını kendileri karşılayabilse de birbirleri arasında enerji alışverişi yapmaktadırlar. Bu sebeple enerji, ayrıca önemli bir ticaret konusudur ve ülkelerin politikalarını belirlemede önemli bir etken olarak rol oynamaktadır. Günden güne artan nüfus ve sanayileşme, dünyada elektrik tüketimini de artırmaktadır. Buna paralel olarak ülkeler her geçen yıl ilave enerji kaynaklarını devreye almaktadırlar. Zira ülkelerin gelişmesinde sürdürülebilir bir enerji ihtiyacının temin edilmesi önemlidir. Bazı devletler bu sebeple enerji kaynaklarını devamlı ellerinde tutma veya yönetme savaşı vermektedir. Bu konular dikkate alındığında enerjinin şu anda gündemde olduğu gibi daha uzun yıllar dünyada ve Türkiye’de gündemde olacağı düşünülebilir.

Bu projede rüzgar kavramı üzerinde durulmuş, rüzgar türbinlerindeki önemli parametreler açıklanmaya çalışılmış, çeşitli türbinlerin birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Türkiye genelinde yüksek hızlı rüzgar enerjisi potansiyeli çok fazla mümkün olmadığından, ülkemizde düşük hızlı rüzgarlarda çalışabilen dikey eksenli türbin modellerinin daha çok yer bulabileceği düşünülmüş, bu nedenle düşük rüzgar hızlarında bile elektrik enerjisi üretmeye başlayabilecek dikey eksenli bir rüzgar türbini çalışması ve tasarımı ele alınmıştır.

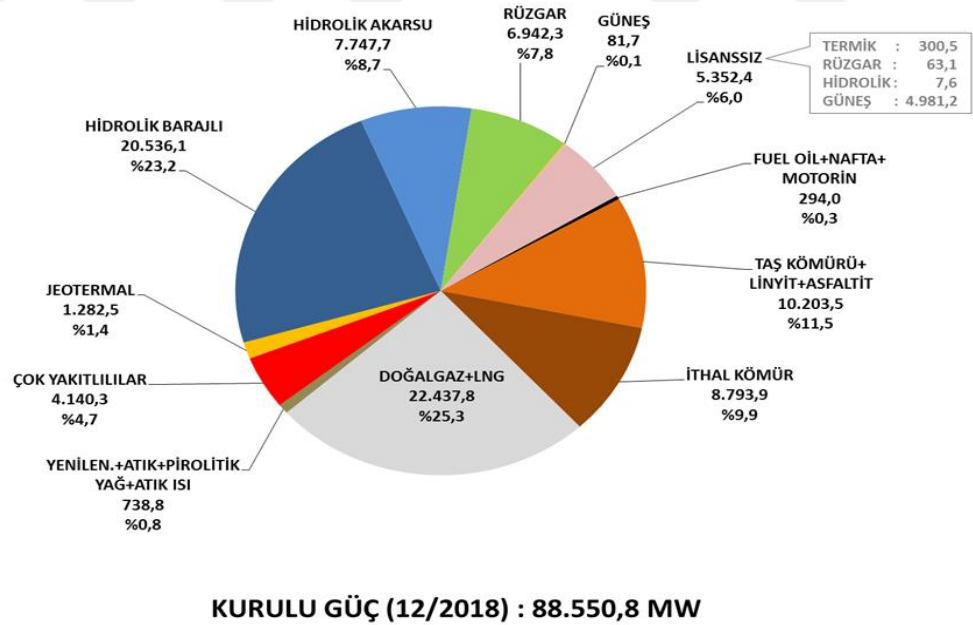
2. RÜZGAR

Güneş, atmosferi ve yer yüzeyinde her yeri homojen olarak ısıtmamaktadır. Bu yüzden farklı bölgelerde farklı sıcaklıkta hava durumu ve farklı nemlilikler olmaktadır. Sıcak bölgelerde basınç alçak, soğuk bölgelerde basınç yüksektir. Hava ise yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru hareket eder. Bu hava akışı rüzgardır. Kısaca rüzgar, soğuk hava ile sıcak havanın yer değiştirmesidir.

Bazı bölgelerde rüzgar hızı düşük, bazı bölgelerde yüksektir. Mevcut rüzgar potansiyelinden ülkeler çeşitli oranlarda faydalanmaktadır.

2.1. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücü Şekil 2.1. de görüldüğü gibi 2018 yıl sonu itibariyle 6.942 MW ‘a ulaşmıştır. Toplam kurulu güç 88.550 MW’a çıkmıştır. Rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç oranı toplamda %7,8 olmuştur.



Şekil 2.1. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu güç dağılımı (2018) ([2])

783.562 km² alanda yaklaşık 82 milyon nüfuslu Türkiye’de, kuzey ülkelerindeki gibi sürekli ve yüksek hızlı rüzgarlar yoktur. Ancak artan elektrik tüketimi doğrultusunda rüzgar enerjine ilgi, her geçen gün yükselen bir ivme göstermektedir. Şu anda Türkiye’de ihtiyaç duyulan elektrik enerji kaynağının bir kısmı ithal edilmektedir ve cari açığın bir kısmını enerji tutmaktadır. Bu yüzden elektrik enerjisi üretiminde mümkün olan doğal kaynakları kullanmak konusunda yapılan her türlü araştırma, çalışma önemlidir.

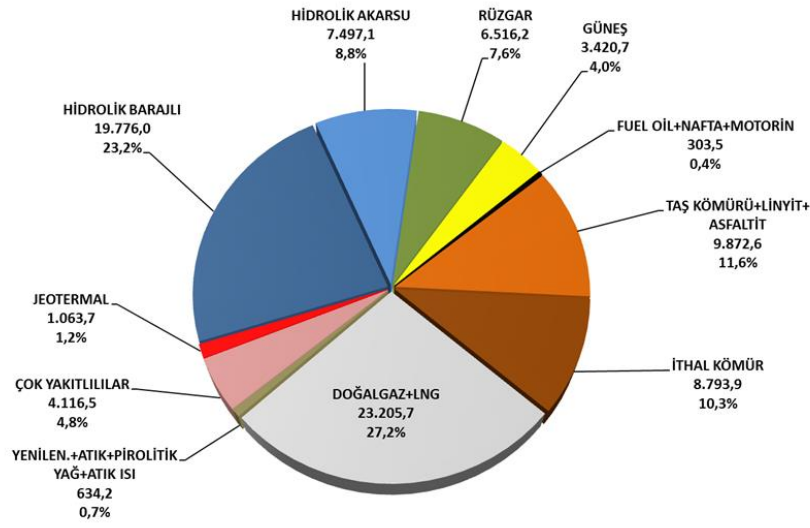
T.C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı web sayfasından alınan bilgiye göre Türkiye’de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santralı kurulabileceği belirtilmektedir. Bu kabul ile orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Buna göre Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30’una denk gelmektedir [2].

Türkiye’de yukarıda bahsedilen mevcut rüzgar potansiyeline ulaşmak için, önümüzdeki yıllarda daha çok rüzgar yatırımı yapılabileceği ve rüzgar endüstrisinin yakın zamanda Türkiye ekonomisine ve iş imkanlarına çok fazla katkı sağlayacağı düşünülebilir.

Türkiye ‘deki rüzgar santrallerinin hepsi şu anda karalar üzerinde kuruludur. Henüz deniz üstü rüzgar santralı yoktur. T.C.Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2018 yılı sonunda açıklanan ilk 100 günlük icraat programında deniz üstüne kurulacak rüzgar santralı için bir yarışma düzenleneceği bildirilmiştir. Önümüzdeki günlerde Türkiye’de de deniz üstünde rüzgar santralı konusu konuşulmaya başlanacaktır.

2.2. Türkiye’de Elektrik Enerjisi Üretim Ve Tüketim Bilgileri

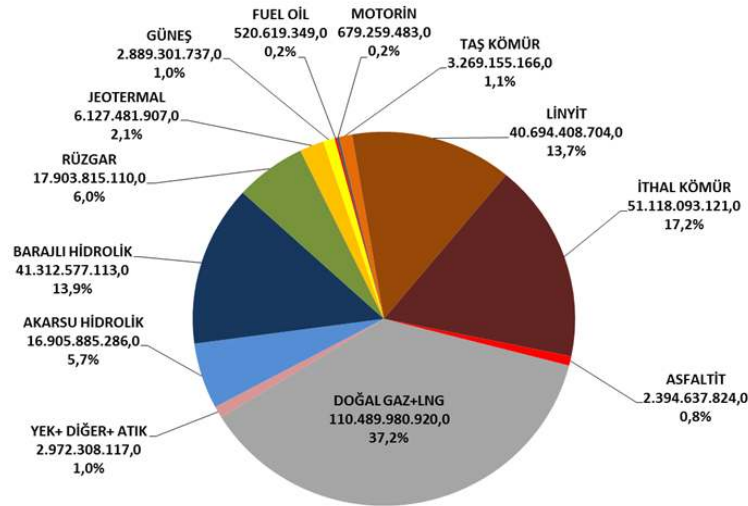
2017 Yılı elektrik kurulu gücümüz Şekil 2.2.’de belirtildiği gibi rüzgar için %7,6 idi. 2018 ‘de %7,8’e yükseldiği Şekil 2.1’de ifade edilmişti.



KURULU GÜÇ (2017) : 85.200 MW

Şekil 2.2. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu güç dağılımı (2017) ([2])

2017 Yılında rüzgar enerjisi üretim bilgisi Şekil 2.3.’de belirtildiği gibi 17.913.815 MW olarak gerçekleşmiş olup rüzgar enerjisi üretim oranı % 6 olarak gerçekleşmiştir.



ÜRETİM (2017) : 297.277.523.857 kWh

TÜKETİM (2017) : 296.702.118.671 kWh

Şekil 2.3. Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi (2017) ([2])

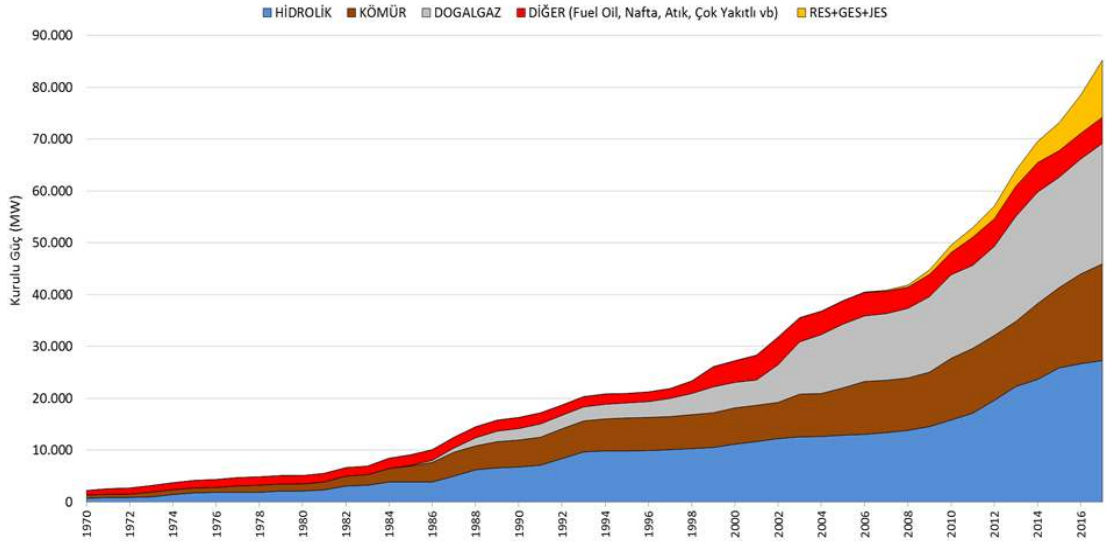
2017 yılında Türkiye toplam elektrik tüketimi 2016 yılına göre %5,6 artış göstermiştir ve 294,9 TWh (294.900.000 MWh) olmuştur.

Yıllık elektrik tüketimi artış oranlarına göre 2023 Yılı baz senaryo hazırlanmıştır. 2023 yılı baz senaryoda Türkiye’de elektrik tüketimi yıllık olarak %4,8 artışla 385 TWh düşünülmektedir.

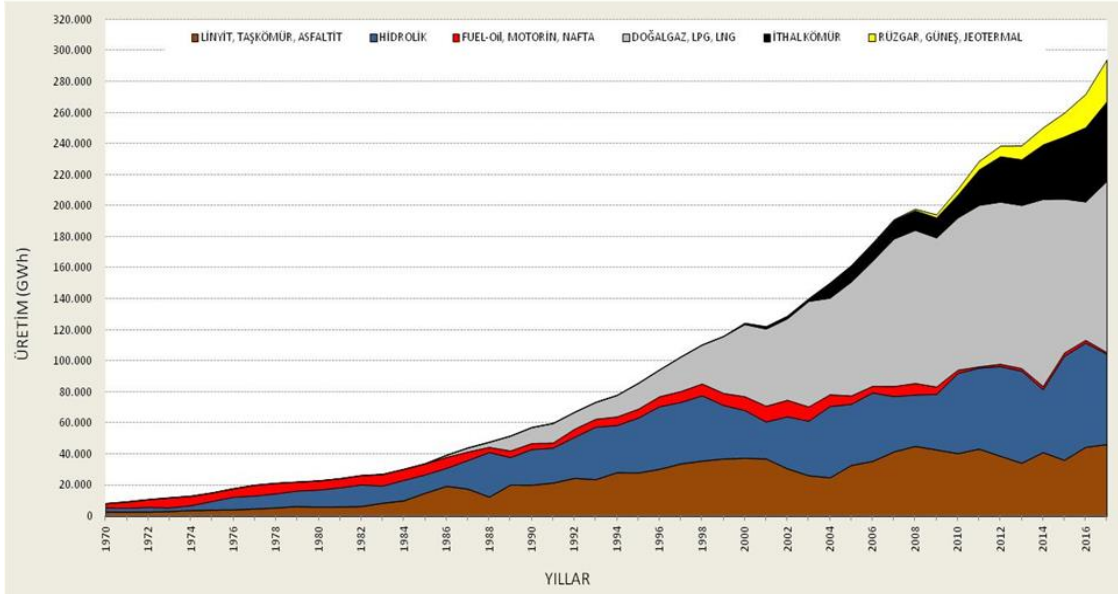
Tablo 2.1. *Türkiye’deki kurulu santral sayısı ([2])*

	2018 İlk yarı	Santral Sayısı
Doğalgaz		303 Adet
Kömür		41 Adet
Hidrolik		636 Adet
Rüzgar		232 Adet
Jeotermal		40 Adet
Güneş		5422 Adet
Diğer		212 Adet
Toplam santral sayısı		6886 Adet (Lisanslı ve lisanssız)

Tablo 2.1.’e göre Türkiye’de 2018 yılındaki mevcut santral sayısı görülebilir. Fakat her geçen zaman yenilenebilir kaynaklara ait santral sayısı artmaktadır. Bu artış Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.’de de görülebilir. Şekil 2.4.’de Türkiye’de yıllar içinde kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı görülmektedir. Şekil 2.5.’de de üretimin hangi kaynaklardan gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 2.4. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücün yıllar içinde değişimi 1970-2017 ([2])



Şekil 2.5. Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminin yıllar içinde değişimi 1970-2017 ([2])

Tüketimin abone gruplarına göre Tablo 2.2.'de dağılımı gösterilmektedir. Aydınlatmanın genel tüketimde 2017'de %1.8 yer aldığı görülmektedir.

Tablo 2.2. Türkiye’de tüketilen elektrik enerjisinin abone gruplarına göre dağılımı (2017) ([2])

2017 YILINDA TÜKETİME SUNULAN ELEKTRİK ENERJİSİNİN
ABONE GRUPLARINA GÖRE DAĞILIMI

ABONE GRUBU	TÜKETİM (2017)		ABONE (2017)	
	MWh	Payı (%)	Sayı	Payı (%)
MESKEN	54.251.308	21,8	34.781.657	81,9
TİCARET VE KAMU HİZ.	67.093.546	26,9	6.333.684	14,9
SANAYİ	116.482.599	46,8	351.834	0,8
TARIMSAL SULAMA	6.049.407	2,4	634.589	1,5
AYDINLATMA	4.397.009	1,8	360.339	0,8
DİĞER	748.778	0,3	28.557	0,1
TOPLAM	249.022.646	100,0	42.490.660	100,0

Kaynak: TEDAŞ Türkiye Elektrik Dağıtım ve Tüketim İstatistikleri - 2017

2.3. Dünyada Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerji sistemlerini çok kullanan ülkelerden Almanya, şu anda elektrik enerji ihtiyacının yaklaşık %40’ını deniz üstünde ve karada kurulu rüzgar santrallerinden karşılamaktadır.

Nüfusu yaklaşık 5,77 milyon kişi olan 43.000 km² alanda yerleşik Danimarka’da rüzgar enerjisi verileri Rüzgar Endüstrisi Birliği (Danish Wind Industry Assosation) internet sitesinde günlük olarak yayınlamaktadır [3]. Buradan alınan bilgiye göre Tablo 2.3.hazırlanmıştır.

Tablo 2.3. Tarih: 8.12.18 ve 31.12.18'de günlük Danimarka'da üretilen rüzgar enerjisi bilgileri ([3])

Tarih	Danimarka'da Üretilen Rüzgar Enerjisi	Tüketimi Karşılama Oranı
8.12.2018	89,3 GWh (89300 MWh) Denizde kurulu 23,7 GWh (23700 MWh) Karada kurulu 65,6 GWh (65600 MWh)	%90,3
31.12.2018	52,7 GWh (52700 MWh) Denizde kurulu 13,1 GWh (13100 MWh) Karada kurulu 39,6 GWh (39600 MWh)	%59,2

2.4. Rüzgar Hızı

Türbin güç eldesinde en etkili eleman rüzgar hızıdır.

Bir rüzgar türbininin harekete geçmesi için gerekli olan hız, başlama hızı (cut in) olarak adlandırılır. Rüzgar türbininin jeneratörünün dayanabileceği maksimum bir hız bulunmaktadır. Türbin bu hızın üzerinde bir hızla dönerse, jeneratörü bozulur veya türbin kırılır. Bu hıza da durma hızı (cut out) denilmektedir. Yüksek güçlü rüzgar türbinleri dizayn edilirken, durma hızında türbini frenleyecek şekilde yapılır. Durma hızında stop konumuna geçerler. Türbinler başlama ve durma hızları arasında çalışır ve o aralıkta enerji üretebilirler. Türbinlerin genellikle başlama hızları 2-4 m/saniye , nominal hızları (sistemde tasarlanan en büyük güç nominal güçtür, nominal güce ulaştıran hız da nominal hız olarak adlandırılır.) 10-15 m/sn, durma hızları 25-35 m/sn dir. Rüzgar türbini tasarımında rüzgar hızı küpü ile formüle katıldığından rüzgarın hızının nelere bağlı olduğunu da iyi bilmek gerekir.

İki basınç merkezi arasındaki basınç farkı arttıkça rüzgar hızı artar.

İki basınç merkezi arasındaki uzaklığa bağlı olarak rüzgar hızı artar veya azalır.

Sürtünmenin az olduğu , engebe ve bitki örtüsünün kısa olduğu yerlerde rüzgar hızı artar. Engeli alanlarda ve ormanlık bölgelerde rüzgar hızı azalır.

Rüzgar hızı anemometre ile ölçülür. Çeşitli anemometre örnekleri aşağıda Görsel 2.1’de görülmektedir.



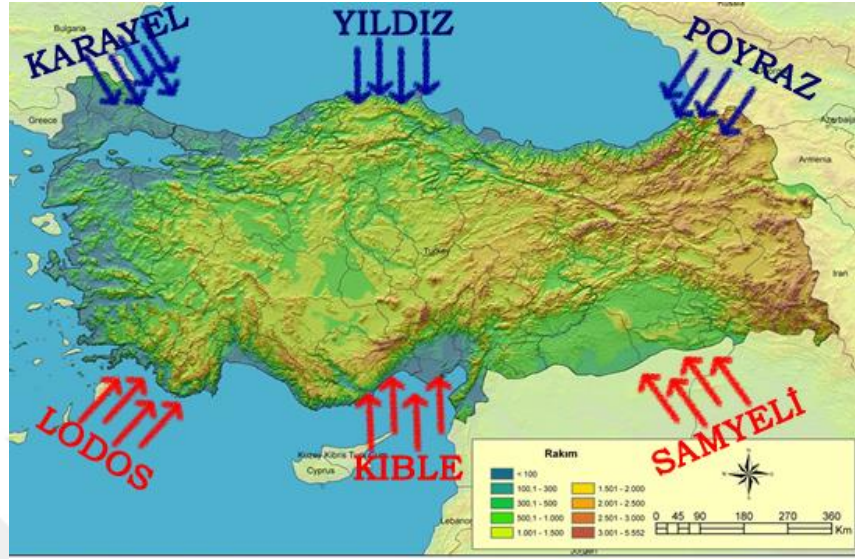
Görsel 2.1. *Anemometre örnekleri*

Bu tezde kullanılan, cep telefonuna bağlanarak ölçüm yapan anemometre Görsel 2.2.’de görülmektedir.

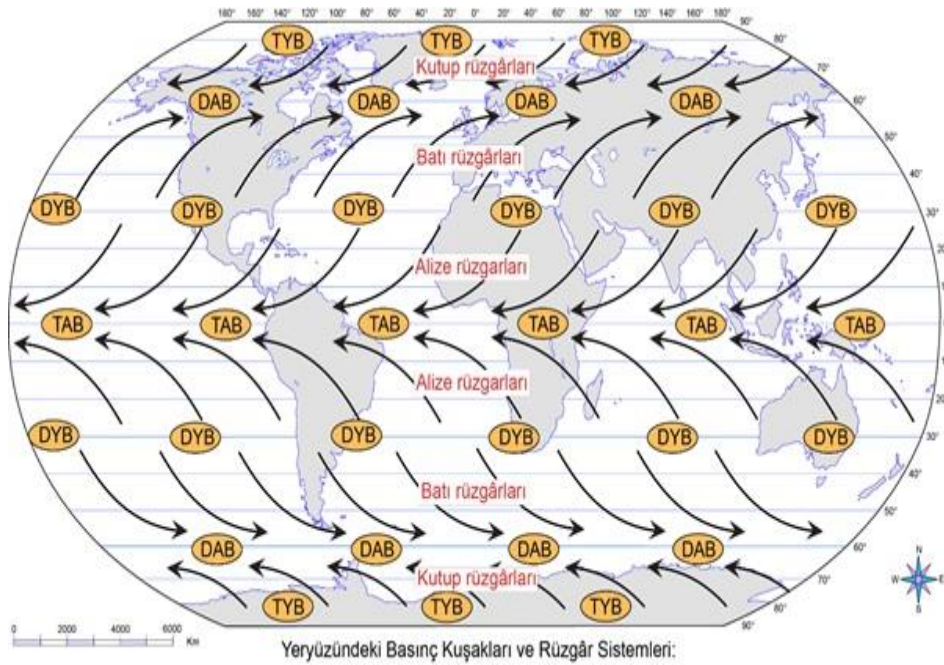


Görsel 2.2. *Bu tezde kullanılan anemometre*

Türkiye’de esen yerel rüzgarlar, yönleri ile Şekil 2.6.’da, dünyada esen rüzgarlar Şekil 2.7.’de gösterilmiştir.



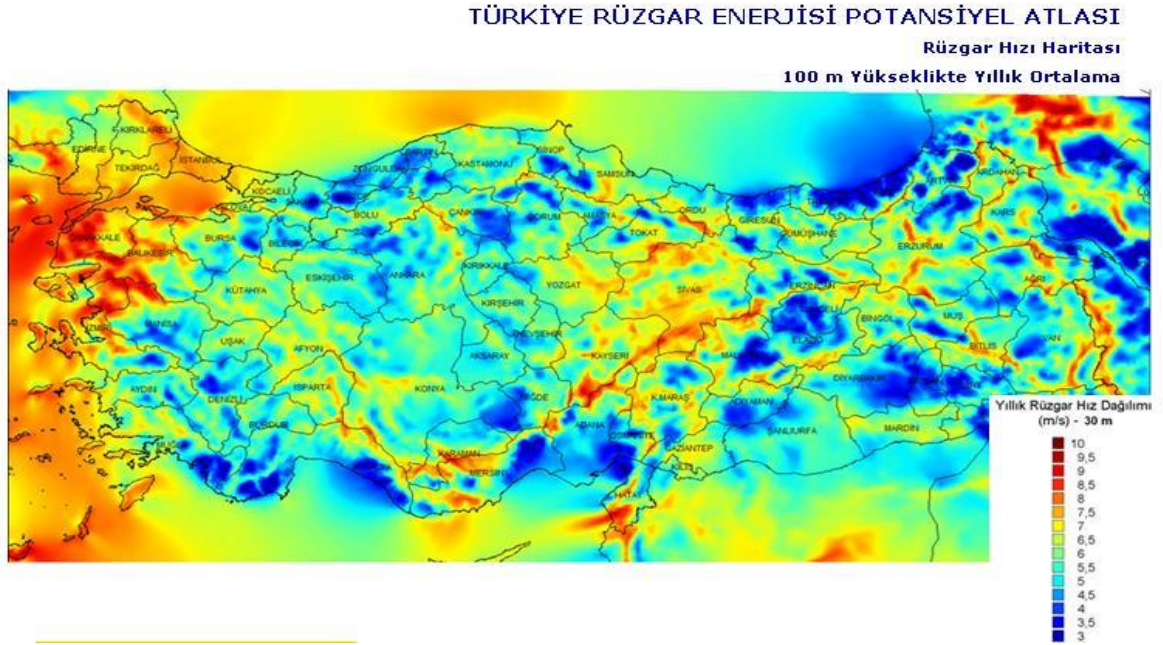
Şekil 2.6. Türkiye ‘deki rüzgarlar



Şekil 2.7. Dünyadaki rüzgarlar

2.6. Rüzgar Potansiyeli

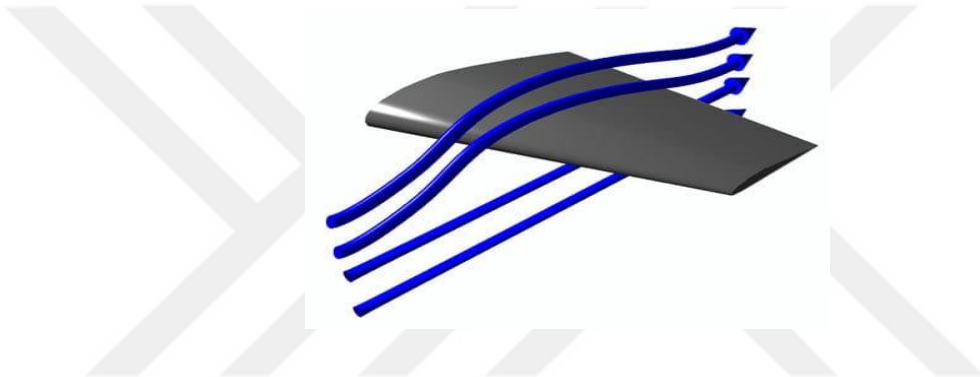
Türkiye’de meteorolojik çalışmalar için çıkarılmış bir rüzgar atlası mevcuttur. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) Şekil 2.8.’ de gösterilmiştir. Ancak bu atlas, rüzgar yoğunluklarını bölgelere göre renklendirerek vermektedir. Belirli bir bölgede ayrıntıya girmek mümkün olmasa da renklendirme neticesinde Türkiye haritasında rüzgarlı bölgeler konusunda bir fikir elde edilmektedir. Bu veriler sadece ön fizibilite aşamasında kullanılabilir, lisanslı bir rüzgar yatırımı için ilgili sahada en az 1 yıl, sürekli rüzgar hızı ölçüm zorunluluğu bulunmaktadır. Resmi Gazetenin 17.06.2014 tarihli tebliği, rüzgar ve güneş enerjisine dayalı ön lisans başvuruları için yapılacak rüzgar ve güneş ölçümlerine dair tebliğdir. İlgili sahada rüzgar ölçümü çalışması ve süresi çok önemlidir. Bu ölçümlerde sahanın rüzgar verileri, sıcaklık, nem, basınç gibi bilgileri detaylı olarak konusunda uzman kişiler tarafından kontrol edilir, düzenli bir şekilde ölçülen veriler belirlenen süre boyunca kayıt altına alınır. İlgili tebliğde ‘1 yıllık ölçüm verisinde, işletme, bakım, arıza vb. nedenlerle rüzgar veri kaybı % 20’den daha fazla olamaz’ denilmektedir [5].



Şekil 2.8. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)

2.7. Kanatlara Etki Eden Kuvvetler

Rüzgar kuvveti ile hava yer değiştirmektedir. O halde hava da bir akışkan olarak kabul edilebilir. Rüzgar türbinlerinde akışkanlar dinamiğinden Bernoulli denklemi ile açıklanacak çok şey vardır. Pek çok düzenek akışkanın hızındaki farktan ortaya çıkan basınç yardımı ile çalışır. Uçakların uçabilmesi de hava akışkanının basınç farkı ile yer değiştirmesi yardımıyla olur. Bernoulli denklemine göre sabit bir akışkan kütleinin, t saniye içinde, sisteme giriş noktasından çıkış noktasına varırken aldığı yol arttığında hızı da artmaktadır, hızı arttığında ise basıncı düşmektedir.



Şekil 2.9. Damla modeli şeklindeki kanadın üst ve alt kısmında rüzgarın aldığı yol

Uçakların kanatlarının üstü daha geniş yüzeye sahiptir, kanatların altı ise üste göre daha kısa bir yüzeye sahip olarak yapılır. Bu durum Şekil 2.9.' da çizilmiştir. Rüzgar, kanadın ucundan girdiğinde alt yüzeyinde daha kısa bir yol alarak t saniyede v hızıyla uca varırken, kanadın üst kısmında aldığı yol daha fazla olduğundan, t saniyede rüzgar hızı artarak çıkışa gelir, bu durumda kanadın altında düşük hızdan dolayı yüksek basınç, kanadın üst tarafında ise hızın artması sebebiyle basınç düşüklüğü olur. Hava, her zaman yüksek basınçtan alçak basınca doğru yer değiştirir ve bu işlemi yaparken yani aşağıdan yukarıya çıkarken uçak kanatlarını da yukarı doğru ittirir. Hava ,türbin kanatlarının da aynı şekilde harekete geçmesini sağlar. Bunu, kanatlar üzerinde kaldırma ve itme-sürüme kuvvetleri yaratarak sağlar. Bu kuvvetler Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Bir cisme etki eden kuvvetler

2.8. Rüzgar Türbini Çeşitleri

Rüzgar enerji santrallerinden karada yerleştirilmiş olanlarına kara üstü sistemler (onshore) denilir ve Görsel 2.3’de örneği görülmektedir. Açık denizlere yerleştirilmiş olanlara deniz üstü sistemler (offshore) denilir ve Görsel 2.4.’de görülmektedir.



Görsel 2.3. Kara üstü rüzgar türbini (Onshore)

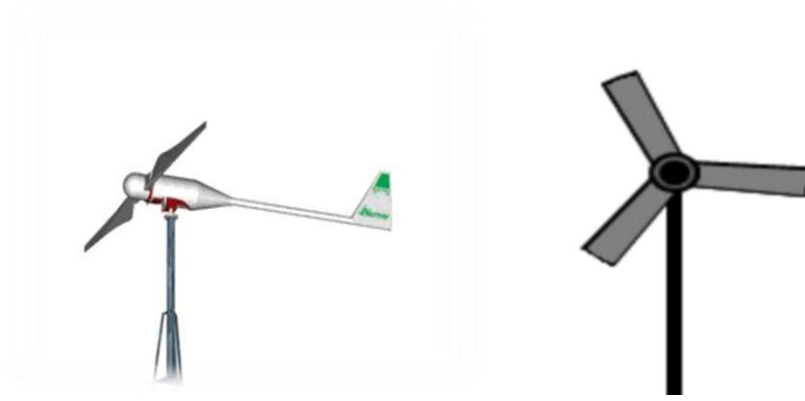


Görsel 2.4. *Deniz üstü rüzgar türbini (Offshore)*

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çeviren ve sonrasında mekanik enerji ile jeneratör rotorunu döndürerek elektrik üreten sistemler olarak tanımlanan rüzgar türbinleri , temel olarak rotorunun dönme ekseninin yatayda ya da düşeyde olmasına göre 2'ye ayrılır.

2.8.1. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Rotorun dönme eksenini yatay eksen boyunca ise yatay eksenli rüzgar türbini adı verilmektedir. Tek kanatlı, çift kanatlı, 3 kanatlı veya daha farklı tasarımlı olabilir. Yatay eksenli rüzgar türbini kısaca baş harfleri ile YERT diye anılmaktadır. (İngilizce HAWT, horizontal axis wind turbine) Şekil 2.11.'de yatay eksenli rüzgar türbinlerinden örnekler görülmektedir. Yatay eksenli türbinlerin dezavantajı başlamak için yüksek rüzgar hızlarına ihtiyaç duyarlar ve bu sebeple yerden ulaşılabilirdiği kadar çok yükseğe monte edilirler. Avantajları ile yüksek güçler üretebilmeleridir.



Şekil 2.11. Yatay eksenli rüzgar türbin örnekleri (HAWT)

2.8.2. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Rotorun dönme eksenini dikey ekseninde ise dikey eksenli rüzgar türbini adı verilir. Baş harflerinin kısaltması ile DERT diye anılmaktadır. (İngilizce VERT, vertical axis wind turbine) Dikey eksenli türbinler düşük rüzgar hızlarında düşük güçler üretirler, yerden çok yüksekte olmalarına gerek yoktur.



Helis

H tipi

Darrieus

Şekil 2.12. Dikey eksenli rüzgar türbin örnekleri (VERT)

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden şekil 2.12.'de helis kanat, H tipi kanat ve Darrieus tipi kanatlı türbin örnekleri görülmektedir. Hepsinde kanatlar damlacık modeli

şeklindedir. Sebebi ise kanadın alt ve üst yüzeyinde farklı büyüklükte yüzey alanı yaratarak rüzgarın hızının alt ve üst kanatta farklı olmasını sağlamaktır. Bernolli akışkanlar dinamiği ile açıklanmakta olan bu durum, farklı hızda farklı basınç yaratılarak havanın basınç farkı ile yer değiştirmesine yardımcı olmaktadır.

1925 Yılında Fransız mühendis G.J.M.Darrieus 'un kendi ismiyle anılan türbini, bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Dizaynındaki avantaj; 2 yada da 3 ince kanadın yüksek rüzgarlarda dahi korunması, merkezdeki şaft üzerinde düzgün mekanik bir tork yaratması, güç katsayısının ve TSR değerinin S rotor veya savonuis tip dikey eksenli türbinlere göre daha iyi olmasıdır. Dezavantajı, kendi kendine start alamamalarıdır. Dışarıdan bir başlangıç gücüne ihtiyaçları vardır. Bu amaçla bazı uygulamalarda hem Darrieus hem Savaonuis kanat tipi birlikte düşünülmüştür. Görsel 2.5.' de benzer bir uygulama görülmektedir.



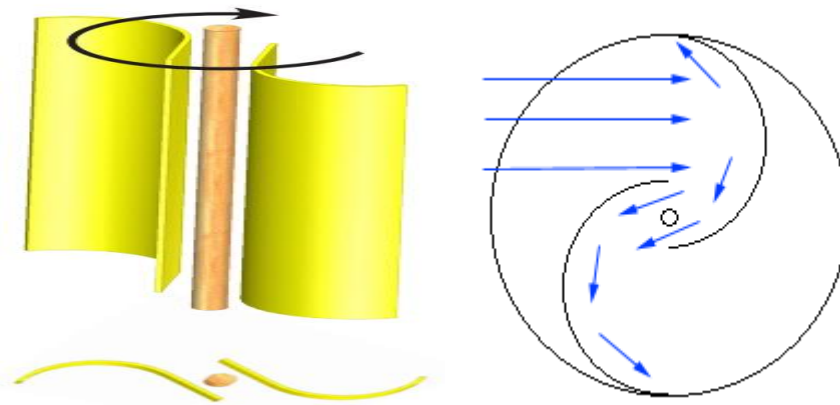
Görsel 2.5. İçi Savonius, dışı Darrieus tipi düşey eksenli rüzgar türbini

Şekil 2.13.'de Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden Savonius modeli veya S rotor diye anılan rüzgar türbin kanadı görülmektedir.



Şekil 2.13. *Savonius Tipi Dikey Eksenli Rüzgar Türbini (VERT)*

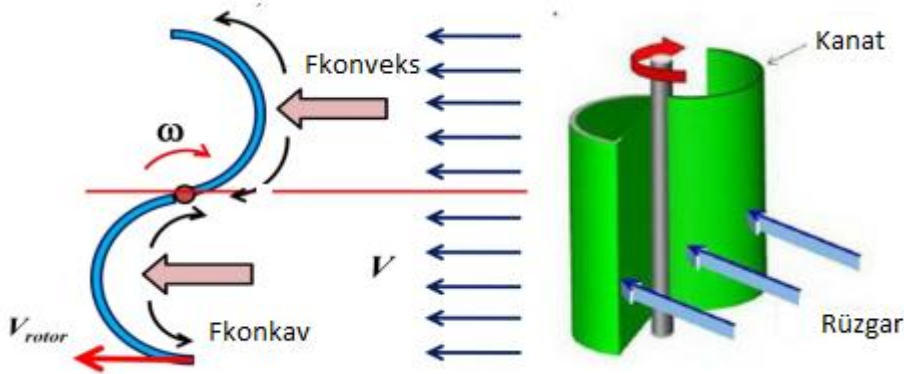
Savonius tipi rüzgar türbini üstten bakıldığında S harfini andıran kanat yapısına sahiptir. İlk olarak 1922 ‘de Finli mühendis Savonius tarafından dizayn edilmiştir. Ana mantık , iki yarım silindirin birer noktasında merkeze bağlanmaları ve içlerine dolan rüzgar ile itilip sürülmeleri prensibine dayanmaktadır. Düşük hızda döndükleri için düşük güçler üretebilirler. Fakat yüksek tork değerleri elde edilebildiğinden su pompalama işlerinde , öğütme taşlarını çevirmede kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.14. *Savonius Tipi Dikey Eksenli Rüzgar Türbini-Merkezi aralıklı (VERT)*

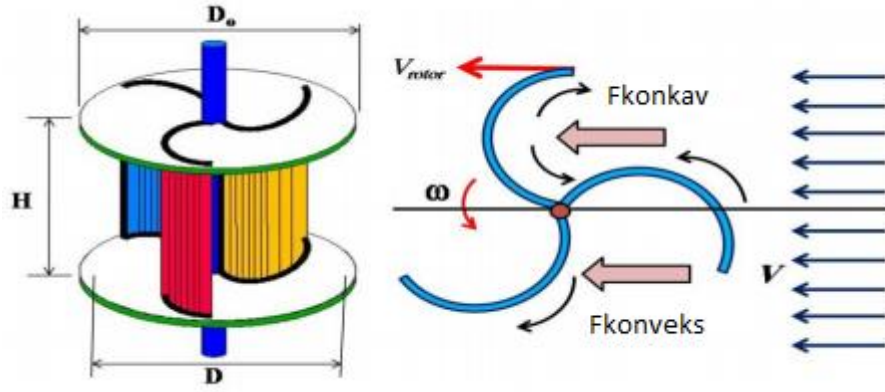
Çok çeşitli kanat tasarımları yapılabilir. Ferdowsi Üniversitesi İran da yapılan bir araştırmaya göre 6 çeşit savanois tip türbin modeli karşılaştırılmış, her birinin birbirlerine göre üstün oldukları durumlar gözlenmiştir. Bazısı düşük ve yüksek rüzgar hızlarında yüksek güç faktörüne ulaşmışlar, bazıları da ortalama bir hızda en yüksek güç faktörünü vermiştir. Şekil 2.14.' deki gibi 2 yarım daire birer uçlarından merkeze bağlanırken bir aralık verilirse, birbirlerinin kullandıkları hava akışı diğerine de geçebilir. Sargolzaei, J. Tarafından 2007 yılında yapılan bir araştırmada bu şeklin oldukça verimli olduğu gözlenmiştir [6].

Dikey eksenli Savonius tip rüzgar türbini kısaca şöyle özetlenebilir. Kanatlar arasına giren rüzgar, kanatları sürüme kuvveti ile döndürür. Şekil 2.15.'de gösterildiği gibi konkav şekildeki kanat rüzgarı toplar. Rotor, F_{konkav} ve $F_{konveks}$ kuvvetlerinin farkı ile oluşan V_{rotor} hızıyla döner.



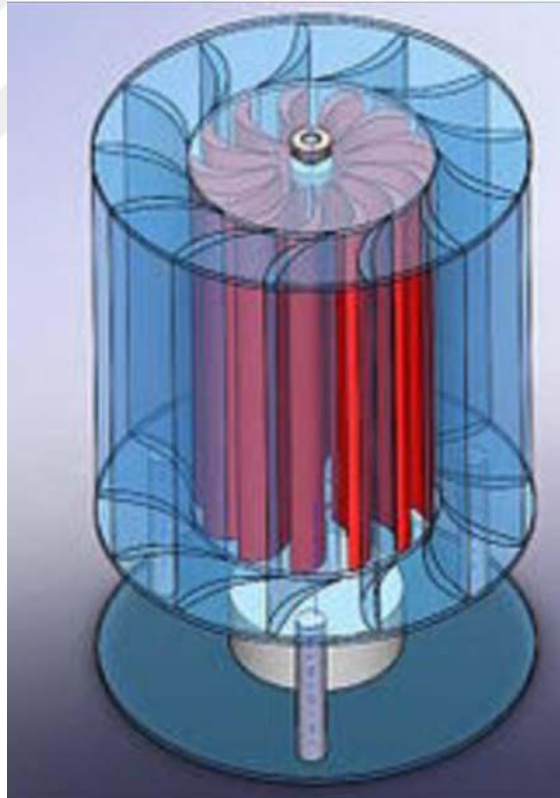
Şekil 2.15. 2 Kanatlı Savonius tipi rüzgar türbini

Savonius tipi rüzgar türbininde türbin kanatlarına gelen rüzgar, bir an rüzgara karşı bir an da rüzgarla birlikte hareket ettiğinden, diğer tip türbinlere göre sürüme kuvveti (drag force) düşük olur Bu yüzden de verimleri düşüktür [7].

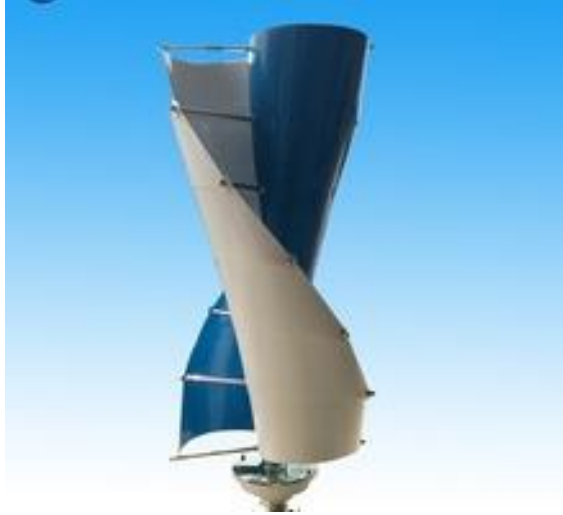


Şekil 2.16. 3 Kanatlı Savonius tipi rüzgar türbini

Yukarıdaki Şekil 2.16.'da 3 kanatlı savonius tipi rüzgar türbini, Şekil 2.17.'de ise çok kanatçıklı dışarıdan yönlendirme kanatları da olan bir dizayn görülmektedir.



Şekil 2.17. Dışarıdan yönlendirmeli çok kanatçıklı Savonius tipi rüzgar türbini

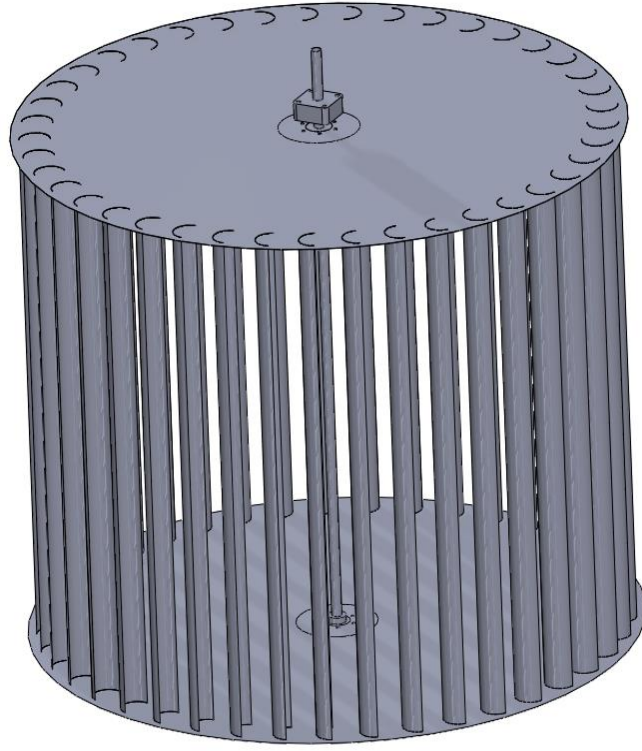


Görsel 2.6. *Helis tip düşey eksenli rüzgar türbini*

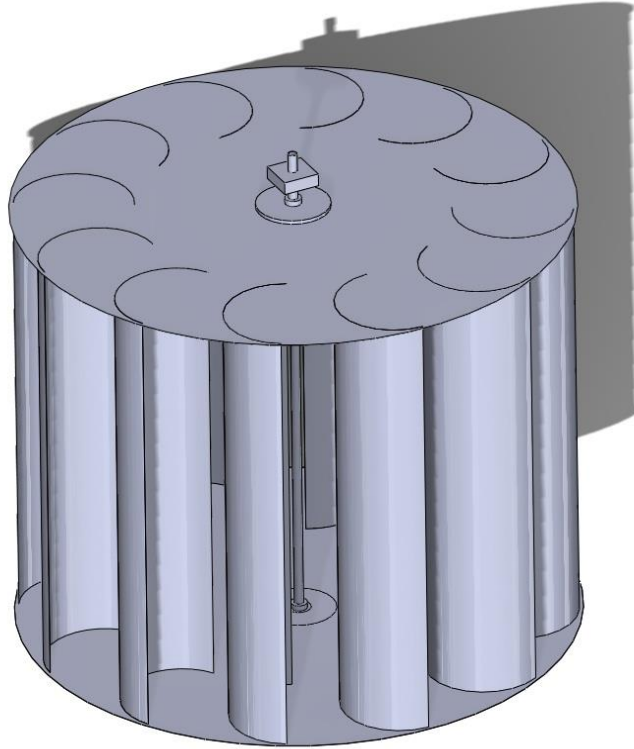


Görsel 2.7. *Darrieus tipi rüzgar türbini*

Dikey eksenli rüzgar türbini için çok çeşitli kanat tasarımları yapılabilir. Görsel 2.6.'da helis tip dikey eksenli rüzgar türbini, şekil 2.7.'de Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbini görülmektedir. Bu tez için başlangıçta düşünülen 41 yan kanatçıklı tasarım, Şekil 2.18.'de görülmektedir, fakat ilerleyen aşamalarda dizaynın yapım zorluğu sebebiyle değiştirilmiştir. Son yapılan türbin dizaynımız Şekil 2.19. daki gibidir.



Şekil 2.18. 41 kanatçıklı VERT türbin



Şekil 2.19. 12 kanatçıklı Savonius tipi rüzgar türbini

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin dezavantajı yer seviyelerinde olduklarından düşük rüzgar hızlarına maruz kalmalarıdır. Bu sebeple yatay eksenli türbinlere göre daha düşük verimlidirler, fakat avantajları da aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1- Basit kurulum.
- 2- Her yere montaj imkanı.
- 3- Kaynağında elektrik kullanım imkanı.
- 4- Düşük maliyet.
- 5- Sabit ve yerel fiyatla üretim.
- 6- Her yönden gelecek rüzgarı kabul etmesi.
- 7- Savonius tipleri özellikle düşük hızda başlayabilmesi ve yüksek başlama torkuna sahip olması.
- 8- Düşük rüzgar hızlarında da dönebilmesi.
- 9- Genellikle yer gibi alçak seviyelerde olduğu için generator , akü, inverter gibi ekipmanları yer seviyesinde olacağından kolay servis işlemi.

Bir araştırmada da; küçük güçlü bir dik eksenli türbin sistemi, bağlı olduğu yükler ile birlikte incelenmiş ve önemli bir avantajı daha ortaya konmuştur. Araştırmada sistemin, kendisine bağlı olan yüklerin aktif ve reaktif güç çekmelerinden etkilenmediği ve sistemin güç performansının değişmediği gözlenmiştir [8].

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÜÇ HESABI

Enerji; üretilmeyen, ancak bir formdan diğer bir forma dönüştürülebilen, kısaca Yunanca “energia” sözcüğünden alınmış, karşılığı etkiyen kuvvet anlamına gelen bir güçtür. Rüzgar türbinlerinden elektrik üretmek de, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi, başka bir form olan mekanik enerjiye çevirmek ve sonrasında da mekanik enerji ile jeneratör rotorunu döndürerek elektrik enerjisine çevirme işlemidir.

Güç hesabı için ilerideki sayfalarda elde edilen ana formül, hem yatay eksenli türbinlere hem de dikey eksenli türbinlere uygulanabilmektedir. Zira ana mantık aynıdır. Türbin kanatlarının süpürdüğü alan bir silindirik kolon gibi düşünülür.

Silindirik kolon gibi düşünülebilecek rüzgar türbininin , içinden v hızıyla geçen akışkan havanın bir kinetik enerjisi vardır ve şu şekilde ifade edilir:

$$Ek = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (3.1)$$

Ek : Kinetik enerji (İş)..... kg.m²/sn² veya j(joule) veya..... Nm

m : Hareket eden havanın kütlesi.....kg

v : Hareket eden kütlenin hızı.....m/sn

t zamanda yapılan iş veya harcanan enerji gücü belirtir:

$$P = \frac{dEk}{dt} \quad (3.2)$$

P : GüçBirim zamanda yapılan iş..... (Nm/sn veya j/sn veya W)

t : Zaman....sn

$$P = \frac{d\left(\frac{1}{2} . m . v^2\right)}{dt}$$

denklemini $P = \frac{d(u.v)}{dt} = u \frac{d(v)}{dt} + v \frac{d(u)}{dt}$ kuralına göre açıldığında :

$$P = \frac{1}{2} (2mv \frac{d(v)}{dt} + v^2 \frac{d(m)}{dt})$$

Hız v sabit olduğu anda , değişmiyor kabul edildiğinde $\frac{d(v)}{dt} = 0$

$$P = 1/2 (2mv.0 + v^2 d(m)/dt)$$

$$P = 1/2. v^2. \dot{m} \quad (3.3)$$

Türbin kanadına çarpan havanın kütleli debisi :

$$\dot{m} = \rho. A. v \quad (3.4)$$

$\dot{m}$: Kütle... kg/sn (Değişken olan havamızın kütlesi)

ρ : Yoğunluk... kg/m³

A : Havanın çarptığı kesit alanı.....m²

v : Hareket eden kütlenin hızı...m/sn

Kütle m nin formülü $Kütle = Yoğunluk * hacim$ şeklinde de açıklanabilir.

Yer değiştiren akışkan havanın hacmi, kesit alanı ile aldığı yolun uzunluğunun (Diğer bir deyişle süpürdüğü yolun) çarpımıdır :

$$V = A. d \quad (3.5)$$

V : Hacim.... m³

A : Kesit alanı...(Rüzgar türbininde süpürülen alanın kesiti olarak anılacaktır.)..... m²

(Savonius türbinde $A = 2R * h$, yani türbin çapı ve türbin yüksekliği çarpımıdır.

Bu tez sonunda yapılan 12 kanatçıklı türbinde süpürülen alan $A = 2R * h$

Türbin yarıçapımız $R=0,75$ m , $h=1$ m ise $A = 1,5$ m²)

d : Yükseklik veya yol (Türbinde hava ile süpürülen yol)....m

$$d = v. t \quad (3.6)$$

d : yol....m

v : Rüzgar hızı.....m/sn

t : Zaman....sn

(3.5) ve (3.6) birleştirildiğinde (3.4) de ki formüle tekrar ulaşılmış olur.

$$\dot{m} = \rho . A . d = \rho . A . v . t \quad (3.4)$$

O halde elde edilecek kütle , rüzgar gücü formülünde (3.2) yerine konursa:

$$P = Ek/t \quad (3.2)$$

$$P = \frac{1}{2} . \rho . A . v . t . v^2 / t$$

$$P = \frac{1}{2} . \rho . A . v^3 \quad (3.7)$$

Bu formül, rüzgar gücü hesaplamasında kullanılacak ana formüldür.

$P_{rüzgar} = (Pr) = \frac{1}{2} . \rho . A . v_1^3$ olarak ileride Cp hesabında kullanılacaktır

Temel rüzgar türbini formülümüzde en dikkat çeken veya en etkili unsurun v^3 olduğu görülmektedir, yani rüzgar hızı kendi küpüyle güç hesabına katıldığından en etkili elemandır.

3.1. Hava Yoğunluğu

Hava yoğunluğu , birim hacimdeki havanın kütlesidir. Meteoroloji ve havacılıkta hava yoğunluğunu hesaplamak çok önemlidir. Rüzgar türbinlerinde de gücü etkileyen önemli bir etkidir.

$$Havanın\ Yoğunluğu = \frac{Atmosfer\ basıncı}{Gaz\ sabiti * Sıcaklık} \quad (3.8)$$

Atmosfer basıncı : Belirli bir yüzeye, üzerindeki atmosfer kolonu tarafından uygulanan birim kuvvettir. Atmosferik veya barometrik basınç olarak da anılır. Genellikle civalı ve aneroid (sıvısız) barometreler ile ölçülür.

Gaz sabiti : Hava için gaz sabiti $0,2870 \text{ kJ}/(\text{Kg.k})$

Sıcaklık : Kelvin cinsinden alınır.

3.1.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişmesi

Hava yoğunluğu çok değişkendir. Değişme sebeplerinden birisi sıcaklıktır. Sıcaklık ile ters yönde değişir. Sıcaklık yükselirse hava yoğunluğu düşer, dolayısıyla elde edeceğimiz güç düşer. Soğuk hava rüzgar enerjisi elde etmek için daha uygundur.

Tablo 3.1 'de hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişmesi gösterilmektedir.

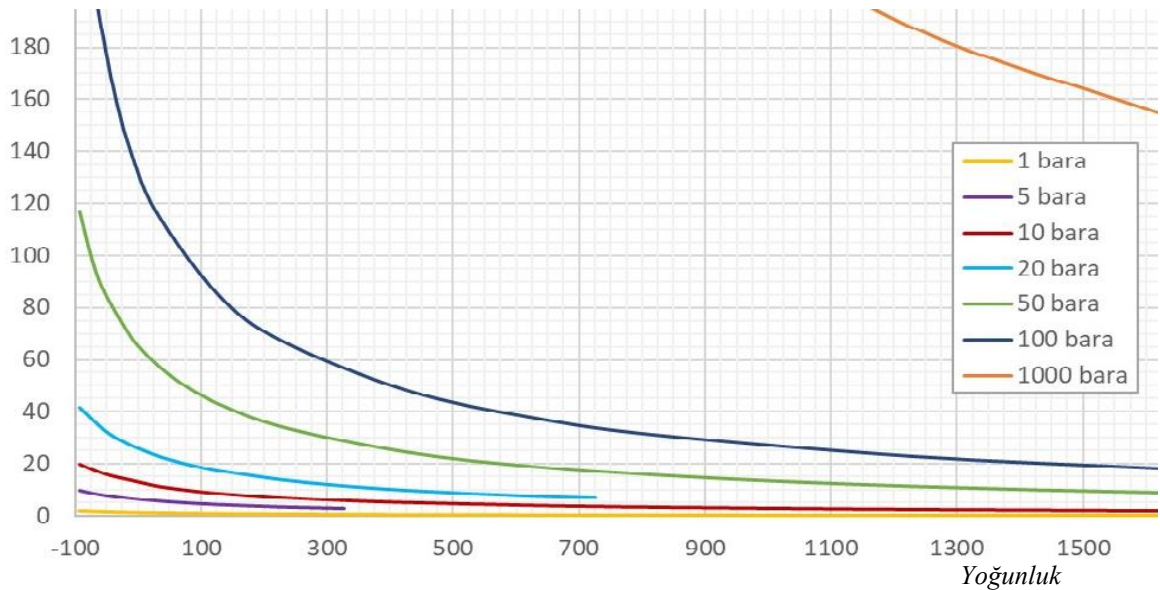
Uluslararası Standart Atmosfer (ISA), dünya atmosferinin sıcaklık, yoğunluk, basınç, gibi özelliklerinin yüksekliğe bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

International Standard Atmosphere - ISA şartlarında :

Deniz seviyesinde 1013,25 mb atmosfer basıncında ve 15°C de kabul edilen hava yoğunluğu $\rho = 1,226 \text{ kg}/\text{m}^3$ 'dür.

Tablo 3.1. Hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişmesi [9]

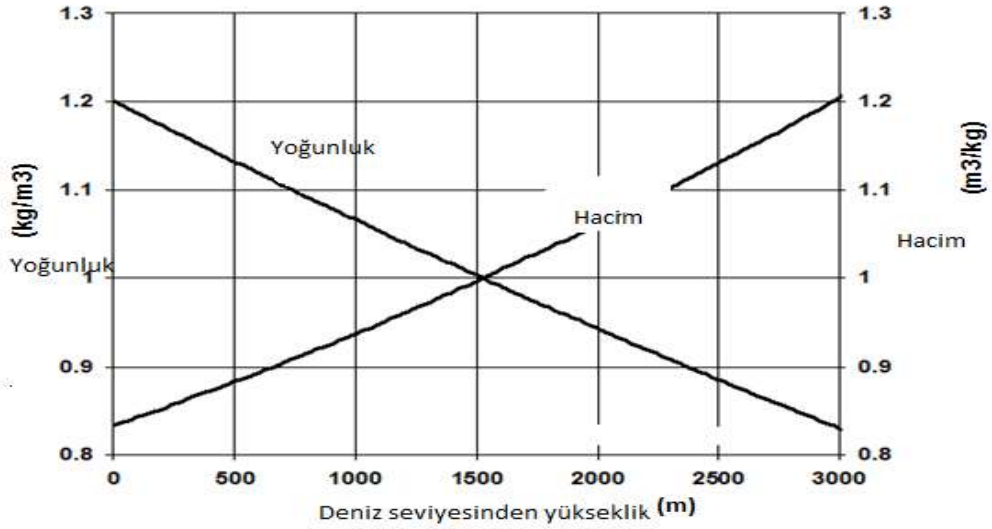
Sıcaklık



3.1.2. Hava yoğunluğunun yükseklik ile değişmesi

Hava yoğunluğu Tablo 3.2.'de görüldüğü gibi yükseklik ile ters yönde değişmektedir.

Tablo 3.2. Hava yoğunluğunun yükseklik ile değişmesi [10]



Türbinimizin bulunduğu yerin hava yoğunluğu, türbinimizin bulunduğu yerin deniz seviyesinden yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\rho = \rho_0 - 1,194.10^{-4}.H \quad (3.9)$$

ρ : Bulunulan yerin hava yoğunluğu

ρ_0 : 1,226 kg/m³

H : Bulunulan mevkinin rakımı..... m.....(Eskişehir rakım 873m)

(3.9) da yerine konulduğunda

$$\rho = 1,226 - 1,194.10^{-4}.873 = 1,1217 \text{ kg/m}^3 \quad (3.10)$$

Eskişehir 'de türbini koyacağımız bölge Odunpazarı OSB, Kanlıpınar Köyü mevkiinde rakım 873 m'dir. Örneğin aşağıdaki tablo 3.3.'de görüldüğü gibi 14.Şubat.2018 Tarihinde sıcaklık 7,1 °C , basınç 1015 hPa , ve rüzgar hızı sıfırdır.

Anadolu Üniversitesinde rüzgar hızı 23 km/saat (6,4 m/sn) olarak görülmektedir. En yüksek rüzgar hızı 26 km/saat (7,2 m/sn) olarak görünmektedir.

Tablo 3.3. Eskişehir Bölgesinin 14.02.2018 deki Meteoroloji 3.Bölge Müdürlüğü'nden alınan hava durumu [11]

Filtre...	Hadise	Sıcaklık (°C)	Basınç (hPa)	Nem (%)	Yağış (mm)	Rüzgar Yönü	Rüzgar (km/saat)
ESKİŞEHİR BÖLGE 14 Şubat - 11.45 (Yükseklik: 801)		5,6	1014,8	72			16
ALPU/ALAPINAR KÖYÜ 14 Şubat - 11.30 (Yükseklik: 1250)		4,3		66			0
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ 14 Şubat - 11.45 (Yükseklik: 788)		5,7	1015,1	70			23
MAHMUDİYE TİGEM 14 Şubat - 11.45 (Yükseklik: 888)		7,5	1017,2	58			23
MİHALIÇCIK/KIZILTEPE ORMAN SAHASI 14 Şubat - 11.48 (Yükseklik: 1341)		3,9		55			26
MİHALIÇCIK/ÇATACIK 14 Şubat - 11.48 (Yükseklik: 1586)		1,7	1015,2	90			16
ODUNPAZARI/KANLIPINAR KÖYÜ 14 Şubat - 11.40 (Yükseklik: 873)		7,1		76			0

Dikey eksenli türbinin konulduğu OSB bölgesinde ve kurulması düşünülen çeşitli alanlarda muhtelif rüzgarlı zamanlarda anemometre yardımıyla rüzgar hızı ölçülmüştür. Örneğin Sakarya Üniversitesi Serdivan Esentepe Mevkiinde kurulu bulunan kampus içindeki Elektrik Elektronik Mühendisliği binasının önünde çeşitli ölçümler yapılmış, yer seviyesinde ortalama 3,3 m/sn rüzgar hızı ölçülmüştür. Rüzgarlı havalarda okunabilen rüzgar hızları tablo (3.4) deki gibidir.

Tablo 3.4. *Türbinin kurulduğu yerde ve kurulması düşünülen yerlerde muhtelif zamanlarda ölçülen rüzgar hız değerleri*

Tarih	Saat	Ortalama Rüzgar hızı km/saat
21.10.16 Cuma	16: 58	9,1 Batıkent Mevkii
“ “	16:59	8,4 “
12.02.18 Pazartesi	10:06	7,1 OSB Mevkii
14.02.18 Çarşamba	14:34	20,5 “
“ “	14.35	31 “
7.3.18 Çarşamba	17:26	11,4 Batıkent Mevkii
“ “	17:28	9,3 “
“ “	17:29	12,4 “
16.10.18 Salı	04:28	10,8 Batıkent Mevkii
“ “	09:28	7,1 “
“ “	09:30	7,1 ”
18.10.18 Perşembe	15.38	7,6 OSB Mevkii
“ “	15:41	7 “
5.11.18 Pazartesi	10:20	7,1 “
16.11.18 Cuma	14:31	7,8 “
28.11.18 Çarşamba	16.36	7,9 “
“ “	16:37	7,1 “
9.12.18 Pazar	12:45	9,5 ”
“ “	12:48	7,2 “
“ “	13:18	10,7 “
13.2.19 Çarşamba	14:14	11,9 Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü önü.

Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi Kanlıpınar mevkiinde rüzgar hızı ortalama 7 km/h olup rüzgar gücü formüllerinde kullanacağımız birim m/sn olacağından, ortalama 2m/sn ye denk gelmektedir. Bu demektir ki, rüzgar hızı çok düşük olduğundan türbin dönme hızı da düşük olacaktır. Buradan yola çıkılarak bu projede çok düşük dönüş hızında çalışmaya başlayacak jeneratör düşünülmüştür. Mevcut jeneratörümüz 30 Rpm de üretime başlayıp , 240 Rpm’e kadar artan bir voltaj yaratacaktır.

Tasarımda başlangıçta hızı artırıcı dişli kutusu, kayış kasnak sistemi gibi aktarma sistemleri kullanılmamıştır. Fakat bu durumda jeneratörün devir sayısı çok düşük olduğundan gücümüz de çok düşük olmuştur. Bu sebeple jeneratör devir sayısını

artırmak için türbin altına bir büyük kasnak ve jeneratör mili üstüne ¼ çaplı küçük kasnak yerleştirilerek devir sayısı 4 katına çıkarılmıştır.

3.2. Hellmann Yükseltme Bağntısı

Rüzgar sistemi tasarımında ortalama rüzgar hızıyla enerji hesabı yapılmaz. Mutlaka planlanan yükseklikteki rüzgar hızı uzun süreli gözlenmelidir. Ancak planlanan yükseklikteki rüzgar hızı, referans yükseklikteki rüzgar hızı değerlerinden hareketle hesaplanabilir. Bu hesap, Hellmann yükseltme bağıntısı kullanılarak yapılabilir.

$$\frac{V_r}{V_{ref}} = \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\mu \quad (3.11)$$

μ : Hellmann katsayısı

V_r : Hesaplanacak rüzgar hızı ...m/sn

V_{ref} : Ölçülmüş referans rüzgar hızı....m/sn

H : İstenilen türbin yüksekliği...m

H_{ref} : Ölçülmüş referans türbin yüksekliği....m

Farklı bölgelerde Hellmann katsayısı farklı değerlerde alınır. Tablo 3.5. Hellmann katsayı değerlerini çeşitli bölgelere göre vermektedir.

Tablo 3.5. Farklı bölgelerde μ Hellmann katsayısı

Ölçüm yeri	μ : Hellmann katsayısı
Açık deniz, kıyı şeridi	0,14
Açık alan ve tarlalar	0,18
Ağaçlık alan ve şehir	0,28
Yüksek binalı kentsel alan	0,4

3.3. Rüzgar Hız Dağılımı Kavramı Ve Hesaplama Teknikleri

Bir bölgenin rüzgar potansiyelini hesaplamak için çeşitli metotlar kullanılır. En çok kullanılan ve doğruluğu en yakın olan metod Weibull dağılımıdır.

Weibull dağılımı, iki parametrelili bir dağılım fonksiyonu olup boyutsuz şekil (k) ve ölçek parametresi (c)‘ den oluşur. 2 farklı parametre olmaz ise o zaman farklı analitik dağılım fonksiyonları kullanılır. Bu hesaplamada ölçek parametresi (c) rüzgar hızı ile aynı birime sahip olacaktır ve birimi m/sn’ dir. Şekil parametresi(k) rüzgar sıklığıdır.

İki parametrelili weibull olasılık dağılım fonksiyonu:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3.12)$$

Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığında şekil parametresi ekvator yakınlarında 1 civarında, sıcak enlemlerde 2 civarında, sık rüzgarlı bölgelerde 3 civarındadır. Ölçek parametresi 1 ‘e eşit olduğunda Gaussian Dağılımı, 2’ye eşit olduğunda da Rayleigh dağılımı denir. Yani Rayleigh dağılımı, weibull dağılımının ölçek parametresinin 2 olduğu özel bir durumudur ve tek parametrelili bir dağılımdır.

Rayleigh dağılımında sadece ortalama rüzgar hızıyla dağılım belirlenebilir.

$$F_{rayleigh}(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v_m^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \frac{v^2}{v_m^2}\right) \quad (3.13)$$

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(v/c\right)^k\right] \quad (3.14)$$

Simülasyon programlarında sistemin denenmesi için bazen binlerce veri gerekebilir, bu durumda verilerin toplanması çok zahmetli olabilir. Rüzgar çalışmalarında Weibull olasılık yoğunluk dağılımı gerçeğe yakın veriler oluşturduğu düşünülerek sıklıkla kullanılmaktadır.

Aşağıdaki çalışmalarda rüzgar hızları simülasyonu için weibull dağılımları kullanılmıştır:

- Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi [12].

- Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı. [13].

Bir çalışmada da dikey eksenli küçük ölçekli bir rüzgar türbininin önemli parametreleri üzerinde durulmuş , farklı rüzgar hızlarında jeneratörden elde edilebilecek güçler tablo haline getirilmiştir. Türbin 3 m/sn ve 16m/sn hızlarında çalışmak üzere dizayn edilmiş, aylık ve yıllık olarak Rayleigh dağılımı ile rüzgar hızı olasılıkları yaratılmış, yıllık üretilecek enerji hesaplanmıştır. 7.838.665,48 Wh bulunmuştur. Tablo haline getirilen veriler elektrik kWh fiyatı Ontario şehrinde \$ 0,108 /KWh ile çarpılarak yıllık elektrik üretilerek tasarruf edilebilecek enerji miktarı çıkarılmıştır[14].

3.4. Cp Güç Katsayısı (Betz Yasası)

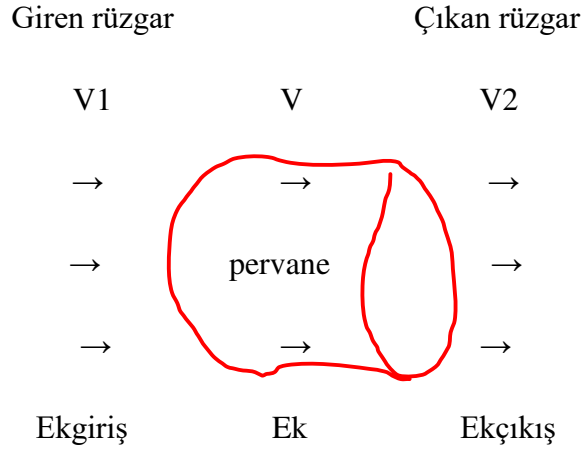
Betz yasası, 1919'da Alman mühendis Albert Betz tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir. Betz, rüzgar rotorunu ideal bir enerji dönüştürücüsü olarak kabul etti. Pratikte, teorikte hesaplanan gücün tamamının elde edilmesi mümkün değildir. Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde toplam verim, türbinin verimine, kanatların aerodinamik özelliklerine, varsa dişli mekanizmasının verimine, kavrama sistemlerinin verimine, jeneratör verimine vs. bağlıdır. Cp adı verilen güç katsayısı (Power coefficient baş harflerinin kısaltılmışıdır), Betz tarafından maksimum %59,26 olarak belirlenmiştir[15].

Hava bir akışkan kabul edildiğinden Betz yasasını akışkanlar dinamiğinden termodinamik içindeki carnot çevrimi ile benzer düşünmek gerekir. Bir ısı makinası enerjinin tüm rezervini kullanamaz, ısının bir kısmını çevreye verir, bu durumda carnot verimliliği şu şekilde açıklanabilir:

Giriş sıcaklığı T1, red edilen sıcaklık yani çevreye geri iade edilen sıcaklık T2 ise,

$$\eta_{carnot} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Betz denkleminde de türbinin giriş hızı V1, çıkış hızı V2 olarak düşünülebilir. Aşağıdaki şekilde V1 ve V2 hızları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Pervanenin kabul konumu

Türbinin yapacağı iş, rüzgarın kanatlara uyguladığı basınca bağlıdır, rüzgar tarafından kanatlara uygulanan basınç ise, Bernoulli ilkesine göre kesitiyle hızı arasında ters orantılıdır. Kesit alanlarını sırasıyla S_1 , S , S_2 olarak düşünersek:

Bernoulli akışkanlar dinamiğine göre $V_2 < V_1$ ise $S_2 > S_1$ dir.

Eğer hava akışının, engellenmemiş bir şekilde aktığı düşünülürse:

$$m = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho \cdot S \cdot V = \rho \cdot S_2 \cdot V_2 = \text{sabit olur} \quad (3.15)$$

Rotorda yaratılan kuvvet bu durumda Euler teoremine göre:

$$F = m \cdot a \quad (3.16)$$

Duran bir cismi harekete geçirmek için kuvvet gerekir, sabit hızla giden bir cismin hızını değiştirmek için de bir kuvvet gerekir. Hızın zamana göre değişimine ivme denir, kuvvetin ivme ile yakın ilişkisi vardır. Burada bahsedilen a ivme olup rüzgar hızının zamana göre değişimidir:

$$\begin{aligned} F &= m \cdot \frac{d(V)}{dt} = m \cdot \Delta V \\ &= m \cdot (V_1 - V_2) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Rüzgar tarafından türbinde yapılan iş, kabaca $\text{kuvvet} \times \text{yol}$ ise:

$$dE = F \cdot dx \quad (3.18)$$

(3.2) ile denkleştirilirse:

$$\text{Güç } Pt = \frac{dE}{dt} = F \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) = F \cdot V = m \cdot (V1 - V2) \cdot V$$

$$Pt = \frac{Ek}{t} = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \frac{d(m)}{dt} \quad (3.2)$$

$\frac{d(m)}{dt}$ Birim zamanda kısaca m diyelim.

$$Pt = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V1^2 - V2^2)$$

$$Pt = m \cdot (V1 - V2) \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V1^2 - V2^2)$$

$$m \cdot V \cdot (V1 - V2) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot V2^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V1 + V2) \cdot (V1 - V2)$$

$$V = \frac{1}{2}(V1 + V2) \quad (3.19)$$

Yani türbine giren ve çıkan rüzgarın ortalaması, türbindeki rüzgarın hızını verir.

Türbinimizdeki rüzgarın kütlesi $m = \rho \cdot A \cdot V$ ise türbinimizin gücü : (3.20)

$$Pt = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V1^2 - V2^2)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot (V1^2 - V2^2) \quad \text{V yerine (3.19) formülü konur:}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (V1 + V2) \cdot (V1^2 - V2^2)$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (V1 + V2) \cdot (V1^2 - V2^2)$$

C_p , esasen P_t ve P_r değerlerinin oranıdır.

$$C_p = P_t / P_r \quad (3.21)$$

$Pr = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3$ Daha önce bulunmuştu.

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) / \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) / V_1^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot (V_1 + V_2) / V_1 \cdot (V_1^2 - V_2^2) / V_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot (1 + V_2/V_1) (1 - (V_2/V_1)^2) \end{aligned}$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)$$

V_2/V_1 için bir b değeri verilirse, bu değere etkileşim parametresi , (interference parameter) veya çıkış hız faktörü (downstream) denir.

$$b = V_2/V_1 \quad (3.22)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot (1 + b)(1 - b^2) \quad (3.23)$$

fonksiyonu elde edilir.

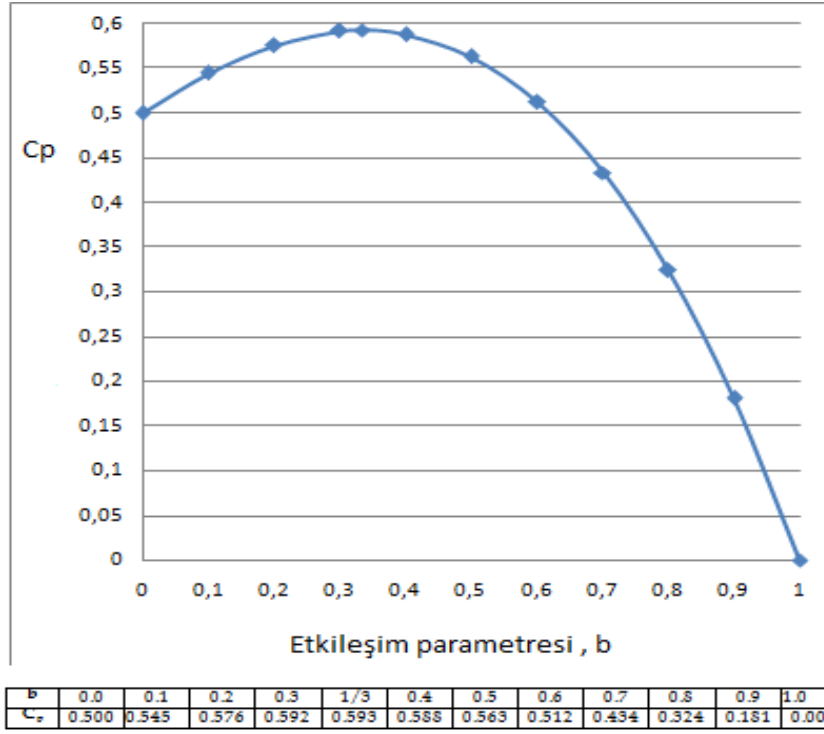
$b=1$ olduğu zaman $V_1=V_2$ olur ki bu sıfır performans olur.

$b=0$ olduğu zaman $V_2=0$ demektir ve türbin durmuştur , C_p 0,5 olmuştur.

Çeşitli b değerleri (etkileşim parametresi) aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde C_p nin maksimum olması için gereken b değeri bulunur. Bu değer $1/3$ tür. Yani rüzgar hızı , türbin çıkış hızının 3 katı olmalıdır. C_p maksimum verim : 0,5926 olarak bulunur. Pratikte bu oranı tutturmak zor olabilir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde %35 ile %50, dikey eksenli rüzgar türbinlerinde ise daha düşük seviyelerde olmaktadır. Yaklaşık %20 olarak düşünülmektedir. Betz yasası hem dikey hem de yatay eksenli türbinlere uygulanabilmektedir [16].

Tablo 3.6. C_p değeri ve b etkileşim parametresi ilişkisi



b etkileşim değeri : Rüzgarın türbinden çıkış hızı ile giriş hızı arasındaki oranı

Genel kabul görmüş tablo 3.6 daki bu standart değerlerden yararlanarak, dikey eksenli rüzgar türbinlerinde C_p güç katsayısının en iyi 0,3 civarında olduğu kabul edilirse, b yaklaşık 0,85 civarında olur, yani türbine giren rüzgar 10 ise 8,5 olarak çıkar.

C_p , rüzgar türbininin aerodinamik karakterine çok bağlıdır. Ancak havanın kaldırma kuvvetini kullanamayan Savonius rüzgar türbininde C_p değeri çok düşüktür. C_p yüksek oranda lineer olmayan, λ ve β değerlerine bağlı bir güç fonksiyonudur. Değişken olan λ , türbinin açısal hızına ve rüzgarın hızına bağlıdır, β ise türbin kanatlarının açısına bağlıdır.

C_p hesabı için Siegfried, 1998 yılında bir model geliştirmiştir. Bu modelin denklemi oldukça genel bir kabul görmüştür, ve bir çok yayında referans olarak kullanılmaktadır [17].

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot (C_2 / \lambda i - C_3 \cdot \beta - C_4) \cdot \exp(-C_5 / \lambda i) + C_6 \cdot \lambda \quad (3.24)$$

Siegfried ‘a göre denklemdeki sabitler aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$C_1 = 0,5176$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0,4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = 21$$

$$C_6 = 0,0068$$

Bu yaklaşım Matlab ‘de aşağıdaki şekilde yazılabilir:

```
% Bu formül Siegfried yaklaşımı ile
% Cp'yi hesaplamaktadır.
% lambda: 0.5 Örnek olarak verilmiştir DEĞİŞEBİLİR
% beta:0 Örnek olarak verilmiştir DEĞİŞEBİLİR
% C_1:0.5176          C_2:116
% C_3:0.4            C_4:5
% C_5:21             C_6:0.0068
%%
lambda=0.5;
beta=0;
C_1=0.5176;
C_2=116;
C_3=0.4;
C_4=5;
C_5=21;
C_6=0.0068;
Cp=C_1*(C_2/lambda-C_3*beta-C_4)*exp(-C_5/lambda)+C_6*lambda;
%end
```

3.5. Kanat Uç Hızı

Kanat ucu hızı V_{tip} ile anılır. (Tip speed) Pervane kanadı ile rüzgar hızı arasındaki etkileşim, uçak kanatlarındaki gibidir. Rüzgar kuvveti, kanatlara aerodinamik kaldırma ve itme -sürüme kuvveti uygular. Kaldırma kuvveti her zaman rüzgar hızına göre dik olarak kabul edilen kuvvettir, sürüme kuvveti ise paralel olarak kabul edilen kuvvettir. Kanadın eğiminin yatay eksene göre 15 derece civarında

olduğudurumlarda kaldırma kuvveti birden düşmektedir. Bu kaldırma kuvveti kaybına STALL durumu denilmektedir. Düşme şeklinde tercüme edilebilir. Uçaklarda tutunma hızı olarak da adlandırılmaktadır. Kanat şekline göre kaldırma ve sürüme kuvvet katsayıları bulunur ve akışkanlar dinamiği hesabıyla hesaplanır.

Bazı türbinlerde kanatlar rüzgar ile birlikte döndüğünde kanatlarda oluşan hız, rüzgar hızından daha büyüktür. Türbin hızı kanadın ucunda, ortasında ve bağlantı hub noktasında farklı hızlardadır. En yüksek hız kanat ucundadır. Örneğin bir yatay eksenli rüzgar türbininde rüzgar hızı 9 m/s iken kanat ucu hızı 60m/s olabilmektedir. Rüzgarın sabit durduğu zamandaki kanat hızı ile rüzgar olduğunda kanadın hızı da oldukça farklıdır. Aynı rüzgarda kanat ucunda oluşan hız kanat çapına bağlı olarak artmaktadır. V_{tip} ile gösterilir.

$$V_{tip} = \omega R = 2\pi f R = 2\pi NR/60 \quad (3.25)$$

V_{tip} : Kanat uç hızı..... m/sn

ω : Türbin açısal hızRadyan/sn

f : Dönme frekansı (Hz).....1/sn

N : RPM Türbin dönüş hızı ...rpm (1 rpm=16,67 mHz)

R : Türbin rotoru yarıçapı.....m

Çevresel gürültü dolayısıyla da kanat uç hızı hesaplanıp yorumlanabilir. Aşağıdaki limitin altında olması istenmektedir:

$V_{tip} < 75 \text{ m/sn (270 km/saat)}$

3.6. Kanat Uç Hız Oranı (TSR)

TSR oranı (Tip speed ratio), kanat ucu hızının , rüzgar hızına bölünmesiyle elde edilir. λ ile gösterilir.

$$\lambda = V_{tip}/V_r \quad (3.26)$$

λ : TSR-Tip speed ratio....Kanat uç hız oranı

V_{tip} : Kanat uç hızı..... m/sn

V_r : Rüzgar hızı.....m/sn

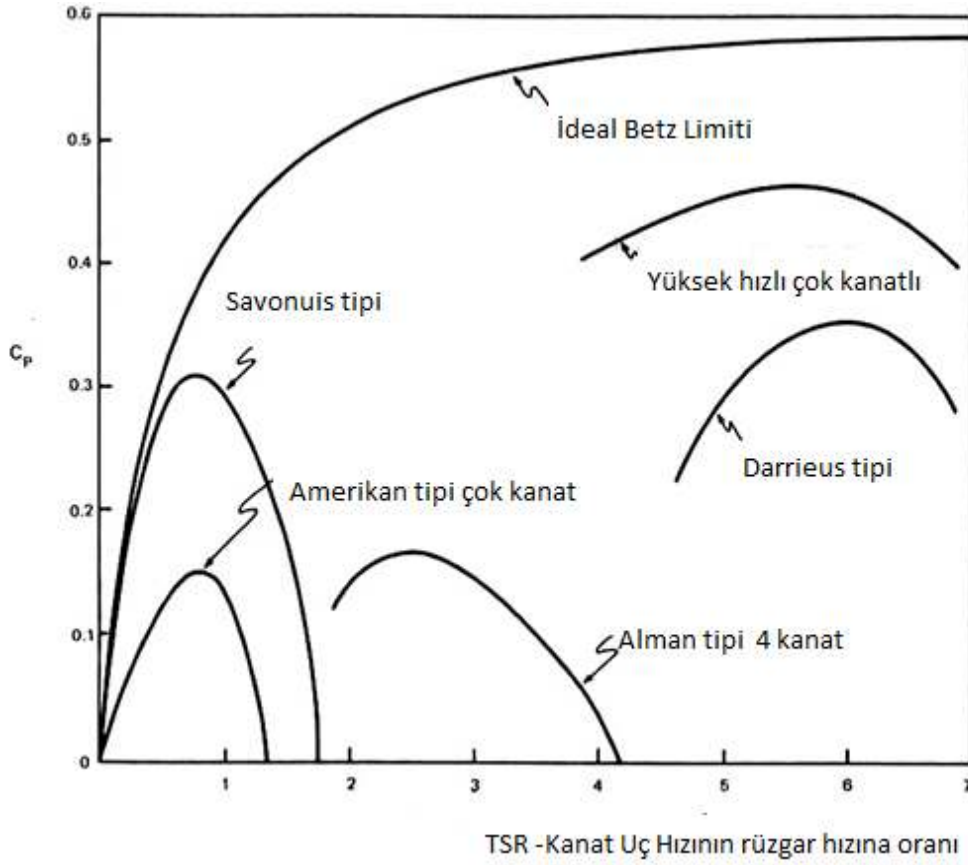
Türbine gelen havanın bir kısmı kanatlardan geçerken hızını kaybeder. Çıkıştaki bu hız sıfır olursa türbin katı bir duvar olmuş gibi düşünülebilir. Fakat bu durumda türbin dönmez. Rüzgarın bir kısmını almalı , kalanının çıkışına izin vermelidir. Kanatlar çok yavaş dönüyorsa , türbine giren rüzgar çok kayba uğramadan çıkar. Yani giren rüzgardan yeteri kadar enerji elde edemeden türbinden geçip gidiyor demektir. Türbinimiz çok hızlı dönerse bu sefer de kanatlarımız giren rüzgarın önünde bir duvar gibi duruyor demektir. Bu yüzden rüzgar türbini kanat ucu hız oranı – TSR- en uygun oranda tutulmalıdır. Ayrıca kanat çok hızlı döndüğünde arkasında bir türbülans yaratır, bir kanadın yarattığı türbülans, kuvvetli olursa diğer kanada ulaşır, türbinin verimini düşürür.

Kanat uç hız oranı –TSR, kanat sayısına göre değişir. Kanat sayısı az olursa türbin daha hızlı döner, dolayısıyla kanat ucu hızı artar. Böylece TSR artmış olur. Örneğin iyi dizayn edilmiş 3 kanatlı bir yatay eksenli türbinin TSR değeri 6 civarındadır. İyi dizayn edilmemiş bir türbinde TSR düşük olursa , türbin yavaş döner veya stall durumuna girer ve dönmez. Bu durumda rüzgardan alınabilecek enerji alınmamış olur. TSR çok yüksek olursa türbin çok hızlı döner, bu durumda kanatlar türbülans yaratır, ayrıca aşırı hızdan türbin strese girer ve kırılma riski ile karşı karşıya kalınır.

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden Darrieus tip, uçak kanatları benzeri kanatlara sahip olduğundan havanın aero dinamik kaldırma kuvveti ile birlikte TSR değeri yüksektir. Savonius tipte ise kanatlar rüzgara karşı duvar gibi durduğundan hızlı dönemez , dolayısıyla TSR değeri daha küçüktür [18].

Çeşitli tip rüzgar türbinlerinde kanat uç hız oranı ile güç katsayısının değişimi Tablo 3.7. de gösterilmektedir. Savonius tip dikey eksenli rüzgar türbinlerinde güç katsayısının maksimum 0,3 olduğu görülmektedir [19].

Tablo 3.7. TSR (λ -Uç hızı oranı) ile C_p (Güç katsayısı) değişimi



Anemometreler de bir savonius tipi dikey eksenli rüzgar türbini gibidir.

$$\lambda_{\text{anemometre}} \leq 1$$

Bir rüzgar türbininin ne şekilde bir kanat yapısı olduğu TSR değerinden anlaşılabilir. Eğer TSR değeri 1'den küçükse, rüzgarın itme sürümesi ön planda ve kaldırma kuvveti ikinci plandadır diye yorumlanır, savonius tipi dikey eksenli türbinlerinde havanın yalnızca itme-sürüme kuvvetinden yararlanır, kaldırma kuvvetinden yararlanılamaz, bu yüzden TSR en fazla 1 olur. Yatay eksenli türbinlerde havanın itme -sürüme kuvvetinden yararlandığı gibi kaldırma kuvvetinden de büyük ölçüde yararlanır, bu yüzden TSR değerleri yüksektir. Yani erodinamik kaldırma kuvvetinin ön planda olduğu türbinlerde verim daha yüksektir, $TSR(\lambda) \geq 1$ ise elde edilecek olan enerji daha fazladır.

Günümüzde yüksek enerji eldesi için en çok , yatay eksenli rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Başka sebeplerle olan üstünlüklerinden dolayı da dikey eksenli rüzgar türbinleri de kullanılmaktadır. Piyasada şu anda en çok rağbet gören dikey

eksenli türbinlerden Savonius , Darriues, H-rotor tipleridir. [20] Nolu yayında dikey eksenli türbin çeşitleri incelenmiştir.

3.7. Türbin Torku

Rüzgar türbinlerinde tork hesaplamaları eskiden de en önemli konulardan biri olduğu gibi günümüzde de çok önemlidir. Çünkü dönme olmadan güç üretimi olmaz, açısal hız ve tork olmazsa da güç olmaz.

Tork, türbin rotorunu döndürebilmek için gerekli olan kuvvettir. Dönme momenti diye de anılmaktadır. Basitçe kuvvetin dik bileşeninin rotora olan uzaklığı ile çarpımıdır.

Rotordan elde edilen mevcut tork ile rüzgarda bulunan teorik tork arasındaki oran, tork katsayısını bildirir.

$$C_t = T_t / T_r \quad (3.27)$$

C_t : Tork katsayısı (Torque coefficient)

T_t : Türbin(Rotor) torku (N . m)

T_r : Mevcut rüzgar torku (N . m)

$$T_t = P_t / \omega \quad (3.28)$$

$$= C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 / \omega$$

$$\lambda - TSR \text{ formülü} = V_{tip} / v \quad (3.26)$$

$$= \omega R / v$$

$\omega = \lambda \cdot v / R$ yukarıda ω yerine konulduğunda

$$T_t = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot R / \lambda \cdot v$$

$$C_p \text{ yerine } C_p = \lambda \cdot C_t \text{ yazıldığında:} \quad (3.28)$$

$$C_p = \lambda \cdot C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot R / \lambda \cdot v$$

$$T_{\text{türbin}} = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot R \quad (3.29)$$

Rüzgar türbini performansını ölçmek için kullanılan diğer bir kabul de T_s - Statik torku hesaplamaktır. Bu aynı zamanda türbinin harekete geçme performansını da ölçen bir metottur. Statik tork, rotor kilitlendiği anda maksimum torkun okunduğu değerdir. Yani rotorun dönemez hale geldiği değerdir. Savonius rotor ve savonius düz kanatlı 2 çeşit sistemin birlikte kullanıldığı kombine sistemde tork performansı artmıştır. Bu durum [21] nolu yayında deneyle anlatılmış , kendi kendine start alabilen ve her rüzgar hızında bir güç üretebilen türbin tasarlanmıştır.

Savonius türbinler esasen ters kanattaki negatif tork sebebiyle verimleri düşüktür fakat düşük rüzgarlarda düşük başlama torkları sayesinde kolay harekete geçebilirler. Kanat şekli tasarımıyla güç faktörleri iyileştirilebileceğinden daha uzun zaman çeşitli kanat tasarımları üzerinde çalışılabilir. [22] nolu çalışmada gelecekteki tasarımlara fikir vermesi açısından geçmişteki savonius tasarımları incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.8. Yük Analizi

Rotorun maksimum dönme hızını bulmak için , rotorun üzerindeki yükleri iyi bilmek gerekir. Kanatları ölçülendirmek için sistemin santrifuj ve aero dinamik kuvvetleri hesaplanmalıdır.

$$Fr = Fc + Fn \quad (3.30)$$

Fr : Rotor kuvveti (Rotor force)

Fc : Santrifuj kuvveti (Centrifugal force)

Fn : Kanatların aerodinamik kuvveti (Aerodynamic force)

Santrifuj kuvvetine basit bir örnek vermek gerekirse, bir çember üstünde dönen bir arabada yolcuyla merkezden dışarı atmak isteyen kuvvet şeklinde tanımlanabilir. Kapı da bu durumda yolcuya içeri doğru bir kuvvet uygular.

$$F_c = m.R.\omega^2 \quad (3.31)$$

F_c : Santrifuj kuvveti . (Centrifugal force).....N

m : Kütle rotor için ... (Mass).....kg

R : Rotorun yarıçapı (Radius).....m

ω : Açısal hız.....(rad/sn)

F_n normal kuvvet, yani aerodinamik kuvvet hesaplanırken türbinin maksimum hız sınırında (cut out) oluşan aero dinamik kuvvetler olarak düşünülmelidir. Aerodinamik kuvvet, kaldırma kuvveti ve itme sürüme kuvvetleridir. Dikey eksenli türbinlerden Darius tipi türbinde kaldırma kuvveti hesaba katılır, savonius tipi türbinlerde itme sürüme kuvvetleri hesaba katılır yani savonius türbin dizayn ederken kaldırma kuvveti sıfır kabul edilir. Sürüme kuvveti de 2 bileşen olarak düşünülebilir, rüzgar kanada çarptığında 2 kuvvet oluşur, yüzeye dik gelen sürüme kuvveti F_n , bir de yüzeye teğet gelen tanjant kuvvet F_t . Yük analizinde bu kuvvetleri hesaba katmak gerekir.

3.9. Kanat Tasarımı

Kanat tasarlarken bazı noktalara çok dikkat edilmelidir. Öncelikle düşük sürtünme kuvveti yaratacak kanatlar olmalıdır. Esneme hareketinin çok ve düzensiz olacağı akıldan çıkarılmamalıdır. Kanadın aero dinamik özelliklerine dikkat edilmelidir. Uzun yıllar çalışması düşünülerek dayanıklı malzemeden yapılmalıdır. Fakat dayanıklı malzeme düşünülürken, ağırlığı da akıldan çıkarmamak gerekir. Çünkü ağırlık, sistemin verimini doğrudan etkilemektedir. Aşağıdaki çalışmada farklı malzemeden 3 çeşit kanat incelenmiş ve her birinin farklı güç katsayıları olduğu bulunmuştur. Ağır olanın sistem güç katsayısı en düşük olarak bulunmuştur [23].

Kanatların üstüne bir sonlandırma plakası da takılabilir, bu plaka türbin içindeki kanatları ittirecek hava miktarının dışarı kaçmasına engel olarak miktarının artmış olmasını sağlar. Bir araştırmada da bu durum test edilmiştir, türbin performansını arttırdığı bulunmuştur [24] .

Kanatçıkların etrafına bir kabuk da geçirilebilir. Yukarıdaki araştırmada kabuksuz performansın daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Kanatçıklar arası açıklık değeri c (Clearance) önemlidir. Bu yüzen türbin tasarlarken belli olan çapa göre kanatçık sayısını da en uygun sayıda seçmek gerekir.

$$N = \frac{2\pi R}{r+c} \quad (3.32)$$

N :Uygun kanatçık sayısı

R :Türbin Yarıçapı

r : Kanatçık yarıçapı

$$\begin{aligned} c \text{ açıklık değeri} &= \frac{2\pi R}{12} - 0,15 \\ &= 0,39 \text{ m} - 0,15 \\ &= 0,24 \end{aligned}$$

Çok kanatçıklı sistemlerde kanatçık sayısına da dikkat etmek gerekir, bu sebeple üst üste bindirme oranı adını verebileceğimiz (Overlap Ratio) hesaplanmalıdır. Aynı araştırmada bu oranın belli bir değerin altında olması, türbinin daha rahat çalışması için önerilmiştir. Kanatçık sayısı artıktıkça kanatlar arasındaki açıklık azalacak ve bu oran düşecektir.

Bindirme oranı , internal ve external olarak anılır ve şu formülle hesaplanır:

$$OR = \frac{e-e'}{d} \quad (3.33)$$

OR : Bindirme oranı .(Overall ratio)

e : Açıklık (2 kanat arasındaki mesafe) ($r+c$)

e' :Rotor mili çapı.

d : Kanatçık yüksekliği.

Bizim tasarımızda:

$$e \text{ kanatçıklar arası boşluk (gap)} = (0,24 + 0,15)$$

$$e' \text{ rotor mili çapı} = 0,03 \text{ m}$$

$$d \text{ kanatçık diameter} = 0,3 \text{ m}$$

$$OR \text{ bindirme oranı (overlap ratio)} = \frac{0,39-0,03}{0,3} = 1,2$$

OR ve AR oranları Loganathan 'ın araştırmasında resimler ile çok güzel anlatılmaktadır [25].

Bu oranların en iyi hangi değerler olacağı konusu Menet tarafından araştırılmış ve kendisi için uygun OR değerini 0,15 olarak belirlenmiştir. Genel türbin içinde kanatçıkların belli bir kanatçık sayısına kadar Cp verimini artırdığı , fazlasının fayda yerine Cp verimini düşürdüğü düşünülmektedir [26]. Fakat bu araştırmalar çok fazla sayıda doğrulanmamıştır.

Nobuyaki de farklı üst üste bindirme OR oranlarının türbinin aerodinamik performansını nasıl değiştirdiğini incelemiştir [27] .

Dikey eksenli savonuis türbin tasarlarken boy çap oranı şeklinde ifade edilebilen (Aspect ratio) hesabını da dikkate almak gerekir.

$$AR=H/D \quad (3.34)$$

AR: Türbin boy çap oranı. (Aspect ratio)

H: Türbin yüksekliği

D: Türbin çapı

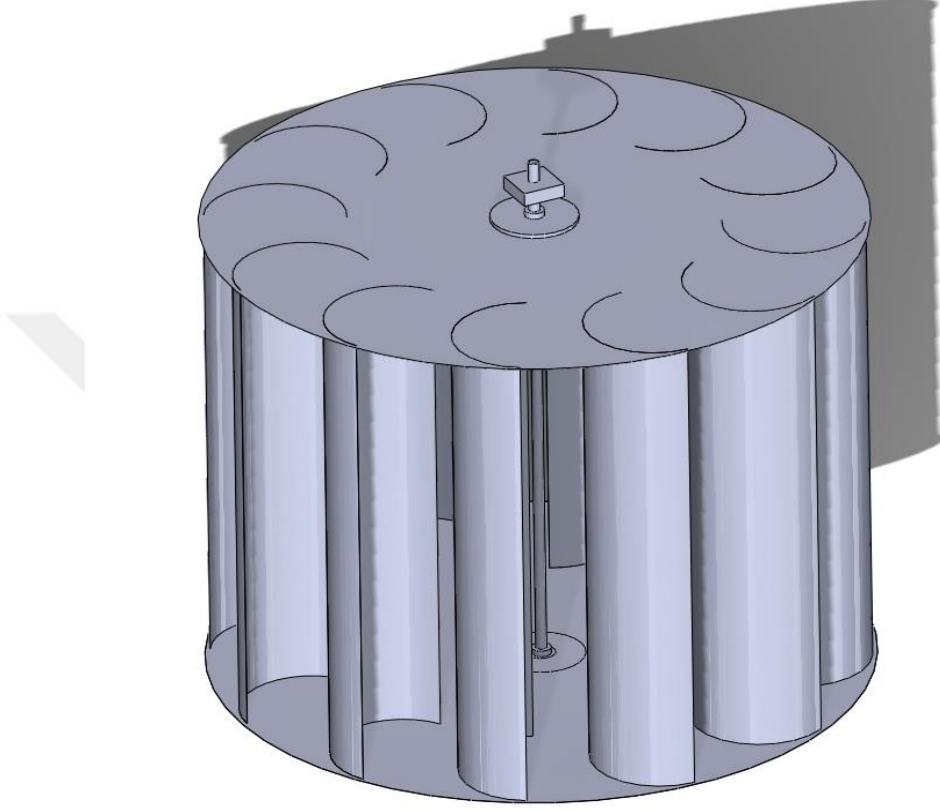
(Bizim tasarımızda H: 1 m. ve D: 1,5 m. Olduğundan AR: 0,66)

Başka bir araştırmada da türbin boy çap oranı (aspect ratio) nın türbin performansını nasıl etkilediği incelenmiş, oranının yaklaşık 1 civarlarında olduğu durumda C_p performansını etkilemediği (yaklaşık 0,065) , fakat yüksek en boy oranlarında (yaklaşık 5) uygun kanat şekli ve kabuk sistemi ile birlikte C_p performansının 0,25 değerlerine çıkardığı ifade edilmektedir [28].



4. TEZ SONUNDA YAPILAN DÜŞEY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ

Bu tez sonunda imal edilen türbin kanatları Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi 12 kanatçıklı düşey eksenli Savonius tipidir. Çalışma videoları CD içinde teze eklenmiştir.



Şekil 4.1. 12 kanatçıklı Savonius tipi rüzgar türbini 3D resmi

Tasarlanan türbinimizin direği yere monte edilmiştir. Dönen hareketli kısmının alt noktası ise ,türbin altında bulunabilecek bir insana çarpmaması için , yerden 190 cm yükseklikte ve minumum yükseklik olarak direğe bağlanmıştır.

4.1. Türbin Teknik Bilgileri

Tasarladığımız türbinimizin teknik bilgileri şu şekilde sıralanabilir:

Kullanım amacı : Sokak lambası.

Rotor tipi : Dikey eksenli rotor.

Rotor ölçüleri : 12 kanatçık Ø1,5 m çapta yerleştirilmiş , yükseklik 1 m

Süpürülen alan : $1,5 \text{ m}^2$ ($2 \cdot R \cdot H = 2 \cdot 0,75 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$)

Kanat malzemesi : 7000 Serisi Alüminyum.

Yapı malzemesi : Çelik boru.

Kanat sac kalınlığı : 1mm.

Kaplama : Alüminyum korozyona karşı dayanıklı olduğundan kanatlara herhangi bir boya kaplama uygulanmamıştır.

Renk : Gri. (Alüminyum doğal rengi)

Toplam ağırlık : 50 kg

Ses : Hesaplanmamıştır. (Düşük hızda döndüğünden gürültülü değildir.)

Başlama hızı : 3 m/sn

Ortalama rüzgar hızı: 3 m/sn

Durma hızı : Hesaplanmamıştır. (Türbini koyduğumuz yer seviyesinde en çok gözlemlenen rüzgar hızı 20 km/saat olmuştur yani 6 m/sn'dir. Genelde rüzgar hızı düşük olduğundan düşünülmemiştir.)

Maksimum rotor dönme hızı :200 rpm (Jeneratör kapasitesi max 200 rpm dir)

Hız kontrol sistemi : Yapılmamıştır, ancak bu proje bir basamak daha geliştirildiğinde düşünülmelidir.

Jeneratör özellikleri : Senkron , Çok kutuplu , sabit mıknatıslı.

Çıkış : 3 faz AC

Mıknatıs tipi : NdFeB (Nadir element Neodyum, Demir ve Bor birleşiminden oluşur.)

Nominal Güç : 200 W

Nominal Voltaj : 12 V AC

Nominal dönme hızı: 200 rpm

Jeneratör yapısı : Dış rotor. (Outer Rotor .)

Jeneratör gövdesi : Alüminyum alaşımı.

Jeneratör ölçüleri : Ø 265mm*98 mm

Jeneratör ağırlığı : 11 kg.

Jeneratör şaft çapı : 30 mm

Akü : 65 Ah, 12 V

Akü boyutları : 278 *175*190 mm (En*Boy*Yükseklik)

Şarj kontrol ünitesi: Değişik zamanlarda değişik değerlerde üretilen anlık akımı doğrultarak aküde toplayacak kontrol sistemi olarak jeneratör çıkışına eklenmiştir.

Bindirme oranı : 1,2 (External Overlap Ratio)

Boy-çap oranı : 0,66 (Aspect Ratio)

4.2. Sistemin Parçaları ve Kurulum Mantiği

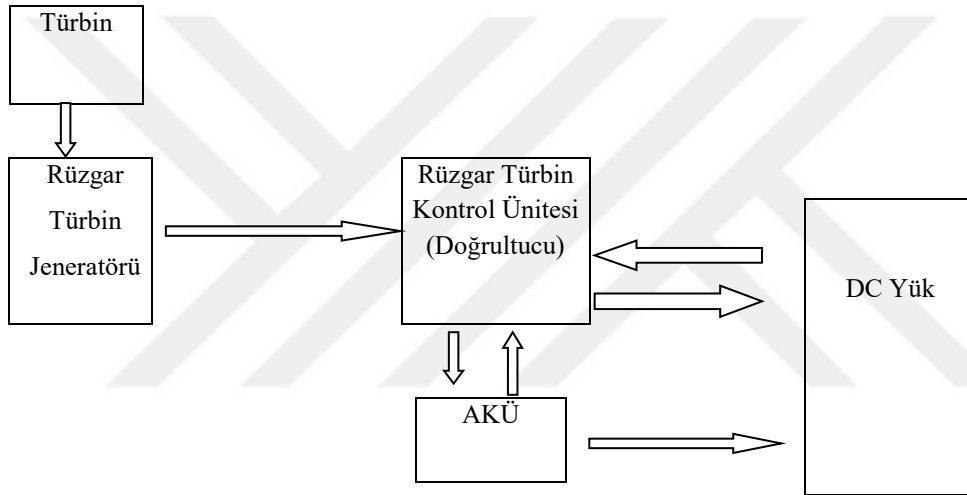
Bir rüzgar türbininin ana parçaları kanatlar, jeneratör, kontrol ünitesi (doğrultucu), aküdür.



Görsel 4.1. Türbinimizin Parçaları

Sistemin parçaları görsel 4.1.' de gösterildiği gibidir. Akü çok sık dolup boşaldığı için, sistemde normal akü yerine , sık dolup boşalmaya uygun jel akü kullanılmıştır.

Sistemin kurulum mantığı, şekil 4.2.'de de gösterilmektedir. Türbin kanatlarının altında jeneratör vardır. Türbinin harekete geçip dönmesi ile birlikte, jeneratör rotoru dönmektedir. Jeneratörde elektrik üretme mantığına göre, jeneratörün manyetik alanının yön değiştirmesi ile birlikte iletken telde bir akım oluşmaktadır. Değişken olan bu AC akımımız, doğrultucu vasıtasıyla DC akıma çevrilip aküde depolanmaktadır. Aküye bağlanan DC lambamız gerektiğinde yanmaktadır.



Şekil 4.2. Türbin kurulum mantığı

Sistem ilk kurulduğunda türbin altı görsel 4.2' deki gibi jeneratör rotoruna doğrudan bağlanmıştır. Fakat sonradan jeneratör rotorunun dönmesinin (rpm), yeterli sayıda olmadığı görülmüştür. Kayış kasnak sistemi ile iyileştirme yapılmıştır.



Görsel 4.2. *Türbin altından jeneratöre bağlantı*

MATLAB Simulink programı ile bir benzetim modeli hazırlamak için kullanacağımız formüller:

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v} \dots\dots\dots 1$$

$$V_{tip} = \omega R \dots\dots\dots 2$$

$$\omega = \frac{2.\pi.N}{60} \dots\dots\dots 3$$

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{\frac{1}{2} . \rho . A . v^3} \dots\dots\dots 4$$

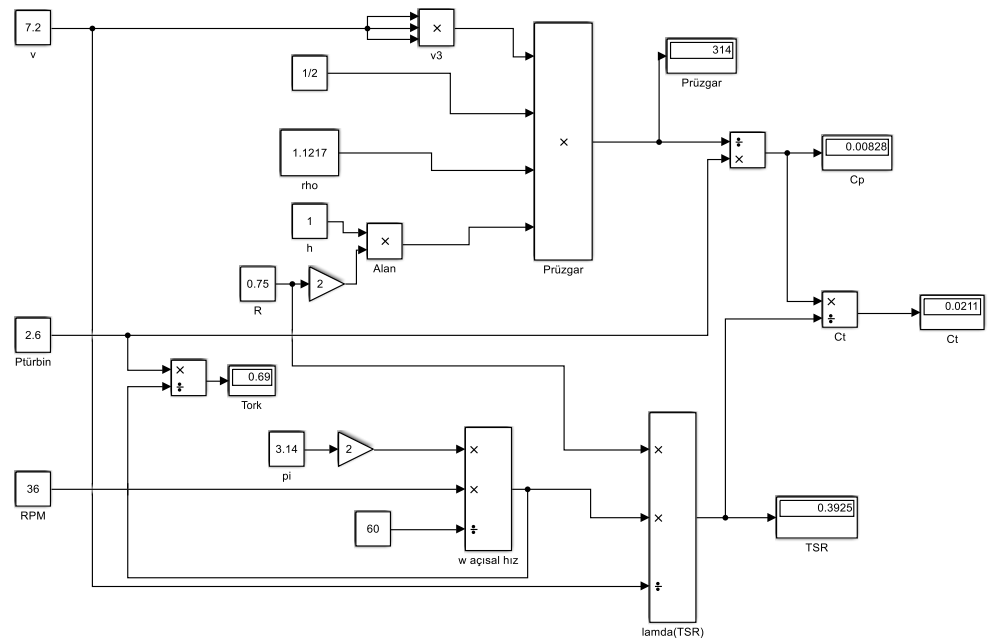
$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \dots\dots\dots 5$$

$$T = \frac{P_{türbin}}{\omega} \dots\dots\dots 6$$

Tablo 4.1. Deneyisel sonuçlar (Kayış kasnaksız)

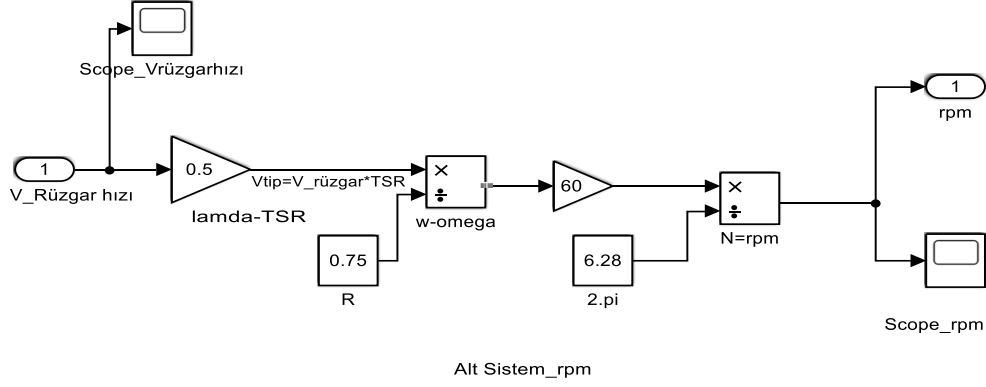
V rüzgar m/sn	RPM	P türbin w	Cp	TSR
7,2	42	2,7	0,008	0,45
4,3	30	1,7	0,025	0,54
7,1	40	2,6	0,008	0,44
3,6	24	0,7	0,017	0,52

Yukarıda şekil 4.2’deki gibi tasarlanarak yapılan türbinin kontrol ünitesinde RPM ve P türbin değerleri tablo 4.1.’deki gibi okunmuştur. O andaki mevcut rüzgar hızı ise anemometre ile ölçülmüş ve tablo 4.1.’e yazılmıştır. Sistemin Cp ve TSR değeri ise, yukarıdaki formüller kullanılarak hazırlanan şekil 4.3.’deki sümulink simülasyonundan elde edilmektedir.



Şekil 4.3. Türbin Cp ve TSR değerlerinin simulink 'de kurgulanması

Alt sistem, rüzgar hızından elde edilen türbin dönme hızını (RPM) görmek için şekil 4.4. 'deki gibi kurulmuştur.



Şekil 4.4. Matlab simulink te alt sistem olarak türbin hızı rpm kurgulanması. (Kayış kasnaksız)

Türbin ilk başta kayış kasnaksız ,doğrudan jeneratör rotoruna bağlanmıştır. Bu durumda TSR 0,50 civarında gözlenmiş, Cp: 0,02 olarak bulunmuştur. Sistem verimini gösteren bu değer çok düşük çıkmıştır. Dolayısıyla elde edilen güç de düşük olmuştur. Sebepleri düşünüldüğünde ilk etapta jeneratörün dönme hızının düşük olduğu akla gelmiştir. İyileştirme olarak türbin şaftının jeneratör miline dişli sistemi veya kayış kasnak sistemi ile bağlanması düşünülmüştür, yani jeneratör miline aktarılan dönme hızının yükseltilmesi denenmiştir. Aktarma organları türbininin harekete geçmesini bir miktar zorlaştırsa da iyileştirme sağlamıştır. Bizim sistemimizde fiili olarak hız 4 katına çıkarılmıştır. Türbin altına çapları 1' e 4 oranında farklı iki tip kasnak aşağıda görsel 4.3.'deki gibi bağlanmıştır . Büyük kasnak bir tur attığında küçük kasnağın 4 tur atması sağlanmıştır.

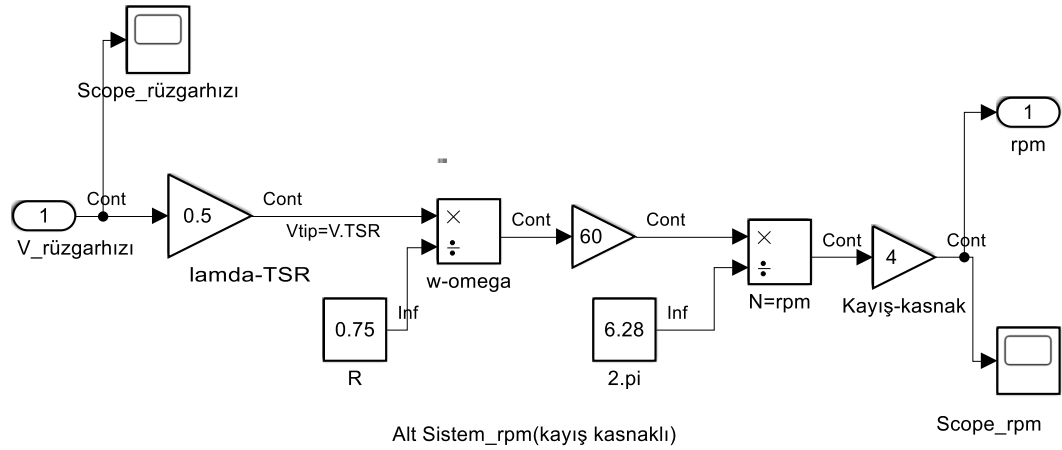


Görsel 4.3. Kayış kasnak sistemi

İlgili durumun deneysel sonuçları Tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Deneysel sonuçlar (Kayış kasnaklı)

V rüzgar m/sn	RPM	P türbin w	Cp	TSR
3,5	84	10	0,27	1,88
3	66	6,3	0,27	1,73
3,5	78	9,4	0,26	1,75
3	66	7,5	0,33	1,73
3,5	84	10	0,27	1,88
3,3	78	7,1	0,23	1,85



Şekil 4.5. Rpm alt sistemi modellemesi (Kayış kasnak aktarmalı jeneratör bağlantısı)

Bu tezde tasarlanan mevcut türbinin değişik rüzgar hızlarında üretebileceği güçler Matlab Simulink'de simülasyonu yapılarak görülebilir. Simülasyonda kullanılmak

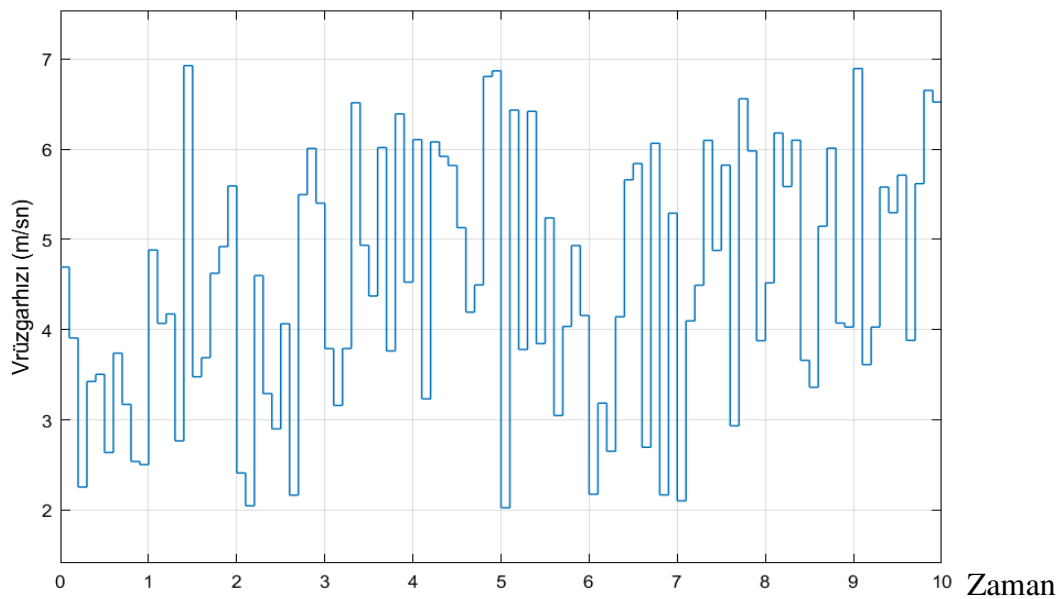
üzere öncelikle düzensiz rüzgar hızları yaratılmalıdır. Gerçeğe uygun rüzgar verileri yaratmak için Eskişehir’de yıllar içinde esen ortalama rüzgar hızları ve en yüksek rüzgar hızları tablo 4.3.’de görülebilir.

Tablo 4.3. Eskişehir ili ortalama ve en yüksek rüzgar hızları

Yıllar	Ortalama Rüzgar Hızı m/sn	En Yüksek Rüzgar Hızı m/sn	En Yüksek Hızın Gerçekleştiği Ay
2018	2,5	2,8	Mart
2017	2.8	3	Ağustos
2016	2.7	2.8	Şubat
2015	2.8	3.9	Temmuz
2014	2.4	3.9	Temmuz
2013	3.1	3.1	Ocak

Simülasyonda kullanılmak üzere minimum 2 m/sn ve maksimum 7 m/sn arasında rasgele değişen rüzgar hızları var kabul edilmiştir ve simülasyonlar 10 sn süresince yapılmıştır. Bu durum tablo 4.4.’de gösterildiği gibi veri olarak simülasyona girilecektir.

Tablo 4.4. V rüzgar hızı - zaman grafiği



Matlab programı için gerekli kodlar

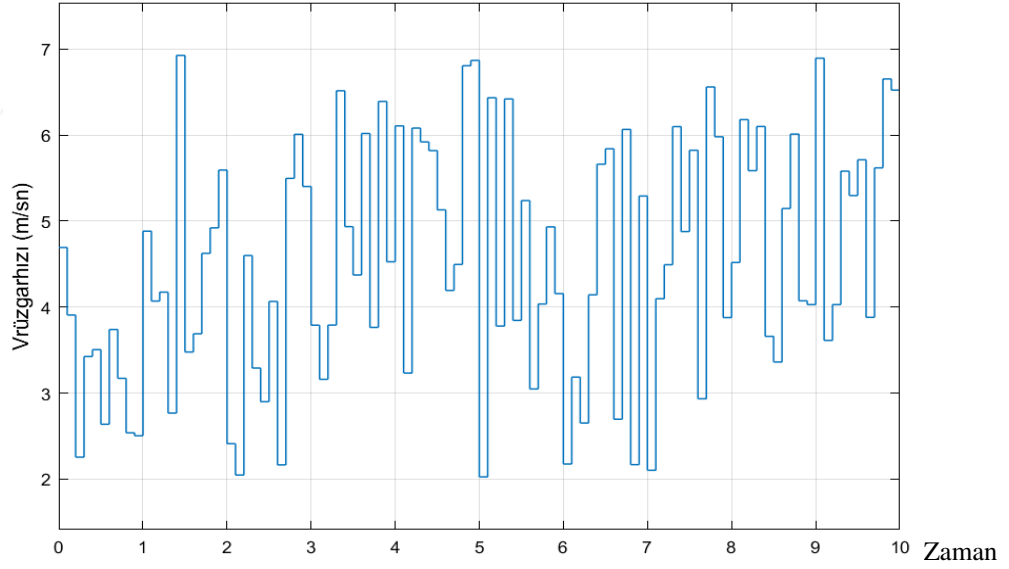
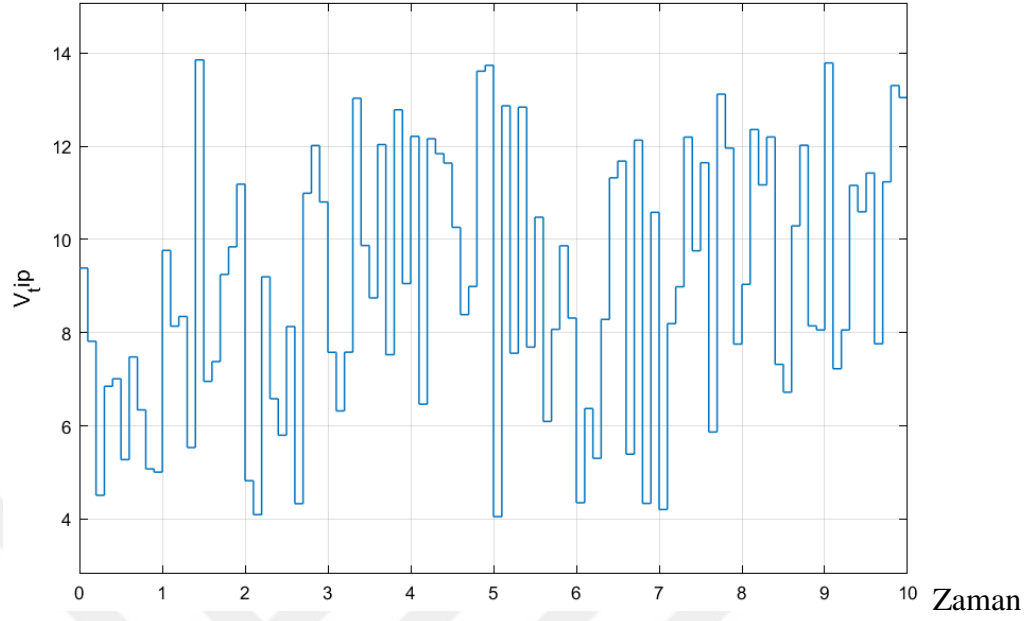
Aynı durumun Matlab kodları ile özeti:

```
%  
% lambda=0.5   tsr sabit  
% v=round(2+5*(rand(1)))   rüzgar hızı rasgele 2 ile 7 arasında  
değişken  
% R=0.75   yarıçap sabit  
% pi=3.14   pi sayısı sabit  
% C_p=0.28   güç katsayısı sabit  
% rho=1.1217   hava yoğunluğu sabit  
% A=1,5   türbinde süpürülen alan sabit  
%  
  
lambda=0.5 ;  
v=round(2+5*(rand(1)));  
R=0.75 ;  
pi=3.14 ;  
C_p=0.28 ;  
rho=1.1217;  
A=1.5;  
  
V_tip=lambda*v;  
omega=V_tip/R;  
N=omega*60/2/pi;  
P_turbin=C_p*0.5*rho*A*v^3;  
C_t=C_p/lambda ;  
T=P_turbin/omega ;  
% end
```

Buradaki sabitler, yukarıda Matlab yazılımında belirtildiği gibi lambda (TSR-kanat uç hızının rüzgar hızına oranı), R (Türbin yarıçapı), pi sayısı, C_p (güç katsayısı), rho (havanın bulunduğumuz noktadaki yoğunluğu), A (türbin içinde süpürülen alan) 'dır. Değişkenlerimiz ise v rüzgar hızıdır. Ortaya çıkacak güç ,bağlı olduğundan V tip (kanat uç hızı), omega (açısal hız), N (RPM dakikadaki döngü sayısı) P türbinden elde edilecek güç, Ct (tork katsayısı) ve T (türbin torku) değerleri değişir. Matlab de, emir penceresine (command window) formüller tanımlanıp sabit ve değişkenler girildiğinde 2 ile 7 arasında rasgele üretilmiş olan bir v hızında, istenen değerler bulunur.

Weibull dağılımının ölçek parametresi 2 olduğu durum olan Rayleigh olasılık dağılımı ile, şekil parametresi olarak ortalama rüzgar hızı 3 m/sn kabul edilerek de çeşitli hızlar üretilebilir.

Tablo 4.5. V_{tip} kanat uç hızı - zaman grafiği

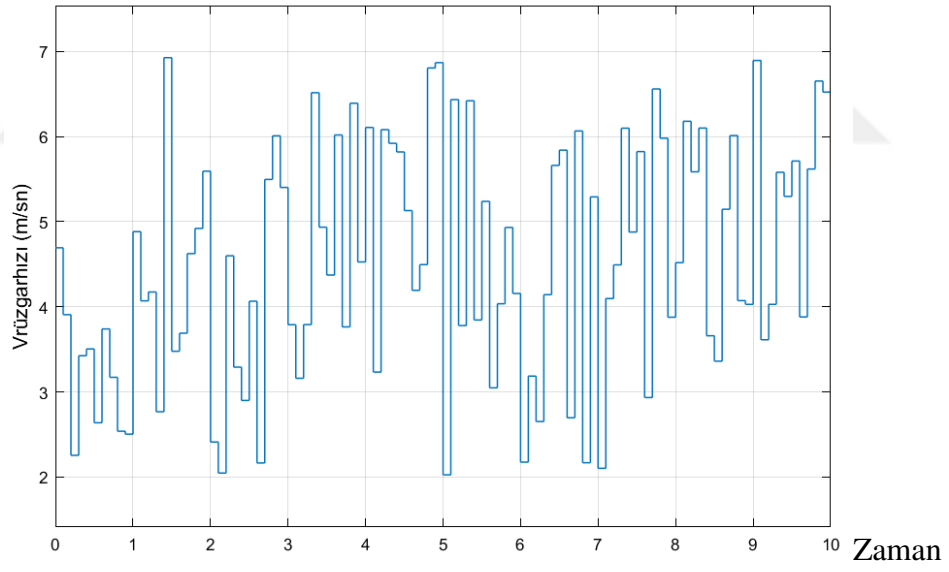
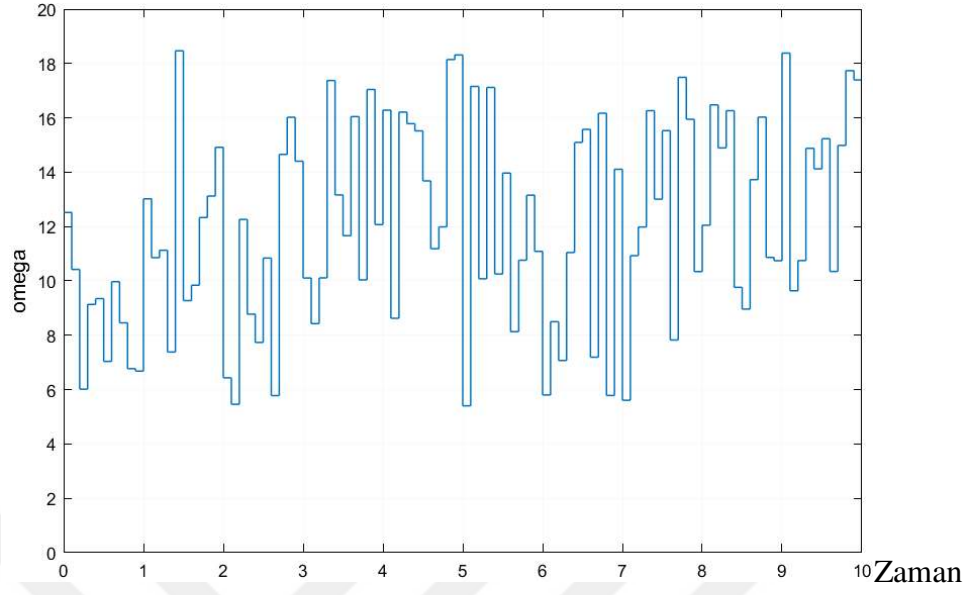


Aşağıdaki tablo 4.6.'da da açısal hızın rüzgar hızı ile ilişkisi görülebilir.

Rüzgar hızımız 7 m/sn iken, türbin açısal hızımız 19 radyan olarak görülmektedir.

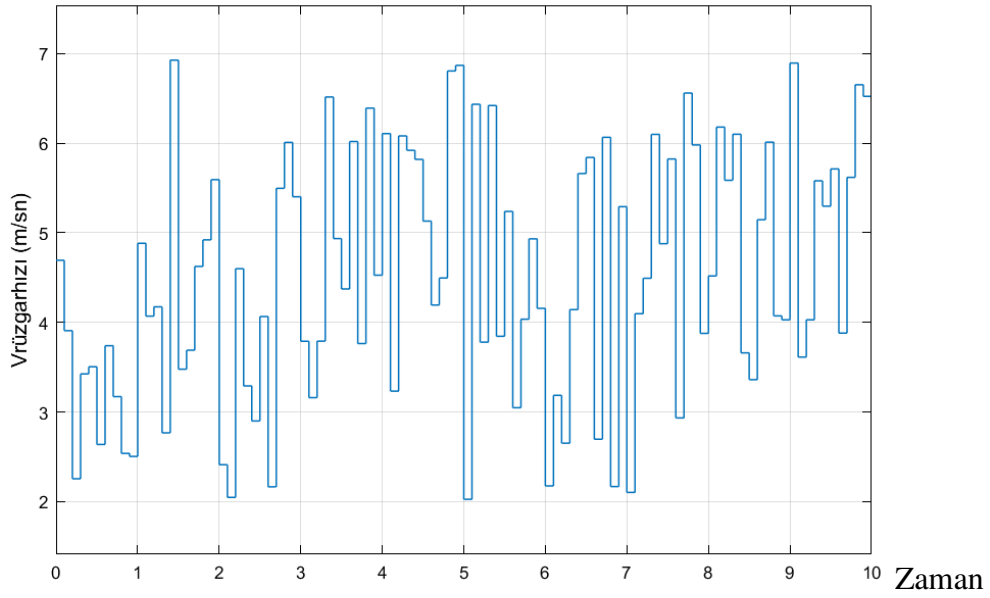
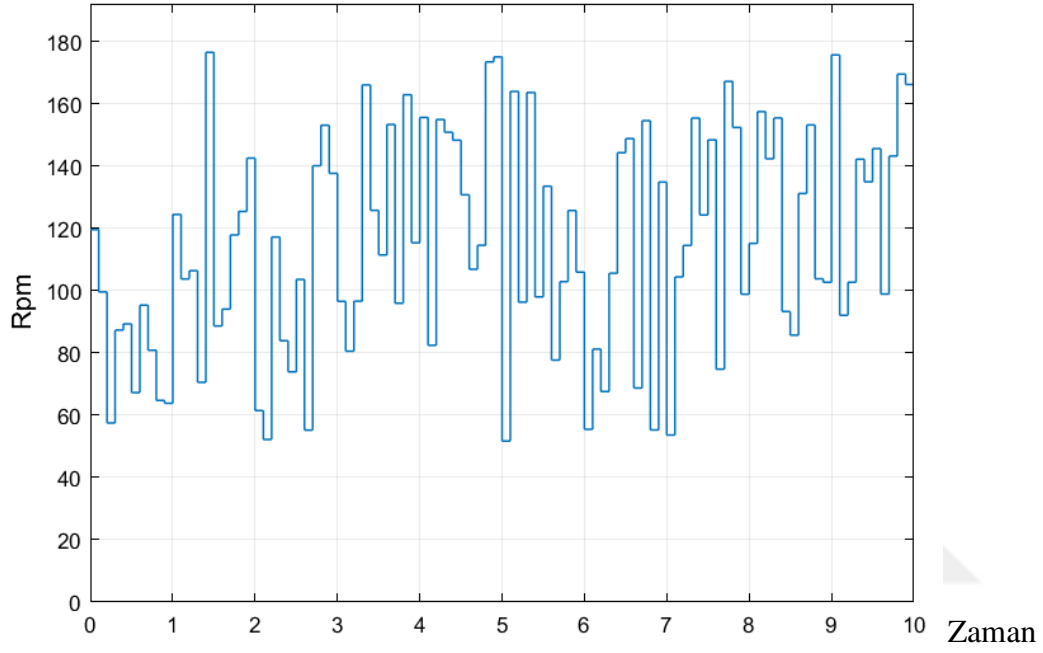
$\omega = 2\pi NR$ formülü ile ifade edilmektedir.

Tablo 4.6. *Açısal hız ω - zaman grafiği*



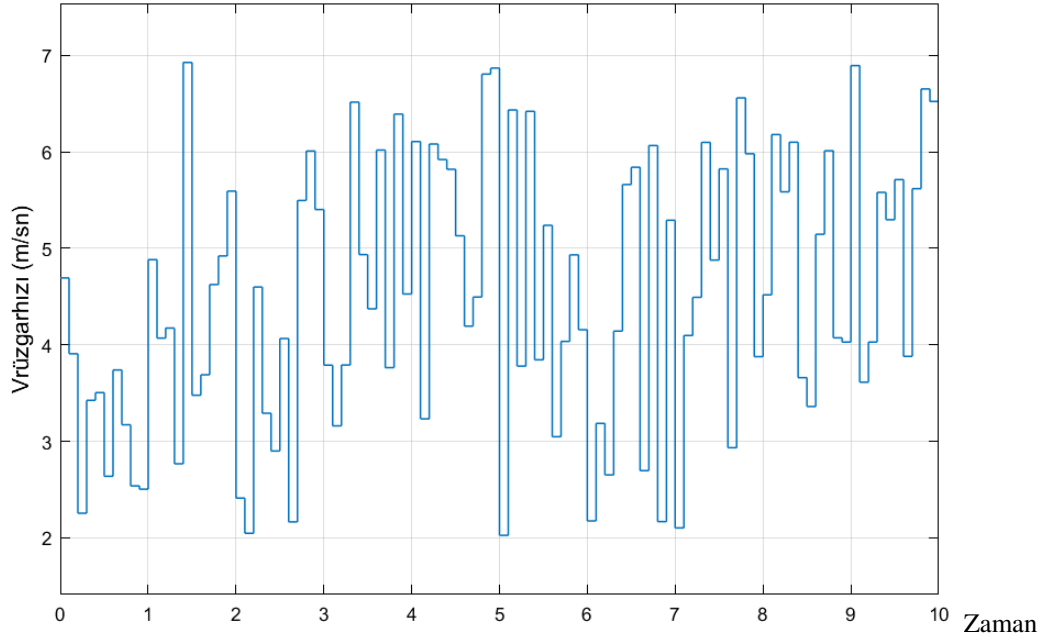
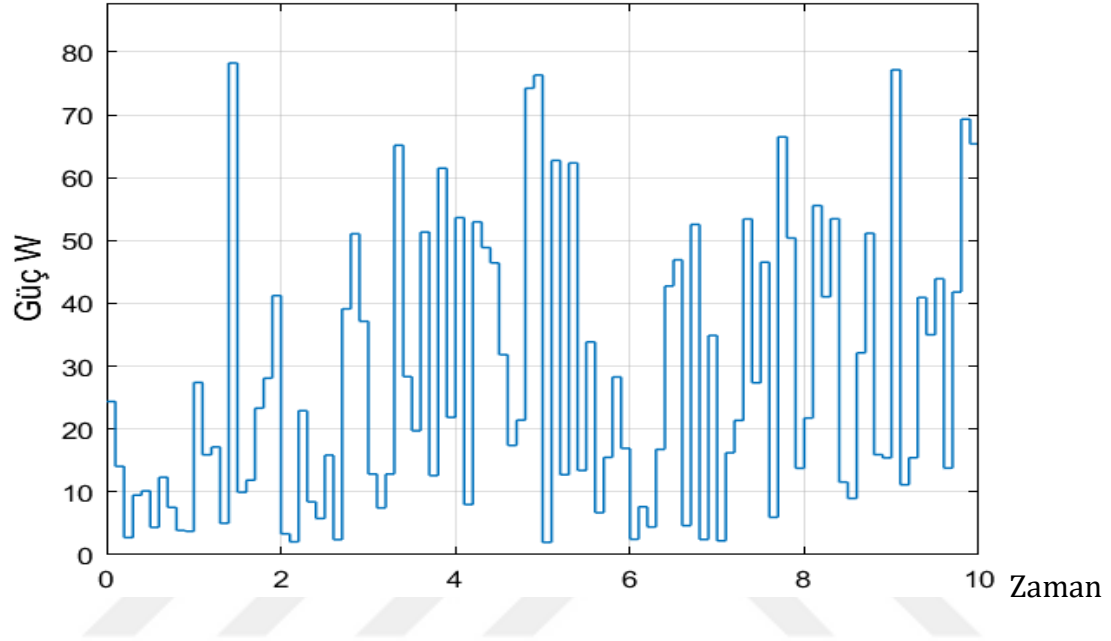
Türbin dönüş hızı tablo 4.7. gösterilmektedir. Rüzgar hızı 7 m/sn olduğunda türbin dönüş hızı 180 RPM değerlerine ulaşmaktadır. Bu durumda türbindeki rotorun da dönüş hızı fazla olacağından jeneratörde daha çok elektrik indüklenmiş olur.

Tablo 4.7. RPM - zaman grafiği



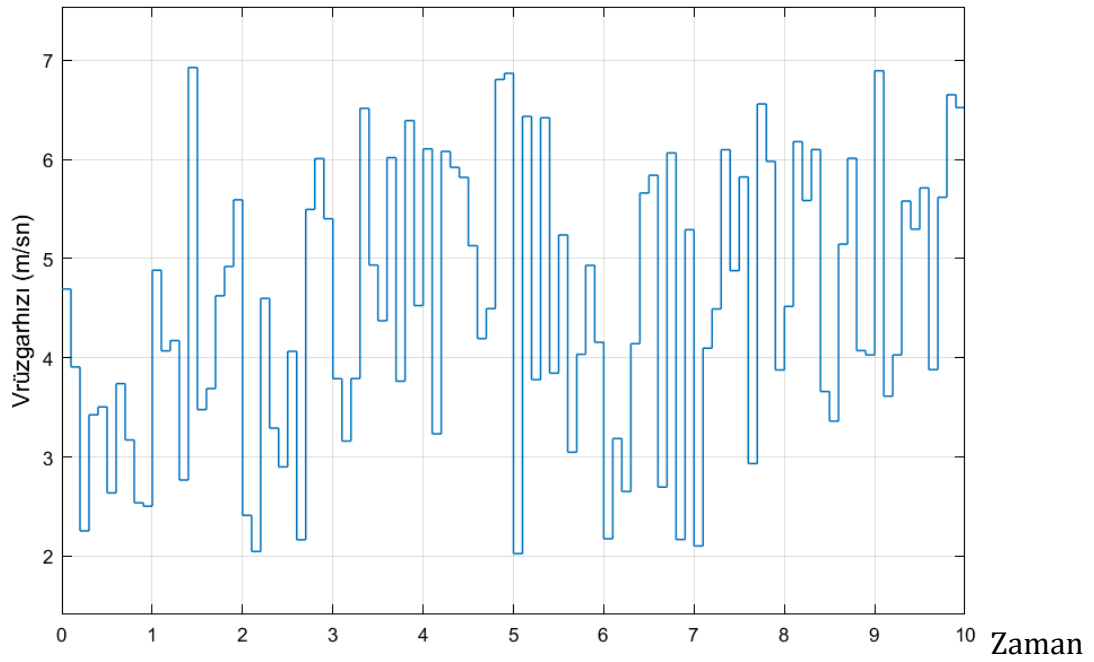
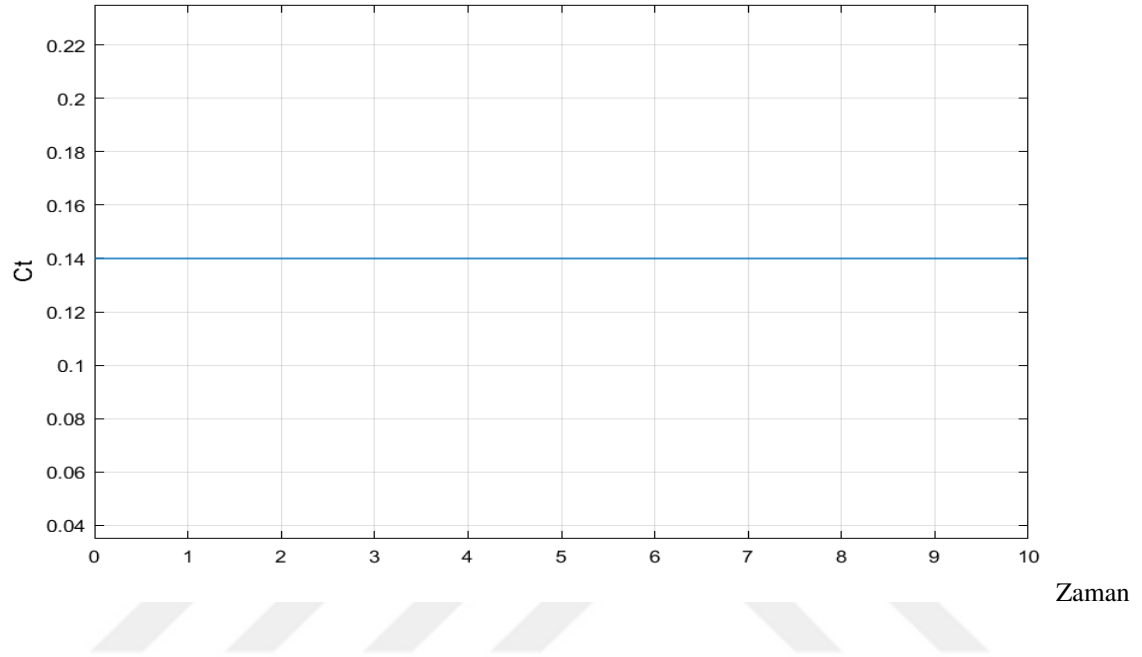
Rüzgar hızı ile gücün nasıl değiştiği tablo 4.8.'de ifade edilmektedir. Rüzgar hızının 7 m/sn olduğu anda güç 80 W'a ulaşmaktadır.

Tablo 4.8. *Ptürbin - zaman grafiği*



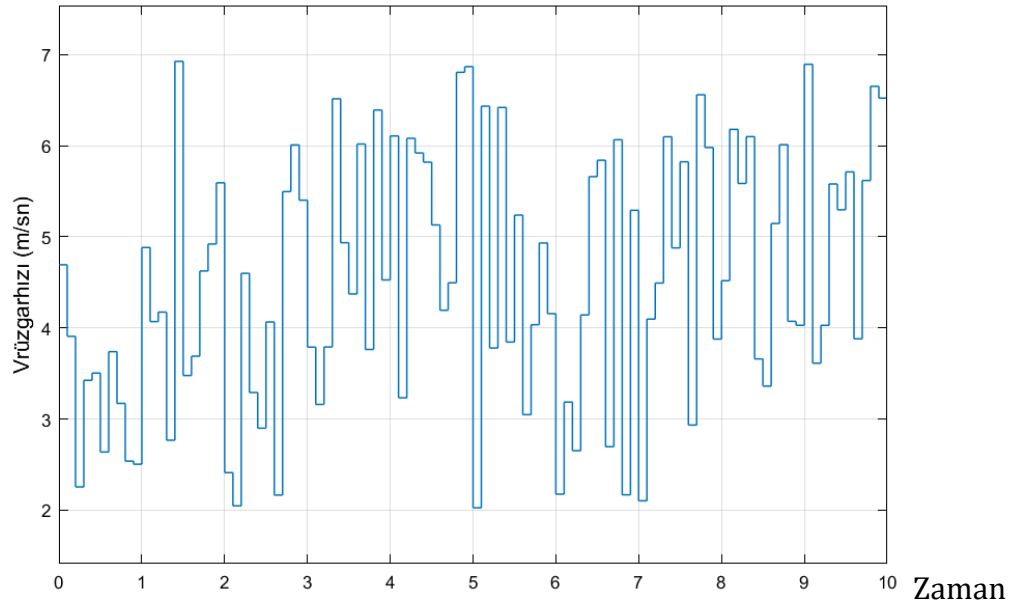
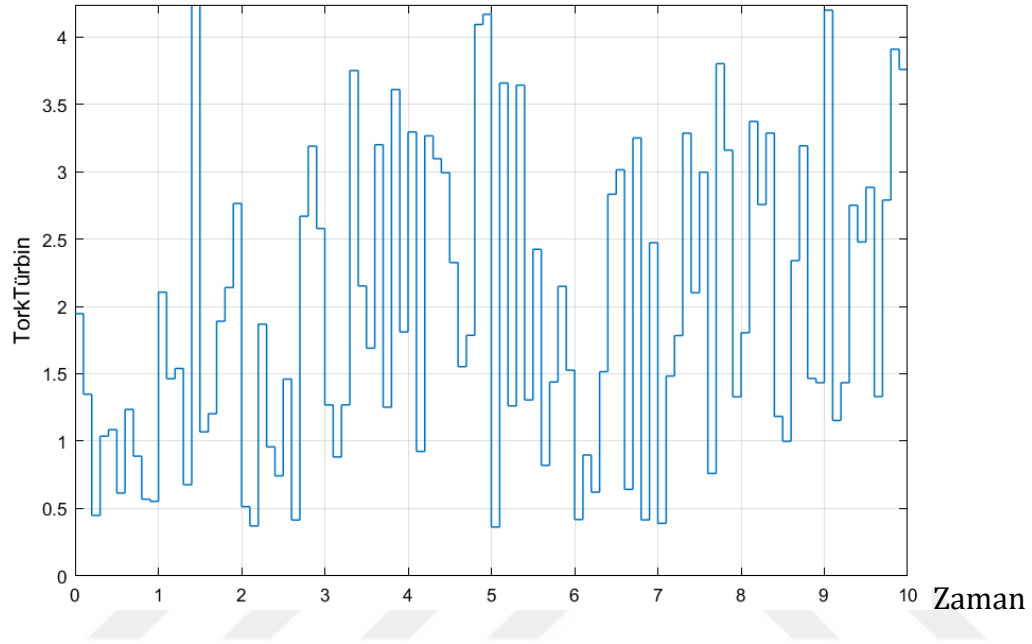
Sistemin torku da tablo 4.9.' da görüldüğü gibidir. Sistemin bir özelliği olup bu sistem için bu şekilde sabittir.

Tablo 4.9. C_t – zaman grafiği



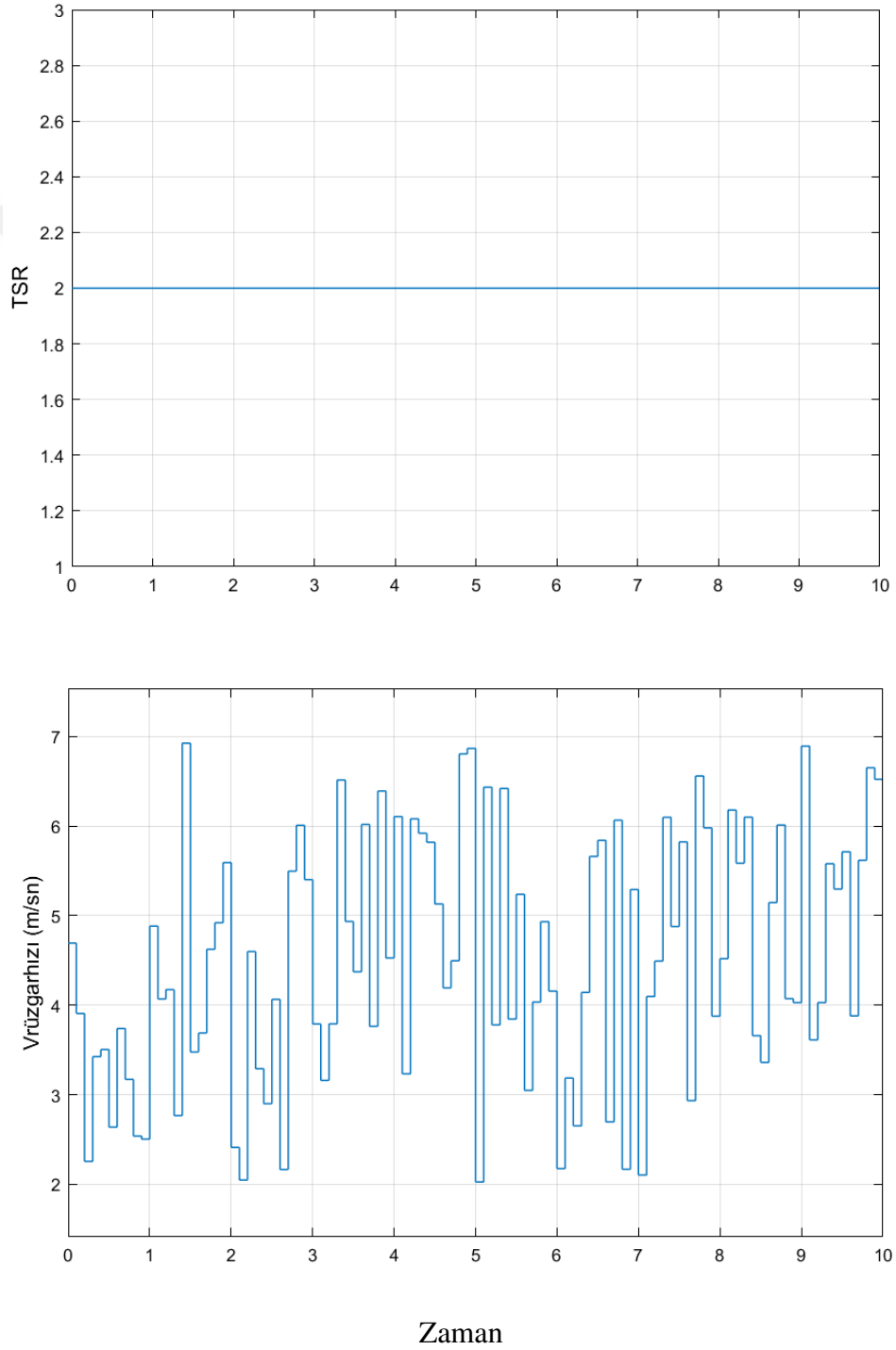
Sistemin sahip olduğu tork da güç gibi rüzgar hızına bağlıdır. Şekil 4.10.'da rüzgar ile ilişkisi görölmektedir.

Tablo 4.10. *Tork Türbin - zaman grafiğı*



TSR değeri sistemin bir kimliği gibidir. Aynı sistemde sabittir, şekil 4.11.'de görüldüğü gibi rüzgar hızıyla değişmez, sistemin performans değeri gibidir.

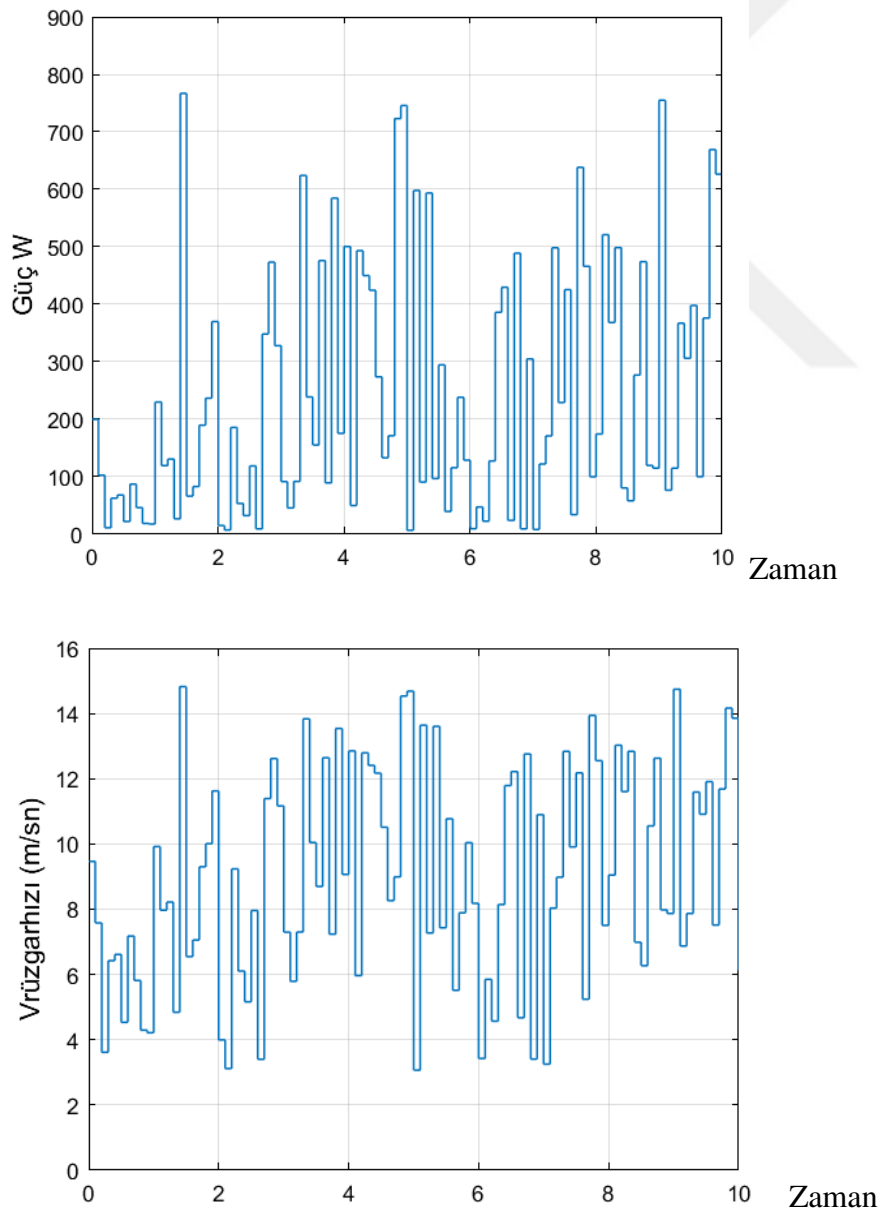
Tablo 4.11. *TSR - Zaman grafiği*



Matlab Simulink programında, çeşitli simulasyonlar [29] ve [30] nolu araştırmalarda yapılmıştır.

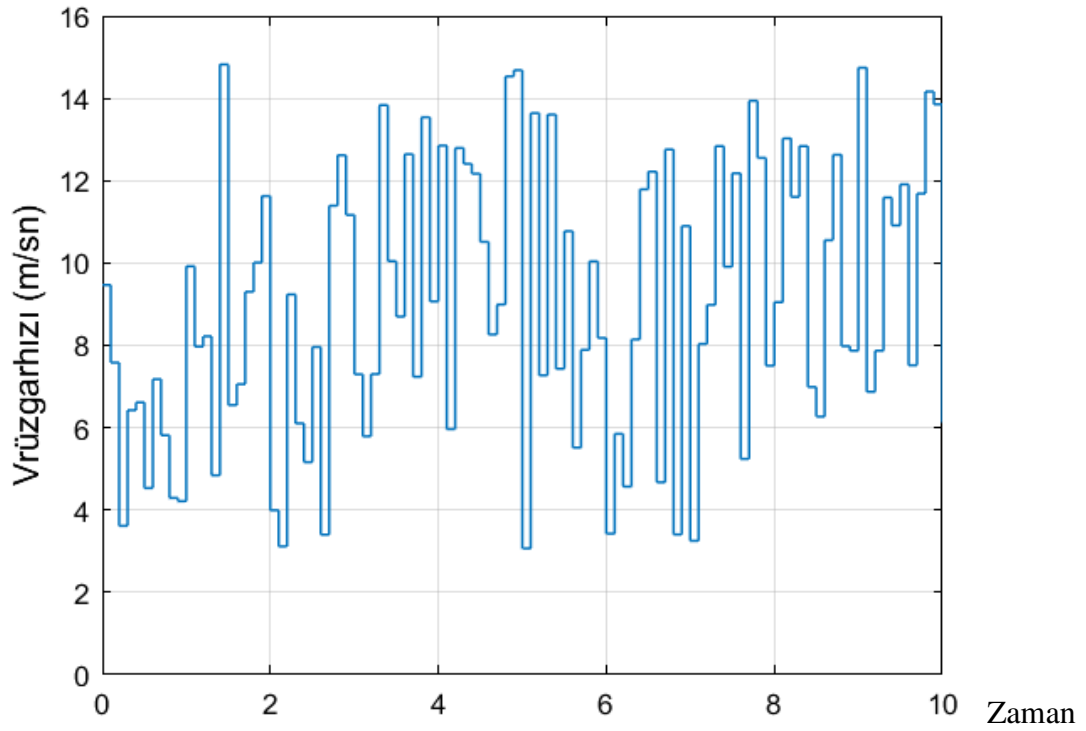
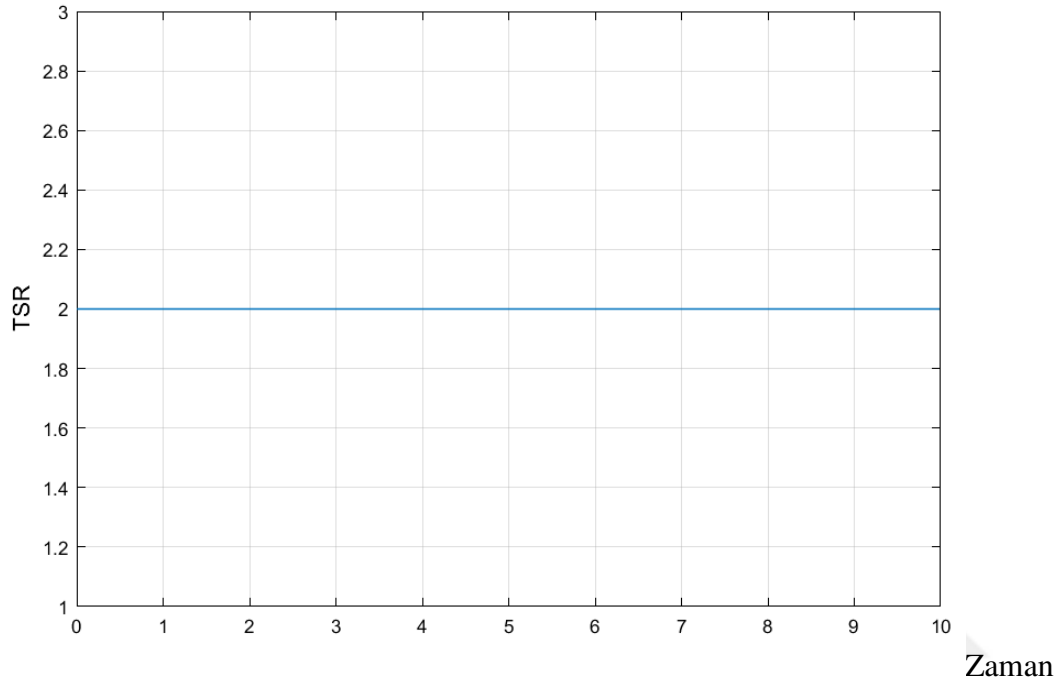
Aynı sistem çok rüzgarlı bir bölgeye monte edilirse, rüzgar hızının 3 ile 15 m/sn arasında olduğu kabul edilirse , simülasyonda elde edilebilecek güç değerleri tablo 4.12.' de gösterilmiştir.

Tablo 4.12. Güç - Zaman grafiği (Rüzgar hızı 3-15 m/sn için)



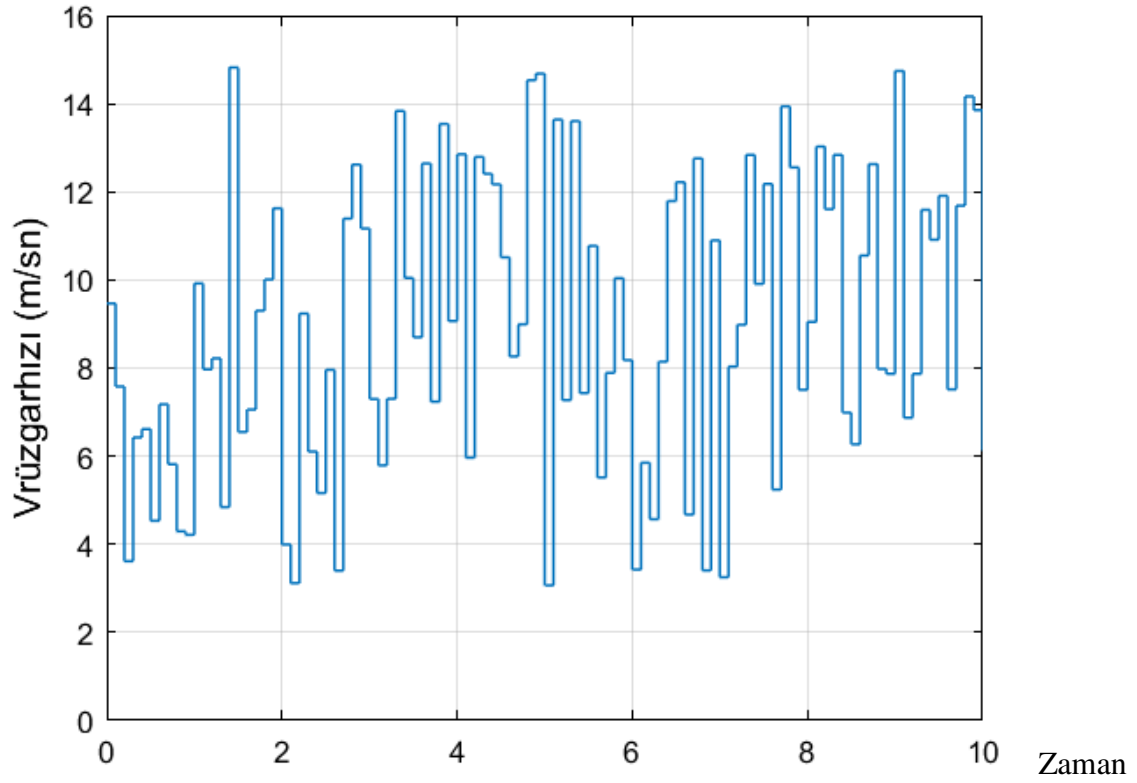
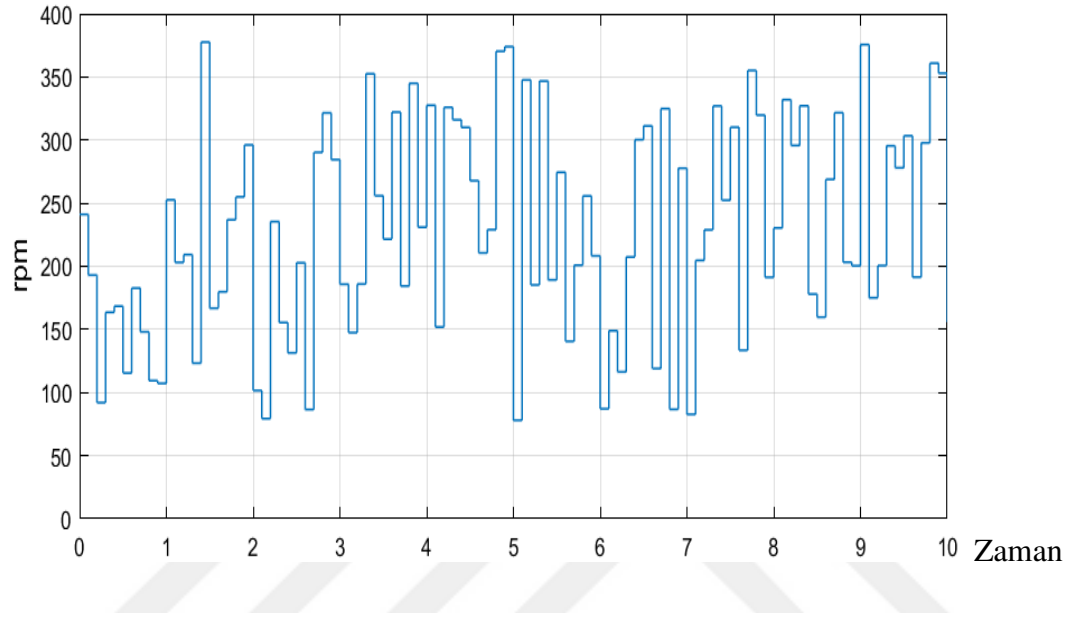
Sistemimiz değişmediği için, rüzgar hızları farklı bile olsa TSR ‘nin aynı kaldığı tablo 4.13’de görülmektedir.

Tablo 4.13. *TSR- Zaman Grafiği (3-15 m/sn hızlarda)*



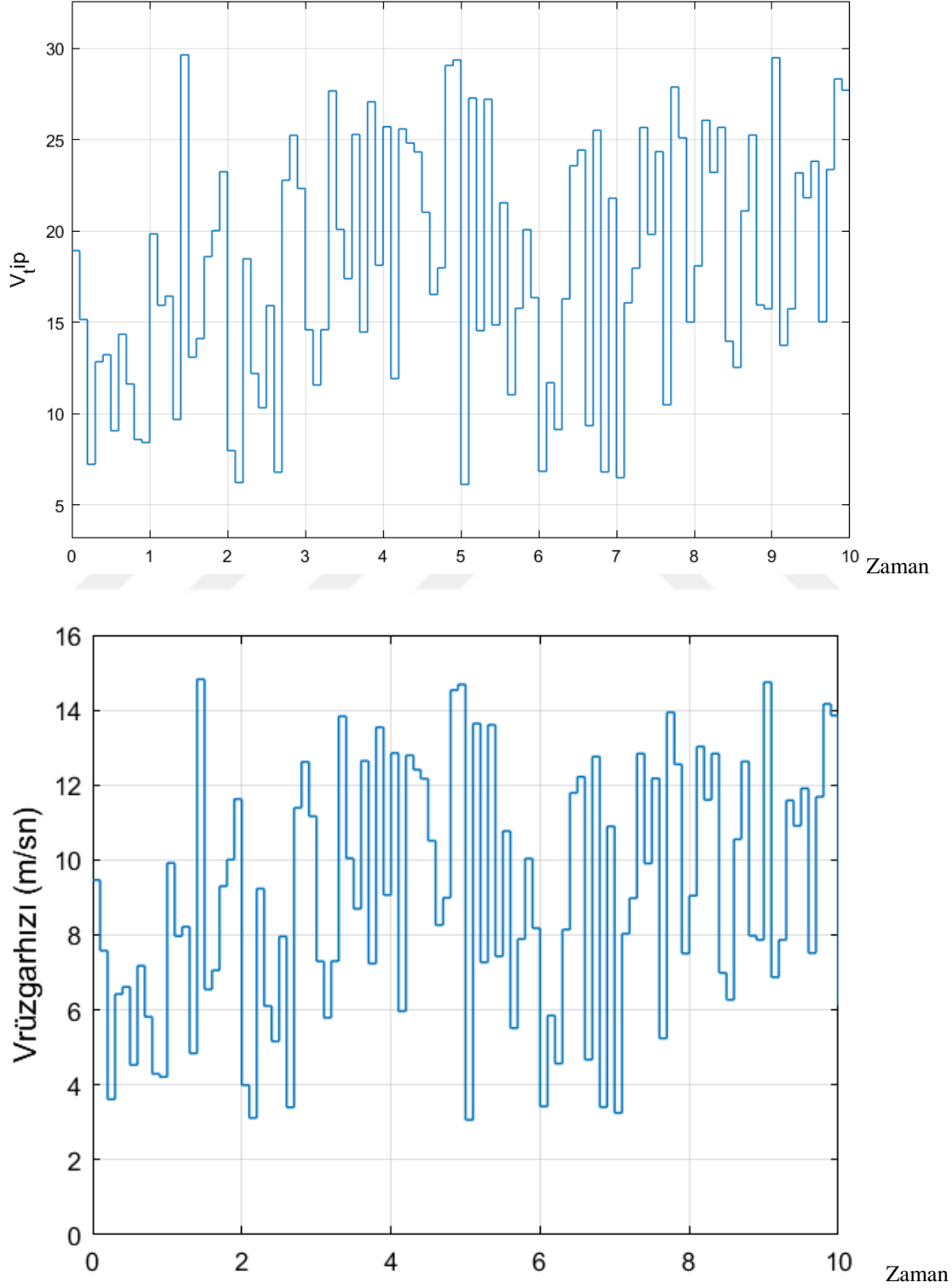
Türbin dönüş hızı da rüzgarın artması ile çok yükselmiştir. Bu dönüş hızlarında jeneratör ağırlığı da fiyatları da düşmektedir.

Tablo 4.14. RPM- Zaman Grafiği (3-15 m/sn hızlarda)



Aynı sistemin yüksek hızlardaki kanat uç hızı oranı tablo 4.15.'de görülmektedir.

Tablo 4.15. *V tip- Zaman Grafiği (3-15 m/sn hızlarda)*





Görsel 4.4. *Sistemin bahçeye montajı*

5. SONUÇ

Günümüzde elektrik enerjisi; hava ve su kadar hayatın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir ve bir çok iş elektrik enerjisi sayesinde başarılmaktadır. Hayatın devamı için bu kadar önemli bir ihtiyacın, uzunca bir süredir bağlı olduğu fosil yakıtların gelecek yıllar içinde tükeneceğinin öngörülmesi, ayrıca dünyamıza verdiği zararların farkına varılması, insanoğlunu alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. İnsanlar tarafından geçmişte çeşitli şekillerde kullanılan rüzgar enerjisi bu sebeple günümüzde tekrar dikkatleri üzerine toplamıştır.

Türkiye’de ve bölgemizde çok düşük rüzgar hızları görüldüğünden, (2018 yılı Eskişehir ortalama rüzgar hızı 2,3 m/sn) bu projede düşük rüzgar hızlarından nasıl yararlanabiliriz düşüncesiyle dikey eksenli rüzgar türbini çalışması yapılmış ve bir sokak lambası tasarlanmıştır. Rüzgar 3 m/sn hızlara ulaştığında türbinimiz elektrik enerjisi üreterek bağlı olduğu aküyü şarj etmektedir. Geceleri de sisteme bağlı olan lamba, akü den aldığı enerji ile yanmaktadır. Tasarladığımız rüzgar türbini çevresindeki 12 kanatçığıyla her yönden esen rüzgarı içine kolaylıkla almaktadır. Başlangıçta türbin doğrudan jeneratör miline bağlanmıştır. Bu durumda C_p güç katsayısı çok düşük olarak bulunduğundan elde edilen güç de düşük olmuştur. Sonrasında kayış kasnak sistemi ile jeneratör şaftına iletilen dönme hızı 4 katına çıkarılmıştır. Türbin altına büyük kasnak, jeneratör şaftına küçük kasnak bağlanmıştır, kasnak çapları birbirinin 4 katı olarak yapılarak hızın 4 kat artırılarak jeneratör şaftına iletilmesi sağlanmıştır. Son durumda güç katsayısı $C_p = 0,28$ olarak elde edilmiştir. Matlab Simulink programında yüksek rüzgarlarda türbinimizin nasıl güç ürettiği simule edilmiştir. Bu konudaki gelecek araştırmalarda kanat tasarımında bazı iyileştirmeler yapılarak elde edilecek güç artırılabilir. Türbin boyu yükseltip çap küçültülebilir ve kanatçıkların yerleşimi daha sık hale getirilebilir. Kanat malzemesi değiştirilebilir. Türbinde kullanılan rüzgar hareketini elektrik enerjisine çevirecek sabit mıknatıslı senkron jeneratör yapımı, enerji depolama sistemleri üzerinde çalışılabilir.

Türkiye’de genel aydınlatma için harcanan elektrik enerjisi, toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %2’si olduğu düşünüldüğünde, bu şekilde çalışacak yol aydınlatmaları yapılması, genel tüketimde bir katkı sağlayabilir. (Tasarladığımız rüzgar türbini ile çalışan sokak lambamızın çalışma videoları cd ile tez ekindedir.)

KAYNAKÇA

- [1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar> (Erişim Tarihi : 05.02.2019)
- [2] http://direnc.blog/wp-content/uploads/2019/03/20190308_Elektrik-İstatistikleri.pdf
(Erişim tarihi:8.3.19)
- [3] Danish Wind Industry Assosation (Danimarka Rüzgar Endüstrisi Birliği)
<https://en.windpower.org/> (Erişim tarihi: 8.12.2018 ve 31.12.2018)
- [4] EİE, Elektrik İşleri Etüt İdaresi,
<http://www.etisanenerji.com/bilgi/elektrik-isleri-etut-idaresi-eie/>
(Erişim tarihi:21.02.1019)
- [5] 17.Haziran.2014 Tarihli ve 29033 Sayılı Resmi Gazete.
- [6] Sargolzaei, J. (2007, October). Prediction of the power ratio and torque in wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks. In *Proceedings of the WSEAS international Conference on Renewable Energy Sources* (pp. 14-16).
- [7] Mohammed Hadi Ali. International Journal of Modern Engineering Research Lecturer University of Mustansiriya. Sept-October, 2013(IJMER)
- [8] Alimuzzaman, M. (2013). *Power performance investigation and control system design of grid-connected small wind turbines* (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- [9] Engineering ToolBox, (2003). *Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures*. [Online]
https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html
(Erişim Tarihi : 23.02.2019)
- [10] Engineering ToolBox, (2003). *Air - Altitude, Density and Specific Volume*. [online]
https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-density-volume-d_195.html
(Erişim Tarihi : 23.02.2019)

- [11] Meteoroloji 3.Bölge Müdürlüğü Eskişehir
<http://www.eskisehir.mgm.gov.tr/sondurum/turkiye.aspx> (Erişim tarihi : 14.02.2018)
- [12] Kurban, M., KANTA, Y. M., & HOCAOGLU, F. O. (2007). Weibull Dağılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluklarının İstatistiksel Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 205-218.
- [13] Akdağ, S. A. (2008). *Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı* (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü). İstanbul Teknik Üniversitesi
- [14] Small Scale Vertical Axis Wind Turbine by Sahishnukumar Shah B.Tech Electrical & Electronics Engineering, 2011 CUSAT A project presented to Ryerson University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering in the program of Electrical & Computer Engineering Toronto, Ontario, Canada, 2015
- [15] Ragheb, M. "Wind energy conversion theory, betz equation." *Wind Energie* (2014).
- [16] Ragheb, M., & Ragheb, A. M. (2011). Wind turbines theory-the betz equation and optimal rotor tip speed ratio. In *Fundamental and advanced topics in wind power*. InTech. Department of Nuclear , University of Illinois at Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory,USA
- [17] Suvire, G. O., & Mercado, P. E. (2010). Dynamic modelling of a wind farm and analysis of its impact on a weak power system. In *Dynamic modelling*. IntechOpen. Gastón Orlando Suvire and Pedro Enrique Mercado Instituto de Energía Eléctrica – Universidad Nacional de San Juan Argentina
- [18] Wind Power Technology, Yazar : Earnest ,Joshua τ
PHI Learning Pvt. Ltd., 2 Kas 2013 - 492 sayfa
- [19] Optimal Rotor Speed Ratio , M.Ragheb, 3.11.2014
- [20] Vertical Axis Wind Turbine -M.Ragheb 21.3.2015
- [21] Feng, F., Li, S., Li, Y., & Xu, D. (2012). Torque characteristics simulation on small scale combined type vertical axis wind turbine. *Physics Procedia*, 24, 781-786.- Elsevier

- [22] Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141, 383-388.
- [23] Castillo, J. (2011). Small Scale Vertical Axis wind Turbine . Bachelor's Thesis Degree program in Aeronautical Engineering Tampere University of Applied Sciences.
- [24] Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19-25
- [25] Loganathan, B. "Aerodynamic study of single stage multi-blade drag-based vertical axis wind turbines." (2018).
- [26] J.L. Menet A double-step Savonius rotor for local production of electricity *Renewable Energy*, 29 (2004), pp. 1843
- [27] F. Nobuyuki On the torque mechanism of Savonius rotors *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40 (1992), pp. 277-292
- [28] Alexander, A. J., & Holownia, B. P. (1978). Wind tunnel tests on a Savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 3(4), 343-351.
- [29] Aravind, C. V., Rajparthiban, R., Rajprasad, R., Grace, I., Teymourzadeh, R., & Norhisam, M. (2012, December). Mathematical toolbox and its application in the development of laboratory scale vertical axis wind turbine. In *2012 IEEE International*
- [30] Bashar, Mohammad M. "Computational and Experimental Study on Vertical Axis Wind Turbine in Search for an Efficient Design." (2014).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burcu GÜLER

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı : Ankara./1972

E-Posta : burcu@denizdokum.com.tr

Eğitim Geçmişi:

- 2016-2019 Anadolu Üniversitesi İleri Teknolojiler Anabilim Dalı –Enerji Kaynakları Ve Yönetimi (Yüksek lisans)
- 2013-2015 Anadolu Üniversitesi- Açık Öğretim Fakültesi -Elektrik Enerjisi Üretim İletim Dağıtım Bölümü (Önlisans)
- 1989-1994 Anadolu Üniversitesi –Elektrik Elektronik Mühendisliği (Lisans)

Mesleki Geçmişi:

- 1993-Halen Deniz Döküm San.Tic.A.Ş. Mühendis-Yönetim Kurulu Üyesi
- 2006-Halen Su Makina San.Tic.Ltd.Şti. Mühendis-Kurucu Ortak

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası MİSEM kapsamında Çeşitli Mesleki Eğitimler: Reaktif Güç Kompanzasyonu Ve Harmonikler Eğitimi, Topraklama Yetkilendirme Eğitimi, YG Tesislerinde İşletme Sorumluluğu Yetkilendirme Eğitimi , Güneş Enerjisi Sistemleri Tesisatı Eğitimi, Rüzgar Enerjisi Sistemleri Eğitimi.

Mesleki Birlik/Derneğ/Kuruluş Üyelikleri:

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Anadolu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Mezunları Derneği

EMO Elektrik Mühendisleri Odası

TÜDöKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği

AFS EVA Eskişehir Temsilcisi

EOSB Eskişehir Sanayi Konseyi Üyesi