



T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BEŞ BASAMAKLI NACA RÜZGÂR TÜRBİNİ KANAT
PROFİLLERİNİN AYNI ORTAM KOŞULLARINDA
KARŞILAŞTIRMALI AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENES SEZER

OCAK

ENES SEZER

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE
UYGULAMALARI**

OCAK 2025

**BEŞ BASAMAKLI NACA RÜZGÂR TÜRBİNİ KANAT
PROFİLLERİNİN AYNI ORTAM KOŞULLARINDA
KARŞILAŞTIRMALI AERODİNAMİK PERFORMANS ANALİZİ**

Enes SEZER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

Danışman

Dr. Öğr.Üyesi Yavuz ÜNAL

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Enes SEZER tarafından hazırlanan Beş Basamaklı Naca Rüzgâr Türbini Kanat Profillerinin Aynı Ortam Koşullarında Karşılaştırmalı Aerodinamik Performans Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Yavuz ÜNAL

Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : PROF. DR. Ünal KURT

Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : DOÇ. DR. Bülent TURAN

Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 31/01/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Enes SEZER

31/01/2025

BEŞ BASAMAKLI NACA RÜZGÂR TÜRBİNİ KANAT PROFİLLERİNİN AYNI
ORTAM KOŞULLARINDA KARŞILAŞTIRMALI AERODİNAMİK PERFORMANS
ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Enes SEZER

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2025

ÖZET

Rüzgâr türbinlerinin kullanımı dünya genelinde yaygınlaşmakta ve buna bağlı olarak üretilen enerji miktarı da her geçen gün artmaktadır. Türbinlerin güç üretiminde kanat profilleri kritik bir rol üstlenmektedir. Optimum verimin sağlanabilmesi için rüzgâr türbini kanatlarının tasarımı ve aerodinamik özellikleri büyük bir öneme sahiptir. Türbin kanat profil yapısı, türbin kanadının rüzgâr enerjisinden faydalanmasını ve aerodinamik yapısını etkileyen en önemli etkidir. Bu çalışmada, 3 kW kurulu güce ve 2 metre kanat uzunluğuna sahip yatay eksenli bir rüzgâr türbini modeli için Q-Blade simülasyon yazılımı kullanılarak NACA 5-Digit kanat profillerinin sabit koşullardaki aerodinamik performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, örnek tasarım koşulları altında optimum verime sahip kanat profilinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Sonuç olarak, kaldırma (Cl) ve sürüklenme (Cd) katsayıları, kayma oranı, moment katsayıları gibi faktörler karşılaştırarak, küçük çaplı rüzgâr türbinleri için NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profilleri arasından NACA 22112 kanat profilinin aerodinamik açıdan en verimli kanat profili olduğu tespit edilmiştir.

Sayfa Adedi : 56
Anahtar Kelimeler : Q Blade, rüzgâr türbini, kanat profili, kaldırma katsayısı
Danışman : Dr. Öğr.Üyesi Yavuz ÜNAL

COMPARATIVE AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF FIVE-STAGE
NACA WIND
TURBINE AIRFOILS UNDER THE SAME AMBIENT CONDITIONS
(M. Sc. Thesis)

Enes SEZER

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

The use of wind turbines is becoming widespread worldwide and the amount of energy produced is increasing day by day. Airfoils play a critical role in the power generation of turbines. The design and aerodynamic properties of wind turbine blades are of great importance for optimum efficiency. Turbine airfoil structure is the most important factor affecting the turbine blade's wind energy utilization and aerodynamic structure. In this study, the aerodynamic performance of NACA 5-Digit airfoils under steady conditions is comparatively analyzed using Q-Blade simulation software for a horizontal axis wind turbine model with an installed power of 3 kW and a blade length of 2 meters. As a result of the analyses, it is aimed to determine and evaluate the airfoil with optimum efficiency under sample design conditions. As a result, by comparing factors such as lift (Cl) and drag (Cd) coefficients, slip ratio, moment coefficients, it was determined that NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 airfoils for small diameter wind turbines, NACA 22112 airfoil is the most aerodynamically efficient airfoil.

Number of pages : 56
KeyWords : Q Blade, wind turbine, airfoil
Supervisor : Asst. Prof. Dr.Yavuz ÜNAL

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinden tezimin nihayetlenmesine kadar geçen süreçte bana hiç bir zaman desteğini esirgemeyen ve çalışmamda her daim beni motive eden kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜNAL hocama şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca tez dönemi sürecinde bana destek veren ve güven duygusunu sonuna kadar hissettiren kıymetli eşim Emine UYSAL SEZER'e ve çok sevdiğim kızım Sümeyye Bilge SEZER'e teşekkür ederim.

Enes SEZER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
RESİMLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	iv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
2. ENERJİ KAYNAKLARI VE ENERJİ ÇEŞİTLERİ	5
2.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	5
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları	6
2.2.1. Hidrolik enerji	7
2.2.2. Jeotermal enerji	8
2.2.3 Güneş enerjisi.....	9
2.2.4. Biokütle enerjisi	9
2.2.5. Dalga enerjisi.....	9
2.2.6. Rüzgâr enerjisi.....	10
2.2.6.1. Rüzgârın oluşumu	11
2.2.6.2 Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları	11
2.2.6.3. Rüzgâr enerjisi kullanımının tarihsel gelişimi	14
2.2.6.4. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli	16
2.2.6.5. Rüzgâr Türbinleri	20
2.2.6.5.1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması	20
2.2.6.5.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT).....	20
2.2.6.5.2.1. Rüzgârı önden alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	21
2.2.6.5.2.2. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri	22
2.2.6.5.3. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT).....	22
2.2.6.5.3.1. Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleri	23
2.2.6.5.3.2. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri	24
2.2.6.5.4 Rüzgâr türbini bileşenleri	25

2.2.6.5.4.1. Kanatlar ve rotor:	26
2.2.6.5.4.2. Kanat döndürme mekanizması (pitch):	28
2.2.6.5.4.3. Fren.....	29
2.2.6.5.4.4. Düşük hızlı şaft:	29
2.2.6.5.4.5. Dişli kutusu:	30
2.2.6.5.4.6. Jeneratör:	30
2.2.6.5.4.7. Kontrol kutusu:.....	30
2.2.6.5.4.8. Anemometre ve rüzgâr gülü:.....	30
2.2.6.5.4.9. Türbin kafa kısmı:	31
2.2.6.5.4.10. Yüksek hız şaftı:.....	31
2.2.6.5.4.11. Rota mekanizması ve motoru (Yaw):.....	31
2.2.6.5.4.12. Kule:	32
2.2.6.5.5. Rüzgâr türbin kanatları.....	32
2.2.6.5.5.1. Kanat profili (Aerofoil).....	33
2.2.6.5.5.2 Kanat bileşenleri.....	34
2.2.6.5.5.3. Kanat tasarımında kullanılan malzemeler	35
2.2.6.5.5.4. Kanat imalatı	36
2.2.6.5.5.5. El yatırma yöntemi	36
2.2.6.5.5.6. Vakum torbalama yöntemi	37
2.2.6.5.5.7. Vakum infüzyon yöntemi.....	37
3. MATERYAL VE METOT.....	39
3.1. Q Blade Yazılımı.....	39
3.2. Kanat Elemanı Momentum Teorisi	39
3.2. Aerodinamik Kriterleri	41
3.4. Kanat Profili(Airfoil) Yapısı	44
3.5. Tasarım ve Analiz	45
4. SONUÇLAR	47
4.1. Genel Sonuçlar	50
4.2. Öneriler.....	52
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kanal tipi hidroelektrik santrali	8
Şekil 2.2. Rüzgar enerjisinin oluşumu	10
Şekil 2.3. Türkiye geneli 100 m yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hızları haritası	18
Şekil 2.4. Türkiye geneli 100 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu haritası	18
Şekil 2.5. Rüzgâr etkisine göre türbinler (a) önden rüzgâr alan, (b) arkadan rüzgâr alan...	22
Şekil 2.6. Darrieus dikey eksenli rüzgar türbini	24
Şekil 2.7. Rüzgâr türbini bileşenleri	25
Şekil 2.8. Direct drive sistemi	28
Şekil 2.9. Havanın aerofoil etrafındaki hareketi ve kaldırma kuvveti oluşumu.....	33
Şekil 2.10. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı	34
Şekil 3.1. Kanat profili geometrisi	44
Şekil 3.2. Q-Blade programı NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profillerinin tasarım görüntüsü.	46
Şekil 4.1. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açlarına göre kaldırma (Cl) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.	47
Şekil 4.2. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açlarına göre sürüklenme (Cd) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.	48
Şekil 4.3. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açlarına göre süzülme(Cl/Cd) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.	48
Şekil 4.4. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açlarına göre moment(Cm) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.	49

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.5. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin sürüklenme (C_d) katsayılarına göre kaldırma (C_l) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.	50
---	----



RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Geçmişte kullanılmış rüzgar türbini.....	15
Resim 2. 2. Yatay eksenli rüzgar türbini.....	21
Resim 2.3. Dikey eksenli rüzgar türbini.....	23
Resim 2.4. Savonius dikey eksenli rüzgar türbini.....	24



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
\emptyset	akış açısı
ω	kanat dönüş hızı
Ω	açısal hız
ρ	hava yoğunluğu
a	eksensel indüksiyon
a'	açısal indüksiyon
π	pi sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
GW	gigawatt
MW	megawatt
Cl	kaldırma katsayısı
Cd	sürüklenme katsayısı
Re	Reynolds sayısı
HES	hidroelektrik santral
km	kilometre
kWh	kilowatt saat
dB	desibel

milattan önce

Elektrik İşleri Etüt İdaresi



1. GİRİŞ

Gün geçtikçe modernleşen ve sanayileşen dünyamızda insanların yaşamlarını sürdürmeleri ve yaşam standartlarını artırmaları için enerjiye ihtiyaç vardır. Gitgide artan ülkemiz ve dünya nüfusu sayesinde enerji ihtiyacı çoğalmaktadır (Tokul, 2021).

Nerdeyse her gün gelişen teknoloji ve sanayinin devamını sağlanması ve daha da gelişmesi için kaynak sağlanması gerekmektedir. Bu bağlamda enerji tüketimi de sadece lüks yaşam değil ülkeler adına gelişmişlik belirtisidir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin artan nüfusları ve gelişen sanayileri ile birlikte harcanan elektrik enerjisi de paralellik göstermektedir (Soydugan, 2021).

Sürekli ihtiyaç duyulan enerji ile birlikte yenilemeyen enerji kaynaklarının da sınırlı oluşu ülkeleri enerji üretmeye ve yenilebilir kaynaklarında yönelmeye itmiştir (Tokul, 2021).

Dünya genelinde temiz enerji kaynaklarına yönelimin artmasıyla yenilenebilir enerji projelerinin kapasitesi geçen yıl 2019 yılına göre yüzde 52 artışla 3 bin 869 GW'a ulaşmıştır (Damyan, 2024).

Ülkelerin enerji üretme açısından arz talep dengesini gözetmeleri gerekmektedir. Enerji üretimi ile tüketimi arasındaki fark açıldığı zaman ülkeler hem maddi açıdan hem de dış politika açısından zor duruma düşecektir. Çünkü enerji üretimindeki açık ülkeleri dışa bağımlılığa itecektir (Tokul, 2021).

Bir ülke ne kadar zengin olursa olsun, dışarıdan alınacak enerjinin belli bir sınırı vardır. Yenilemeyen enerjinin sınırlı olduğunu düşünürsek bütün dünyada artan nüfus ve enerji ihtiyacı dünyaya giderek enerji krizi olarak yansıyacaktır. Hatta önümüzdeki yıllarda gerçekleşecek olası dünya savaşlarının ana sebeplerinden birisinin enerji krizi olması ön görülmektedir (Soydugan, 2021).

Enerjiye olan ihtiyaç, bilim insanlarını enerjiiyi bir formdan başka bir forma dönüştürme ve dönüştürdüğü enerjiiyi verimli kullanma konusunda teşvik etmiştir. Enerjiiyi dönüştürürken de doğaya yaşadığımız dünyaya zarar vermemek amaçlanmaktadır. Genel olarak enerji teknolojilerinin temel amaçlarını; uzun zaman kullanılabilir dayanıklı yapılar oluşturmak, bakım-onarım masraflarını minimize etmek, doğayı azami derecede korumak ve enerji maliyetlerini düşürmek olarak sıralayabiliriz (Soydugan, 2021).

Yenilenebilir enerjiyi kullanmanın, geliştirmenin ve yenilenebilir enerjiyi devamlı hale getirmenin en önemli menfaatlerinden birisi de enerji maliyetlerini kontrol altına almaktır. Yenilenemeyen enerji kullanmak ve enerjiyi sürekli olarak dışarıdan temin etmek belirli bir süreden sonra ülkelerin enerjiye ayırdıkları bütçeyi dizginlemez hale getirecektir (Soydugan, 2021).

Yenilenebilir enerji teknolojilerine sahip olmak enerjide dışa bağımlılığı azaltacağından, enerji maliyetlerini kontrol altına alacağından ve arz talep dengesini sağlayacağından dolayı ülke ekonomilerine ciddi katkılar sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji, doğrudan sağlayacağı ekonomik katkının yanı sıra yeni istihdam alanları sağlayacağı için dolaylı olarak da ülke ekonomilerine katkı yapacaktır. İstihdam konusundaki artış işsizliğin azalmasını da sağlayacak ve ülkedeki iş sahası genişletilmiş olacaktır. İstihdam edilmiş insanların gelirlerinin artmasıyla ekonomik döngüye daha fazla katkı sağlayacaklardır. Gelişen teknoloji ile birlikte insan gücüne olan ihtiyaç azalmış ve artan nüfus ile işsizlik artmaktadır. Yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması ile birlikte farklı iş sahaları meydana gelecek ve istihdam konusunda alternatif oluşturmuş olacaktır.

Yeryüzü şekilleri, coğrafi konum ve iklim değişiklikleri gibi sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarından her zaman, her dönem standart şekilde fayda sağlanamayabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal kaynaklar olduğu için verim konusunda değişkenlik gösterebilirler. Bu nedenle yenilenebilir enerjiye yatırım yapılırken tek bir enerjiye yönelmek uzun vadede kârlı olmayabilir. Elbette yenilenebilir enerji seçilirken iklim şartları ve coğrafi konum göz önünde bulundurularak en verimli olan enerji yönelmek mantıklıdır. Fakat değişken koşullar göz önüne alınarak enerjinin çeşitlendirilmesi olası maddi zararların önüne geçecektir.

Günümüzde en yaygın etkin bir şekilde kullanılan rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Güneş ışınlarının mevsimsel ve coğrafi nedenlerle yeryüzünü farklı oranlarla ısıtmasıyla atmosferde basınç farklılıkları oluşur ve bu sebeple de havanın yer değişikliği ile rüzgarlar meydana gelir. Ülkemiz de rüzgar enerjisi yönünden önemli bir potansiyele sahiptir (Soydugan, 2021).

Enerji ajanslarının verilerine göre de Eylül 2024'te Türkiye'nin rüzgar enerji kurulu gücü bir önceki aya göre artarak 12.342 MW seviyesine yükselmiştir.

Bu çalışmada sabit ortam koşullarında Q-Blade Simulasyon yazılımı kullanılarak Naca-5-Digit Rüzgâr Türbini Kanat Profillerinin Karşılaştırmalı Aerodinamik Performans Analizi Gerçekleştirilecektir.

1.1. Literatür Taraması

Rüzgâr türbini kanat performansını kanatın kaldırma ve sürükleme katsayıları belirler ve aerodinamik performansın yüksek olması için kanat profilinin kaldırma katsayısının (C_l) olabildiğince yüksek, sürükleme katsayısının (C_d) ise olabildiğince düşük olması gerekmektedir (Çil, 2022). Kanat profillerinin aerodinamik performansı üzerine birçok akademik çalışma yapılmıştır.

Muftah, Türbin kanat profili NACA2414 üzerinde yaptığı çalışmasında, hücum açısının değişimine göre ve farklı Reynolds sayılarında kaldırma katsayısı (C_l), sürükleme katsayısı (C_d) ve C_l/C_d oranını incelemiş, Re 'nin yükselmesiyle C_l/C_d oranının arttığını ve 5° 'deki hücum açısında azami aerodinamik verimin elde edildiği sonucuna ulaşmıştır (Muftah, 2019).

Kulshreshtha, Gupta ve Singhal, hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu kullanarak NACA 2412, NACA 2414 ve NACA 2415 türbin kanat profillerinin, sabit hava ortamında -5° ile 20° hücum açıları skalasında kaldırma ve sürükleme katsayılarını mukayese etmiştir. Mukayese sonucunda C_l/C_d oranları açısından 27,92 ile NACA 2412'yi 1. sırada, 26,32 ile NACA 2415'i 2. sırada ve 23,56 ile NACA 2414'ü son sırada verimli bulmuştur (Kulshreshtha, Gupta ve Singhal, 2020).

Solanki, Ansys CFX programı ile alarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu yardımıyla NACA 6409 kanat profilini referans gösterecek şekilde 0° - 15° hücum açısı aralığında ve 4m/s, 5m/s, 6m/s rüzgâr hızlarında aerodinamik performans incelemesi yapmış ve C_l/C_d oranının 4m/s, 5m/s rüzgâr hızlarında 5° hücum açısında iken, 6m/s rüzgâr hızında ise 4° hücum açısında iken maksimum değere ulaştığı neticesine varmıştır (Solanki, 2021).

Widyalankara, Jayawickrama, Ambegoda ve Velmanickam, yol kenarlarında meydana gelecek araçların rüzgârlarından meydana gelecek rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çeviren enerji depolamalı rüzgâr santralini MATLAB Simulink programı ile modellemiş ve verimlilik analizleri yapmıştır. Bu santralin modellenmesinde dikey eksenli rüzgâr türbini tercih etmişler, Q Blade yazılımı aracılığıyla 1×10^5 Reynolds sayısında NACA serisi 0012, 2412, 2415, 2418, 4412, 4415 ve 6409 türbin kanat profillerini, karşılaştırmalı verimlilik analizi yaparak 0° - 20° hücum açısı aralığında en iyi performansa sahip kanat profilinin NACA 6409 olduğunu tespit etmiş ve santral modellemesine dahil etmişlerdir (Widyalankara, Jayawickrama, Ambegoda ve Velmanickam, 2021).

Cevahir Tarhan ve Mehmet Ali Çil; NACA 0009, NACA 2415, NACA 4415, NACA 4424, NACA 6412, NACA 6415, NACA 24112, FX 63-137, GOE 795, NREL's S824, SD 5060,

SG6040) kanat profillerinin Q blade yazılımı kullanılarak simülasyonları oluşturulup sayısal analizleri yapılmış ve aerodinamik performansları incelemiştir. Sayısal analizler 0° - 20° arası hücum açılarında ve 5×10^4 , 2×10^5 1×10^6 Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiş ve en yüksek aerodinamik verimliliğe sahip kanat profilleri NACA 6412, NACA 6415 ve NACA 4415 olarak belirlenmiş ve bu kanat profillerinden üç kanatlı rüzgâr türbini oluşturulup elde edilen güç çıkışları ve performans değerleri bulmuştur (Tarhan & Çil, 2022).

Zahari araştırmasında, farklı şekilde mollenmiş on tane NACA kanat profilini analiz etmiş, aynı koşullarda asgari sürükleme katsayısı (Cd) değerinden azami sürükleme katsayısı bulduran kanat profillerinin, sırasıyla NACA 0006, NACA 1408, NACA 2408, NACA 0009, NACA 1410, NACA 0015, NACA 6409, NACA 2418, NACA 6412 ve NACA 4424 olduğu neticelendirmiştir (Zahari, 2013).

Islam, Bashar, Saha ve Rafi; NACA serisi 2412, 2415, 2418, 4412, 4415, 63(2)615, 6409 kanat profilleri ve NREL serisi S817, S821, S822, S823, S825, S834 ve S835 kanat profillerinin verimlilik çözümlerini yapmıştır. Bu çözümlerini; 1×10^5 ve 3×10^5 Reynolds sayılarında ve 0° - 15° hücum açıları aralığında Q Blade yazılımı ile yapılmıştır. ve 1×10^5 ve 3×10^5 Reynolds değerleri için NACA serisinde 6409'un, NREL serisinden S825'in daha performanslı olduğu belirtmiştir. Genel değerlendirmede de stabilite ölçütü nedeniyle NREL kanat profillerinin NACA kanat profillerinden daha etkili olduğunu belirtilmiştir (Islam, Bashar, Saha ve Rafi, 2019).

Mankotia, Channi ve Gupta, 2kW'lık rüzgâr türbini için E387, S1223, SD7080, NACA2414 kanat profillerini düşük Re ile Q Balde yazılımını kullanarak sırasıyla analiz etmiş ve sırasıyla 7, 7, 3, 5 hücum açılarında maksimum kaldırma/sürükleme katsayısı oranlarını yine aynı sırayla 70, 60, 59,2, 54,2 şeklinde bulmuştur (Mankotia, Channi ve Gupta, 2020).

2. ENERJİ KAYNAKLARI VE ENERJİ ÇEŞİTLERİ

Kısaca, iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan enerji, mekanik (potansiyel ve kinetik), ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi değişik türlerde bulunabilmekte, uygun yöntemlerle bir türden diğerine dönüşebilmekte olup, farklı şekillerde sınıflandırılabilir.

Enerji kaynakları kullanma biçimlerine göre Yenilenemeyen Enerji Kaynakları ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları şeklinde kategorize edilebilir (Koç & Kaya, 2014).

2.1. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Bir kez kullanıldığında kendini yenileyemeyen enerji kaynakları yenilenemez enerji kaynakları olarak bilinmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları kendi arasında fosil kaynaklı ve çekirdek kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Kömür, petrol ve doğal gaz fosil kaynaklı yenilenemez enerji kaynağı olarak değerlendirilirken, uranyum ve toryum ise çekirdek kaynaklı yenilenemez enerji kaynağı grubunda yer almaktadır (Koç ve Kaya, 2014).

Fosil yakıtlar; ölmüş canlı organizmaların yıllarca toprak altında oksijenden mahrum kalmasıyla oluşur. Bu kaynakların en yaygın kullanılanlarından petrolün ilk olarak M.Ö 3000’li yıllarda Mezopotamyalılar tarafından keşfedildiği tahmin edilmektedir. Petrol çok eski çağlarda duvar inşasında ve mumyalama gibi basit işler için kullanılmıştır (Demir, 2019). Günümüzde ise eski çağlara nazaran çok daha önemli hale gelmiştir ve ulaşımdan sanayide birçok alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır. 2024 yılı verilerine göre dünya genelinde 300 milyar varil rezervi bulunduğu tahmin edilmektedir.

En çok kullanılan yenilenemez enerji kaynaklarından birisi olan kömür, günümüzde daha çok evlerde ısınma ve elektrik üretimi amacıyla kullanılır. Karbon, hidrojen, azot, kükürt ve oksijenden oluşan bu enerji kaynağının işletmeciliğine ait dokümanlar 12. yüzyıla aittir. Kömürün günümüzde doğalgazın kullanımının artmasıyla birlikte kullanımı azalsa da elektrik üretiminde önemini korumaktadır (Demir, 2019). 2024 yılı rakamlarına göre dünyadaki elektrik üretiminin yaklaşık %35’inin kömürden karşılanması bunun bir ispatıdır.

Nükleer enerji ise radyoaktif elementlerin atom çekirdeklerinin parçalanması (filyon) veya birleştirilmesi (füzyon) ile açığa çıkan enerji olarak tanımlanmaktadır. Nükleer enerji ilk

olarak 1945 yılında atom bombası olarak kullanılmıştır. Daha sonra 1951 yılında ilk nükleer enerji santrali kurulmuş ve elektrik üretimi başlamıştır (Erdöşemeci, 2014).

Nükleer enerjinin küresel elektrik üretimindeki payı değişkenlik gösterse de, genellikle dünya çapında elektrik üretiminin yaklaşık %10'unu oluşturduğu kabul edilir. Bu oran, ülkelere ve bölgesel enerji politikalarına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir. Örneğin, Fransa'da nükleer enerji elektrik üretiminin %70'inden fazlasını karşılamaktadır. Bu oran ABD'de yaklaşık %20 civarındadır. Dünya genelinde nükleer enerji kullanımının geleceği, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan artan ilgi ve nükleer enerjinin çevresel ve güvenlikle ilgili sorunları gibi faktörler tarafından etkilenmesi kaçınılmazdır (İnovakademi 2024).

Tüm dünyada tüketilen enerjinin yaklaşık %70'i yenilenemeyen enerjiden sağlanmaktadır. Dünyada nüfusun sürekli artması, insanların yaşam standartlarının artması ve teknolojinin gelişmesiyle enerji ihtiyacı katlanarak artmaktadır. Güncel durumda bu yüksek enerji ihtiyacını tedarik etmek, kaynakları sınırlı olan yenilenemez enerji kaynaklarının planlı bir şekilde tüketilmesini zorunlu hale getirmektedir (Koç ve Kaya, 2014).

Yenilenemeyen enerjinin Kaynakları sınırlı olması, artan enerji talebinin hepsini karşılamakta zorlanması; küresel ısınma, çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi konuların da belirgin bir şekilde gündeme gelmesiyle birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmak gereklidir.

2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji tabiatta her daim var olan, kısa sürede kendini yenileyebilen ve tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Eski çağlarda yenilenebilir kaynaklardan olan rüzgâr gücü ve su gücü, temel ihtiyaçları karşılamak üzere enerji kaynağı olarak kullanılmaktaydı. Günümüzde ise bu kaynaklar bilimsel ve teknik gelişmelerin ışığında daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır (Demir, 2019).

Günümüzde en çok tercih edilen fosil yakıtlar, sınırlı bir kaynağa sahip ve yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Hâlbuki yenilenebilen enerji kaynakları, kısıtlı kaynaklara sahip değiller. Sürekli kendini yenileyebilen enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve jeotermal

enerjisi gibi doğal kaynaklara sahip enerji türleri hem yenilenebilir hem de çevreye zarar vermiyor olmalarından dolayı temiz enerji kaynaklarıdır (Dilmaç, 2019).

Ülkemizde ve yaşadığımız dünya genelinde en çok kullanılan enerji kaynağı olan fosil yakıtların, zamanla tükenmesi, yaşadığımız çevreye ve canlılara büyük zararlar vermesi, zararlı gazların salınımların yüksek olmasıyla iklim değişikliğine sebebiyet vermesi gibi sebeplerden dolayı bilim insanlarını tükenmeyen ve çevreci enerji kaynaklarını değerlendirmeye yönlendirmiştir (Demir, 2019).

Bu durumlar nedeniyle yenilenebilir enerjinin, fosil kaynakların yerini alabileceği düşünülmekte ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin her geçen gün daha da geliştirilmesi ile ilgili alternatifli çalışmalar devam etmektedir.

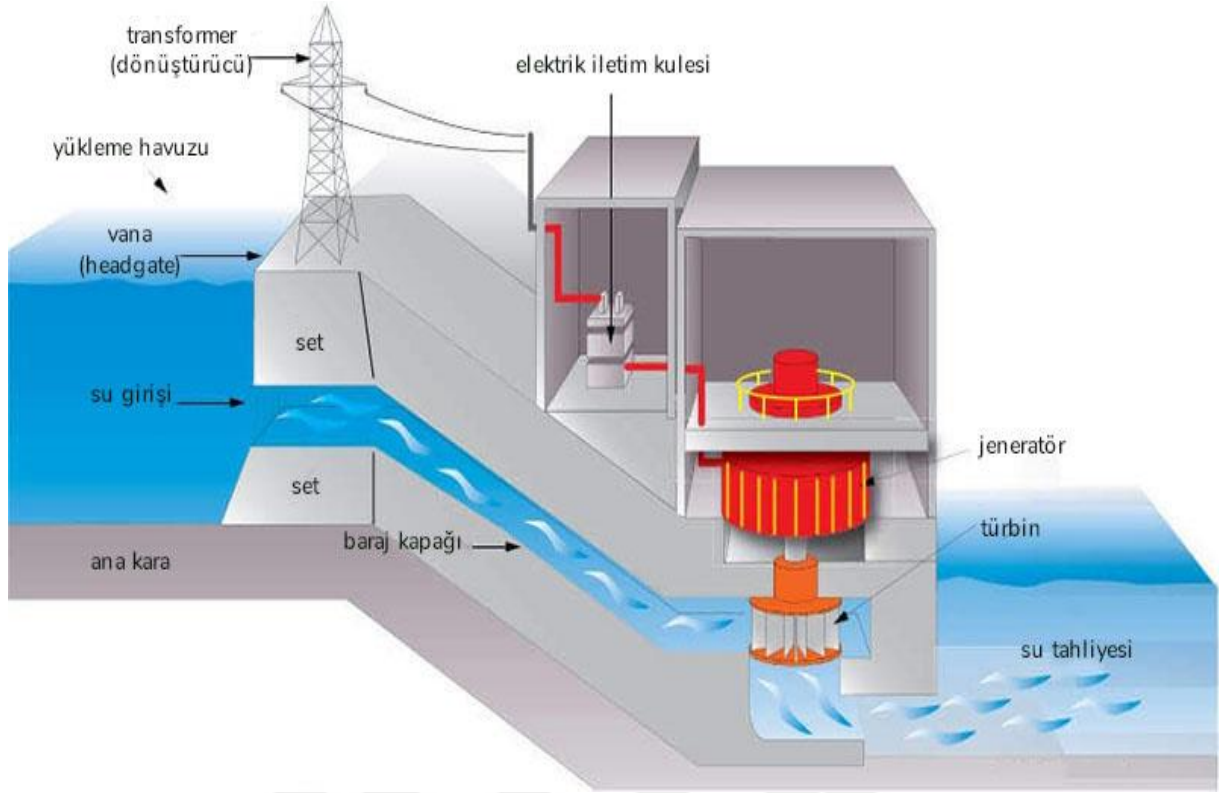
Ülkemiz, Dış İşleri Bakanlığımızın verilerine göre enerji ihtiyacının yaklaşık %74'ünü dışarıdan ithal etmektedir. Halbuki ülkemizin, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği ve potansiyeli açısından varlıklı bir ülkedir. Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle ciddi bir güneş enerjisi potansiyeline, jeotermal enerji bakımından önemli bir potansiyele, ciddi bir rüzgâr potansiyeline ve yeryüzü şekil özellikleri ve iklim nedeniyle de önemli bir hidrolik enerji potansiyeline sahiptir. Eğer ki değerlendirebilirsek bu yenilebilir enerji potansiyeli ülkemizin dışa bağımlılığını ciddi mânâda düşürebilir (Koç ve Kaya, 2014).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik enerji, jeotermal enerji, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi ve rüzgâr enerjisidir.

2.2.1. Hidrolik enerji

En yaygın olarak bilinen yenilebilir enerji kaynaklarından olan hidrolik enerji, suyun belirli bir hızla hidroelektrik santral türbinlerine çarptırılması neticesinde suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesiyle elektrik enerjisi üretimidir (Koç & Kaya, 2014).

Genellikle hidrolik enerjinin kullanım biçimi nehirler üzerinde barajlar inşa ederek suyun rezervuarlarda birikmesini sağlamak ve suyun potansiyel enerjisinden faydalanmak suretiyle elektrik enerjisi üretmektir. Bu bahsedilen eylemler için hidroelektrik santrallerden (HES) fayda sağlanmaktadır (Koç ve Kaya, 2014).



Şekil 2.1. Kanal tipi hidroelektrik santrali

Uluslararası Hidroelektrik Derneği'nin (IHA) "2024 Hidroelektrik Enerji Görünümü" raporundan yapılan derlemeye göre, geçen yıl dünyada hidroelektrik santrallerinden 4 bin 185 teravatsaat elektrik üretildi. Ülkemizde ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının verilerine göre 2024 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 114.599 MW'a ulaşmıştır.

2.2.2. Jeotermal enerji

Elektrik enerjisi üretimi ve kış aylarında evlerin ısıtılması gibi amaçlarla kullanılan jeotermal enerji dünyanın doğal iç ısısidir. Bu ısı, yer altının derinliklerinde bulunan basınç altındaki sıcak su ve buharın yer yüzüne doğru hareket etmesiyle birlikte elde edilen enerjidir (Koç ve Kaya, 2014).

Jeolojik özelliği ve coğrafi konumu açısından jeotermal enerjide avantajlı olan Türkiye, kurulu güç bakımından dünyada 4'üncü, potansiyel bakımından ise Avrupa'da ilk sırada yer alıyor. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, ülkemizde, doğal çıkış şeklinde ve değişik sıcaklıklarda yaklaşık 1000 jeotermal kaynak bulunuyor. Keşfedilmiş jeotermal kaynak potansiyeli ise 62 bin megavat olarak hesaplanıyor.

2.2.3 Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğindeki füzyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan çok güçlü bir enerjidir. Güneş ışınları vasıtasıyla dünyamıza gelen bu enerjiden yararlanmak için güneş kollektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler sayesinde güneş enerjisi ısı enerjisi olarak doğrudan ya da elektrik enerjisine dönüştürülerek dolaylı olarak kullanılabilir. Dünyada güneş enerjisinden daha fazla yararlanmak amacıyla çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir. Güneş pili (Fotovoltaik piller -PV-) üretim maliyetlerindeki düşüş ve teşviklerin katkısıyla yakın gelecekte dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisinde elektrik enerjisi üretim faaliyetlerinin artması beklenmektedir (Koç ve Kaya, 2014).

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha avantajlı durumdadır. Türkiye'nin güneş enerjisinde kurulu gücü Ağustos 2024 itibarıyla 16 bin megavatı geçerek ülkedeki toplam kurulu gücün yüzde 14'ünü oluşturmuştur (Anadolu Ajansı, 2024).

2.2.4. Biokütle enerjisi

Bu enerji hayvansal ve bitkisel atıklardan elde edilebilen, karbonhidrat bileşikleri bulunduran maddelerin oluşturduğu bir enerji çeşididir. Biyoetanol, biyodizel ve biyogaz olarak bilinen yakıtlar biyokütle enerji kaynakları kullanılarak elde edilirler (Koç ve Kaya, 2014).

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre 2024 Kasım ayında Türkiye'nin kurulu gücü 114.751 MW'a ulaşırken, toplam santral sayısı da 32.360 adet olmuştur.

2.2.5. Dalga enerjisi

Denizlerdeki ve okyanuslardaki dalgaların gücünden yararlanarak elde edilen enerjiye dalga enerjisi denir. Dünyadaki yenilenebilir enerji pasta payındaki en küçük alanı dalga enerjisi

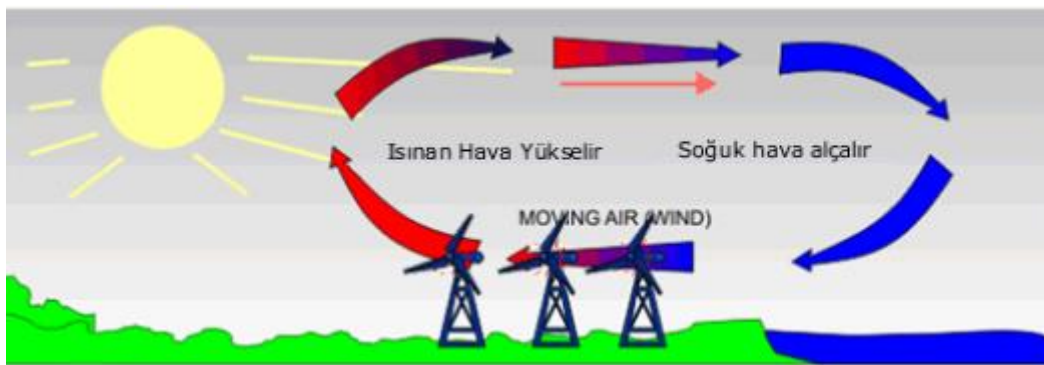
temsil etmektedir. Bu enerjinin kaynak potansiyeli çok büyük olmakla birlikte bu alandaki teknolojilerin hala çok gelişmiş olduğunu söylemek mümkün değildir.

Dalga ve deniz rüzgarlarından üretilen elektriği kapsayan okyanus enerjisinde dünyada kısıtlı bir değer bulunuyor (Tokul, 2021). Toplam 527 megavat kurulu güce sahip okyanus enerjisi projelerinin yüzde 50'si Asya'da, yüzde 45'i ise Avrupa'da kalan kısım ise diğer kıtalarda yer alıyor (Topbaş, 2021).

2.2.6. Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr türbinlerinin rüzgâr gücünü kullanmasıyla hareket ederek kinetik enerjiyi ilk olarak mekanik enerjiye sonrasında da elektrik enerjisine çevirmesi ile meydana gelen enerjiye rüzgâr enerjisi denir. Rüzgâr enerjisi günümüzde, teknolojisi sürekli olarak güncellenen ve yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Rüzgâr enerjisi sistemleri, hava kirleticileri olmayan, çevreci, sürekli ve sonu olmayan bir enerji kaynağıdır. Dağ-vadi yapılarından ve kıyı şeritlerinden dolayı ülkemizin coğrafi yapısının ciddi bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu kanısına varılabilir (Tokul 2021).

Rüzgâr enerjisinin çevrime uğramış güneş enerjisi olduğu söylenebilir. Yerküreye gelen güneş enerjisinin çok küçük bir miktarı rüzgâr enerjisine çevrilebilmektedir. Rüzgar enerjisi lokal coğrafi farklılık ve heterojen ısınmaya bağlı olarak dönemsel ve yöresel farklılıklar gösterebilir. Bilimsel verilere göre rüzgârın hızının yükseklikle, rüzgârın gücünün ise hızının küpü ile orantılı bir şekilde arttığını söyleyebiliriz. Rüzgârların yönü ise iklim şartlarına ve günlük hava durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Dilmaç 2019).



Şekil 2.2. Rüzgar enerjisinin oluşumu

Rüzgâr enerjisi kullanılarak elektrik enerjisinin üretimi rüzgâr türbinleri sayesinde gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr enerjisini verimli bir şekilde elde etmenin en önemli etkenlerinden birinin türbinlerinin kanat yapıları olduğu söylenebilir. Rüzgâr türbinlerinin kanat profiline yapısı kanatların verimliliğini etkiler, bu nedenle rüzgâr türbinleri için kanat profilleri ciddi bir öneme sahiptir. Rüzgâr türbinlerindeki enerji üretim maliyetinin düşmesindeki en önemli sebeplerden birisi en elverişli kanat profiline oluşturmak için gerçekleştirilen çalışmalar olmuştur (Dilmaç 2019).

2.2.6.1. Rüzgârın oluşumu

Güneşten enerjisi atmosferde, kara parçalarında ve suda farklı sıcaklıklara sebep olur. Bunun sebebi atmosferin, suyun ve kara parçalarının farklı öz ısılarına sahip olmalarıdır. Bu sıcaklık farklılığında çevresel ve coğrafi faktörlerinde etkili olduğu söylenebilir. Dünyamızda meydana gelen bu sıcaklık farklılıkları doğal olarak basınç farklılıklarına sebep olur bu durum da rüzgârın oluşmasına sebep olur.

Oluşan rüzgâr yüksek basınç kuşaklarından alçak basınç kuşaklarına doğru yönelir. Dünyanın hareketinden doğan “Coriolis” kuvveti ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvveti, yeryüzünde meydana gelen hava kütleleri hareketlerini doğrudan etkiler.

Ekvator bölgesi yeryüzünün diğer bölgelerine nazaran güneş tarafından daha fazla ısıtılır bu ısınmanın sonucu sıcaklığı yükselen hava atmosferde 10 km yüksekliğe kadar yükselir ve buradan güney ve kuzey kutuplarına doğru hareket eder. Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi olayı, hava hareketinin yerkürenin tümüne doğru yayılmasını sağlar ve rüzgârları oluşturur.

Dünyadaki birçok enerji kaynaklarının sebebi güneştir. Güneşten dünyaya gelen enerji miktarı saatte yaklaşık 145,000,000,000,000 kWh tir ve bu enerjinin sadece yüzde 1-2 si rüzgâr enerjisine dönüşür (Dilmaç 2019).

2.2.6.2 Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Rüzgâr enerjisinden faydalanıp rüzgâr enerji sistemleri kullanımının, aşağı kısımda yer alan bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Rüzgâr enerjisinin belirli avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Diğer farklı enerji kaynaklarının içerdiği gibi radyoaktif atık içermediği için, sera gazları, dolayısıyla da asit yağmurları oluşturmadığı için temiz bir enerji kaynağıdır. Daha da önemlisi bu asit yağmurlarının ve sera gazlarının oluşumunda dolaylı yoldan bir azalmaya yol açar. Zira fosil yakıtların ürettikleri enerjiye alternatif üretim yaptıkları için harcanan fosil yakıtların tüketilmesini ve böylelikle meydana gelecek atıkları azaltmış olurlar (Hayli, 2001).

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtlara alternatif olması dolayısıyla bu yakıtların tüketimini azaltmak suretiyle bu kısıtlı kaynakların kullanılabilirliğini de uzatır. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olması sebebiyle hammadde masrafı yoktur ve bundan dolayı da maliyeti az bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi, ülkeleri doğal kaynak elde etme açısından dışa bağılıktan azat ettiği için, klasik kaynaklara göre daha maliyetli olsa bile, yerel iktisat adına ciddi bir kazançtır. Yerel iktisada katkısı, yalnızca enerjide dışa bağılılığı düşürmesi ve klasik kaynaklara yardımcı olması ile kısıtlı değildir. Bütün bunların yanında, güncel iş sahalarıyla birlikte iş olanakları fırsatlarını da çoğaltmaktadır. Bunlarla birlikte, alternatif çoğu enerji kaynağına nazaran, rüzgâr enerjisi ile üretilen elektrik enerjisinin masrafı daha düşüktür. Örneğin, Amerika'da enerjisi ile üretilen elektrik enerjisinin masrafı, güneş enerjisi ve nükleer enerjinin yarısı kadar, kömür, petrol ve doğalgaz ile çalışan termik santrallerden kazanılan elektrik enerjisinin ise, yaklaşık çeyreği kadardır.

Ortalama değerlere göre rüzgâr türbinlerinin faaliyete geçme süresi, imalatının başlama süresi itibariyle yaklaşık 4 ay gibi kısa bir zaman lazım olur. Bahsedilen gecikme, nükleer enerjide takribi 7 sene, doğalgazda 1 yıl, hidrolik enerjide ise 2 ila 10 yılı bulabilir (Bayraç, 2011).

1 km² yer kaplayan yirmi tane rüzgâr türbini barındıran spesifik bir rüzgâr türbini çiftliğinin alanının takribi % 1'lik kısmı türbin yerleşim yeri olarak kullanılır. Geriye kalan alanlar hayvan yetiştiriciliği ve çiftçilik amacıyla veya natürel arazi olarak kullanılabilir (Bayraç, 2011).

Toplumsal ilerlemeye ve iktisada katkı yapma amacıyla, rüzgâr endüstrisi istihdamı artırır. 2024 verilerine göre günümüzde rüzgâr endüstrisinde 1,5 milyon insan iş imkânı bulmaktadır (Anadolu Ajansı, 2024). Rüzgâr endüstrisi dediğimiz iş sahası; elektrik üreten, satan/dağıtan işletmelere, türbin, kanat ve diğer parça imalatçılara, araştırma geliştirme şirketlerine, mühendislik, servis, teknik, finans firmalarına yeni istihdam olanakları oluşturmaktadır.

Köy bölgelerinde inşa edilen rüzgâr türbin çiftlikleri için, bu alanlara ödenecek olan kiralama ve satın alım paraları bu köy bölgelerinde yaşamını sürdüren insanlara maddi açıdan destek sağlayacaktır (Bayraç, 2011).

Yukarı kısımda bahsedilen kazanımlarıyla birlikte çevreci bir enerji kaynağı olsa dahi rüzgâr türbinlerinin kurulduğu bölgede bazı olumsuz durum meydana getirmesi gibi handicap oluşması bariz bir durumdur. Bu dezavantajların bazılarını şöyle sıralayabiliriz:

Hava şartları ve iklim değişikliği gibi sebeplerden dolayı rüzgâr düzenli bir şekilde kendini göstermeyebilir. Bu durum da enerji üretiminde kesintiye hatta durmaya sebep olabilir. Bu gibi aksaklıkların önüne geçmek için daha önce üretilmiş elektriğin büyük akümülatörler tarafından depolanması ve elektroliz yoluyla elde edilmiş hidrojenin depo edilmesi gibi faaliyetlerde bulunmaktadır. Böylelikle rüzgârın esmediği dönemlerde tedarikli olunmuş olur. Denizin üstüne kurulan rüzgâr istasyonlarında elektroliz yoluyla elde edilmiş hidrojen tanker gemisiyle nakledilir. Bu durum taşınan hidrojenin denizin altından geçecek büyük masraflı denizaltı transfer sistemlerine gerek bırakmamak gibi bir avantaj sağlar. Karada veya denizde kurulmuş rüzgâr enerji sistemlerinin enerji üretmesindeki kesintiden kaynaklanan dezavantajın bertaraf edilmesi ve üretilmiş elektriğin devasa akümülatörlerde biriktirilmesi gibi usullerden en önemlilerinden birisi elektroliz yöntemidir.

Birçok kişi tarafından rüzgâr türbinlerinin yüksek desibelli ses ürettiği iddia edilir. Fakat bu yüksek desibelin gürültü kirliliğine fazla bir katkısı yoktur. Mevcut yüksek desibelli ses, sadece rüzgâr enerjisi istasyonlarının konumlandığı yerlerde görülür. Bu yüksek desibelin ortadan kaldırılması için bazı teknik önlemler alınmaya çalışılıyor. Rüzgâr enerji santrallerinin konumlanacağı yerin seçimi de alınan önlemlerin içerisinde. Rüzgâr enerji istasyonlarında yaklaşık 80 ila 85 dB'lik gürültü meydana gelir. Bu desibel değeri işitmenin çok zor olduğu bir değerdir. Bu nedenle rüzgâr enerji santrallerinin kurulacağı yerin iskan bölgeleriyle ez az 400 ila 500 metre arasında bir uzaklığın olması gereklidir. Zira gürültü kirliliği açısından düşük bir değer olan 37 desibel, rüzgâr türbinlerinden 400 metre mesafeden ölçülmüştür. Bunların yanında rüzgâr türbinin üreteceği gürültüyü minimize etmek için; pervane, titreşimini absorbe edecek vibrasyonlu bir yatak kullanılarak dişli kutusundan yalıtılır. Bu yalıtma işlemi dişli kutusu ve jeneratörü içinde bulunduran tekne için yapılır.

Rüzgâr türbin sistemlerinin bir başka dezavantajı da; türbinin var olduğu yaklaşık 2-2,5 km çapındaki bölgede televizyon ve radyo gibi haberleşme araçlarının dalgalarının olumsuz etkilenmesidir.

Rüzgâr türbin sistemlerinde türbinlerin aralıklı olarak konumlandırılmasının nedeni türbinlerin birbirlerinin rüzgârını engellememektir. Bu durum rüzgâr Türbin yerleşmelerinin diğer enerji santrallerine göre daha fazla yer kaplamasında yol açar. Büyük boyutlarda diyebileceğimiz 20 tane rüzgâr türbini takribi 1 km²'lik yer işgal eder. Bu 1 km²'lik yerin

yalnızca yaklaşık %1'i türbinin oturduğu alandır. Türbinlerin bulunmadığı alanlar da hayvancılık ve tarım sektörüne hizmet edecek şekilde tahsis edilebilir. Bu boş alanlara rüzgâra engel oluşturacak yapıların inşa edilmesi söz konusu değildir.

Kimilerine göre rüzgâr türbinleri doğaya yakışmayacak şekilde görüntü kirliliğine sebep olmaktadır. Bu duruma önlem alan İngiltere; milli park alanlarına 5MW'ı geçecek güçteki ve sayı olarak da ondan fazla türbini kabul etmemektedir (Bayraç, 2011).

Rüzgâr türbinlerinin hızlı bir şekilde dönmesi kuş ölümlerine sebebiyet vermektedir (Hayli, 2001).

Yukarıda sayılan dezavantajlar rüzgâr türbin teknolojisinin başlangıç zamanlarında fazlasıyla meydana gelmekteydi. Teknoloji geliştikçe rüzgâr türbin sistemleri de gelişmiş böylelikle de elektromanyetik dalgalar olsun yüksek desibelli ses olsun zamanla bertaraf edilmiştir. Rüzgar çiftlikleri alanlarındaki sesler rahatsız edici olsa da yapılarda kullanılan rüzgar türbinlerinin sesleri alçak şiddettedir. Bina ortamlarında kullanılan rüzgar türbinlerinin çevrede yoğun ortamlarda kullanılması sıklıkla tehlikeli olarak addedilir. Buna mukabil hızla atılım yapan teknoloji ile birlikte rüzgâr türbinleri, yüksek hızla çalıştıklarında kendi kendine fren yapabilen bir niteliğe sahiptir. Bu durum parça kopması gibi olayların tamamen bertaraf edilmesine yol açar (Bektaş, 2013).

2.2.6.3. Rüzgâr enerjisi kullanımının tarihsel gelişimi

Milattan önceki dönemlerde; yel değirmenlerine, yelkenli gemilere ve rüzgâr millerine güç beslemesi için rüzgâr enerjisinden faydalanılmıştır. Bilhassa tahıl öğütme ve su pompalama amacıyla uzun zamanlar rüzgâr enerjisinden yarar sağlanmıştır. Rüzgâr enerjisinden faydalanma ilk olarak Orta Doğu'da M.Ö. 2800 yılları civarında başlamıştır. M.Ö. 17. Yüzyılda rüzgâr enerjisi kullanılmış hatta bu dönemde Babil Kralı Hammurabi sulama maksadıyla rüzgâr enerjisi kullanılmasında öncü olmuştur. Tarihte yel değirmenlerinin kurulduğu ilk bölgenin İskenderiye civarı olduğu söylenir. Milattan sonra yedinci yüzyılda Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini kurmuşlardır. Buna karışık Avrupa devletleri ilk yel değirmenlerini haçlı seferleri dönemlerinde kurmuşlardır. Avrupa devletlerinden İngiltere ve Fransa ise 12. yüzyılda yel değirmenlerinden faydalanmaya başlamıştır. Avrupa'da yel değirmeninin kullanımı sanayi devrimi zamanına kadar hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır ve bu yel değirmenleri su pompalama, hızar kullanımı ve tarım ürünlerini

ufalamak maksadıyla kullanılmıştır. 18. Asrın son dönemlerine doğru Hollanda'nın yaklaşık 10.000 adet yel değirmeni kullandığı tahmin edilmektedir. Bu dönemlerde rüzgâr enerjisi önemini kaybetmiştir. Bunun sebebi kömür ve odundan enerji üretimi ve buhar makinesinin icat edilmesiyle sürekli enerji üretiminin meydana gelmesidir. Buna karşılık Danimarka; 1890'lı yıllarda elektrik üretimi maksadıyla rüzgâr türbini olarak adlandırılan donanımlar üretmiştir. Paul la Cour isimli modern aerodinamik kavramıyla ilgili ciddi çalışmalar yapan mühendis, Danimarka'da rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk rüzgâr türbinini imal etmiştir. (Elibüyük ve Üçgül, 2014)



Resim 2.1. Geçmişte kullanılmış rüzgar türbini

Avrupa'da 1200 ila 1900 yılları arasında rüzgâr enerjisi, toplam enerji gereksiniminin yüzde 11'ine karşılık geliyordu. Bunun sebebi; yel değirmenlerinin Avrupa kıtasında bir hayli ön plana çıkması, 1800'lü yıllara gelindiğimizde, kısa boylu da olsa Fransa'da 20,000 tane yel değirmeni kullanılması, aynı dönemlerde Hollanda sanayisinin enerjini ihtiyacının % 90'ının rüzgâr enerjisinden sağlanması, 1904 yılına gelindiğinde Almanya'da 18,000 yel değirmeni tesis edilmesidir (Özgür, 2006).

1920 senesi sonuna doğru elektrik üretmek amacıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde; kırsallarda küçük çaplı yel değirmenleri kullanılmıştır. 1930 senesi sonrasında ise yel değirmenleri, elektrik hatlarının kırsal bölgelere enerji ulaştırdığından önceki yıllara göre daha az kullanılmaktaydı. Bununla birlikte Amerika'nın batı kesimlerinde bazı köy bölgelerinde yel değirmenlerinden hâlâ faydalanılıyordu. Rakam belirtecek olursak yaklaşık

600,000 adet yer değirmeni, 1920 ila 1930 senelerinde Amerika'da aktif bir şekilde kullanılmaktaydı. Günümüzde de Amerika yapımı yel değirmenlerinden, tarımsal amaçla dünyanın birçok ülkesi faydalanmaktadır (Dilmaç, 2019).

İkinci Dünya Savaşı ardından rüzgâr türbinlerine gösterilen alaka, petrol fiyat bedellerinin düşüşe geçmesiyle azalmıştır. 1970 yılına gelindiğinde ise petrol fiyat bedellerinin fahiş bir şekilde artmasıyla dünya genelinde rüzgâr türbinlerine olan alaka yeniden artmıştır. Yine bu dönemde petrole uygulanan kısıtlamalarla, rüzgâr türbin sistemlerine yeniden meyil edilmek suretiyle rüzgâr enerjisinden nasıl daha fazla faydalanılacağı gündeme gelmiştir. Bu gündeme gelme biçimi, Avrupa ve Amerika'nın enerji ağına olumlu bir şekilde yansımıştır. Bu gelişmelerle birlikte 1970 senesiyle birlikte rüzgâr enerjisi teknolojisi yavaş yavaş gelişme göstermiştir. 1990 senesi sonlarında ise rüzgâr enerji sistemleri, yenilenebilir enerji elde etme yollarından birisi olarak kabul edilmiştir (Özgür, 2006).

Türkiye'nin iktisadi ve tarihsel olarak gelişme açısından rüzgâr enerjisinin önemli payı vardır. Anadolu'da karşılaşılan tarihi keşifler Truva medeniyetine kadar gider. Bu keşifler bize yel değirmenlerinin hangi dönemde kurulduyuyla ilgili bir bilgiyi bize sunmaz. 1389 tarihine ait bir askeri harita bize yel değirmenlerinin İzmir Körfezi boyunca konumlandığını ispat eder. Yel değirmenleri, Anadolu'nun 1960-1961 yıllarında tarımda kuvvet kazanmasının temel sebeplerindendir. Bahsi geçen yıllarda ülkemizde 749 tane yel değirmeni aktif olarak çalışmaktaydı. Bu yel değirmenlerinin 41 elektrik üretmede, 708'i ise su pompalama amacıyla istifade edilmiştir. 1966-1967 yıllarında 309 yel değirmeninden 2 adedi ve 1978-1979 yıllarında 894 yel değirmeninden 23 adedi elektrik üretiminde kullanılmıştır. Kullanılan bu yel değirmenlerinin potansiyeli 1 kW 'tan düşüktü (Dilmaç, 2019).

2.2.6.4. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli

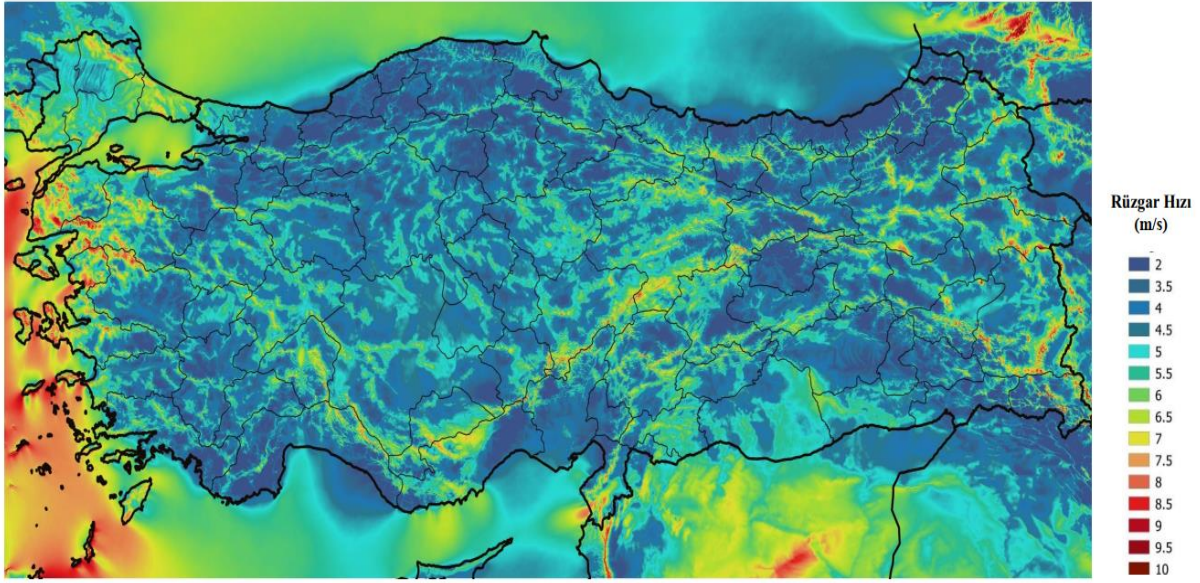
Rüzgâr enerjisi ile alakalı ilk bilimsel çalışma 1960'larda Ankara Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaları yetmişli yıllarda Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ege Üniversitesi ve Tübitak Marmara Araştırma Merkezi'nde yapılan çalışmalar izlemiştir. 1981 senesinin ardından da Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, rüzgâr enerjisi ile ilgili çalışmalar yapmış ve bu kurum 1989 senesinde kendi bünyesinde Rüzgâr Enerjisi Şube Müdürlüğü faaliyete geçirilmiştir. 1992 senesine gelindiğinde, Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin Türkiye Şubesi açılmıştır. Bu gelişmelerden sonra Devlet Meteoroloji İdaresi Genel Müdürlüğü; 1993 senesinden sonra 43 tane meteoroloji merkezinin oluşturduğu rüzgâr

ve coğrafi datalar ile zenginleştirilerek, Türkiye Rüzgâr Atlasını oluşturmuştur. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi, rüzgâr enerjisine yönelik faaliyet ve uygulamaların gelişimini desteklemek ve rüzgâr enerjisinin tanınmasını sağlamak amacıyla çalışmalarını idame ettirmektedir. Bahsi geçen kurum, 1. Ulusal Rüzgâr Enerjisi Sempozyumunu Haziran 1995'te İstanbul'da gerçekleştirmiştir (Hayli, 2001).

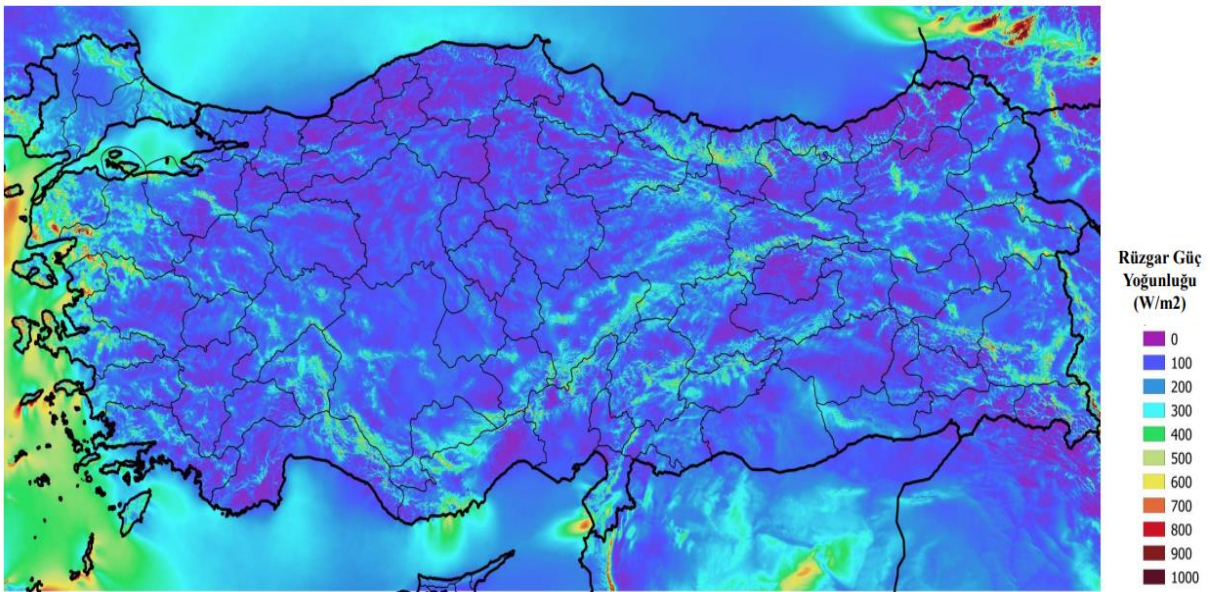
Bir ülkede rüzgâr enerjisinin şartlarının değerlendirilebilmesi için, başlangıçta o ülkenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin iyi analiz edilmesi zorunludur. Ülkemizde de rüzgâr enerji potansiyelini tespit etmek amacıyla rüzgâr hesaplamaları, diğer meteorolojik hesaplamalarla beraber Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) yerine getirilmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü ilk iş olarak Rüzgâr Enerjisi Gözlem İstasyonlarını, saptanmış ve rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak yönünden umut vadeden bölgelerde yapılan incelemeler neticesinde rüzgâr aracılığıyla elde enerji elde etmeye müsait bölgelere kurmuştur. Sonrasında da bu Gözlem İstasyonlarından veri toplama aşamasına geçilmiştir. İlk etapta yapılan ölçme işlemleri genellikle 10 m yükseklikte yapılmıştır. Ölçüm yapılan yükseklik zaman zaman 30 m'yi de bulmuştur. Elde edilen veriler, 10 dakikalık ve birer saatlik zamanlarla toplanmaktadır. Bu veriler yazılım programı aracılığıyla işleminden geçmektedir ve kaydedilmektedir. Bir bölgenin rüzgâr enerji sistemleri için faydalı olup olmadığı; Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün (YEGM) ölçüm noktalarından alınan ortalama rüzgâr değerleri aracılığıyla belirlenmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün enerji elde etme maksatlı ölçüm noktalarının sayısı azdır. Enerji elde amaçlı daha güven verici rüzgâr datalarına sahip olmak amacıyla istasyon sayısının acilen çoğaltılması şarttır. İstasyon sayısının artması demek, Türkiye rüzgâr enerji potansiyel atlasının daha sıklıkla güncellenebileceği manasına gelir. Böylelikle, rüzgâr enerji verimliliği yüksek olan bölgeler ve buralardaki ortalama rüzgâr hızı ve rüzgâr güç yoğunluğu tespit edilir. Tespit edilen bu değerlerle de rüzgâr enerjisi sektörüne yatırım yapmaya niyetli şirketler cesaretlendirilebilir (Şenel ve Koç, 2015).

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlasını 2006 senesinde ülkemizin rüzgâr kaynaklarının nitelikleri ve dağılımı gibi rüzgâr enerjisi açısından önemli verileri ortaya çıkarmak amacıyla ortaya koymuştur. Ülkemizde rüzgâr enerjisi sayesinde elde edilecek elektriğin üretileceği bölgelerin ortaya çıkarılmasına temel olacak datalar, Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlasında verilecek detaylı bilgiler sayesinde ortaya konulmaktadır. Ülkemizin en etkili rüzgâr potansiyeli alanları; dağ tepeleri, açık alanların yakın bölgeleri, yüksek yerlerde bulunan bayırlar ve kıyı şeritleri olduğu söylenebilir. Bu

genelleme senelik ortalama değerler eşliğinde yapılabilir. Ülkemizin batı kıyı şeridi, Antakya'ya yakın dar bir alan ve Marmara denizinin etrafı; açık alanların yakın bölgelerindeki en yüksek senelik ortalama rüzgâr hızı değerine sahiptir. Ülkemizin orta kısımları boyunca, orta şiddeteki rüzgâr hızına sahip geniş alanlar ve rüzgâr gücü yoğunluğu görölmektedir. Türkiye geneli 100 m yükseklikte ortalama rüzgâr hız dağılımı Şekil 4'te ve 100 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu Şekil 5'te verilmiştir (Şenel ve Koç, 2015).



Şekil 2.3. Türkiye geneli 100 m yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hızları haritası



Şekil 2.4. Türkiye geneli 100 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu haritası

Ortalama Rüzgâr Hızları Haritasına göz atıldığında; Çanakkale Boğazı ve Çanakkale Boğazı sahilinin, Karaburun Yarımadası'nın, Türkiye'nin batı ve kuzeybatı sahillerinin ülkemiz açısından çok değerli bir rüzgâr enerjisi verimliliğine sahip olduğu söyleyebiliriz. Bunun yanında rüzgâr enerji potansiyeli bakımından, Anadolu'nun güney kısmında ve kuzey kısmında uzanmış dağ sıralarının tepe bölümlerinin de zengin olduğu söylenebilir. Coğrafi bölge bazında baktığımızda ise rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından en zengin coğrafi bölgelerimiz; Ege Bölgesi, Marmara Bölgesi ve Doğu Akdeniz Bölgesinin kıyı kesimleridir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlasının verilerine göre rüzgâr hızları ise; Marmara Bölgesi, Marmara Bölgesi'nin Karadeniz kıyı bölgeleri, Doğu Akdeniz kıyı bölgelerinde 6,0-7,0 m/sn, iç kesimlerinde 5,5-6,5 m/sn dolaylarında, Batı Akdeniz kıyı kesimlerinde 5,0-6,0 m/sn iç kesimlerde 4,5-5,5 m/sn, Kuzeybatı Ege'de ise kıyı şeridinde 7,0-8,5 m/sn, iç kısımlarında 6,5-7,0 m/sn'dir (Şekil 2). Bir rüzgâr enerjisi istasyonunun iktisadi olarak verimli olması için, bu tesisinin bulunduğu konumdaki rüzgâr hızının 7 m/sn veya 7 m/sn'nin üzerinde olması zorunludur (Aydın, 2011).

Ülkemiz Coğrafi bölgeleri arasında rüzgâr gücü potansiyelleri analiz edildiğinde, bölgelere rüzgâr enerjisi potansiyel sıralaması;

- Marmara Bölgesi
- Ege Bölgesi
- Batı Karadeniz Bölümü
- İç Anadolu Bölgesi
- Güneydoğu Anadolu Bölgesi
- Doğu Anadolu Bölgesi şeklinde yapılabilir (Bektaş, 2013).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nce yapılan rüzgâr hız ölçümlerinden çıkan verilere göre ülkemizin deniz rüzgâr potansiyeli rüzgâr hızının 6.5 m/s'nin üstüne çıktığı bölümlerde 17393.20 MW olarak saptanmıştır. Bir ülkede denize nazaran kara rüzgâr verimliliğinin daha öncelikli olarak değerlendirilmesi gerekir. Bunun sebebi denizin üstüne kurulan enerji istasyonlarının karaya kurulan rüzgâr enerji istasyonlarına göre daha yüksek maliyet gerektirmesidir (Şenel ve Koç, 2015).

2.2.6.5. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüştüren sisteme rüzgâr türbini denir. Bir rüzgâr türbini kule, jeneratör, dişli kutusu, pervane ve elektrik-elektronik elemanlardan müteşekkildir. Rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi rotorda meydana gelir. Rotor milinin dönme hareketi hızlandırılarak gövde kısmındaki jeneratöre iletilir. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi de akümülatörler aracılığıyla doğrudan veya dolaylı olarak şebekeye ulaştırılır (Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Rüzgâr gücü rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı iken rüzgâr hızı ise yükseklikle doğru orantılıdır. Rüzgâr santrali için kurulum yapılacak yerlerde, en az bir yıl boyunca rüzgâr ölçümlerinin yapılması santral kurulmadan önce çok önemlidir. Rüzgârın hızı bölgenin coğrafik özelliklerine ve çevresel faktörlere göre değişkenlik gösterebilmektedir. Rüzgârdan elde edilecek olan enerji, doğal olarak türbinin maruz kaldığı rüzgâr hızına göre değişiklik göstermektedir. Bu sebeple belirli bir bölgede, rüzgârdan üretilecek elektrik enerjisinin planlanan üretim miktarı belirlenirken, yıllık ortalama rüzgâr hızı hesaplanmalıdır (Dilmaç, 2019).

2.2.6.5.1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre şöyle sınıflandırılırlar:

- Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

2.2.6.5.2. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

Bu tür rüzgâr türbinlerde; dönme eksenini rüzgâr yönüne paraleldir. Bu türbinler günümüzde en çok tercih edilen rüzgâr türbin türlerindedir. Kanatların dönme ekseninin rüzgâra dik olması türbinden en iyi verimi elde etmek için gerekli bir durumdur.



Resim 2. 2. Yatay eksenli rüzgâr türbini

Türbin kanatlarının kuleye bağlanma şekli rüzgâr türbinleri için önemli bir durumdur. İki çeşit bağlanma şekli vardır. İlki rüzgâr, kanada önden geliyorsa buna “rüzgârı karşıdan alan”, diğeri ise kulenin ekseninin arka kısmında, yani rüzgârın doğrultusu üzerinde bulunuyorsa buna “rüzgârı arkadan alan” rüzgâr türbini denilir.

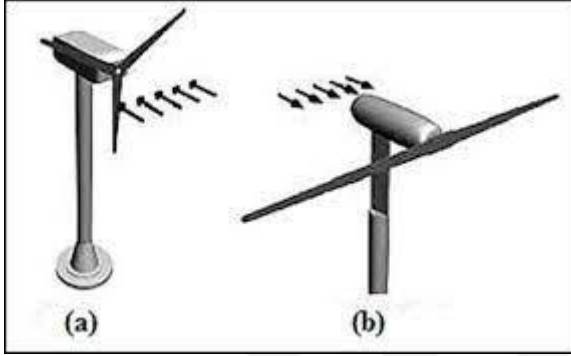
Rüzgârı arkadan alan türbin çeşidi, türbülans olumsuzluklarından sebep çok tercih edilmezler. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinin bazı avantajları da vardır. Bu türbinlerde rotor rüzgârı karşılariken ek bir mekanizmaya ihtiyaç duymaz (Dilmaç, 2019).

2.2.6.5.2.1. Rüzgârı önden alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu tür türbinlerde kanatlar kulenin önünde konumlanacak şekilde yerleştirilir. Rüzgârın etkisini azaltacak herhangi bir etmen bulunmaması sebebiyle rüzgârı arkadan alan türbinlere nispeten daha çok tercih edilen türbin türüdür. Türbin kanatlarının kuleye göre açılı durmasının sebebi kulenin rüzgâra olan etkisini azaltmaktır (Dilmaç, 2019).

2.2.6.5.2. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbinlerde de kanatlar türbin kulesinin arkasında konumlanacak biçimde bağlanır. Bu tür türbinlerde türbinin kendisi kanatlara gelen rüzgârı belli oranda etkilediği için çok tercih edilen bir rüzgâr türbin türü değildir (Dilmaç, 2019).



Şekil 2.5. Rüzgâr etkisine göre türbinler (a) önden rüzgâr alan, (b) arkadan rüzgâr alan

2.2.6.5.3. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri çalışma prensibi olarak kanatları vasıtasıyla, rüzgârla birlikte aldıkları hareketi jeneratöre dikey olarak iletirler. Bahsi geçen iletim yönü rüzgâr akış yönüne göre dikeydir. Bu tip rüzgâr türbinlerde var olan kanatlar iç bükey ve dış bükey şekindedirler. Rüzgâr türbinindeki dönme hareketinin ortaya çıkmasının sebebi kanatların bu özelliklerde olmasıdır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin çalışma prensibinin diğer türlere nazaran basit olduğu söylenebilir fakat bu rüzgâr türbinlerinin, yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre randımanı daha düşüktür.



Resim 2.3. Dikey eksenli rüzgar türbini

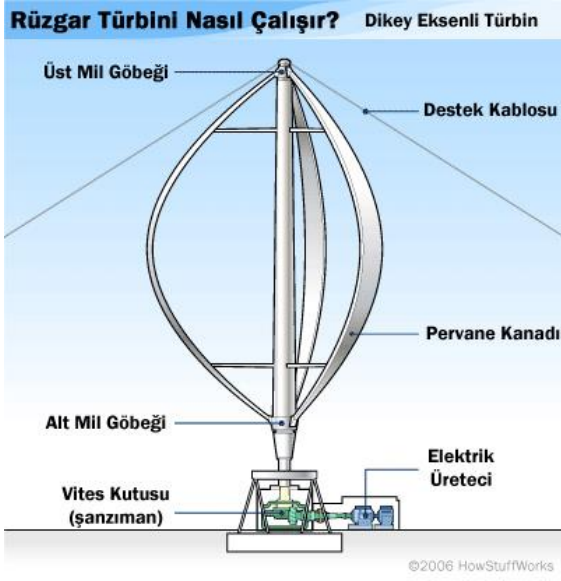
Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin sahip olduğu belirli avantajlar vardır. Bunlardan birisi bakım ve onarımının zor olmamasıdır. Bunun sebebi de türbinin hareketli parçalarının yere yakın olmasıdır. Bu tür türbinlerin bir diğer avantajı da yön bulma mekanizması kullanılmamasıdır (Dilmaç, 2019).

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin dezavantajlarını sayacak olursak; türbin kanatlarının rüzgârla birlikte dönmesi sebebiyle ciddi miktarda enerji kayıpları meydana gelmektedir. Bu sebeple yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin ürettiğini enerjinin yaklaşık yarısı kadar enerji üretebilmektedir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin verimli çalışması için bu türbinlerin yüksek ve düz alanlara kurulumunun yapılması gerekmektedir. Bunun nedeni türbin kanatlarının yere yakın olmasıdır (Dilmaç, 2019).

Dikey eksenli türbin tasarımları arasında en çok Darrieus ve Savonius rüzgâr türbinleri öne çıkmaktadır.

2.2.6.5.3.1. Darrieus dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Fransız mühendis George J.M. Darrieus 1931 yılında bu rüzgâr türbini icat etmiştir. Amerika ve Kanada'da 1970-1980'li yıllarda bu türbinler üzerine geniş çaplı çalışmalar yürütülmüştür. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgâr türbininde, düşey şekilde yerleştirilmiş iki veya üç tane kanat bulunur. Bu rüzgâr türbinlerindeki dönme hareketi türbin kanatların içbükey ve dışbükey yüzleri arasındaki çekme kuvveti farkı sebebiyle oluşur. Darrieus tipi düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin rotorun kalkış torku yüksek olduğu için dışardan bir güç kaynağı kullanılmalıdır. Rüzgâr türbini kulesinin destekleyici kalın kablo halatlarla birlikte sabitlenmesi gerekmektedir (Dilmaç, 2019).



Şekil 2.6. Darrieus dikey eksenli rüzgar türbini

2.2.6.5.3.2. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri

1925 yılında Sigurd J. adındaki Finlandiyalı mühendis Savonius rüzgâr türbinlerini icat etmiştir. Savonius dikey eksenli rüzgâr türbinleri merkezleri birbirine göre simetrik olarak konumlandırılmış, iki yatay disk arasında yerleştirilmiş iki ya da üç adet kepçeye benzer bölmenin birleşimi şeklindedir. Türbine gelen rüzgârın etkisiyle, çarkı oluşturan kepçeye benzer bölmenin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir momentum olmaktadır. Dönme hareketi, aradaki momentum farkı nedeniyle pozitif moment yönünde sağlanır.

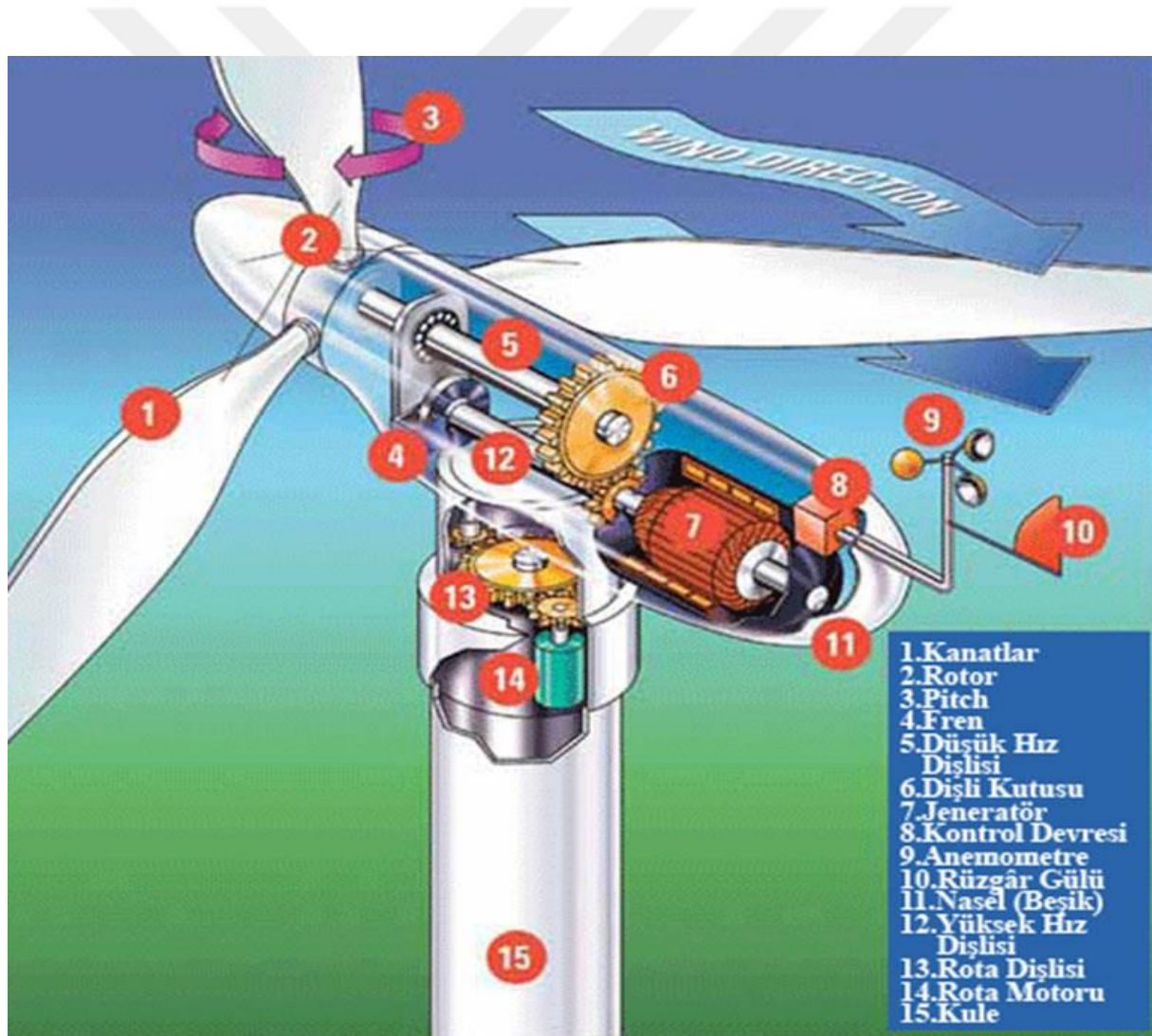


Resim 2.4. Savonius dikey eksenli rüzgar türbini

Savonius tipi rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansı düşük olması sebebiyle elektrik üretiminde çok fazla kullanılmazlar. Genellikle su pompalama, havalandırma ve rüzgâr ölçümlerinde kullanılan anemometre olarak kullanılmaktadırlar. İlave bir destek gerekmeksizin harekete ilk geçişini kendi kendine sağlıyor olması, rüzgâr yönüne bağımlı olmaması ve üretimin yüksek masraflı olmaması diğer tür dikey eksenli rüzgâr türbinlerine göre avantajları olarak belirtilebilir (Dilmaç, 2019).

2.2.6.5.4 Rüzgâr türbini bileşenleri

Rüzgâr türbini bileşenleri aşağıdaki şekilde gibidir.



Şekil 2.7. Rüzgâr Türbini Bileşenleri

Yukarı şekilde görüldüğü üzere rüzgâr türbini şu parçalardan müteşekkildir:

1. Kanatlar
2. Rotor
3. Kanat döndürme mekanizması
4. Fren
5. Düşük hızlı şaft
6. Dişli kutusu
7. Jeneratör
8. Kontrol kutusu
9. Anemometre
10. Rüzgâr gülü
11. Türbin kafa kısmı
12. Yüksek hız şaftı
13. Rota mekanizması
14. Rota motoru
15. Kule

Şimdi bu parçalardan detaylı bir şekilde bahsedeceğiz.

2.2.6.5.4.1. Kanatlar ve rotor:

Rüzgâr türbin kanadının görevi; rüzgârı yakalayıp yakaladığı gücü rotora nakletmektir. Rotor adı verilen birim, elde edilen gücü şaft aracılığıyla dişli kutusuna, dişli kutusundan da jeneratöre ileten en dış parçadır. 600 KW güç üreten yeni tarzda bir rüzgâr türbininin kanat uzunluğu 20 metredir. Bu rüzgâr türbin kanadı uçak kanadına hayli benzer bir biçimde tasarlanmaktadır.

Faydalı enerji, rüzgârdaki kinetik enerjinin rüzgar türbinleri yardımıyla çevrilmesiyle elde edilir. Rüzgâr türbinlerinden azami enerji üretebilmek için bazı etkenlere dikkat edilmesi elzemdir. Bu etkenler; rüzgâr türbininin zemininden en yüksek noktası arasındaki fark, rüzgâr türbin kanadının süpürme alanı, rüzgâr türbininin aerodinamik yapısı, hava yoğunluğu ve rüzgâr türbininin kurulacağı alandaki rüzgar hızı gibi etkenlerdir. Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin azami %59'unun faydalı enerjiye çevrilebiliyor olması, bu etkenlerin en önemlilerinden birisinin de rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısı olduğunu bizlere gösteriyor. (Eker ve Vardar, 2003)

Rüzgâr türbini kanat tasarımı, rüzgâr türbini için fevkalade önemlidir. Bundan dolayı kanat modellenmesi hususunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonunda da farklı kanat profilleri üretilmiştir. Kanat profilleri rüzgâr türbinlerinin performansının yukarı çıkarılması için geliştirilmiştir. NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) adlı kuruluş, bu kanat profilleri için ağırlıklı olarak teorik çalışmalar yürütmüştür. Rüzgâr türbin santrali bir bölgeye inşa edileceği zaman, bölgenin karakteristik nitelikleri iyi incelenerek kanat profilleri arasında hangisi uygun ise o kanat profili olarak tercih edilmelidir. Tercih edilen kanat kadar, kanat profili kadar, rüzgâr türbin kanadının rotora bağlanma açısı da fazlasıyla önem arz eder. Büyük rüzgâr türbinlerinde, türbin kanatları istenildiği gibi ve faydalanma ideal olacak biçimde uygulanabilir. Bununla birlikte küçük çaplı rüzgâr türbinleri söz konusu olduğunda türbin kanadının bağlama açısı doğru tercih edilmelidir.

Rüzgâr türbin kanatlarının seçiminde en verimli kanat yapısını meydana getirmek için kanadın burulmasını, kanat sayısını ve kanat açılarını belirlemek hayati önem taşır (Karadağ, 2009).

Türbin kanat malzemesi için çoğunlukla ağaç, işlenmiş ağaç, karbon fiberle sağlamlaştırılmış plastik, çelik ve alüminyumdan faydalanılmaktadır. Ağaçtan imal edilmiş küçük kanatlar, sürekli ve tekrarlanan yükler altında kırılmadan veya bozulmadan dayanabileceği maksimum gerilme seviyesi açısından iyi düzeydedir. Karbon fiber takviyeli polimer malzeme, büyük rüzgâr türbinlerde kanat malzemesi olarak kullanılır. Fakat bu karbon fiber takviyeli polimer malzemenin masrafı yüksektir. Kanat imalatında çelik malzeme kullanımında ise sürekli ve tekrarlanan yükler altında kırılmadan veya bozulmadan dayanabileceği maksimum gerilme seviyesi açısından aksaklıklar görünür. Çeliğin deforme olmadan veya kırılmadan yüksek gerilmelere veya zorlamalara karşı dayanma yeteneği yüksektir ve çeliğin ağırlığı kronik bir problem meydana getirir. Günümüzde büyük çaplı rüzgâr türbinlerde cam elyaf takviyeli plastik kullanılmaktadır (Karadağ, 2009).

Klasik rüzgâr türbin sistemlerinde, türbin rotorunda mevcut olan dönme hareketi, iletim elemanları aracılığıyla jeneratörle entegre edilmektedir. Dişli kutusu denilen birim, 30-60 d/dk. olan düşük devir sayısını, jeneratörün gereksinimi olan 1500 d/dk. kademelerine yükseltir. Kavrama sistemine nispeten dişli sistemi üstün görülse de direk sistemle mukayese edildiğinde daha kompleks olduğu görülmektedir. Dişli sistemi mutlaka yağlama ve soğutma gibi bakım işlemlerine gereksinim duyar.

Modern rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan önemli bir teknoloji de Direct Drive Sistemi'dir. Bu modern sistemin, mekanik gerilimde azalma elde etmesinin sebebi daha az

döner parça ihtiva etmesidir. Böylelikle teçhizatın teknik ömrü de daha uzamış olur. Bunun yanında bakım ve servis harcamaları düşmekte ve işletme giderleri düşürülmektedir (Karadağ, 2009).



Şekil 2.8. Direct drive sistemi

Direct Drive Sisteminde aracılık edecek çetrefilli dişli düzeneğine muhtaç olunmamaktadır ve rotor göbeği ile jeneratör birbirine doğrudan birleştirilmektedir. Rotor birimi sabit mile monte edilir. Direct Drive Sistemi klasik rüzgâr sistemleriyle mukayese edildiğinde; dişli sistemlerinde ihtiyaç hissedilen çoğu destek noktasına karşılık, direk sistemde iki adet, ağır ağır dönme hareketi yapan bilyeli yatak mevcuttur. Bunun nedeni de direk sistemde düşük hıza ihtiyaç duyulmasıdır.

Direct Drive Sistemde en mühim parça dairesel jeneratör bölümüdür. Rotor göbeğiyle entegre çalışması neticesinde, sürtünme kayıplarını asgariye düşer, sürekli bir enerji akışı meydana gelmektedir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.2. Kanat döndürme mekanizması (pitch):

Türbin kanatları, pitch kontrollü türbinlerde göbeğe yerleşik bir açı ile sabitlenmemişlerdir. Rüzgâr türbininin kanadının, üzgâr hızına bağlı şekilde eksenini etrafında hareket edebilmesinin

sebebi pitch kontrol mekanizmasıdır. Bu tip rüzgâr türbinlerinde, daha etkili bir güç çıkışı sunulmaktadır. Bunun sebebi standart hız üstünde sabit güç üretimi yüzündendir. Bu düzenek ile tüm hızlarda kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir ya da sistemde yıpranmayı azaltmak amacıyla sadece standart hızın üzerinde güç kontrolü amacıyla kullanılabilir. Pitch ayarlı türbinlerden sağlanacak verimlilik artışı, esasen kullanılan pitch sistemlerinin hızına ve duyarlılığına bağlıdır. Bu cihazlar yüksek hızlarda çalıştığı zaman yapısal sorunların meydana gelmesi aşikârdır. Bunun nedeni sahip oldukları pitch sistemleridir. Buna karşılık sürekli gelişen teknoloji ile birlikte bu problemlerin asgariye düştüğü görülmektedir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.3. Fren

Bilim insanları rüzgârdan kazanılan enerjinin, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğunu ortaya koyuyorlar. Buna bağlı olarak, yüksek rüzgâr hızlarında oluşabilecek kuvvetler öngörülebilir değerlerdir. Bahsi geçen kuvvetleri denetim altına alabilme adına fren sistemi kullanılır.

Bilhassa havanın fırtınalı olduğu durumlarda rüzgârı engelleyecek bir panel koyulabilir. O hava durumunda istasyondan faydalanamayacaksa rüzgâr türbinini tamamıyla da durdurulabilir. Bu neticeleri almak gayesiyle farklı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerden biri de mekanik fren mekanizmasıdır. Bu mekanik fren, dişli kutusuna koyulan bir diskten meydana gelmektedir. Fren mekaniğindeki fren diski, çelikten malzemedir. Bu fren diski milin üstüne yerleştirilir. Meydana gelebilecek bozukluklara karşı durdurma sistemini korumak için sıvı basıncı gerekli olmaktadır. Sıvı basınçlı düzenek, türbinin hava akımı frenlerini düzenlemek maksadıyla kullanılır. Sıvı basıncı olmadığı takdirde, fren balataları fren diskini baskı altına alacaktır. Frenleme düzeneği, fren balatası ile disk arasındaki sürtünmenin bir neticesidir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.4. Düşük hızlı şaft:

Düşük hızlı şaft, rüzgâr türbinini rotor bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. 600 KW gücündeki yeni nesil bir rüzgâr türbini bünyesindeki rotoru 19-30 dönüş /dakika (RPM) kadar döner. Bu şaft, hava akımı frenlerini çalıştırabilecek sıvı basınçlı düzenekleri borulara adapte eder (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.5. Dişli kutusu:

Dişli kutusunun sol kısmında düşük hızlı şaft yer alır. Dişli kutusunun sağ tarafında hızlı şaft bulunur ki bu hızlı şaft düşük hızlı şafttan elli kat daha süratlidir. Ana şaft, dişli kutusu ve yüksek hız şaftından müteşekkil güç ünitesi rüzgâr türbini rotorunun dönmesiyle meydana gelen gücü jeneratöre iletir. Rüzgar türbini rotoru tarafından sağlanan düşük devir hızı ve yüksek tork, dişli kutusu aracılığıyla jeneratör için gereken yüksek devir, düşük tork enerjisine dönüştürülür. Çoğunlukla, rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı bulunur (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.6. Jeneratör:

Jeneratör, rüzgâr türbin sistemlerinde mekanik gücü elektrik enerjisine çevirmek için gereken elemandır. İki tür jeneratör vardır ve bunlar; senkron jeneratör ve asenkron jeneratördür. Bu jeneratörlerden senkron jeneratör, ağ frekansında faaliyette bulunur. Bu jeneratör türü ağdan reaktif enerji almazlar buna karşılık maliyetlidirler. Senkron jeneratörün faaliyete başlaması için şebekeye bağlı olması zorunludur. Diğer jeneratör türü olan asenkron jeneratörler sıradan ve maliyetsizdir. Bu jeneratör şebeke frekansına nazaran biraz daha yüksek frekansta eylemde bulunur bununla beraber şebekeden reaktif enerji alırlar (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.7. Kontrol kutusu:

Kontrol kutusu bünyesinde bilgisayar taşır. Bu bilgisayar rüzgâr türbininin koşullarını devamlı izler ve rota mekanizmasını (yaw) kontrol altında tutar. Ayrıca dişli kutusu veya jeneratörün fazla ısınması gibi bir arıza zuhur ettiğinde rüzgâr türbinini kendiliğinden stoplar ve türbin operatörü bilgisayarına modem hattı aracılığı ile ileti gönderir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.8. Anemometre ve rüzgâr gülü:

Anemometre Ve Rüzgâr Gülü rüzgârın hızını ve yönünü tespit etme amaçlı kullanılır. Örnek verecek olursak; türbin devreye girme hızı 5 m/s, kesme hızı 25 m/s olan bir rüzgâr

türbininde, rüzgâr hızı 5 m/s'ye ulaştığı an bu türbini çalıştırma amacıyla rüzgâr türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin ilettiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgârın hızı 25 m/s' değerini geçerse rüzgâr türbinini ve bileşenlerini korumak amaçlı olarak türbinini otomatik bir şekilde bilgisayar durdurur. Rüzgâr gülünden alınan sinyaller rüzgâr türbini elektronik kontrolcüsü aracılığıyla alınır. Bu sinyaller aynı zamanda rota mekanizması (yaw) aracılığıyla rüzgâra karşı türbini çevirme amaçlı kullanılır (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.9. Türbin kafa kısmı:

Rüzgar türbininin dişli kutusunu ve jeneratör de dahil olmak üzere ana bileşenlerini kapsar. Bakım personeli, türbin kulesinin üst kısmına girebilir. Üst kısımda, rüzgâr türbini rotoru, rotor kanatları ve kanat montaj noktası yer alır (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.10. Yüksek hız şaftı:

Yüksek Hız Şaftı elektrik jeneratörünü faaliyete geçirmekle görevlidir. Bu şaft takribi 1.500 devir/dak. (RPM) ile dönmektedir. Ani durumlar için devreye girebilecek mekanik bir disk freni ile beraberdir. Aerodinamik frenlerin arızalı olması kusurlu olması veya türbinin hizmette olduğu durumlarda mekanik fren aktif hale gelir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.11. Rota mekanizması ve motoru (Yaw):

Bu mekanizma rüzgâr gülü aracılığıyla rüzgârın yönünü tayin eden elektronik kontrolcü tarafına yönetilir. Rüzgâr türbin kanatlarının yönünün rüzgâra dik olması rüzgârdan maksimum düzeyde yarar sağlamak için zorunludur. Rüzgârın yönünün değiştiği anda rota mekanizması işlevselleşerek türbin kanatlarını optimum pozisyona getirir. Bu durum çoğunlukla birkaç derecelik açı değişmesi ile meydana gelebilir. Bahsi geçen durum rota motorunun çevirme etkisiyle meydana gelir. Bazı olumsuz hava şartlarında, yüksek rüzgâr hızı ortaya çıktığında kanatların dönmesinin ağırlaştırılması hatta durması mecburiyet haline gelebilir. Böyle bir durumda rota mekanizması ters yönde çalıştırılabilir.

Modern rüzgâr türbin sistemlerinde, yaw mekanizması hidolik fren sistemiyle beraber monte edilmektedir. Hidrolik fren, hem rotoru müsait pozisyon bulduğunda rotoru sabitler hem de rotor dönmesindeki pürüzleri giderir (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.4.12. Kule:

Bu birim, rüzgâr türbininin kafa bölümünü ve rotoru bünyesinde taşır. Rüzgârların hızları yerden yükseldikçe çoğaldığı için çoğunlukla kulenin yerden yüksek olması avantajlı bir durumdur. Bununla birlikte kule ağırlığının dolayısıyla maliyetinin artması kule yüksekliğini mecburen kısıtlamaktadır. Yaklaşık olarak; rotorun ağırlığı 3-26 ton, gövdenin ağırlığı 10-56 ton ve kulenin ağırlığı 12-88 ton civarındadır. Spesifik olarak 600 KW'lık yeni nesil bir rüzgar türbininin kulesi 40 ila 60 m yüksekliği arasındadır. Bu yükseklik değeri yaklaşık 20 katlı bir binanın yüksekliğine tekabül eder. Kuleler şeklen olarak tüp veya kafes biçiminde olurlar. Tüp şeklindeki kulelerde gerekli durumlarda bir merdivenle iç kısımdan türbinin tepe noktasına çıkmak zor olmadığı için bu rüzgâr türbin istasyonunda çalışanlar için avantajlı bir durumdur. Kafes tipi kulelerin cazip tarafı maliyetlerinin düşük olmasıdır (Karadağ, 2009).

2.2.6.5.5. Rüzgâr türbin kanatları

Kanat, rüzgârdaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek şafta aktaran rüzgâr türbin birimidir. Rüzgâr türbin kanatları yapı olarak ve aerodinamik bakımdan üç bölümden meydana gelir. Bu bölümler; kök bölge, orta bölge ve uç bölgedir. Kanadın kök bölgesi, kanattaki en çok zorlanmayla karşı karşıya kalan bölümdür. Bu bölge kanat profili ile kanat bağlantı noktası arasında kalan bölümdür. Bu bölümün başlangıç kısmında kanat, daire şeklinde bir kesit alanına sahiptir. Kanadın orta bölgesi ise, güç üretiminde en kritik bölümdür. Bu bölümün modellenmesinde aerodinamik kriterler dikkate alınmaktadır. Uç bölge de türbin kanadının zarif bir tasarıma sahip bölgesidir. Bu bölge güç üretimi için önem taşıyan bir bölümdür. Yeni nesil rüzgâr türbinlerinde kanat, değişik ölçülerde halka kesitli bölümler ve aerofoil kesitli bölümlerden müteşekkildir. Kanadın şekli, kök kısmından uç kısmına doğru dairesel kesitten büyük aerofoil kesite, sonrasında ise küçük aerofoil kesite doğru farklılık arz etmektedir (Şenel, 2012)

2.2.6.5.5.1. Kanat profili (Aerofoil)

Rüzgâr türbini pervane kanatlarında kullanılan aerofoiller, bir giriş çizgisi üzerinde ve altında belirlenmiş iki özel eğrinin birleşiminden meydana gelmektedir. Kamburluk kavramı bu eğrilerden üst eğrinin eğrilik yarıçapının alt eğrininkinden küçük olmasıdır. Pervanenin her iki yüzeyinde değişik akış hızlarının meydana gelmesi kamburluk sayesinde olmaktadır. Kaldırma veya taşıma kuvveti olarak isimlendirilen kuvvet, kanat yüzeylerindeki farklı akış hızları, kanadın üst yüzeyi ve alt yüzeyi arasında basınç farkı meydana getirmesiyle oluşur. Rüzgâr türbininden enerji oluşmasını sağlayan kuvvet, bu kaldırma kuvvetidir. Şekil 4'te, havanın kanat profili civarındaki hareketi ve kaldırma kuvvetinin meydana gelmesi şematize edilmiştir (Şenel, 2012).



Şekil 2.9. Havanın aerofoil etrafındaki hareketi ve kaldırma kuvveti oluşumu

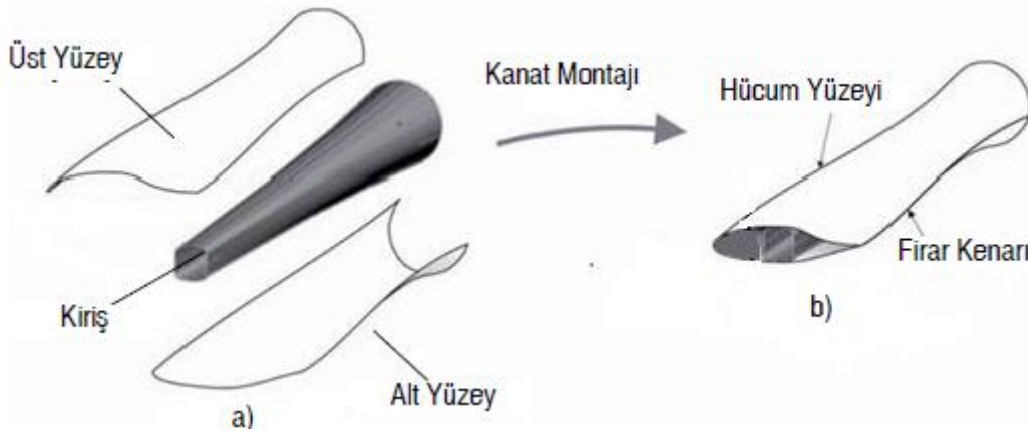
Rüzgâr türbinlerinin modellenmesinde; Delft Teknoloji Üniversitesinin ürettiği DU, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarının ürettiği SERI, İsveç Havacılık Araştırmaları Kurumunun ürettiği FFA-W, Althaus ve Wortmann tarafından tasarlanan FX, Danimarka Riso Ulusal Laboratuvarının ürettiği RISO ve ABD Ulusal Havacılık ve Danışma Komitesi tarafından geliştirilen NACA aerofoilleri kullanılmaktadır. Bahsedilen kanat profillerinden günümüzde en çok tercih edileni NACA'dır (Kaya & Koç, 2015).

NACA kanat profilleri genellikle 4 veya 5 basamaklı sayılarla ifade edilir. NACA 22112 ve NACA4415 şeklinde ifade edilir. Buradaki her sayı kanat profilleri için yapısal bir mana

içerir. Bu basamaklardan birinci sayı, maksimum kamburluk yüzdesi oranını (f) ikinci sayı, on katının oran olarak en yüksek kamburluğun ön kenarından itibaren yerini; üçüncü ve dördüncü sayı ise yüzde olarak azami kalınlık oranını ifade etmektedir (Şenel, 2012).

2.2.6.5.2 Kanat bileşenleri

Günümüzde sıkça tercih edilen çağdaş rüzgâr türbinlerinde, pervane kanadı iki ana bileşenden oluşmaktadır: dış yüzey ve kiriş. Bu bileşenlerden dış yüzey, kanat veya pervanenin aerodinamik şeklini oluşturur ve üst yüzey ile alt yüzey olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Kiriş, pervanenin uygulanan yüklere karşı direnç göstermesini sağlar. Şekil 6'da, kanadı meydana getiren parçalar ve kanat montajı, şematik bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 2.10. Rüzgâr türbin kanat bileşenleri ve montajı

Kanat kirişi, dış yüzeyden aldığı kuvvetleri merkezine ileten bir bileşen olup, kanadın dayanıklılığını artırmak için kullanılmaktadır. Kirişteki dikey eleman, kiriş perdesi; yatay eleman ise kiriş başlığı olarak adlandırılmaktadır. Kanat kirişi, kanadın rotora bağlandığı noktaya yakın bir yerden başlayarak uç kısmına kadar uzanmaktadır. Bu yapı, kanadın kendi ağırlığından kaynaklanan kuvvetlerle birlikte rüzgâr etkisiyle oluşan yüklerden de etkilenir (Kaya ve Koç, 2015).

2.2.6.5.5.3. Kanat tasarımında kullanılan malzemeler

Rüzgâr türbinindeki kanadının modellenmesinde en kritik parametrelerden birisi de kanadın yapılacağı malzemedir. Rüzgâr türbin kanadının yapılacağı malzemelerinin;

- Kanada etki edecek yüklere mukavemet gösterecek nitelikte olması,
- Kanada olumsuz yönde etki eden yerçekimi kuvvetlerinin azaltılması amacıyla düşük öz kütleye sahip olması,
- Yorulma ömrünün uzun süre olması, gereklidir.

Rüzgâr türbini pervanelerinde genellikle çelik, alüminyum, cam veya karbon takviyeli kompozit materyaller ile ahşap tercih edilmektedir. Bugünlerde küçük boyutlu rüzgâr türbini pervanelerinde çelik ve alüminyum, modern rüzgâr türbini pervanelerinde ise cam elyafı ve karbon elyafı takviyeli kompozitler sıkça tercih edilmektedir.

İki ya da daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde birleşimi kompozit malzeme olarak ifade edilir. Yapıyı meydana getiren materyallerin kompozit yapıdan önce sahip olmadığı özelliklerin, bu materyalleri birleştirerek kazanılması kompozit malzemelerin üretilmesindeki temel amaçtır. Kompozit malzemeler, takviye ve matris malzemesi olacak şekilde en az iki farklı malzemenin bir araya gelmesinden meydana gelir. Yapıya uygulanan yükleri taşıyan takviye malzemeler, etrafında yer alan matris yapı tarafından bir arada tutulur, desteklenir ve dış etkilere karşı korunur.

Kompozit materyallerde, takviye elemanı olarak genellikle elyaf malzeme kullanılır. Rüzgâr türbin kanatlarında çoğunlukla cam elyaf kullanılır. Bunun nedeni maliyetinin düşük olması ve istenilen nitelikleri karşılamaıdır. Karbon elyaf, tek başına ya da karbon elyaf ve cam elyaf karışımı hibrit yapı biçiminde, büyük boyutlu rüzgâr türbinlerinde tercih edilmeye başlanmıştır.

Kompozit materyallerde, yük taşıyan takviye elemanlarının görevini yerine getirebilmesi için matris malzemelerinden faydalanılır; matris malzeme ise takviye malzemesine göre daha düşük dayanıklılığa sahiptir ve esnektir. Rüzgâr türbini pervanelerinde, üstün mekanik özellikleri, korozyon direnci, elektriksel nitelikleri ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı gibi avantajları sebebiyle epoksi reçineler kullanılmaktadır.

Yeni nesil rüzgâr türbin kanatlarında farklı olarak sandviç kompozitler de tercih edilmektedir. Sandviç kompozitler kanadın eğilme direncini ve sertliğini fazlalaştırmaktadır. Bu durum sandviç kompozitlerin yapısında matris ve takviye malzemelerinin yanında, ara (core)

malzemelerin de kullanılmasından kaynaklanır. Sandviç tipi yapılarda ara malzeme olarak balsa ağacı, PET köpük veya PVC tercih edilmektedir.

ağdaş rüzgâr türbini pervanelerinde, kanat kök bölgesi ve kanat dış yüzeyi cam elyafı veya karbon elyafı takviyeli epoksi kompozit materyallerden, iç destek yapısı olarak bilinen kiriş perdesi ve kiriş başlığı ise sandviç kompozit materyallerden üretilmektedir. Kanatta tercih edilen sandviç kompozit materyallerinde, en üst katmandan en alt katmana doğru sırasıyla, cam veya karbon elyaf takviyeli kompozit, ara malzeme (balsa ağacı veya köpük) ve tekrar cam veya karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme yer almaktadır. Buna ek olarak, kanadın en dış yüzeyinde poliüretan boya veya jel kaplama tabakası yer almaktadır (Kaya ve Koç, 2015).

2.2.6.5.5.4. Kanat imalatı

Kanadın üretimi için önce bir kanat kalıbı oluşturulur ve ardından aşağıdaki üretim tekniklerinden biri kullanılarak kanadın dış yapısı (kabuk yapısı) üretilir. Dış yapı ile destek yapısı (kiriş elemanı), uyumlu yapıştırıcılar aracılığıyla tümleşik hale getirilir ve böylece kanadın üretimi tamamlanmış olur. Rüzgâr türbini kanadı üretiminde başlangıçta açık kalıp yöntemi kullanılırken, yapılan araştırmalar neticesinde aşağıda kısaca açıklanan el yatırma, vakum torbalama ve vakum infüzyon teknikleri icat edilmiştir (Kaya ve Koç, 2015).

2.2.6.5.5.5. El yatırma yöntemi

Kompozit malzemelerin temel üretim tekniklerinden biri olan el yatırma yöntemi, takviye malzemesinin kalıplara serilip, üzerine sıvı reçine uygulanarak yapılır. El yatırma yönteminde ilk iş; hazır edilen kanat kalıbına kaplama tabakası sprey tabancası, fırça ya da rulo yöntemi ile gerçekleştirilir. Kaplama tabakası yeterince sertleştikten sonra, üzerine takviye malzemesi yerleştirilir ve takviye malzemesinin üstüne reçine uygulanır. Sonrasında da bir rulo ile reçinenin takviye malzemesi etrafına tamamen dağılması ve reçinenin takviye tabakasına daha iyi yayılması sağlanır. Reçine kafi sertliğe erişene kadar rulo ile uygulama işlemine devam edilir. Bu işlem takviye elemanı ve reçine arasında boşluk kalmaması amacıyla gerçekleştirilir. Kanat üst dış yapısı ve alt dış yapıları bu işlemin yinelenmesiyle oluşturulur. Kanat üretiminde çalışanların alerjik hastalıklara maruz kalması el yatırma yönteminin negatif

yanlarından birisidir. El yatırma yönteminin tercih edildiği çalışma alanlarında ilerlemiş havalandırma düzeneklerine muhtaç olunmasının nedeni budur. İmal edilecek ürünün kalitesinin çalışma ortamındaki kişilerin yeteneklerine bağlı olması bu yöntemin diğer bir olumsuz yönüdür (Kaya ve Koç, 2015).

2.2.6.5.5.6. Vakum torbalama yöntemi

Bu teknolojide, el yatırma yönteminden değişik olarak, reçine kalıp yüzeyine yayıldıktan sonra, reçine reaksiyonu hızlanıp jel kıvamına ulaşmadan önce, kalıp iç kısmı ısıya ve basınca dayanıklı vakum torbası ile örtülerek sızdırmazlık sağlanır. Sonrasında sisteme vakum yapılır. El yatırma metoduyla mamülden alınamayan hava kabarcıklarının vakum aracılığıyla giderilmesi ve reçinenin lifler arasına daha basit bir şekilde sızması bu vakumlama işleminin amacıdır. Ürünün tamamen katılaşıncaya kadar vakum işlemi devam ettirmenin amacı bu metod aracılığıyla nitelikli bir ürün elde etmek içindir. Bu işlem icra edilirken, Sağlık açısından tehlikeli olabilecek uçucu bileşenlerin solunmasını önleyen kapalı bir alan meydana getirilmektedir. Vakum torbalama yönteminin tek olumsuz yanı imalatının yüksek maliyetlere sebep olmasıdır (Kaya ve Koç, 2015).

2.2.6.5.5.7. Vakum infüzyon yöntemi

İnfüzyon denilen işlem reçinenin kalıba aktarılmasıdır. Bu yöntemin temel ilkesi, vakum altına yerleştirilen kuru takviye ve dolgu malzemelerinin, oluşan basınç farkından faydalanılarak sıvı reçineyle doyurulmasıdır. Vakum infüzyon yönteminin en etkili niteliği, takviye elemanının doğru bir biçimde reçine ile kaplanması neticesinde ürünün içindeki hava boşluklarının el yatırması yönteminden daha iyi giderilmesidir.

Literatürde, vakum altında reçine infüzyonu prensibine dayanan ve farklı adlarla anılan çeşitli teknikler mevcuttur. Bu yöntemler arasında ufak tefek farklılıklar olmasının yanında, bu işlemlerin genel yöntemi ve basamakları aşağıda verilmiştir.

- Takviye malzemeleri, bir kalıbın içine yerleştirilir.
- Yerleştirilen takviye malzemesi, vakum torbalama tekniğinde olduğu gibi plastik bir vakum filmi ve sızdırmazlık materyali kullanılarak dış ortamdan ayrılır.
- İzole edilen alandaki hava, bir vakum pompası ile çekilerek boşaltılır.
- İzole edilen alana reçine iletilerek takviye malzemesinin reçineyle doygunluğu sağlanır.

- Takviye malzemesi reçineyle doygun hale geldiğinde, reçine girişı kapatılır ve reçinenin sertleşmesi için beklemeğe geçilir.

Kalıp üretim teknolojileri önemli ölçüde ilerlemesi vakum infüzyon yönteminin rüzgâr türbin kanatlarında tercih edilmeye başlanması sayesinde olmuştur. Kendiliğinden ısınabilen, vakum girişleri önceden hazırlanmış ve izolasyon uygulanarak ısı kayıplarının en düşük seviyeye indirildiği kalıplar tasarlanmış, böylece ürün kalitesinin daha da iyileştirilmesi sağlanmıştır. Vakum torbalama metoduyla daha ileri seviye mekanik özelliklere sahip rüzgâr türbin kanatları üretilebilmesine rağmen, daha ucuz olması sebebiyle günümüzde vakum infüzyon yöntemi daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarının boyutları büyüdükçe, vakum torbalama yöntemiyle kanat üreten firmaların vakum infüzyon yöntemini seçmeleri daha olası hale gelmektedir (Kaya ve Koç, 2015).



3. MATERYAL VE METOT

Çalışmada Q Blade yazılımı aracılığıyla, beş basamaklı NACA profilleri olan NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 serisi türbin kanat profillerinin tasarımı ve mukayeseli verimlilik analizi yapılmıştır. Verimlilik analizi yapılırken çevre şartları olarak 1×10^6 sabit Re , 0^0-20^0 hücum açıları aralığı, sabit hava yoğunluğu tercih edilmiştir. 3kW güçte ve 2m kanat uzunluğuna sahip rüzgâr türbin modeli, türbin yapısı olarak kabul edilmiştir.

3.1. Q Blade Yazılımı

Dr.-Ing. David Marten; kendi önderliğindeki çalışma grubu ile birlikte, Berlin Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği ve Taşıma Sistemleri Fakültesi'nde, Q-Blade yazılımını 2010 yılında bilim dünyasına sunmuştur. Bu yazılım kullanımı ücretli olmayan C++ tabanlı bir programdır (Qblade, 2024).

Q-Blade yazılımı, rüzgâr türbinlerinin aero-servo-hidro-elastik modellenmesi amacıyla gereksinim duyulacak kanat profillerinin modellenmesi, verimlilik analizlerinin modellenmesi ve bu modellemeler sonucunda sahip olunan verilerin türbin tasarımına adapte edilmesi gibi önemli işlevleri yerine getirebilir (Doğan, 2014).

Q-Blade yazılımının sahibi, bu yazılımda kullanılan teknikleri anlatan ve kanat profilleri tasarlamak için uygulanabilecek farklı yöntemleri izah eden bir doktora çalışmasını 2020 yılında ortaya koymuştur (Marten 2020).

3.2. Kanat Elemanı Momentum Teorisi

Q-Blade programında Kanat Elemanı Momentum (BEM) teorisi, türbin kanatlarında indüklenen hızları bulgulamak ve türbin kanat profillerinin niteliklerini ortaya koymak amacıyla kullanılan en bilindik yöntemlerden birisidir. Bu teori, Rankine ve Froude'un 1878'de ortaya koyduğu öncü pervane çalışması tarafından önerilen aktüatör disk teorisinin

iyileştirilmiş şeklidir. Bu teori ‘kanat elemanı teorisi’ ile ‘momentum teorisinin’ bir araya gelmesinden oluşur (Mahmuddin, 2017).

Kanat elemanı teorisi, türbin kanatlarının, etraftaki birimlerden kendi başına hareket edebilen ve yerel akış şartlarına göre aerodinamik kuvvet bileşenleri hesaplanabilen iki boyutlu kanat profilleri şeklinde, aerodinamik çalışan küçük birimlere bölünebileceğini öngören bir teoridir. Meydana gelen bu küçük birimlere uygulanan eksensel ve itki kuvvetleri kanat açıklığı boyunca toplanır, böylelikle kanat türbini üzerine uygulanmış toplam kuvvet ve momentler hesaplanmış olur. Bu yaklaşımla eksensel (F) ve itki (T) kuvvetleri sırasıyla şu şekilde belirtilir:

$$dF = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot B \cdot d \cdot W^2 \cdot dr [C_l \cos\phi + C_d \sin\phi] \quad (1)$$

$$dT = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot B \cdot d \cdot W^2 \cdot r \cdot dr [C_l \sin\phi - C_d \cos\phi] \quad (2)$$

Bu formüllerde hava yoğunluğu ρ , kanat sayısı B, kanat profili veter uzunluğu d, bileşke hızı W, elemanın hub’dan (bağlantı merkezinden) uzaklığı r, kaldırma katsayısı C_l , sürüklenme katsayısı C_d , ve akış açısı ϕ sembolleri ile temsil edilir (Moriarty & Hansen, 2005).

Kanat Elemanı Momentum teorisinin diğer kısmı olan momentum teorisi, rotor düzeyindeki basınç veya momentum kaybının, rotor düzeyinden geçen hava akımının kanat birimleri üzerinde yaptığı işten kaynaklandığını öngörür. Bu teori kullanarak, eksensel ve teğet yönlere akışta yitirilen momentumdan indüklenen hızlar tespit edilebilir. Momentum teorisi ile kanatların dönme hareketi yapmadan güç üretebileceği farz edildiğinde, eksensel kuvvet şöyle ifade edilir:

$$dF = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (3)$$

Modele rotasyon eklendiğinde, itki (T) kuvveti şöyle ifade edilir:

$$dT = 4 \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \rho \cdot V \cdot \Omega \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \quad (4)$$

Burada a eksensel indüksiyon faktörü şöyle gösterilir:

$$a = \frac{V - V_T}{V} \quad (5)$$

a' burada açısal indüksiyon faktörüdür ve şöyle ifade edilir:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (6)$$

Bu denklemlerde aşağı yönde rüzgâr hızı V , yukarı yönde rüzgâr hızı VT , kanat dönüş hızı ω ve açısal hız Ω ifade edilerek açıklanmaktadır.

Kanat elemanı teorisi ve momentum teorisi teorilerinin birleşimi ile kanat elemanı momentum teorisi (BEM) meydana gelir. Bu teori aerodinamik kuvvetler ve rotor etrafında indüklenen hızları değerlendirmek için yineleyen bir süreç oluşturur. Bunun için momentum teorisi ve kanat elemanı teorisinden elde edilen denklemler bir araya geldiğinde;

$$8. a. (1 - a). V^2. \pi. r = B. d. W^2. [C_l \cos\phi + C_d \sin\phi] \quad (7)$$

$$8. a'. (1 - a). \rho. V. \Omega. \pi. r^3 = B. d. W^2. [C_l \sin\phi - C_d \cos\phi] \quad (8)$$

Kanat Elemanı Momentum teorisinin kritik iki denklemi meydana gelir (Mahmuddin, 2017).

3.2. Aerodinamik Kriterleri

Rüzgâr türbinine gelen hava akımı, türbin kanadının üst ve alt kısmından geçerek bölünür ve türbin kanadının arka kenarında kanattan ayrılır. Daniel Bernoulli 1738 senesinde bu hava akımının türbin kanadında oluşturduğu kuvvetleri açıklamıştır. Bernoulli'nin kendi ismini verdiği ilkeye göre kanadın üzerindeki hava basıncı, kanadın üst kısmından akan havanın hızlanıp esnemesiyle azalır. Bununla birlikte kanadın alt kısmındaki havanın hızı ve basıncı kısmen aynı kalır. Bunun sebebi de kanadın alt kısmından akan havanın daha düz bir şekilde hareket etmesidir. Bernoulli denklemi akan havanın dönüşümünü ifade etmede kullanılır. Bernoulli denklemi şu şekildedir;

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \text{sabit} \quad (9)$$

Bu formülde; P basıncı, ρ hava yoğunluğunu, V rüzgâr hızını temsil etmektedir (Yükselen, 2012).

Rüzgâr türbin kanatlarının alt kısmında yüksek, üst kısmında yüksek basınç hava akımı tesiri ile meydana gelir. Hava akımı yüksek basınçtan alçak basınca doğru olacağı için kanatlarda bir kaldırma kuvveti oluşacaktır ve kanadın alt ve üst kısmı arasında meydana gelecek basınç

farkı yükseldikçe de bu kaldırma kuvvetinin değeri artacaktır. Kaldırma kuvveti denklemi şu şekildedir;

$$- \quad (10)$$

Rüzgâr türbinlerinde kanatlarının hareketi ile hareket doğrultusunda ve hareket yönünün tersi yönünde başka bir kuvvet meydana gelir. Bu kuvvet sürüklenme kuvveti olarak ifade edilir. Sürüklenme kuvveti denklemi şu şekildedir;

$$- \quad (11)$$

Bir rüzgâr türbininin kanat verimliliğini kanadın kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı oranı belirginleştirir. Kaldırma kuvvetinin azami, sürüklenme kuvvetinin de asgari olduğu açı kanat verimliliğinin en yüksek olduğu açıdır. Bahsi geçen açı rüzgâr türbinleri için tasarım açısı olarak kabul edilir (Yükselen, 2012).

Reynolds sayısı, akışkanlar mekaniğinde kullanılan katsayıların en önemlilerinden birisidir. (Re) ile gösterilen Reynolds sayısı boyutsuz bir sayı olan akışkan maddenin atalet kuvvetinin (ρV) viskozite kuvvetine (μ/d) olan oranıdır ve Osborne Reynolds tarafından 1883 yılında tanımlanmıştır.

$$- \quad (12)$$

Bu formülde; V havanın hızını, μ havanın dinamik viskozitesini, ρ havanın yoğunluğunu ve d de kanat veter uzunluğunu temsil eder (Cengiz, 2010).

Kanat profili aerodinamik analizi yapılırken önemli kriterlerden bir tanesi de Mach sayısıdır. Türbin kanadına çarpan rüzgârın hızının, bulunduğu ortamdaki ses hızına oranını ifade eden bu sayı ismini Avusturyalı fizikçi Ernst Mach'tan alır. Çevre şartları olarak deniz seviyesinde 15°C hava sıcaklığında ve 1 atm basınç altında 1 Mach=340 m/s olarak ifade edilir. Deniz

seviyesinden yüksek yerlere çıkıldıkça hava sıcaklığı da düşer, buna paralel olarak ses hızı da yavaşlar. Bu sebeple bir kütle için aynı hız değeri için yüksek rakımdaki sahip olduğu Mach sayısı, deniz seviyesindeki Mach sayısına göre daha yüksektir. Mach sayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$— (13)$$

Subsonik, transonik ve süpersonik hava akımları rüzgâr türbin kanat profili üzerinde meydana gelebilmektedir. Bu hava akımı türleri; 0,8 Mach sayısı veya 273 m/sn altındaki akımlar için Subsonic (sesaltı), 0,8 ile 1,2 Mach veya 273-409 m/sn aralığındaki hava akımları için Transonik, 1,2 ile 5 Mach veya 410-1702 m/sn aralığındaki hava akımları için Süpersonik biçiminde tasnif edilir (Pitts, Nielsen, Kaattari, 1957).

N-Crit katsayısı kritik yükseltme faktörünün kısaltması olarak kullanılır. Bu değer akışın bozulmalara karşı duyarlılığını belirler ve yüksek bir N-Crit değeri daha laminer akışa karşılık gelirken, düşük N-Crit değeri türbülans akışı karşılar. N-Crit katsayısının yüksek değeri, laminer akışın uzamasını en üst düzeye çıkararak bozulmayı belirli rüzgâr hızı ve ortam koşullarında asgariye indirir. Düşük N-Crit koşullarında, yüksek derecede türbülansa sahip akış öngörülerek yüzey sürtünme direncinin yükselmesi sağlanır. Q-Blade programı bu belirsizlik katsayılarının simülasyonlarını e^N metoduyla yapar. En fazla N-Crit katsayısını 9 (min. bozulma), en az N-Crit katsayısını(maks. bozulma) ise 0 olarak ifade edebilmektedir (Caboni, Minisci, Riccardi, 2018).

Türbin kanat aerodinamiğindeki önemli terimlerden birisi de uç hız oranıdır. Bu uç hız oranı (tip speed ratio-TSR kanadın ucunun teğetsel hızının gelen rüzgârın hızına oranını ifade eder. Ayrıca bu oran türbinin arka kısmında girdap halkalarının ne kadar baskın bir şekilde paketlendiğini açıklayan bir etkidir (Marten 2020).

Üç kanatlı pervane prototipinin yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılması sebebiyle rüzgar türbininden azami verim alınması için uç-hız oranının takribi 5-8 aralığında bir değerlerde olması gerekir (Emniyetli, 2007). Uç hız oranı λ sembolü ile gösterilir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$— (14)$$

Bu denklemde kanat açısasal hızı ω , rüzgâr hızı V ve kanat yarıçapı r ile temsil edilmektedir (Çil, 2022).

Güç katsayısı, bir rüzgâr türbin kanadının bulunduğu çevredeki rüzgâr gücünden ne kadar üretkenlik sağlayabileceğini belirleyen kritik parametrelerden birisidir. Güç katsayısının değerini türbin kanatların kazandığı rüzgâr gücünün, ortamda bulunan toplam rüzgâr gücüne oranı belirler. Güç katsayısının denklemi aşağıda ifade edilmiştir;

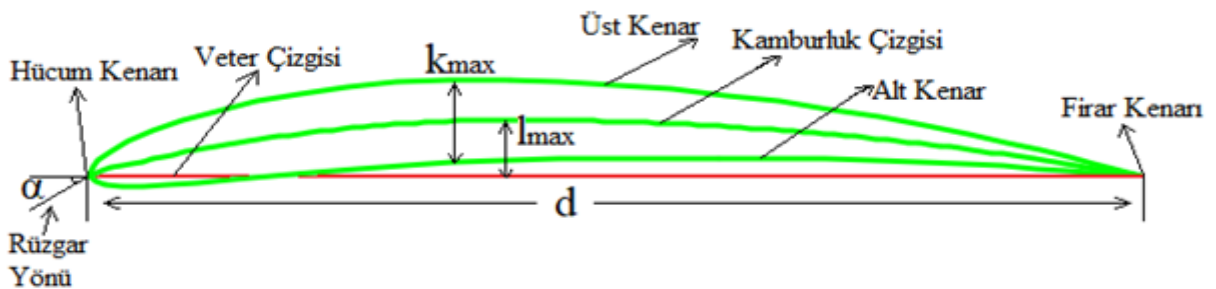
$$C_p = \frac{N_k}{\rho V^3 r^2} \quad (15)$$

Bu formülde, güç katsayısı C_p , rüzgâr hızı V (m/s), havanın yoğunluğu ρ (kg/m^3), kanat yarıçapı r (m) ve kanatların rüzgârdan sağladığı güç N_k olarak temsil edilir (Şenel ve Koç, 2014).

3.4. Kanat Profili(Airfoil) Yapısı

Rüzgâr türbinleri için birçok farklı kanat profili tasarlanırsa da günümüzde en yaygın olarak kullanılan kanat profilleri NACA(National Advisory Committee For Aeronautics/Ulusal Havacılık Danışma Komitesi) serisidir (Kaya ve Koç, 2015).

NACA kanat profilleri altı farklı grup olacak şekilde 4 basamaklı, 5 basamaklı, 1 serisi, 6 serisi, 7 serisi ve 8 serisi olmak üzere kategorize edilebilir. Bu çalışmada 5 basamaklı dokuz farklı NACA serisi kanat profilleri mukayese edilmiştir. NACA, kanat profilleri belirli bir kalınlığa ve ortalama çizgiye göre ifade edilmektedir. Örneğin NACA 23012 kanat profilinin maksimum kamburluk oranı %2, maksimum kamburluk noktasının hücum kenarına uzaklığının veter uzunluğuna oranı % 30 ve kanat profilinin maksimum kalınlığının veter uzunluğuna oranı % 12 'tir (Gudmundsson, 2014).



Şekil 3.1. Kanat profili geometrisi

Rüzgâr türbini kanat profili genel olarak üst kenar ve alt kenar olmak üzere iki eğriden müteşekkildir. Kanat profilinin hava akımını aldığı hücum kenarı ile akımın profili terk ettiği firar kenarı ucu arasındaki mesafeye veter uzunluğu (chord) denilmektedir. Bu mesafe “d” ile gösterilir. Hücum açısı, rüzgâr vektörlerinin veter hattı (kiriş) ile yaptığı açıya denir. Bu açı da “ α ” ile ifade edilir. Kanat profilinin üst ve alt kenarının ortasından geçerek hücum kenarı ile firar kenarını birleştiren eğri kamburluk çizgisi dolarak ifade edilir. Kamburluk çizgisi ile veter hattı arasındaki mesafe kanadın kamburluğu olarak ifade edilir ve “ l_{max} ” kamburluğun maksimum olduğu noktaya karşılık gelmektedir. Kanat profilinin alt ve üst kenarları arasındaki dikey uzunluk kanat kesit kalınlığı olarak adlandırılır ve kesit kalınlığının maksimum olduğu nokta “ k_{max} ” ile ifade edilir (Yükselen 2012). NACA abbcc” yapısında “a” yı temsil eden kamburluk oranı denkleminin aşağıdaki gibidir;

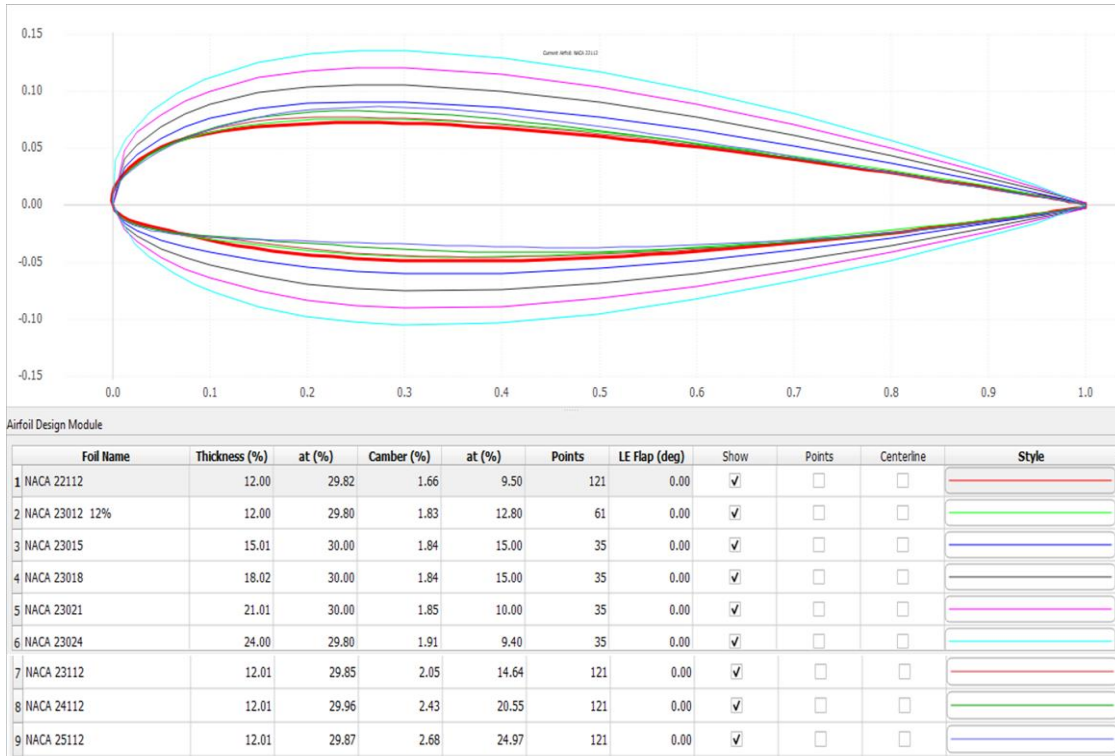
$$\frac{a}{d} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{a}{d}} \right)^2 \quad (16)$$

Aynı şekilde “NACA abbcc” yapısında “c” yi temsil eden kalınlık oranı ise aşağıdaki gibidir;

$$\frac{c}{d} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{c}{d}} \right)^2 \quad (17)$$

3.5. Tasarım ve Analiz

Bu çalışma NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profillerinin aynı durum şartlarındaki aerodinamik performanslarını inceleyecektir. Q-Blade programıyla gerçekleştirilecek incelemeler için online ortamda kanat profili üreticisi kullanılarak “dat” dosya uzantısına sahip profil dosyaları indirilmiştir. İndirilen koordinat dosyalarının girişleri Q-Blade programına yapılmıştır. Sonrasında kanat profillerinin kalınlık oranları, maksimum kalınlık noktaları, kamburluk oranları, maksimum kalınlık noktası, toplam referans noktası sayıları gibi değerler “Kanat Profili Tasarım Modülü” sekmesi aracılığıyla elde edilmiştir.



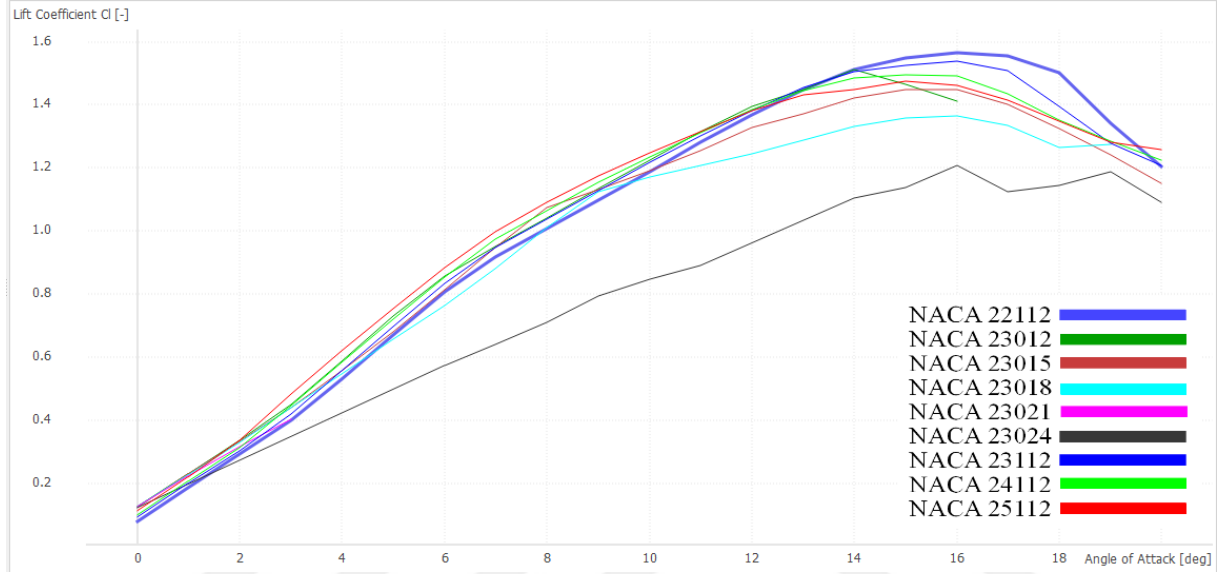
Şekil 3.2. Q-Blade programı NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profillerinin tasarım görüntüsü.

Üzerinde çalışılan dokuz farklı kanat profilinin maximum kalınlık noktalarının %29.8, %29.82, %29.85, %29.87, %29.96 ve %30 gibi değerlerle birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık kamburluk oranları, kalınlık oranı ve maksimum kamburluk noktalarının farklı olduğu görülmektedir.

Sonrasında “Kanat Profili Tasarım Modülü” kısmında analizin temel şartları belirtilmiştir. Üzerinde çalıştığımız bu dokuz kanat profili için de aynı değerler olacak biçimde; Ncrit katsayısı yüzey pürüzlülük değeri en az olacak şekilde “9”, Mach sayısı subsonic ortam değeri olan “0” ve Re orta seviyenin başlangıç değeri olarak kabul edilen “ 1×10^6 ” olarak belirlenmiştir. Kanat profillerinin analizinin yapılacağı hücum açısı aralığı olarak ise 0^0 - 20^0 açı aralığı tercih edilmiştir.

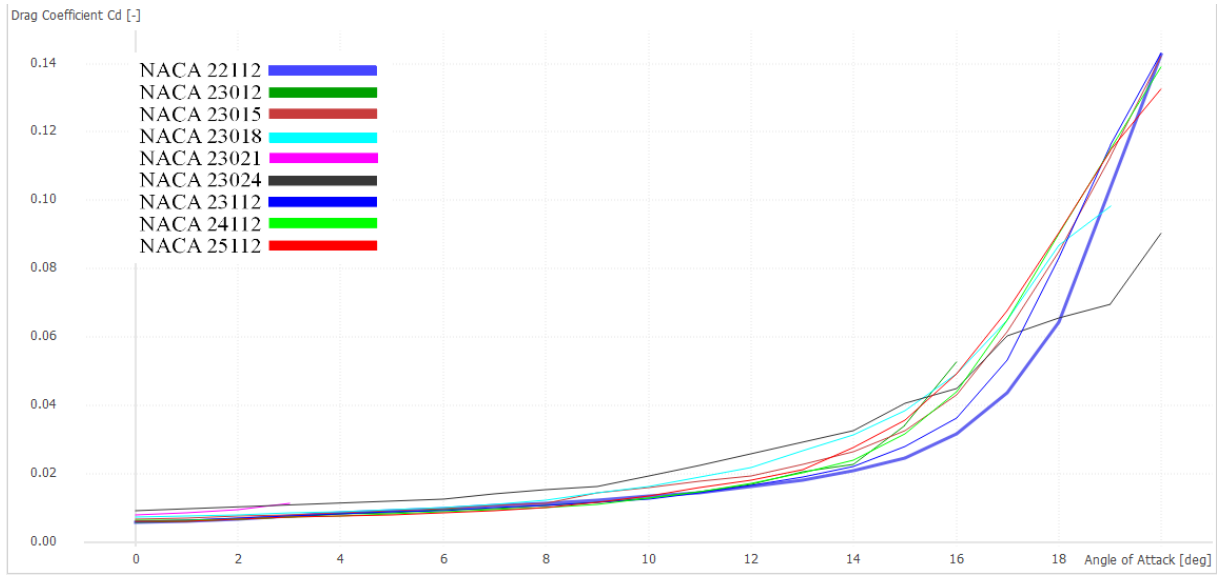
4. SONUÇLAR

Q-Blade yazılımında kanat profili analiz modülü kullanılarak yapılan ilk aşama analizler ile, 0^0 - 20^0 hücum açıları aralığında NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profillerinin kaldırma, sürüklenme, süzülme ve moment katsayısı değişimleri gözlemlenmiştir.



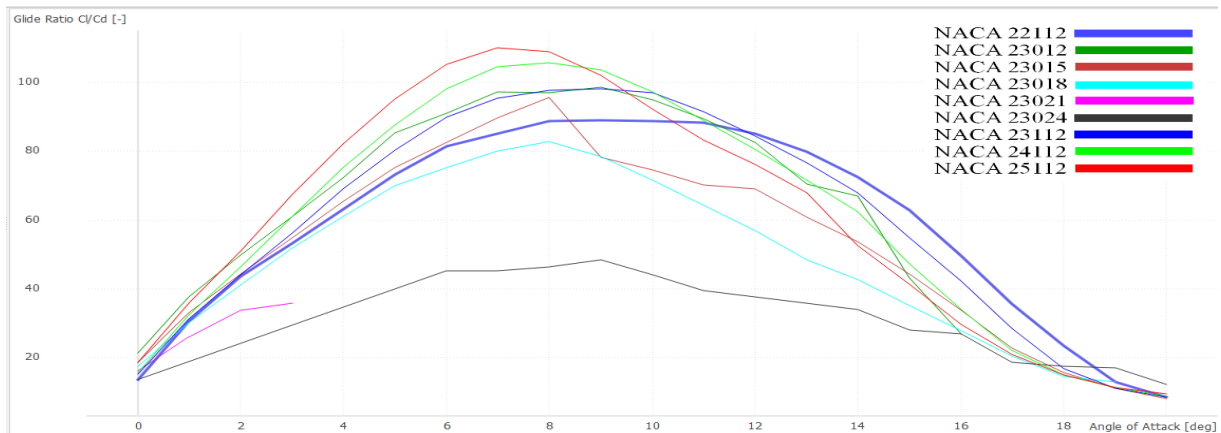
Şekil 4.1. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açılarına göre kaldırma (Cl) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.

Şekil 1de sunulan hücum açısına göre kaldırma katsayısı değişim grafiklerine göre ilk bakışta NACA 23024'nın kaldırma kuvvetinin diğerlerine nazaran çok daha düşük olduğu görülüyor. 14^0 hücum açısına kadar diğer sekiz profilin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. 14^0 hücum açısından sonra NACA 22112 kanat profilinin kaldırma kuvveti bakımından diğer kanat profillerine göre daha avantajlı olduğu tespit edilmektedir.



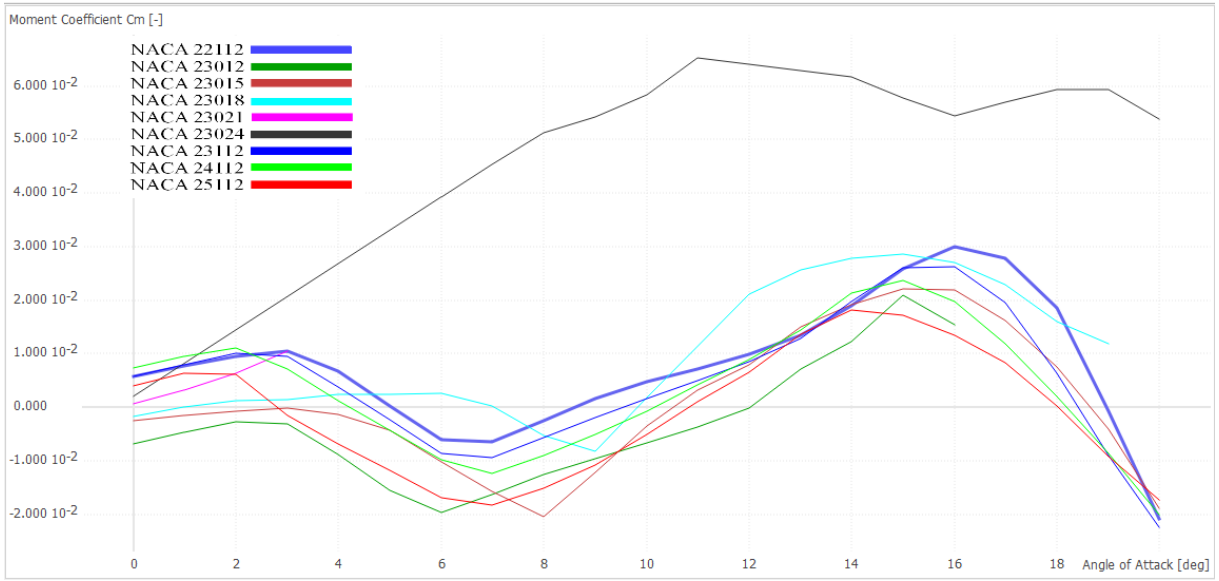
Şekil 4.2. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açılarına göre sürüklenme (C_d) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.

Şekil 2 de sunulduğu üzere hücum açısına göre sürüklenme katsayısı değişim grafiklerine göre 8^0 hücum açısına kadar kanat profillerinin sürüklenme katsayısı değerlerinin birbirine yakın olarak seyrettiği, 14^0 hücum açısına kadar ise kısmi değişim gösterdiği görülmektedir. 14^0 hücum açısından 20^0 'ye kadar olan bölümde ise kanat profillerinin sürüklenme kuvveti bakımından katsayıları hızla arttığı, NACA 22112 'in ise daha yavaş yükseldiği tespit edilmektedir. Böylelikle NACA 22112 'in diğer kanat profillerine göre sürüklenme katsayısı bakımından da daha avantajlı olduğu söylenebilir.



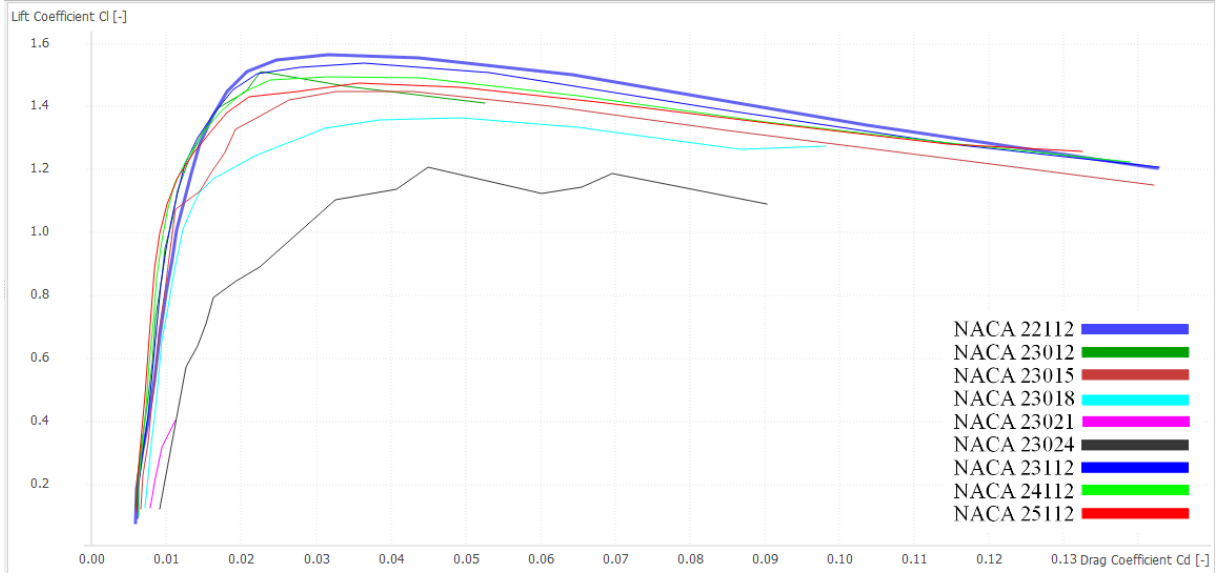
Şekil 4.3. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açılarına göre süzülme(Cl/C_d) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.

Bir başka parametre olan kanat profillerinin süzülme katsayılarının hücum açılarına göre değişimleri incelendiğimizde ise Şekil 3’de sunulduğu üzere 7^0 hücum açısında çoğu kanat profilinin pik değerlerine ulaştığı görülmektedir. Özellikle bu 7^0 hücum açısında NACA 25112 kanat profilinin yaklaşık 110 değer ile diğer profillere göre avantajı göze çarpmaktadır. Ancak 12^0 hücum açısından itibaren NACA 22112’nin süzülme katsayısının diğerlerinden daha yüksek verime sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin hücum açılarına göre moment(C_m) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.

Şekil 4’te sunulan grafik kanat profillerinin hücum açılarına göre moment katsayısının değişim grafiğini içermektedir. Grafik detaylı incelendiğinde NACA 23024 kanat profilinin moment katsayısının diğer kanat profillerine göre önemli bir farkla daha yüksek olduğu görülmektedir. NACA 23024’dan sonra NACA 23018 profilinin moment katsayısı bazı hücum açılarında diğer profillere nispeten yüksek gibi gözükse de NACA 22112 profilinin 3^0 - 5^0 , 8^0 - 10^0 aralıklarında özellikle de 16^0 hücum derecesinden sonra diğer yedi kanat profillerine göre avantajı görülmektedir.



Şekil 4.5. NACA 22112/23012/23015/23018/23021/23024/23112/24112/25112 kanat profillerinin sürüklenme (Cd) katsayılarına göre kaldırma (Cl) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiği.

Şekil 5'te sunulan bu grafikte incelediğimiz kanat profillerinin, hangi sürüklenme katsayısı değerinde yüksek kaldırma değeri oluşturduğunu ve hangi sürüklenme katsayısı değerinde performansının düştüğünü gözlemleyebiliyoruz. Başlangıçta, düşük sürüklenme katsayısı değerlerinde çoğu kanat profilinin kaldırma katsayılarının yüksek olduğunu görüyoruz. Aynı zamanda bu yüksek değerlerde profillerin optimum performans göstereceğini belirtebiliriz. Sürüklenme katsayısı arttığında ise doğal olarak kaldırma katsayılarının yavaş yavaş düştüğünü gözlemleyebiliyoruz. Grafiğin geneline baktığımızda ve profilleri birbiriyle mukayese ettiğimizde ise NACA 22112 kanat profilinin düşük sürüklenme katsayılarından yüksek sürüklenme katsayılarına kadar, kaldırma katsayısının diğer sekiz kanat profilinden daha yüksek olduğunu dolayısıyla da performansının diğer kanat profillerinden yüksek olduğunu görmekteyiz.

4.1. Genel Sonuçlar

Q-Blade yazılımı kullanılarak, 1×10^6 sabit Re ve 00-200 hücum açıları aralığında, hava yoğunluğu ve ortam koşulları sabit tutularak, NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 kanat profillerinin tasarımı ve karşılaştırmalı performans analizi gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetle şu şekildedir;

Kaldırma kat sayısı(C_l) bakımından, 00-140 hücum açısına kadar profillerin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmesiyle birlikte 140 hücum açısından sonra NACA 22112 kanat profilinin kaldırma kuvveti bakımından diğer kanat profillerine göre daha avantajlı kanat profili olduğu tespit edilmiştir.

Sürüklenme katsayısı(C_d) olarak, 00'den 80 hücum açısına kadar kanat profillerinin sürüklenme katsayısı değerlerinin birbirine yakın olarak seyrettiği, 140 hücum açısına kadar ise kısmi değişim gösterdiği, 140 hücum açısından 200'ye kadar olan bölümde ise kanat profillerinin sürüklenme kuvveti bakımından katsayıları hızla arttığı, NACA 22112 'in ise daha yavaş yükseldiği için NACA 22112 'in diğer kanat profillerine göre sürüklenme katsayısı bakımından da daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Süzülme katsayısı(C_l/C_d) açısından, 70 hücum açısında NACA 25112 kanat profilinin yaklaşık 110 değer ile diğer profillere göre avantajı tespit edilmiştir. 120 hücum açısından itibaren NACA 22112'nin süzülme katsayısının diğerlerinden daha yüksek verime sahip olduğu belirlenmiştir.

Moment(C_m) katsayısı bakımından, NACA 23024 kanat profilinin moment katsayısının diğer kanat profillerine göre önemli bir farkla daha yüksek olduğu ve ikinci olarak da NACA 22112 profilinin kanat profillerine göre avantajı tespit edilmiştir.

Sürüklenme (C_d) katsayılarına göre kaldırma (C_l) katsayılarının karşılaştırmalı değişim grafiğine göre de NACA 22112 kanat profilinin düşük sürüklenme katsayılarından yüksek sürüklenme katsayılarına kadar, kaldırma katsayısının diğer sekiz kanat profilinden daha yüksek olduğunu dolayısıyla da performansının diğer kanat profillerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.

NACA 22112 kanat profilinin kaldırma katsayısı (C_l), sürüklenme katsayısı (C_d) değerlerine göre diğer profillere göre optimum değerlere sahip olduğundan; süzülme(C_l/C_d) ve moment(C_m) katsayıları bakımından da dokuz kanat profili arasından ikinci derecede optimum değerlere sahip olduğundan diğer kanat profillerine göre avantaj sağladığı tespit edilmiştir.

4.2. Öneriler

Çalışmamızda Q Blade yazılımı aracılığıyla, beş basamaklı NACA profilleri olan NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 serisi türbin kanat profillerinin tasarımı ve mukayeseli verimlilik analizi yapılmıştır. Verimlilik analizi yapılırken çevre şartları olarak 1×10^6 sabit Re , 0^0 - 20^0 hücum açıları aralığı, sabit hava yoğunluğu tercih edilmiştir. 3kW güçte ve 2m kanat uzunluğuna sahip rüzgâr türbin modeli, türbin yapısı olarak tercih edilmiştir. Beş basamaklı NACA profilleri ile ilgili gelecekte yapılacak sayısal çalışmalarda aşağıdaki konuların dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir:

Bu çalışmadaki kullanılan hücum açıları ve Reynolds sayısı haricinde, kanat profillerinden daha iyi verim alabilmek için farklı hücum açılarında ve Reynolds sayılarında sayısal analizler yapılabilir.

Bu çalışmadaki kullanılan güç değeri ve kanat uzunluğu değerleri haricinde, kanat profillerinden daha iyi verim alabilmek için farklı güç değeri ve kanat uzunluğu değerleri ile sayısal analizler yapılabilir.

Q Blade yazılımı aracılığıyla, beş basamaklı NACA profilleri olan NACA 22112, NACA 23012, NACA 23015, NACA 23018, NACA 23021, NACA 23024, NACA 23112, NACA 24112, NACA 25112 serisi türbin kanat profillerinin tasarımı ve mukayeseli verimlilik analizi; xfoil vb. farklı aerodinamik analiz yapan yazılımlar aracılığıyla yapıp Q Blade ile yapılmış analizlerle mukayese edilerek daha kapsamlı sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Aydın, İ. (2014). Balıkesir’de Rüzgâr Enerjisi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 18(29), 29-50.
- Bayraç, H. N. (2011). Küresel Rüzgâr Enerjisi Politikaları ve Uygulamaları. Rüzgar Enerjisinin Nitelikleri ve Diğer Enerji Kaynakları İle Karşılaştırılması. Uludağ Üniversitesi *İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* Cilt/Vol. XXX, Sayı/No. 1, 2011, pp. 37-57.
- Bektaş, A. (2013). *Binalarda Rüzgâr Enerjisi Kullanımının Farklı Bölgeler Açısından Değerlendirilmesine Yönelik Bir Çalışma: Toki Tarımköy Projesi Örneği*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Caboni M., Minisci E., Riccardi A. (2018). Aerodynamic Design Optimization of Wind Turbine Airfoils under Aleatory and Epistemic Uncertainty, *Journal of Physics Conference Series*, cilt 1037, no. 4, pp. 1-10.
- Cengiz, Ç. (2010) *Slatlı Kanat Profilinin Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava Ve Su Akışlarının İncelenmesi Ve Aerodinamik Performans Analizleri*, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çil, M. A. (2022) *Hava Araçları Ve Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Farklı Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Demir, M. S. (2019). *Boru Hatlarına Entegre Edilmek Üzere Küresel Hidrokinetik Türbin Tasarımı ve Had Analizleri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Dılmaç E. (2019). *NACA 4415 Rüzgâr Türbini Kanat Profilinde Firar Kenarı Etkisinin İncelenmesi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Doğan, K. (2014) *Yatay Eksenli Rüzgar Türbin Kanatlarının Akışkan-Yapı Etkileşimi Yönünden İncelenmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Emniyetli, G. (2007). *Evsel Elektrik İhtiyacının Karşlanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı*, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Tırakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorlu.
- Gudmundsson, S. (2014) *The Anatomy of the Airfoil*, %1 içinde General Aviation Aircraft Design: Applied Methods And Procedures, Oxford, Elsevier, 2014, pp. 235-297.
- Hayli, S. (2001). Rüzgâr Enerjisinin Önemi, Dünya'da Ve Türkiye'deki Durumu. Türkiye'deki Rüzgâr Enerjisi Uygulamaları. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. Cilt: 11 Sayı: 1, Sayfa: 1-26, Elazığ.
- İslam M. R., Bashar L. B., Saha D. K., Rafi N. S. (2019) Comparison and Selection of Airfoils for Small Wind Turbine Between NACA and NREL’s S series Airfoil Families, *International Journal of Research in Electrical, Electronics and Communication Engineering*, cilt 4, no. 2, pp. 1-11.

- İnternet: Amazon Services LLC Associates Program, Airfoil Tools, Amazon EU Associates Programme. URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2024
- İnternet: Damyan, BNEF: Yenilenebilir enerji sektörü 2024'ün ilk yarısında 313 milyar dolar yeni yatırımla ivmesini koruyor. URL: <https://temizenerji.org/2024/08/28/bnef-yenilenebilir-enerji-sektoru-2024un-ilk-yarisinda-313-milyar-dolar-yeni-yatirimla-ivmesini-koruyor/> Son Erişim Tarihi: 21.12.2024
- İnternet: İnovakademi URL: <https://inovakademi.com/nukleer-enerji-101/>. Son Erişim Tarihi: 20.12.2024
- İnternet: Marten D.-I. D., Saverin D.-I. J., Becker D.-I. S. P., Behrens M. R. de Luna, The Qblade Software. URL: <https://qblade.org/>. Son Erişim Tarihi: 20.12.2024
- İnternet: MIT Department of Aeronautics and Astronautics, Theory of Flight, Man-Vehicle Laboratory, 16 Mart 1997. URL: <https://web.mit.edu/16.00/www/aec/flight.html>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2024
- İnternet: Soyduğan, F. (2021). Esen Yelden Yenilenebilir Temiz Enerjiye: Rüzgâr Enerjisi. URL: <https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/makale/ruzgar-enerjisi> Son Erişim Tarihi: 17.12.2024
- İnternet: Topbaş, Türkiye'nin güneş enerjisinde kurulu gücü 16 bin megavattı geçti. URL: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyenin-gunes-enerjisinde-kurulu-gucu-16-bin-megavatt-gecti/3299314>. Son Erişim Tarihi: 17.12.2024
- İnternet: Yükselen M. A. (2012). Kanat Profillerinin Aerodinamiği, İstanbul: İTÜ Uçak Ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü. URL: https://persis.gelisim.edu.tr/DOSYA/CV/3623_1_Y%C3%96K%20Formatl%C4%B1%20%C3%96zge%C3%A7mi%C5%9F.pdf Son Erişim Tarihi: 12.12.2024
- Karadağ, H. İ. (2009). *Yenilebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgâr Enerjisinin Önemi ve Rüzgâr Türbini Tasarımı. Rüzgâr Türbini Bileşenleri*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kaya, K., Koç, E. (2015) Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı Ve Üretim Esasları, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, no. 670, pp. 38-48.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis Ve Makina*, 56(668), 36-47.
- Kulshreshtha A., Gupta S. K., Singhal P. (2020) FEM/CFD Analysis Of Wings At Different Angle Of Attack, *Materials Today: Proceedings*, pp. 1638-1643, Mart.
- Mahmuddin, F. (2017) Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory, *Energy Procedia-The 8th International Conference on Applied Energy*, p. 1123.
- Mankotia P., Channi H. K., Gupta S. (2020) Modeling And Designing Of Small Wind Turbine Blade, *Journal Of Critical Reviews*, cilt 7, no. 19, pp. 7276-7284.

- Marten, D. I. D. (2020) *QBlade: A Modern Tool for the Aeroelastic Simulation of Wind Turbines*, Technical University of Berlin, Faculty of Mechanical Engineering and Transport Systems. Berlin.
- Moriarty P. J., Hansen A. (2005). *AeroDyn Theory Manual*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Muftah A. (2019) Cfd Modeling Of Airfoil Of Wind Turbine Under Different Effect Of Operating Conditions, *Sirte University Scientific Journal (Applied Sciences)*, cilt 9, no. 1, pp. 27-43, Haziran.
- Pitts W. C., Nielsen J. N., Kaattari G. E. (1957). Lift and Center of Pressure of Wing Body Tail Combinations at Subsonic, Transonic, and Supersonic Speeds, National Advisory Committee for Aeronautics, California.
- Solanki P. (2021) Computational Fluid Dynamics Analysis of Wind Turbine Blade at Low Reynolds Number and Various Angle Of Attack, *International Research Journal of Engineering and Technology*, cilt 8, no. 6, pp. 4478-4485, Haziran.
- Şenel, M. C. (2012). *Rüzgar Türbinlerinde Güç İletim Mekanizmalarının Tasarım Esasları – Dinamik Davranış*, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Şenel, M. C. ve Koç, E. (2015). Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme. *Mühendis Ve Makina*, 56(663), 46-56.
- Şenel, M. C. ve Koç, E. (2014) Kanat Tasarım Parametrelerinin Rüzgâr Türbini Aerodinamik Performansına Etkisi, %1 içinde V. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı, Kayseri.
- Tarhan, C., Çil, M. A. (2022) Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Farklı Kanat Profillerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Mühendis ve Makine* cilt 63, sayı 706, s. 1-22, 2022 Araştırma Makalesi
- Tokul, A. (2021). *Amasya İli Koşullarında 1 MWP Kurulu Gücünde Yüzer Tip Ve Arazi Tipi Enerji Santrallerinin Karşılaştırmalı Analizi Ve Optimizasyonu*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Vardar, A., Eker, B. (2006) Design of a Wind Turbine Workingwith the Continuity Principal. *Energy Exploration & Exploitation*. Volume 24 · Number 4+5 · 2006 pp. 349–360
- Widyalankara N. N., Jayawickrama P., Ambegoda D., Velmanickam L. (2021). Optimum Wind Turbine Design And Analysis To Harvest Wind Energy From Fast-Moving Vehicles On Highways, 3rd International Conference on Electrical Engineering, pp. 7-12, 24 Eylül.
- Zahari, M. F. B. (2013). *A Study Of Drag Force On Different Type Of Airfoil In A Subsonic Wind Tunnel*, Faculty of Manufacturing Engineering, Pahang.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Enes Sezer

Uyruđu : Türkiye Cumhuriyeti

Eğitim Derecesi

Okul/Program

Mezuniyet Yılı

Lisans

Fırat Üniversitesi

2013

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)