T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ

Fedli AKINCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Nisan 2019

T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ

Fedli AKINCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Nisan 2019

T.C

DİCLE UNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Fedli AKINCI tarafından yapılan "Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Jeneratör Çeşitleri" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

Ünvanı	Adı Soyadı	
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi	Fatma Figen BİNBAY
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi	Dilan ALP
Üye :	Doç. Dr.	Ömer ÇELİK

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 17/Nisan/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../2019

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Akademik yolda attığım ilk adımdan bu aşamaya kadar geçen süreçte bana yol gösteren, gerekli bilgiye ulaşma ve kat ettiğim yolda bu donanımı doğru şekilde kullanarak, bilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Fatma Figen BİNBAY, başta abim İbrahim AKINCI olmak üzere aileme ve değerli arkadaşım Ramazan ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Nisan 2019

Fedli AKINCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR I
İÇİNDEKİLER II
ÖZET IV
ABSTRACT V
ÇİZELGE LİSTESİ VI
ŞEKİL LİSTESİ VII
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL VE METOT 7
3.1. Rüzgar Türbinleri ve Tarihsel Gelişimi 7
3.1.1. Rüzgar Oluşumu 7
3.1.2. Rüzgar Hızının Ölçülmesi 7
3.1.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi 11
3.2. Rüzgar Türbinleri 12
3.3. Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi 13
3.4. Dünyada Rüzgar Enerjisi 16
3.4.1. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi 18
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 29
4.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması 29
4.1.1. Yatay Eksenli Türbinler 29
4.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri 31
4.1.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri 32
4.1.4. Rüzgar Türbininin Gücü 33
4.1.5. Doğrudan Sürüşlü ve Dişli Kutulu Rüzgar Türbinleri 34
4.1.6. Şebekeye Bağlı ve Şebekeden Yalıtılmış Rüzgar Türbinleri 34
4.1.7. Denizde ve Karada Kurulan Rüzgar Türbinleri 34
4.2. Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri 35
4.2.1. Kanatlar 36
4.2.2. Rotor 36
4.2.3. Kanat Açısı Sürücüsü 37
4.2.4. Sapma Sürücüsü 37
4.2.5. Rotor Şaftı 38
4.2.6. Fren 38
4.2.7. Dişli Kutusu 38

4.2.8. Kontrol Paneli 39
4.2.9. Jeneratör 39
4.3. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler 39
4.3.1. Doğru Akım Jeneratörleri 40
4.3.2. Senkron Jeneratörleri 40
4.3.3. Asenkron Jeneratörler 43
4.4. Rüzgar Türbinlerinin Geleceği 45
4.4.1. Rüzgarın Geleceği 45
4.5. Gelişen Pazarlar 48
4.6. Diyarbakır İl Genelinde Ekonomik RES Yatırımı Yapılabilecek Alanların Değerlendirilmesi 49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 55
6. KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 61

ÖZET

RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fedli AKINCI

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

2019

Dünyamızın, günümüzde bulunduğu enerji darboğazında; yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmakta ve bu kaynaklardan biri olarak rüzgar enerjisine olan ilgi ve yatırımlar da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda rüzgar enerjisinden yararlanılarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan jeneratör sistemleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratör türleri ve amaçları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, rüzgar türbini, jeneratör tipleri

ABSTRACT

GENERATOR TYPES USED WIND ENERGY

MASTER THESIS

Fedli AKINCI

DEPARTMENT OF PHYSICS
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2019

Nowadays, there is a need for renewable energy sources in the energy bottleneck where our world is located and this new energy gains importance in the interest and investments in wind energy which is clean energy. Thus, wind energy conversion systems are spreading. Generator systems used in the conversion of mechanical energy into electrical energy are of great importance by utilizing wind energy. In this study, wind turbine generators, used generator types and usage purposes are examined.

Key Words: Wind power, wind turbine, generator types

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	2015 yılında ülkemizin elektrik enerjisi kurulu gücü (MW)	19
Çizelge 4.1.	Tasarımlarına göre rüzgar tribünlerinin karşılaştırılması	32
Çizelge 4.2.	Rüzgar gücü teknolojisi, geçmişi, günümüz ve gelecek	45
Çizelge 4.3.	Diyarbakır bölgesi ait aylık rüzgar hızı ortalama verileri	50
Çizelge 4.4.	Diyarbakır iline kurulabilecek rüzgar enerji santralı güç kapasitesi	57

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No:		Sayfa
Şekil 3.1	Rüzgar Ölçüm İstasyonu	8
Şekil 3.2.	Kepçe Anemometre	9
Şekil 3.3.	Pervaneli Anemometre	10
Şekil 3.4.	Ultrasonik Anemometre	10
Şekil 3.5.	Rüzgar Yön Ölçer	11
Şekil 3.6.	Smith-Putnam Türbini	14
Şekil 3.7.	Jull tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten jeneratör	15
Şekil 3.8.	Ulrich Hutter'in tasarladığı rüzgar türbini	16
Şekil 3.9.	Dünyadaki kümülatif kurulu rüzgar kapasitesinin yıllara göre değişimi	18
Şekil 3.10.	Dünyada yıllık kurulan rüzgar kapasitesinin yıllara göre değişimi	18
Şekil 3.11.	2017 yılında ülkemizde kurulu elektrik enerjisi gücü	20
Şekil 3.12.	2017 Yılı Sonu İtibarıyla Türkiye'de Kaynak Bazında Kurulu Güç Oranı	21
Şekil 3.13.	Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum	21
Şekil 3.14.	2018 yılında Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin kurulumunun yıllara göre dağılımı	22
Şekil 3.15.	2018 yılında Türkiye'de işletmedeki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yatırımcılara göre dağılımı	22
Şekil 3.16.	2018 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından türbin markalarına göre dağılımı	23
Şekil 3.17.	Türkiye Rüzgar Haritası	24
Şekil 3.18.	2018 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı	25
Şekil 3.19.	2017 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı	25
Şekil 3.20.	Türkiye'de 2017 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı	26
Şekil 3.21.	2018 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı	26
Şekil 4.1.	Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması	29
Şekil 4.2.	Düşey eksenli düz tip bir Darrieus rüzgar türbini	31

Şekil 4.3.	Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri	33
Şekil 4.4.	Denizde ve karada kurulan rüzgar türbinleri	35
Şekil 4.5.	Türbinin iç yapısı	35
Şekil 4.6.	Türbin kanatları	36
Şekil 4.7.	(a) Üçlü silindirik göbek (b) küresel göbek	37
Şekil 4.8.	Fren	38
Şekil 4.9.	Dişli kutusu	38
Şekil 4.10.	Değişken hızlı alan sargılı senkron jeneratörü	41
Şekil 4.11.	Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron jeneratör	42
Şekil 4.12.	DGM konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkron jeneratör	42
Şekil 4.13.	Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron jeneratör	43
Şekil 4.14.	Değişken hızlı sincap kafesli asenkron jeneratör	44
Şekil 4.15.	Nysted rüzgar çiftliği (Danimarka)	47
Şekil 4.16.	Enercon E48 800 Kw	48
Şekil 4.17.	Whisper H80 rüzgar türbini	48
Şekil 4.18.	Diyarbakır bölgesine ait aylık rüzgar hızı ortalama verileri	50
Şekil 4.19.	Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Haritası	51
Şekil 4.20	Diyarbakır Bölgesi Rüzgar Hız Dağılımları (50 m)	52
Şekil 4.21.	Diyarbakır ilinde kapasiteye göre RES kurulabilecek alanlar	53
Şekil 4.22.	Rüzgar santrali kurulamayacak alanlar	53

1. GİRİŞ

Rüzgar, çok eski çağlarda yel değirmenleri aracılığı ile su pompalamak ve buğday öğütmek için kullanılan bedava bir enerji kaynağıdır. İnsanoğlu bu enerji kaynağını 20. yüzyıldan itibaren daha farklı amaçlar için de kullanmaya başlamıştır. Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan fosil yakıtlar endüstri devrimiyle hızlı ve bilinçsiz bir şekilde tüketilmeye başlanmıştır. Fosil yakıtların kaynaklarının sınırlı olmasından ve bu kaynakların tükenebileceğinin anlaşılmasıyla enerji, ülkelerin birinci öncelikli konusu olmuştur. Enerji kaynaklarını elde etmek için savaşlar çıkmış, bu kaynakları ellerinde bulunduran ülkeler dünya ekonomisine yön vermeye başlamıştır. Ayrıca, 1973 yılında ortaya çıkan petrol krizinden sonra ülkeler enerji politikalarını yeniden gözden geçirmek zorunda kalmıştır (Kincay ve ark., 2009). Enerji fiyatlarındaki artışlar ve ülkelerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için dış ülkelere bağımlı olmaları, yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanılabilir enerji elde edilmesinin önemini arttırmıştır.

Son senelerde yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji verimliliği açısından kullanımının önemi giderek artmıştır. Rüzgar da bu yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Çevre temizliği, güvenilirliği ve ucuzluğu açısından rüzgar enerjisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosil yakıtların elektrik üretimine katkısı tartışılmazdır. Bununla birlikte, rüzgar enerjisinin önemi bu yakıtların tüketiminin çoğalmasıyla birlikte artmaktadır. Başta Almanya, Portekiz, İspanya ve Danimarka olmak üzere birçok Avrupa ülkesinde, elektrik enerjisinin büyük bir kısmını rüzgar enerjisi sağlamaktadır.

Dünyanın çeşitli yerlerinde rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla çeşitli rüzgar türbinleri tasarlanıp kullanılmaya başlanmıştır. Kullanımı bakımından en verimli ve en uygun olan rüzgar türbinlerinin yapısında jeneratör olarak çalıştırılan yani rüzgar enerjisini elektrik enerjisine çeviren bir elektrik makinesi bulunmaktadır.

Yenilenebilir enerji ile elektrik üretim teknikleri arasında günümüzde en fazla gelişme gösteren teknik rüzgar enerjisi ile elektrik üretimidir (Kincay ve ark., 2009). Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi rüzgar türbinleri aracılığıyla yapılmaktadır. Rüzgar türbinleri havanın kinetik enerjisini, yapısında bulunan jeneratör yardımı ile elektrik

enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yönteminin önemi arttıkça daha yüksek kapasiteli ve kompleks sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. 2002 yılında dünya genelinde kurulu güç kapasitesi 31,100 MW olan rüzgar santralleri 2012 yılının sonunda yaklaşık 282,408 MW kurulu güç kapasitesine erişmiştir (GWEC, 2012).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sarıtaş ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmada, 700 VA gücünde bir Kesintisiz Güç Kaynağı (KGK) meydana getirilmiştir. Bu güç kaynağı sistemi bir giriş gücü aşaması, tahrik ünitesi, batarya dolgu, invertör ünitesi, çıkış gücü kademesi, örnekleme ünitesi, kontrol ünitesi ve 2x12 V kuru batarya içerir. Kuru bataryadaki 24 V DC voltaj, elektronik cihazların ON-LINE gücü ile beslenmesi için sürekli olarak 50 Hz frekansta 220 V AC'ye dönüştürülür. "Darbe genişlik modülasyonu" (PWM) tekniğiyle çalışan UPS sisteminin 3 durumlu bir çıkışı bulunmaktadır. PWM sinyalleri, KGK'nın çıkış voltajını düzenlemek için sürücü ve kontrol ünitesi aracılığıyla sürücüye uygulanır. Sistemin ön panelinde akü şarjı, aşırı akım, UPS açık/kapalı durumu ve düşük pil seviyesini gösteren dört LED göstergesi bulunmaktadır. Pil seviyesinin düştüğünü bildirmek için sisteme sesli bir uyarı da eklenmiştir. KGK'nin filtrelenmiş çıkışı ve aşırı kısa/yük devre koruması vardır. Bu sistem, giriş gücünün kesilmesi durumunda 15-30 dakika süren kesintisiz bir enerji sağlayabilmektedir.

Picone (2004) genellikle saf sinüs dalgası çıkışına odaklandığı bir çalışma yapmıştır. Saf sinüs dalgası çıkışı, yüksek frekanslı anahtarlama ve bir mikroişlemciyle elde edilir. DC / AC güç çevirici, 12 Volt DC ile kullanılır. Bu DC voltajı daha sonra işlevsel bir 120 Volt AC güç kaynağına dönüştürülür. Bu güç kaynağı, devamlı olarak 300 watt güç sağlayabilmektedir. Çıkış sinüs dalgasına çok yakındır. Tasarım, yüksek frekanslı anahtarlama ve mikroişlemciden dijital sinyal alma ile gerçekleştirilmiştir. Gerilim artışı, kısa devre ve sıcaklık koruması bir mikroişlemci yardımıyla izlenmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, güçte önemli faktör verimliliktir. Bu, güç kaynağının doğrudan çıkış sinyaliyle alakalıdır. Bu nedenle, çıkış mümkün olabildiği kadar saf sinüs dalgasına yakın olmak zorundadır (Akt. Toprak, 2011).

Tuncer ve ark. (2004)'ın yaptığı çalışmada, 3 durumlu 5 kademeli invertör tasarımı amacıyla uygulanması gerekli adımlar verilmiştir. Yine bu çalışmada güç devresinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan sorunlar ve bu problemlere çözüm önerileri sunulmaktadır. Tasarlanan invertörden elde edilen deney sonuçları ayrı ayrı verilmiştir (Akt. Toprak, 2011).

Emniyetli (2007) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de rüzgar enerjisinin potansiyel kullanımlarını ve türbin tipi ve büyüklüğünde nasıl kullanılabileceği incelenmiştir. Böyle bir türbinin aerodinamik tasarımı daha sonra belirlenmiş ve beklenen performans hesaplanmış ve buna göre üretilecek enerjinin maliyeti tahmin edilmiştir. Yüksek potansiyel alanlar Weibull dağılımından faydalanarak mevcut rüzgar verileri kullanılarak belirlenmiştir. Maliyet ve rotor süpürme alanlarındaki değişiklikler Türbin gücündeki değişime göre incelenmiş ve diğer bazı faktörler dikkate alınarak türbin gücü 600 kW olarak seçilmiştir. Tasarlanan türbin performansının ve çeşitli bölgelerde üretilmesi beklenen yıllık enerji miktarlarının hesaplanmasından sonra, enerji biriminin maliyetinin ne olduğunu bulmak için EWEA tarafından verilen değerler 5 600 kW türbinlerden oluşan 3 MW'lık bir rüzgar çiftliğinde kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, üretilen elektrik enerjisinin birim maliyetinin 2,8-5,1 cent/kWh arasında değiştiği gözlenmiştir.

Ortaç (2007)'ın yaptığı çalışmada, geri dönüş "DC-DC Inverter güç kaynağı devresi" kullanılmaktadır. Kare dalga, DC girişinden üretilmiş, daha sonra referans sinüs elde edilmiş ve güç transistörleri değiştirilerek PWM modülasyonu yapılmıştır. Sinüs bilgisiyle kare dalga depolanıp, itme-çekme topolojisi kullanılarak transformatörün genliği arttırılıp ve AC filtresi LC filtreden süzülerek elde edilmiştir. Sistem kumanda elemanları aracılığıyla yarı otomatik olarak çalıştırılmaktadır. Cp-X eğrisi türbin üzerinde gerekli olan ölçümlerin yapılmasıyla çizilmiştir. Son olarak kurulan rüzgar türbinine en yakın ölçüm lokasyonu Akhisar (l0m) ölçümleri baz alınarak yıllık olarak elde edilecek enerji miktarı hesaplanmıştır.

Şimşek (2007) tarafından yapılan çalışmada genel olarak; rüzgar enerjisi dünyasında Türkiye ve dünyadaki rüzgar enerjisiyle ilgili teorik ve istatistiki bilgiler verilmektedir. 2005 yılında Sivas Meraküm Tepe'nin rüzgar enerjisi potansiyeli ve rüzgar frekans dağılımı günlük rüzgar hızı verileri incelenerek belirlenmiştir.

Elmas ve ark. (2008)'ın yaptığı çalışmada, üç seviyeli diyot-tutmalı bir inverter tasarlanarak uygulanmıştır. Uygulanan iki seviyeli invertör ile üç seviyeli invertörlerin beslediği asenkron motorun faz akımları ve fazlar arası gerilimleri karşılaştırılmıştır. Uygulamanın sonuçlarına göre, üç seviyeli invertör tarafından beslenen asenkron

motorun faz akımları ve faz-içi gerilimlerinin harmonik bileşenlerinin iki seviyeli invertörlerden daha düşük olduğu görülmüştür.

Aydın (2008)'ın bir evde tüketilen yıllık ortalama elektrik enerjisini tespit ettiği bir çalışmasında; ağın ulaşamadığı bir yerin ihtiyacını karşılamak için gereken türbin gücüyle bunun depolanması için bazı hesaplamaların yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda türbin seçiminde en ekonomik olanının belirlenmesi ve enerji arzının karşılanabilmesinden dolayı gereken türbin maliyetlerinin değerlendirilmesi; sistemin geri ödeme süresi, elde edilen elektrik enerjisi ile hesaplanmıştır. Türbinlerin maliyetleri dikkate alındığında, "otonom rüzgar enerjisi çevrim sistemi" olan bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilen ekonomik türbin seçimi yapılmış ve benzer türbinlerin enerji miktarları üretilmiştir. Çalışmalar neticesinde; İzmir ilindeki bir evin, belirlenen elektrik enerjisi gereksiniminin ekonomik olarak 3 kW'lık bir türbin ile karşılanmasının uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

Demirtaş (2008)'ın yaptığı bir çalışmada, rüzgar ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir hibrid enerji santrali tasarlanıp uygulanmıştır. Güneş panelleri ve rüzgar türbini ile elde edilen elektrik enerjisini aynı doğru akım (DC) veriyoluna bağlamak ve yükü yüke göre yönlendirmek için, Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) ile iki amplifikatör dönüştürücü kurulmuştur. Her iki trafo bir mikrodenetleyici ile kontrol edilmiş ve sistemin akım ve gerilim bilgileri burada değerlendirilmiştir. Ayrıca, güneş takip mekanizması ve kontrol devreleri, güneş panellerinden en verimli enerji üretmek için tasarlanmıştır. Sistem bileşenleri arasında iletişimi sağlamak için iletişim modülleri tasarlanmış ve sistem verileri sürekli olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen verilerin yardımıyla, sistemin günlük verileri kaydedilmiş ve etkinliği incelenmiştir.

Üze ve ark. (2008)'ın yaptıkları çalışmada, Türkiye'de rüzgar enerjisinin potansiyel uygulamaları ile bunun uygulanabilirlik durumu araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında araştırmacıların tasarladığı türbinin devreye alma hızı 4 m/s, nominal hızı 12,5 m/s ve ayrılma hızı ise 22 m/s olarak belirlenmiştir. Kanat sayısı 3, nominal güç ise güç 600 kW olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tasarım mevcut türbinlerin ekipmanlarına ve benzer çalışmalara göre uygun sonuçlar vermiştir.

Buna ek olarak, tasarım sırasında, tür seçiminin, türbinin kullanılacağı rüzgar koşullarıyla türbin performansı kadar önemli olduğu bulunmuştur (Akt. Toprak, 2011).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Rüzgar Türbinleri ve Tarihsel Gelişimi

3.1.1 Rüzgar Oluşumu

Hava hareketlerinin temel prensibi, güneşten alınan ısı nedeniyle mevcut atmosfer basıncının bölgeler arasında değişmesidir. Hava basıncı yeryüzü boyunca sabit bir değere sahip değildir. Atmosferdeki basınç değişimleri farklı bölgelerdeki yükseklik ve sıcaklık farkı sebebiyle oluşan farklı hava yoğunluklarından dolayı meydana gelmektedir. Bir bölgede ısınan hava molekülleri havanın yükselmesine neden olmakta yükselen hava moleküllerinin birim hacimdeki miktarı azalmakta ve yoğunluğu düşmektedir. Aynı şekilde sıcaklığı düşen hava moleküllerinin yoğunluğu artmakta ve bulunduğu yerden daha alçağa hareket etmektedir. Hava moleküllerinin bu yer değiştirmeleri yeryüzünde yüksek basınç ve alçak basınç bölgelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek basınç alanları, atmosferik basıncı 1013 milibar ve üstü olan, alçalıcı hava hareketleri gösteren bölgelerdir. Bu bölgelerde alçalan hava yeryüzüne çarpar ve yatay bir şekilde dağılır. Yüksek basınç alanlarında hava Kuzey Yarımküre'de saat yönünde, Güney Yanmküre'de ise saat yönünün tersinde hareket etmektedir. Alçak basınç alanları, atmosferik basıncı 1013 milibar altı olan ve yükselici hava hareketleri göstermektedir. Alçak basınç alanlarında hava Kuzey Yarımküre'de saat yönünün tersi yönde Güney Yarımküre'de ise saat yönünde hareket etmektedir.

Rüzgar oluşumu, hava kütlelerinin farklı sıcaklıklar, yoğunluklar ve yükseklikler ile yer değiştirmesinden kaynaklanır. Rüzgar hızı, rüzgarı oluşturan faktörlerden dolayı da değişir. Rüzgar türbinlerinin ürettiği enerji o bölgedeki rüzgar hızı tarafından doğrudan etklilenmektedir. Bir bölgede kurulacak rüzgar türbini sisteminin doğru tasarlanması için o bölgenin rüzgar özelliklerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir.

3.1.2. Rüzgar Hızının Ölçülmesi

Bir bölgede kurulacak rüzgar türbininden üretilebilecek enerji o bölgedeki rüzgar karakteristiğine doğrudan bağlıdır. Bir bölgenin rüzgar karakteristiği rüzgar hızı, hakim rüzgar yönü, sıcaklık ve basınç gibi parametrelere bağlıdır ve o bölgede yapılacak ölçümler ile belirlenir.

Ülkemizde rüzgar ölçümleri, Orman ve Su İşleri Bakanlığına bağlı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi kurmak isteyen firmalar, üniversiteler ve tüzel kişiler tarafından yapılabilmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretim tesisi kurmak ve lisans almak isteyen tüzel kişiler; tesisin kurulacağı bölgede ölçüm istasyonu kurmak ve en az bir yıl süreyle ölçüm yapmak, ölçüm yapılmak istenen bölgenin rüzgar hızını, rüzgar yönünü, sıcaklığını, basıncını ve bağıl nemini ölçebilecek aygıtlar bulundurmak zorundadır. Kurulan ölçüm istasyonunda ölçüm direği yüksekliği en az 60 m olacak şekilde ölçümler 30 m ve ölçüm direğinin en üst seviyesinde olmak üzere minimum 2 adet yükseklikte yapılmalı ve yapılan ölçümler sonucu elde edilen rüzgar verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne iletilmelidir. Şekil 3.1'de örnek bir rüzgar ölçüm istasyonu gösterilmiştir (Leung ve ark., 2012).



Şekil 3.1. Rüzgar Ölçüm İstasyonu (Leung ve ark., 2012)

Bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için gerekli olan en önemli parametre rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı anemometre denilen aygıt ile ölçülmektedir. Rüzgar hız ölçümleri genellikle kepçeli anemometreler ile yapılmaktadır. Kepçeli anemometreler Şekil 3.2'de gösterildiği gibi genellikle metal üç adet kepçeden oluşmaktadır. Bu kepçelere çarpan rüzgar kepçelerin bağlı olduğu şaftı döndürür. Rüzgar hızının değişimi ile şaftta oluşan birim zamandaki dönme miktarına bağlı olarak rüzgar hızı belirlenir. Kepçeli anemometrelerde kepçeler farklı yönlere baktığı için rüzgar yönü ölçülen rüzgar hızını değiştirmemektedir.



Şekil 3.2. Kepçe Anemometre (Çolak ve ark., 2015).

Kepçeli anemometreler dışında rüzgar hızı pervaneli ve ultrasonik anemometreler ile de ölçülebilir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi pervaneli anemometrelerde kepçeli anemometrelerden farklı olarak rüzgar pervanelere çarparak şaftı döndürür. Bu anemometrelerde yatay ve dikey yönde esen rüzgar hızları ölçülebilmektedir.



Şekil 3.3. Pervaneli Anémomètre (Çolak ve ark., 2015).

Ultrasonik anemometreler Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ses dalgalarını dikey bir sabit yön boyunca iletebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ses dalgaları anemometrenin farklı uçları tarafından algılanıp bir mikro işlemcide işlenmekte ve rüzgar hızı ölçülmektedir. Bu anemometrelerin diğer anemometrelere göre avantajları hareketli parçalarının olmaması ve ani rüzgar değişimlerine tepkilerinin daha hızlı olmasıdır (Turhal, 2009).



Şekil 3.4. Ultrasonik Anemometre (Golding, 1976)

Bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için rüzgar hızının yanında rüzgar yönünü de belirlemek gereklidir. Rüzgar ölçüm istasyonlarında bulunan rüzgar yön ölçer cihazlar vasıtasıyla hakim rüzgar yönü ve yönlere göre esme sayısı belirlenmelidir. Rüzgar yön ölçerler rüzgar ölçüm istasyonlarında anemometrenin etkilenmemesi için anemometreden 1.5 ile 2.0 m aşağıya kurulmalıdır (Leung ve ark., 2012). Şekil 3.5 'te örnek bir rüzgar ölçer gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Rüzgar Yön Ölçer (Ergür, 2006)

3.1.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi için rüzgar santralleri kurmadan önce kurulumun yapılacağı bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek gerekmektedir. Bu potansiyeli belirlendikten sonra o bölgeye kurulacak uygun rüzgar türbinleri seçilebilmektedir. Rüzgar potansiyelinin belirlenmesi için sistemin kurulacağı bölgenin hız dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Bir bölgenin rüzgar hız dağılımının belirlenmesi için günümüzde Weibull ve Rayleigh dağılımı yöntemleri en sık kullanılan yöntemlerdir (Ulgen ve Hepbasli, 2002).

Bunlardan Weibull dağılımı yöntemi bir bölgenin rüzgar hız dağılımını belirlemek için kullanılan en yaygın ve ölçülen değerlere yakın sonuçlar veren iki parametreli bir yöntemdir. Weibull dağılım fonksiyonu aşağıdaki denklem ile belirtilmiştir:

$$f_w(v) = \frac{k}{c}.\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (1.1)$$

Bu denklemde;

f_w: boyutsuz Weibull şekil parametresi

v: rüzgar hızı

c: Weibull ölçek parametresi

şeklinde tanımlanmıştır (ECDGE, 2009).

Rüzgar hız dağılımının belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem Rayleigh hız dağılımı yöntemidir (Vural, 2011). Bu yöntem Weibull dağılım fonksiyonunun özel bir durumu olup k boyutsuz Weibull şekil parametresinin değeri 2 olarak kabul edilmektedir. Rayleigh dağılım fonksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir (Vural, 2011):

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

Burada;

v: ortalama rüzgar hızı şeklinde tanımlanmıştır.

3.2. Rüzgar Türbinleri

Havadaki kinetik enerji rüzgar türbinleri tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar türbinlerinin başka bir işlevi de rüzgar enerjisi kullanılarak mekanik enerji elde etmektir. Kısacası rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rüzgar türbinleri basit bir şekilde çalışır. Rüzgardaki enerji, kanatların hava kinetik enerjisine bağlı olduğu rotor çevrilerek mekanik enerjiye dönüştürülür. Rotor şaftının dönme hareketi bir dişli çark vasıtasıyla arttırılır ve mekanik enerji jeneratöre aktarıldıktan sonra elektrik enerjisine dönüştürülür.

Elektrik üretimi esnasında türbin rüzgarı kullanmak için türbini rüzgara yönlendirir ve rüzgar hızı limiti aşarsa fren sistemi türbini yavaşlatır ve durdurur. Güç kaynağı sağlanacaksa, voltaj transformatör kullanılarak şebeke voltaj seviyesine yükseltilir. Rüzgar enerjisinden daha fazla yararlanmak için rüzgar türbinleri bir kulenin tepesine monte edilir (Anonim,2018).

Tek makine güçleri genellikle 250 kW'ın üzerinde olan gelişmiş rüzgar türbinleri 2-3 kanatlı ve yatay eksenlidir. Rotor çapları 30-60 m arasında, kulelerinin yükseklikleri ise 30-70 m arasında değişmektedir. Temel çapının 15 metre olduğu bir rüzgar türbini yaklaşık olarak 176,71 m^2 alan kaplamaktadır.

3.3. Rüzgar Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Çok eski zamanlarda yel değirmenleri mekanik güç üretmek amacıyla kullanılmıştır. Rüzgar türbiniyle aynı işlevi gören yel değirmeninin bilinen ilk örneğinin 1180'lerde Fransa'nın kuzeyinde bir yerde kullanıldığı düşünülmektedir (Bir ve ark., 2012). James Blyth'in 1887 yılında İskoçya'da ilk denemesini yaptığı yel değirmenlerinden elektrik üretimi için ilk rüzgar türbini sistemini Charles F. Brush ise 1888'de ABD'de kurmuştur. Bu tarihte ortaya konan rüzgar türbinleri, bugüne kadar Almanya, Danimarka ve ABD gibi ülkelerin liderliğinde hızla geliştirilmeye devam ettirildi (Leung ve ark., 2012).

Rüzgar, insanlık tarihi boyunca toplumlar üzerinde önemli bir rol oynamıştır. Rüzgar enerjisinin yüzyıllar öncesinden kullanıldığı, gemilerdeki yelken uygulamaları ve yel değirmenlerinde tahıl işlenmesi ve su pompalarında kullanılması gibi örneklere dayandırılabilir. Rüzgar enerjisinden yararlanma yöntemleri tarihten günümüze farklılık gösterir. Çin, Tibet ve İran'da elektrik elde etme amacıyla yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 19.yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin kullanılmaya başlamasının ardından enerjiye duyulan talep arttı. Bu dönemde gittikçe yaygınlaşmaya başlayan elektrik jeneratörlerinde ihtiyaç duyulan mekanik enerji rüzgar türbinleri vasıtasıyla sağlanabileceği fikri, ilk rüzgar türbini çalışmalarının başlamasına imkân vermiştir (Kincay ve ark., 2009).

Charles F. Brush tarafından 1888 yılında Ohio'da elektrik üretmek için rüzgar türbini kullanımının en iyi örneklerinden birisi gerçekleştirildi. 12 kW gücündeki

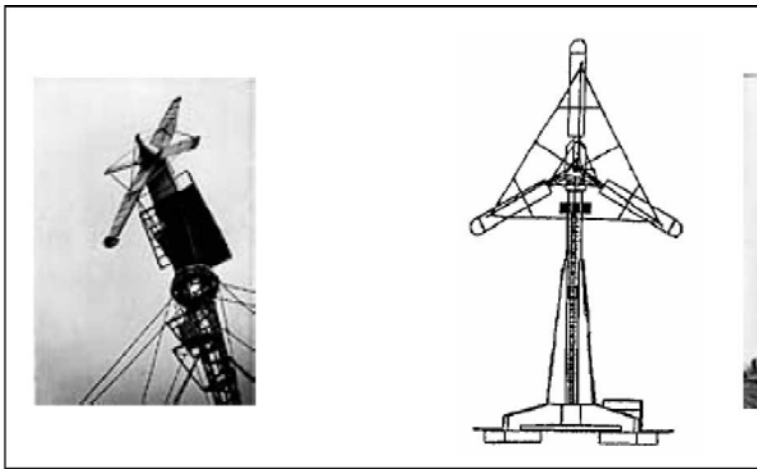
türbinin rotoru 17 metre çapında ve dişli bir sistem yardımıyla DC jeneratör için 500 rpm'lik bir hız elde edildi. Literatürde ilk olarak rüzgar enerjisini kullanarak elektrik elde eden kişi Danimarkalı Dane Poul La Cour'dur (Danish Wind History, 1999). 1891 yılında Dane Poul La Cour tarafından geliştirilen 4 kanatlı rüzgar türbininde ilkel aerodinamik profiller kullanıldı. 1918'de Danimarka'da elektrik üreten 120 adet türbin bulunmaktaydı. Bu türbinler toplamda 3 MW'lık bir kurulu güç oluşturarak Danimarka'nın elektrik gücünün % 3'ünü oluşturmuştur. Günümüzde 3 MW'lık güç tek bir türbin ile karşılanabilmektedir.

İkinci Dünya Savaşı sırasında elektrik kesintilerin önüne geçmek için Danimarkalı bilim adamları rüzgar enerjisi teknolojisini geliştirdiler. Özellikle 1941 yılında F.L. Smith firması tarafından geliştirilen sistemler bugünkü rüzgar türbinlerinin öncüleri olarak kabul görmüştür. F.L. Smith firması 2 ve 3 kanatlı rüzgar türbinleri imal etmişlerdir. İmal edilen bu türbinlerin en büyüğü 1941 yılında Vermont'ta yapılan 1,25 MW gücündeki Smith-Putnam türbinidir (Şekil 3.6). Yatay eksenli, 2 kanatlı ve yaklaşık 54 metre rotor çapına sahiptir (Turhal, 2009).



Şekil 3.6. Smith-Putnam Türbini

1950'li yıllardan sonra doğru akım jeneratörlerinin yerini alternatif enerji üreten asenkron makineler almaya başladı. La Cour'un yetiştirdiği Johannes Juul tarafından AC jeneratör üretimi ile ilgili ilk çalışmalar yapılmıştır (Ayaz, 2016). 1960 yılında, 200 kW kapasitesinde Gedser türbini Juul tarafından SEAS elektrik firması için Gedser 'de imal edilmiştir (Ayaz, 2016). İmal edilen türbinin 3 kanadı, elektromanyetik eğim sistemi ve asenkron jeneratörü bulunmaktaydı. Frenleme ve durdurma kontrol sistemine göre çalışan Gedser türbininde, aerodinamik üç fren sistemi bulunmaktadır. Bu frenleme sistemi günümüzde hala türbinlerde de kullanılmaktadır (Golding, 1976). Şekil 3.7'de Jull'un kullandığı alternatif akım üreten ilk jeneratör görülmektedir.



Şekil 3.7. Jull tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten jeneratör (Burton ve ark., 2001)

Aynı zamanda Alman Ulrich Hütter yeni bir yaklaşım geliştirdi. Rüzgar türbini iki yana sallanan bir göbek üzerindeki kuleye rüzgarı arkadan alacak şekilde monte edilen iki ince fiberglas kanattan oluşmakta ve Hütter'in türbini yüksek verime sahip olmasıyla tanınmaktadır (Ergür, 2006; ECDGE, 2009) Şekil 3.8'de örnek uygulama görülmektedir.



Şekil 3.8. Ulrich Hutter'in tasarladığı rüzgar türbini (Ayaz, 2016)

Dünya enerji gereksiniminin oldukça önemli bir bölümünü oluşturan fosil yakıtların kullanım sürelerinin sınırlı olması ve bu yakıtlardan enerji elde edilmesi esnasında çevreye verilen tahribat ve gelecek nesillerde enerji gereksinimi önemsendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmaktadır. Belirli ülkelerde hükümetlerin desteği ile ilave gelişmeler meydana gelmiştir. Kamu Kurumu Düzenleyici Politikaları (PURPA) yenilenebilir enerji sistemleri için vergi kredileriyle birleştirildiğinde rüzgar enerjisi kullanımının artmasına neden oldu. Özellikle ABD'de pek çok rüzgar çiftliği kuruldu. Danimarkalı firmaların rüzgarı ön cepheden karşılayabilen rüzgar türbini tasarımıyla türbinlerin enerji kapasiteleri neredeyse 30 katına çıktı. Adım adım geliştirilen teknoloji, 1990'ların sonunda en önemli yenilenebilir enerji kaynağı halini aldı (Vural, 2011).

3.4. Dünyada Rüzgar Enerjisi

Dünya üzerinde gelişen teknoloji ve sanayiyle birlikte elektrik ihtiyacı da artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamada kullanılan fosil yakıtlar, su gücü ve nükleer yakıtların çevreye verdiği zararlar insanlar için tahammül edilmez bir hale gelmiştir. İnsan hayatını olumsuz etkileyen ve doğaya zarar veren bu enerji üretim yöntemlerini en az miktarda kullanmak için yenilenebilir ve çevreye zararı olmayan enerji üretim

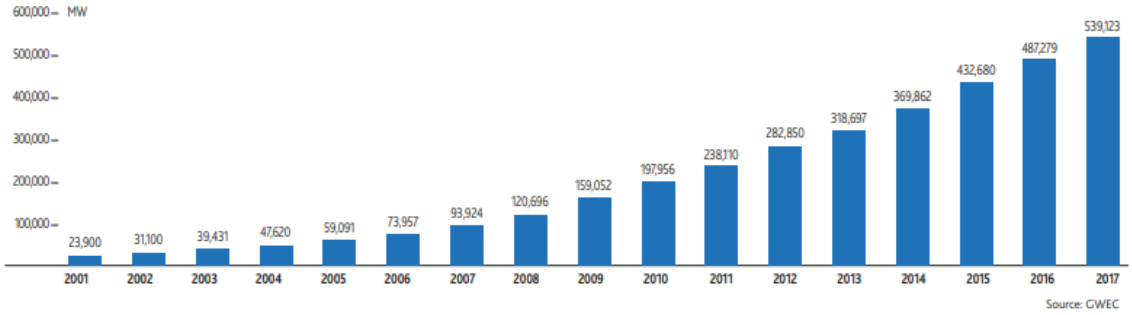
yöntemleri geliştirilmiştir. Bunların başında ise rüzgar gücünden elektrik üretimi gelmektedir. Rüzgar enerjisi çok uzun zamanlardan beri kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisiyle birlikte ise rüzgar türbinleri daha çok gelişmiştir. İlk zamanlarda güçleri 20-30 kW civarında olan türbinler şimdi 5-7 MW civarlarına kadar çıkmıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte daha da artacağı düşünülmektedir.

İnsanlığın geleceği için uzun vadede sürdürülebilir enerji tedarik sistemine geçiş, tükenir ve tükenmez kaynakların birlikte kullanımı ile mümkün olabilir. Bu noktada kilit iki nokta dünya nüfusunun artışı ve yerel-küresel çevre etkileridir. Dünyadaki rüzgar enerjisinin teknik potansiyeli 53.000 TW/h olarak tahmin edilmektedir. Daha kötümser tahminlerde ise 20.000 TW/h olarak gösterilmektedir (Vural, 2011).

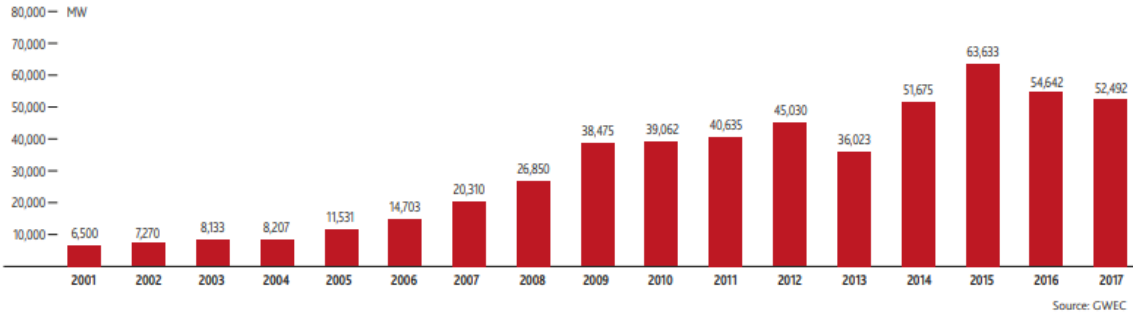
Rüzgar enerjisi günümüzde kullanımı hızla artan enerji türlerinde biri haline gelmiştir. Dünya üzerinde teknik potansiyel olarak mevcut olan rüzgar gücü dünya enerjisinin çok üzerindedir. Fakat ekonomik ve fiziksel sebeplerden dolayı bu enerjinin hepsinden yararlanmak mümkün değildir.

Günümüzde dünya üzerindeki rüzgar kurulu gücü yaklaşık olarak 486,749 GW seviyesine ulaşmıştır. Dünya üzerinde rüzgar enerjisi özellikle bazı ülkelerde önemli yatırımlara olanak sağlamıştır. Dünyadaki rüzgar enerjisi kullanımının %42,8'ini Çin, %15'ini ABD, %10'unu Almanya, %6,6'sını Hindistan ve %4,7'sini İspanya kullanmaktadır. Ayrıca, rüzgar enerjisi kullanımı yaygınlığı Kanada, İngiltere, Japonya, Romanya ve Türkiye'de gittikçe artmaktadır.

Dünya üzerinde kümülatif kurulu rüzgar gücü, Şekil. 3.9'da görüldüğü üzere 2001 yılından itibaren sürekli artış göstermiştir. 2001 yılında 23900 MW olan toplam güç, 2002 yılında 31100 MW, 2008 yılında 120725 MW ve 2015 yılında 396553 MW'a kadar çıkmıştır. 2014 yılında 396533 MW olan kurulu güç, 2015 yılında 432,419 MW, 2017 ise 539,123 MW değerine yükselmiştir (Global Wind Energy Council, 2017).



Şekil 3.9. Dünyadaki kümülatif kurulu rüzgar kapasitesinin yıllara göre değişimi (Global Wind Energy Council, 2017).



Şekil 3.10. Dünyada yıllık kurulan rüzgar kapasitesinin yıllara göre değişimi (Global Wind Energy Council, 2017).

3.4.1. Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

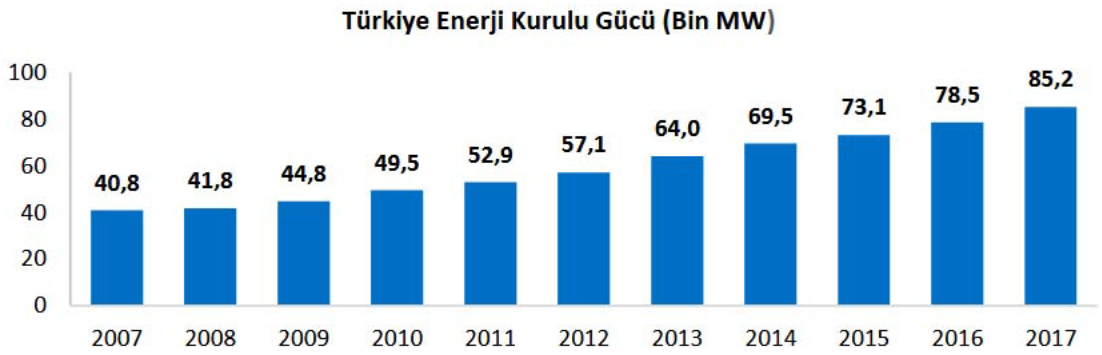
Rüzgar enerjisi sistemlerinin kullanılması ve geliştirilmesi, gelişmekte olan ülkeler için çok önemli bir enerji politikası olmuştur. Gelişmekte olan ülkeler çevresel etkileri ve arz güvenliğini dikkate alarak enerji üretmek zorundadır. Alt yapısı ve iletimi düşünüldüğünde rüzgar enerjisi diğer enerji türlerinden daha ekonomik bir yapıdadır (Mehel, 2009). Rüzgar türbinlerinin devreye girip elektrik üretmesi kolaydır. Özellikle nükleer ve termik santrallere göre daha kısa sürede ve daha ekonomik bir şekilde elektrik üretmektedir. Fosil yakıtların çevreye olan zararlarının azaltılması için fosil yakıt kullanan santrallerin azaltılması gerekmektedir. Bu santrallerin azaltılması için ise mevcut sisteme rüzgar enerji sistemlerinin entegre edilmesi daha kolaydır ve çevre için çok yararlıdır. Rüzgardan elektrik elde edilmesi için gerekli rüzgar potansiyellerinin incelenmesi ve belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgar potansiyelinin verimli olduğu yerlerin rüzgar türbini kurmak için uygun olup olmadığı araştırılmalıdır. Çünkü rüzgar potansiyeli uygun olsa bile türbinlerin kurulması için gerekli çevresel ve ekonomik

şartlar uygun olmayabilir. Bunlar iyice araştırılmalı ve bunların yanında rüzgar hızı, ayrıntılı rüzgar potansiyeli sonuçları değerlendirilip incelenmelidir.

Türkiye'de rüzgar ölçümleri, diğer meteorolojik (sıcaklık, radyasyon vb.) ölçümleri ile beraber Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından yapılmaktadır. 1930'lardan beri rüzgar hızı, yönü ve frekansı DMİ tarafından ülkenin her yerinde ölçülmüştür (Mehel, 2009). Türkiye'de halen işletilmekte olan ilk rüzgar enerji santrali Şubat 1998'de İzmir'in Çeşme ilçesindeki Germiyan köyünde otoprodüktör statüsünde kurulmuştur. Her biri 500 kW olan ve 1.5 MW gücünde üç türbin bulunmaktadır. Bunu takiben, Çeşme ilçesinin Alaçatı köyünde 7,2 MW'lık 12 türbinden oluşan ikinci bir rüzgar santrali devreye alındı. 25 Haziran 2000 tarihinde Çanakkale Bozcaada'da 17 adet rüzgar türbininden oluşan 10,2 MW gücünde olan üçüncü bir santral devreye girmiştir. Ülkemizde işletmede olan enerji tesislerinin kaynak kapasiteleri ve yıllara göre dağılımı Çizelge 3.1'de, grafik gösterimi ise Şekil 3.11'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. 2017 yılında ülkemizin elektrik enerjisi kurulu gücü (MW) (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2017)

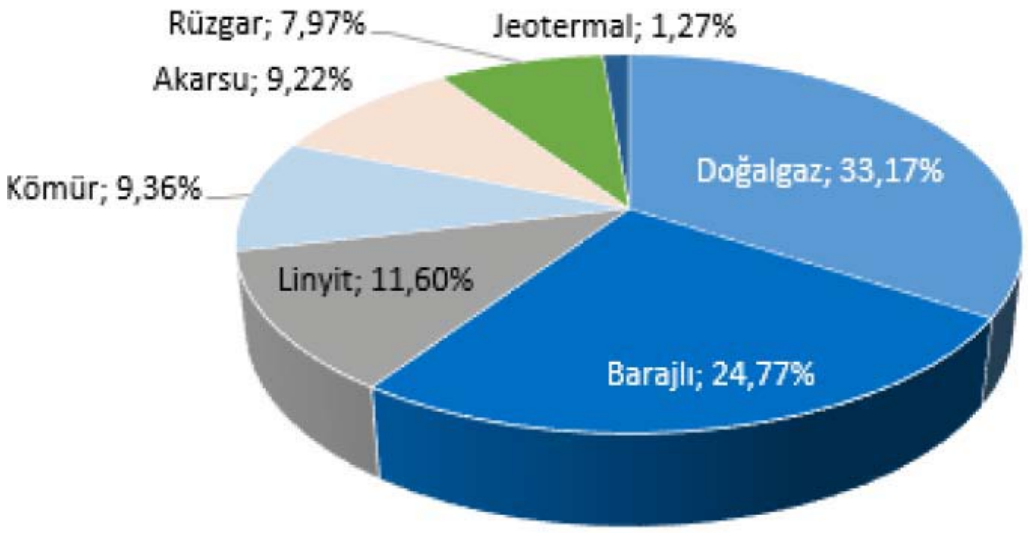
Yıl		Toplam		Kömür	Sıvı yakıtlar	Doğal gaz	Hidrolik	Yenilenebilir Enerji ve Atıklar
2007		**191.558**		27,9	3,4	49,6	18,7	0,4
2008		**198.418**		29,1	3,8	49,7	16,8	0,6
2009		**194.813**		28,6	2,5	49,3	18,5	1,2
2010		**211.208**		26,1	1,0	46,5	24,5	1,9
2011		**229.395**		28,8	0,4	45,4	22,8	2,6
2012		**239.497**		28,4	0,7	43,6	24,2	3,1
2013		**240.154**		26,6	0,7	43,8	24,7	4,2
2014		**251.963**		30,2	0,9	47,9	16,1	4,9
2015		**261.783**		29,1	0,9	37,9	25,6	6,5
2016		**274.408**		33,7	0,7	32,5	24,5	8,6
2017		**297.278**		32,8	0,4	37,2	19,6	10,0



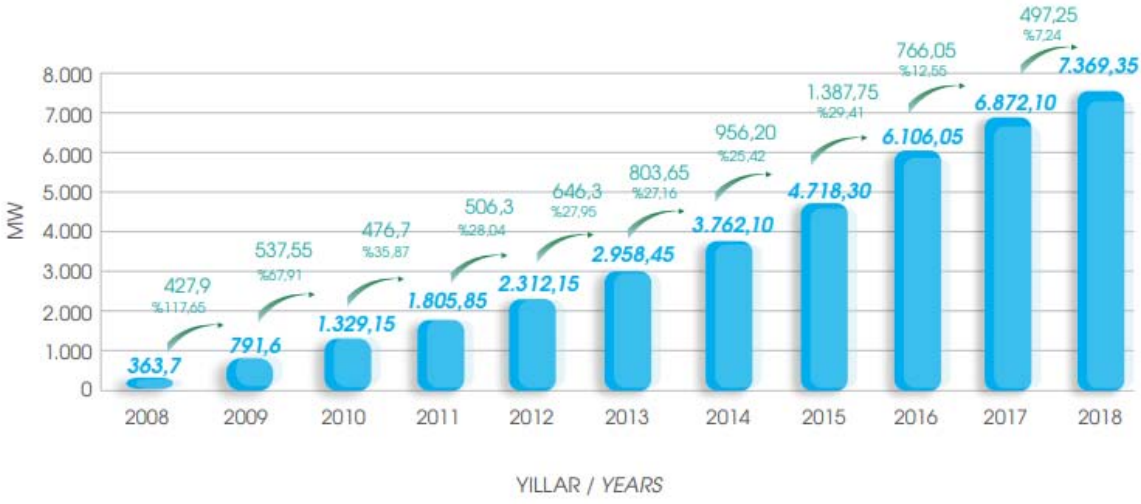
Şekil 3.11. 2017 yılında ülkemizde kurulu elektrik enerjisi gücü (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2016)

Ülkemizde nüfusun artmasıyla paralel olarak artan enerji ihtiyacının karşılanması için çeşitli kuruluşlar tarafından önemli yatırımlar gerçekleştirilmiş; böylece elektrik kurulu gücü 2007 yılının sonunda 41.000 MW iken 2017'de bu değer 85.200 MW'a çıkmıştır. Türkiye'nin elektirik kurulu gücü böylece 10 yılda %108 oranında artmıştır. 2016'da toplam 5.900 MW'lık, 2017 yılının ilk 9 ayında ise toplam 3.600 MW'lık kurulu gücünde santral devreye girmiştir. 2016 yılında toplam kurulu güçler arasında en çok kurulum artışı güneş enerjisinde meydana gelmiştir. Güneş enerjisi kurulu gücü bir önceki seneye göre üç kattan fazla artarak 2017'nin sonunda 2.642 MW'a ulaşmıştır. Toplam kurulu gücün 28.637 MW'ı doğal gaz, 19.776 MW'ı barajlar, 9.773 MW'ı linyit, 8.794 MW'ı ithal kömür, 7.497 MW'ı akarsular ve 6.516 MW'ı rüzgardan elde edilmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) "2015-2019 yılı Stratejik Planı" na göre 2019' a kadar hidrolik için 32.000 MW, rüzgar için 10.000 MW, güneş için 3.000 MW, jeotermal için 700 MW ve biyokütle için 700 MW'lık kurulu güce ulaşılması hedeflenmektedir.

Ülkenin kurulu gücünün 2023 yılında 100.000 MW'a ulaşması ve 5.000 MW'lık güneş ve 20.000 MW'lık rüzgar enerjisi üretilmesi beklenmektedir. Bu hedefin gerçekleştirebilmesi için güneşte bugünkü kurulu gücün yaklaşık 5; rüzgarda ise 3,5 kat arttırılması gerekmektedir. Mevcut görünümde kurulu güç iletisinde yenilenebilir enerjinin payı % 43 dolayındayken, bu sayının önümüzdeki dönemlerde % 50'ye ulaşması beklenmektedir (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2016).

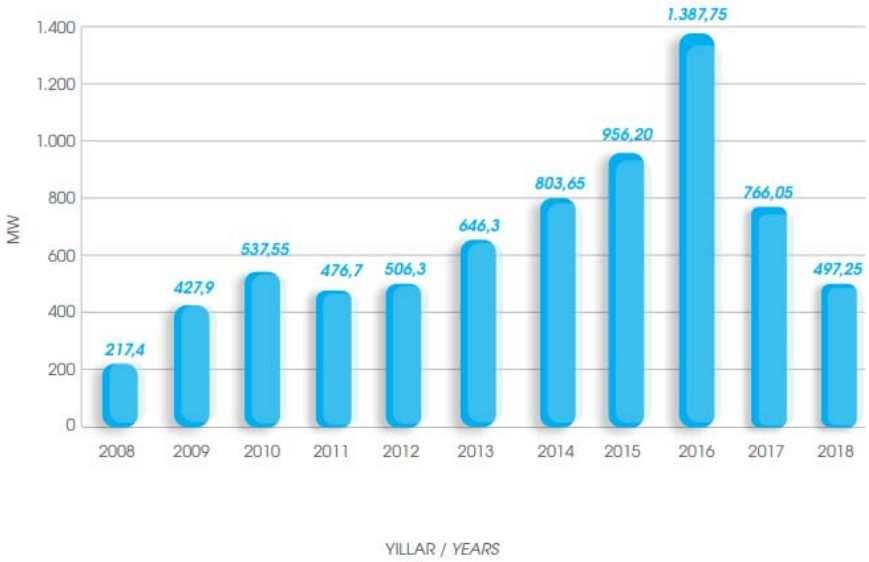


Şekil 3.12. 2017 Yılı Sonu İtibarıyla Türkiye'de Kaynak Bazında Kurulu Güç Oranı (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2017)



Şekil 3.13. Türkiye'deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum (Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, 2018)

Ülkemizde rüzgar enerjisi kümülatif kurulum gücü sürekli bir artış göstermiştir. Planlanan hedefler doğrultusunda bu kurulu güç ilerleyen yıllarda daha çok artacaktır. Hem ülke enerjisinin karşılanmasında rüzgar enerjisinin payı da daha çok artacaktır. Şekil 3.14'de Türkiye'de 2017 yılının verileri değerlendirildiğinde, rüzgara verilen önemin gitgide arttığının göstergesidir.



Şekil 3.14. 2018 yılında Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin kurulumunun yıllara göre dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).



Şekil 3.15. 2018 yılında Türkiye'de işletmedeki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yatırımcılara göre dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).



Şekil 3.16. 2018 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından türbin markalarına göre dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).

Türkiye'de rüzgar enerji santrallerine yatırım yapan firmaların toplam rüzgar kurulu güçleri Şekil 3.15'de verilmiştir. Şekil 3.16, Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinde kullanılan türbinlerin markalarını göstermektedir. Nordex, Vestas, Enercon ve gibi türbin markaları Türkiye pazarında önemli yere sahiptir.

Türkiye'nin rüzgar haritası oluşturmasında Avrupa rüzgar haritasının hazırlanmasında kullanılan Danimarkalı Meteoroloji Teşkilatı'nın WASP (Rüzgar Atlası Analizi ve Uygulama Programı) yazılım paketi kullanıldı. Bu haritalar için Türkiye'de yapılan 96 araştırmacı saha meteoroloji istasyonu için benzer dağılım gösteren çalışmalar, bu istasyondan alınan 45 ölçüm noktasından elde edilen veriler kullanılarak yapılmıştır.



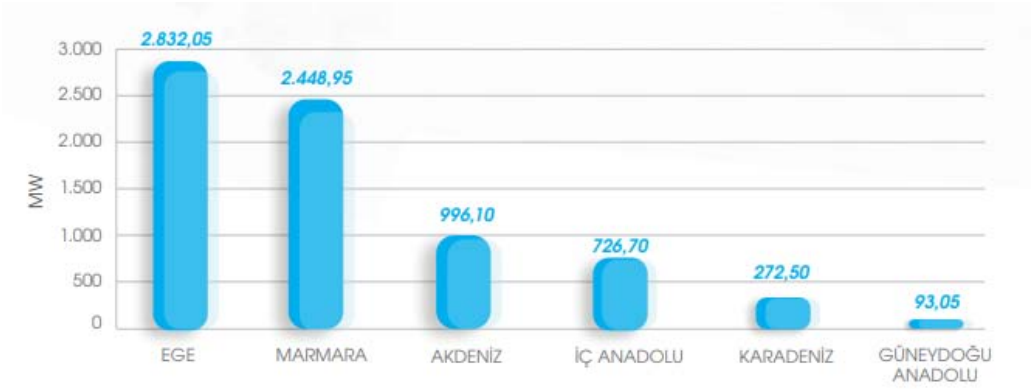
Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansyeieri										
	Kapalı Araziler		Açık Araziler		Kıyılar		Açık Deniz		Tepe ve Bayırlar	
	Ms	Ws	Ms	Ws	Ms	Ws	Ms	Ws	Ms	Ws
	> 6,0	> 250	> 7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9,0	> 800	> 11,5	> 1800
	5,0-6,0	150-250	6,5-7,5	300-500	7,0-8,5	400-700	8,0-9,0	600-800	10,0-11,5	1200-1800
	4,5-5,0	100-150	5,5-6,5	200-300	6,0-7,0	250-400	7,0-8,0	400-600	8,5-10,0	700-1200
	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5,0-6,0	150-250	5,5-7,0	200-400	7,5-8,5	400-700
	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5,0	< 150	< 5,5	< 200	< 7,0	< 400

Şekil 3.17. Türkiye rüzgar haritası (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2018)

Seçilen rüzgar istasyonları için hesaplanan "ortalama rüzgar hızları (m/s)" ve "ortalama enerji yoğunlukları (W/m^2)" kullanılarak 50 m yükseklik için rüzgar haritası oluşturulmuştur. Hazırlanan haritaya göre, Marmara ve Doğu Akdeniz kıyıları ile Batı Karadeniz ve Ege kıyı bölgelerinde rüzgar enerji potansiyeli en üst düzeydedir (Şekil 3.17). Buradan hareketle bu bölgelerimizde daha fazla rüzgar enerjisi projeleri yapılabileceği sonucuna varılabilir.

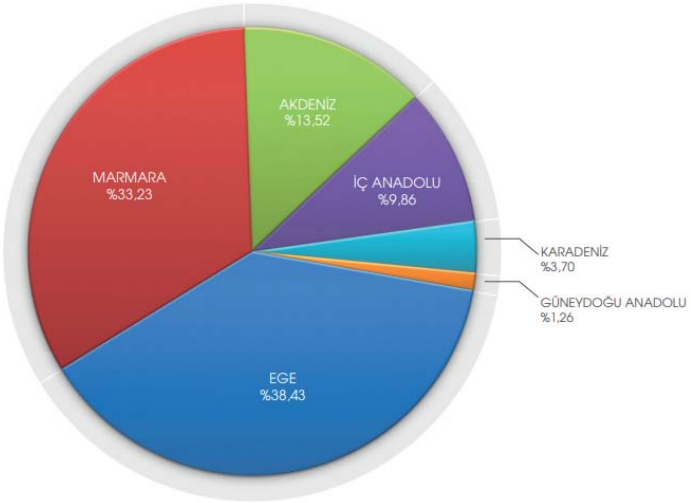
Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin (EWEA) oluşturduğu sınıflandırmada, rüzgar enerjisinden faydalanılacak yükseklikteki ortalama rüzgar hızları sırasıyla;

- 6,5 m/s için "iyiye yakın",
- 7,5 için m/s "iyi"
- 8,5 m/s için ise "çok iyi" olarak belirtilmiştir (Mehel, 2009).

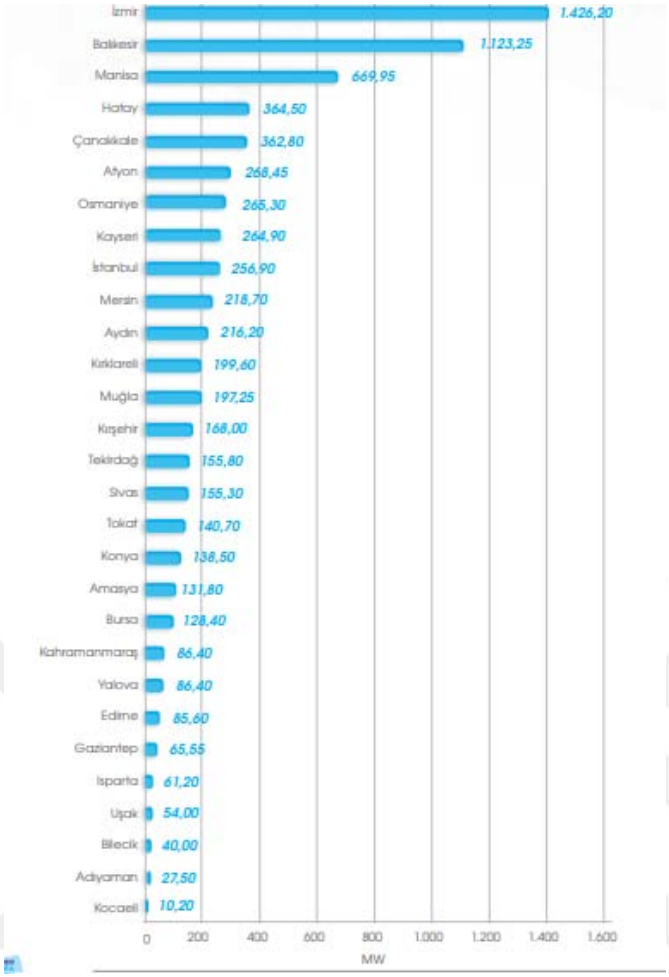


Şekil 3.18. 2018 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).

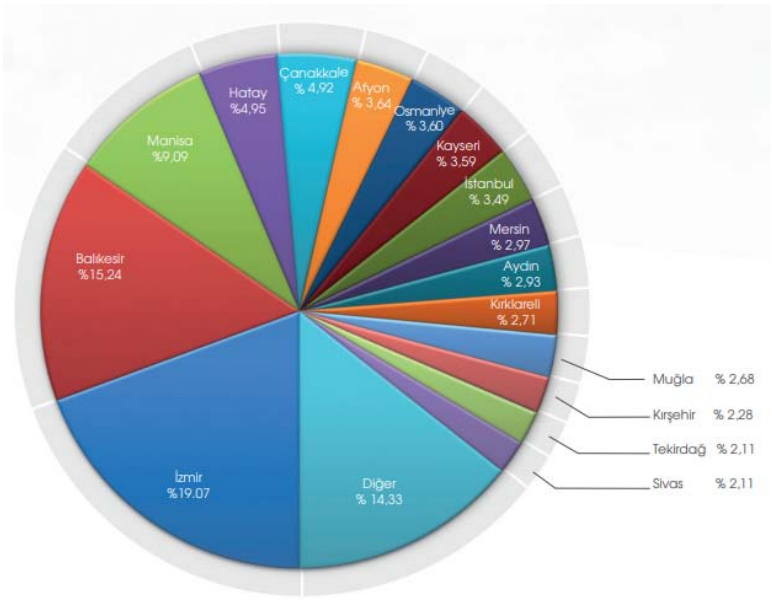
Şekil 3.14'e göre Ege ve Marmara bölgeleri rüzgar enerji santrallerine sahip olma konusunda başı çekmektedir. Bu da Türkiye geneli değerlendirildiğinde en fazla rüzgar potansiyeline sahip bölgelerin Marmara ve Ege bölgeleri olduğunu kanıtlar niteliktedir. Şekil 3.19'da kurulu güç bakımından Türkiye'de işletilen rüzgar enerji santrallerinin bölgelere göre dağılımı grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.19. 2017 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).



Şekil 3.20. Türkiye'de 2017 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).



Şekil 3.21. 2018 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı (Turkısh Wind Energy Asociation, 2018).

Şekil 3.20 ve 3.21'de ise şehir bazında kurulu rüzgar güçleri ile ilgili istatistiki veriler verilmiştir. İstatistiki verilere göre İzmir ili 1.426,20 MW kurulu gücü ile Türkiye'deki en fazla rüzgar enerji santraline sahip olan ilimizdir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri türbin jeneratör seti, türbin rotoru, hava akış yolu, türbin gücü, jeneratör sürücü yolu, güç kaynağı modu ve türbin inşaatına göre altı farklı sınıfta incelenebilir.



Şekil 4.1. Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması (Elibüyük ve Üçgül)

4.1.1. Yatay Eksenli Türbinler

Hemen hemen tüm ticari türbinler bu gruba dahil edilmiştir. Türbin yatay durumdadır. Rotor, dişli, jeneratör ve diğer ekipmanlar bir kuleye yatay olarak bağlanır. 1 MW'tan büyük türbinler, transformatördeki kulenin tepesindeki türbin gövdesinde bulunur. Daha küçük tarafta, transformatör ızgara bağlantı sistemleriyle birlikte zeminde yer almaktadır. Rotora bağlanan kanat sayısı iki veya üçtür (Aydın, 2003).

Türbinlerden üç kanatlı olanlar üretim açısından daha az istikrarlı, değişimleri ve sesleri daha azdır fakat bunların yanında iki kanatlılara göre maliyeti daha yüksek meblağlardadır. Önceleri rotorlar daha çok metal plakalardan üretilirken, günümüzde hafif kompozit malzemelerle üretimi gerçekleştirilmektedir. Rotor genellikle kulenin önündedir. Rotor kulenin arkasında bulunuyorsa, kule tarafından oluşturulan türbülans türbin verimliliğini azaltır. Rotorun türbinin önündeki rüzgar yönüne göre

ayarlanabilmesi için, bir elektrik kılavuzu bulunmakta ve bu kılavuz kuleyle türbin gövdesinin arasına yerleştirilmiştir. Kule çoğunlukla çelik strüktürden meydana gelmiştir.

Jeneratör sabitse, rotor hızının kontrolü sağlanmalıdır. Aksi takdirde, aşırı bir rüzgarda, rotor hızının kontrolünü sağlamak mümkün olmaz bu da kazalara neden olur.

Rotorun hızının kontrolü iki farklı biçimde yapılabilir. İlk olarak rotor kanadı tasarlanırken aerodinamik ilkeler gözetilmesiyle, rüzgar hızı belli bir seviyeyi (örnek; 30 m/s) üzerine çıktığında bile türbinin hızı sabitlenir. İkinci olaraksa rüzgar yönünü ve açısını bir hidrolik sistem (eğim kontrolü) ile değiştirmektir. Rüzâr hızının aşırı olduğu zamanlarda kanatlar minimum dirençle rüzgara göre ayarlanabilir ve bu şekilde türbin hızının belli bir hız seviyesinin üstüne çıkması engellenir. Değişimi mümkün olan rotor kanatları sabit olanlara karşı bir diğer artısı, düşük rüzgar hızlarında bile yüksek verimle çalışır.

Teknolojideki bir diğer gelişmeyse, yeni jeneratörlerin değişken hızlara sahip olmasıdır. Böylece, aşırı rüzgarlarda verimli bir biçimde enerji üretimi sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, değişken hızlara sahip jeneratörler sabit hızlı jeneratörlerden daha yüksek fiyatlıdır. Ayrıca, çıkış frekansı elektronik olarak 50 Hz'e sabitlenmeli ve böylece elektrik şebekeye bağlanmalıdır. Rotor ve jeneratör arasındaki vites, türbin hızını jeneratörün tasarım hızına yükseltmek için kullanılır, elbetteki bu maliyet ve bakım giderlerinin artmasına neden olur. Son zamanlarda, rotor milini doğrudan bir dişli çark gerekmeden özel tasarıma sahip jeneretörlere bağlamak mümkün kılınmıştır. Jeneratör fiyatının biraz daha fazla olmasına rağmen, dişli çarkların ortadan kaldırılması ve bakım maliyetlerindeki azalmaktadır (Aydın, 2003).

Mevcut ticari rüzgar türbinlerinin çoğu yatay eksenli türbinli ve kanatlar rüzgar akışına paralel dönüş eksenlidir. Bu tür türbinlerin avantajı, yüksek türbin verimliliği ve yüksek güç yoğunluğu, düşük devreye alma hızı ve birim çıkış gücüdür. Düşey eksene sahip rüzgar türbinleri, kanatlar zemin eksenine dik olacak şekilde dikey bir eksen doğrultusunda dönmektedir. Düşey eksende dönen türbinlerin avantajlı oldukları en önemli kısım, türbinin rüzgarı her açıdan rahatlıkla alması ve hiçbir şekilde bir sapma kontrolüne bir gereksinim duymamasıdır. Jeneratör, dişli kutusu ve diğer ana parçalar

zeminde olacağından, kulenin tasarımı ve yapısı basitleştirilmiştir. Bu türbin maliyetini azaltır.

4.1.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu türbinler rüzgara dik gelecek şekilde düşey doğultuda dönerler. Kanat kirişi, dönüş eksenine dik olarak düzenlenmiştir. Dönüş, kanatların dış ve iç yüzeyleri arasında oluşan çekme kuvveti farkından kaynaklanır. Darrieus ve Savonius türü gibi tipleri mevcuttur. Üretimleri daha çok deneysel amaçlıdır. Şekil 3.4'te Darrieus tipine örnek olarak gösterilmiştir.

Bu türbinlerin avantajları şöyledir:

- Jeneratör ve şanzıman zemine yerleştirildiğinden türbini kuleye yerleştirmek gerekli değildir. Yani kuleye maliyet yoktur.
- Türbinin mili dışında kalan parçaların bakım ve onarımları kolaydır.
- Ortaya çıkan güç zemin hizasında olduğu için taşınması daha rahattır.

Dezavantajlarınıysa şöyle sıralayabiliriz:

- Zemine yakınlığı sebebiyle, düşük noktalarda rüzgar hızları da düşük olmakta.
- Kanatlarının yere yakın olması, düşük rüzgar hızına sahip olmalarından ötürü verimlilik azaltmaktadır.
- İlk hareket, çalışmaya başlamak için bir motor tarafından verilmelidir, bu nedenle ilk hareket motoruna ihtiyaç duyarç
- Yerde durabilmek için tellerle sabitlenmelidir, bu pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değiştirilmesi gerektiğinde, tüm makine yatırılmalıdır (Gasch ve Twele, 2012).



Şekil 4.2. Düşey eksenli düz tip bir darrieus rüzgar türbini

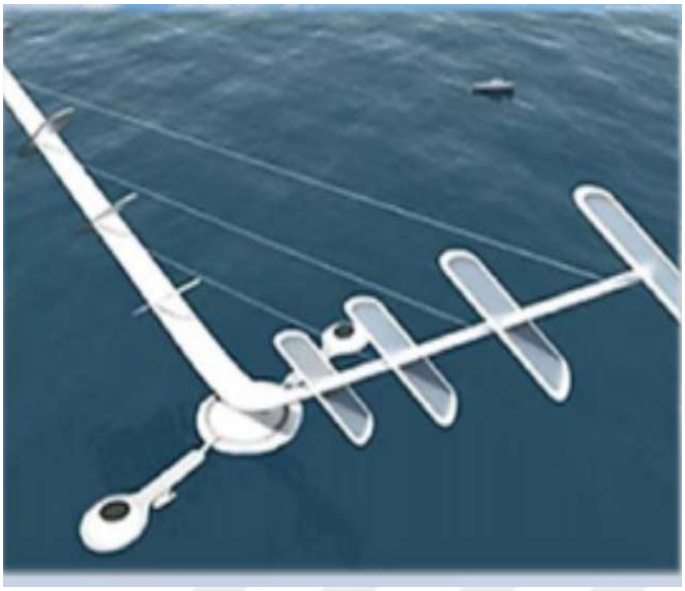
Ancak, dikey eksene sahip rüzgar türbinleri, başlatma sırasında bıçakları döndürmek için harici bir enerji kaynağı gerektirir. Rüzgar türbininin ekseni, yalnızca zemindeki tek bir uçtan desteklendiğinden, maksimum yüksekliği sınırlıdır. Düşük rüzgar enerjisi verimliliği nedeniyle dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kullanımı çok düşüktür (Avcı ve Yılmaz, 2012).

Çizelge 4.1. Tasarımlarına göre rüzgar tribünlerinin karşılaştırılması

Yatay Eksenli Rüzgar Türbini	**Dikey Eksenli Rüzgar Türbini**
Rüzgarın hızına ve yönüne göre kanatların açısı ve yönü ayarlanır. Böylece rüzgardan maksimum seviyede faydalanılır.	Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için bu elemanların bakımı kolaydır
Verimi yüksektir	Kuleye monte edilmesi gerekmez.
Kule sayesinde daha fazla rüzgar gücü elde edilir.	Rüzgarı her yönden aldığı için türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur.
Bölgenin yapısına göre tek kanatlı veya çok kanatlı tasarlanabilir.	Enerji toprak seviyesinde elde edildiğinden nakli daha kolaydır
Kule ve kanatların maliyeti daha yüksektir. Montajı daha zordur.	Yere yakın olduklarından rüzgar hızı düşüktür.
Çevre radar cihazlarında sinyal karışıklığı aratabilir.	Verimi düşük
Görüntü ve ses kirliliği yaratır.	Bir motor vasıtasıyla ilk hareketin verilmesi gerekir. Türbin miline müdahale zordur.
Ekstra kontrol mekanizmaları gerektirir.	Ayakta durabilmesi için tel desteği gerekir. Bu da maliyeti arttırır.

4.1.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Bu tip rüzgar türbinleri rüzgar doğrultusuna belli bir açı ile dönme eksenleri konumlandırılmıştır. Dönme eksenleri, rüzgar yönünde bir açı yapan türbinlerdir. Bu tür türbin, bıçaklar ve dönme eksenleri arasında belirli bir açıya sahiptir. Verimleri düşüktür ve yaygın kullanım alanı yoktur. Son yıllarda güç elektroniği alanındaki gelişmeler sonucunda rüzgar enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan teknikler artmış ve gelişmiştir. Bu gelişmeler, daha verimli türbinlerin tasarlanmasını ve inşasını sağlamıştır.



Şekil 4.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

4.1.4. Rüzgar Türbininin Gücü

Rüzgar türbinlerini, nominal güç kapasitesi esas alınarak birkaç farklı gruba ayırmak mümkündür. Bunlar çok büyük, büyük orta küçük ve mikro rüzgar türbinleridir.

Mikro rüzgar türbinlerinin detaylı bir tanımı olmadığı için, birkaç kW'dan daha az güçteki türbinlere mikro-türbinler denir. Mikro türbinler, özellikle elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde kullanılır. Gelişmekte olan ülkelerde sokak aydınlatma, su pompaları ve uzak alanlardaki konutlarda kullanılabilir. Düşük başlangıç rüzgar hızlarından dolayı dünyanın birçok yerinde kullanılabilirler.

100 kW'ın altında olan rüzgar türbinleri küçük rüzgar türbinleri olarak kabul edilmektedir. Küçük rüzgar türbinleri yaygın biçimde konut, çiftlik, kırsal alanlarda bulunan su pompalama istasyonları ve telefon santralleri gibi diğer uygulama alanlarında kullanılır. Dağıtılmış küçük rüzgar türbinleri iletim hattı kapasitesi ihtiyacını arttırmaktan kaçınan bölgelerde elektrik teminini arttırabilir.

Rüzgar türbinleri içinde en yaygın olanlarıysa 100 kW - 1 MW arasında değişen orta boydaki türbinlerdir. Aynı zamanda orta boy türbinler hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız olarak kullanılabilir.

10 MW'ın üstünde olan rüzgar türbinleri çok büyük rüzgar türbinleri olarak anılır. Ancak bu büyük türbinler henüz araştırma geliştirme aşamasındadır (Avcı ve Yılmaz, 2012).

4.1.5. Doğrudan Sürüşlü ve Dişli Kutulu Rüzgar Türbinleri

Jeneratör sistemindeki aktarım organlarına göre rüzgar türbini doğrudan sürüşlü veya dişli kutulu olarak ikiye ayrılabilir. Jeneratör rotoru dönme hızını arttırarak yüksek bir güç çıkışı elde etmek için dişli kutulu rüzgar türbininde çoğunlukla çok aşamalı bir dişli kutusu bulunmaktadır. Bu kutu kanat rotorununda bağlı olduğu düşük hızlı şafttaki dönme hızını alıp jeneratör rotorunun bağlı olduğu yüksek hızdaki şafta iletir. Dişli sistemin avantajı düşük maliyeti, küçük boyutu ve ağırlığıdır. Ancak rüzgar türbininin güvenilirliğini azaltırken gürültüsünü ve mekanik kayıplarını da arttırır.

Dişli kutusu olmadığındaysa jeneratörün içinde bulunan şaftı doğrudan bir biçimde kanat rotoruna bağlanmaktadır. Bu nedenle, doğrudan sürüşlü sistemin enerji verimliliği, güvenilirliği ve tasarım sadeliği daha yüksektir (Avcı ve Yılmaz, 2012).

4.1.6. Şebekeye Bağlı ve Şebekeden Yalıtılmış Rüzgar Türbinleri

Bu tip türbinler hem şebekeye bağlı hem de şebekeden ayrı uygulamalar için kullanılabilir. Orta boy rüzgar türbinlerinin birçoğu ve büyük boy rüzgar türbinlerininse neredeyse tamamı şebekeye bağlı uygulamalar kapsamında kullanılır. Şebekeye bağlı uygulamanın en önemli avantajı enerji depolama sorununun olmamasıdır.

Küçük rüzgar türbinlerinin büyük bir kısmıysa şebekeden yalıtılmış olarak kullanılır. Rüzgar gücünün kesintili olmasından dolayı şebekeden yalıtılmış rüzgar türbinlerinin ürettiği güç, kısa zaman aralıklarında önemli miktarlarda değişiklik gösterebilir (Avcı ve Yılmaz, 2012).

4.1.7. Denizde ve Karada Kurulan Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinlerinin karada kurulması, düşük temel masrafı, şebeke ile kolay entegrasyon, kule inşası ve türbinlerin montajının düşük maliyeti ve bakım-işletim için

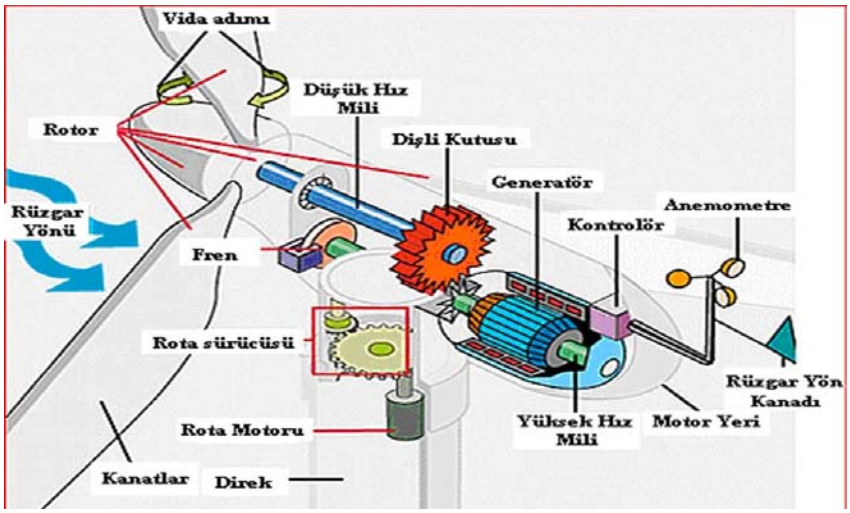
kolay erişim gibi birçok avantajı vardır. Deniz üzerinde kurulanlarıysa daha iyi bir rüzgar kaynağına sahip olmasından dolayı yüksek voltajlarda güç üretimi yapabilirler ve kara üzerinde kurulanlara kıyasla yıllık çalışma saatleri çok daha yüksek, ayrıca çevreden kaynaklanan kısıtlamalar daha az önem arzetmektedir (Avcı ve Yılmaz, 2012).



Şekil 4.4. Denizde ve karada kurulan rüzgar türbinleri

4.2. Rüzgar Türbinlerinin Bileşenleri

Bu bölümde bir rüzgar türbininde bulunan parçalar detaylı olarak anlatılmıştır. Rüzgar türbinleri, kinetik enerjiden elektrik enerjisi elde etmek için gerekli olan birtakım parçalar içermektedirler. Şekil 4.5.'de bir rüzgar türbinin iç yapısında bulunan parçalar verilmiştir.



Şekil 4.5. Türbinin iç yapısı (Ergür, 2006).

4.2.1. Kanatlar

Kanatlar, rüzgar eserken türbin kanatlarında oluşturduğu kaldırma kuvveti prensibiyle çalışırlar. Dönen kanat sistemleri rüzgardaki kinetik enerjiyi rotor kısmına aktarır. Gelişmiş rüzgar türbinlerinde kanatların boyu 35 metreden daha uzun olabilirler. Rüzgar türbinlerinin kanat yapısı; alüminyumdan, titandan, çelikten, takviye elyaf ile güçlendirilmiş plastik ve ağaç gibi çeşitli malzemelerden olabilir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatları genellikle cam elyafı ile takviye edilmiş polyester veya cam elyaflı plastikten imal edilir. Çelikten imal edilen kanatların eğilmeye mukavemeti iyi olmasına rağmen korozyon problemi meydana gelmektedir. Alüminyum kanatların, çelik kanatlara göre hafif olması, yorulma dayanımlarının iyi ve korozyon olayına karşı daha mukavim olmaları alüminyumu cazip kılar. Alüminyum malzemesinin dezavantajı; malzemenin çabuk burkulması, imalat biçiminin zor ve pahalı olmasıdır.

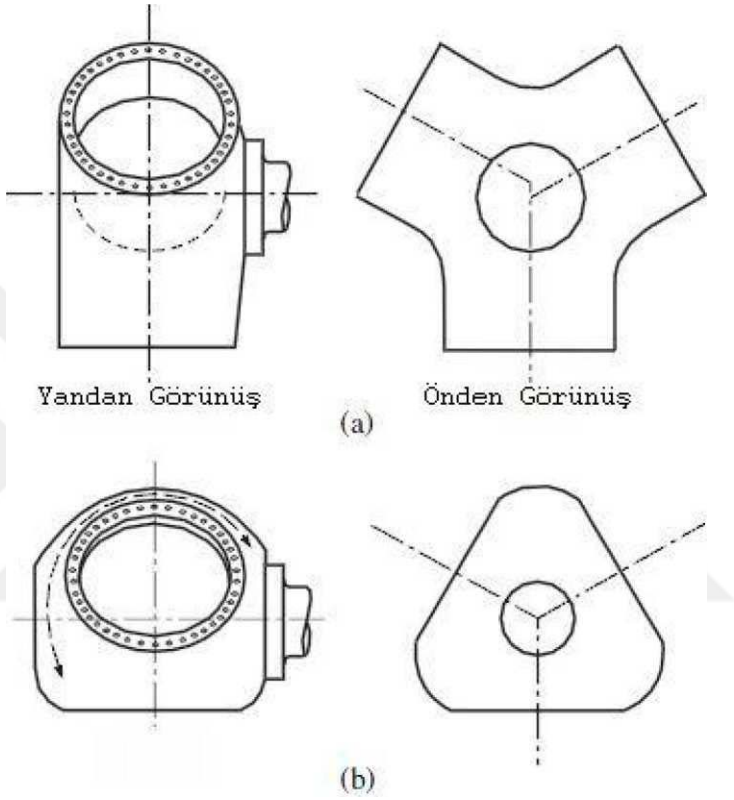


Şekil 4.6. Türbin kanatları

4.2.2. Rotor

Rotor kanatların birleştiği merkezdir. Rotor göbeği çoğunlukla küreye benzer grafit demirden meydana gelir. Eskiden değişik sayılarda kanatlı sistemler denenmiş olsa da bugün yalnızca iki veya üç kanatlı sistemlerin kullanımı vardır. Üç kanatlı rotor sürekli (istikrarlı) enerji sağlar ve gürültüsüz çalışır, ancak maliyeti yüksektir. Sistemin merkezi rotor şaftına bağlıdır. Rotor çapı büyüdükçe üretilen elektrik kapasitesi de artmaktadır. Rotor çapı türbinin aldığı rüzgar alanıdır. Rotorlar önceden genellikle metalden imal edilirken, yeni nesil rotorlar kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Rotorlar çoğunlukla kulenin en ön kısmında bulunur ve türbin önünde rüzgarın geliş yönüne göre ayarlanması için elektrikli yönlendiriciler bulunmaktadır. Aşağıdaki

şekilde gösterildiği gibi üçlü silindirik veya küresel yapıda olacak şekilde imal edilebilirler (Burton ve ark., 2001). Bir flanş bağlantısı ile ana şafta takılır. Yapı içindeki kanatları dipleri ve mil yatağı aralığının bakımı sırasında rahat bir çalışma ortamı sağlanabilmesi için göbek genelde iki kişinin sığabileceği yeterli genişlikte yapılır.



Şekil 4.7. (a) Üçlü silindirik göbek (b) küresel göbek (Burton ve ark., 2001).

4.2.3. Kanat Açısı Sürücüsü

Rüzgar hızı enerji üretmek için çok hızlı veya çok düşük veyahut rüzgar hızı değişkenlik gösterdiğinde, rotor kısmının dönmesini önlemek amacı ile kanatların rüzgara karşı açıları değiştirilir ve oluşturulan rüzgar kuvvetinin değiştirilmesiyle hız kontrolü yapılır.

4.2.4. Sapma Sürücüsü

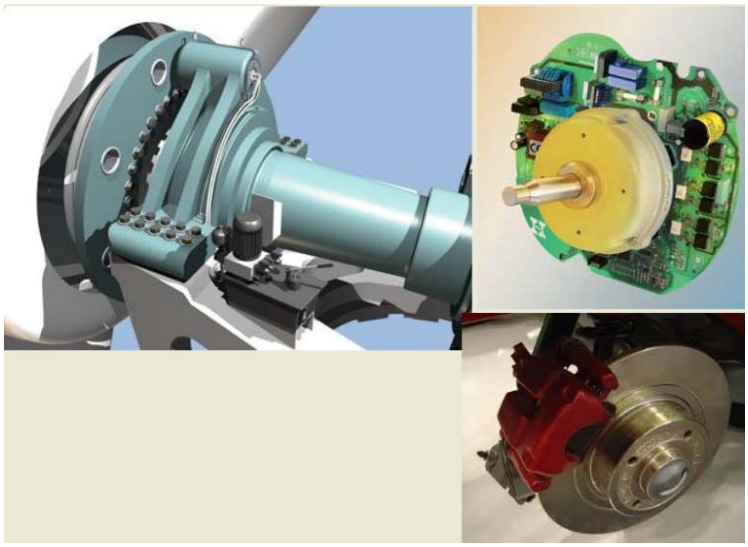
Sapma sürücüsü, sistemin rüzgara karşı durmasını sağlayarak rotoru rüzgarın yönü değiştikçe döndürür ve saptırma motoru tarafından taşınır. Dönüş yönü ve miktarı kontrol sistemi tarafından rüzgar yüzgecinden alınan bilgilerle hesaplanır.

4.2.5. Rotor Şaftı

Rotor şaftı rotoru dişli sisteme ya da doğrudan olarak tahrikli sistemlerden jeneratöre bağlamada görevlidir.

4.2.6. Fren

Fren, acil bir durumda ya da ihtiyaç olduğunda rotorun dönmesini durdurur.



Şekil 4.8. Fren

4.2.7. Dişli Kutusu

Dönme hareketi hızlı olan jeneratörlerde bulunur. Ağır ve pahalı bir alettir. Dişli kutusunda, bir düşük hız mili ve yüksek hız mili bulunur. Yüksek hız mili, düşük hız milinden 50 kat hızlı döner.



Şekil 4.9. Dişli kutusu

4.2.8. Kontrol Paneli

Rüzgar türbinini sürekli izleyen, kanatların alacağı açıyı kontrol eden ve bir arıza anında türbini durduran sistemdir.

4.2.9. Jeneratör

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten santrallerde kullanılan jeneratörler, doğru veya alternatif akım üretimini gerçekleştirebilirler. Rüzgar enerji santrallerinde üretilen elektrik akımı, kalitesi düşük doğru veya alternatif akım olsalar da, farklı elektronik cihazlarıyla şebeke için uygun bir akım haline getirilmeleri mümkündür. Doğru akım için kullanılan jeneratörler, büyük kapasiteye sahip santrallerde daha çok kullanılmaktadır. Bunun nedeni, sıklıkla bakım gerektirmesi ve maliyetinin alternatif akım sağlayan jeneratörlere göre daha fazla olmasıdır. Günümüzde doğru akım sağlayan jeneratörler bir tek düşük kapasiteye sahip rüzgar enerji santrallerinde aküleri doldurmak için kullanılmaktadır. Dişli kutusundaki kayıplar ve ses kirliliğinin engellenebilmesi için, çok kutuplu jeneratörü bulunan dişli kutusu olamayan türbinler de kullanılmaktadır. Bundan ötürü, çok kutuplu jeneratörlerde dişli kutusuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Şebekeye bağlantısı olan alternatif akım jeneratörlerinde, yalnız şebeke frekansı sağlayan devir sayısında elektrik enerjisinin üretimini mümkün kılmaktadır. Bunun anlamı, rüzgar türbininde örnek olarak 8 m/s olan ideal hız limitinden yararlanmak anlamına gelir. Bir kısım rüzgar türbinleri de, bu sebeplerden dolayı yüksek ve düşük rüzgar hız limitleri için iki ayrı jeneratör kullanımı mevcuttur (Avcı ve Yılmaz, 2012).

4.3. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Jeneratörler

Mekanik enerjiyi en minimize enerji harcanarak elektrik enerjisine dönüştürebilmek için rüzgar türbinlerinde farklı hızlar ve çıkış kombinasyonları kullanılır. Rüzgar türbinlerinde üç farklı jeneratör türü kullanılmakta;

1. Doğru akım jeneratörü,
2. Senkron jeneratör,
3. Asenkron jeneratör.

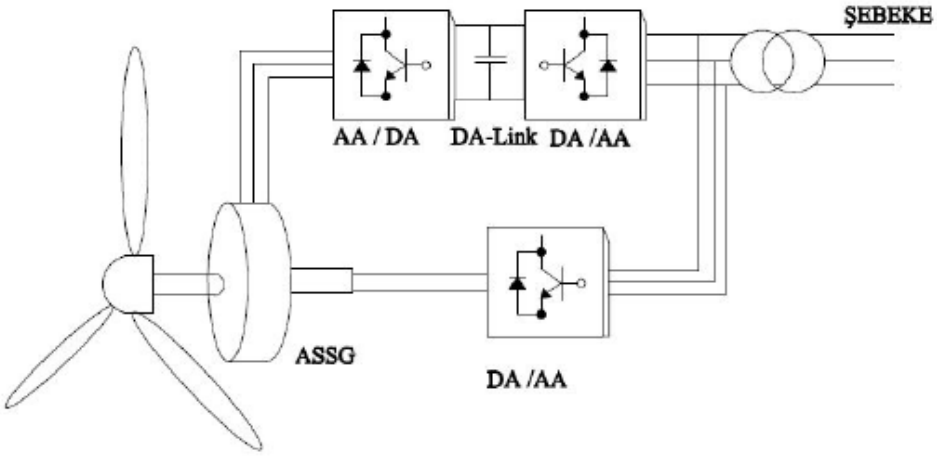
Geçmişte küçük ve güçlü sistemler için kullanılan doğru akım jeneratörleri artık eşzamanlı veya eşzamansız jeneratörler ile değiştirilmektedirler. Bu jeneratörler, doğru akımları dönüştürücülerin yardımıyla alternatif akıma kolayca dönüştüren güç elektroniği elemanları ile çalışır. Senkron ve asenkron jeneratörler daha çok orta ve büyük güç sistemlerinde kullanılır. Bu kısımda, değişken hızlara sahip rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratörler ve konvertörlerin ana özellikleriyle incelemesi yapılacaktır.

4.3.1. Doğru Akım Jeneratörleri

Doğru akım makineleri, düşük güvenilirliği ve bakım maliyetleri gibi dezavantajları olmasına rağmen, kontrol kolaylığı nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. DA jeneratörü, özellikle de şebekeden bağımsız olarak kullanıldığında, küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde tercih edilir. Son yıllarda, mekanik komütatör doğru akım makineler komütatörü ortadan kaldırmak için kalıcı mıknatıslar olarak tasarlanmıştır. Bu cihazda üretimi gerçekleşen alternatif akım yarı iletken redresörler ile DA'ya dönüştürülür. Fırçasız DC makineleri olarak da adlandırılan bu makineler, sabit mıknatısların sınırlı kapasitesi ve gücü sebebiyle küçük ve güçlü rüzgar türbinleri için kullanılır.

4.3.2. Senkron Jeneratörleri

Senkron jeneratör, dışında bir yükü besleyen 3 fazlı sargılar ve manyetik alanı oluşturan bir rotor tarafından oluşturulan bir statordan oluşur. Rotor tarafından üretilen manyetik alan, mıknatıslar veya sargılar içinden akan doğru akımdan üretilir. Senkron jeneratörler sabit hıza bağlı olarak sabit konumdaki frekanslarda çalışmaktadır. Rüzgar türbinlerinde, genelde alan sargıları ve daimi mıknatıslarla iki tip senkron jeneratör kullanılır.



Şekil 4.10. Değişken hızlı alan sargılı senkron jeneratörü

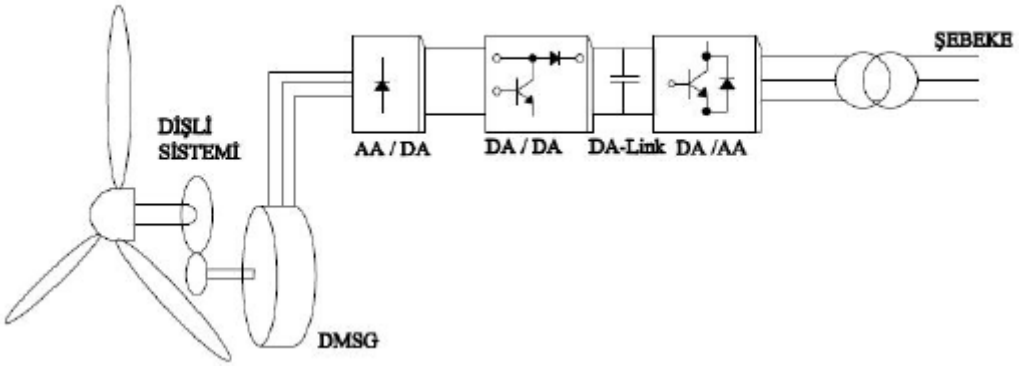
"Alan sargılı senkron jeneratörlerde" (ASSG); stator sargısı, çift taraflı akım akışının olduğu gerilim kaynaklı iki inverterden meydana gelmiş, "dalga genişlik modülasyonu" (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, 4 bölgeli bir güç konverterinden şebekeye bağlanmıştır (Şekil 4.10). Bu sistemin meydana getirdiği aktif ve reaktif gücü ise stator tarafındaki konverter düzenler. ASSG avantajları aşağıdadır:

- Tüm stator akımı elektromanyetik torkun üretimi için kullanıldığından, bu makinenin verimliliği genellikle yüksektir.

- Makinenin güç etmeninin doğrudan kontrolü deşarj edilmiş bir direğe sahip olan sarımı ile senkron bir jeneratörün kullanılmasının en büyük yararıdır. Sonuç olarak, stator akım birçok çalışma halinde en aza indirilebilir.

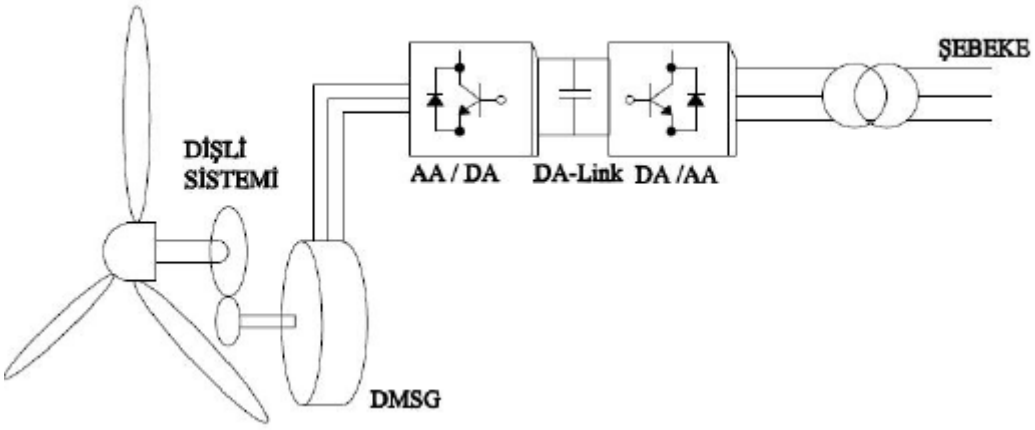
- Bu jeneratörlerdeki kutup eğimi, indüksiyon makinelerinden daha küçük olabilir. Bu durum, vites kutusunu ortadan kaldırarak düşük hızlı ve çok kutuplu makinelerin elde edilmesi için çok önemli bir özellik olabilir.

- Rotorda sargı devresi bulunması, "sabit mıknatıslı senkron jeneratöre" (DMSG) göre rotorda sargı devresinin bulunması bir kıyasla bir dezavantaj olmaktadır. Bunun yanında üretilmiş olan reaktif ve aktif gücü düzenlemek için, "nominal rüzgar gücü"nün 1,2 katıyla konvertörleri kullanmak gerekir.



Şekil 4.11. Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron jeneratör

Şekil 4.11.'de "üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimi mıknatıslı senkron jeneratöre (DMSG) ait rüzgar güç sistemi" görülmektedir. Bu sistemde elektromanyetik tork yükseltici DA-DA kıyıcısı tarafından kontrol edilmektedir. DA link gerilimini regüle eden ve girişin güç faktörünü kontrol eden bir konverter bulunmaktadır.

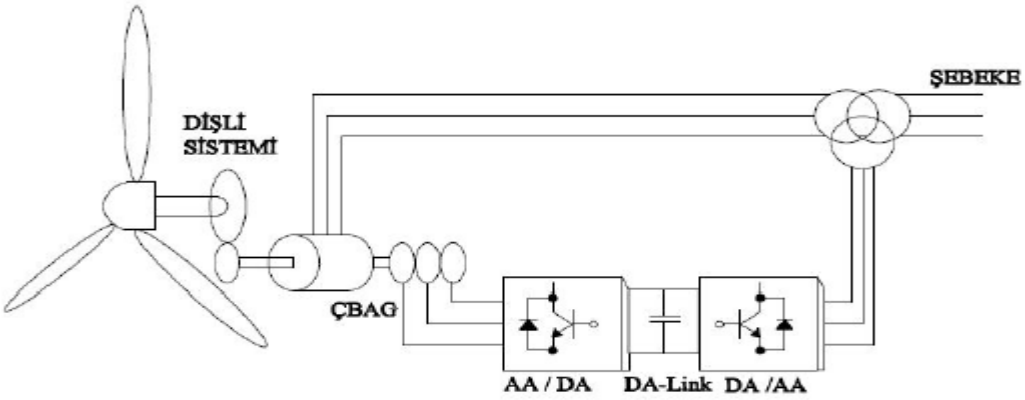


Şekil 4.12. DGM konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkron jeneratör

Şekil 4.12.'de görülen farklı bir DMSG rüzgar güç sisteminde jeneratör ve DA bağlantısı arasında DGM tekniğine sahip olan ve DGM, inverter aracılığıyla şebekeye bağlanan bir redresör kullanılır. Bu sistemin avantajı şudur: güç elektroniği ve jeneratör devresindeki kayıpları azaltmak amacıyla optimal çalışma noktasına yakın çalışmasına izin verilen alan güdümlü kontrolü kullanmak mümkündür. Bununla birlikte, sıcaklık ve frekansa bağlı olarak değişebilen jeneratör parametrelerinin performansı etkileyebileceğine dikkat edilmelidir.

4.3.3. Asenkron Jeneratörler

Rüzgar türbinleriyle alternatif akım üretmek amacıyla üç fazlı asenkron jeneratörler ya da indüksiyon jeneratörleri kullanılır. Bu tür jeneratörler küçük hidroelektrik santralleri ve rüzgar türbini endüstrisi dışında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Bu jeneratörler, güvenli oldukları ve düşük maliyete sahip oldukları için tercih edilmektedir. Rüzgar türbinlerinde, genellikle "rotor sargısı" ve "sincap kafesi" olmak üzere iki tür asenkron jeneratör kullanılmaktadır.



Şekil 4.13. Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron jeneratör

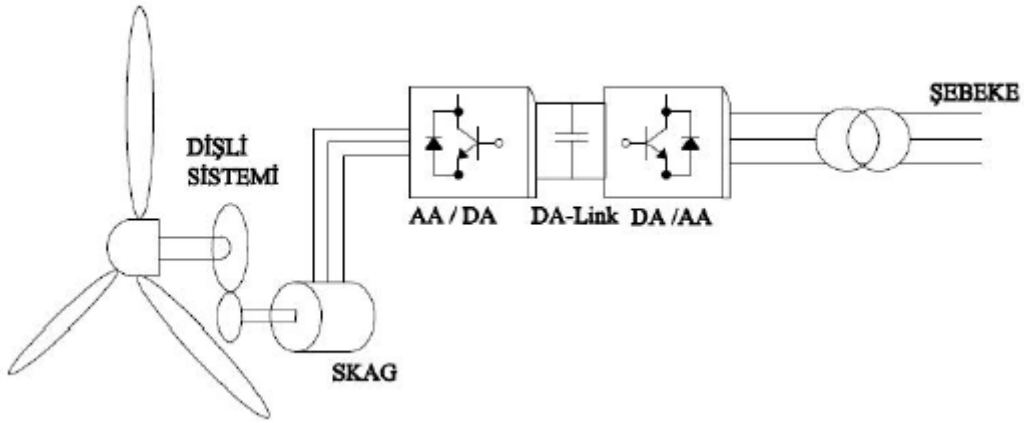
Şekil 4.13, çift beslemeli bir asenkron jeneratör (ÇBAG) kullanan bir rüzgar enerjisi sistemini göstermektedir. Bu sistemde stator sargısı doğrudan şebekeye bağlanır. Rotor sargısı, iki arka arkaya voltaj kaynağı DGM invertöründen oluşan dört bölgeli bir güç dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlanır. Genel olarak, rotor tarafındaki dönüştürücü kontrol sistemi elektromanyetik torku düzenler ve makinenin mıknatıslanmasını sağlamak için reaktif güç sağlar. Ağ tarafı dönüştürücü kontrol sistemi DA bağlantısını düzenler. Eşzamanlı jeneratörler ile karşılaştırıldığında, MSB'nin aşağıdaki gibi birkaç avantajı vardır.

- Toplam sistem gücünün sadece% 25'i inverter olarak kullanılır, çünkü sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmek için bir dönüştürücü sisteme sahiptir. Bu invertörün maliyetini azaltır.

- Sistemde kullanılan filtreler 0.25 p.u adresinde. Toplam sistem gücünün, invertör filtrelerinin maliyeti azalır. Aynı zamanda, invertör harmonileri toplam sistem harmonilerinin daha küçük bir bölümünü temsil eder.

Bünyesinde periyodik bakıma gereksinim duyan bilezik tertibatının bulunması ÇBAG için en büyük dezavantajdır.

Şekil 4.14.'de gösterilen "sincap kafesli asenkron jeneratör" (SKAG) ise rüzgar güç sistemlerinde kullanılan bir başka jeneratördür.



Şekil 4.14. Değişken hızlı sincap kafesli asenkron jeneratör

Bu sistemde stator sarımı, DA bağlantısının her iki tarafına bağlı voltajlı iki DGM invertörden oluşan dört bölgeli bir güç dönüştürücü vasıtasıyla şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki dönüştürücünün kontrol sistemi, elektromanyetik torku düzenler ve makinenin manyetik alanını üretmek için reaktif güç sağlar. Ağ tarafı dönüştürücü, sistemden ağa ve DA bağlantısına aktarılan aktif ve reaktif gücü düzenler. Rüzgar gücü sistemlerinde kullanılan SKAG'ın avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Sincap kafesi asenkron makineleri, fırçasız, ekonomik, sağlam ve güvenilir yapısı sayesinde pratikte sıklıkla kullanılırlar.

- Redresör, jeneratör için programlanabilir bir uyarma oluşturabilir.

- Evirici harmonik bir kompansatör olarak çalıştırılabilir.

Bu sistemin dezavantajları, jeneratör parametrelerinin, sistemin kontrolünü karmaşık hale getirmek için sıcaklık ve frekansı değiştirmesi ve stator tarafındaki dönüştürücünün, makinenin gereksinim duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güçten % 30 daha yüksek olmasıdır.

Yukarıda tarif edilen jeneratörler dışında; çift hızlı asenkron jeneratörler, değişken relüktans jeneratörleri, fırçasız çift beslemeli jeneratörler bazen rüzgar enerjisi sistemlerinde özel uygulamalar için kullanılır.

4.4. Rüzgar Türbinlerinin Geleceği

Esasen, rüzgar türbinleri gelişen teknoloji sayesinde işleyen bir sistemdir ve bu teknoloji gelişimini asla kesmeyecektir. Bu teknoloji bizim için elektrik üretiyor, su pompalıyor ve bunu bir veya binlerce rüzgar türbini yardımıyla yapıyor. Bu teknoloji şu unsurları yaratır: malzeme formu, sensör tekniği, mikrobilgisayarların yaygın kullanımı, yeni simülasyon ve üretim tekniklerinin entegrasyonu. Rüzgar türbini üreticilerine göre, şu özellikler elde edildi: sadelik, uygulanabilirlik, verimlilik, dönüştürülebilirlik, sessizlik, güvenlik, dayanıklılık, esneklik.

Rüzgar enerjisi gelişmeye devam ettiği sürece yeni uygulamalar hayata geçirilecek ve rüzgar enerjisi üreten topluluklar ve rüzgar enerjisi araçları gibi kavramlar hayatlarımıza tanıtılacaktır.

4.4.1. Rüzgarın Geleceği

ABD Enerji Bakanlığı'nın verilerine göre, rüzgar enerjisinin en ilerici yenilenebilir enerji türü olduğu bildirilmektedir. Ekonomik olarak, her geçen gün daha faydalı hale geliyor ve 2010'a kadar kWh başına maliyet önemli ölçüde azaltılacak.

Araştırma çalışmalarının temel amacı, 2010 yılına kadar rüzgar enerjisi maliyetini 3 katına çıkarmaktır. Bu şekilde, geleneksel enerji türlerinden çok daha rekabetçi olacaktır (Patel, 1999)

Çizelge 4.2. Rüzgar gücü teknolojisi, geçmişi, günümüz ve gelecek

Teknoloji Durumu	1980	1990	2000 sonrası
kWh Başına Maliyet	0.35 $-0.4 $	0.05 $-0.07 $	<0.04 $
kW Başına Anapara Maliyeti	2000 $-3000 $	500 $-800 $	<500 $
Çalışma Ömrü	5-7 yıl	20 yıl	30 yıl
Kapasite Faktörü	50 %-65 %	95 %	>95 %
Boyut Aralığı	50-150 kW	300-1000 kW	500-2000 kW

Sektördeki uzmanlar özellikle aşağıdaki alanlardaki gelişmeler ile ilgilidir;

-Aaerodinamik tasarım, ileri üretim teknolojileri, yüksek mukavemetli ve sönümlü malzemelerin kullanımı, geliştirilmiş yük ve mukavemet güvenliği, yeni konseptlerin oluşturulması, geliştirilmiş kanat tasarım, bakım ve onarım maliyetleri azaltma,

- Türbülans altındaki yüklerin yapısını ve durumunu, türbin yaşamının etkisini daha iyi anlama,

- Güç elektroniği ve entegre jeneratör sayesinde mekanik şanzımanlardan kurtulma,

- Sistem simülasyonlarını ve modellerini geliştirme,

- Düşük maliyetli enerji depolama,

- Daha iyi rüzgar hızı karakter analizi yapma.

Yapılan çalışmalar neticesinde ana amaç, daha iyi bir tasarım, geliştirme ve üretim yaparak rüzgar enerjisinin verimliliğini arttırmaktır.

Havai rüzgarın potansiyeli daha yüksektir. Bu potansiyeli daha iyi kullanmak için önemli bir adım olacaktır. Askeri testler, balıkçılık ve gemi rotaları kısıtlamalar dışında doğal kısıtlamalar da vardır. Bunlar deniz derinliği, fırtına ve rüzgar hızı yüksekliğidir. Bu kısıtlamaların aşılması durumunda daha düşük maliyetle üretim yapılabilir (Patel, 1999).

Asya kıtasındaki potansiyelin değerlendirilmesi ve MW'lık türbinlerin uygulamaya alınması denizüstü santralleri haricinde gelişme beklenmesi gereken diğer uygulamalardır.

Rüzgar türbinlerinin gelecekte karşılaşacağı sorunlardan biri de rüzgar türbinlerinin çevresel sorunları ve çevresel etkileridir. Rüzgar türbinlerinin kuşlara verdiği zararlar önemli çevresel etkilerden biridir.

Rüzgar türbinleri 4 kategoriye ayrılabilir ve gelecekte açıklanabilir.

- Kategori A

1.5 MVV'dan büyük olan türbinler bu kategoriye dahildirler. Bunlar genelde üç kanatlı, durdurma veya kanat açısı değişimi regülasyonlu, değişken veya sabit hızda çalışan türbinlerdir (Şekil 2.24). Araştırma-geliştirme konuları şunlar olacaktır: ekonomikliğin arttırılması, kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi, sistem ve şebeke stabilitesinin sağlanması ve güç iletiminin iyileştirilmesi.

- Kategori B

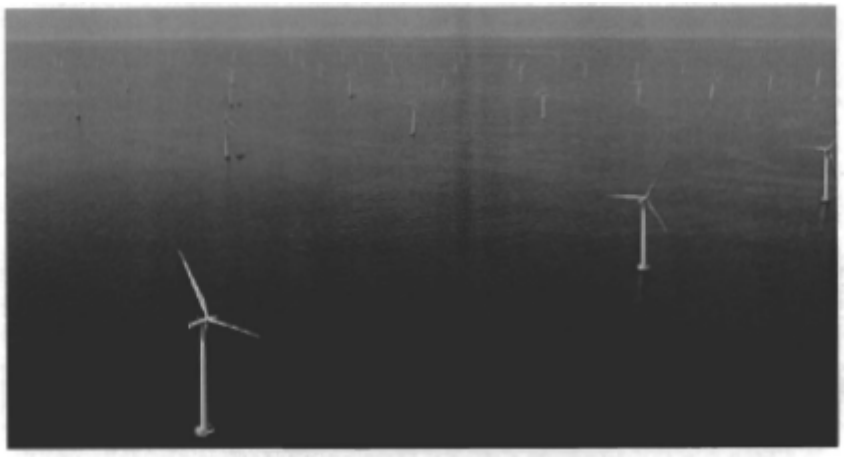
1.5 MVV'tan büyük denizüstü rüzgar türbinleri bu gruba girer. En yaygın kullanımları üç kanatlı, aktif durdurma veya kanat açısı değişimi regülasyonlu, yatay eksenli ve sabit hızlı tiplerdir. (Şekil 4.12.) Gelişmenin gösterileceği konular dalga ve buz dayanımı ile güç iletiminin geliştirilmesidir.



Şekil 4.15. Nysted rüzgar çiftliği (Danimarka) (Turkeş, 2012).

- Kategori C

0.5-1.5 MW arası türbinler bu gruba girerler. Bu kategorideki türbinlerin çoğu yer üzerine kurulu ve temel olarak rüzgar kapasitesi ile üretim masrafları alınmış türbinlerdir. Gelişme alanları; tasarımsal maliyetler, güç kalitesi artışı, kontrol sistemlerinde gelişme ve hibrite uyarlanabilmedir.



Şekil 4.16. Enercon E48 800 kW (Leung ve ark., 2012).

- Kategori D

0.1-500 kVV'lık arasındaki küçük türbinler bu sınıfa girerler. Büyük türbinlerde gelişmeye odaklı endüstri sayesinde küçük türbinler gelişmelerini sağlayamamışlardır. Bazı firmaların bu sektöre yönelmesiyle beraber gitgide büyüyen bir sektör olma eğilimindedir.



Şekil 4.17. Whisper H80 rüzgar türbini (Leung ve ark., 2012).

4.5. Gelişen Pazarlar

Dünya çapında birçok bölgede gelişen rüzgar enerjisi pazarını görmek mümkündür. En gelişmiş pazarlara göz atacak olursak;

Birleşik Devletler: 30 eyalette bulunan türbinlerle 2003 sonunda 6374 MW üretim mevcuttur. Bu elektrik 1.6 milyon hanenin elektrik ihtiyacını karşılayacak

düzeydedir. Federal Üretim Vergi Kredisi ve Eyalet Yenilenebilir Portfolyo Standartları gibi uygulamalarla gelişim sağlanması amaçlanarak 2020 yılında 100000 MW kurulu güce ulaşmak hedeflenmektedir.

Avrupa: 10.3 milyon Avrupalının evindeki elektrik ihtiyacı rüzgar enerjisiyle karşılanabilmektedir. Avrupa elektrik ihtiyacının %2'si rüzgar enerjisinden sağlanabilmektedir. Global rüzgar pazarının %90'ına Avrupalı üreticiler sahiptir. Dünya kurulu gücünün %75'i Avrupa'dadır. Büyüme hızı %35 civarındadır.

Avustralya ve Yeni Zelanda: Avustralya 2003 yılında kapasitesini iki katına çıkarmıştır. Tasarım ve üretim halindeki projeler ile 2010 yılında elektrik üretiminin %2'sinin yenilenebilir olmasına çalışılmaktadır.

Orta ve Güney Amerika: Arjantin, Brezilya gibi bölge enerji lideri ülkeler dışında Meksika, Kosta Rika, Kolombiya, Şili ve Karayiplerde de çalışmalar sürmektedir.

Asya: 1990'lara kadar bölgede lider ülke Hindistan olmuştur. Çin'in enerji sektöründe gösterdiği gelişme ve Japonya'nın da devreye girmesiyle bölgede dev pazarlar oluşmaktadır.

Afrika: Fas, Mısır ve Tunus dışında yeterli rüzgara sahip bölgeler yoktur. Bu üç ülkede de ufak çaplı çalışmalar yürütülmektedir.

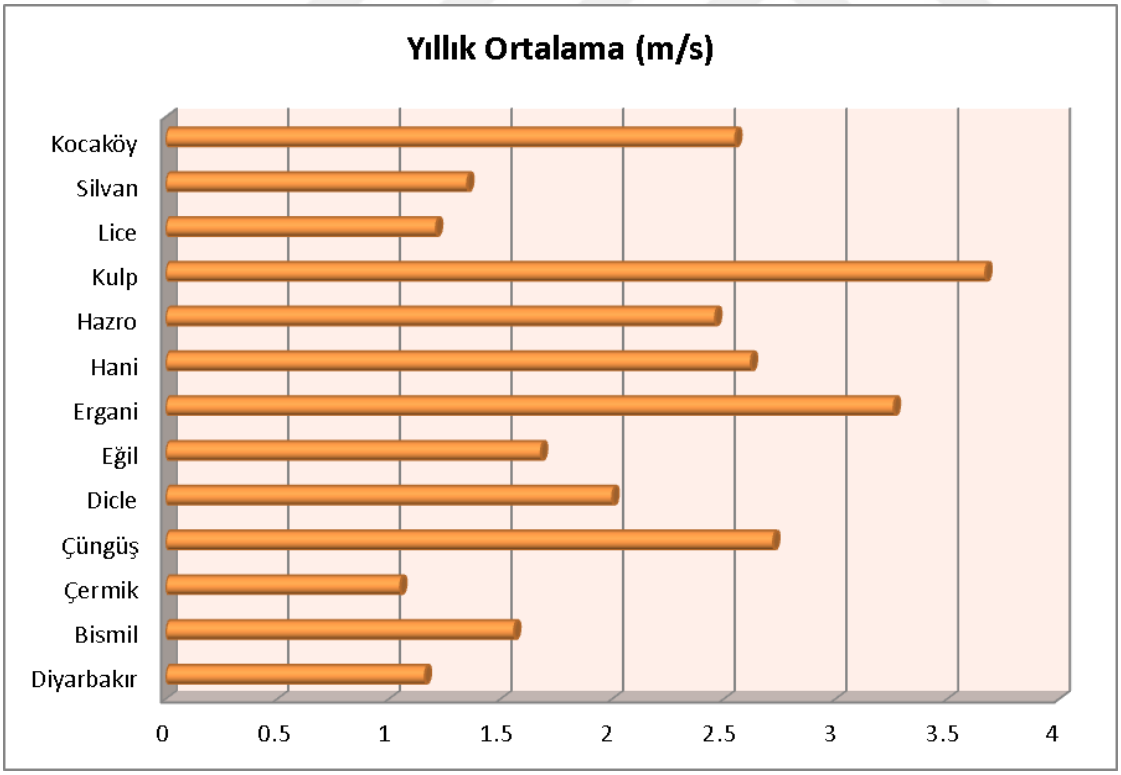
Orta Doğu: Türkiye, rüzgar potansiyeli yüksek olan bir ülkedir ve gelecekte bu potansiyeliyle büyük pazarlardan biri olacaktır. Bölgede diğer aktif ülkeler Suriye, Ürdün ve İran'dır.

4.6. Diyarbakır İl Genelinde Ekonomik RES Yatırımı Yapılabilecek Alanların Değerlendirilmesi

Diyarbakır bölgesi için ekonomik RES yatırımı yapılabilecek alanların belirlenmesi amacıyla Diyarbakır Meteoroloji Genel Müdürlüğünden 2018 yılı aylık ortalama rüzgar hızı verileri alınmıştır. Bu veriler ekonomik RES alanlarını belirlemeden daha çok alanlar hakkında ön bilgi sahibi olmamızda işe yarayacak önemli bir parametrelerden biridir.

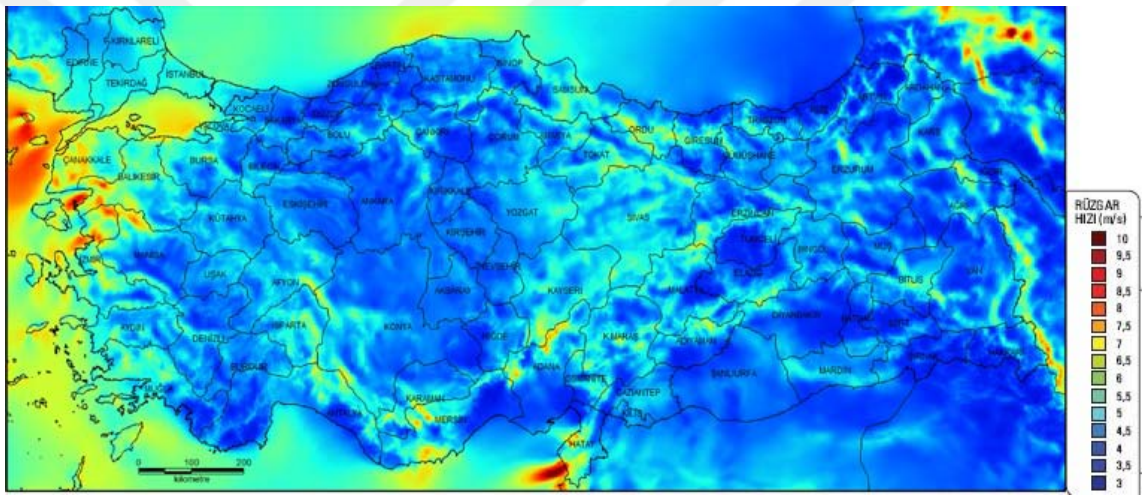
Çizelge 4.3. Diyarbakır bölgesi ait aylık rüzgar hızı ortalama verileri (ölçümler 5-10 metrede yapılmıştır.) (Meteoroloji Diyarbakır Bölge Müdürlüğü)

	1. Ay	2. Ay	3. Ay	4. Ay	5. Ay	6. Ay	7. Ay	8. Ay	9. Ay	10. Ay	11. Ay	12. Ay	Yıllık Ort. (m/sn)
Diyarbakır	1.0	0.8	1.2	1.3	1.2	1.5	1.6	1.5	1.2	1.0	0.7	1.0	1.16
Bismil	1.5	1.3	1.9	1.8	1.8	2.0	1.8	1.7	1.3	1.3	0.8	1.5	1.56
Çermik	1.0	0.8	1.1	1.2	1.0	1.2	1.3	1.3	1.1	1.0	0.6	0.9	1.05
Çüngüş	3.0	2.0	2.3	2.9	2.4	2.8	3.2	3.4	2.7	2.7	2.5	2.8	2.72
Dicle	2.4	1.5	1.7	1.9	1.8	2.1	2.2	2.5	2.1	2.0	1.9	1.9	2
Eğil	1.7	1.1	1.6	1.6	1.5	1.8	2.0	2.2	1.8	1.7	1.4	1.8	1.68
Ergani	4.1	2.8	2.7	3.3	2.8	3.2	3.8	4.1	3.6	3.3	2.6	2.9	3.26*
Hani	3.1	2.0	2.0	2.9	2.3	2.9	3.0	3.4	2.7	2.9	1.9	2.4	2.62
Hazro	2.6	1.9	2.3	2.7	2.3	2.7	2.6	2.8	2.4	2.7	2.0	2.6	2.46
Kulp	3.5	2.9	2.5	4.2	3.4	4.4	3.8	4.6	4.1	4.3	3.5	2.9	3.67*
Lice	1.1	0.9	1.2	1.3	1.3	1.5	1.6	1.5	1.3	1.2	0.7	1.0	1.21
Silvan	1.3	1.0	1.3	1.4	1.4	1.9	1.7	1.6	1.4	1.3	0.8	1.1	1.35
Kocaköy	2.8	2.1	2.4	2.6	2.4	2.9	2.7	2.7	2.4	2.8	2.1	2.8	2.55



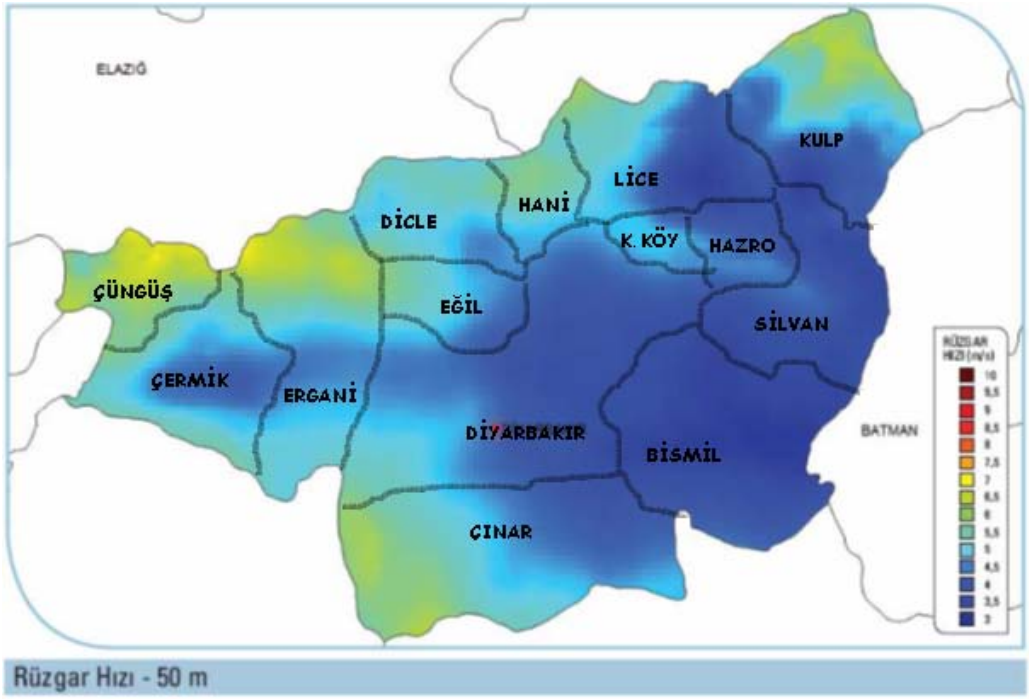
Şekil 4.18. Diyarbakır bölgesine ait aylık rüzgar hızı ortalama verileri (ölçümler 5-10 metrede yapılmıştır.) (Meteoroloji Diyarbakır Bölge Müdürlüğü)

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere Diyarbakır ili Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden alınan veriler ışığında Diyarbakır bölgesi için ekonomik RES yatırımı yapılabilecek en uygun alanların Kulp ve Ergani ilçeleri olduğu anlaşılmaktadır. Ancak verilerin 5-10 metre aralığında yapılan ölçümlerden alınmasından dolayı ekonomik RES alanlarını rüzgar hızları açısından belirlemede tek başına yeterli değildir. Çünkü RES alanlarını belirlemede sağlıklı bir sonuca ulaşabilmek için ölçümlerin 50 m yükseklikte yapılması gerekmektedir. 50 m yükseklikteki aylık ölçümlere ait sayısal veriler elimizde bulunmasa da 50 metre yükseklikteki yıllık ortalamaları baz alınmış Diyarbakır bölgesine ait rüzgar hız dağılımı haritası (Şekil 4.17) bu alanları belirlemeye yardımcı olacaktır.



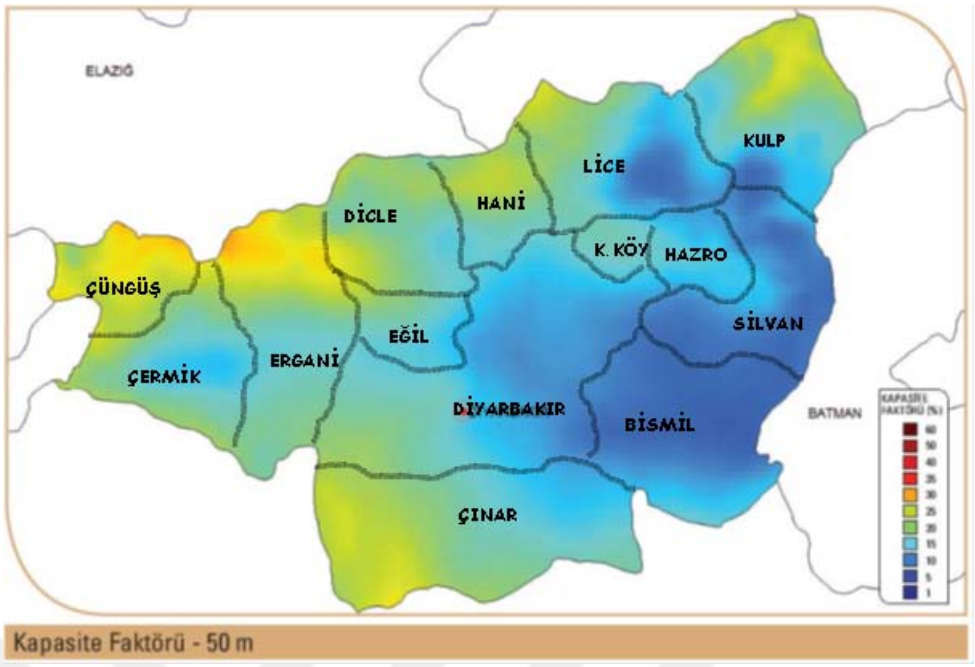
Şekil 4.19. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Haritası (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü)

Şekil 4.16'daki Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel haritasına baktığımızda Diyarbakır ilinin teorik potansiyel enerjisinin düşük olduğunu görmekteyiz. Öyle ki Türkiye'nin toplam 115.329 MW'lık teorik potansiyel enerjisinin sadece 635,04 MW'lık kısmını karşılamaktadır. Rüzgar potansiyeli açısından Diyarbakır ili bu değerler ile Türkiye illeri arasında 33. sırada bulunuyor olsa da asıl olarak potansiyelinin genele oranla %1'in altında olması, Türkiye genelinde teorik potansiyellere sahip alanların sadece %13'ünde RES tesislerinin bulunması ve bölgedeki rüzgar hızı Türkiye geneline göre çok düşük olması burada RES santrallerinin neden bulunmadığını açıklar niteliktedir.



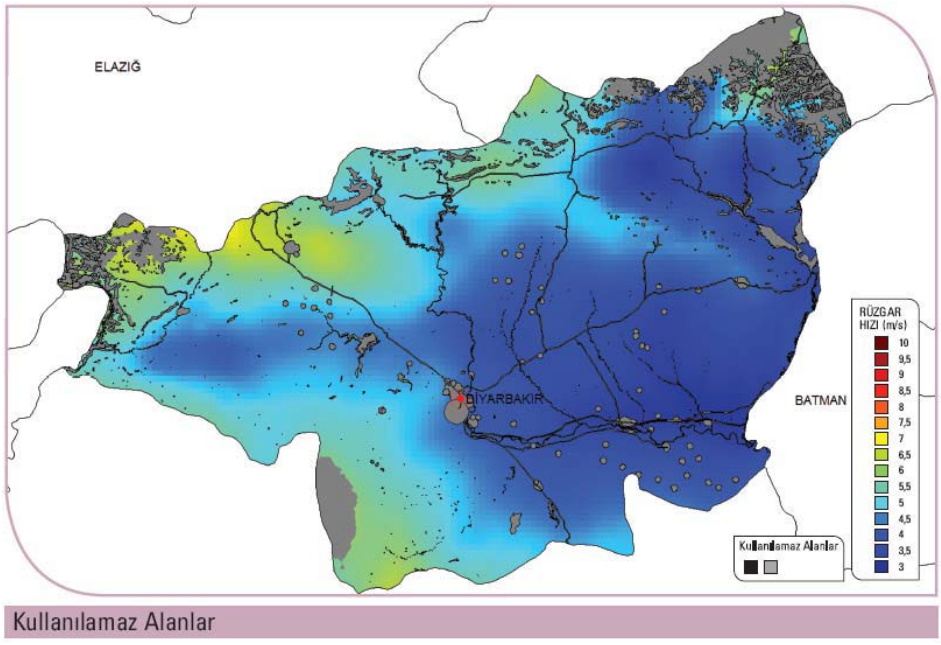
Şekil 4.20. Diyarbakır Bölgesi Rüzgar Hız Dağılımları (50 m) (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü)

Şekil 4.17'yi incelediğimizde Diyarbakır bölgesinde rüzgar hızlarının şiddetinin yükseltiyle paralellik gösterdiğini görmekteyiz. Rüzgar türbinlerinin çalışması için gerekli olan 4,5 m/sn'lik hız nerdeyse Diyarbakır bölgesinin tamamında ulaşılabilecek bir değerdir. Ancak ekonomik olarak RES kurulması için gereken değerin 50 m yükseklikte 7 m/sn olmasından dolayı Diyarbakır bölgesinin birçok alanında RES tesislerinin kurulumundan yüksek miktarda enerji elde edilemeyecektir. Yine haritaya göre ortalama rüzgar hızlarının 50 m yükseklikte 7 m/sn olduğu bölgedeki RES tesislerinin kurulabileceği alanlar Kulp ilçesinin kuzeydoğusu (Şenyayla bölgesi), Ergani ilçesinin kuzey kesimi, Çüngüş ilçesinin orta ve kuzey kesimleri ve Çınar ilçesinin batı kesimleridir (Karacadağ etekleri). Yükseltinin az olmasından dolayı Diyarbakır merkez, Silvan, Bismil, Çermik, Hani, Lice, Hazro, Eğil ve Kocaköy ilçelerinin tamamı ile Çınar'ın doğusu, Ergani'nin orta ve güney kesimleri ve Kulp ilçesinin batı ve güney bölgelerinde RES tesisi kurmak ekonomik açıdan değersizdir.



Şekil 4.21. Diyarbakır ilinde kapasiteye göre RES kurulabilecek alanlar (Açık yeşil alanlar) (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü)

Ekonomik RES yatırımı için ayrıca %30 veya üzerinde kapasite faktörü gerekmektedir. Haritada açık yeşil ile boyanmış alanların RES tesisi kurulumuna uygunluğu sadece rüzgar hızı verilerine göre belirlenmiştir. Yani aşırı engebeli arazi ulaşım sıklığı ve gelir-gider ekonomisine dayalı daha başka sorunlar bu harita için göz önünde bulundurulmamıştır.



Şekil 4.22. Rüzgar santrali kurulamayacak alanlar (Gri renkli olanlar) (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü)

Daha önce rüzgar hızı dağılımı ve kapasite faktörü açısından RES tesislerinin kurulmasının mümkün olduğu alanlardan bahsetmiştik. Fakat bahsettiğimiz bu alanların bazılarında farklı nedenlerden ötürü bu tesislerin kurulması elverişli değildir. Bu alanlar Şekil 4.19'da gri renk ile gösterilmiştir. Gri renkle gösterilen bu alanlarda Kulp ilçesinin Şenyayla bölgesi dağlık, engebe, ulaşım güçlüğü ve aşırı kar yağışı; Çınar ilçesinin batısında bulunan Karacadağ eteklerinde kar yağışı; Çüngüş ilçesinde ise aşırı engebeden ve kar yağışından ötürü bu bölgelerde RES tesislerinin kurulması ekonomik olarak uygun alanlar değildir. Yukarıdaki haritaya göre ekonomik olarak RES tesisi kurulması için tek uygun alanın Ergani ilçesinin kuzey kesimleri olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4. Diyarbakır iline kurulabilecek rüzgar enerji santralı güç kapasitesi (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü)

50 m'deRüzgar Gücü (W/m2)	**50 m'deRüzgar Hızı (m/s)**	**Toplam Alan (km2)**	**Teorik Potansiyel Güç (MW)**
300 – 400	6.8 - 7.5	110,03	550,16
400 – 500	7.5 - 8.1	16,98	84,88
500 – 600	8.1 - 8.6	0,00	0,00
600 – 800	8.6 - 9.5	0,00	0,00
> 800	> 9.5	0,00	0,00
		127,01	**635,04**

Çizelge 4.2'e göre Diyarbakır ilinde 50 metre yükseklikte 300-400 W/m^2 rüzgar gücüne sahip 110,03 km^2'lik alan bulunmakta ve bu alanda teorik potansiyel güç 550,16 MW, 400-500 W/m^2 rüzgar gücüne sahip 16,98 km^2'lik ve bu alanda da 84,88 MW teorik potansiyel güç sağlayabilecek kapasitede bölgelerin olduğunu görmekteyiz. Böylece Diyarbakır ili toplamda 127,01 km^2'lik alanda 635,04 MW'lık bir enerji kapasitesine sahiptir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgar türbinleri çağımızın gelişmeye ve kullanıma en müsait yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Özellikle petrol kaynaklı enerjilere oranla sağladığı faydalar ve çevreye daha az zarar vermesiyle diğer enerji kaynakları arasından sıyrılmasını sağlamıştır. Bu gelişim yüzyıllardan beri sürmektedir. Rüzgar ve rüzgardan elde edilen enerji bu bağlamda en eski enerji kaynaklarından birisidir.

Son yıllarda özellikle Amerika ve Avrupa'da gelişim gösteren rüzgar enerjisi, kullanım oranları bakımından her geçen gün önemi daha iyi anlaşılan ve yaygınlaşan bir enerjidir. Teknolojisi sürekli yenilendiği ve geliştiği için de maliyet unsuru bakımından avantajlı konuma gelmesiyle daha da yaygınlaşacaktır.

Rüzgar türbinleri ülkemizde de gelişmeye açık bir enerji kaynağıdır. Özellikle ülkemizin bu alandaki potansiyeli sonucu önümüzdeki 10 yıl içinde büyük gelişme göstereceği açıktır. Bu sebepten rüzgar enerjisinin ve rüzgar türbini teknolojisinin daha iyi anlaşılması mutlak gerekliliktir.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak günümüzde 126 metre rotor çapında, 135 metre kule yüksekliğinde ve 6 MW gücünde üretilen bir rüzgar türbininden yılda 20 milyon kWh'lık enerji elde edilebilmektedir. Bunun sonucu olarak şebekeye bağlı çalışan rüzgar santrallerinin kurulu güçleri artmıştır. Güç sisteminde rüzgar gücü oranının artması şebeke üzerinde bir takım etkilere neden olmaktadır. Eskiden dağıtım sistemlerine bağlanan rüzgar santralleri üretim gücünün artmasıyla artık çoğunlukla iletim sistemlerine entegre olmaktadır. Dağıtım sistemine bağlı rüzgar enerjisi santrallerinin şebeke üzerindeki etkilerini analiz ederken, gerilim etkileri araştırıldı. İletim sistemine rüzgar enerjisi santrallerinin dahil edilmesiyle, güç sisteminin dengesinin korunması ön plana çıkmıştır.

Günümüz rüzgar türbinleri değişken hızlı ve transistör tabanlı frekans invertörlerine sahip olduğundan, titreme ve harmonikler gibi voltaj kalitesine etkileri azalmaktadır. Aynı zamanda hem geçici hem de sürekli olarak aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilirler. Mevcut koşullara göre mevcut standartlar düzeltilmiştir ve ülkeler, iletim ve dağıtım sistemine bağlanacak rüzgar çiftliklerinin enerji sistemine katkıda bulunmak için kılavuz düzenlemiştir. Rüzgar santrallerinin kurulumundan önce, güç sistemi ile entegrasyonu incelenmekte ve uyum analizi gerçekleştirilmektedir.

Türkiye rüzgar enerjisi potansiyel haritasına baktığımızda Diyarbakır ilinin teorik potansiyel enerjisinin düşük olduğunu görmekteyiz. Öyle ki Türkiye'nin toplam 115.329 MW'lık teorik potansiyel enerjisinin sadece 635,04 MW'lık kısmını karşılamaktadır. Rüzgar potansiyeli açısından Diyarbakır ili bu değerler ile Türkiye illeri arasında 33. sırada bulunuyor olsa da asıl olarak potansiyelinin genele oranla %1'in altında olması, Türkiye genelinde teorik potansiyellere sahip alanların sadece %13'ünde RES tesislerinin bulunması ve bölgedeki rüzgar hızı Türkiye geneline göre çok düşük olması burada RES santrallerinin neden bulunmadığını açıklar niteliktedir.

Yaptığımız çalışma sonucunda Diyarbakır ilinde Ergani ilçesinin RES tesisleri kurulması bakımından tek uygun alan olduğu ve bölgede yapılacak bir RES tesisi yatırımı için buranın çok rahatlıkla tercih edilebileceğini ifade edebiliriz.

Bir rüzgar santralinin performansı, santralin kurulacağı bölgenin rüzgar rejimine ve türbin tipine en uygun jeneratörün kullanılmasına bağlıdır. Küçük ve orta güçlü rüzgar güç sistemlerinde daimi mıknastıslı senkron jeneratör hem de Sincap kafesli asenkron jeneratör kullanılır. Büyük güçlü rüzgar güç sistemleri için ise hem senkron jeneratör hem de çift beslemeli asenkron jeneratör tercih edilir. Dalga genişlik modülasyonu, sistemin giriş ve çıkışındaki akım harmonilerini azaltacağından, dalga genişlik modülasyonu tekniğine göre anahtarlama yapabilen, "back-to-back gerilim kaynaklı dört bölgeli güç konverteri" tercih edilir. Böylelikle, jeneratör üzerindeki tork titreşimleri azalır ve çıkış gücünün kalitesi artar. Ayrıca güç elektroniği teknolojisinde kaydedilecek yeni gelişmeler ile beraber, rüzgar güç sistemlerinin performansına optimize etmek mümkün olacaktır.

6. KAYNAKLAR

Anonim, http://www.floatingwindfarms.com/vawt.html, (Erişim Tarihi: 20.09. 2018)

Avci, B. ve Yilmaz, T. (2012). *Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Ayaz, M. S. (2016) *Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Jeneratör Tiplerinin Akıllı Şebekeler Üzerindeki Etkileri*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Aydın, İ., (2008). Küçük Güçlü Bir Otonom Rüzgar Enerjisi Çevrimi İle Elektrik Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği.

Aydın, M. (2003). *Rüzgar Enerjisi,* Mühendis Türk Dergisi, Nisan, 15-17.

Bayram, Y., (2007). *PIC Kontrollü Kesintisiz Güç Kaynağı Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Bir, A., Acar, M. Ş. ve Kaçar, M. (2012). *Anadolu'nun Değirmenleri*, YEM Yayını, Ofset Yapımevi.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

Colak, I., Ayaz, M. S. ve Boran, K. (2015). *CFD Based Wind Assesment in West of Turkey,* International Conference on Renewable Energy and Applications, Palermo.

Danish Wind History, (1999). Danish Wind Turbine Manufacturers Association Wind Power. Danimarka.

Demirtaş M. (2008). *Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Kullanılarak Şebeke İle Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı ve Uygulaması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., (2014). *Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri*, Yekarum e-Dergi. Cilt 2/Sayı 3.

Elmas, Ç. ve Bingöl, O. (2008). *Üç-Seviyeli Bir Eviricinin Tasarım ve Uygulaması* Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12-1(2008),77-84.

Emniyetli, G., (2007). *Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı,* Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 20-30.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2013). Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı raporu, Ankara.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2016). Dünya ve Ülkemiz Enerji Tabi Kaynaklar Görünümü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Raporu, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.enerji.gov.tr%2FResources%2FSites%2F%2FPages%2FSa yi 11%2FSayi 11.html%23p%3D2&date=2016-05-09,

Ergür, Ö. (2006). *Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi.* Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

European Commission Directorate-Jeneral for Energy, (2009). Wind energy - The facts, Technology, 1, 35-40.

Gasch, R., Twele, J. (2012). Wind Power Plants, Springer, Berlin.

Global Wind Energy Council (2016). Global wind statistics 2015, Global Wind Energy Council Report , Brussels.

Global Wind Statistics, (2012). Global Wind Energy Council (GWEC), Web Sayfası: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats (Erişim Tarihi: 12.09. 2018)

Golding, E. W. (1976). The Jeneration Of Electricity By Windpower, London: Spon Ltd., 8-16.

Hennessey Jr JP. (1978). A Comparison Of The Weibull And Rayleigh Distributions For Estimating Wind Power Potential. Wind Engineering; 2(3):156-164.

Kincay, O., Yumurtaci, Z. ve Bekiroglu, N. (2009). Rüzgar Enerjisi Ders Notları, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi

Leung, Y.C.D., Yang, Y., (2012). Wind Energy Development and Its Environmental Impact: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 1031¬1039.

Mehel, N. (2009). *Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, Kullanımı ve Almanya-Türkiye Karşılaştırması,* Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Meteoroloji Diyarbakır Bölge Müdürlüğü-2019

Ortaç, O., (2007). *DA/AA Dönüştürücü*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-29.

Sarıtaş, M., Aydemir, M.T., Dalbaz, A. (2002). *700 VA Kesintisiz Güç Kaynağı Devresinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.* Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 17, No 1, 33-42, 2002.

Şimşek, V., (2007). *Rüzgar Enerjisi ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı*. Cumhuriyet Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Sivas.

Tong, W. (2010). Wind Power Jeneration and Wind Turbine Design, WIT Press, Boston.

Toprak, A. (2011). *Elektrik Üretimi Düşük Güçlü Rüzgar Enerji Sistemi Tasarımı*. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Konya.

Turhal, S. (2009). *Rüzgar Türbinleri ve Kontrol Sistemleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

Turkish Wind Energy Association 2016. Wind Energy Statistics ReportJanuary 2015, Ankara :Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.

Kalyoncu, Ö. T. (2012). *Avrupa Birliği'nde Rüzgar Enerjisi: İspanya ve Türkiye Örneği*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Ulgen K., Hepbasli A., (2002). *" Determination of Weibull parameters for Wind Energy Analysis of Izmir,Turkey "*, International Journal of Energy Research,26:495-506.

Vural, A. (2011). *Rüzgar Türbinleri için Kanat Açısı ve Rotor Hız Kontolü Yaparak Verimliliğin Sağlanması,* Yüksek Lisans Tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü-2019

ÖZGEÇMİŞ

01.02.1989 Diyarbakır doğumluyum. Evli bir çocuk babasıyım. 2008-2012 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik/Mimarlık Makültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldum. 15.04.2013'ten itibaren mühendis olarak Erzincan Botaş kompresör istasyonuna atandım. 16.10.2017'den itibaren de Diyarbakır'da Birim Baş Mühendisi olarak çalışıyorum.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	FEDLİ AKINCI
ÖĞRENCİ NO	16802005
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	FİZİK
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	RÜZGAR ENERJİSİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	61
BENZERLİK ORANI	%20
RAPORLAMA TARİHİ	30/04/ 2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 61 sayfalık kısmına ilişkin, 30/04/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *TURNİTİN* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 20 dir

Uygulanan filtrelemeler:

☒Kabul/Onay sayfaları hariç,
☒Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

FEDLİ AKINCI
07/05/2019

DR.ÖĞR.ÜYESİ FATMA FİGEN BİNBAY	PROF.DR.HATİCE BUDAK GÜMGÜM
Tez Danışmanı	**Anabilim Dalı Başkanı**
07/05/2019	07/05/2019

Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.

KGK-FRM-340/00