

T.C.

NİĞDE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

NİĞDE İLİNDE KURULABİLECEK RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİNİN

FİZİKSEL VE EKONOMİK ANALİZİ

BEYTULLAH TAŞKIN

HAZİRAN 2013

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

NİĞDE İLİNDE KURULABİLECEK RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİNİN
FİZİKSEL VE EKONOMİK ANALİZİ

BEYTULLAH TAŞKIN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜMÜŞ

Haziran 2013

Beytullah TAŞKIN tarafından Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÜMÜŞ danışmanlığında hazırlanan “Niğde İlinde Kurulabilecek Rüzgar Enerjisi Santralinin Fiziksel ve Ekonomik Analizi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :  Yrd.Doç.Dr. Mehmet DEMİRALP

Niğde Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu

Üye :  Yrd.Doç.Dr. Menderes KALKAT

Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye :  Yrd.Doç.Dr. Ahmet Gümüş

Niğde Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

......./...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içerisindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Beytullah TAŞKIN

ÖZET

NİĞDE İLİNDE KURULABİLECEK RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALİNİN

FİZİKSEL VE EKONOMİK ANALİZİ

TAŞKIN, Beytullah
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜMÜŞ

Haziran 2013, 95 sayfa

Sanayinin ve teknolojinin her geçen gün hızla gelişmesi, buna karşılık mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması, ülkemizin enerji kaynaklarına olan ihtiyacını artırmaktadır. Türkiye'nin büyük oranda ithalat yoluyla enerji talebini karşılıyor olması, dışa olan bağımlılığını artırmıştır. Günümüzde gelişmiş birçok ülke enerji problemini çözmek için; Güneş, rüzgar, dalga, biyokütle gibi yenilenebilir enerjilere yönelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisi ile ilgili yatırımlar son yıllarda hızlı bir artış göstermektedir. Dünya genelinde birçok ülke rüzgar enerjisi kullanımını teşvik etmektedir. Bu nedenle, ülkemizin enerji talebinin karşılanabilmesi için biz de mevcut rüzgar potansiyelimizi değerlendirmemiz gerekir.

Bu çalışmada ilk olarak, enerji kaynakları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Rüzgar enerjisinin Türkiye'deki ve Dünya'daki durumu ile ilgili teorik ve istatistiksel bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra ise rüzgar enerjisinin fiziksel özelliklerine yer verilmiştir. Son kısımda, Niğde ilinin rüzgar enerjisi potansiyelinin varlığını göz önüne serilmiştir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) verilerini kullanarak ve RETScreen programı ile kurulabilecek rüzgar santralinin fiziksel ve ekonomik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; Niğde ilinin rüzgar enerjisinin fiziksel ve ekonomik analizi sonucunda elektrik enerjisi üretiminin mevcut şartlara göre şu an için ekonomik olduğunu söyleyebiliriz.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, rüzgar santrali, elektrik enerjisi, yatırım projesi

SUMMARY

WIND POWER PLANTS INSTALLED IN NİĞDE

PHYSICAL AND ECONOMIC ANALYSIS

TAŞKIN, Beytullah

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assistant Professor Dr. Ahmet GÜMÜŞ

June 2013, 95 papes

The rapid development of industry and technology with each passing day, whereas that it is limited to the available energy sources, has increased the need for energy sources in our country. That Turkey meets energy demand by largely through imports, has increased its dependence on export. . Investments about wind energy that is one of the renewable energy sources have shown a rapid increase in the last few years. Many countries around the world promotes the use of wind power. Therefore, in order to meet the energy demand of our country, we need to evaluate the existing wind potential.

In this study, firstly, it has been examined the physical aspect of wind energy; the theoretical and statistical information about the state of the wind energy in the world and in Turkey are given. In the second part, for wind energy ,the European Union and Turkey's wind energy policies and incentives have been discussed. In the last part, the presence of the wind energy potential in the center of the province of Nigde has been demonstrated.By using datas of Turkey Wind Energy Potential Atlas (REPA) and physical and economic analysis of wind power central that will be planted by RETScreen package program has been analysed.

Consequently, as result of of physical and economic analysis of the wind energy of Nigde we can say economic according to the prevailing conditions as a result of physical and economic analysis of the cost for the moment.

Keywords: *wind energy, wind plants, electric energy, investment Project*

ÖNSÖZ

Rüzgar enerjisi, son yıllarda önemi ivmeli bir şekilde artan yenilenebilir bir enerji türüdür. Temiz bir enerji kaynağı olarak bilinen ve yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemli bir yere sahip olan rüzgar enerjisinin birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Ticari açıdan en elverişli enerji türüdür. Rüzgarın insan sağlığı ve çevreyle uyumlu yerli bir enerji kaynağı olması, tükenmez olması, fosil yakıtlardan tasarruf sağlaması tercih sebebidir. Gelişen teknoloji ile birlikte, enerji birim maliyetleri de düşmektedir.

Tez konusunun belirlenmesi sırasında ve tez hazırlık aşamasında, bana yol gösteren, bilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜMÜŞ'e, Niğde Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerine, en sıkıntılı zamanlarımda desteklerini esirgemeyen eşime ve tüm aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II. ENERJİ KAYNAKLARI VE RÜZGAR ENERJİSİ	3
2.1 Enerji Kaynakları.....	3
2.1.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları	4
2.1.1.1 Petrol.....	4
2.1.1.2 Linyit ve taş kömürü	5
2.1.1.3 Doğalgaz.....	6
2.1.1.4 Nükleer enerji	7
2.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	8
2.1.2.1 Güneş Enerjisi	8
2.1.2.2 Hidroelektrik enerji.....	11
2.1.2.3 Biyokütle enerjisi.....	12
2.1.2.4 Jeotermal enerji.....	14
2.1.2.5 Dalga enerjisi.....	15
2.1.2.6 Hidrojen enerjisi	16
2.2 Rüzgâr Enerjisi	17
2.2.1 Rüzgâr Enerjisinin Gücü	18

2.2.2	İdeal disk teorisi ve betz limiti	20
2.2.3	Rüzgar enerji santrallerinin (RES) tarihçesi.....	25
2.2.4	Rüzgar potansiyelinin sınıflandırılması	27
2.2.5	Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları.....	28
2.2.6	Dünya’ da rüzgâr enerjisi potansiyeli ve uygulamaları	31
2.2.7	Türkiye’ de rüzgâr enerjisi potansiyeli ve uygulamaları	33
BÖLÜM III. RÜZGARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ		41
3.1	Rüzgarın Fiziksel Özellikleri	41
3.1.1	Rüzgar oluşumu ve kuvvetler.....	41
3.1.2	Havanın yoğunluğu.....	44
3.1.3	Havanın sıcaklığı ve basıncı.....	45
3.1.4	Türbülans.....	46
3.1.5	Pürüzlülük ve pürüzlülük uzunluğu	46
3.1.6	Hellmann yükseltme bağıntısı	49
3.1.7	Rüzgar hızı ölçümü ve anemometre	49
3.1.8	Basınç, sıcaklık, nem ve çevre	51
3.2	Rüzgar Engelleri.....	52
3.2.1	Wake etkisi (Wake effect).....	52
3.2.2	Türbinlerin yerleşim etkisi (Park effect).....	53
3.2.3	Tünel etkisi (Tunnel effect).....	54
3.2.4	Tepe etkisi (Hill effect).....	54
3.2.5	Rüzgar türbini alanının seçimi	55
3.2.6	Weibull dağılımı	56
3.2.7	Rayleigh dağılım fonksiyonu	57
3.2.8	Kanat sayısının etkisi	57

3.2.9	Kanat süpürme alanı	58
3.2.10	Kanat yapımında kullanılan malzemeler.....	59
3.2.11	Kule yüksekliğinin etkisi.....	60
BÖLÜM IV. NİĞDE İLİNİN RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN FİZİKSEL VE EKONOMİK ANALİZİ		61
4.1	Materyal ve Metot	61
4.1.1	RETScreen	61
4.1.2	Niğde ilinin coğrafi konumu	62
4.1.3	Niğde ilinin rüzgar verileri.....	62
4.1.4	Niğde ilinin rüzgar yönü ve hızı.....	64
4.1.5	Atmosfer basıncı sıcaklık ve rüzgârlar	66
4.2	RETScreen ile Rüzgar Analizi	67
4.2.1	Enerji modeli	68
4.2.2	Maliyet analizi.....	68
4.2.3	Ekonomik analiz.....	69
BÖLÜM V. BULGULAR VE TARTIŞMA.....		71
BÖLÜM VI. SONUÇ.....		76
KAYNAKLAR		78

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Rüzgâr santralindeki değişik bölümlerin verim değerleri	24
Tablo 2.2. Dünya genelinde ilk 20 ülkenin güç kapasiteleri	32
Tablo 2.3. Bölgelere göre yıllık ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu	34
Tablo 2.4. Türkiye'de (2013) işletmedeki rüzgar elektrik santralleri	36
Tablo 2.5. Yenilenebilir enerji alım fiyatları	39
Tablo 2. 6. Yenilenebilir enerji yerli katkı ilaveleri	40
Tablo 3.1. Farklı yüzeylerin z pürüzlülük uzunluğu değerleri	47
Tablo 3.2. Farklı yüzeylerin α rüzgar kesme üs değerleri	48
Tablo 4.1. Niğde ilinde kurulabilecek rüzgâr enerjisi santrali güç kapasitesi	64
Tablo 4.2. Niğde İline ait 1970-2012 arası ortalama rüzgar hızları ve yönleri	65
Tablo 4.3. Niğde İline ait 1970-2012 arası aylık toplam rüzgar esme sayıları	66
Tablo 4.4. RETScreen yazılımından rüzgâr türbini seçimi	69
Tablo 4.5. RETScreen yazılımıyla elde edilen maliyet analizi	69
Tablo 4.6. RETScreen yazılımıyla elde edilen finansal parametreler	70
Tablo 5.1. RETScreen yazılımı ile elde edilen niğde meteoroloji verileri.	71
Tablo 5.2. Niğde için seçilen türbine göre güç eğrisi ve enerji eğrisi verileri	72
Tablo 5.3. RETScreen yazılımıyla elde edilen proje yıllık gelirleri	74
Tablo 5.4. RETScreen yazılımıyla elde edilen diğer gelirler ve maliyetler	74
Tablo 5.5. RETScreen yazılımıyla elde edilen proje maliyetleri ve tasarrufları	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Doğalgazın uzun borularla nakledilmesi	6
Şekil 2.2. Nükleer santral	7
Şekil 2.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası (GEPA).....	9
Şekil 2.4. Niğde güneş enerjisi potansiyeli haritası(GEPA).....	9
Şekil 2.5. Güneş enerjisi tarlaları	10
Şekil 2.6. Barajlardaki su türbinlerle elektrik enerjisine dönüştürülür.....	12
Şekil 2.7. Enerji bitkisi olarak tarımı yapılan kolza bitkisi	13
Şekil 2.8. Yeraltındaki sıcak sular basınçla yeryüzüne çıkar	14
Şekil 2.9. Dalgadan enerji üreten pelamis	15
Şekil 2.10. Rüzgardaki enerji bir türbinle elektrik enerjisine dönüştürülür	17
Şekil 2.11. Betz modeli	21
Şekil 2.12. Betz güç faktörü grafiği.	23
Şekil 2.13. Eski çağlarda rüzgarın kullanım alanları	26
Şekil 2.14. Göç yollarına kurulan türbinler kuş ölümlerine sebep olabilir	30
Şekil 2.15. Türkiye geneli rüzgar kurulu gücü	34
Şekil 3.1. Dünya çevresindeki hava hareketleri.....	41
Şekil 3.2. Coriolis saptırıcı kuvvetleri.....	43
Şekil 3.3. Bir atm basınç altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi	45
Şekil 3.4. 15° C’ de hava basıncının ve yoğunluğunun yükseklik ile değişimi	45
Şekil 3.5. a) Rüzgarın engeller etrafındaki türbülans etkisi b) Gökyüzünde türbülans	46
Şekil 3.6. Ağaçlarla kaplı zemin örneği	48
Şekil 3.7. Rüzgar gözlem istasyonu	50
Şekil 3.8. Bir engel etrafında rüzgârın akışı	52
Şekil 3.9. Wake etkisi.....	53

Şekil 3.10. Türbin yerleşim planı	53
Şekil 3.11. Tünel etkisi örneği	54
Şekil 3.12. Tepe etkisi örneği	55
Şekil 3.13. Hakim rüzgâr yönü	55
Şekil 3.14. Kanat sayısı etkisi	57
Şekil 3.15. Rotor çapı güç ilişkisi	58
Şekil 3.16. Kanat süpürme alanının büyümesi enerjiyi de artırır	59
Şekil 3.17. Kule yüksekliği attıkça enerji de artar	60
Şekil 4.1. Niğde İline ait 50 metre rüzgâr hızı haritası	63
Şekil 4.2. Niğde İline ait 50 metre rüzgâr kapasite faktörü haritası	63
Şekil 5.1. RETScreen yazılımından elde edilen güç ve enerji eğrisi	73
Şekil 5.2. RETScreen yazılımından elde edilen enerji eğrisi	73
Şekil 6.1. Enercon E48, 74 metre	77

SİMGE VE KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgar Enerji Santrali
RĞİ	Rüzgar Gözlem İstasyonu
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TMMOB	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
UEA	Uluslararası Enerji Ajansı
YE	Yenilenebilir Enerji
D,B,K,G	Doğu, Batı, Kuzey, Güney
KKD	Kuzey Kuzeydoğu
KD	Kuzeydoğu
DKD	Doğu Kuzeydoğu
DGD	Doğu Güneydoğu
GD	Güneydoğu
GGD	Güney Güneydoğu
GGB	Güney Güneybatı
GB	Güneybatı
BGB	Batı Güneybatı
BKB	Batı Kuzeybatı
KB	Kuzeybatı
KKB	Kuzey Kuzeybatı

BÖLÜM I

GİRİŞ

İnsanlar tarih boyunca enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Diğer canlı varlıklar gibi sadece besinler yoluyla aldıkları enerjiyle yetinmemişler ve besin kaynakları dışında çeşitli enerji kaynakları keşfederek bu kaynakları çeşitli teknolojiler sayesinde ısı, mekanik ve elektrik enerjisine çevirmeyi öğrenmişlerdir (Aslan, 2006).

Enerji, esas olarak iş yapabilme yeteneği demektir. İş, kuvvet ile kuvvetin etki ettiği yönde yer değiştirmenin çarpımına eşittir. Dolayısıyla, yapılan bir işten söz edilebilmesi için bir kuvvetin varlığı ve bu kuvvetin etki noktasının hareket ediyor olması gerekir. Yani ne kadar kuvvetli olursanız olun ve ne kadar büyük bir kuvvet uygularsanız uygulayın, eğer bu kuvveti uyguladığınız nokta hareket etmiyorsa fiziksel anlamda hiç iş yapmıyorsunuz demektir (Altın, 2002).

Dünya nüfusunun artması, teknolojideki yeni gelişmelere paralel olarak artan enerji ihtiyacının karşılanması, enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sürdürülebilirliği sağlama isteği, Kyoto Protokolü¹ gereğince CO₂ ve diğer sera gazı emisyonlarının azaltılması zorunluluğu yenilenebilir enerji yatırımlarını zorunlu hale getirmiştir.

Bugün tüm dünyada çözülmesi gereken öncelikli küresel problemlerin başında, sürdürülebilir enerji güvenliği gelmektedir. Bir ülkenin bağımsızlığı artık “kendi enerjisini karşılayabilme potansiyeli” ile belirlenmektedir. Enerji olmadan endüstri, endüstri olmadan refah ve mutlu toplum veya bağımsızlığını koruyabilme yeteneği olmayacaktır. Petrol ve doğal gaz gibi konvansiyonel enerji kaynaklarının giderek azalıyor olması, alternatif ve yenilenebilir çözümlerin ortaya çıkarılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapılan uzun dönem araştırmalarına göre, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelecekte günümüzden daha etkin bir rol oynayacağı öngörülmektedir (Karadağ ve arkadaşları, 2009).

Yenilenebilir enerji kaynakları ülkenin enerji ihtiyacını karşılarken, fosil yakıtlarla rekabet edebilecek hale gelmesi için devletler tarafından desteklenmektedir. Yapılan bu

¹ Kyoto Protokolü; Kyoto Protokolü, gelişmiş ülkelerin sera gazı (karbondioksit, metan, nitroz oksit, kükürt hekzaflorür, hidroflorokarbon (HFC), perflorokarbon (PFC) salınımlarını 2008-2012 yılları arasında, 1990 yılına göre ortalama % 5 oranında azaltmalarını hedefleyen bir anlaşmadır.

desteklemeler, hem yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yerli üreticileri teşvik etmekte, hem de bu tür uygulamaların ülke çapında yaygınlaşmasına neden olmaktadır.

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerjiler arasında en gelişmiş olanı ve ticari açıdan en ucuz enerji türüdür. Rüzgarın insan sağlığı ve çevreyle uyumlu yerli bir enerji kaynağı olması, tükenmez olması, fosil yakıtlardan tasarruf sağlaması, teknolojiye ilerlemeler sonucu kurulum ve işletim maliyetinin her geçen gün düşmesi gibi nedenlerle, giderek daha çok tercih edilen bir enerji kaynağı haline gelmiştir (Bayraç, 2011).

Günümüzde ülkelerin karşı karşıya kaldıkları en önemli sorunların başında enerji ihtiyacı ve bunun giderilmesi gelmektedir. Böyle bir sorunun çözümünde, temiz enerjinin üretilmesi, depolanması, dağıtılması ulusal ve uluslararası düzeyde çok önemli bir konu olarak yer almaktadır. Dünya ülkelerinin bugünkü enerji ihtiyacının yaklaşık %50'si petrole bağlıdır. Önümüzdeki yıllarda bu oranın daha da artacağı tahmin edilmektedir. Bu bakımdan rüzgar enerjisinin kullanımı, çevresel kaygılar da dikkate alındığında oldukça önemlidir. Rüzgar enerjisi alternatif enerjiler arasında en ucuz maliyetli ve önemi her geçen gün artan bir enerjidir. Artık tüm ülkeler bu enerjiden en üst seviyede yararlanmak için bu alanda yapılan tüm çalışmaları desteklemektedir. Önümüzdeki yıllar, bu enerjinin atılım yaparak zirveye yerleşeceği yıllar olacaktır (Nurbay, 2005).

Türkiye'nin enerji konusunda birçok problemi olmasına rağmen, öne çıkan en önemlisi dışa bağımlı olmasıdır. Giderek artan birincil enerji ihtiyaçları karşısında, yerli enerji kaynaklarının zamanında hizmete alınamayışı enerji arzında dışa bağımlılık ve bunun doğurduğu ekonomik ve siyasi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Türkiye'de petrol ve doğal gaz aramalarında arzu edilen gelişmelerin meydana gelmemesi, yetersiz yerli üretim, birincil enerji arzında %73 gibi yüksek bir değerle dışa bağımlılık doğurmuştur. Artan birincil enerji ihtiyaçları karşısında bu oranın giderek artması beklenmektedir (WEC, 2011).

BÖLÜM II

ENERJİ KAYNAKLARI VE RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Enerji Kaynakları

Çalışmanın bu bölümünde enerji kaynakları ve rüzgar enerjisi hakkında genel bilgiler verilerek rüzgar enerjisinin önemine dikkat çekilmiş, Dünyadaki ve Türkiye’ deki uygulamalarına değinilmiştir.

Enerji, günümüzde en önemli tüketim maddelerinden biri ve vazgeçilmez bir uygarlık aracıdır. Gelişmişlik düzeyi yüksek ülkelerin en önemli ihtiyaçlarının başında gelen enerji tüketimi, sürekli artarak devam etmektedir. Bugün sahip olduğumuz teknolojik gelişmelerin devam etmesi ve sunduğu imkanların yaşamımızda sürmesi için doğrudan ve dolaylı olarak enerjiyi tüketmek zorundayız. Tüketmek zorunda olduğumuz enerjinin bugün büyük bir çoğunluğu fosil yakıtlarından, geri kalanı ise nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Fosil yakıt kullanımının çevre ve insan sağlığına verdiği zararlar ortadadır. Eğer önlem alınmazsa, bu zararların telafisi için gelecek nesillerin ödeyeceği bedelin çok büyük boyutlara ulaşması kaçınılmaz olacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, yeryüzünde ve tabiatta çoğunlukla herhangi bir üretim sürecine ihtiyaç duymadan temin edilebilen, fosil kaynaklı (kömür, petrol ve karbon türevi) olmayan, elektrik enerjisi üretilirken CO₂ emisyonu az bir seviyede gerçekleşir. Çevreye zararı ve etkisi geleneksel enerji kaynaklarına göre çok daha düşüktür. Sürekli bir çevrimle yenilenir ve kullanılmaya hazır olarak tabiatta var olur. Hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git, hidrojen gibi enerji kaynaklarını ifade eder. Kısaca, yenilenebilir enerji, tabiatta var olan ve sürekli kendini yenileyen enerji kaynağı demektir. Hidroelektrik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, gel-git enerjisi gibi kaynaklar yenilenebilir ve bunlar kullanmakla eksilmez enerji kaynaklarıdır (MEB, 2012).

2.1.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları

Yenilenemeyen (dönüşümsüz) enerji kaynakları milyonlarca yıl öncesinden depolanan güneş enerjisi olup fosil yakıtlar; petrol, doğal gaz, kömür, petrollü kayalar (şeyl) ve nükleer enerji olarak isimlendirilir. 19. yüzyıl sonlarında ve 20. yüzyıl başlarında Avrupa'nın temel enerji kaynağını oluşturan kömür kullanımı, 20. yüzyılın ikinci yarısında nükleer sanayinin hızla kurularak büyümesi ile nükleer enerji alanına yönelmiştir. Fransa bu geleneği hala devam ettirmektedir. İkinci Dünya savaşından sonra Orta Doğu'daki petrol kaynaklarının kullanılmaya başlanması kömürün yerine petrolün tercih edilmesini sağlamıştır. 1960'lı yıllar ile 1974'deki ilk petrol krizine kadar olan dönem henüz petrolün nispeten ucuz ve kolay temin edilebilir olduğu zamanlardı. 1974 ve 1979 yıllarında yaşanan enerji krizlerinin ardından, Avrupa ve dünya ülkeleri petrolün yerini alabilecek yakıt ve yeni enerji kaynaklarına geçilmesi gerekliliğini kavramışlardır (Bozdoğan, 2003).

2.1.1.1 Petrol

Son yıllarda enerji kaynakları içerisinde petrolün giderek önemini kaybedeceği yönündeki tartışmalar ağırlık kazanmıştır. Alternatif enerji kaynaklarının varlığı ile petrol rezervlerinin hızla tükenmesi, bu iddianın dayanaklarını oluşturmaktadır. Ancak, gerek alternatif enerji kaynaklarının yeterince ekonomik hale gelmemiş olması gerek ise yeni yatırımlarla birlikte yeni petrol rezervlerinin keşfedilmeye devam etmesi, petrolün bir stratejik ürün olarak öneminin azalmasını engellemektedir.

Petrol, 19. yüzyıldan itibaren ticari olarak kullanılmaya başlanmış ve önemli bir sermaye birikim kaynağı olmuştur. Daha önce temel enerji kaynağı kömür iken, petrol 20. yüzyıldan sonra temel stratejik ürün niteliği kazanmıştır. Petrol ve doğal gaz, hem birincil enerji kaynağı hem de kolay vergilendirilebilen bir ürün olması nedeniyle ülkelerin ekonomik gelişmesinde önemli bir yere sahiptir (Petrol-İş, 2011)

Petrol rezervinin 100 milyar tonu (%57) Orta Doğu Ülkelerinde, 17 milyar tonu (%9) Rusya ve Bağımsız Devletler Topluluğu (BDT) ülkelerinde, 16,9 milyar tonu Afrika'da (%10) bulunmaktadır. Dünya üretilebilir petrol ve doğal gaz rezervlerinin yaklaşık %72'lik bölümü, Türkiye'nin yakın coğrafyasında yer almaktadır. Türkiye, jeopolitik

konumu itibariyle dünya ispatlanmış petrol ve doğal gaz rezervlerinin dörtte üçüne sahip bölge ülkeleriyle komşu olup enerji zengini Hazar, Orta Asya, Orta Doğu ülkeleri ile Avrupa'daki tüketici pazarları arasında doğal bir "Enerji Koridoru" olmak üzere pek çok önemli projede yer almakta ve söz konusu projelere destek vermektedir. (GEKA, 2012).

2.1.1.2 Linyit ve taş kömürü

Kömür yanabilen organik bir kayadır. Kömür karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş olup, diğer kaya tabakalarının arasında milyonlarca yıl kalarak ısı, basınç ve mikrobiyolojik etkilerin sonucunda meydana gelir. Dünya genelinde kömür rezervlerinin 297 trilyon tonu (%32) Asya Pasifik ülkelerinde, 254 trilyon tonu (%28) Kuzey Amerika ülkelerinde, 222 trilyon tonu (%24) Rusya ve BDT ülkelerinde bulunmaktadır (GEKA,2012).

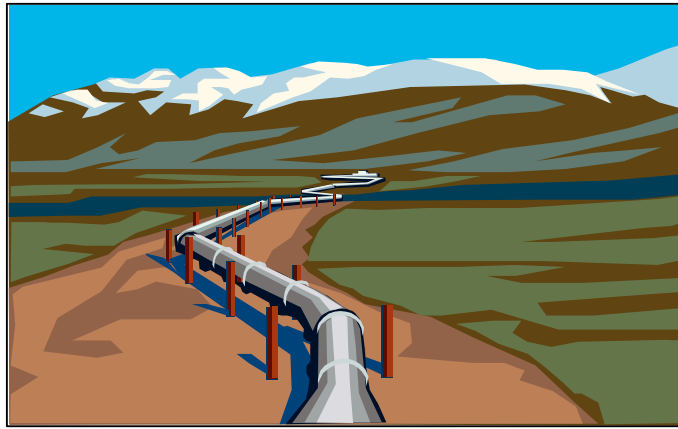
Enerji hammaddeleri içinde önemli bir yere sahip olan kömür dünyada geniş rezervlere ve yaygın tüketim alanlarına sahiptir. Kömürleşme süreci ve oluşum, nem içeriği, kül ve uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, kükürt ve mineral madde içeriklerinin yanı sıra jeolojik, fiziksel, kimyasal ve termik özellikler yönünden kömürler çok çeşitlilik gösterirler. Kömür üretimi, kullanımı ve teknolojisinde ileri ülkeler öncelikle kendi kömürlerinin özelliklerine göre bir sınıflama yaptıkları gibi uluslararası genel bir sınıflama için ortak standartlar da geliştirmişlerdir. Kömür, fosil yakıtlar arasında en yaygın olanıdır. Yapılan araştırmalarda, kömürün, Dünya birincil enerji arzı içinde petrolle birlikte en yüksek oranda kullanılan yakıt olma niteliği 2035 yılına kadar artarak devam edeceği öngörülmektedir.

Toplam dünya linyit rezervinin yaklaşık %1,6'sı ülkemizde bulunmaktadır. Türkiye'nin toplam linyit rezervi 12,4 milyar ton seviyesinde olup işletilebilir rezerv miktarı ise 3,9 milyar ton düzeyindedir. Bununla birlikte linyitin büyük kısmının ısı değeri düşük olduğundan termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmıştır. 2005 yılından itibaren enerji üretiminde yerli kaynaklara önem verilmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması hedefleri çerçevesinde sanayileşme ve nüfus artışına paralel olarak artan enerji talebinin karşılanması amacıyla; yeni kömür sahalarının bulunması ve bilinen sahaların

geliştirilmesi çalışmalarına hız verilmiştir. Kömür aramalarında sondaj miktarı son yıllarda artarak devam etmektedir (WEC,2011).

2.1.1.3 Doğalgaz

Dünya toplam konvansiyonel üretilebilir doğal gaz rezervleri 2011 yılı sonu itibarı ile 208,4 trilyon m³ olarak verilmektedir. Dünyanın kanıtlanmış gaz rezervlerinin yaklaşık yarısından fazlası Rusya ve Orta Doğuda bulunmaktadır. ABD dünya doğalgaz rezervinin sadece % 4'üne sahip olmasına rağmen Dünya doğalgaz üretiminin %20'sini gerçekleştirmektedir. Doğal gaz rezervlerinin yoğun olduğu bölge, 80,0 trilyon m³ ile Orta Doğu (%38,4) bölgesidir. Orta Doğu bölgesini 74,7 trilyon m³ (%35,8) rezerviyle Rusya'yı izlemektedir. Ülkeler bazında bakıldığında ise, Rusya Federasyonu 44,6 trilyon m³ rezerviyle (%21,4) ilk sırada yer alırken, onu İran (33,1 trilyon m³) ve Katar (25,0 trilyon m³) izlemektedir. Rusya'nın zengin gaz rezervleri, bir yandan bu ülkenin ekonomik gücüne büyük katkı, diğer yandan da birçok ülkeyle dış ilişkilerinde ciddi politik üstünlük sağlamaktadır. Doğalgaz talebinin yoğun olduğu kış aylarında kaynak ülkelerdeki veya güzergâh ülkelerindeki aksamalar, dönemsel arz-talep dengesizliklerine yol açabilmektedir. Şekil 2.1.'de doğal gazın taşınması görülmektedir.



Şekil 2.1. Doğalgazın uzun borularla nakledilmesi

Hazar ve Orta Doğu bölgesi gaz kaynaklarının AB piyasalarına ulaştırılmasını hedefleyen Güney Avrupa Gaz Ringi (Türkiye-Yunanistan-İtalya Boru Hattı) Yunanistan bağlantısı 2007 yılında tamamlanarak işletmeye başlamıştır. Yıllık 12

milyar m³ kapasite ile Yunanistan ve İtalya gaz piyasalarında önemli bir paya sahip olacak olan bu proje, Türkiye gaz sisteminin AB ile bütünleşmesinin ilk adımını oluşturmuştur (WEC, 2012).

2.1.1.4 Nükleer enerji

Nükleer enerji atomun çekirdeğiyle ilgili bir olay olup, iki şekilde elde edilebilir. Bunlardan birincisi iki küçük çekirdeğin birleştirilmesi, yani füzyon, ikincisi ise büyük bir çekirdeğin parçalanması, yani fisyonudur. Aslında nükleer enerjinin, kendiliğinden oluşması nedeniyle insan müdahalesine imkan tanımayan bir üçüncü şekli daha vardır, Bu yapı kararsız olan 'radyoaktif' çekirdeklerin daha kararlı yapılara dönüşmeleri sırasında açığa çıkan ısı enerjisidir. Halen ticari olarak enerji üreten nükleer santrallerin işleyişi, çekirdek parçalanmasına, yani fisyon dayalıdır. Yakıtları uranyum, toryum gibi radyoaktif elementlerdir. Doğada bulunan uranyum neredeyse bütünüyle proton sayıları aynı (92), nötron sayılarıysa farklı olan U-235 ve U-238 izotoplarından oluşur. Şekil 2.2.'de bir nükleer santral görülmektedir.



Şekil 2.2. Nükleer santral

U-235 çekirdeği yavaş bir nötron yutup parçalandığında ortaya; 'fisyon ürünleri' denilen orta büyüklükte iki çekirdek, ayrıca bazı radyasyon parçacıkları ve iki ya da üç hızlı nötron çıkar. Eğer bu hızlı nötronlar yavaşlatılabilir ve bu arada yutulmazlarsa, diğer U-235 çekirdekleri tarafından yutulup yeni fisyonlara, buradan çıkan hızlı

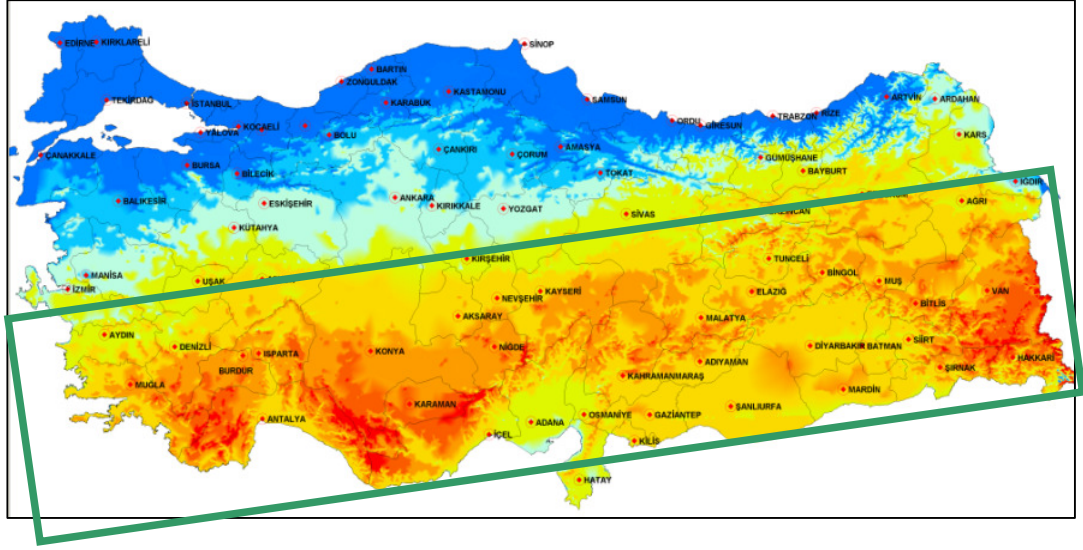
nötronlar yavaşlatılıp, yine yeni fisyonlara yol açabilir. Böylelikle bir ‘zincirleme tepkime’ ortamı kurulmuş olur. Bunu başarabilmek için ortamın kimyasal kompozisyonunu, geometrisini ve boyutlarını uygun şekilde seçmek gerekir. Söz konusu ortama, nükleer reaktörün kalbi denir. Bir nükleer santrali diğer termik santrallerden farklı kılan, bu kalptir. Diğer bileşenler yaklaşık aynıdır. Nükleer enerji; biyolojik dengeyi geri dönülemez boyutlara getirmesi sebebiyle ve güvenlik harcamaları çok olmasından yatırımlarda tercih edilecek son enerji seçeneği olmalıdır (Bilim ve Teknik Dergisi, 2002).

2.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

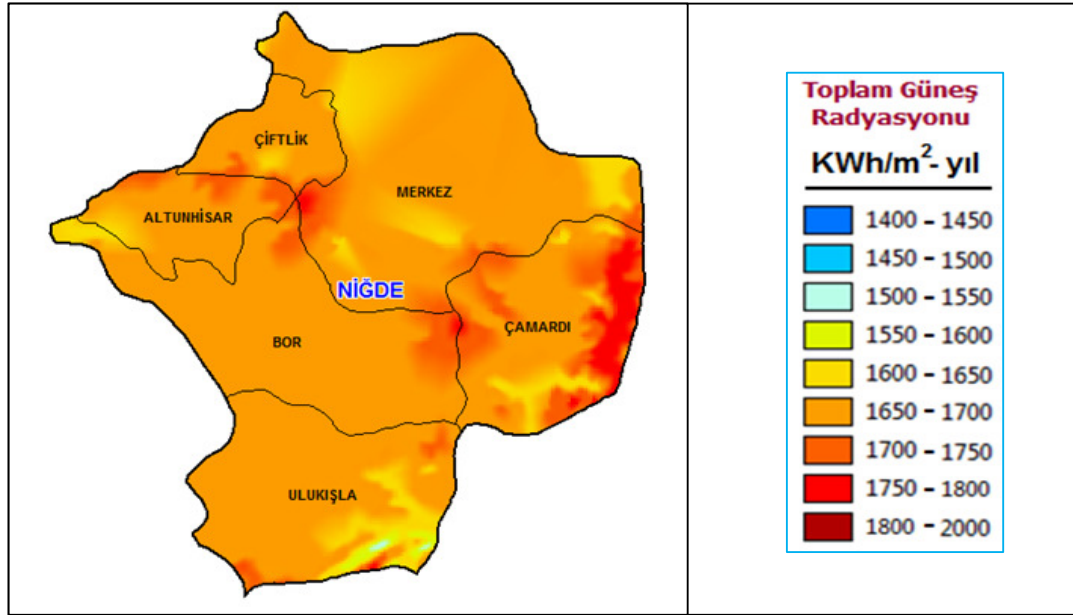
2.1.2.1 Güneş enerjisi

Türkiye 36 ve 42 kuzey enleminde Akdeniz’de yer almaktadır ve tipik Akdeniz iklimine sahiptir. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülke olan Türkiye, yıllık ortalama güneş radyasyonu 3.6 kWh/m^2 gün’dür. Şekil 2.3.’de görüldüğü gibi toplam yıllık radyasyon periyodu yaklaşık 2640 saat civarındadır. Türkiye’de birkaç şehrin güneş radyasyonunu belirlemek için bireysel bazda bir takım çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyel atlası Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE) tarafından geliştirilmiştir. EİE verilerine göre yoğun güneş alan şehirlerimizden biri de yıllık 2628 saat ile Niğde’dir (Şekil 2.4) (Karamanav, 2007).

Güneş, dünyaya göre tükenmez olduğu kabul edilen tek enerji kaynağıdır. Fosil enerji kaynakları ve diğer alternatif enerji kaynakları güneş ışınlarının fiziksel etkilerinden oluşmuştur. Güneş enerjisi dalgalı ve değişkendir. Işıma, atmosfer koşullarına bağlıdır. Bu özelliklerinden dolayı güneş enerjisinin depolanması ve farklı uygulama alanlarında kullanılması ile bu üstün nitelikli yenilenebilir enerji kaynağından en verimli şekilde yararlanılmış olur. Ülkemizde güneş enerjisi yatırımları henüz yeni başlamıştır. Güneş enerjisi potansiyelimizi değerlendirmek için mevcut yatırımlara hız verilmelidir (Şenpınar ve Gençoğlu, 2006).



Şekil 2.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası (GEPA)



Şekil 2.4. Niğde güneş enerjisi potansiyeli haritası (GEPA)

Güneş enerjisi, güneşin merkezinde, temelde hidrojen çekirdeklerinin kaynaşmasıyla nükleer füzyon reaksiyonu sonucu meydana gelir. Güneşin merkezinde oluşan bu reaksiyon sonucu yaklaşık 15 milyon derecelik bir sıcaklık oluşur. Güneşin korundaki bu tepkimeler sonucu büyük bir enerji ortaya çıkmaktadır.

Güneşin toplam ışıması 3.8×10^{26} Joule/saniye olduğundan, güneşte bir saniyede yaklaşık 600 milyon ton proton, yani hidrojen tüketilmektedir. Bu sayı ilk bakışta ürkütücü bir rakam olarak gözükse de, güneşin kütlesinin yaklaşık %70'lik kısmının hidrojen olduğu düşünülürse, güneşteki hidrojen yakıtının tüketilmesi için daha yaklaşık 5 milyar yıllık bir süre olduğu ortaya çıkar. Bu yönüyle güneş, insanlık için tükenmez bir enerji kaynağıdır.

Güneşin içinde, sürekli olarak Hidrojenin Helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmektedir ve oluşan kütle farkı, ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Güneşte açığa çıkan bu enerjinin çok küçük bir kısmı yeryüzüne ulaşmaktadır. Atmosferin dış yüzeyine ulaşan enerji 173.100 kW değerindeyken, yeryüzüne ulaşan değer 1.400 kW'a düşmektedir (Akbulut ve Dikici, 2004).



Şekil 2.5. Güneş enerjisi tarlaları

Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre 380 TWh/yıl olarak ifade edilmektedir. Mevcut durumda herhangi bir güneş enerjisi lisansı olmamasına karşın, araştırma amaçlı kullanılan güneş pili kurulu gücü 1 MW düzeyindedir. Şekil 2.5.'te bir güneş tarlası görülmektedir. Ayrıca Türkiye'de teknik güneş enerjisi potansiyeli 76 TEP (ton eşdeğer petrol) olup, önemli düzeyde de güneş kolektörü bulunmaktadır. Coğrafi konumu nedeniyle ortalama yıllık toplam

güneşlenme süresi 2.640 saat (günlük 7,2 saat) olan Türkiye'nin ileriki dönemlerde bu enerji kaynağından yararlanmaya yönelik çalışmalar gerçekleştireceği düşünülmektedir. Bu çalışmaların temelini oluşturmak üzere Strateji Belgesi'nde güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması ve özendirici çalışmaların başlatılması hedefi koyulmuştur. 08/01/2011 tarihli Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun (Yenilenebilir Enerji Kanunu) ile de güneş enerjisine **13,3** Dolarcent/kWh sabit fiyat garantisi verilmiş olması, güneş enerjisinin diğer yenilenebilirler göre yüksek maliyetinin göz önünde bulundurularak ayrıca teşvik edildiğini göstermektedir. Burada, yine aynı Kanun ile getirilen güneşe dayalı kurulu güç kısıtlamasından da bahsetmekte fayda vardır. Söz konusu Kanunun 6/C maddesi uyarınca, 31/12/2013 tarihine kadar iletim sistemine bağlanacak YEK belgeli güneş enerjisi tesislerinin toplam gücü 600 MW ile sınırlandırılmıştır. Bu tarihten sonra devreye girecekler için ise kurulu güç üst sınırı Bakanlar Kurulu tarafından belirlenecektir (Doleitte, 2011).

2.1.2.2 Hidroelektrik enerji

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilir. Bu sistem için yükseklik farkından yararlanılarak suyun basınçlı bir şekilde türbin içinden geçirilerek şaftın/alternatörün çevrilmesi sağlanarak elektrik enerjisi üretilir. Sudan elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılan teknoloji diğer kaynaklardan elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılan teknolojilerden daha basittir. Hidrolik enerji üretiminde ithal kaynak kullanılmadığından, bu tesislerde elde edilen enerji yerli olarak kabul edilmekte ve tesisin yapı özelliği bakımından da kısmen yenilenebilir enerji kaynakları sınıfına girmektedir. Ancak su rejimi değişken olduğundan dolayı özellikle doğal ekosistem üzerinde bazı olumsuz etkilere de neden olabilmektedir. Hidroelektrik enerji biriktirmeli yapılarda puant çalışması gibi çok önemli bir özelliğin olmasının yanı sıra özellikle nehir tipi yapılar yağış değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Şekil 2.6.'da barajlarda biriken suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümü görülmektedir.

Devlet Su İşleri (DSİ) verilerine göre, ülkemizdeki akarsu ve göletlerdeki doğal akışın % 100 değerlendirilmesi varsayımı ile hesaplanan hidroelektrik potansiyel, toplam

hidroelektrik potansiyel olarak ifade edilmektedir. Bu ifade ile ülkemizdeki teorik hidrolik potansiyel 433 milyar kWh/yıl olarak belirtilmektedir (TMMOB, 2011).



Şekil 2.6. Barajlardaki su türbinlerle elektrik enerjisine dönüştürülür

2.1.2.3 Biyokütle enerjisi

Biyokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yolu ile kimyasal enerjiye dönüştürerek depolaması sonucu meydana gelen biyolojik kütle ve buna bağlı organik madde kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Dünyanın artan nüfusu ve sanayileşmesi ile giderek artan enerji ihtiyacı çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek kaynaklardan belki de en önemlisi biyokütle enerjisidir. Bitki yetiştirilmesi, güneş var olduğu sürece süreceği için, biyokütle tükenmez bir enerji kaynağıdır. Biyokütle; tükenmez bir kaynak olması, her yerde yetiştirilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Kolza bir enerji bitkisidir. Şekil 2.7.'de bir kolza bitkisi görülmektedir. İlkbaharda çiçek açan ve yağ bitkileri içerisinde hasada en erken gelen bitkilerdendir. Uzun gün bitkisi olup kışlık ve yazlık olarak yetiştirilebilir. Yazlıklar 100-120, kışlıklar 120-150 günde hasada gelir. genellikle yağ bitkisi sıcak iklimde yetişir ve kışlık ekinleri pek azdır.

Kolzanın kışlık olarak ekilebilmesi ekim ve hasat dönemindeki iş dağılımına uygun bir çalışma imkanı sağlar. Kolza tohumu küçük, yuvarlak ve kaygan olduğundan ekimden önce iyi bir tohum yatağı ister (Ünalın, 2001).



Şekil 2.7. Enerji bitkisi olarak tarımı yapılan kolza bitkisi

Biyokütlele örnek olarak, ağaçları, mısır, buğday gibi özel olarak yetiştirilen bitkileri, otları, yosunları, evlerden atılan meyve ve sebze atığı gibi tüm organik çöpleri ve sanayi atıklarını saymak mümkündür. Bitkilerin fotosentezi sırasında kimyasal olarak özellikle selüloz şeklinde depo edilen ve daha sonra çeşitli şekillerde kullanılabilen enerjinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin biyokütle biçimindeki depolanmış enerjiye dönüşümü, insan yaşamı için vazgeçilmezdir.

Fotosentez yoluyla enerji kaynağı olan organik maddeler sentezlenirken tüm canlıların solunumu için gerekli olan oksijen de atmosfere verilir. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit ise, daha önce bu maddelerin oluşması sırasında atmosferden alınmış olduğundan, biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre, karbondioksit salınımı açısından korunmuş olacaktır (TMMOB, 2011).

Biyokütle enerjisini modern ve klasik anlamda olmak üzere iki grupta ele almak mümkündür. Birincisi; konvansiyonel ormanlardan elde edilen yakacak odun ve yine yakacak olarak kullanılan bitki ve hayvan atıklarından oluşur. İkincisi, yani modern

biyokütle enerjisi; enerji ormancılığı ve orman-ağaç endüstrisi atıkları, tarım kesimindeki bitkisel atıklar, kentsel atıklar, tarıma dayalı endüstri atıkları olarak sıralanabilir. Bu materyaller biyokütle yakıt teknikleri ile işlenerek katı , sıvı ve gaz yakıtlara çevrilir (Demirtaş, 2007).

2.1.2.4 Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun işletilebilir derinliklerinde birikmiş olan ısıнын meydana getirdiği bir enerji türüdür. Yeraltına sızan sular burada gözenekli ve geçirimli özellikleri bulunan hazne kayalarda toplanır. Hazne kayalar üstünde geçirimsiz örtü kayalar vardır. Isı, yerkabuğundaki kırık veya çatlaklarda dolaşan sular vasıtasıyla yeryüzüne aktarılır. Eğer yerkabuğunda doğal su dolaşımını sağlayacak yeterli kırık yoksa ve ısı birikimi tespit edilirse, oluşturulacak yapay kırıklardan dolaştırılacak akışkanlardan enerji elde edilmesi mümkündür. Jeotermal enerji alanları, etkin depremlerin olduğu tektonik bakımdan aktif olan genç volkanların bulunduğu kuşaklardır. Şekil 2.8.'de yeraltındaki sıcak suların basınçla çıkışı görülmektedir.



Şekil 2.8. Yeraltındaki sıcak sular basınçla yeryüzüne çıkar

Yeryüzüne ulaşan buhar ve sıcak suyun içerdiği enerjiden ya doğrudan ya da başka enerji türlerine dönüştürülerek kullanılmaktadır. Jeotermal enerji kullanımındaki en büyük problem bu enerji kaynağının oldukça yayılmış bir karaktere sahip olmasıdır.

Dünyadan uzaya yılda yaklaşık 4×10^{17} KJ jeotermal enerji yayılmaktadır. Eğer biz bu enerjiyi kullanabilseydik dünyanın tüm enerji ihtiyacını 20 kez karşılayabilirdik. Yalnız bu miktar tüm dünya yüzeyine yayıldığından metrekare başına sadece 0,063 W enerji düşer ki bu güneşten gelen enerjiden çok daha azdır. Eğer jeotermal enerji tüm yer kabuğuna eşit olarak dağılmış olsaydı, belki de faydalı enerji olarak kullanılma imkanı olmayacaktı (Servin, 1998).

2.1.2.5 Dalga enerjisi

Pelamis adı verilen bir sistem sayesinde yukarı aşağı, sağ sol dalga hareketlerini yakalayıp, Pelamis'in parçalarını bağlayan pistonları hidrolik kanallara iterek akümülatörden geçirmekte ve böylece hidrolik motorun döndürülmesi sağlanarak elektrik üretilmektedir. Dalga enerjisinden enerji üretimi için herhangi bir yakıtı ihtiyaç duyulmamakla birlikte enerji üretim aşamasında da kirlilik yaratmamaktadır. İşletme ve bakım masrafları ise çok düşük maliyetlerle yapılabilmektedir. Ancak bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır; dalgalara bağlı olarak bazen enerji üretimi mümkün olmayabilir. Ayrıca bu mekanizmaların zor hava koşullarına dayanıklı olması gerekmektedir bu da ekstra bir maliyeti beraberinde getirir. Şekil 2.9.'da pelamisler görülmektedir.



Şekil 2.9. Dalgadan enerji üreten pelamis (deniz yılanı)

Dalga enerjisi kullanımının ülke enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayacağı öngörüldüğünden birçok okyanus kıyısı ülkede çalışmalara büyük önem verilmektedir. Ancak, dalga enerjisi yoğunluğu orta yükseklikte olan ülkelerde, ekonomik olduğu sürece mevcut klasik/yenilenebilir enerji planlamalarına tamamlayıcı bir enerji şekli olarak dahil edilebilir.

Dünyada bir çok yenilenebilir enerji teknolojisi ve pazarı gelişmekte, gün geçtikçe bu gelişmede endüstri sektörü, araştırma müesseseleri ve akademik çevreler büyük rol almaktadır. Birçok ülkede pazar gelişimi politikası ve programı uygulanması sonucu güvenilirliğin arttığı ve maliyetlerin düştüğü görülmektedir. Türkiye'nin yıllık dalga enerji kaynağı 4-17 kW/m'lik deniz yoğunluğuyla 10 TW/yıl olarak tahmin edilmektedir (Sağlam, Uyar, 2004).

2.1.2.6 Hidrojen enerjisi

Bir enerji taşıyıcısı ve yakıt olarak hidrojenin taşıdığı potansiyel, yaklaşık 200 yıldan beri bilinmektedir. 1805 yılında Isaac de Rivaz tarafından icat edilen erken içten yanmalı motor, hidrojenle çalışmaktadır. Hidrojen birincil enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır. Elektriğe benzemektedir, fakat ondan daha verimli bir şekilde enerjiyi taşıyabilir.

Hidrojen için geleceğin ideal yakıtı denilmektedir. İdeal bir yakıtta bulunması istenen özellikler ise şöyle sıralanabilir. Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli, taşınırken enerji kaybı hiç olmamalı. Her yerde, kullanılabilmeli, depolanabilmeli, tükenmez olmalı. Temiz olmalı, birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı. Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılmalı. Güvenli olmalı, ısı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli. Çevre üzerinde hiç olumsuz etkisi olmamalı, çok yüksek verimle enerji üretebilmeli, karbon içermemeli, ekonomik ve çok hafif olmalıdır (Aslan, 2007).

Hidrojen enerjisi “21. yüzyılın enerji taşıyıcısı” olmaya en büyük adaydır. Teknolojinin sürekli olarak gelişmesi ve bunun sonucunda yükselen bir ivme ile enerji talebinde bulunması, hidrojenin önemini artırmaktadır. Bu süreçte dünyanın yürüttüğü enerji politikalarını izlemek, çağa uyum sağlamak açısından önem arz etmektedir. Türkiye'nin hidrojen enerjisine adaptasyonunun gerçekleşebilmesi için ülkenin kendi enerji

kaynaklarının farkında olması ve bu kaynaklardan etkin bir biçimde faydalanması kendi lehine olacaktır (Öztürk, 2005).

2.2 Rüzgâr Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri de, havada bulunan rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr hızına ve esme sayısına bağlı olarak tasarlanan rüzgar türbinleri, boyutlarıyla orantılı bir şekilde enerji üretir. Rüzgâr enerjisi, dönüştürme tekniklerinin diğer enerjilere göre ucuzluğu, sistemlerin kurulum ve işletme kolaylıkları açısından önem verilmesi gereken bir enerji türüdür. Rüzgâr enerjisinden faydalanılmak istenen bölgelerin coğrafi ve iklimsel özelliklerine dikkat etmek gerekir. Türkiye, coğrafi konumu ve yapısı nedeniyle rüzgâr enerji santrallerinin kurulmasına oldukça elverişli bir ülkedir. Özellikle, üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizde Ege Bölgesi ve Marmara zengin bir rüzgâr enerji potansiyeline sahiptir. Denize açılan vadilerin ağzlarında türbinlerin kurulması ile önemli miktarda enerji elde edilebilir.

Rüzgâr, atmosferin ısınması ve soğumasından kaynaklanan sıcaklık ve basınç farkından dolayı yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağlı olarak yaptığı harekettir. Burada yüksek basınç alanından alçak basınç alanına bir hareket söz konusudur. Rüzgâr, atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Güneş enerjisinin dolaylı bir sonucu olan rüzgâr enerjisi, kinetik bir enerjidir. Şekil 3.10.'da üç kanatlı bir rüzgar türbini görülmektedir.



Şekil 2.10. Rüzgardaki enerji bir türbinle elektrik enerjisine dönüştürülür

Yeryüzünün aldığı toplam güneş enerjisinin yaklaşık olarak %2'sinin rüzgâr kinetik enerjisine dönüştüğü tahmin edilmektedir. Bu miktarın toplam dünya enerji tüketiminin yüzlerce katı olduğu düşünülecek olursa, bu enerjinin önemi daha iyi anlaşılacaktır. Yapılan rüzgâr türbinleriyle şimdilik ancak belirli bir rüzgâr hızı aralığında bu enerjiden istifade edilebilmektedir. Rüzgâr enerjisinden faydalanmak için, ilk olarak rüzgâr güç potansiyelinin belirlenmesi gerekir. Rüzgâr milinin, kanat süpürme alanından akan hava kütlesi parçacıklarının momentum değişimi yapmasıyla dönen bir makine olduğu düşünülürse, süpürme alanındaki rüzgâr gücü, bu alanın büyüklüğü, havanın yoğunluğu ve hızının küpüyle orantılıdır (Hocaoglu ve Kurban, 2005).

2.2.1 Rüzgâr enerjisinin gücü

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için en temel veriler rüzgârın hızı ve esme saat sayılarıdır. Bu veriler kullanılarak bir yöreye ait rüzgâr potansiyelini ortaya koymak mümkündür. Bunun için, rüzgâr potansiyelini tanımlayan kinetik enerjinin hesaplanması gerekir. Havanın bir ağırlığı ve hızı olması nedeniyle bir kinetik enerjisi vardır. Rüzgâr hareket halindeki hava olup sahip olduğu kinetik enerji şu şekilde verilir:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Burada;

K : Rüzgârdaki kinetik enerji (Joule)

v: Ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızı (m/s)

m: Havanın kütlesi (kg)

Havanın kütlesi m(kg) olmak üzere

$$m = \rho.V \quad (2.2)$$

Burada;

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m³)

V: Hava hacmi (m³)

Havanın hacmi ise;

$$V = v.A\Delta t \quad (2.3)$$

formülü ile hesaplanır. Burada;

v: Ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)

A: Rotor süpürme alanı (m²)

Δt: Ölçüm zamanını (s) temsil eder.

Böylece, (2.2) bağıntısı (2.1) bağıntısında yerine konularak, kinetik enerji eşitliğinde gerekli düzenlemeler yapılacak olursa, rüzgâr enerjisi (K) Joule cinsinden aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmış olur;

$$K = \frac{1}{2} \rho A \Delta t v^3 \quad (2.4)$$

Bu eşitlik birim zaman Δt'ye bölünürse, birim zamandaki enerji, yani rüzgârın anlık gücü (P);

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

elde edilir.

Değişik rüzgâr hızlarına sahip yörelerin rüzgâr güç ve enerjilerini karşılaştırmak amacıyla, rüzgâr güç ve enerji yoğunluğu teriminden yararlanılır. Buna göre (2.5) eşitliği düzenlenecek olursa; P, ölçüm yüksekliğinde birim alana düşen güç yoğunluğu (W/m²) şu şekilde olur:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.6)$$

Güç yoğunluğunu, yıllık esme sayısı “ f “ ile çarparsak enerji yoğunluğu E_y elde edilir. Bu sonuca göre enerji yoğunluğunu bulacak olursak;

$$E_y = \frac{P}{A} \cdot f = \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot f \quad (2.7)$$

bulunur. Burada;

E_y: Enerji yoğunluğu (W/m².yıl)

A: Rotor süpürme alanını (m^2)

f: Yıllık esme saat sayısını (saat/yıl) göstermektedir.

Rüzgâr, kinetik enerjisi nedeniyle doğal bir potansiyel enerjiye sahiptir. Bunun bilinen fiziksel konular ve teknolojik imkânlar sayesinde yararlı enerjiye çevrilen miktarına “Rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli” denir. Teorik olarak bulunan Enerji yoğunluğu pratik olarak elde edilen uygulamalarla enerji kayıplarından dolayı örtüşmemektedir.

2.2.2 İdeal disk teorisi ve betz limiti

Rüzgârdan enerji elde etmek için kurulacak türbinin boyutları aerodinamik yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Sistem ne kadar ideal olursa olsun rüzgârdan elde edilecek enerjinin bir üst limiti vardır. Betz tarafından 1926 yılında belirlenen bu limite Betz limiti denir. Betz, söz konusu teoriyi hesaplarken hareketli diskin önünde, üzerinde ve gerisindeki hava akımları için enerjinin korunumu yasalarını kullanmıştır. Betz’in ideal disk teorisine göre; diskten geçen havanın akış hızı, disk alanının her noktasında eşit olmasına rağmen basınç ani olarak düşer. Bu basınç farkından dolayı diskin hareket enerjisi artmış olur. Şekil 2.11.’ Betz teoremine göre hesaplama yapılırken, akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılamaz olduğu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğu, sonsuz sayıda kanat olduğu ve diskin önünde ve arkasında türbülans olmadığı kabul edilecektir (Avcı, Yılmaz, 2012).

Betz teorisine göre, türbinin toplam gücü;

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v_b (v_u^2 - v_d^2) \quad (2.8)$$

v_u : Rotora gelen havanın hızı.

v_b : Kanatlara çarpan havanın hızı.

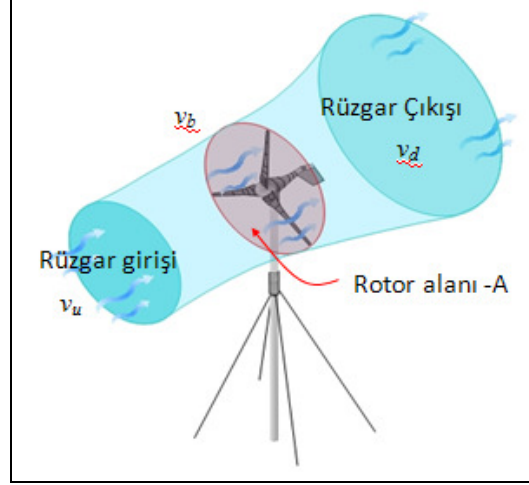
v_d : Rotordan çıkan havanın hızı.

Türbin içindeki rüzgârın ortalama hızı,

$$v_b = \frac{v_u + v_d}{2} \quad (2.9)$$

Türbinin toplam gücü,

$$P_T = \frac{1}{4} \rho A (v_u + v_d)(v_u^2 - v_d^2) \quad (2.10)$$



Şekil 2.11. Betz modeli.

Bu eşitlik düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_T = \frac{1}{4} \rho A v_u^3 \left(1 + \frac{v_d}{v_u}\right) \left(1 - \left(\frac{v_d}{v_u}\right)^2\right) \quad (2.11)$$

Bu ifade, ilk bulunan (2.5) eşitliğindeki P gücüne bölünürse;

$$\frac{P_T}{P} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_d}{v_u}\right) \left(1 - \left(\frac{v_d}{v_u}\right)^2\right) \quad (2.12)$$

elde edilir. Burada güç faktörü $C_p = \frac{P_T}{P}$ ve $n = \frac{v_d}{v_u}$

yavaşlatma faktörü “n” olarak tanımlanırsa;

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + n)(1 - n^2) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denklemde maksimum güç faktörü “ C_p ” ‘ yi bulmak için yavaşlatma faktörü “ n ” ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{d}{dn} C_p = \frac{1}{2} \frac{d}{dn} (1 - n^2 + n - n^3) \quad (2.14)$$

türev alma işlemi yapıldıktan sonra aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d}{dn} C_p = \frac{1}{2} [(1 - n)^2 \cdot (1 + n) \cdot (1 - 2n)] = 0 \quad (2.15)$$

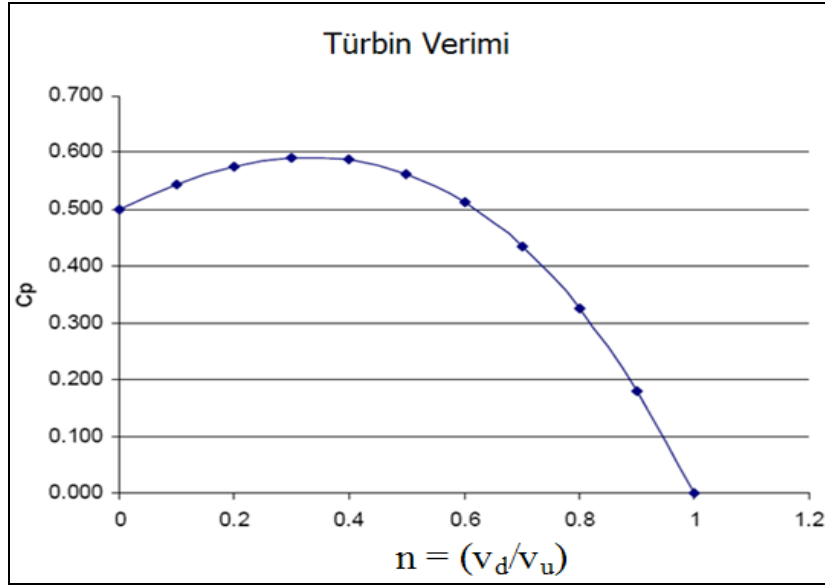
$$\frac{1}{2} [(1 - n) \cdot (1 - 3n)] = 0 \quad (2.16)$$

$n_1 = 1/3$ $n_2 = -1$ bulunur. Yavaşlatma faktörü “ n ”, hiçbir zaman negatif değer olmayacağından $1/3$ alınır ve denklemde yerine konursa; ($n = -1$ çözüm değil)

$$(C_p)_{\max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.17)$$

elde edilir. Şekil 2.12. ‘de C_p - n grafiği görülmektedir.

Serbest rüzgâr türbininden alınacak maksimum verim **0,5926**, yani **% 59,26** olarak bulunur. Bir rüzgâr türbiniyle, rüzgârın tüm enerjisinden faydalanmak en azından böyle bir sistem için mümkün değildir. Belki gelecekte daha değişik bir sistem tasarlanarak verim artışı sağlanabilir. Şekil 2.12.’de Betz güç faktörü grafiği görülmektedir.



Şekil 2.12. Betz güç faktörü grafiği.

Rüzgar; türbininden, rüzgardan aldığımız enerji ölçüsünde yavaşlamış olarak çıkar. Eğer rüzgardaki tüm enerjiyi alabilseydik, rüzgarın türbinden durgun halde çıkması veya geri dönmesi gerekirdi. Fakat bu durumda da türbine rüzgarın diğer taraftan girmesi engellenir ve hiç enerji elde edilemezdi.

Günümüzdeki rüzgâr türbinleri için “ C_p ” değeri yaklaşık olarak **0,35–0,40**’tır. Bunun nedeni: hava direnci, rotorun oluşturduğu türbülans ve aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardır. Bulduğumuz “ C_p ” maksimum güç faktörü teorik bir değerdir. Uygulamada bu değer çok daha düşüktür. Ayrıca devreye mekanik-teknik kayıplar da girmektedir. Ancak mekanik-teknik verimlilik (η) değeri 1 ‘e yakın bir değer olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilir. Bu bilgiler dikkate alınarak güç eşitliğimiz;

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir.

Bir rüzgâr enerji santralinde (RES) temel sistem bileşenleri ve güç akış diyagramı aşağıdaki şekilde verilir.

$$\begin{array}{ccccccc}
P_w & \rightarrow & \text{Türbin} & P_T & \rightarrow & \text{Mekanik İletim} & P_m & \rightarrow & \text{Jeneratör} & P_g & \rightarrow & \text{Elektrik İletim} & P_e \\
(C_p) & & & (\eta_m) & & & & & \rightarrow & (\eta_g) & & & (\eta_e)
\end{array}$$

Yukarıda verilen rüzgar enerji dönüşüm sistemini dikkate alırsak;

$$C_p(\text{Türbin verimi}) = \frac{P_T}{P_w} \quad (2.19)$$

$$\eta_m(\text{Diş verimi}) = \frac{P_m}{P_T} \quad (2.20)$$

$$\eta_g(\text{Jeneratör verimi}) = \frac{P_g}{P_m} \quad (2.21)$$

$$\eta_e(\text{Elektrik İletim verimi}) = \frac{P_e}{P_g} \quad (2.22)$$

verimler ayrı ayrı bulunabilir. Bu denklemlere göre sistemin genel verimi,

$$\eta(\text{Genel verim}) = \frac{P_e}{P_w} = \frac{P_T}{P_w} \frac{P_m}{P_T} \frac{P_g}{P_m} \frac{P_e}{P_g} \quad (2.23)$$

$$\eta = C_p \eta_m \eta_g \eta_e \quad (2.24)$$

şeklinde bulunur. Aşağıdaki Tablo 2.1. 'de rüzgar enerji sistem bileşenlerinin pratikteki yaklaşık verim değerleri verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği gibi, asıl verim kaybı kanat ve türbin sisteminden kaynaklanmaktadır (Boztepe, 2009).

Tablo 2.1. Rüzgar santralindeki değişik bölümlerin verim değerleri

RES	VERİM	VERİM
BİLEŞENLERİ	Küçük Güçlü Sistem (%)	Büyük Güçlü Sistem(%)
Kanat,Türbin	20-40	40-50
Dişli Ünitesi	70-80	80-95
Jeneratör	65-85	85-95
Elektriksel İletim	95-98	95-98

2.2.3 Rüzgar enerji santrallerinin (RES) tarihçesi

İnsanlık medeniyet tarihinde rüzgar çok önemli bir rol oynamıştır. Rüzgarın ilk kullanılması Milattan 500 yıl önce Mısır'da kayıkların bir sahilden diğerine yüzdürülmesiyle olmuştur. İlk yel değirmeni MÖ 200 yılında antik Babylon'da inşa edilmiştir. Bu değirmen bir eksene tutturulmuş pervaneler ile dönüş hareketi üreten bir makineydi. MS 10. yy'a kadar Doğu İran ve Afganistan'da 5 metre rüzgar yakalama kanatları ve 10 metre yüksekliği olan rüzgar değirmenlerinde tahıl öğütüldüğü bilinmektedir. Batı dünyası yel değirmenlerini çok daha sonraları keşfetmiştir. Bu konudaki ilk yazılı kayıtlar 12. yy'a aittir. Birkaç yüzyıl sonra yel değirmenleri geliştirilerek ve uyarlanarak su pompalamada kullanılmıştır (Demir, 2009).

Çok pervaneli yel değirmenleri 19. yy'ın ikinci yarısında ABD'de icat edilmiştir. 1889 yılında ABD'de 77 tane yel değirmeni fabrikası vardı ve yüzyılın sonunda yel değirmeni ihracatı ABD ekonomisi için en büyük ihracat kalemi olmuştur. Dizel motorlar icat edilene kadar, ABD'deki büyük demiryolları büyük çok pervaneli yel değirmenlerine bağlı kalmıştır (buhar lokomotifleri için su pompalama yel değirmeni ile yapılmıştır). 1930 ve 1940'lı yıllarda ABD'de binlerce elektrik üreten rüzgâr türbini imal edildi. Bunlarda yüksek hızda dönen ve elektrik jeneratörünü çalıştıran iki veya üç ince pervane vardı. Bu türbinler çiftliklere elektrik sağladılar, depolama pillerini doldurmada, radyo alıcılarını çalıştırmada ve bir veya iki aydınlatma lambasını çalıştırmada kullanıldı.

1973 OPEC petrol ambargosunu takiben enerji fiyatlarındaki artış ve geleneksel enerji kaynaklarının sınırlanması rüzgar enerjisine olan ilgiyi tekrar artırmıştır. Teşvikler ve resmi araştırma çalışmaları sonucu birçok yeni türbin tasarımı yapılmıştır. Bazı modeller çok büyüktür. 54 metre pervane çaplı bir büyük türbin 700 evin elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Konutlarda, çiftliklerde kullanılmak üzere birçok yeni küçük ölçekli model geliştirilmiştir. Şekil 2.13.'te rüzgarın eski çağlarda kullanım alanları görülmektedir.



Şekil 2.13. Eski çağlarda rüzgarın kullanım alanları

1970’li yıllarda ABD’de yaklaşık 50 tane yerli rüzgar türbin imalatçısı vardı. Rüzgâr sistemleri için yeni bir pazar olarak “rüzgâr çiftlikleri” 1980 başlarında başladı. 1978 yılında ABD’de çıkarılan yasa ile rüzgâr enerjisine getirilen teşvik ile elektrik dağıtım şirketleri rüzgâr enerjisinden üretilen elektriği almak zorundaydılar.

Endüstri devrimi ile birlikte, 18. yüzyılda buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucunda dünya, enerji ihtiyacı temini için termodinamik işlemlere dayanan makinelerden yararlanmaya başlamıştır. Özellikle kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile beraber, bu makineler daha avantajlı bir duruma gelmiştir. İstenildiği anda enerji üretimi imkanı sağlamasından dolayı, rüzgâr enerjisinden daha popüler hale gelmişlerdir. Bu nedenle 19.yüzyılda ve 20.yüzyılın ortalarına doğru rüzgâr enerjisinin önemi azalmıştır. Sadece, Amerika, Rusya ve Avustralya gibi nüfusu geniş bir alana yayılmış olan ülkelerde rüzgâr enerjisi çiftçiler tarafından su çekmek için kullanılmıştır.

1973 Dünya petrol krizi, yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına neden olmuştur. Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması, enerjinin elde edilmesi sırasında çevreye yapılan tahribat, gelecek nesillerin sağlığı ve enerji ihtiyacı dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılabacaktır.

Rüzgar Enerjisi; özellikle 1990’lı yıllardan itibaren önemli bir gelişme göstermiş, Amerika ve Avrupa’da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yapılan araştırmalara göre; şu an yürütülmekte olan politikaların devam etmesi durumunda Dünya üzerindeki elektrik enerjisi üretimindeki payının hızla artacağı tahmin edilmektedir (Özgener, 2002).

2.2.4 Rüzgar potansiyelinin sınıflandırılması

Lokal, bölgesel veya küresel rüzgar kaynak bilgileri kullanılarak rüzgar enerjisinin elektriksel güç üretim potansiyeli tahmin edilebilir. Fakat tahmin edilen farklı rüzgâr enerjisi potansiyelleri arasındaki ayrımı iyi yapmak gerekir. Rüzgâr kaynak potansiyeli tahminleri aşağıda belirlendiği gibi beş kategoride değerlendirilmelidir.

Meteorolojik potansiyel: Mümkün olan rüzgâr kaynağına eşdeğer bir potansiyeldir.

Saha potansiyeli: Meteorolojik potansiyele dayanılarak ortaya konulan bir değerlendirmedir. Güç üretimi için coğrafik olarak mevcut olabilecek sahalarla sınırlandırılır.

Teknik potansiyel: Mevcut teknolojiyi de dikkate alarak saha potansiyelinden hesaplanan değerlerdir.

Ekonomik potansiyel: Ekonomik olarak gerçekleştirilebilecek teknik potansiyel olarak tanımlanır.

Uygulanabilir potansiyel: Bu potansiyel, belirli bir zaman diliminde devreye alınabilecek olan rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için teşvik ve kısıtlamaları da hesaba katarak elde edilir.

Rüzgar enerjisi konusunda herhangi bir yatırıma başlamadan önce yatırımın yapılacağı yerin rüzgâr kaynağı özelliklerini iyi anlamak gerekir. En iyi rüzgâr alan sahalar nerelerdir, ilgilenilen sahadan ne kadar enerji elde edilebilir, rüzgâr türbin performansı türbülans veya diğer rüzgar kaynak karakteristikleri tarafından etkilenecek mi? Bunlar ilk akla gelen birkaç sorudur ve cevaplandırılması gerekmektedir. Rüzgar enerjisi potansiyel atlasları bu ve benzeri soruların cevaplandırılması için başvurulması gereken en önemli kaynaklardan biridir.

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla üretilmiştir. Bu atlasta verilen detaylı rüzgâr kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir alt yapı sağlamaktadır (Malkoç, 2007).

REPA; büyük, orta ve mikro ölçekli hava tahmin modelleri kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin üretildiği bir rüzgar enerjisi potansiyel atlasıdır. Bu modeller yardımıyla Türkiye genelinde (kara, deniz, göl) 200 m x 200 m çözünürlükte; 30, 50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hız ortalamaları, 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları, 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü, 50 m yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları, 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri, Yer seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri ortaya konulmuştur (Yıldırım, 2012).

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce tespit edilemeyen potansiyeller görünür hale gelmiştir. Bir rüzgâr enerjisi atlası, atlas alanındaki rüzgâr enerjisi kaynağını belirlemede ve yüksek rüzgâr potansiyel bölgelerini belirlemede kullanılabilir. Yüksek çözünürlüklü rüzgâr kaynağı haritaları ve bu haritalardan alınan bilgiler hükümet yetkilileri, enerji servis şirketleri, özel girişimciler, iş dünyası ve arazi/konut sahipleri gibi geniş bir kullanıcı bandına hizmet sunmaktadır.

Türkiye iyi sıra dışı rüzgar sınıfına giren aralıkta rüzgarlı alanların potansiyeli yaklaşık olarak 48.000 MW'lık rüzgar kurulu gücü destekleyebileceği hesaplanmıştır. Rüzgar enerjisi potansiyelini ortaya koyarken daha önce belirtilen bir çok parametre kullanılmıştır. Fakat bu hesaplamada elektriksel altyapı dikkate alınmamıştır. Bu miktardaki bir rüzgar enerjisi potansiyeli en güvenli tarafta kalınarak elektrik enerjisine dönüştürülürse yıllık 147 Milyar kWh enerji üretilebilecektir. Hesaplamada 50 m yükseklikteki rüzgar hızları, %35'lik kapasite faktörü, yıllık ortalama rüzgar hızının 7 m/s ve üzerindeki kullanılabilir alanlar ve km² başına 5 MW'lık bir güç kurulabileceği gibi güvenli yaklaşımlar kabul edilerek yapılmıştır. Rüzgar enerjisi uygulaması amaçlı kullanılamayacak tüm alanlar bu hesaplamadan çıkarılmış ve dikkate alınmamıştır (Malkoç, 2006).

2.2.5 Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Rüzgâr enerjisi geleceğin enerji kaynakları arasında özellikle iklim değişikliklerini önlemede önemli bir rol alacaktır. Halen dünyanın en çok büyüyen enerji sektörlerinden biridir. Rüzgâr enerjisi temiz bir enerjidir. Rüzgâr türbinlerinin çevreye olan olumlu etkilerinin yanında fosil yakıtların kullanımını ve yanma sonucu oluşan kirletici maddelerin emisyonunu azaltması sayılabilir. Bunlardan en önemlisi de karbon oksitler,

sülfür ve nitrojen gibi zararlı gazları yaymıyor olmasıdır. Dolayısıyla sera etkisine neden olmamaktadır. Konvansiyonel fosil yakıt kullanan santraller sülfür ve nitrojen oksitler yaymaktadır. Bu da çevreye önemli ölçüde zarar veren asit yağmurlarına yol açmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin diğer bir avantajı ise ekonomik alan kullanımıdır. Özellikle rüzgâr çiftliklerinde, rüzgârdan daha iyi yararlanabilmek için türbinler birbirlerinden belirli uzak mesafelere yerleştirildikleri için kapladıkları arazi oldukça geniştir. 20 türbinden oluşan tipik bir rüzgâr çiftliği yaklaşık 1 km² (100 hektar) alan kaplar ama bu alanın sadece %1'ini kullanmaktadır. Geri kalan alanlar çiftlik için ya da doğal alan olarak kullanılabilir. Bunun gibi bir proje 6.500 ile 10.000 arasında evin elektrik gereksinimini karşılayabilmektedir.

Rüzgâr enerjisi santrallerinden enerji üretme maliyetleri günümüzde 1980' li yıllara göre %80 oranında düşmüştür. Araştırmalar gelecek yıllarda rüzgârdan üretilen enerjinin maliyetinin daha da düşeceğini göstermektedir. Rüzgâr enerjisi santralleri diğer santrallere göre daha kısa sürede 1-2 yılda kurulabilmektedir. Bu da çevreye daha az zarar vermektedir. Örneğin nükleer santraller 5-9 yıl, hidroelektrik santralleri 2-10 yıl, doğalgaz santralleri 1-3 yılda kurulabilmektedir. Rüzgâr enerjisinin bir diğer avantajı da ülkelerin enerji konusunda dışa bağımlılığını ortadan kaldırmasıdır.

Rüzgâr türbinlerinin dezavantajları, gürültü ve görüntü kirliliği, kuşlara ve radyo-TV sinyallerine zarar vermesi olarak sıralanabilir. Rüzgâr türbinlerinde iki çeşit gürültü oluşmaktadır. Mekanik gürültü, dişli kutusu, jeneratör ve yedek motorların yarattığı gürültüdür. Mekanik gürültü, akustik kılıfların ve özel dişlilerin kullanılması ve dönen parçaların ses emici malzemeyle kaplanması ile giderilebilmektedir. Aerodinamik gürültü ise, hava içinde dönen kanatların hızına bağlı olarak artar. Rüzgar santralleri için ileri sürülen gürültü kirliliği de çok yüksek düzeyde değildir. Rüzgar santral civarında türbinlerin bulunduğu ortamın gürültü seviyesi 80 dB 'dir. Bu değer trafiğin yoğun olduğu bölgelerdeki gürültü düzeyine eşittir. Bundan dolayı rüzgar santralleri ile yerleşim birimleri arasındaki mesafe 500 m'den az olmayacak şekilde dizayn edilir.

Rüzgâr santrallerin yaygın olduğu Danimarka, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde yapılan çalışmalar, rüzgâr türbinleri yanında yaşayan insanların genellikle şehirde yaşayanlara göre türbinleri daha uygun bulduklarını göstermiştir. Estetik açıdan, büyük türbinler genellikle küçük türbinlerden daha düşük dönme hızına sahiptir. Bu yüzden

büyük türbinler, hızlı dönen cisimlerin gözde yaptığı olumsuz etkiyi yapmaz. Ayrıca boru tipi kuleler, kafes tipi kulelere göre daha hoş görünümlü oldukları için, görüntü kirliliğini önlemek için boru tipi kuleler tercih edilmektedir. Kuşların kule veya kanatlara çarparak ölme ve yaralanması veya türbinlerin yuvalama ve göç yollarına zarar vermesi mümkündür. Şekil 2.14. de bu durum görülmektedir. Fakat rüzgâr türbinleri nedeniyle kuş ölümü seyrek olur. Genellikle kuş ölümlerine yüksek gerilim hatları neden olmaktadır (mdn, 2011).

Rüzgar enerjisi sektörü istihdam yaratarak, ekonomik ve toplumsal gelişmeye katkıda bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi sektöründe günümüzde 400.000 kişi istihdam edilmekte olup, bu sayının artarak gelecek yıllarda 1.000 000 kişiye ulaşacağı beklenmektedir.

Rüzgar enerjisi santralleri, acilen yeni elektrik enerjisi üretme ihtiyacı duyan ülke veya işletmeler için çok uygun bir seçenektir. Temel elektrik altyapısı ve gücün taşınması için şebeke yatırımları gerektiren büyük güç santralleri ile karşılaştırıldığında, göreceli olarak daha çabuk ve ucuz bir şekilde devreye alınabilmektedirler (Güler, 2005).

Rüzgar santrali kurulumu için gereken alet ve teçhizatın büyük bölümünün yurt dışından ithal edilmesi, türbinlerin kuruluş maliyetini arttırmaktadır. Bu sorunun giderilmesi için, yerli üretimin teşvik edilmesi gerekmektedir.

Türbinler kuşların göç yollarına kurulmamalıdır. Rüzgar enerjisinin belirtilen dezavantajlarına rağmen, sahip olduğu avantajlar onu diğer kaynaklara göre, daha ekonomik ve cazip hale getirmektedir.



Şekil 2.14. Göç yollarına kurulan türbinler kuş ölümlerine sebep olabilir

2.2.6 Dünya’ da rüzgâr enerjisi potansiyeli ve uygulamaları

Küresel ısınma sonucu dünya genelinde çevre duyarlılığının artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini giderek artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr, sağladığı avantajlara bağlı olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu nedenle özellikle gelişmiş ülke hükümetleri, arz güvenliğinin sağlanması ve dışa olan bağımlılığın azaltılmasında, rüzgâr enerjisinin üretim ve kullanımını giderek daha fazla oranda desteklemektedirler (EİE, 2013).

Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücünde 2010 yılından sonra, yıllık % 20'lik artış hedeflenmiştir. 2020 yılı sonunda 1,2 milyon MW'a ulaşacağı ve dünya elektrik tüketiminin % 10'unu karşılayacağı beklenmektedir. 2040 yılında dünya elektrik enerjisi tüketiminin % 20'si rüzgar enerjisi tarafından karşılanacağı tahmin edilmektedir.

Çin, dünyanın en hızlı büyüyen rüzgar enerjisi pazarlarından birisidir ve günümüzde 75.564 MW kapasiteye sahiptir. CREIA (Chinese Renewable Energy Association)'nın yaptığı tahminlere göre, 2020 yılında "Wind Base" programına bağlı olarak inşa edilecek santrallerle birlikte toplam kurulu kapasitesinin 150.000 MW'a yükselmesi beklenmektedir. Ayrıca, Çin'deki off-shore (deniz üstü) potansiyelinin ise, 30.000 MW civarında olduğu yapılan fizibilite çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Rüzgar enerjisinde yerli üretim, ya doğrudan-dolaylı destek mekanizmaları ya da teknolojik uzmanlık ve istihdamdan kaynaklanan bölgesel avantajlar gibi yöntemlerle desteklenebilmektedir (Bayraç, 2011).

2012 yılında, Amerika kıtasında ABD, 60.000 MW'lık kurulu güç ile birinci sırada yer alırken, Avrupa kıtasında 31.332 MW ile Almanya ilk sırayı almakta bunu, 22.796 MW ile İspanya, 8.445 MW ile İngiltere ve diğerleri izlemektedir. Asya kıtasında ise; Çin 75.564 MW ile en başta yer alırken, Hindistan 18.421 MW ile onu takip etmektedir. Dünya çapında Çin yarışı açık farkla önde götürmektedir. Dünya genelindeki ilk 20 ülkenin rüzgar güç kapasitesi tablo 2.2.'de görülmektedir (AWEA, 2011).

Tablo 2.2. Dünya genelinde ilk 20 ülkenin rüzgar güç kapasiteleri

Yıllar	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Çin	340	401	468	566	764	1266	2599	5912	12210	25805	44,733	62,733	75,564
ABD	2254	4275	4685	6374	6740	9149	11603	16819	25170	35064	40,200	46,919	60,007
Almanya	6113	8754	12001	14609	16629	18427	20622	22247	23903	25777	27,214	29,060	31,332
İspanya	2235	3337	4830	6202	8263	10028	11630	15145	16754	19149	20,676	21,674	22,796
Hindistan	1167	1407	1702	2110	2985	4430	6270	7850	9645	10926	13,064	16,084	18,421
İngiltere	408	464	552	648	901	1353	1963	2389	3241	4051	5,203	6,540	8,445
İtalya	427	682	788	904	1265	1718	2123	2726	3736	4850	5,797	6,747	8,144
Fransa	79	85	147	198	390	757	1567	2455	3404	4492	5,660	6,800	7,196
Kanada	137	207	236	322	444	683	1460	1846	2369	3319	4008	5265	6200
Portekiz	100	127	194	289	562	1022	1716	2130	2862	3535	3,702	4,083	4,525
Danimarka	2300	2417	2880	3110	3117	3128	3136	3125	3180	3465	3,752	3,871	4,162
İsviçre	241	295	345	404	452	509	571	891	1067	1560	2163	2798	3745
Japonya	142	275	334	506	896	1,040	1,309	1,528	1,880	2,056	2,304	2,501	2,614
Avustralya	30	71	103	197	379	579	817	817	1,494	1,712	2,020	2,005	2,584
Brezilya	22	24	22	24	24	29	237	247	339	606	931	1,429	2,508
Polonya	5	22	28	58	58	73	153	276	472	725	1,180	1,616	2,497
Hollanda	440	481	682	908	1,078	1,224	1,559	1,747	2,225	2,229	2,269	2,328	2,391
Türkiye	18,9	18,9	18,9	20,1	20,1	20,1	65	207	333	801	1329	1805	2,312
Romanya	0	0	1	1	1	1	3	8	8	14	462	826	1905
Yunanistan	247	272	276	365	473	573	756	873	990	1,087	1,323	1,627	1,749

Doğrudan destekler, özellikle yerel rüzgâr üretim teknolojisindeki gelişmeleri gösterirken dolaylı destekler, genellikle rüzgâr gücü uygulamalarını teşvik eden politikalar olarak, yerli rüzgâr imalat sektörü için uygun bir ortam oluşturmayı planlamaktadırlar. Doğrudan mekanizmaları oluşturan yerli imalat zorunluluğu, finansal vergi teşviki, gümrük vergisi kolaylıkları, ihracat kredisi yardımları, kalite sertifikasyonu, Ar-Ge fonları rüzgar türbinleri teknolojilerinin gelişiminde kullanılmaktadır.

2.2.7 Türkiye’ de rüzgâr enerjisi potansiyeli ve uygulamaları

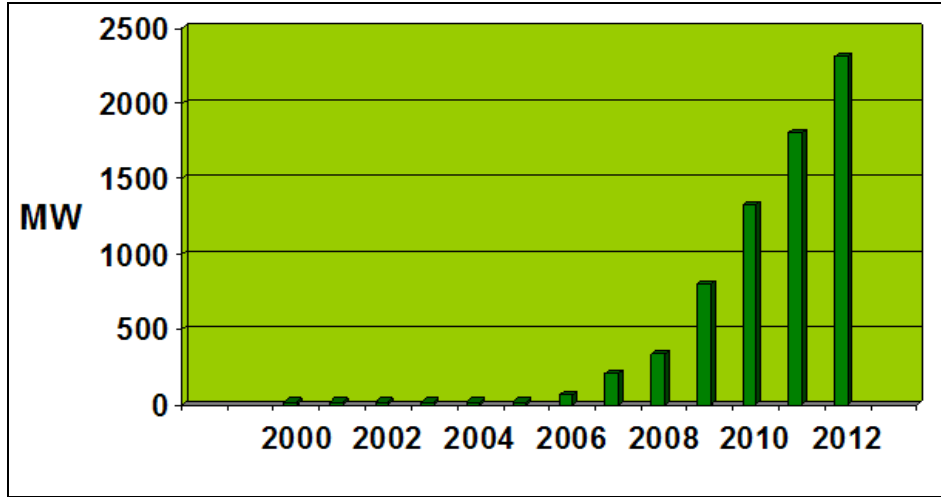
Rüzgâr enerjisi, ithalata ve dışa bağımlılığı azaltan yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak dünya ülkelerinde olduğu gibi, Türkiye’de de giderek artan oranda ilgi görmektedir. Türkiye’de rüzgâr enerjisinden ticari olarak yararlanılması son on yıldan beri söz konusudur.

Türkiye Rüzgar Atlası için, Danimarka Meteoroloji Teşkilatı tarafından hazırlanan ve Avrupa Rüzgar Atlasının hazırlanmasında da kullanılan WASP (Wind Atlas Analysis And Application Program) paket programından yararlanılmıştır. Bu program kullanılarak Türkiye üzerinde homojen dağılım gösteren 96 adet meteoroloji istasyonu için yerinde incelemeler yapılmış ve bu istasyonlardan 45 tanesinin verileri kullanılarak Türkiye Rüzgâr Atlası hazırlanmıştır. 50 m yükseklik için hazırlanan bu rüzgar atlasına göre, özellikle Ege ve Batı Karadeniz kıyıları ile Marmara Bölgesi ve Doğu Akdeniz kıyılarında rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olduğu ve bu bölgelerde yapılacak detaylı çalışmalar ile rüzgar enerjisinden verimli bir şekilde yararlanılabileceği belirtilmektedir (DMİ, 2010).

Türkiye'nin karasal alanlarda 400 milyar kWh/yıl brüt potansiyel, 120 milyar kWh/yıl teknik potansiyel ve 50 milyar kWh/yıl ekonomik potansiyel bulunmaktadır. Brüt potansiyel 160.000 MW, teknik potansiyel 48.000 MW ve ekonomik potansiyel ise, 20.000 MW kurulu güce eşdeğerdir ve Türkiye'nin kıyı bölgelerinde 8.200 MW kurulu gücünde potansiyel mevcuttur.

Türkiye'nin deniz alanlarında rüzgar teknik potansiyelinin 60.000 MW (150 milyar kWh/yıl) düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de yıllık rüzgar hızı 8,5 m/s ve üzerinde olan yörelerde en az 5.000 MW, 7,0 m/s'nin üzerindeki bölgelerde ise, en az 48.000 MW büyüklüğünde rüzgar enerjisi potansiyeli bulunduğu ifade edilmektedir.

Tablo 2.3.’e verildiği gibi, 10 metre yüksekliğe göre, Türkiye’nin % 64,5’inde rüzgar enerjisi güç yoğunluğu 20 W/m^2 ’yi geçmezken, % 16,1’inde $30\text{--}40 \text{ W/m}^2$ arasında, % 5,9’unda 50 W/m^2 ’nin ve % 0,08’inde de 100 W/m^2 ’nin üzerindedir. Türkiye’nin en fazla rüzgar alan bölgeleri Marmara, Ege bölgesi ve sahilleri ile Hatay civarlarıdır. Türkiye geneli kurulu güç Şekil 2.15.’de verilmiştir (Durak, 2009).



Şekil 2.15. Türkiye geneli rüzgar kurulu gücü (2000-2012) (EİE)

Tablo 2.3. Bölgelere göre yıllık ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu (10m)

Bölge	Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Yıllık Ortalama Rüzgar Yoğunluğu (W/m ²)
Marmara Bölgesi	3,29	51,91
Ege Bölgesi	2,65	23,47
Akdeniz Bölgesi	2,45	21,36
İç Anadolu Bölgesi	2,46	20,14
Karadeniz Bölgesi	2,38	21,31
Doğu Anadolu Bölgesi	2,12	13,19
Güney Doğu Anadolu Bölgesi	2,69	29,33
Ortalama	2,58	25,82

Türkiye'nin ilk rüzgar santrali 1998 yılında Çeşme Alaçatı Germiyan köyünde devreye girmiştir. Çeşme Alaçatı'da Yap İşlet Devret (YİD) Modeli ile 7,2 MW'lık 12 adet türbinden oluşan ikinci bir rüzgar santrali işletmeye alınmıştır ve bu santraller ulusal şebekeye elektrik vermeye devam etmektedir. Daha sonra, Çanakkale Bozcaada'da 10,2 MW kurulu gücünde ve İstanbul'da 1,2 MW kurulu gücünde rüzgar enerjisi santralı kurulmuştur.

Şekil 2.15.'de görüldüğü gibi, AB uyum çalışmalarına bağlı olarak, 2000 yılından itibaren rüzgar enerjisi yatırımlarında önemli artışlar meydana gelmiştir. 2010 yılı sonu itibarıyla 1029,85 MW'lık rüzgar santralı şebekeye bağlı olarak enerji üretimini

sürdürmektedir. Türkiye'de 2010 yılı sonu itibarıyla inşa halinde olan 492,35 MW'lık kapasiteye ilave olarak, 644,45 MW'lık proje halinde olan ve yakın dönemde inşaatına başlanacak ek kapasite de söz konusudur (mku bilişim).

Enerjide dışa olan bağımlılığın azaltılması ve arz güvenliğinin sağlanması amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması Türkiye Enerji Politikası açısından önem taşımaktadır. Türkiye'de başta rüzgar olmak üzere, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (YEK) Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun ve ikincil mevzuat kapsamında teşvik edilmektedir. 4628 sayılı Elektrik Piyasası kanunu çerçevesinde; 500 kW'den daha büyük YEK tesisleri için lisans muafiyeti ve lisans bedeli muafiyeti (% 99) ve yıllık lisans bedeli ödemesinde ilk 8 yıllık muafiyet tanınmaktadır.

5346 sayılı kanuna göre, her yıl elektriğin birim fiyatı, EPDK tarafından bir önceki yıl belirlenen Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatının altında olmamak şartıyla yeniden belirlenecektir. Ancak fiyat, işletmeye giren YEK enerjisi tesislerinde üretilecek elektriğe 5 euro cent/kWh karşılığı TL'den az 5,5. euro cent/kWh karşılığı TL'den fazla olmayacak biçimde sabit fiyat tarifesi uygulanacaktır. YEK türleri ve teknolojileri arasında fiyat farklılığı yoktur ve ayrıca istendiği taktirde, serbest piyasada satış imkanı da verilmektedir (İlkılıç, 2003).

2005 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının(YEK) Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanılmasına İlişkin Kanun ile özel sektör aracılığı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmesi imkanı sağlanmıştır. Rüzgar enerjisi yatırımlarında son yıllarda önemli artışlar olmuş ve 2012 yılı sonu itibarıyla, 2300 MW'lık rüzgar santralı şebekeye bağlı olarak enerji üretimi yapmaya başlamıştır. Tablo 2.4.'te Türkiye geneli yatırımların dağılımı görülmektedir. 2023 yılına kadar rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW'a çıkarılması planlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırmak, yeni teknolojiler ve istihdam imkanları sağlamak amacıyla, 2008 yılı sonundan itibaren ETKB tarafından 5346 sayılı kanunda değişiklikler yapılması için, bazı teklifler önerilmiştir.

Tablo 2.4. Türkiye'de (2013) işletmedeki rüzgar elektrik santralleri (MW). (EİE)

İşletmedeki Lisanslı Rüzgâr Santralleri		
Mevkii	Şirket	Kurulu Güç (MW)
İzmir-Çeşme	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	1,50
Çanakkale-İntepe	Anemon Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	30,40
Manisa-Akhisar	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	10,80
Çanakkale-Gelibolu	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	14,90
Manisa-Sayalar	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	34,20
İstanbul-Çatalca	Ertürk Elektrik Üretim A.Ş.	60,00
İzmir-Aliğa	İnnores Elektrik Üretim A.Ş.	57,50
İstanbul-Gaziosmanpaşa	Lodos Elektrik Üretim A.Ş.	24,00
İzmir-Çeşme	Mare Manastır Rüzgar Enerjisi Santralı San. ve Tic. A.Ş.	39,20
İstanbul-Hadımköy	Sunjüt Sun'i Jüt San. ve Tic. A.Ş.	1,20
İstanbul-Silivri	Teperes Elektrik Üretim A.Ş.	0,85
Balıkesir-Bandırma	Yapısan Elektrik Üretim A.Ş.	35,00
Balıkesir-Şamlı	Baki Elektrik Üretim Ltd. Şti.	114,00
Muğla-Datça	Dares Datça Rüzgar Enerji Santralı Sanayi ve Ticaret A.Ş.	29,60
Hatay-Samandağ	Deniz Elektrik Üretim Ltd. Şti.	30,00
Aydın-Didim	Ayen Enerji A.Ş.	31,50
Çanakkale-Ezine	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	20,80
Balıkesir-Susurluk	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	20,70
Balıkesir-Susurluk	Alentek Enerji A.Ş.	45,00

Osmaniye-Bahçe	Rotor Elektrik Üretim A.Ş.	135,00
İzmir-Bergama	Ütopya Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş.	30,00
İzmir-Çeşme	Mazı-3 Rüzgar Enerjisi Santrali Elektrik Üretim A.Ş.	30,00
Balıkesir-Bandırma	Akenerji Elektrik Üretim A.Ş.	15,00
Balıkesir-Bandırma	Borasco Enerji ve Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş.	57,00
Manisa-Soma	Soma Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	140,10
Hatay-Belen	Belen Elektrik Üretim A.Ş.	36,00
Tekirdağ-Şarköy	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	28,80
İzmir-Urla	Kores Kocadağ Rüzgar Enerji Santrali Üretim A.Ş.	15,00
Balıkesir-Bandırma	Aş Makinsan Temiz Enerji Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	24,00
Mersin-Mut	Akdeniz Elektrik Üretim A.Ş.	33,00
Edirne-Enez	Boreas Enerji Üretim Sistemleri A.Ş.	15,00
İzmir-Bergama, Aliğa	Bergama RES Enerji Üretim A.Ş.	90,00
Hatay-Belen	Bakras Enerji Elektrik Üretim ve Tic. A.Ş.	15,00
Hatay-Samandağ	Ziyaret RES Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	57,50
Manisa-Soma	Bilgin Rüzgar Santrali Enerji Üretim A.Ş.	90,00
Manisa-Kırkağaç	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	25,60
Çanakkale-Ezine	Garet Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş.	32,50
Aydın-Çine	Sabaş Elektrik Üretim A.Ş.	24,00
Çanakkale-Ezine	Enerjisa Enerji Üretim A.Ş.	29,90

Balıkesir-Havran	Alize Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	16,00
Balıkesir-Bandırma	Galata Wind Enerji Ltd. Şti.	93,00
Manisa-Akhisar	Akhisar Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi Santralı Ltd. Şti.	43,75
İzmir-Aliaga	Doruk Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	30,00
Balıkesir-Bandırma	Bandırma Enerji ve Elektrik Üretim A.Ş.	3,00
Çanakkale-Ayvacık	Ayres Ayvacık Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretim Santralı Ltd. Şti.	5,00
Tokat	PEM Enerji Anonim Şirketi	40,00
Aydın-Söke	ABK Enerji Elektrik Üretim A. Ş.	30,00
Kayseri-Yahyalı	Aksu Temiz Enerji Elektrik Üretim San. ve Tic. A.Ş.	72,00
Amasya-Merzifon	Baktepe Enerji A.Ş.	39,00
Bilecik-Bozüyük	Can Enerji Entegre Elektrik Üretim A.Ş.	39,00
İzmir-Aliaga	Kardemir Haddecilik San. ve Tic. Ltd. Şti.	12,00
Hatay-Merkez	EOLOS Rüzgar Enerjisi Üretim A.Ş.	26,00
Mersin-Mut	Enerjisa Enerji Üretim A.Ş.	39,00
Balıkesir-Kepsut	Poyraz Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	50,00
Balıkesir-Kepsut	Enerjisa Enerji Üretim A.Ş.	41,25
İzmir-Aliaga	Doğal Enerji Elektrik Üretim A.Ş.	10,00
İzmir-Çeşme	Ares Alaçatı Rüzgar Enerjisi Sant. San. ve Tic. A.Ş.	7,20
Çanakkale-Bozcaada	Bores Bozcaada Rüzgar Enj. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	10,20
TOPLAM	İŞLETMEDEKİ TOPLAM KAPASİTE	2130,95

Yenilenebilir enerjilerin türüne göre verilen destekler **Tablo 2.5.**' de verilmiştir. Öngörülen teşvikler kapsamında, teşvikli satın alma fiyatlarının kaynak türüne göre farklılaştırılması, YEK tesisinde kullanılan makine ve teçhizatın belli bir yüzdesinin yerli üretim tarafından karşılanması zorunluluğu gerektirmesi gibi çeşitli desteklerin sağlanması hedeflenmiştir. **Tablo 2.6.**'da bahsedilen destekler görülmektedir.

Son yıllarda dünya çapında yenilenebilir enerji (YE) kaynaklarının kullanımını artırmaya yönelik bölgesel, ulusal ve uluslararası pek çok politika ve kampanya yürütülmektedir. Bu çabaların doğal bir sonucu olarak 2008 yılında YE kaynakları küresel enerji tüketiminin % 19'unu oluşturmuştur. Bu rakamın 2035 yılına kadar % 23'e çıkması beklenmektedir. Sadece 30 sene önce bu rakamın sıfıra yakın olduğu düşünülürse artışın ciddiyeti anlaşılır.

YEK teşvikinden yararlanmak isteyen yatırımcıların her yıl en geç 31 Ekime kadar EPDK'ya başvurması gerekmektedir. YEK teşvikleri Tablo 2.5.'te verilmiştir. 31 Aralık 2015'den önce işletmeye giren YEK tesisleri güneş enerjisi hariç 10 yıl teşvikten yararlanabilecektir. ETKB hedeflerine göre, 2020 yılına kadar 19000 MW rüzgar enerjisi yatırımının yapılması planlanmakta ve bu yatırım için 22 milyar euro harcama yapılması gerektiği hesaplanmaktadır (Deloitte, 2011).

Tablo 2.5. Yenilenebilir enerji alım fiyatları

I Sayılı Cetvel (29/12/2010 tarihli ve 6094 sayılı Kanunun hükmüdür.)	
Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi	Uygulanacak Fiyatlar (ABD Doları cent/kWh)
a. Hidroelektrik üretim tesisi	7,3
b. Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi	7,3
c. Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi	10,5
d. Biyokütleyle dayalı üretim tesisi (çöp gazı dahil)	13,3
e. Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	13,3

Tablo 2. 6. Yenilenebilir enerji yerli katkı ilaveleri

II Sayılı Cetvel (29/12/2010 tarihli ve 6094 sayılı Kanunun hükmüdür.)		
Tesis Tipi	Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat	Yerli Katkı İlavesi (ABD Doları cent/kWh)
A- Hidroelektrik üretim tesisi	1- Türbin	1,3
	2- Jeneratör ve güç elektroniği	1,0
B- Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Kanat	0,8
	2- Jeneratör ve güç elektroniği	1,0
	3- Türbin kulesi	0,6
	4- Rotor ve nasel gruplarındaki mekanik aksamın tamamı (Kanat grubu ile jeneratör ve güç elektroniği için yapılan ödemeler hariç.)	1,3
C- Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2- PV modülleri	1,3
	3- PV modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4- İnvertör	0,6
	5- PV modülü üzerine güneş ışıını odaklayan malzeme	0,5
D- Yoğunlaştırılmış güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Radyasyon toplama tüpü	2,4
	2- Yansıtıcı yüzey levhası, Güneş takip sistemi	0,6
	3- Isı enerjisi depolama sisteminin mekanik aksamı	1,3
	4- Kulede güneş ışıını toplayarak buhar üretim sisteminin mekanik aksamı	2,4
	5- Stirling motoru	1,3
	6- Panel entegrasyonu ve güneş paneli yapısal mekaniği	0,6
E- Biyokütle enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Akışkan yataklı buhar kazanı	0,8
	2- Sıvı veya gaz yakıtlı buhar kazanı	0,4
	3- Gazlaştırma ve gaz temizleme grubu	0,6
	4- Buhar veya gaz türbini	2,0
	5- İçten yanmalı motor veya stirling motoru	0,9
	6- Jeneratör ve güç elektroniği	0,5
	7- Kojenerasyon sistemi	0,4
F- Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Buhar veya gaz türbini	1,3
	2- Jeneratör ve güç elektroniği, Buhar enjektörü veya vakum kompresörü	0,7

BÖLÜM III

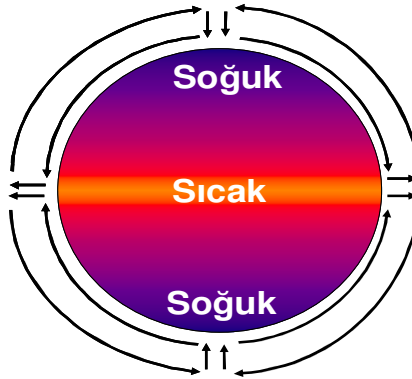
RÜZGARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ, RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNLERİ

3.1 Rüzgarın Fiziksel Özellikleri

3.1.1 Rüzgar oluşumu ve kuvvetler

Güneş ışınları yeryüzünde farklı sıcaklık, basınç ve nem oluşturur. Bu oluşumlardan dolayı rüzgar enerjisi oluşur. Yani rüzgar enerjisi Güneş enerjisinin dolaylı bir sonucudur. Rüzgâr yatay ve yataya yakın yönde yer değiştiren bir hava kütesinin hareketidir. Dünyanın eğriliği, dönme ekseninin eğikliği ve yüzeyin homojen olmayan yapısı nedeni ile yüzey tarafından alınan güneş enerjisinin farklı olması sonucu, yatay doğrultuda atmosfer basıncında ortaya çıkan fark, havanın hareketine dolayısı ile rüzgârın meydana gelmesine sebep olur.

Meteorolojik olayların yaşandığı hava tabakası (stratosfer), dünyanın çevresini kaplayan bir deniz gibi düşünülebilir. Dünyanın kendi etrafındaki dönüşü nedeniyle bu “gaz denizinin” dengesindeki yüksekliği ekvator çevresinde daha yüksek, kutuplarda daha alçak seviyedir. Herhangi bir yerde bu denge seviyesinin üstüne çıkan hava kitlesi dalgalar halinde daha alçak yerlere doğru akar. İşte dünyada genel hava hareketlerinin kaynağı, ekvator çevresindeki bölgenin güneş ışığını daha dik alarak kutup bölgesindeki havaya göre daha çok ısınmasıdır. Kutuplarda radyasyon (gazın sıcaklığına göre etrafa yaydığı ışıma) sonucu soğuma, güneşten kutuplara gelen enerjiye göre fazladır. Bunun tam tersi ekvatorda olmaktadır. Dolayısıyla ekvatorda hava genişleyip yükselmekte, kutuplarda da yoğunlaşıp çökmektedir. Hava hareketleri Şekil 3.1.’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Dünya çevresindeki hava hareketleri

Yeryüzünde esen rüzgarların tamamı alçak ve yüksek basınç alanlarının oluşması sonucu meydana gelmektedir. Bu hava hareketinin hızına göre hafif veya kuvvetli rüzgarlar oluşmaktadır. Rüzgarın esme şiddetine göre hızı da değişik değerler almaktadır. Rüzgarın esmesi en hafif şiddette olduğu gibi fırtına ve daha güçlü akımlar halinde de olabilmektedir. Örneğin rüzgarın 30 m/s'den daha fazla esmesi ile kasırgalar oluşmaktadır. Rüzgarın hızı rüzgarın esmesi sonucu çalışan bazı cihazların yardımı ile ölçülmektedir. Rüzgar hızını ölçen aletlerin pervanelerinin dönmesiyle oluşan devir sayıları rüzgarın şiddetini belirlemektedir (İlkılıç, 2003).

Uzun bir dönem içerisinde atmosferin ortalama hareketine sirkülasyon denir. Atmosferdeki bu hareketin en önemli sebebi ekvatorial bölgenin aşırı derecede ısınması ve kutup bölgelerinin de aşırı derecede soğumasıdır. Bu iki bölge arasındaki sıcaklık farkından dolayı atmosferin genel sirkülasyonu oluşmaktadır.

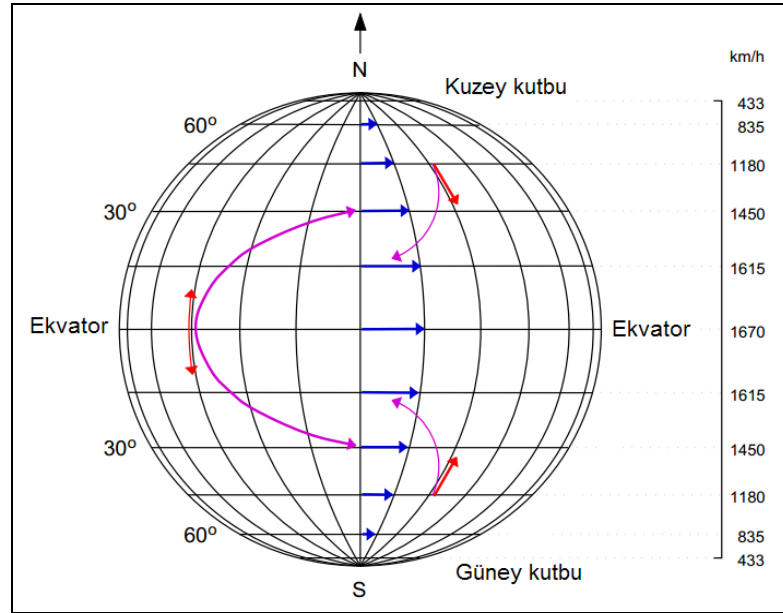
Atmosferin genel sirkülasyonu basit gibi gözüксе de birçok dinamik faktörlerin yani dünyanın dönüşü, sınır tabaka yüksekliği, momentumun taşınması ve yeryüzünün homojen olmaması gibi, bir araya gelmesi ile karmaşık bir durum arz etmektedir. Ancak asıl sebep termal ısı farkıdır.

Rüzgârlar genel olarak; basınç, sıcaklık ve nem farklılıklarını azaltır. Kuzey kutup bölgesinde rüzgâr genellikle güneyden geleceğinden havayı ısıtır, tropiklerde ise rüzgârlar havayı serinletir. Rüzgârlar beraberlerinde nem getirdikleri gibi, kuru bir rüzgâr, mevcut nemi de kurutabilir (Boztepe, 2009).

Günümüzde, teknolojisi ve kullanımı en hızlı gelişme gösteren ve ekonomisi de konvansiyonel enerji kaynakları ile rekabet edebilir hale gelen yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri rüzgar enerjisidir. Rüzgâr, yeryüzünün eşit olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketleridir. Rüzgar enerjisi ise, rüzgarı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisidir. Havanın dünya yüzeyi üzerinde hareket edebilmesini sağlayarak rüzgarı meydana getiren ve rüzgarın hızına etki eden atmosfer içindeki belli başlı kuvvetler ise; basınç gradyan kuvveti, coriolis kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürtünme kuvvetidir. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eden kuvvettir. Coriolis kuvveti ise, dünyanın dönmesinin saptırıcı kuvveti olarak bilinmektedir.

Rüzgarlar, genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin neticesi olarak da, kendilerini dolanım merkezlerinden uzaklaştırmak isteyen bir kuvvet etkisi altında bulunurlar. Bu kuvvete, merkezkaç kuvveti denilmektedir. Rüzgarın meydana getirilmesinde etkili olmayan, rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışan kuvvete ise sürtünme kuvveti denir. Bu kuvvet, yer yakınında en büyüktür ve türbülanslar tarafından yukarıya taşınır.

Rüzgar, toprak yüzeyinin güneş tarafından düzensiz ısıtılması sonucu ortaya çıkan bir hava hareketi olup vektörel bir kuvvettir. Yön ve şiddet olmak üzere iki faktör halinde ölçülür. Rüzgârın hangi yönden estiğini saptayabilmek için, yatay hava hareketini etkileyen basınç gradyan kuvveti, Coriolis kuvveti, sürtünme kuvveti gibi kuvvetlerin incelenmesi gerekir. Rüzgarın oluşmasına ve hızına etki eden 4 kuvvet vardır. Saptırıcı etki Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Coriolis saptırıcı kuvvetleri

Basınç gradyan kuvveti: Bu kuvvet havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru sürüklemeye çalışır. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eder.

Saptırıcı (Coriolis) kuvvet: Coriolis kuvvet rüzgâra dik doğrultuda tesir eder, yönünü değiştirir ancak şiddetini etkilemez. Coriolis kuvvet büyük ölçekli alanlarda esen rüzgârlar için göz önünde bulundurulur. Küçük ölçekli hareketlerde ise hesaba katılmaz. Yer yakınındaki sürtünme kuvveti ise, rüzgâr şiddetini ve buna bağlı olarak Coriolis kuvvetinin küçülmesine neden olur. Bu kuvvet iki şekilde etki eder. Birincisi, enlem daireleri boyunca oluşan hareketler için, ikincisi ise ekvator dan kutuplara doğru ya da kutuplardan ekvatora doğru oluşan hareketler için yer dönmesinin saptırıcı kuvvetidir. Coriolis kuvvetine, dünyanın dönmesinin saptırıcı kuvveti de denir. Rüzgar oluşumunun diğer bir nedeni Coriolis Kuvvetidir.

Merkezkaç kuvvet: Rüzgarlar genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu dönme hareketi sonucunda ortaya çıkan ve rüzgarı dönme merkezinden uzaklaştırmaya çalışan kuvvete, merkezkaç kuvvet adı verilir.

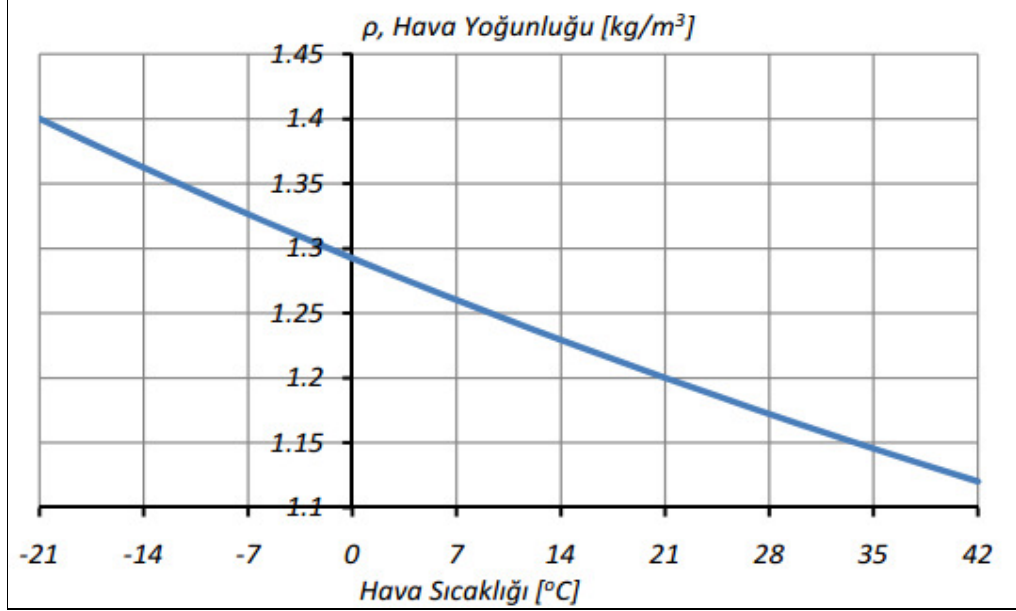
Sürtünme kuvveti: Bu kuvvet sadece rüzgarın hızına etki eden bir kuvvettir. Bu kuvvet rüzgarın yeryüzüne sürtünmesinden doğmakta ve türbülans anaforlarıyla 600 m yüksekliklere kadar iletilmektedir. Rüzgarın meydana getirilmesinde etkili olmayan sürtünme kuvveti, rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışır. Bu kuvvet, yer yakınında en büyüktür ve türbülanslar tarafından yukarıya taşınır. Rüzgarın sürtünmesinden doğan bu kuvvet, yer üstünde 450-600 m yüksekliğe kadar rüzgarı yavaşlatmaktadır. Rüzgarın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Vardar, 2006).

3.1.2 Havanın yoğunluğu

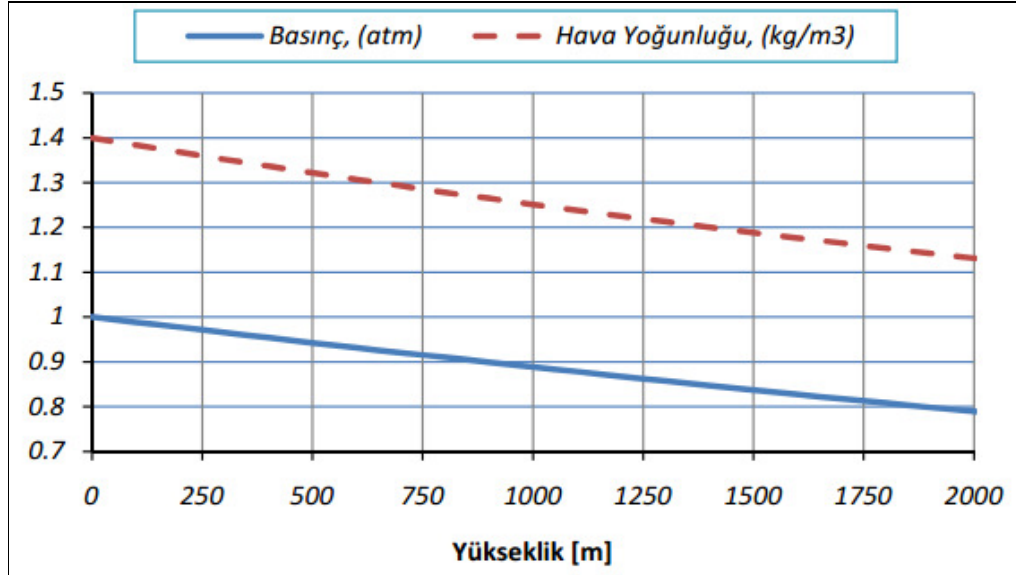
Rüzgar enerjisi hava yoğunluğu ile orantılı bir şekilde artar. Şekil 3.3.'de yoğunluk ile sıcaklık arasındaki ilişki gösterilmiştir. Nemli iklimler kuru iklimlerden daha yüksek hava yoğunluğuna sahiptir. Yüksekliği düşük olan yerler daha yüksek hava yoğunluğuna sahiptir. Rüzgâr güç verileri hazırlanırken genellikle hava yoğunluğunun $1,225 \text{ kg/m}^3$ olduğu, yani hava şartlarının 15° C sıcaklık ve 1 atm basınç altında olduğu kabul edilir. Farklı hava şartları için hava yoğunluğu “ideal gaz kanunundan” hareketle elde edilebilir. Sıcaklık değişirse hava yoğunluğu da değişir (DMİ, 2009).

3.1.3 Havanın sıcaklığı ve basıncı

Hava yoğunluğu ve dolayısıyla rüzgâr gücü atmosferik basınca ve sıcaklığa bağlıdır. Basıncın yükseklik ile değişimi Şekil 3.4.'te verilmiştir. Hava basıncı ise rakımın bir fonksiyonu olduğundan deniz seviyesinin üzerindeki bölgelerde rüzgâr gücü tahmin edilirken bir düzeltme faktörü kullanılmalıdır (Boztepe, 2009).



Şekil 3.3. Bir atm basınç altında hava yoğunluğunun hava sıcaklığı ile değişimi



Şekil 3.4. 15° C' de hava basıncının ve yoğunluğunun yükseklik ile değişimi

3.1.4 Türbülans

Eğer arazide düz olmayan alanlar ve ardından engeller (binalar vb) varsa düzensiz rüzgar esmeleri (sıklıkla dönen veya anafor oluşturan) birbirine benzer türbülanslar oluşur. Bu durum Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. a) Rüzgarın engeller etrafındaki türbülans etkisi b) Gökyüzünde türbülans

Türbülans rüzgardaki kullanılabilecek enerjiyi azaltarak rüzgar türbininden elde edilen enerjiyi de azaltır. Diğer taraftan rüzgar türbini kuleleri, türbülansın etkilenmemek için (rüzgarın yere yakın olduğu seviyelerde) yeterli uzunlukta imal edilirler (Windpower, 2003).

3.1.5 Pürüzlülük ve pürüzlülük uzunluğu

Rüzgar hızı genellikle yükseklik ile doğru orantılı olarak artar. Buna "rüzgar kesme" denir. Bunun sebebi sürtünme kuvvetidir. Rüzgar yere yakın noktalarda yavaş hareket eder. Toprak, ağaç ve bina gibi engeller rüzgarı yavaşlatır. Değişik yüzey türleri için farklı "pürüzlülük" değerleri vardır. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi sık olmayan ağaçlarla kaplı zeminin pürüzlülük katsayısı yaklaşık 0,1'dir. Yerden belli yükseklikteki rüzgar hızını belirlemek için çeşitli matematiksel modeller vardır. Yükseklik değişikliğinin rüzgar hızını nasıl etkileyeceğini tahmin etmek için çok yaygın iki formül kullanılır.

a. Rüzgar hızı logaritmik denklemi

b. Rüzgar hızı güç denklemi

a. Rüzgar hızı logaritmik denklemi:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln\left(\frac{H}{z}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z}\right)} \quad (3.1)$$

Formüldeki “z” değeri, pürüzlülük sabiti olarak adlandırılır ve aşağıdaki **Tablo 3.1.**’de gösterilen tipik değerlere sahiptir.

Tablo 3.1. Farklı yüzeylerin z pürüzlülük uzunluğu değerleri

Arazi Açıklaması	Yüzey Pürüzlülük Uzunluğu, z (metre)
Çok düzgün, buz veya toprak zemini	0.00001
Sakin açık deniz	0.0002
Dalgalı deniz	0.0005
Kar yüzeyi	0.003
Çimen otlak	0.008
Kaba mera	0.01
Nadasa bırakılmış zemin	0.03
Bitkilerle kaplı zemin	0.05
Birkaç ağaçtan oluşan zemin	0.1
Birçok ağaçların, çalıların, ve binaların olduğu zemin	0.25
Sık Orman ve ağaçlık	0.5
Şehrin kenar mahallesi	1.5
Yüksek binalar ile şehirlerin merkezleri	3.0

b. Rüzgar hızı güç denklemi:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

Burada v , H yüksekliğindeki rüzgâr hızı, v_0 ise H_0 referans yükseklikteki rüzgâr hızıdır(genellikle $H_0=10\text{m}$ alınır). α ise sürtünme katsayısıdır.

Sürtünme katsayısı α , rüzgâra maruz kalan yer yüzeyinin topolojisine bağlı bir katsayıdır. Tablo 3.2.’de farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları verilmiştir.

Not: Rüzgâr gücü rüzgâr hızının küpü ile değiştiğinden (3.2.) formülü kullanılarak H yüksekliğindeki rüzgâr bağıl gücü, H_0 referans yüksekliğindeki gücün bir fonksiyonu olarak bulunabilir.

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^3 = \left[\left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \right]^3 \Rightarrow \frac{P}{P_0} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^3 = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3\alpha} \quad (3.3)$$

Tablo 3.2. Farklı yüzeylerin α rüzgar kesme üs değerleri

Arazi Açıklaması	Rüzgar Kesme Üs, α
Pürüzsüz, sert zemin, göl ya da okyanus yüzeyi	0.10
İşlenmemiş toprak üzerinde kısa çim	0.14
Ayak seviyesinde çim ile kaplı zemin	0.16
Maki, fundalık ağaçlarla kaplı zemin	0.20
Birçok ağaç ve ara sıra bina ile kaplı zemin	0.22 – 0.24
Ağaçlık ve küçük kasabanın kenar mahallesi	0.28 – 0.30
Yüksek binaların olduğu şehir merkezleri	0.4



Şekil 3.6. Ağaçlarla kaplı zemin örneği

Yer seviyesinden yükseklerde rüzgar yerdeki engellerden etkilenmez. Atmosferin düşük katmanlarında rüzgar hızı yeryüzüne sürtünmeden dolayı etki eder. Yeryüzünde bir çok keskin engelin olduğu yerlerde rüzgarın hızı azalır. Ormanlar ve büyük binalar rüzgar hızını azaltır. Buna karşılık hava alanlarının pistleri gibi (beton zeminler) yerlerde

rüzgar hızı çok az düşer. Su yüzeyleri (denizler vb) beton zeminler gibi daha pürüzsüz olduğu için rüzgar hızına daha az etki yapar. Buna karşılık çimlerle veya çalılarla kaplı zeminler rüzgar hızını önemli oranda azaltır. Yeryüzü ne kadar çok pürüzlü veya engebeli ise rüzgar hızı da o oranda azalacaktır. Bu nedenle rüzgar türbinlerini engebeli ve ormanlık alanlara kurmamak gerekir(Boztepe, 2009).

Rüzgar hızı ölçümleri Dünya Meteoroloji Teşkilatı'nın belirlemiş olduğu 10 m yükseklikte yapılmaktadır. Türbinler ise genellikle 60m yükseklikte inşa edilir. Bu yükseklikte rüzgar hızının belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgar endüstrisinde bir bölgenin rüzgar şartları değerlendirileceği zaman pürüzlülük sınıfı veya pürüzlülük uzunluğu referans alınır. Pürüzlülük sınıfı 3 veya 4 olan bölge ağaçlarla ve binalarla kaplı bir alını ifade eder. Buna karşın pürüzlülük sınıfı 0 olan alan su (deniz, göl vb) yüzeylerini ifade eder. Hava limanlarının pistlerinde ise pürüzlülük sınıfı 0.5'dir. Düz ve açık alanlardan oluşan bölgelerde (hayvanların otlatılması için ayrılmış alanlar) bu sınıfa girer. Sonuç olarak; bir rüzgar türbininden maksimum enerji üretimini sağlayabilmek zemin şartları çok önemlidir.

3.1.6 Hellmann yükseltme bağıntısı

Rüzgar hızları zemine yakın yerlerde yükseklikle değişmektedir. Herhangi bir yükseklikte ölçülen rüzgar hızı ile başka bir yükseklikteki rüzgar hızı tahmin edilebilmektedir. Bunun için en yaygın olarak kullanılan bağıntı Hellmann bağıntısıdır.

Yeryüzüne yaklaştıkça sürtünme nedeniyle rüzgar hızı düşer. Sıfır yükseklikte rüzgar hızı da sıfırdır. Yüzeyden 10 m yükseklikteki rüzgar hızı 4 m/s ise, 50 metre yüksekteki hız yaklaşık 5m/s'dir. Yani hız yaklaşık % 25 oranında artmıştır. Bu nedenle rüzgar hızı ölçümleri çoğunlukla yerden 10 m yükseklikte ölçüm yapılarak, daha yüksekteki hızlar buna göre tahmin edilir. Daha net bilgi edinmek için rüzgar santrali kurulacak bölgede bir yıl boyunca 10 metre yükseklikte değil; en az 60 metre yükseklikte ölçüm yapmak gerekir. Yerinde ölçülen bilgiler her zaman daha gerçekçidir.

3.1.7 Rüzgar hız ölçümü ve anemometre

Ölçüm istasyonu; rüzgâr hızı sensörü, rüzgâr yönü sensörü, sıcaklık sensörü, basınç sensörü, bağıl nem sensörü ile ölçüm kayıt cihazından oluşur. Rüzgâr ölçüm direğinin yüksekliği minimum 60 m olmalıdır. Rüzgar ölçümleri, birisi 30 m, diğeri direğin en üst

seviyesinde olmak üzere en az iki seviyede yapılmalıdır. Basınç, sıcaklık ve nem ölçümleri ise en az 3 m yükseklikte yapılmalıdır. Yapılan ölçümler, ölçüm verileri üzerinde değişikliğe sebep olacak herhangi bir müdahale olmaksızın çevrimiçi olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğüne (MGM) iletir. Veri iletimi, günün belli bir saatinde veri kayıt cihazı tarafından MGM'nin belirleyeceği e-posta adresine veya terminale otomatik olarak gönderilir. Kayıt edilen tüm ölçüm verileri, belli zaman aralıklarında veya ölçüm süresinin sonunda, verileri değiştirecek herhangi bir müdahale olmaksızın orijinal olarak MGM'ye elektronik ortamda sunulacaktır. Bir yıllık ölçüm süresi içerisinde, işletme bakım veya sair nedenlerle veri kaybı yüzde 20'den daha fazla olamaz (28212 Sayılı Resmi Gazete, 2012).

Rüzgar hızının ölçülmesinde kullanılan ölçü aletine anemometre denir. Ölçümlerde genellikle kap anemometresi (cup anemometer) kullanılır. Kap anemometresi dikey bir eksene ve 3 tane kaba (küçük fincan) sahiptir. Bu kaplar ile rüzgar yakalanır (Şekil 3.7.)'de kap anemometre görülmektedir. Her dakikadaki ölçüm kaydedilir. Normalde anemometre rüzgar yönünü tespit edebilmek için rüzgar fırıldığı ile donatılmıştır. Diğer anemometre türleri ultrasonik veya lazer anemometrelerdir.



Şekil 3.7. Rüzgar gözlem istasyonu

Anemometrenin gövdesi keskin hatlara sahip olmamalı; küçük ve simetrik hatlara sahip olmalıdır. Aksi takdirde anemometre gövdesine gelen rüzgar türbülans yaratarak ölçüm sonuçları üzerinde olumsuz etkiler yapacaktır. Rüzgarın değdiği kepçeler (cup) önemlidir. Kötü dizayn edilmiş cup yapısı, dinamik etkileri gerekli hassasiyette dikkate

almayabilir. Cup anemometreyi ana gövdeye bağlayan bilyeli yataklar mekanik sürtünmeyi en aza indirebilmek için yüksek kalitede olmalıdır. Ölçümlerde kullanılan anemometreler mutlaka kalibrasyon sertifikalı olmalıdır. Ölçüm bittikten sonra anemometreler tekrar kalibre edilmelidir (Durak, 2013).

Ayrıca RGI'nun kurulacağı noktadaki rüzgar akışları daima birbirine paralel olmalı, bozulmuş rüzgar akışları ve türbülanslar bulunmamalıdır. Özellikle enerji amaçlı rüzgar hız ve yön ölçümlerinde hassas olunması istenmektedir. Zira, ölçümlerde yapılabilecek küçük bir hata enerji üretimine önemli oranda hata ve belirsizlik olarak yansiyacaktır.

3.1.8 Basınç, sıcaklık, nem ve çevre

Rüzgar hızı ve rüzgar yönü ile birlikte diğer bazı meteorolojik parametrelerin de ölçülmesi son derece faydalı olacaktır. Özellikle rüzgar enerjisi hesaplamalarında kullanılan bir değer olan hava yoğunluğunu hesaplayabilmek için basınç, çevre sıcaklığı ve nemlilik değerlerinin ölçülmesidir.

Topografya rüzgarın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepe ve kayalıklar, rüzgar profillerini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsileleri eğer denize paralel, hakim rüzgar yönüne dik, orta eğimli (10-22°) ve özellikle ağaçsız ise enerji üretimine uygun yerlerdir. Zirvede rüzgar hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepenin üst ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmaz.

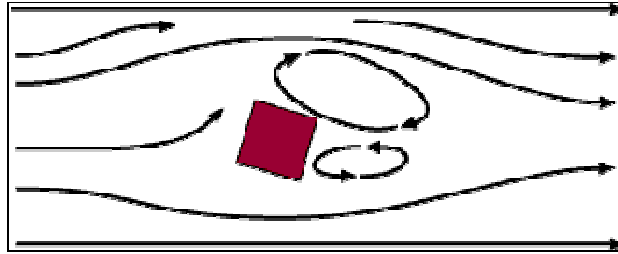
Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve en önemlisi de kullanılacak türbinin tasarımına bağlıdır. Seçilen bölgeden ekonomik olarak enerji üretebilmek için rüzgar hızı ve yön ölçümleri, topoğrafik yapı ve arazi pürüzlülüğü çok iyi belirlenmelidir. Rüzgar türbinlerinin kurulması tasarlanan bölgede türbin tarafından üretilebilecek elektrik enerjisinin hesaplanabilmesi için, meteorolojik ve bölge verilerinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. En yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemi Danimarka'da RISO Laboratuvarlarında geliştirilmiş bulunan "Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı (WASP)" 'dır.

Arazi seçiminden sonra kapasiteyi belirleyen en önemli unsur üretilen elektriğin nereye verileceğidir. Ulusal dağıtım sistemine verilecekse araziye en yakın iletim hattı belirlenerek gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Bölge seçimini kısıtlayan bir faktör de

rüzgar çiftliği için (bir çok rüzgar türbininin bir arada bulunduğu yerler) geniş arazi gerektirmesidir. Bu santral alanlarında türbinlerin birbirlerine çok yakın yerleştirilmesi birbirlerinin rüzgarlarını keseceği için uygun değildir. Santral alanının en çok kullanıldığı alan %1'i geçmez ve geri kalan arazi tarım ve hayvancılık amacıyla kullanılabilir (Sülün, 2007).

3.2 Rüzgar Engelleri

Rüzgar engelleri (binalar, ağaçlar vb) rüzgar hızını önemli ölçüde düşürebilir ve sıklıkla türbülansa sebep olurlar. Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi engel etrafında rüzgar akışı oluşur. Bu engel yüksekliğinde, üç tane türbülans bölgesi verilebilir. Türbülans engelin arkasında, engelin önüne göre daha belirgindir. Bundan dolayı, rüzgâr türbinini engellere uzak noktalarda tasarlamalıyız. Engeller rüzgâr hızını, engele akış yönünde azaltır. Rüzgâr hızındaki bu azalma engelin gözenekli olmasına da bağlıdır. Bundan dolayı rüzgâr santrali tasarımında engeller de hesaba katılmalıdır. Eğer türbinler birbirine yakın (1km den daha yakın) ve temel rüzgâr yönünde tasarlanırsa bunu da bir engel olarak görmek ve hesaplamaları buna göre yapmak gerekir (Windpower, 2003).



Şekil 3.8. Bir engel etrafında rüzgârın akışı

3.2.1 Wake etkisi (Wake effect)

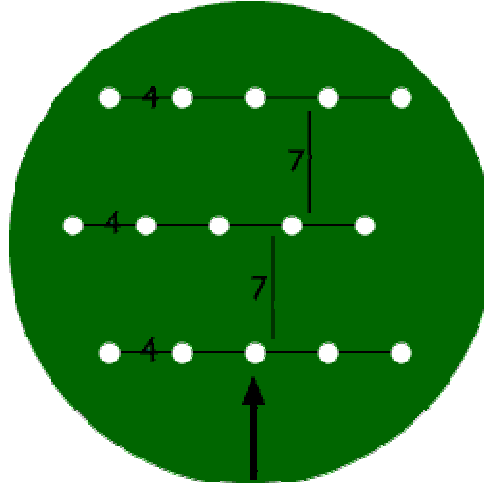
Bir rüzgâr türbini enerji ürettiğinden, türbine gelen rüzgârın türbinden çıkan rüzgârdan daha düşük bir enerjiye sahip olması gerekir. Bir rüzgâr türbini daima aşağıya doğru esen bir rüzgâr gölgesi oluşturur. Gerçekte Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi türbin arkasında bir wake (uyanma, çalkantı) meydana gelecektir. Türbin uçlarına duman eklenirse, bir türbinin arkasındaki wake izini görmek mümkündür (Windpower, 2003).



Şekil 3.9. Wake etkisi

3.2.2 Türbinlerin yerleşim etkisi (Park effect)

Her rüzgâr türbini rüzgârdaki enerjiyi alıp elektrik enerjisine çevirdikten sonra rüzgârı yavaşlatır. Bundan dolayı türbin yerleşim planında, türbinler arasında, hakim rüzgar yönünde yeterli mesafe bırakılmalıdır. Diğer taraftan, türbinlerin elektrik bağlantıları için türbinleri mümkün olduğunca yakın planlamalıyız. Türbin yerleşim planında, türbinler arasında hakim rüzgar yönünde rotor çapının 7 katı, düşey yönde 4 katı mesafe bırakılmalıdır. Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi 3 sıradan oluşan ve her sırada 5 türbin olan bir örnek vardır (beyaz noktalar türbini temsil etmektedir). Hakim rüzgar yönünde(ok ile gösterilmiş) türbin sıraları arasında rotor çapının 7 katı ve aynı sıradaki türbinler arasında rotor çapının 4 katı mesafe bırakılmıştır (Windpower, 2003).



Şekil 3.10. Türbin yerleşim planı

3.2.3 Tünel etkisi (Tunnel effect)

Yüksek binaların arasında veya dar dağ geçitlerinde yürüdüğümüzde bu etkiyi hissederiz. Hava, binalar veya dağlar arasında rüzgârlı taraftan sıkıştırılır ve rüzgârın hızı engeller arasında hissedilir derecede artar. Rüzgâr açık alanda 6m/s hızla esiyorsa doğal tünelde (dağlar aralarında) 9m/s hızla esebilir. Şekil. 3.11.'de görüldüğü gibi, rüzgar türbinini bu şekilde bir tünele yerleştirerek çevre arazide esen rüzgardan daha yüksek bir rüzgar hızı elde edilir.



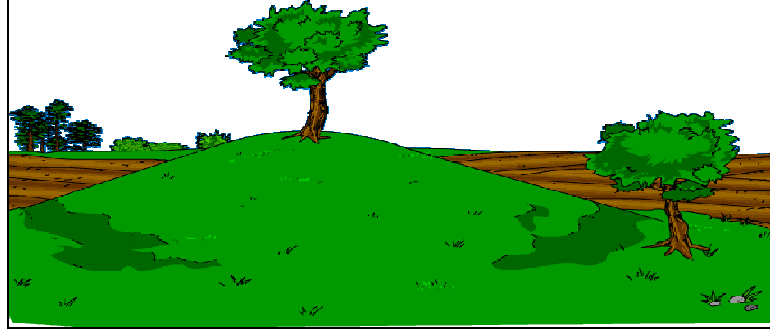
Şekil 3.11. Tünel etkisi örneği

İyi bir tünel etkisi elde etmek için türbini yumuşak engellerin arasına yerleştirmek gerekir. Eğer tepeler çok pürüzlü ve engebeli olursa alanda türbülanslar oluşur (rüzgar farklı yönlerde döner) (Windpower, 2003).

3.2.4 Tepe etkisi (Hill effect)

Türbin yerleşiminde uygulanan yaygın bir yol da, türbini tepenin üstüne yerleştirmektir. Şekil 3.12.'de görüldüğü gibi özellikle rüzgarın hakim yönünde geniş alanlar varsa bu yerleşim daha avantajlıdır. Tepelerde rüzgâr hızı yere göre daha yüksektir. Rüzgar, rüzgar türbini rotorundan geçerken çok düzensizdir. Eğer tepe sarp (dik) ise veya engebeli ise türbülansı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Topografya, rüzgârın yönü, hızı ve dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsilesi, tepe ve kayalıklar rüzgâr kalitesini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsileleri, eğer denize paralel, hakim rüzgar yönüne dik, orta eğimli ve özellikle çıplak ise, enerji üretimine en uygun yerlerdir.



Şekil 3.12. Tepe etkisi örneği

Zirvede rüzgâr hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepenin üst ve ön kısmı tesis için uygundur. Fakat, tepenin üst ve arka kısmı türbülans nedeniyle uygun değildir (Windpower, 2003).

3.2.5 Rüzgar türbini alanının seçimi

Rüzgar çiftliği kurarken (rüzgar tarlası) göz önünde bulundurulması gereken faktörler; Arazinin engebeli olmaması, rüzgar engelleri, park etkisi, tünel etkisi, tepe etkisi olarak düşünülebilir. Rüzgâr türbinini yerleştirecek en uygun yeri bölgenin doğal şartlarına bakarak seçeriz. (Eğer bölgede ağaçlar, çalılar, fundalıklar varsa bunlara bakarak rüzgarın hakim yönünü kolayca belirleriz) Şekil 3.13.'de görüldüğü gibi.



Şekil 3.13. Hakim rüzgâr yönü

Meteoroloji verileri (30 yıllık bir periyotta çıkarılmış rüzgar gülü) bizim için en iyi rehberdir. Fakat bu rüzgâr verileri direk olarak santral kurmayı düşündüğümüz bölgeden elde edilmemiş olabilir. Eğer kurulum yapmayı planladığımız bölgede rüzgar türbini varsa bunlardan elde edilen veriler bölgenin rüzgâr şartlarını tespit etmede en iyi rehberimiz olur. Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde ülke geneline yayılmış çok

sayıda türbin olduğundan, imalatçı firmalar kurulumdan sonrası için hesaplanan değerlerde üretim garantisi verirler.

Rüzgar şartlarını belirledikten sonra bölgenin hakim rüzgar yönünde geniş ve açık olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bu geniş ve açık alanda hakim rüzgâr yönünde birkaç tane engel varsa ve düşük pürüzlülük sınıfında ise bunlar kabul edilebilir. Eğer bölgede türbin yerleştirecek tepeler varsa bu çok verimli olur (Hill Effect). Büyük rüzgâr türbinleri elektrik şebekesine bağlanmalıdır. Daha küçük projeler için de bu gereklidir. Fakat bağlantı masrafları analiz edilmelidir (uzun iletim hatları gerekebilir). Eğer iletim hattına çok rüzgâr türbini bağlanırsa iletim hattına takviye gerekebilir. Ülkemizin için bu durum problem olabilmektedir. Mevcut iletim hatları yenilenmeli ve güçlendirilmelidir (Ağçay, 2007).

Türbin alanının seçiminde toprak şartları analizi de gereklidir. Hem türbin temeli için fizibilite hem de türbinin ağır parçalarını bölgeye götürmek için yol yapımı fizibilitesi gereklidir. Meteoroloji her zaman rüzgar verilerini hava tahmini yapmak için, havacılık için de meteoroloji balonlarını kullanır.

Rüzgar hızı ölçümlerindeki hassaslık (kesinlik) rüzgar enerjisi planlamasında diğerlerine (hava tahmini vb) göre daha önemlidir.

3.2.6 Weibull dağılımı

Rüzgar hızındaki değişimleri tespit edebilmek ya da hangi yönde nasıl değişimlerin olacağını önceden tahmin edebilmek, rüzgar enerjisi için çok önemli konuların başında gelmektedir. Türbin üreticileri, türbin tasarımını optimize üretim maliyetlerini minimize etmek için bu bilgilere ihtiyaç duyarlar. Rüzgar değişimlerini tanımlayabilmek için Weibull dağılımından faydalanılır. Rüzgar enerjisinin frekans dağılımına en uygun istatistiksel dağılımının Weibull dağılımı olduğu başta Justus (1978) ve Lyons tarafından ifade edilmiştir. Rüzgar hız değerlerinin hâkim yön ve şiddetlerinin bulunması, bu dağılımın kullanılmasının esas sebepleri arasında yer almaktadır. Eğer bir yıl boyunca rüzgar ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgarların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgarların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir bölge için rüzgar dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde Weibull dağılımı ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir. Bu dağılımın grafiğinin altında kalan alanın toplamı “1” dir (Ergür, 2006).

3.2.7 Rayleigh dağılım fonksiyonu

Rüzgarın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, enerji üretimi değerlendirmeleri için çok önem arz eder. Türbin tasarım şirketleri; türbin iyileştirmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgar dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Bir yerde sadece ortalama rüzgar hızı (v_{ort}) biliniyorsa; Rayleigh Dağılım Fonksiyonu yardımıyla herhangi bir rüzgar hızının (v_i), esme saati (h) yüzdesi bulunabilir. Bunun sonucunda ortaya çıkan rüzgâr hızları bir olasılık yoğunluğu dağılımıdır. Dağılım şematik olarak çizilirse bu dağılımın altında kalan alan 1'e eşittir. Çünkü, rüzgarın sıfır dahil herhangi bir hızda esme olasılığı % 100'dür (Gülersoy, Çetin, 2010).

3.2.8 Kanat sayısının etkisi

Türbin dizayn edilirken ilk göz önüne alınması gereken parametre kanat sayısıdır. Rüzgar türbinleri kanat sayısı 1 ile 40 arasında değişecek şekilde dizayn edilebilirler. Kanat sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hızı oranlı rotorlar için kullanılırlar. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir. Yüksek uç hızı oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanır.

Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin kullanılmasının temel amacı, pervanelere etki eden yüksek çizgisel hızın düşürülmesidir. Bu türbinler aerodinamik açıdan dengesizdir. Bu nedenle istenmeyen bazı yüklere neden olur. Bu mekanizmayı dengelemek için, göbek kısmına ek yapılar ilave etmek gerekir. Diğer yandan gürültü seviyesi de yüksektir. Uç hızı üç kanatlı pervaneler ile kıyaslandığında iki kat daha fazladır. Değişik kanat örnekleri Şekil 3.14.'de verilmiştir.



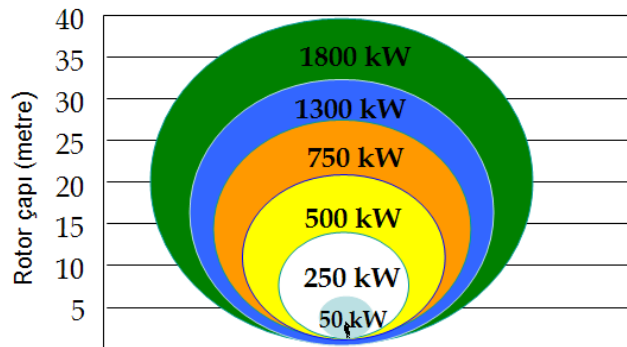
Şekil 3.14. Kanat sayısı etkisi

İki kanatlı rüzgar türbinleri 20-25 yıl öncesine kadar Avrupa ülkelerinde ve Amerika’da kullanılmıştır. Bu türbinler ekonomik açıdan avantajlı gibi görünse de ek yapılarla üç kanatlı türbinlerle aynı maliyete gelmektedir. Üç kanatlı rüzgar türbinlerinde görülmeyen bir eylemsizlik momenti oluşur. Eylemsizlik momenti $I = m \cdot r^2$ ile verilir. Burada m, dönen sistemin kütlesi, r de dönme ekseninden bu kütleye çizilen uzaklıktır. Sistemin dengede durabilmesi için sallanan bir göbek olmalıdır. Bu yapılmazsa aşırı yükten kanatlar kırılabilir. Bu türbinleri devreye girmesi için en az 3m/s rüzgar hızına ihtiyaç vardır.

Günümüzde hem verim açısından hem de estetik açısından en çok kullanılan model üç kanatlı türbinlerdir. Bu türbinler hız ne olursa olsun sabit bir eylemsizlik momentine sahiptir. Üç ve daha fazla kanadı olan bu tür türbinler bu avantaja sahiptir. Bu avantajından dolayı göbek kısmına ek bir yük getirmez. Ayrıca gürültü seviyesi de diğerlerine göre daha düşüktür (Working Wind).

3.2.9 Kanat süpürme alanı

Rüzgar enerjisi kanat süpürme alanıyla orantılı bir şekilde artar. 1MW’lık bir rüzgar türbininde rotor çapı 54m’dir. Rotor süpürme alanı türbinin rüzgardan ne kadar enerji elde edeceğini belirler. Rotor çapının artırılması ile süpürme alanının artması sağlanır ($A = \pi r^2$). Eğer rotor çapını 2 kat artırırsak rotor alanı 4 kat artar böylelikle elde edilen enerji de 4 kat arttırmış olur. Rotor çapı önemlidir, çünkü türbin üreten firmalar bölgesel rüzgar şartları için ürünlerini optimize ederler. Büyük güçlü bir jeneratör daha güçlü bir rüzgar ile kullanılabilir bundan dolayı eğer düşük rüzgar gücüne sahip bir bölgeye kurulum yapılacaksa düşük güçlü jeneratör seçilmelidir. rotor çapına göre elde edilen güçler Şekil 3.15. ‘de verilmiştir.



Şekil 3.15. Rotor çapı güç ilişkisi

3.2.10 Kanat yapımında kullanılan malzemeler

Bir rüzgar türbininden maksimum enerji üretimini sağlayabilmek çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar rüzgar türbininin yüksekliği, rüzgar türbin kanadının süpürme alanı ve aerodinamik yapısı, hava yoğunluğu ve rüzgar hızı gibi faktörlerdir. Bu faktörlerin en önemlilerinden biri de rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısıdır. Kanat örneği Şekil 3.16.'da görülmektedir. Rüzgar türbin kanadının aerodinamik yapısı incelenirken kanat tipinin, kanat açılarının ve kanat konumunun en az rüzgarda bile dönme sağlayabilecek özelliklerde olması ve yörenin rüzgar potansiyeli ile uyum sağlaması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır (Vardar, Eker, 2001).

Rüzgar türbinlerinin kanatları cam elyafı (fiber-glass) polyester malzemeden, nadiren de tahtadan yapılmaktadır. Kuleler ise; çelik boru şeklinde, kafes tipi veya betondan üretilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleri yaklaşık 3-5 m/s de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15 m/s 'de ulaşır ve yaklaşık 25 m/s 'ye ulaştığı zaman çalışmayı durdurur (Adım, 2009).

Teknolojik gelişimin hızla ilerlemesi ile sektördeki tüm firmaların ürettiği türbinlerin alt standartları iyice yükselmiş ve önemli bir unsur olarak kanatların dizaynı, malzemesi ve üretim şekli önem kazanır olmuştur. Artık günümüzde rüzgâr türbini kanatlarının, türbin verimliliğinde ciddi oranda etkisi olduğu kabul edildiğinden mühendislik ve teknoloji olarak önemli yatırımlar yapılmakta ve sürekli gelişmektedir.



Şekil 3.16. Kanat süpürme alanının büyümesi enerjiyi de artırır

Rüzgar türbinlerinden yüksek verim elde edilmesi, her birim için uygun malzemenin seçilmesiyle mümkündür. Bu nedenle, tüm koşullarda malzeme gelişim ve davranışları incelenmektedir. Kompozit malzemeler; yeni bulunan bir malzeme olmayıp, tabiatta var olan yapılardan hareketle farklı özelliklere sahip malzemelerin değişik şekillerde (taneli, lifli, tabakalı vb.) birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir (Karabağ, 2011).

3.2.11 Kule yüksekliğinin etkisi

Kule, rüzgar türbinlerinde nacelle ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır. Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir. Rotorun kulenin tepesine yerleştirilmesi durumunda direğin gölgesi kanatlar üzerinde etkili olmayacağı için daha yüksek güç elde edilebilir. Şekil 3.17.'de değişik yüksekliklerde kuleler görülmektedir. Bu durum aynı zamanda daha düşük gürültü daha az kanat yorgunluğu ve daha düzgün güç üretilmesi gibi avantajlar sağlar (Ağçay, 2007).



Şekil 3.17. Kule yüksekliği atıkça enerji de artar

BÖLÜM IV

NİĞDE İLİNİN RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN FİZİKSEL VE EKONOMİK ANALİZİ

4.1 Materyal ve Metot

Niğde bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli 2008-2009 yıllarında Uğur YILDIRIM, Yavuz GAZİBEY, Afşin GÜNGÖR tarafından istatistiksel olarak incelenmiştir. Rüzgar verilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel yaklaşım olarak Weibull dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri moment metodu ve enerji eğilim faktörü yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan her iki yöntem ile Belirleme Katsayısı (R^2) ve Ortalama Hata Kareleri Toplamının Karekökü (RMSE) hata analizleri ile karşılaştırılmıştır (Yıldırım ve arkadaşları 2009).

Bizim metodumuz daha önce yapılan çalışmadan farklıdır. Niğde ilinin rüzgar enerjisi potansiyelinin tespit edilebilmesi için “ **RETScreen Temiz Enerji Proje Analiz Yazılımı**” kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla Niğde iline ait 1970-2012 yılları arasındaki meteorolojik veriler Niğde Meteoroloji İl Müdürlüğünden temin edilmiştir. Niğde ilinin rüzgar verilerini kullanarak rüzgar enerjisi potansiyelini tespit etmek için, RETScreen Temiz Enerji Yazılım Programı ile de veriler alınmıştır. Bu program sayesinde hem daha doğru bilgilere ulaşılmış, hem de rüzgar enerjisi analizi daha doğru sonuçlar vermiştir. Aynı zamanda alınan verileri karşılaştırma imkanı doğmuştur. (RETScreen, 2013).

4.1.1 RETScreen

RETScreen Temiz Enerji Proje Analiz Yazılımı, temiz enerji konusunda karar vermede dünyada önde gelen bir yazılımdır. Kanada Hükümeti tarafından tümüyle ücretsiz olarak sağlanan bu yazılım, iklim değişikliği konusunda önlem alınması ve kirliliğin azaltılması için tümleşik bir yaklaşım benimsenmesi ihtiyacı karşısında, Kanada'nın attığı adımlar arasındadır. RETScreen, dünya çapında temiz enerji projeleri alanında kendini kanıtlamış bir kolaylaştırıcıdır.

RETScreen, potansiyel enerji projelerinin tanımlanması ve değerlendirilmesiyle ilişkili maliyetleri (hem para hem zaman açısından) ciddi seviyede azaltır. Fizibilite öncesi,

fizibilite anında, geliştirme ve mühendislik safhalarında ortaya çıkan bu maliyetler; Yenilenebilir enerji ve enerji etkin teknolojilerin benimsenmesinin önünde başlıca engeller haline gelebilmektedir. Bu engellerin ortadan kaldırılmasına yardımcı olan RETScreen, gerek projelerin uygulanmasında karşılaşılan maliyetleri, gerek temiz enerji alanında faaliyet gösterilmesiyle ilgili maliyetleri azaltır.

Yatırımcılar ve araştırmacılar, RETScreen sayesinde, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve kojenerasyon alanında önerilen bir projenin maddi açıdan mantıklı olup olmadığını belirleyebilir. Eğer bir proje uygulanabilir durumdaysa (veya değilse), karar verici kişi RETScreen sayesinde bunu hızla, tartışmasız bir şekilde, kullanımı kolay bir formatta ve göreceli olarak asgari maliyette öğrenebilir. Uzun süre beklemesine gerek kalmaz.

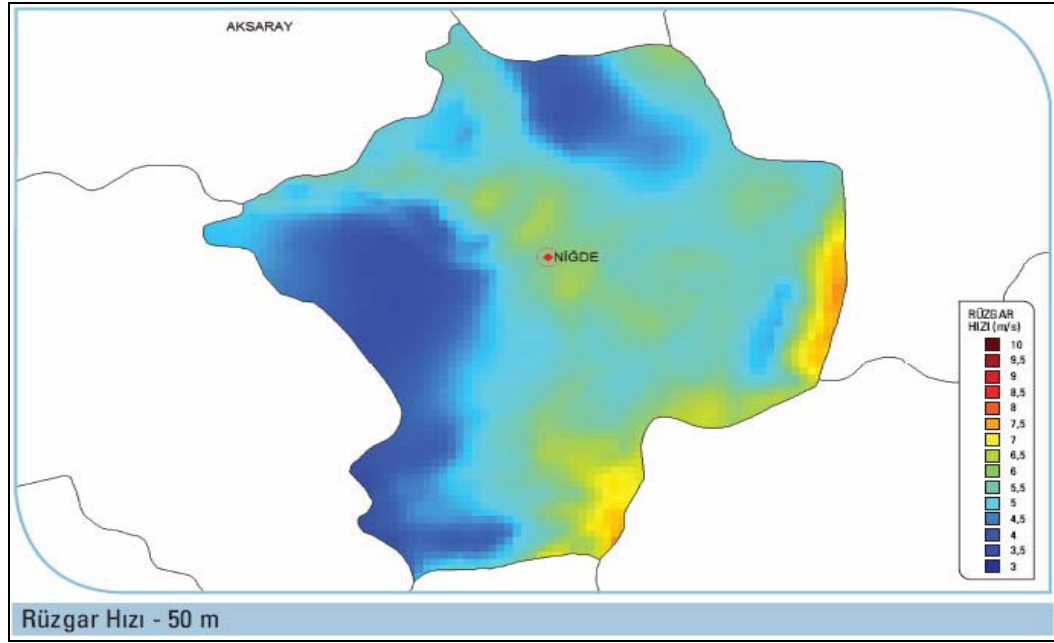
4.1.2 Niğde ilinin coğrafi konumu

Coğrafi koordinatlar sistemine göre Niğde ilinin matematiksel konumu, $37^{\circ} 25' - 38^{\circ} 58'$ kuzey enlemleri ile $33^{\circ} 10' - 35^{\circ} 25'$ doğu boylamları arasındadır. İç Anadolu Bölgesinin Orta Kızılırmak Bölümünde yer alan İl arazisinin bir kısmı Akdeniz Bölgesinin Adana Bölümünde yer alır. Altunhisar ve Çiftlik ilçelerinin tamamı İç Anadolu Bölgesinde kalırken Merkez ilçe ve Bor ilçesinin ise her iki bölgede de toprakları bulunmaktadır. Çamardı ve Ulukışla ilçelerinin tamamı da Akdeniz Bölgesinde yer alır. İl arazisinin yüzölçümü 7400 km^2 civarındadır.

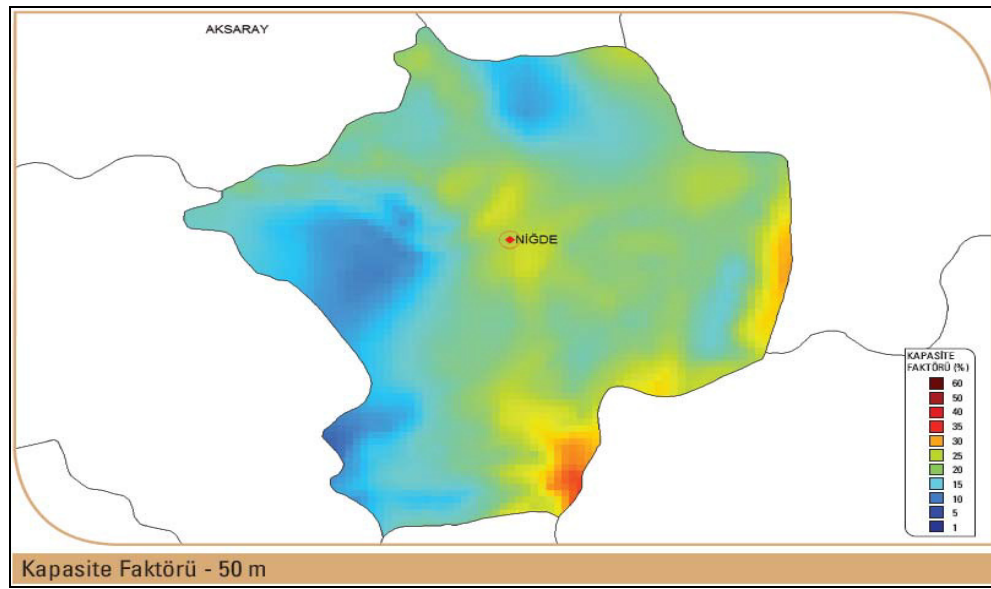
Niğde'nin sahip olduğu coğrafi konum itibarıyla rüzgâr oluşumu açısından oldukça elverişlidir. Tünel etkisi nedeniyle şehir çoğu zaman rüzgar almaktadır. Deniz seviyesinden ortalama 1300 m yükseklikte bir iç Anadolu ilimizdir. Kuzeydeki yüksek kesimi 2963 m zirvesi ile Melendiz Dağı oluşturur. Güney ve güneydoğu sınırlarını Orta Torosların temeli niteliğindeki Bolkar Dağları (3002 m) ve onun uzantısı biçiminde olan Aladağlar (3734 m) kuşatır (Kopar, 2007).

4.1.3 Niğde ilinin rüzgar verileri

Türkiye geneli bütün illerin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) çıkarılmıştır. Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Tablo 4.1.'de 50 metre yükseklikte ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunlukları verilmektedir.



Şekil 4.1. Niğde İline ait 50 metre rüzgâr hızı haritası



Şekil 4.2. Niğde İline ait 50 metre rüzgâr kapasite faktörü haritası (EİE)

Tablo 4.1. Niğde ilinde kurulabilecek rüzgâr enerjisi santrali güç kapasitesi (EİE)

50 metrede Rüzgar Gücü (W/m²)	50 metrede Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300-400	6.8-7.5	11,65	58,24
400-500	7.5-8.1	0,77	3,84
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
		12,42	62,08

4.1.4 Niğde ilinin rüzgar yönü ve hızı

Bölgedeki rüzgar hız ve yönünün bir yıl içerisinde gösterdiği değişimler, Niğde Meteoroloji İstasyonu’ndan elde edilen 1970-2012 yılı saatlik verilen incelenerek değerlendirilmiştir. Uzun yıllara ait yıllık ve mevsimlik rüzgar rejimleri aşağıdaki gibidir. Bölgedeki rüzgar rejimini ortaya koyan istatistiklerin aylara göre dağılımı tabloda gösterilmiştir. Bu istatistiklere göre, rüzgar yönü aydan aya farklılıklar göstermekle beraber, bölgenin rüzgar rejimine kış ve yaz mevsimlerinde kuzey-kuzeydoğu yönlü rüzgarlar hakimdir. Niğde iline ait aylara göre ortalama rüzgar değerleri **Tablo 4.2.** , Rüzgar esme sayıları **Tablo 4.3.** ‘te gösterilmiştir.

Ortalama rüzgar hızı bütün yönlerde oldukça yüksek olup, yönlere göre farklılıklar göstermektedir. Niğde’de yıllık ortalama rüzgar hızı 2,9 m/sn olmaktadır. Bölgede hakim rüzgar yönü, yıllık 115166 esme sayısı ile kuzey-kuzeydoğu’dur. En hızlı esen rüzgarın hızı 30,9 m/sn, en hızlı esen rüzgar yönü ise yine 30,9 m/s ile Doğu Güneydoğu’dur.

Araştırma bölgesinin rüzgâr özelliklerini ortaya koymak için Niğde meteoroloji istasyonlarına ait veriler esas alınmıştır. Buna göre sahada rüzgârların esme sıklığı ve yıllık dağılışında, Kuzey (K) ve Kuzey Kuzeydoğu (KKD) yönlerinden esen rüzgârların fazlalığı dikkat çeker. Bu yönleri diğerleri izler. İstasyonun kayıtları ayrıntılı şekilde incelendiğinde çeşitli yönlerden esen rüzgârların ortalama değerlere göre toplam esme sayısı Niğde için en yüksek 115166’dır. Rüzgar ortalamalarına bakıldığında Niğde’de KKD (Kuzey-Kuzeydoğu), yönünde esme sayıları öne çıkar, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3. (Oreks, 2009).

Tablo 4.2. Niğde İline ait 1970-2012 arası ortalama rüzgar hızları ve yönleri (DMİ)

Rüzgar Hızları- Yönleri	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ortalama
K	3,1	3,2	3,0	2,8	2,9	3,0	3,6	3,5	2,8	2,5	2,6	3,0	3,0
KKD	2,5	2,5	2,5	2,2	2,1	2,3	2,7	2,6	2,2	2,1	2,1	2,3	2,3
KD	2,3	2,5	2,5	2,2	2,1	2,4	2,8	2,6	2,2	2,0	2,1	2,3	2,3
DKD	1,9	1,9	2,1	1,9	1,9	2,2	2,3	2,3	2,0	1,8	1,7	1,8	2,0
D	1,7	1,5	2,0	1,6	1,7	2,0	2,1	2,0	1,7	1,6	1,5	1,4	1,7
DGD	2,0	2,3	2,3	2,2	1,9	1,5	1,6	1,7	1,4	1,5	1,6	1,5	1,8
GD	4,0	4,5	4,3	4,2	2,8	1,9	2,0	1,9	1,7	2,8	3,3	3,9	3,1
GGD	3,5	4,2	3,8	3,8	3,1	2,5	2,3	2,1	2,2	2,8	3,2	3,6	3,1
G	3,8	3,9	4,1	4,2	3,4	2,8	2,8	2,6	2,6	3,0	3,3	3,6	3,3
GGB	2,3	2,9	3,2	3,3	2,9	2,6	2,6	2,4	2,5	2,4	2,5	2,6	2,7
GB	2,6	2,9	3,3	3,6	3,0	2,9	2,6	2,5	2,7	2,5	2,4	2,5	2,8
BGB	2,3	2,5	2,9	2,9	2,4	2,3	2,3	2,2	2,3	2,1	2,1	2,2	2,4
B	2,2	2,3	2,4	2,2	2,0	2,1	2,1	1,9	1,9	1,7	1,8	2,0	2,0
BKB	1,6	1,6	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,4	1,5	1,5
KB	1,3	1,3	1,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,3	1,0	1,0	1,0	1,3	1,4
KKB	2,0	2,1	2,2	1,9	2,0	2,4	3,0	2,7	2,1	1,7	1,8	1,9	2,2
Ort.	3,0	3,3	3,3	3,2	2,7	2,7	2,8	2,7	2,6	2,5	2,8	2,9	2,9

Tablo 4.3. Niğde İline ait 1970-2012 arası aylık toplam rüzgar esme sayıları (DMİ)

Rüzgar Esme Sayıları	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
K	776	841	649	415	611	1010	1801	1218	783	632	531	544	9811
KKD	9698	7928	8713	7651	8619	9765	10623	11593	10983	10350	9649	9594	115166
KD	4856	4445	4138	3309	4367	5576	7507	7372	6042	6271	5582	5182	64647
DKD	1648	1189	1504	1401	2042	2327	2598	2848	2182	2056	1819	1627	23241
D	178	163	197	170	251	259	244	219	221	189	206	194	2491
DGD	446	398	457	514	489	267	161	167	176	232	372	456	4135
GD	400	477	574	459	293	197	99	96	125	295	358	390	3373
GGD	1737	1926	2003	2208	1578	690	422	424	569	1266	1550	1536	15909
G	986	1180	1454	1369	853	434	270	280	416	645	883	992	9762
GGB	4226	4296	4944	5786	5418	3897	3007	3014	3722	4147	3935	4149	50541
GB	1564	1656	1997	2108	1730	1670	1146	1069	1568	1786	1619	1525	19438
BGB	3372	2870	3237	3553	3517	2870	2338	2222	2747	2571	2683	3136	35116
B	629	564	628	497	542	477	394	322	383	417	497	596	6146
BKB	679	543	736	737	761	469	321	343	381	529	565	613	6677
KB	116	111	99	170	148	109	72	59	93	94	113	97	1281
KKB	606	506	630	611	754	909	917	656	559	474	567	558	7747

4.1.5 Atmosfer basıncı sıcaklık ve rüzgarlar

Havanın ağırlığı nedeniyle açık yüzeylere bir basınç uygular. Bu olgu atmosfer basıncı olarak bilinir. Yerden yükseklerle çıkıldıkça hava yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak basınç düşer. Söz konusu yoğunluk azalması hava sıcaklığıyla da ilişkilidir. Yani, hava ısındıkça yoğunluğu azaldığı için hava basıncı azalır, soğudukça yoğunluk artar ve

basınç yükselir. Niğde bölgesinde yıllık ortalama sıcaklık 13 °C, en yüksek sıcaklık Temmuz ayında ortalama 25 °C (Kopar, 2007).

Niğde meteoroloji istasyonuna ait verilere göre bölgede basıncın değişimi istikrarlı bir seyir göstermektedir. Niğde’de Ağustos ayından başlayarak yükselmeye başlayan basınç, Ekim ayında en yüksek ortalama durumu aldıktan sonra yeniden düşmekte ve Temmuz ayında en düşük değere ulaşmaktadır.

4.2 RETScreen ile Rüzgar Analizi

Bu çalışma, Niğde için 50 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızının 7 m/s’den biraz daha az olduğu dikkate alınarak; yükseklik 60 metre seçilerek devam edilmiştir. Rüzgâr veri yeri olarak Niğde’ye en yakın ve yaklaşık aynı şartlara sahip olan Ereğli, Aksaray, Kayseri gibi şehirler alınmıştır. NASA’nın Niğde’de veri istasyonu yoktur. Ölçüm yapılacak nokta uydu haritası üzerinden otomatik olarak işaretlenebilmektedir. Sistem çevredeki istasyonların verilerini kullanarak sonuçları vermektedir. RETScreen’in sunduğu, NASA tarafından belirlenmiş “10 m yüksekliğindeki rüzgar hızı” verileri Niğde için ortalama rüzgâr hızını 4,3 m/s iken Niğde Meteoroloji istasyonundan alınan verilerde bu hız değeri ortalama 3,5 m/s olmaktadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından hazırlanmış olan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) değerleri NASA verilerine daha yakındır.

Detaylı bir analiz için, analiz türü “Yöntem 2” seçilmiştir. “Yöntem 1” daha basit analiz imkanı verir. Çok detaylı analiz için “Yöntem 3” seçilmelidir. Şebeke tipi olarak “Merkezi Şebeke”, Isıl referans değeri olarak “Alt Isıl Değer (AID)” alınmıştır. Saha iklim referans değerleri Niğde ili seçilerek program veritabanından otomatik olarak alınmaktadır. Niğde ve çevresinde farklı ölçüm noktaları seçilerek veriler alınmıştır. Verilerde çok ciddi bir farklılık gözlenmemiştir. RETScreen’in sunduğu, NASA tarafından belirlenmiş “10 m yüksekliğindeki rüzgâr hızı” verileri program sayesinde seçilen göbek yüksekliğine göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. Bu program kullanılmayacak ise, ülkemiz için Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından hazırlanmış olan Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası’ndan yararlanmak daha doğrudur.

4.2.1 Enerji modeli

Enerji modeli sayfasında kullanılacak olan türbin tipi seçilir ve bu türbinden alınabilecek yıllık maksimum enerji miktarı hesaplanır. RETScreen 4'de entegre halde bulunan ürün veri tabanından çeşitli imalatçıların farklı türbin modelleri arasında bir seçim yapılabilir ve bu türbinin çeşitli özellikleri girilerek görülebilir.

Bu çalışmamızda karşılaştırma yapılabilmesi için 50,55,60,76 metre göbek yüksekliği bulunan, 800 kW gücündeki ENERCON-E48 rüzgar türbinleri tercih edilmiştir. Bu türbinlerin tercih edilmesinin temel nedeni Türkiye şartlarına, özellikle düşük rüzgar hızlı bölgelere en uygun olmasıdır. Türkiye’de RES yatırımlarının %30’a yakınında bu türbinler tercih edilmiştir. Özellikle 60 metre yüksekliğe sahip türbin daha çok kullanılmıştır (Enercon, 2013).

Seçilen türbinin özellikleri, güç ve enerji eğrisi verileri program tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur. Bir türbinin rüzgârdaki enerjiyi elektriğe dönüştürebilme oranına kapasite faktörü denir. Türbinin yıllık enerji üretim miktarının, türbin tarafından “nominal güçte” yılda üretilecek teorik enerji miktarına oranı olarak ifade edilebilir. Rüzgâr enerji santralleri için kapasite faktörü genellikle % 25 ile % 35 arasında değişmektedir (Kıncay, 2012). Niğde için özellikle 60 metre yükseklikten sonra kapasite faktörü bu aralıktadır.

4.2.2 Maliyet analizi

Programın maliyet analizi kısmında seçilebilecek iki yöntem mevcuttur. Birinci yöntem genel öngörüler için maliyetlerin başlıklar halinde girilmesine imkan tanırken; ikinci yöntem her başlığın altındaki farklı kalemlerin maliyetlerinin girilmesine imkan tanıyarak detaylı bir çalışma yapılmasını sağlar.

Bu çalışmada maliyet analizi Niğde’nin fiziki ve ekonomik şartlarına uygun olarak detaylı şekilde incelenmiştir. **Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.** ‘de detaylı maliyet analizi verilmiştir. Kullanılan türbin sayısı 5, her biri 800 kW, toplam 4 MW’tır. Türbin sayısı azaldığında birim maliyet 1 MW için en az %10 artmaktadır. Bu nedenle türbin sayısı fazla seçilmiştir (Kıncay, 2012).

Tablo 4.4. RETScreen yazılımından rüzgâr türbini seçimi.

Önerilen durum elektrik	sistemi			
Teknoloji	Rüzgar türbini			
Analiz türü	☐ ☐	Yöntem 1 Yöntem 2 Yöntem 3		
Rüzgar türbini				
Güç kapasitesi	kW	4.000,00		
İmalatçı	Enercon			
Model	ENERCON - 48 - 60M			5 birim
Kapasite faktörü	%	35,0%		
Sağlanan elektrik	MWh	12.264		
Şebekeye verilen elektrik	MWh	12.264		
Elektrik ihracat fiyatı	\$/MWh	70,00		

4.2.3 Ekonomik analiz

Programın ekonomik analiz kısmı beş bölümden oluşur. Bunlar: “Finansal Parametreler”, “Yıllık Gelir”, “Proje Maliyetleri Gelir Özeti”, “Finansal Sürdürülebilirlik” ve “Yıllık Nakit Akışı” bölümleridir. “Proje Maliyetleri ve Gelir Özeti” ile “Yıllık Gelir” bölümleri; enerji modeli, maliyet analizi ve emisyon analizi çalışma sayfalarının bir özeti niteliğindedir. “Finansal Sürdürülebilirlik”, bölümünde ise kullanıcının “Finansal Parametreler” bölümüne girmiş olduğu veriler kullanılarak projenin finansal göstergeleri elde edilir, Tablo 4.6. “Yıllık Nakit Akışı” bölümü kullanıcının vergi öncesi, sonrası ve toplam nakit akışını görüntülemesini sağlar. Bu çalışmada yatırımın %75 borç ile yapılacağı, santral ömrünün yaklaşık 25 yıl olduğu kabul edilmiş; Türkiye şartları için yıllık enflasyon oranı % 6, yıllık gelir vergisi oranı % 40, elektrik ihracat fiyatı eskalasyon oranı % 11 olarak alınmıştır (Hazine Bakanlığı, 2012).

Tablo 4.5. RETScreen yazılımıyla elde edilen maliyet analizi.

İlk maliyetler (krediler)	Birim	Miktar	Birim maliyet	Miktar	Nisbi maliyetler
Fizibilite etüdü					
Fizibilite etüdü	maliyet	1	\$ 80.000	\$ 80.000	
Ara Toplam:				\$ 80.000	1,3 %
Geliştirme					
Geliştirme	maliyet	1	\$ 80.000	\$ 80.000	
Ara Toplam:				\$ 80.000	1,3 %
Mühendislik					
Mühendislik	maliyet	1	\$ 160.000	\$ 160.000	
Ara Toplam:				\$ 160.000	2,6 %
Elektrik sistemi					
Rüzgar türbini	kW	4.000,00	\$ 1.190	\$ 4.760.000	
Yol yapımı	km	1	\$ 160.000	\$ 160.000	
İletim hattı	km	2	\$ 160.000	\$ 320.000	
Trafo Merkezi	proje			\$ -	
Enerji verimliliği önlemleri	proje			\$ -	
Kullanıcı tanımlı	maliyet	1	\$ 100.000	\$ 100.000	
				\$ -	
Ara Toplam:				\$ 5.340.000	86,2 %
Sistem dengesi ve diğer					
Yedek parçalar	%	1,0%	\$ 152.500	\$ 1.525	
Nakliye	proje	1	\$ 125.000	\$ 125.000	
Eğitim ve işletmeye alma	p-g	1	\$ 115.000	\$ 115.000	
Kullanıcı tanımlı	maliyet			\$ -	
Öngörülmemen giderler	%	5,0%	\$ 5.901.525	\$ 295.076	
İnşaat dönemi faizi		12 ay	\$ 6.196.601	\$ -	
Ara Toplam:				\$ 536.601	8,7 %
Toplam ilk maliyetler				\$ 6.196.601	100,0 %

Tablo 4.6. RETScreen yazılımıyla elde edilen finansal parametreler.

Finansal parametreler			
Genel			
	Yakıt maliyeti eskalasyon oranı	%	7,5%
	Enflasyon oranı	%	6,0%
	İskonto oranı	%	15,0%
	Proje ömrü	yıl	25
Finansman			
	Tesvikler ve hibeler	\$	1.488.326
	Borç oranı	%	75,0%
	Borç	\$	4.647.451
	Öz varlık	\$	1.549.150
	Borç faiz oranı	%	25,00%
	Borç vadesi	yıl	12
	Borç ödemeleri	\$/yıl	1.247.597
Gelir vergisi analizi			
	Geçerli gelir vergisi oranı	%	40,0%

BÖLÜM V

BULGULAR VE TARTIŞMA

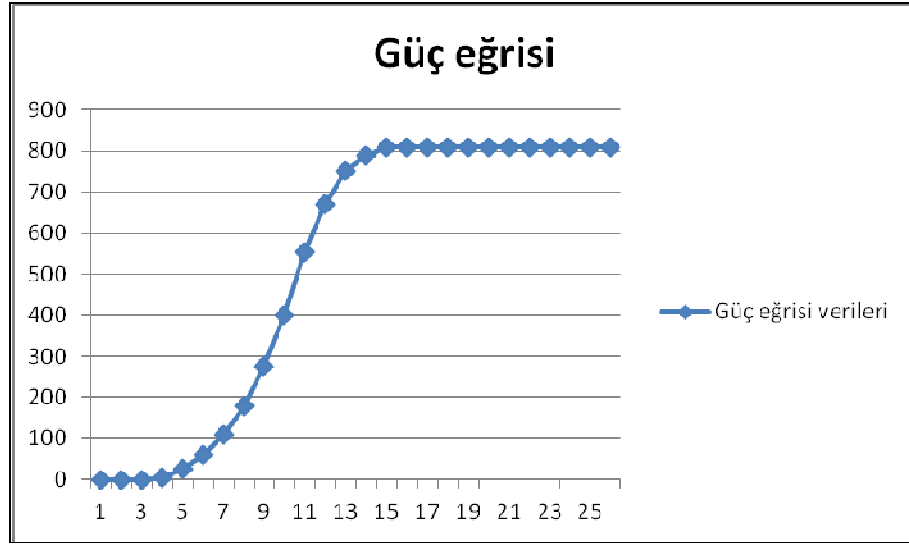
RETScreen yazılımı ile türbin konumu belirlenerek ve veri yeri Niğde seçilerek Tablo 5.1.'deki meteorolojik verilere ulaşılmıştır. Bütün parametreler girildikten sonra rüzgar analizi yapıldı. Analiz sırasında istenilen yükseklik ve türbin markası seçildi. Seçilen marka ve yüksekliğe göre elde edilen sonuçlar da değiştiği gözlemlendi. Tablo 5.1. Tablo 5.2.'de değerler verilmiştir.

Tablo 5.1. RETScreen yazılımı ile elde edilen Niğde meteoroloji verileri.

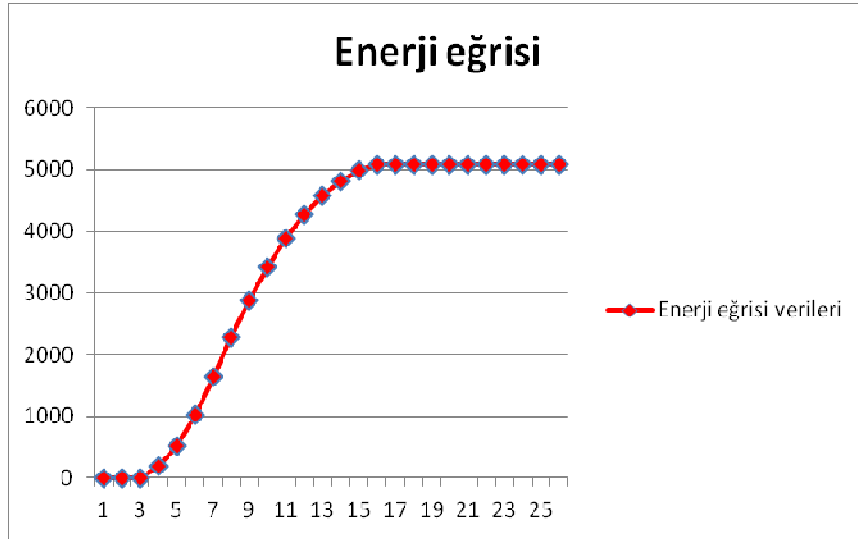
Ay	Hava sıcaklığı	Bağıl nem	Günlük güneş radyasyonu - yatay	Atmosferik basınç	Rüzgar hızı	Yer sıcaklığı	Isıtma derece-gün	Soğutma derece-gün
	°C	%	kWh/M²/gün	kPa	m/s	°C	°C-gün	°C-gün
Ocak	1,6	79,9%	2,07	90,4	4,5	1,7	510	0
Şubat	2,2	75,7%	2,82	90,2	5,4	2,6	444	0
Mart	5,9	67,1%	3,94	90,1	5,0	7,3	374	0
Nisan	11,7	58,4%	4,95	90,1	4,5	14,3	190	50
Mayıs	16,9	51,6%	5,98	90,1	4,1	20,3	36	212
Haziran	21,3	44,3%	7,22	90,0	3,9	25,5	0	338
Temmuz	24,9	36,8%	7,47	89,8	4,0	29,7	0	462
Ağustos	24,5	39,1%	6,50	89,9	3,9	28,6	0	448
Eylül	20,7	41,3%	5,19	90,2	3,5	23,9	0	321
Ekim	14,9	53,3%	3,66	90,5	4,5	16,7	95	153
Kasım	7,7	69,6%	2,41	90,5	4,0	8,2	308	0
Aralık	2,9	79,4%	1,75	90,5	4,4	3,0	468	0
Yıllık	13,0	57,9%	4,51	90,2	4,3	15,2	2.425	1.984

Tablo 5.2. Niğde için seçilen türbine göre güç eğrisi ve enerji eğrisi verileri.

Rüzgar hızı	Güç eğrisi verileri	Enerji eğrisi verileri
m/s	kW	MWh
0	0,0	0,0
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	5,0	193,3
4	25,0	524,1
5	60,0	1.030,3
6	110,0	1.644,9
7	180,0	2.282,5
8	275,0	2.884,1
9	400,0	3.421,2
10	555,0	3.884,2
11	671,0	4.271,2
12	750,0	4.583,0
13	790,0	4.821,3
14	810,0	4.989,4
15	810,0	5.092,9
16	810,0	
17	810,0	
18	810,0	
19	810,0	
20	810,0	
21	810,0	
22	810,0	
23	810,0	
24	810,0	
25 - 30	810,0	



Şekil 5.1. RETScreen yazılımından elde edilen güç eğrisi.



Şekil 5.2. RETScreen yazılımından elde edilen enerji eğrisi

Tablo 5.3. RETScreen yazılımıyla elde edilen proje yıllık gelirleri

Yıllık gelir			
Elektrik ihracat geliri			
	Şebekeye verilen elektrik	MWh	12.264
	Elektrik ihracat fiyatı	\$/MWh	70,00
	Elektrik ihracat geliri	\$	858.480
	Elektrik ihracatı eskalasyon oranı	%	11,0%
Seragazı azaltma geliri			
	Net seragazı azaltımı	tCO2/yıl	5.163
	Net seragazı azaltımı - 25 yıl	tCO2	129.079
	Seragazı azaltma kredi oranı	\$/tCO2	0,70
	Seragazı azaltma geliri	\$	3.614
	Seragazı azaltma kredi süresi	yıl	10
	Net seragazı azaltımı - 10 yıl	tCO2	51.631
	Seragazı azaltma kredi eskalasyon oranı	%	7,5%
Müşteri primi geliri (indirim)			
	Elektrik primi (indirim)	%	5,0%
	Elektrik primi geliri (indirim)	\$	0

Tablo 5.4. RETScreen yazılımıyla elde edilen diğer gelirler ve maliyetler

Diğer gelirler (maliyet)			
	Enerji	MWh	4.000
	Fiyat	\$/MWh	70,000
	Diğer gelirler (maliyet)	\$	280.000
	Süre	yıl	25
	Eskalasyon oranı	%	10,0%
Temiz Enerji (TE) üretim geliri			
	TE üretimi	MWh	12.264
	TE üretim kredi oranı	\$/kWh	0,073
	TE üretim geliri	\$	895.272
	TE üretim kredi süresi	yıl	10
	TE üretim kredi eskalasyon oranı	%	11,0%
	Yakıt türü	Sağlanan Enerji (MWh)	Temiz enerji
1	Rüzgar	12.264	Evet

Tablo 5.5. RETScreen yazılımıyla elde edilen proje maliyetleri ve tasarrufları

Proje maliyetleri ve tasarruf/gelir özeti			
İlk maliyetler			
Fizibilite etüdü	1,3%	\$	80.000
Geliştirme	1,3%	\$	80.000
Mühendislik	2,6%	\$	160.000
Elektrik sistemi	86,2%	\$	5.340.000
Sistem dengesi ve diğer	8,7%	\$	536.601
Toplam ilk maliyetler	100,0%	\$	6.196.601
Teşvikler ve hibeler		\$	1.488.326
Yıllık maliyetler ve borç ödemeleri			
İşletme ve bakım		\$	100.000
Yakıt maliyeti - önerilen durum		\$	0
Borç ödemeleri - 12 yıl		\$	1.247.597
Toplam yıllık maliyetler		\$	1.347.597
Dönemsel maliyetler (krediler)			
Yıllık tasarruflar ve gelir			
Yakıt maliyeti - baz durum		\$	0
Elektrik ihracat geliri - 25 yıl		\$	858.480
Sera gazı azaltma geliri - 10 yıl		\$	3.614
(indirim)		\$	0
Diğer gelirler (maliyet) - 25 yıl		\$	280.000
TE üretim geliri - 10 yıl		\$	895.272
Toplam yıllık tasarruflar ve gelir		\$	2.037.366

BÖLÜM VI

SONUÇ

Bir yatırım kendi maliyetini kısa bir sürede karşılayabiliyorsa ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu söylenebilir. Niğde İlinin fiziksel şartlarını dikkate alarak toplam 4 MW gücünde, 5 adet 800 kW'lık Enercon E-48 rüzgâr türbini seçilmiştir. Bu türbin Şekil 6.1.'de görülmektedir. Bu türbinler 50-55-60-76 metre farklı yüksekliğe ve 48 m rotor çapına sahiptir. Yaklaşık 1800 m² alan süpürür. Rüzgâr hızının düşük olduğu durumlarda Rotor çapı büyük önem arz etmektedir. Bu türbinlerin ömürleri 20-25 yıldır. Özellikle son yıllarda bakım masrafları artmaktadır. Bu türbinler rüzgar hızı ortalama 6-7 m/sn olan III.Sınıf bölgeleri için tasarlanmıştır. Bu nedenle Niğde İli için en uygun türbinler olduğunu söyleyebiliriz.

Bizim çalışmamız, bu konu ile ilgili önceden yapılan çalışmalardan yöntem olarak farklılık göstermektedir. Niğde bölgesi rüzgâr enerjisi potansiyeli istatistiksel olarak daha önce incelenmiştir. Rüzgâr verilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel yaklaşım olarak Weibull dağılımı fonksiyonu kullanılmıştır. Weibull dağılım fonksiyonu parametreleri moment metodu ve enerji eğilim faktörü yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak irdelenmiştir. Bu çalışmaya göre: genel olarak kış ve ilkbahar aylarının yüksek değerlerde güç yoğunluğuna sahip olduğu, yaz ve sonbahar aylarında rüzgârın düşük olduğu anlaşılmıştır (Yıldırım ve arkadaşları , 2009).

Analizler sonucunda Niğde İlinin merkezi için 50 m yükseklikte bulunan rüzgar hız değeri yaklaşık olarak 6-7 m/s olduğunu söyleyebiliriz ve ekonomik olması bakımından toplam 4 MW türbin seçilmiştir. Rüzgar enerjisi yatırımı için yaklaşık **6.200. 000 \$** harcama gerekmektedir. Böyle bir proje tamamlandığında yıllık kazanç yaklaşık **500.000 \$** olacaktır. Bunun anlamı bütün işletme giderleri de dikkate alındığında yaklaşık 4-5 yıl gibi kısa bir sürede, yapılan harcamalar tekrar geri kazanılmış olacaktır. Dolayısıyla santralin yaklaşık 20-25 yıllık ömründen geri kalan yıllarda üretim hep kazanca dönüşecektir.

Bütün bu veriler göz önüne alındığında özellikle 50m yükseklik ve daha yukarısı için uygun konum tespitinden sonra, gerekli hazırlık çalışmaları ve ölçümler yapılmak şartıyla, Niğde İlinin merkez bölgesinde rüzgar enerjisi yatırımlarının ekonomik olabileceğini söyleyebiliriz.

Teknoloji geliştikçe daha kaliteli ve daha uzun ömürlü türbinler üretilmektedir. Özellikle de maliyetlerin azalması, rekabet gücünün artması bu sektöre olumlu yansıyacak; yatırımlar daha cazip hale gelecektir.



Şekil 6.1. Enercon E48, 74 metre

KAYNAKLAR

- Adım C., “Rüzgar Enerjisi” Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Sayfa: 20-22, İzmir, 2009
- Ağçay M., “Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sayfa: 41-42, İstanbul, 2007
- Akbulut A., ve Dikici A. “Elazığ İlinin Rüzgar ve Güneş Enerjisi Potansiyeli” *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2004
- Altın V., “Yeni Ufuklara-Enerji”, Boğaziçi Üniversitesi, *Bilim ve Teknik Dergisi Eki*, Sayfa: 23, İstanbul, 2002
- Aslan N. ve Yamak T. “Türkiye’nin Enerji Sorununun Alternatif Enerji Kaynakları açısından değerlendirilmesi” *Marmara Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, Cilt XXI, Sayı 1, Sayfa:53, İstanbul, 2006
- Aslan Ö., “Hidrojen Ekonomisine Doğru”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* Yıl:6 Sayı:1, s.283-298, İstanbul, 2007
- Avcı B. ve Yılmaz T. B., “Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, *Yüksek Lisans Tezi*, İZMİR, 2012
- Bayraç H. N., “Küresel Rüzgar Enerjisi Politikaları ve Uygulamaları” *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Uludağ Journal of Economy and Society*, Cilt/Vol. XXX, Sayı/No.1, Sayfa: 37-57, Bursa, 2011
- Bozdoğan B., “Mimari Tasarım ve Ekoloji”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2003
- Boztepe M., “Rüzgardan Yakalanan Güç (Mekanik Güç)“, *Rüzgâr ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri*, Sayfa: 9-19 İzmir, 2009
- Deloitte, “Yenilenebilirler için yeni hayat Yenilenebilir enerji politikaları ve beklentiler”, Enerji ve doğal kaynaklar endüstrisi, Sayfa: 21, Ankara, 2011
- Demir M., “Rüzgâr Enerjisinin Tarihte İlk Kullanımı”
- Demirtaş M., “Avrupa ve Türkiye’deki Biyokütle Enerjisi”, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümü, Balıkesir, 2007

- DMİ, “Klimatoloji 2”, Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2009
- Durak M., “2009 Yılı Sonu İtibarı İle Dünya’da ve Ülkemizde Rüzgar Elektrik Santral (RES) Projelerinin Son Durumu “ Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara, 2009
- Ergür Ö., “Rüzgar Türbinleri İle elektrik Üretimi” Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2006
- GEKA, Güney Ege Kalkınma Ajansı, “Enerji Sektörü Raporu”, Sayfa:15-16 2012
- Guided Tour on Wind Energy, Danish Wind Industry Association, 2002
- Güler Ö., “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü , İstanbul, 2005
- Gülersoy T. ve Çetin N. S. “Menemen Bölgesinde Rüzgar Türbinleri için Rayleigh ve Weibull Dağılımlarının Kullanılması”, Ege Üniversitesi, *Politeknik Dergisi* Cilt:13 Sayı: 3 s. 209-213, İzmir, 2010
- Hocaoğlu F. O. ve Kurban M., “Rüzgar Gücünden Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Rüzgar Türbini Tasarımı”, *1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Notları*, s.124, Kocaeli, 2005
- İlkılıç C., “Rüzgar Enerjisi Kullanımı” Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim. Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları 4*, Elazığ, 2003
- İskender S., Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi, 2005
- Karabağ S., “Rüzgar Türbini Kanat İalatı”, *İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, 2011
- Karadağ Ç. ve arkadaşları, “Çevre Dostu ve Temiz, Yenilenebilir Enerji Kaynakları”, Ankara, 2009
- Karamanav M., “Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri”, Sakarya Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sayfa:1-8, Sakarya, 2007
- Kopar İ., “Hasan Dağı ve Yakın Çevresi’nin Fiziki Coğrafyası”, Gündüz Eğitim ve Yayınları, Ankara, 2007
- Malkoç Y., “Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Enerji Profilimizdeki Yeri” EİE İdaresi Genel Müdürlüğü Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara, 2007
- MDN Finans Danışmanlık, “Rüzgar Enerjisi Yatırımı Proje Fizibilitesi”

- MEB, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Önemi” Ankara, 2012
- Mehmetoğlu T., “Petrol ve Doğalgaz” ODTÜ Petrol ve Doğalgaz Müh. Böl., Ankara, 2002
- Nurbay N. ve Çınar A. “ Türkiye’de Rüzgar Enerjisi ve Teknik Eğitim Fakültelerindeki Yeri”, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Kocaeli, 2005
- Oreks Madencilik Ltd. Şti, ”Çinko-Kurşun Zenginleştirme Tesisi Çevresel Etki”
- Özgener Ö., “Türkiye’de ve dünyada rüzgar enerjisi kullanımı”, **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi** Cilt: 4 Sayı: 3, Sayfa:159-170, İzmir, 2002
- Öztürk N. Ve arkadaşları, “Hidrojen Enerjisi ve Türkiye’deki Hidrojen Potansiyeli” Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü, Ankara, 2005
- Petrol-İş, “Kaynak Savaşları ile Belirlenen Güncel ve Yapısal Eğilimler” Araştırma Servisi, 2011
- Resmi Gazete “Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliği” 22/02/2012 tarihli ve 28212 sayılı Resmî Gazete, 2012
- Sağlam M. ve Uyar T. S., “Türk suları için Dalga Enerjisi Örnek Proje Fizibilite Çalışması”, Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2004
- Servin F., “Türkiye’deki Jeotermal Alanlar ve Bu Alanlardaki Farklı Uygulamalara Bakış”, Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir, 1998
- Sülün M., “Rüzgar Enerjisi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, **Bitirme Projesi**, İzmir, 2007
- Şenpınar A. ve Gençoğlu M. T., “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri Açısından Karşılaştırılması”, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2006
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB), **Hidroelektrik Santralleri Raporu**, Sayfa: 56-75, Ankara, 2011
- Ünalın S., “Alternatif Enerji Kaynakları” **ders notları**, 2001
- Vardar A. ve Eker B., “Rüzgar Türbinlerinde Uygun Kanat Tipinin Değerlendirme Raporu” , Sayfa : 26-29 , Niğde, 2009
- WEC World Energy Council, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Sayfa:53-90, Ankara, 2012

WEC, World Energy Council, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Raporu,
Sayfa: 15-37, Ankara, 2011

WEC; Turkish National Committee, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi
Raporu, Ankara, 2011

Working with Wind Energy, Provided by Try Engineering

Yıldırım U., “ Niğde İli Rüzgar Enerjisi Potansiyeli “Akdeniz Üniversitesi, Makine
Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Antalya-2009

www.hazine.org.tr “ 2012 Yıllık enflasyon değerleri ”

www.tryengineering.org

www.windpower.org

repa.eie.gov.tr “Niğde REPA Haritaları”

http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_by_country

http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design

<http://web.deu.edu.tr/ansys/tezler/lisans/ruzgarturbini.pdf>

http://www.awea.org/rn_release_01-24-11.cfm,

[http://www.dmi.gov.tr/FILES/genel/sss/ruzgaratlası.pdf \)](http://www.dmi.gov.tr/FILES/genel/sss/ruzgaratlası.pdf)

http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html

http://www.emo.org.tr/ekler/58072be2820e868_ek.pdf

<http://www.enercon.de/> “Enercon E48 800 kWatt Türbin Verileri”

<http://www.melikedemir.com/ret.html>)

<http://www.mkubilisim.com/>

<http://www.mmo.org.tr/> “Hatay İlinde Rüzgar Enerji Santrali Fizibilite Analizi”

<http://www.retscreen.net> “Temiz Enerji Yazılımı”

<http://www.windpower.org/en/tour/wres/turb.htm>(2003)

<http://www.yildiz.edu.tr/~tanriov/>

http://www2.cedgm.gov.tr/cedsureci/inceleme_degerlendirme_sureci/119_ids.pdf

ÖZ GEÇMİŞ

Beytullah TAŞKIN 01.05.1968 tarihinde Aydın'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Aydın Çine'de, lise öğrenimini de Aydın Efeler Lisesi'nde tamamladı. 1992 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 1996 yılında mezun oldu. Bu tarihten beri Bursa, Kahramanmaraş, Gaziantep, Konya ve Niğde illerinde özel öğretim kurumlarında Fizik öğretmenliği yaptı. Halen Niğde'de özel bir öğretim kurumunda görev yapmaktadır. Bilim dalındaki ilgi alanı yarıiletkenler ve yenilenebilir enerjidir.