T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Akif TAŞKIN

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından FBY-11-3577 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Temmuz 2013
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Akif TAŞKIN

İmza :

"RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ" adlı Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Akif TAŞKIN

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. İbrahim UZMAY

Yrd. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR danışmanlığında Akif TAŞKIN tarafından hazırlanan "RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **yüksek lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

03 /07 / 2013

JÜRİ:

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

Üye : Prof. Dr. Saim KOÇAK

Üye : Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

ONAY:
Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 09/07/2013 tarih ve 2013/30-02 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

09 / 07 / 2013

Doç.Dr. Hasan YALÇIN
Enstitü Müdürü V.

ÖNSÖZ

Çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen ve bana "Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yaşam Döngü Analizi" konulu yüksek lisans tezini veren yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Nesrin Kayataş Demir'e teşekkür ederim.

Ayrıca, sadece yüksek lisans çalışmasında değil, her konuda değerli fikirleri ve yardımlarıyla yanımda olan ve tecrübelerinden faydalandığım değerli hocalarım Sn. Prof. Dr. Hüseyin Yapıcı'ya, Sn. Doç. Dr. Mustafa Serdar Genç'e, Sn. Doç. Dr. Gamze Genç'e, Sn. Yrd. Doç. Dr. Gülşah Özışık'a teşekkür ederim.

Gerek yüksek lisans çalışmamda gerekse arkadaşlıkları ile her zaman yanımda olan değerli dostlarım Arş. Gör. Halil Hakan Açıkel'e, Arş. Gör. Mehmet Fatih Kaya'a, Arş. Gör. Muhammet Çelik'e, Arş. Gör. Selçuk Sarıkoç'a ve Proje Asistanı Gökhan Özkan'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında tüm bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na, maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: FBY-11-3577) içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimde kullandığım programla ilgili karşılaştığım her türlü zorlukta bana yardımlarını esirgemeyen Ahmet Ziyaettin Özbilen'e teşekkür ederim.

Beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan fedakar aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akif TAŞKIN

Kayseri,Temmuz 2013

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

Akif TAŞKIN
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2013
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

KISA ÖZET

Rüzgar, güneş, hidro, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları elektrik üretmek için temiz enerji olarak kabul edilmektedirler. Fakat bu yenilenebilir enerji kaynakları tamamen temiz enerji kaynakları olmayıp imalat, işletme ve geri dönüşüm gibi süreçlerde çevreyi olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Rüzgar türbinleri işletme süresince düşük çevresel etkilere sahiptirler fakat imalat, söküm ve geri dönüşüm gibi süreçlerde rüzgar türbinlerinin işletme safhasına göre önemli ölçüde çevresel etkileri bulunmaktadır.Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında son yıllarda en fazla gelişme gösteren ve yaygınlaşan enerji çeşididir. Bu çevresel etkileri diğer enerji üretim tekniklerinden kaynaklanan çevresel etkilerle karşılaştırmak ve malzeme seçimi sürecinde kullanmak üzere analiz etmek gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının tüm ömürleri boyunca çevresel etkilerini incelemek için yaşam döngü analizi metodu kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Kayseri ili Pınarbaşı ilçesinde kurulduğu varsayılan beş farklı kapasitede (330 kW, 500 kW, 810 kW, 2050 kW, 3020 kW) rüzgar türbininin farklı kule yüksekliklerindeki (50 m, 80 m, 100 m) çevresel etkileri yaşam döngü analizi metodu kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle Pınarbaşı bölgesinin 2000 ile 2011 yılları arasında ölçülen rüzgar hız verileri derlenerek rüzgar potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen rüzgar potansiyeline uygun rüzgar türbinleri seçilmiştir. Seçilen rüzgar türbinlerinin güç eğrileri kullanılarak her bir türbinden bir yılda üretilebilecek enerji hesaplanmış ve türbinlerin kapasite faktörleri belirlenmiştir.

Seçilen rüzgar türbinleri çevresel etkiler, malzeme girdileri, tüketilen enerji ve enerji geri kazanım süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Türbin ömürleri 20 yıl olarak öngörülmüş, fonksiyonel birim olarak şebekeye dağıtılan 1kWh elektrik enerjisi

seçilmiştir. GaBi4 yaşam döngü analizi programı ile modellenmiş, sistem sınırları hammadde elde edilmesi, bu hammaddelerin işlenmesi, türbin bileşenlerinin imalatı, nakliye, türbin montajı, işletme ve bakım, türbin söküm ve geri dönüşümünü içerecek şekilde belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu enerji geri dönüşüm sürelerinin seçilen türbinler için 14.6 ile 35.6 ay arasında değiştiği ve en düşük enerji geri dönüşüm süresinin 2050 kW kapasiteli türbinde 100 m kule yüksekliğinde olduğu bulunmuştur. Aynı şekilde en düşük küresel ısınma potansiyeli 1.63E-02 kgCO_2-eşdeğer/kWh ile aynı türbinden elde edilmiştir. Rüzgar türbininin bileşenlerinden rüzgar türbininin temeli küresel ısınma potansiyeli, enerji girdileri ve malzeme girdileri açısından en fazla paya sahip türbin bileşenidir. Ele alınan tüm türbinler arasında 2050 kW kapasiteli 100 m kule yüksekliğine sahip türbin çevresel etkiler ve enerji parametreleri açısından Pınarbaşı'na kurulabilecek en uygun türbin olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yaşam döngü analizi; yenilenebilir enerji; rüzgar türbini; küresel ısınma potansiyeli.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ELECTRICITY GENERATION BY WIND ENERGY

Akif TAŞKIN
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, July 2013
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

ABSTRACT

Renewable energy sources such as wind, sun, hydropower, geothermal etc. are accepted as clean energy sources. But in fact they are not totally clean energy sources to produce electricity. During manufacturing, utilization and recycling stages, these renewable energy sources have some effects on the environment. Among the production electricity from renewable energy sources, electricity production from wind energy has been developing since the last decade. Wind turbines have lower environmental impacts throughout utilization stage but during manufacturing, decommissioning and recycling stages, they produce emissions at significant levels compared to the utilization stage. These environmental effects must be analyzed to use for comparison with other electricity production methods and material selection processes. In order to analyze the environmental impacts of renewable energy systems during their lifetime, life cycle assessment (LCA) methodology is used.

In this thesis, environmental effects of 5 different rated power (330 kW, 500 kW, 810 kW, 2050 kW, 3020 kW) wind turbines, which were assumed to be installed in Pınarbaşı-Kayseri, with the hub heights of 50 m, 80 m and 100 m were compared by using life cycle assessment methodology. Primarily, by compiling wind speed data, which were measured between the years of 2000 and 2011, wind potential of the region was determined. Then acceptable wind turbines were selected according to the wind potential of Pınarbaşı. By using power curves of selected wind turbines annual electricity production and capacity factors of each turbine were determined.

Selected wind turbines were compared by means of environmental impacts, input material quantities, embodied energies and energy payback times. Lifespan of the wind turbines was assumed as 20 years and functional unit was selected as 1kWh electricity

delivered to the grid. Manufacturing of wind turbine components, utilization of wind turbines, decommissioning and recycling steps were considered for this study. GaBi4 life cycle assessment software tool was used for the analysis. Results showed that energy payback times vary from 14.6 to 35.6 months for the selected wind turbines. Minimum energy payback time and minimum global warming potential were found as 14.6 month and 1.63E-02 kgCO_2-Equiv/kWh at the wind turbine with rated power of 2050 kW at 100 m hub height, respectively. Among the components of the wind turbine, foundation has the largest share of contribution to the global warming potential with the 37%. All the results of this life cycle assessment showed that the wind turbine with rated power of 2050 kW at 100 m hub height is the acceptable wind turbine to install in Pınarbaşı-Kayseri among the selected wind turbines according to the energy and environmental aspects and energy payback time.

Keywords: Life cycle assessment; renewable energy; wind turbine; global warming potential.

İÇİNDEKİLER

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

Sayfa
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI iii
KABUL VE ONAY SAYFASI iv
ÖNSÖZ v
ÖZET vi
ABSTRACT viii
İÇİNDEKİLER x
KISALTMALAR VE SİMGELER xiv
TABLOLAR LİSTESİ xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ xviii

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİ

1.1. Rüzgar Oluşumu 3

1.2. Rüzgar Hızının Ölçülmesi 3

1.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi 8

1.4. Rüzgar Türbinleri 9

1.4.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri 11

1.4.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri 11

1.4.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri 12

1.5. Türkiye ve Dünyada Rüzgar Enerjisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar 12

2.BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ

2.1. Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin Dünyadaki Durumu 16

2.2. Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin Türkiyedeki Durumu 16

2.3. Rüzgar Gücü Hesabı 18

2.4. Kapasite Faktörü 19

2.5. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi Hesabı 20

2.6. Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Türbininden Üretilebilecek Enerji 21

3. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

3.1. Yaşam Döngü Analizi 23

3.2. Yaşam Döngü Analizi Safhaları 24

3.2.1. Amaç ve Kapsam Tanımı 24

3.2.2. Envanter Analizi 25

3.2.3. Etki Değerlendirmesi 26

3.2.4. Yorum 26

3.3. Yaşam Döngü Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları 27

3.4. Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar 28

3.5. Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimine Dayalı Sistemlerinin Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar 30

4. BÖLÜM

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİ İÇİN RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

4.1. Giriş 39

4.2. Pınarbaşı'nın Yeri ve İklim Yapısı 39

4.3. Pınarbaşı İlçesinin Rüzgar Potansiyeli 40

4.4. Seçilen Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilebilecek Enerji 41

4.5. Kayseri İli Pınarbaşı İlçesi İçin Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yaşam Döngü Analizi 42

4.5.1. Amaç ve Kapsam 42

4.5.2. Envanter Analizi 47

4.5.3. Etki Değerlendirmesi 49

5. BÖLÜM

BULGULAR

5.1. Pınarbaşı Bölgesinin Rüzgar Potansiyeli İle İlgili Bulgular..... 52

5.2. Ele Alınan Türbinlerden Üretilebilecek Enerji İle İlgili Bulgular 53

5.3. Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Bulgular..... 54

5.3.1. Enerji İle İlgili Bulgular 54

5.3.2. Çevresel Etkiler İle İlgili Bulgular..... 55

6.BÖLÜM

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Değerlendirme 64

REFERANSLAR..... 66

ÖZGEÇMİŞ..... 73

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı	Birimi
v	Rüzgar Hızı	(m/s)
k	Boyutsuz Weibull Şekil Parametresi	--
c	Weibull ölçek Parametresi	--
$\bar{v}$	Ortalama Rüzgar Hızı	(m/s)
v_o	Ölçüm Yapılan Yükseklikteki Rüzgar Hızı	(m/s)
P_{toplam}	Toplam Rüzgar Gücü	(W)
E_{wt}	Rüzgar Türbininden Üretilebilecek Toplam Güç	(kWh)
$\dot{m}$	Havanın Kütlesel Debisi	(kg/s)
V_r	RüzgarHızı	(m/s)
ρ	Havanın Yoğunluğu	(kg/m^3)
A	Alan	m^2
C_p	Güç Faktörü	--
C_f	Kapasite Faktörü	--
P_n	RüzgarTürbininin Nominal Gücü	(W)
E_p	Türbinden Yıllık Üretilen Enerji Miktarı	(kWh/yıl)
z_s	Yüzey Pürüzlülük Katsayısı	--
z	Rüzgar Hızının Hesaplanacağı Yükseklik	(m)
z_o	Rüzgar Hızı Ölçümünün Yapıldığı Yükseklik	(m)
YDA	Yaşam Döngü Analizi	--
AP	Asitleşme Potansiyeli	$kgSO_2$-eşdeğer
EP	Ötrofikasyon Potansiyeli	kgFosfat-eşdeğer
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli	$kgCO_2$-eşdeğer
FAETP	Temiz Suda Yaşayan Canlıların Zehirlenme Potansiyeli	kgDCB-eşdeğer
HTP	İnsan Zehirlenmesi Potansiyeli	kgDCB-eşdeğer

POCP	Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli	kgEtilen-eşdeğer
TETP	Karada Yaşayan Canlıların Zehirlenme Potansiyeli	kgDCB-eşdeğer

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Dünyadaki Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin 1996-2012 Yılları Arasında Kurulu Güç Kapasitesi.....15

Tablo 2.2. Türkiye'deki Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin 1998-2012 Yılları Arasında Kurulu Güç Kapasitesi[2].....16

Tablo 2.3. Farklı Yeryüzü Şekilleri İçin Yüzey Pürüzlülük Katsayısı Değerleri.....18

Tablo 3.1. Yaşam Döngü Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları.....25

Tablo 4.1. Seçilen Türbinlerin Karakteristik Özellikleri.....40

Tablo 4.2. 330 kW, 500 kW ve 810 kW Kapasiteli Rüzgar Türbinlerinde Yüzde Olarak Malzeme Girdileri.....46

Tablo 4.3. 2050 kW ve 3020 kW Kapasiteli Rüzgar Türbinlerine Yüzde Olarak Malzeme Girdileri. 47

Tablo 5.1. Seçilen Türbinlerden Üretilebilecek Elektrik enerjisi Miktarları.....51

Tablo 5.2. Enerji Geri Kazanım Süreleri.....52

Tablo 5.3. Türbin Bileşenlerinin Yüzde Olarak Enerji Girdileri.....53

Tablo 5.4. Rüzgar Türbinlerinin Çevresel Etki Kategorileri ve Bu Çevresel Etkilerinin Miktarları.....54

Tablo 5.5. Rüzgar Türbini Elemanlarının 50 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri 57

Tablo 5.6. Rüzgar Türbini Elemanlarının 80 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri 58

Tablo 5.7. Rüzgar Türbini Elemanlarının 100 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri.....59

Tablo 6.1. Üretilen Birim Elektrik Başına Atmosfere Salına CO_2 Miktarları 63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Rüzgar Ölçüm İstasyonu [3]. 3

Şekil 1.2. Kepçe (Cup) Anemometre [4] 4

Şekil 1.3. Pervaneli (Propeller) Anemometre [5] 5

Şekil 1.4. Ultrasonik Anemometre [7] 5

Şekil 1.5. Rüzgar Yön Ölçer [8] 6

Şekil 1.6. 12 kW Kapasiteli Bir Rüzgar Türbini [12]. 8

Şekil 1.7. Rüzgar Türbini Ana Elemanları[13]. 8

Şekil 1.8. Düşey Eksenli Rüzgar Türbini [14]. 9

Şekil 1.9. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini[15] 10

Şekil 2.1. 2050 kW Kapasiteli Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi. 19

Şekil 3.1. Yaşam Döngü Analizi Safhaları[37]. 22

Şekil 3.2. Yaşam Döngü Envanter Analizi Adımları[38]. 24

Şekil 3.3. Yorum Safhasının Diğer Safhalarla Olan İlişkisi[38].. 25

Şekil 4.1. Türkiye Rüzgar Atlası (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki açık yüzeyler için rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları) [73]. 38

Şekil 4.2. Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri. 39

Şekil 4.3. Rüzgar Türbini Sistem Sınırları. 41

Şekil 4.4. GaBi4 Yaşam Döngü Analizi Paket Programı İle Modellenen Genel Rüzgar Türbini Sistemi. 42

Şekil 4.5. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Temel Kısmı 43

Şekil 4.6. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Kule Kısmı 43

Şekil 4.7. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Nasel Kısmı.....44

Şekil 4.8. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Rotor Kısmı.....44

Şekil 4.6. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Rüzgar Türbini 45

Şekil 5.1. Pınarbaşı Bölgesi İçin 2000 ile 2011 Yılları Arasında 10 m, 50 m, 80 m ve 100 m Yükseklilerde Yıllık Ortalama Rüzgar Hızları.....50

Şekil 5.2. Küresel Isınma Potansiyelinin Türbin Kule Yüksekliğiyle Değişimi. 55

Şekil 5.3. Asitleşme Potansiyelinin Türbin Kule Yüksekliğiyle Değişimi. 56

Şekil 5.4. Türbin Kule Yüksekliğine Bağlı Olarak CO_2 Emisyonlarındaki Değişim.....60

Şekil 5.5. Üretilen Birim Elektrik Başına Atmosfere Salınan CO_2 Miktarları.....61

GİRİŞ

Günümüzde, artan enerji üretim maliyetleri ve talepleri, enerji güvenliği, yakın gelecekte fosil enerji kaynaklarının tükenebileceğinin tahmin edilmesi, küresel ısınma ve sera gazı emisyonları gibi problemlerden dolayı ülkeler bazı ekonomik, sosyal, çevresel önlemler almak ve politikalarını bu doğrultuda belirlemek zorunda kalmıştır. Elektrik enerjisi üretiminde, yenilemeyen enerji kaynakları olarak adlandırılan ve hidrokarbon içeren kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımı ile birlikte su, güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ve nükleer enerjinin entegre biçimde kullanılması bu önlemlerin başında yer almaktadır.

Dünya nüfusunun hızla artması kullanılabilir enerjiye olan talebin artmasına neden olmuş bu nedenle fosil yakıtlardan, enerjinin en kullanılabilir formu olan elektrik enerjisi üretilmeye başlanmıştır. Bu duruma bağlı olarak, yeniden oluşmaları için çok uzun süreler gereken fosil yakıtlar hızla tükenmeye başlamış ve kendini yenileyememiştir. Sonuç olarak, insanoğlu kendini yenileyemeyen bu enerji kaynaklarına alternatif olarak nükleer enerjiden ve yenilenebilir enerji kaynaklarından da elektrik üretimi yoluna girmiştir.

Yenilenebilir enerji ile elektrik üretim teknikleri arasında günümüzde en fazla gelişme gösteren teknik rüzgar enerjisi ile elektrik üretimidir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi rüzgar türbinleri aracılığıyla yapılmaktadır. Rüzgar türbinleri havanın kinetik enerjisini yapısında bulunan jeneratör yardımı ile elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yönteminin önemi arttıkça daha yüksek kapasiteli ve kompleks sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. 2002 yılında dünya genelinde kurulu güç kapasitesi 31,100 MW olan rüzgari santralleri 2012 yılının sonunda yaklaşık 282,408 MW kurulu güç kapasitesine erişmiştir [1]. Ülkemizdeki kurulu güç kapasitesi 2002 yılında 18.9 MW olan rüzgar santralleri

uygulanan teşvikler ve politikalar sonucu 2012 yılının sonunda 2312.15 MW kapasiteye ulaşmıştır [2].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi, temiz enerji olarak kabul edilse de çevreye hiç bir olumsuz etkisi olmayan tamamen temiz bir enerji değildir. Bu sistemlerden üretilen elektrik enerjisinin çevresel etkileri fosil yakıtlı elektrik üretim sistemlerinden üretilen elektrik enerjisine göre daha azdır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin gelişmesi ve yaygınlaşması ile bu sistemlerin de çevresel etkilerinin incelenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, yenilenebilir enerji sistemlerinin tüm ömürleri boyunca meydana getirdiği çevresel etkileri incelemek ve diğer enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri ile karşılaştırmak için yaşam döngü analizi (YDA) metodu kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, Kayseri iline bağlı Pınarbaşı ilçesinde kurulduğu varsayılan rüzgar türbini sistemleri için YDA yapılmıştır. Bu amaçla, 330 kW, 500 kW ve 810 kW kapasiteli 3 adet orta ölçekli, 2050 kW ve 3020 kW kapasiteli 2 adet büyük ölçekli rüzgar türbini seçilmiş, seçilen bu türbinlerden üretilebilecek elektrik enerjisini hesaplamak için bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. Ele alınan sistemler GaBi4 yaşam döngü analizi paket programı ile modellenmiş, bu sistemlerin çevresel etkileri hesaplanmış ve hesaplanan değerler diğer elektrik üretim sistemlerinin çevresel etkileri ile karşılaştırılmıştır.

1. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİ

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

Yenilenebilir enerji sistemleri arasında rüzgar enerjisinin çevresel etkileri, yatırım maliyetleri ve enerji üretim verimliliği gibi avantajlarından dolayı gelişimi çok hızlı olmuştur. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi rüzgar türbinleri aracılığıyla yapılmaktadır. Günümüzde, düşük kapasiteli ev tipi rüzgar türbinlerinden 8 MW kapasiteye kadar birçok sistem geliştirilmiş, birden fazla rüzgar türbininden oluşan rüzgar tarlaları kurulmuştur. Ayrıca, denizlerin rüzgar potansiyellerinin karaya oranla daha uygun olmasından dolayı denizlerde de rüzgar türbinleri kurulmaya başlanmıştır. Rüzgar türbinlerinden üretilebilecek elektrik öncelikli olarak türbin özelliklerine, kurulduğu bölgenin coğrafi özelliklerine ve rüzgar potansiyeline bağlıdır.

1.1. Rüzgar Oluşumu

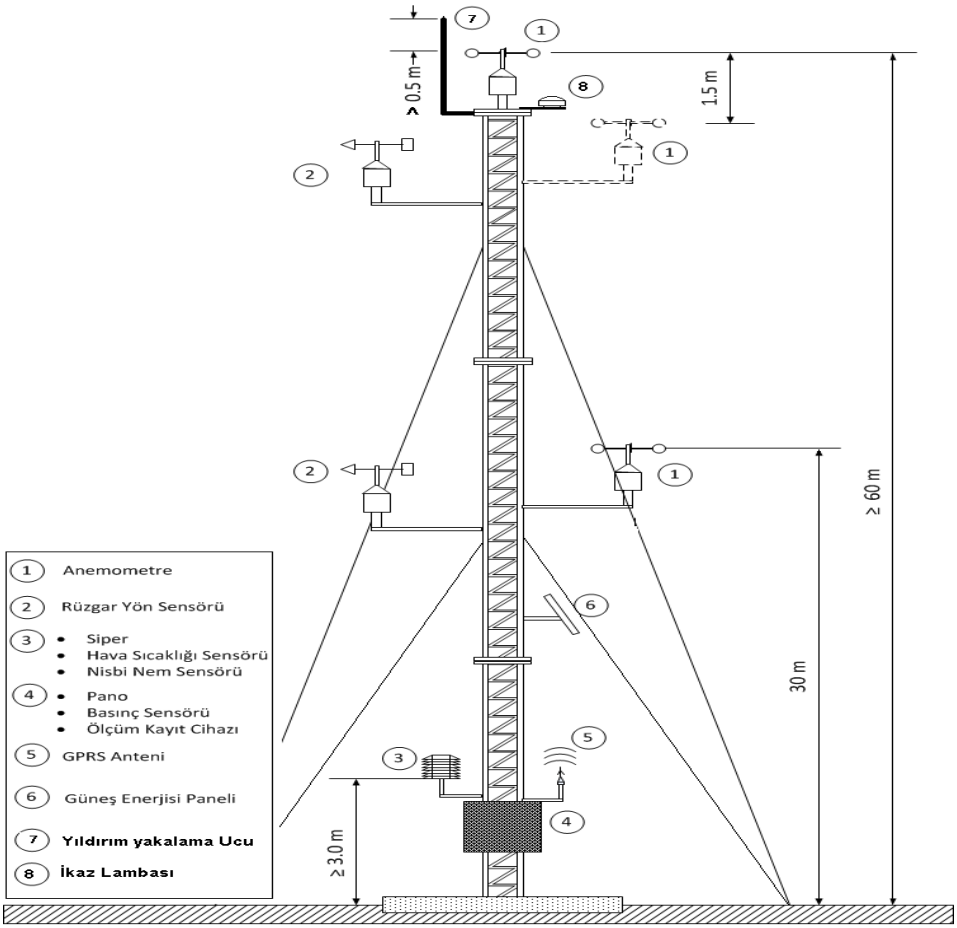
Rüzgar, en basit şekliyle hava moleküllerinin hareketi olarak tanımlanabilir. Hava moleküllerinin bu hareketi yeryüzündeki yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru olmaktadır. Hava basıncı yeryüzü boyunca sabit bir değere sahip değildir. Atmosferdeki basınç değişimleri farklı bölgelerdeki yükseklik ve sıcaklık farkı sebebiyle oluşan farklı hava yoğunluklarından dolayı meydana gelmektedir. Bir bölgede ısınan hava molekülleri havanın yükselmesine neden olmakta yükselen hava moleküllerinin birim hacimdeki miktarı azalmakta ve yoğunluğu düşmektedir. Aynı şekilde sıcaklığı düşen hava moleküllerinin yoğunluğu artmakta ve bulunduğu yerden daha alçağa hareket etmektedir. Hava moleküllerinin bu yer değiştirmeleri yeryüzünde yüksek basınç ve alçak basınç bölgelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek basınç alanları, atmosferik basıncı 1013 milibar ve üstü olan, alçalıcı hava hareketleri gösteren bölgelerdir. Bu bölgelerde alçalan hava yeryüzüne çarpar ve yatay bir şekilde dağılır. Yüksek basınç alanlarında hava Kuzey Yarımküre'de saat yönünde, Güney Yarımküre'de ise saat yönünün tersinde hareket etmektedir. Alçak basınç alanları, atmosferik basıncı 1013 milibar altı olan ve yükselici hava hareketleri gösteren belgelerdir. Alçak basınç alanlarında hava Kuzey Yarımküre'de saat yönünün tersi yönde Güney Yarımküre'de ise saat yönünde hareket etmektedir.

Rüzgar oluşumu sıcaklıkları, yoğunlukları ve yükseklikleri farklı olan hava kütlelerinin yer değiştirmeleri sonucu meydana gelmektedir. Rüzgarı oluşturan etmenlere bağlı olarak oluşan rüzgarın hızı da değişmektedir. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu bölgedeki rüzgar hızı, rüzgar türbini tarafından üretilen enerjiyi doğrudan etkilemektir. Rüzgar türbini sisteminin kurulacağı bölgedeki rüzgar karakteristiğinin doğru belirlenmesi o bölgede kurulacak sistemin doğru tasarlanması açısından oldukça önemlidir.

1.2. Rüzgar Hızının Ölçülmesi

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

Ülkemizde rüzgar ölçümleri Orman ve Su İşleri Bakanlığına bağlı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi kurmak isteyen firmalar, üniversiteler ve tüzel kişiler tarafından yapılabilmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretim tesisi kurmak ve lisans almak isteyen tüzel kişiler tesisin kurulacağı bölgede ölçüm istasyonu kurmak ve en az bir yıl süreyle ölçüm yapmak, ölçüm yapılmak istenen bölgenin rüzgar hızını, rüzgar yönünü, sıcaklığını, basıncını ve bağıl nemini ölçebilecek aygıtlar bulundurmak zorundadır. Kurulan ölçüm istasyonunda ölçüm direği yüksekliği en az 60 m olacak şekilde ölçümler 30 m ve ölçüm direğinin en üst seviyesinde olmak üzere minimum 2 adet yükseklikte yapılmalı ve yapılan ölçümler sonucu elde edilen rüzgar dataları Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne iletilmelidir. Şekil 1.1'de örnek bir rüzgar ölçüm istasyonu gösterilmiştir [3].



Şekil 1.1. Rüzgar Ölçüm İstasyonu [3]

Bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için gerekli olan en önemli parametre rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı anemometre denilen aygıt ile ölçülmektedir. Rüzgar hız ölçümleri genellikle kepçeli anemometreler ile yapılmaktadır. Kepçeli anemometreler Şekil 1.2'de gösterildiği gibi genellikle metal üç adet kepçeden oluşmaktadır. Bu kepçelere çarpan rüzgar kepçelerin bağlı olduğu şaftı döndürür. Rüzgar hızının değişimi ile şaftta oluşan birim zamandaki dönme miktarına bağlı olarak rüzgar hızı belirlenir. Kepçeli anemometrelerde kepçeler farklı yönlere baktığı için rüzgar yönü ölçülen rüzgar hızını değiştirmemektedir.

Şekil 1.2. Kepçe Anemometre [4]

Kepçeli anemometreler dışında rüzgar hızı pervaneli ve ultrasonik anemometreler ile de ölçülebilir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi pervaneli anemometrelerde kepçeli anemometrelerden farklı olarak rüzgar pervanelere çarparak şaftı döndürür. Bu anemometrelerde yatay ve dikey yönde esen rüzgar hızları ölçülebilmektedir.

Şekil 1.3. Pervaneli Anemometre [5]

Ultrasonik anemometreler Şekil 1.4'te gösterildiği gibi ses dalgalarını dikey bir sabit yön boyunca iletebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ses dalgaları anemometrenin farklı uçları tarafından algılanıp bir mikro işlemcide işlenmekte ve rüzgar hızı ölçülmektedir. Bu anemometrelerin diğer anemometrelere göre avantajları hareketli parçalarının olmaması ve ani rüzgar değişimlerine tepkilerinin daha hızlı olmasıdır [6].

Şekil 1.4. Ultrasonik Anemometre [7]

Bir bölgedeki rüzgar potansiyelini belirlemek için rüzgar hızının yanında rüzgar yönünü de belirlemek gereklidir. Rüzgar ölçüm istasyonlarında bulunan rüzgar yön ölçer cihazlar vasıtasıyla hakim rüzgar yönü ve yönlere göre esme sayısı belirlenmelidir. Rüzgar yön ölçerler rüzgar ölçüm istasyonlarında anemometrenin etkilenmemesi için anemometreden 1.5 ile 2.0 m aşağıya kurulmalıdır [3]. Örnek bir rüzgar ölçer Şekil 1.5'te gösterilmiştir.

Şekil 1.5. Rüzgar Yön Ölçer [8]

1.3. Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesi

Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi için rüzgar santralleri kurulmadan önce kurulumun yapılacağı bölgenin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgar potansiyeli belirlendikten sonra o bölgeye kurulacak uygun rüzgar türbinleri seçilebilmektedir. Rüzgar potansiyelinin belirlenmesi için sistemin kurulacağı bölgenin hız dağılımın belirlenmesi gerekmektedir. Bir bölgenin rüzgar hız dağılımının belirlenmesi için günümüzde en sık kullanılan yöntemler Weibull ve Rayleigh dağılımı yöntemleridir.

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

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

Burada;

v: rüzgar hızı

k: boyutsuz Weibull şekil parametresi

c: Weibull ölçek parametresi

şeklinde tanımlanmıştır [9].

Rüzgar hız dağılımının belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem Rayleigh hız dağılımı yöntemidir. Bu yöntem Weibull dağılım fonksiyonunun özel bir durumu olup k boyutsuz Weibull şekil parametresinin değeri 2 olarak kabul edilmektedir. Rayleigh dağılım fonksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir [10]:

$$f_r(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^{2}\right] \tag{1.2}$$

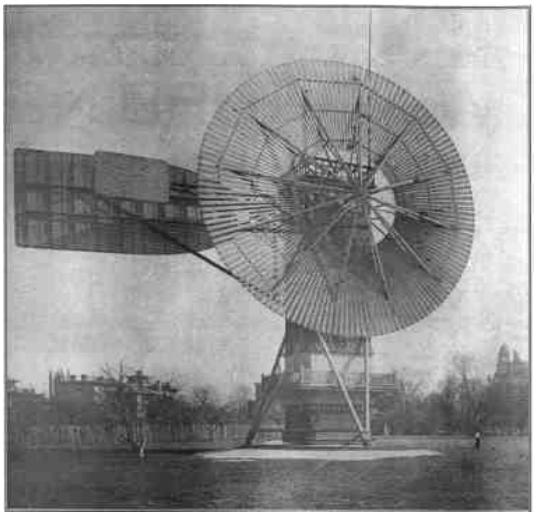
Burada;

$\bar{v}$: ortalama rüzgar hızı

şeklinde tanımlanmıştır.

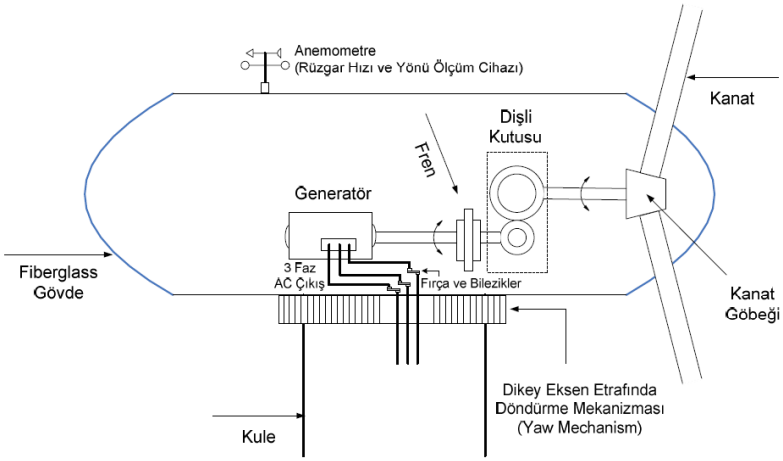
1.4. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, havada bulunan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgar türbinleri çok eski çağlarda mekanik güç üretmek için kullanılan yel değirmenleri olarak ortaya çıkmışlardır. Bilinen ilk yel değirmeninin 1180 yılında Fransa'nın kuzeyinde kullanıldığı sanılmaktadır. Yel değirmenlerinden elektrik üretimi için Prof. James Blyth tarafından 1887 yılında İskoçya'da bir sistem kurulmuş, Şekil 1.6'da gösterilen ve elektrik üreten ilk rüzgar türbini 1888 yılında Charles F Brush. tarafından Amerika'da kurulmuştur. Bu tarihlerde temelleri atılan rüzgar türbini sistemleri, Almanya, Danimarka ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerin öncülüğünde günümüze kadar gelişimlerini hızlı bir biçimde devam ettirmişlerdir [11].



Şekil 1.6. 12 kW Kapasiteli Bir Rüzgar Türbini [12]

Modern rüzgar türbinleri genel olarak temel, kule, nasel, göbek, kanatlar, dişli kutusu ve jeneratör gibi ana elemanlardan meydana gelmektedir. Şekil 1.7'de bir rüzgar türbininin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Rüzgar Türbini Ana Elemanları [13]

Rüzgar türbinleri, kanat sayılarına göre tek kanatlı, iki kanatlı ve üç kanatlı olarak, kanatlarına rüzgarı alma durumlarına göre önden rüzgar alan ve arkadan rüzgar alan, eksenlerine göre düşey eksenli, yatay eksenli ve eğik eksenli rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılmışlardır.

1.4.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Şekil 1.8'de gösterildiği gibi düşey eksenli rüzgar türbinlerinin kanatları dikey bir şafta bağlanmıştır. Bu tip türbinler ilk defa G.J.M. Darrieus tarafından geliştirilip patenti alındığı için Darrieus türbini olarak da adlandırılmaktadırlar. Düşey eksenli rüzgar türbinleri kanatları düşey bir şaft etrafında döndüğü için rüzgarı her yönden alabilirler ve bu sebeple rüzgar yönüne dönmelerine ihtiyaç yoktur. Ayrıca mekanik ve elektronik bileşenlerinin birçoğu yerde olduğu için bu tip türbinlerin kurulumları ve bakımları yatay eksenli türbinlere göre daha kolay ve az maliyetlidir. Düşey eksenli türbinlerinin kanatları yere yakın olduğu için düşük rüzgar hızlarına maruz kalmaktadırlar bu sebeple verimleri yatay eksenli türbinlerine oranla daha düşüktür. Kanat yüksekliğini arttırmak maliyetleri çok fazla arttıracağı için günümüzde elektrik üretiminde çok fazla tercih edilmemektedirler [14].

Şekil 1.8. Düşey Eksenli Rüzgar Türbini [14]

1.4.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin kanatları yatay bir şafta bağlıdır ve rüzgar yönüne dik olacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Bu tip türbinlerde elektromekanik parçalar kulenin üstünde bulunmaktadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin kanatlarının rüzgar yönüne

dönmeleri gerektiğinden bu tip türbinlerde döndürme mekanizması bulunmaktadır. Şekil 1.9'da yatay eksenli bir rüzgar türbini gösterilmiştir.

Şekil 1.9. Yatay Eksenli Rüzgar Türbini [15]

1.4.3. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Eğik eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri ile kanatları arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Bu tip türbinlerin kullanım alanları sınırlıdır.

1.5. Türkiye ve Dünyada Rüzgar Enerjisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Genç ve Gökçek [10] Kayseri ve Kayseri'nin bazı ilçelerinin rüzgar karakteristiği ve rüzgar enerjisi potansiyellerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 2000 ve 2006 yılları arasında 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızlarını kullanmışlar ve bu rüzgar hız verilerini Fortran bilgisayar programı ile derlemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, seçilen bölgeler arasında Pınarbaşı'nın en uygun rüzgar potansiyeline sahip olduğunu belirlemişlerdir. Pınarbaşı için yıllık ortalama hız 3.66 m/s, yıllık ortalama rüzgar yoğunluğu ölçülen değerler için 111.93, Weibull değerleri için 83.44 W/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Gökçek ve Genç [16] İç Anadolu'da bulunan Pınarbaşı, Niğde, Nevşehir, Tomarza, Kırıkkale, Kırşehir ve Develi bölgelerinin rüzgar karakteristiğini belirlemişler ve belirledikleri bu rüzgar değerlerini kullanarak farklı güçlerdeki rüzgar türbinleri için üretilen yıllık enerji miktarını ve enerji maliyetlerini belirlemişlerdir. Bu çalışmada Pınarbaşı için 150 kW/h kapasiteli rüzgar türbininin 30 m yükseklikte yıllık enerji üretimi 120.978 MWh ve maliyeti 30 $/kWh olarak hesaplanmıştır.

Özerdem ve Türkeli [17] İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü kampüs alanı için 16 ay boyunca ölçülen rüzgar değerlerini, WAsP ve WindPRO paket programlarını kullanarak derlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda bölgenin ortalama rüzgar hızını 8.14 m/s, 1500 kWh kapasiteli rüzgar türbininin yıllık enerji üretim miktarını ise 5,927 MWh olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü kampüs alanının rüzgar potansiyeli ve rüzgar enerjisinin ekonomik analizleri Özerdem vd. [18] tarafından yapılmıştır. 2000 ile 2003 yılları arasında ölçülen rüzgar hız değerleri WindPRO paket programı kullanılarak derlenmiş, ekonomik analizler RETScreen paket programı ile yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kurulu güç kapasitesi arttıkça kWh başına düşen maliyetlerin azaldığı görülmüştür.

Şahin vd. [19] güneydoğu Akdeniz bölgesinde bulunan Antakya, İskenderun, Karataş, Yumurtalık, Dörtyol ve Samandağ yörelerinin, 1992 ile 2001 yılları arasında ölçülen rüzgar hız değerlerini WASP paket programında derleyerek rüzgar potansiyellerini belirlemişlerdir. Seçilen bölgelerin çoğunda 25 m yükseklik için rüzgar potansiyelini 500 W/m^2 olarak hesaplanmışlar, Antakya, İskenderun ve Samandağ'ı rüzgar enerjisi potansiyeli en uygun bölgeler olarak belirlemişlerdir.

Uçar ve Balo [20] Uludağ bölgesinin rüzgar karakteristiğini ve rüzgar enerji potansiyelini, Weibull ve Rayleigh dağılım fonksiyonları kullanarak analiz etmişlerdir. Bu bölge için, ele alınan yıllarda ortalama rüzgar hızı 7.08 m/s olarak hesaplanmış 600, 1000, 1500 ve 2000 kW kapasiteli rüzgar türbinleri için yıllık enerji üretimleri, kapasite faktörleri ve üretilen enerjinin maliyeti hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ele alınan rüzgar türbinlerinden üretilen enerjinin maliyetinin 0.255 ile 0.306 $/kWh arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Çelik [21] 1996 ile 2000 yılları arasında ölçülen rüzgar hız verilerini kullanarak 50 m türbin yüksekliği ve kapasitesi 0.6 ile 500 kW arasında değişen rüzgar türbinleri için

İskenderun bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelini ve üretilen enerjinin maliyetini incelemiştir. Çalışma sonucunda en düşük enerji maliyeti 0.15 $/kWh olarak 500 kW kapasiteli türbinde hesaplanmıştır.

İlkiliç ve Türkbay [22] Türkiye'nin rüzgar potansiyelini ve rüzgar enerjisinden elektrik üretim tesislerinin Türkiye'deki durumunu incelemişlerdir. Çalışmalarında, değişik bölgelerde 2004 yılında ölçülen rüzgar verilerini kullanmışlardır. Coğrafi bölgelerin yıllık ortalama rüzgar hızını 2.58 m/s, yıllık ortalama rüzgar yoğunluğunu ise 25.82 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Rüzgar potansiyelinin en uygun olduğu bölgeleri Türkiye'nin kuzey ve kuzeybatı kısımlarında bulunan Ege ve Marmara Denizi kıyıları ve Doğu Anadolu Bölgesi olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca Türkiye'nin sahip olduğu rüzgar potansiyelini kullanarak enerji ihtiyaçlarını karşılayabileceğini belirtmişlerdir.

İlkiliç [23] 2010 yılında Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde ölçülen verileri kullanarak Türkiye'nin rüzgar potansiyelini belirlemiş ve rüzgar enerjisine dayalı üretim tesislerinin durumunu incelemiştir. Yapılan çalışma sonucu Türkiye'nin 2008 yılında rüzgar enerjisi potansiyelinin 433.35 MW olduğu, bu değerin 2010 yılı sonunda 1503.35 MW olacağından ve Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin enerji ihtiyaçlarını karşılamada çok büyük öneme sahip olduğu görülmüştür.

Karsli ve Geçit [24] Türkiye'nin güneyinde bulunan ve Gaziantep iline bağlı olan Nurdağı bölgesinin rüzgar potansiyelini belirlemişlerdir. Çalışmalarında 1995 yılının Ocak ayı ile Aralık ayları arasında Nurdağı'nın eteklerinde 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hız verilerini kullanmışlar ve bölgenin rüzgar hızı dağılımını Weibull fonksiyonunu kullanarak belirlemişlerdir. Yaptıkları hesaplamalar sonucu bölgenin 10 m yükseklikteki yıllık ortalama hızını 7.27 m/s, en yüksek aylık ortalama hızını Ağustos ayında 13.75 m/s, en düşük aylık ortalama rüzgar hızını ise 2.99 m/s olarak Ocak ayında belirlemişlerdir. Ayrıca, bölgenin ortalama rüzgar güç yoğunluğu 222 W/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Akpinar vd. [25] Elazığ ili Maden bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelini 1998 ile 2002 yılları arasında ölçülen rüzgar hız verilerini STATISTICA ve FORTRAN programlarında derleyip Weibull fonksiyonu kullanarak incelemişlerdir. Yaptıkları hesaplamalar sonucu bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızının genellikle 5 ile 6 m/s

arasında değiştiğini ve en yüksek rüzgar hız değerini 21.3 m/s olarak bulmuşlar, bölgenin ortalama rüzgar güç yoğunluğunu ise 244.656 W/m^2 olarak belirlemişlerdir.

Shata ve Hanitsch [9] Akdeniz'in Mısır'a olan kıyı kesiminin rüzgar enerjisi potansiyelini 10 farklı bölgede yapılan ölçümlerden elde edilen rüzgar verilerini kullanarak WASP paket programı ile analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda 3 ölçüm istasyonunda ölçülen yıllık rüzgar hız ortalaması 5 m/s'den fazla bulunmuş, rüzgar hız ortalaması en makul olan El Dabaa bölgesinde 1 MW kapasiteli rüzgar türbininin yıllık enerji üretimi 2718 MWh, üretilen bu enerjinin maliyeti 2 cent/kWh olarak hesaplanmıştır.

Bekele ve Palm [26] Etiyopya'daki Addis Ababa, Mekele, Nazret ve Debrezit bölgelerinin rüzgar enerjisi potansiyelini HOMER paket programını kullanarak analiz etmişler ve Debrezit bölgesinde ortalama hızı 3 m/s'den az, diğer 3 bölgedeki ortalama hız 4 m/s civarında hesaplamışlardır.

Bagiorgas vd. [27] Yunanistan'ın batı bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmaya göre rüzgar türbini kapasitesi arttıkça üretilen enerjinin birim maliyetinin azaldığı görülmüştür.

Rehman vd. [28] Suudi Arabistan'ın Rafha bölgesi için uzun periyotta ölçülen rüzgar hız verilerini analiz etmişler, bu verileri kullanarak 600, 1000 ve 1500 kW kapasiteli rüzgar türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarını HOMER ve RetScreen paket programlarını kullanarak hesaplamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucu 60 metre yükseklikte ortalama hız 4.7 m/s olarak bulunmuş, 600, 1000 ve 1500 kW kapasiteli türbinlerden yıllık üretilen enerji miktarları sırası ile 805, 1332 ve 1905 MWh olarak hesaplanmıştır.

Fawzi ve Jowder [29] Bahreyn Krallığı için 2003 ile 2005 yılları arasında ölçülen rüzgar verilerini 10, 30 ve 60 m yükseklikler için analiz etmişler, 10, 30 ve 60 m yükseklikler için maksimum güç yoğunluğunu sırasıyla 164 W/m^2, 624 W/m^2 ve 1171 W/m^2 olarak, minimum güç yoğunluğunu ise sırasıyla 65 W/m^2, 244 W/m^2 ve 244 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca yıllık ortalama güç yoğunluğunu 10 m için 114 W/m^2, 30 metre için 433 W/m^2 ve 60 m için 816 W/m^2 olarak hesaplanmıştır.

2. BÖLÜM

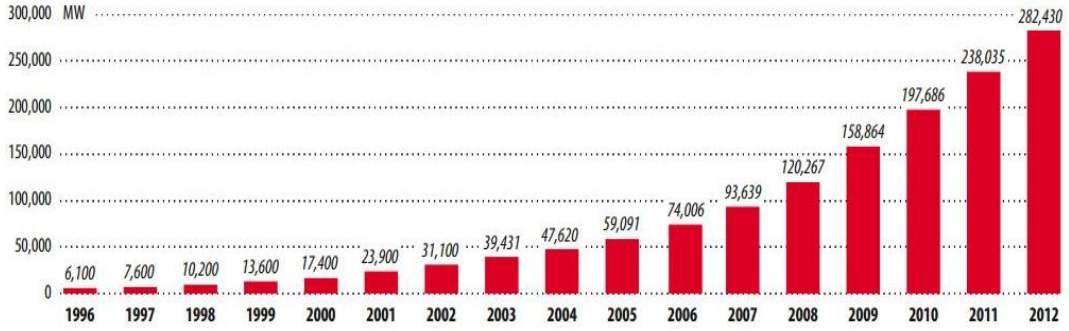
RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ

2.1. Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin Dünyadaki Durumu

Enerjiye olan küresel talebin 2035 yılında günümüzdeki talebe oranla üçte bir oranında artacağı tahmin edilmektedir. Yakın gelecekte, konvansiyonel enerji kaynaklarından ve nükleer enerjiden sağlanan enerjinin miktarının artmasına rağmen üretilen toplam enerji içerisindeki payının düşmesi beklenmektedir. Çevresel sorunlar, artan teşvikler ve fosil yakıtların fiyatlarındaki artışlar yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin gelecekte de hızlanarak artacağını göstermekte, dünyada üretilen toplam elektriğin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanma oranının %31'e çıkacağı beklenmektedir [30].

Rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim tesisleri diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesislerine oranla son yıllarda daha fazla gelişme göstermiştir. Rüzgar enerjisinden elektrik üretim tesislerinin 1996 ile 2012 yılları arasındaki kurulu güç kapasitesi Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Dünyada üretilen elektriğin rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim tesislerinden karşılanma oranı günümüzde %2.5'dir ve bu oranın 2020 yılında %8-12 civarında olacağı tahmin edilmektedir [31].

Tablo 2.1. Dünyadaki Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin 1996-2012 Yılları Arasında Kurulu Güç Kapasitesi [32]



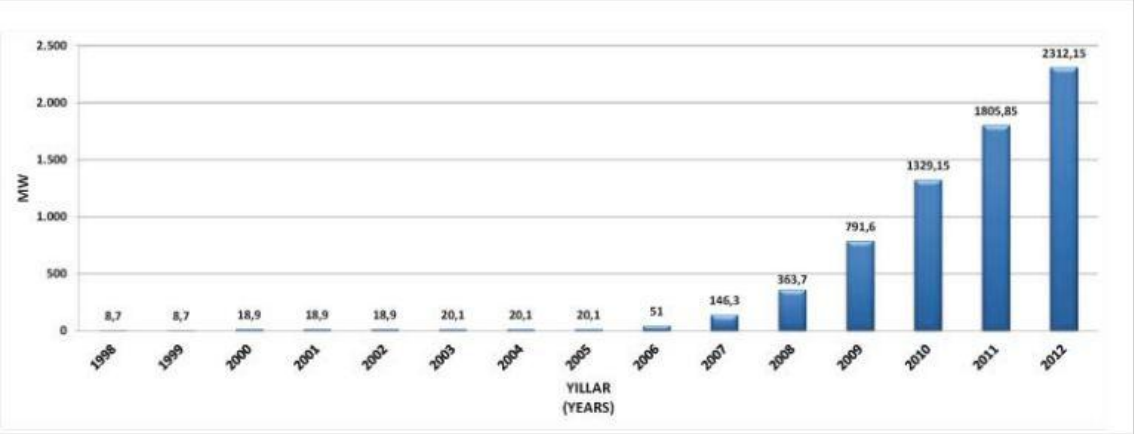
2.2. Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin Türkiye'deki Durumu

Türkiye ekonomisi son on yılda yıllık ortalama %5.2 oranında, nüfusu ise yıllık ortalama %2.1 oranında büyümüş, buna paralel olarak enerjiye olan talep de sürekli artmıştır. Enerji ihtiyacı bakımından kendi kaynakları yetmeyen bir ülke olan Türkiye 2011 yılında enerji ihtiyacının yaklaşık %72'sini fosil kaynaklı enerji ithalatı ile karşılamış, ithal edilen enerjiye yaklaşık 54 milyar dolar ödemiştir. Artan petrol ve doğalgaz fiyatları nedeniyle enerji ithalatı için yapılan ödemelerin ithalat için yapılan toplam ödemeler içerisindeki oranının %25 seviyelerine ulaşması Türkiye'nin cari açığının da önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Bu durum karşısında Türkiye enerji politikalarını yeniden gözden geçirmek zorunda kalmıştır.

18 Mayıs 2009 tarihinde Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı tarafından yayımlanan Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi'ne göre Türkiye'nin elektrik enerjisini karşılamada yerli kaynakların kullanımının payının arttırılması birinci öncelikli hedef olarak sunulmuştur. Buna göre, 2023 yılına kadar ülkemizdeki linyit, taşkömürü ve hidrolik enerji kaynaklarının tamamının kullanılması, üretilen toplam elektriğin %30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması ve rüzgar enerjisine dayalı kurulu gücün 20,000 MW' a ulaşması hedeflenmiştir [33]. Artan enerji taleplerinin karşılanması için 2023 yılına kadar 2 adet nükleer santralin faaliyete geçmesi ve üçüncüsünün inşaatının başlanması planlanmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerjiden elektrik üretimini teşvik eden kanunlar çıkarılmıştır.

Türkiye'de 2012 yılında üretilen elektriğin %43.1'i doğalgazdan, %15.4'ü yerli kömürden, %24.2'si hidrolik enerjiden, %12.1'i ithal kömürden, %2'si sıvı yakıtlardan, %2.4'ü rüzgar enerjisinden, %0.6'sı ise jeotermal ve biyogazdan elde edilmiştir [34]. Ülkemizde elektrik üretiminde rüzgar enerjisinin kullanılması diğer enerji kaynaklarına göre daha hızlı gelişmektedir. Tablo 2.2'de gösterildiği gibi ülkemizdeki kurulu güç kapasitesi 2002 yılında 18.9 MW olan rüzgar santralleri uygulanan teşvikler ve politikalar sonucu 2012 yılının sonunda 2312.15 MW kapasiteye ulaşmıştır.

Tablo 2.2. Türkiye'deki Rüzgar Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesislerinin 1998-2012 Yılları Arasında Kurulu Güç Kapasitesi [2]



2.3. Rüzgar Gücü Hesabı

Rüzgar enerjisinden sağlanabilecek güç rüzgar hızına bağlıdır ve aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$P_{toplam} = \dot{m}.\frac{{V_r}^2}{2} \tag{2.1}$$

Burada;

$\dot{m}$: havanın kütlesel debisi (kg/s)

V_r: rüzgar hızı (m/s)

olarak tanımlanmıştır.

Bu denklemdeki kütlesel debi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{m} = \rho . A . V_r \tag{2.2}$$

Bu denklemde ρ havanın yoğunluğu (kg/m^3), A türbin kanatlarına etki eden rüzgar alanı olarak tanımlamaktadır. Bu değer, denklem 2.1'de yerine yazılırsa:

$$P_{toplam} = \rho . A . \frac{{V_r}^3}{2} \tag{2.3}$$

şeklinde rüzgardan elde edilebilecek gücün rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olduğu bir denklem elde edilir. Bu denklem vasıtasıyla hesaplanan güç kayıpların olmadığı güçtür. Bu durumda, denklem 2.3 güç faktörü (C_P) ile çarpılıp kayıplar hesaba katıldığında elde edilebilecek güç hesaplanabilir.

$$P_{toplam} = \rho . A . \frac{{V_r}^3}{2} . C_P \tag{2.4}$$

Rüzgar türbininden elde edilebilecek maksimum güç, C_P 'nin 0.593 değerini aldığı durumdur. Bu değere Lanchester-Betz limiti denir ve rüzgar türbininin teorik veriminin %59.3'ü aşamayacağını gösterir.

2.4. Kapasite Faktörü

Kapasite faktörü (C_f) bir rüzgar türbininin ne kadar verimli çalıştığını gösteren bir parametredir. Türbinin kurulduğu bölgede belirli bir periyot içerisinde üretebileceği gerçek gücün türbinin tam kapasitede çalışması halinde üretilebileceği güce oranı olarak ifade edilir. Kapasite faktörü aşağıdaki formülle tanımlanmıştır:

$$C_f = \frac{E_P}{P_n . 8760} \tag{2.5}$$

Burada;

E_P: Türbinin bir yılda üretebileceği elektrik enerjisi (kWh/yıl)

P_n: Türbinin nominal gücü (kW)

olarak ifade edilmiştir. Denklemde bulunan 8760 değeri türbinin bir yıl içerisinde tüm saatler (365x24) boyunca tam kapasitede çalışması durumunu ifade etmektedir.

2.5. Rüzgar Hızının Yükseklikle Değişimi Hesabı

Yükseklik arttıkça coğrafi engellerin neden olduğu sürtünme etkisi azalacağı için rüzgar hızı da artmaktadır. Rüzgar enerjisinden elde edilebilecek güç rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğu için rüzgar türbinlerinin projelendirme aşamasında türbinin kurulacağı yükseklikteki rüzgar hızlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Rüzgar hızı ölçüm istasyonlarında genellikle türbinlerin kurulacağı yükseklikte ölçüm yapılmamaktadır. Bu nedenle türbinin kurulacağı yükseklikteki rüzgar hızını hesaplamak gerekmektedir. Belirli bir yükseklikteki rüzgar hızı logaritmik sınır tabaka profili yöntemi kullanılarak ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir [35]:

$$\mathrm{v} = \mathrm{v}_0 . (\frac{\ln(\mathrm{z}/\mathrm{z}_{\mathrm{s}})}{\ln(\mathrm{z}/\mathrm{z}_0)} \tag{2.6}$$

Burada;

v: istenen yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
v_0: ölçüm yapılan yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
z: rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik (m)
z_0: rüzgar hızı ölçümünün yapıldığı yükseklik (m)
z_s: yüzey pürüzlülük katsayısı

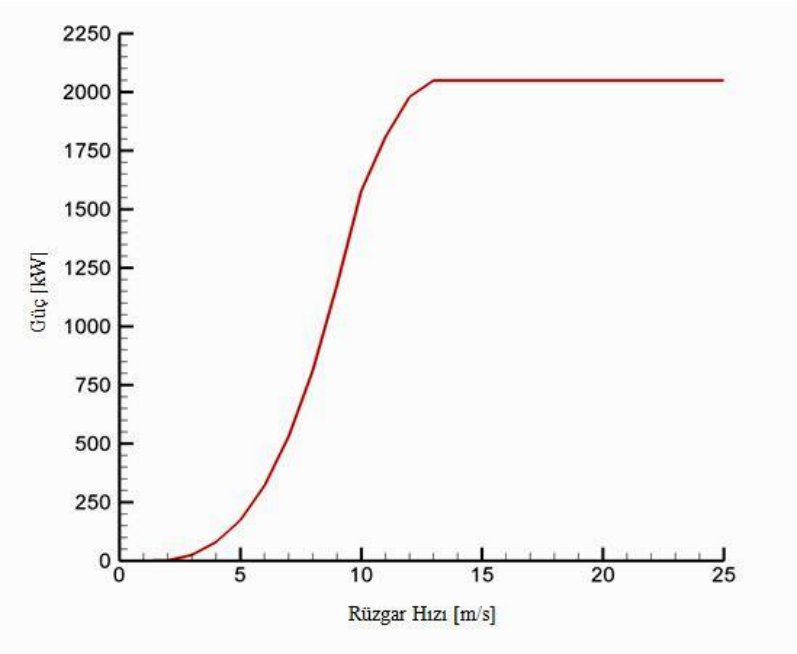
olarak ifade edilmektedir. z_s yüzey pürüzlülük katsayısı rüzgar türbininin kurulacağı bölgenin yeryüzü şekillerine göre seçilmektedir. Tablo 2.3'te farklı yeryüzü şekilleri için yüzey pürüzlülük katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı Yeryüzü Şekilleri İçin Yüzey Pürüzlülük Katsayısı Değerleri

Yeryüzü Şekli	z_s
Büyük ova, geniş çayır	0.15
Orman	0.5
Makilik arazi	0.3
Şehir içi	1.0

2.6. Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Türbininden Üretilebilecek Enerji

Bir rüzgar türbininden belirli bir bölgede üretilebilecek güç türbinin dizayn özelliklerine ve bölgenin rüzgar potansiyeline bağlıdır. Rüzgar türbininin kurulacağı bölgenin rüzgar potansiyeli ölçümlerle belirlenebilir türbin dizayn özellikleri ise üretici firmalar tarafından verilmektedir. Rüzgar türbini üreticisi firmalar türbin kanat tasarımlarına ve güç kayıplarına göre deneysel olarak türbin güç eğrilerini belirleyip tablo ve grafik halinde yatırımcılara sunmaktadırlar. Şekil 2.1'de Enercon E82 model 2050 kW kapasiteli bir rüzgar türbininin güç eğrisi örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 2050 kW Kapasiteli Bir Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi

Şekil 2.1'de örnek olarak gösterilen güç eğrisi, türbinin 2 m/s hızdan sonra enerji üretmeye başladığını, 13 m/s ile 25 m/s rüzgar hızı arasında sabit olarak 2050 kW enerji ürettiğini ve 25 m/s'den yüksek hızlarda türbinin enerji üretmediğini göstermektedir. Farklı rüzgar hızlarında rüzgar türbininden üretilebilecek enerjiyi hesaplamak için rüzgar türbini güç eğrilerine bağlı olarak elde edilen aşağıdaki denklem kullanılabilmektedir [35].

$$P_i(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ \left(a_n v^n + a_{n-1} v^{n-1} + \ldots + a_1 v + a_0\right), & v_{ci} \le v < v_R \\ P_R, & v_R \le v < v_{co} \\ \left(a_n v^n + a_{n-1} v^{n-1} + \ldots + a_1 v + a_0\right), & v_{ci} \le v < v_{co} \\ 0, & v \ge v_{co} \end{cases} \tag{2.7}$$

Bu denklemde;

$P_i(v)$: belirli bir rüzgar hızında elde edilebilecek gücü (kWh)

P_R: türbin nominal gücü (kW)

a_n, a_{n-1}, a_1 ve a_0: regresyon sabitleri

v_R: türbinin maksimum güç üretebileceği hız (m/s)

v: türbinin üretebileceği gücün hesaplanması istenilen hız (m/s)

v_{ci}: türbinin güç üretmeye başladığı hız (m/s)

v_{ci}: türbinin güç üretmeyi durdurduğu hız (m/s)

şeklinde ifade edilmektedir. Belirli bir zaman diliminde değişik rüzgar hızlarında üretilebilecek güç miktarlarını toplayarak rüzgar türbininden üretilebilecek toplam güç hesaplanabilmektedir. Bir saatlik zaman dilimleri için üretilebilecek toplam güç aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$E_{wt} = \sum_{i=1}^{n} t \tag{2.8}$$

Burada;

E_{wt}: rüzgar türbininden üretilebilecek toplam güç (kWh)

n: ele alınan zaman dilimi içerisindeki saat sayısı

t: bir saatlik zaman dilimi

olarak tanımlanmaktadır.

3. BÖLÜM

RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

3.1. Yaşam Döngü Analizi

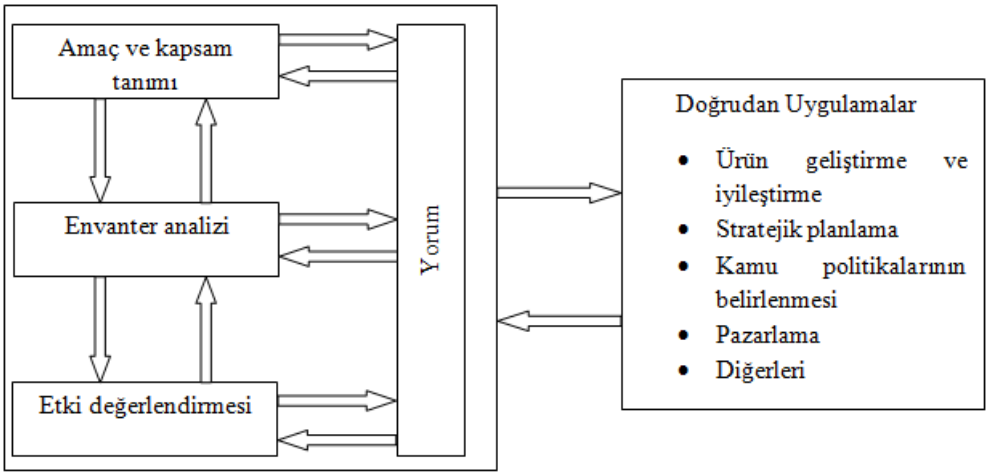
Dünyada çevre bilinci geliştikçe ürünlerin, hizmetlerin ve sistemlerin çevreye olan olumsuz etkilerinin bertaraf edilmesi için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Yaşam döngü analizi kavramı da bu amaçla ortaya çıkan yaklaşımlardan bir tanesidir. YDA kavramının temelleri 1969 yılında Coca Cola firması için paketleme süreci boyunca enerji, malzeme ve çevre faktörleri dikkate alınarak incelenmesiyle atılmıştır. Bu çalışmada, farklı içecek kutularının tüm ömürleri boyunca hangisinin doğal kaynakları daha az tükettiği ve çevreye daha az zarar verdiği karşılaştırılmıştır. 1992 yılında Rio de Janeiro'da gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda hammadde ve kaynakların etkili kullanılmasında, çevreye olan olumsuz etkilerin en aza indirilmesinin önemi belirtilmiş bu amaca yönelik yapılan çalışmalarda YDA yaklaşımının dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır [36]. 1996 yılında Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) ISO 14040 Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-İlkeler ve Çerçeve ve ISO 14044 Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Gerekler ve Kılavuz isimli standartları yayımlamış ve YDA çalışmalarında uygulanacak adımları belirlemiştir. Yaşam döngü analizi, bir ürünün, hizmetin veya sistemin tüm ömrü boyunca çevresel etkileşimlerini incelemek için kullanılan bir araçtır. YDA beşikten mezara yani hammadde elde edilmesinden, imalat, kullanım, geri dönüşüm ve nihai bertaraf gibi süreçleri içine alarak incelemekte ve bu süreçler boyunca enerji, malzeme ve çevresel etkilerin miktarını belirlemede ve karar alma mekanizmalarında kullanılmaktadır.

3.2. Yaşam Döngü Analizi Safhaları

Yaşam döngü analizi Şekil 3.1'de gösterildiği gibi ileri/geri beslemeli ve tekrarlanabilir olmak üzere dört safhadan meydana gelmektedir. Bu safhalar;

1. Amaç ve kapsam tanımı
2. Envanter analizi
3. Etki değerlendirmesi
4. Yorum

şeklindedir.



Şekil 3.1. Yaşam Döngü Analizi Safhaları [37]

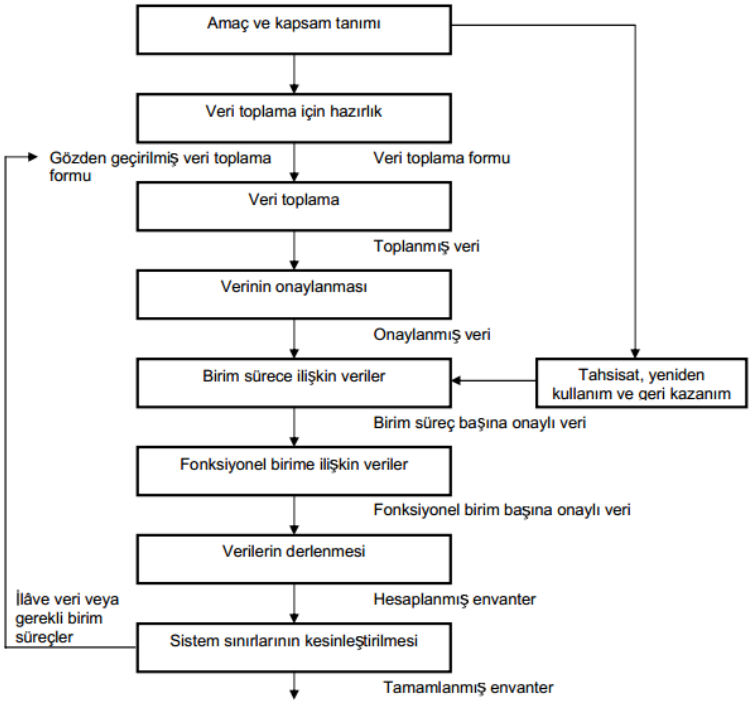
3.2.1. Amaç ve Kapsam Tanımı

Yaşam döngü analizinin ilk basamağı olan bu bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı açıkça belirtilmelidir. Yapılan çalışmanın sebepleri ve değerlendirme bittikten sonra sonuçların ulaştırılması istenen hedef kitle bu basamakta belirtilmelidir. Örnek olarak, bir doğalgaz kombine çevrim santralinin CO_2 emisyonlarının belirlenip bu emisyonları diğer elektrik üretim sistemlerinden oluşan emisyonlarla karşılaştırabilecek bir YDA çalışması yapılabilir. Çalışmanın kapsamı amaca yönelik olmalı ve sistem sınırları, fonksiyonel birim, varsayımlar, sınırlamalar belirtilmelidir [37].

Fonksiyonel birim, elde edilen sonuçların aynı değerde karşılaştırılabilmesine olanak sağlayan referans değerdir. Bu değer, sonuçların normalleştirilmesinde özellikle de farklı sistemlerin karşılaştırılabilmesi için kullanılmaktadır. Fonksiyonel birimi doğru tanımlayabilmek için fonksiyonel birim başına sisteme giren ve çıkan referans akışları belirlemek gerekmektedir. Örneğin, elektrik üretiminde fonksiyonel birim 1 kWh seçildiğinde referans akışlar 10 gCO_2/kWh ve 0.02 gSO_2/kWh şeklinde olabilmektedir.
Sistem sınırları belirlenerek sistem içerisinde bulunabilecek birim süreçler belirlenebilmektedir. Birim süreçler, girdi ve çıktıları olan ve sistemi meydana getiren yapılardır. Sistem sınırları yapılan çalışmanın amaç ve kapsamına, sonuçların ulaştırılması istenilen hedef kitleye, varsayımlara ve sınırlamalara bağlıdır. Sistem sınırlarının doğruluğu yapılan çalışmadan elde edilecek sonuçların güvenilirliği açısından oldukça önemlidir.

3.2.2. Envanter Analizi

Envanter analizi, her süreçte ve sistemin tamamında gerekli olan verilerin toplanma safhasıdır. Envanter analizi aşaması bir YDA çalışmasının en fazla zaman alan ve en zor safhasıdır. Yaşam döngü analizi ileri/geri beslemeli ve tekrarlı bir süreç olduğu için envanter analizinde elde edilen veriler doğrultusunda sistem sınırları, çalışmanın amaç ve kapsamı da değişebilmektedir. Bu nedenle toplanan verilerin kesinliği çalışma sonucu doğru sonuçlar elde edilebilmesi ve çalışmanın başarıya ulaşabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [37]. ISO 14044’de envanter analizi safhasının Şekil 3.2’deki gibi adımlarda gerçekleşmesi belirtilmiştir.



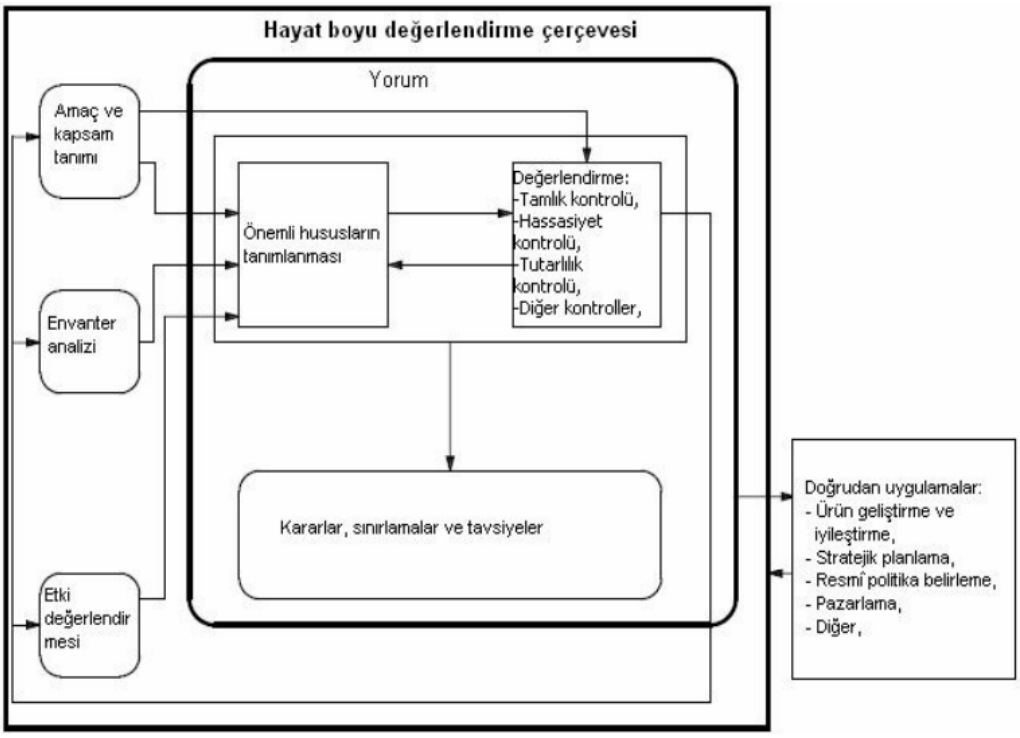
Şekil 3.2. Yaşam Döngü Envanter Analizi Adımları [38]

3.2.3. Etki Değerlendirmesi

Etki değerlendirmesi safhasında çalışmasının amacına ve kapsamına yönelik toplanan verilerden elde edilen sonuçlara göre çevresel etkiler değerlendirilir ve yaşam döngü analizinin son kısmı olan yorum safhası için bilgiler oluşturulur. Etki değerlendirmesinden elde edilen verilere dayanılarak çalışmanın amaç ve kapsamının gerçekleşip gerçekleşemeyeceği değerlendirilir, amaç ve kapsam bu doğrultuda gözden geçirilir [37].

3.2.4. Yorum

Yorum safhası, envanter analizi ve etki değerlendirmesi basamaklarında elde edilen bulgulara dayanılarak değerlendirilmelerin yapıldığı safhadır. Bu aşamada, amaç ve kapsamda belirtilen niteliklere uygun sonuçlar elde edilmelidir. Bu sonuçlara dayalı olarak yapılan yorumlar hedef kitleye karar verme mekanizmalarında yardımcı olmalıdır [37]. Şekil 3.3'te yorum safhasının yaşam döngü analizinin diğer safhalarıyla olan bağıntısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yorum Safhasının Diğer Safhalarla Olan İlişkisi [38]

3.3. Yaşam Döngü Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları

Yaşam döngü analizinde kullanılan bilgisayar programlarından bazıları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Yaşam Döngü Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları

Programın Adı	Hazırlayan Kurum	Web Adresi
GaBi Software	PE Europe GmbH ve IBP University of Stuttgart	http://www.gabisoftware.com/turkey/index/
SimaPro	PRé Consultants	http://www.pre-sustainability.com/software
Umberto	ifu Hamburg GmbH	http://www.umberto.de/en/
CMLCA	Centre of Environmental	http://cml.leiden.edu/software/

	Science (CML), Leiden University	
ECO-it	PRé Consultants	http://www.pre-sustainability.com/eco-it
openLCA	GreenDelta GmbH	http://www.openlca.org/openlca
IDEMAT	Delft University of Technology	http://www.idemat.nl/
TEAM	Ecobilan PricewaterhouseCoopers	http://ecobilan.pwc.fr/en/team/index.jhtml
REGIS	sinum AG	http://www.sinum.com/en/products/software/

3.4. Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Varun vd. [39] günümüzde kullanılmakta olan rüzgar, solar termal, solar fotovoltaik, su ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ve CO_2 yaşam döngü analizlerini incelemişler, elde ettikleri sonuçları kömür, petrol, gaz ve nükleer kaynaklı enerji üretim teknikleri ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda su ve rüzgar kaynaklı yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin diğer yenilenebilir enerji üretim tekniklerine göre atmosfere çok daha az oranda CO_2 salınımı yaptığı, solar fotovoltaik enerji üretim sistemlerinin ise atmosfere dikkate değer biçimde CO_2 salımını yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Varun vd. [40] yaptıkları diğer bir çalışmada rüzgar, solar fotovoltaik, solar termal ve su kaynaklı enerji üretim tekniklerinin atmosfere olan olumsuz etkilerini incelemişler, aynı şekilde rüzgar ve su kaynaklı enerji üretim tekniklerinin atmosfere daha az zarar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Granovskii vd. [41] hidrojen ve elektrik üretiminde rüzgar ve güneş enerjilerinin kullanımının sera gazı salınım miktarına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada gaz yakıtlı ve 500 MW kapasiteli bir elektrik üretim santralinin yerine bu santralle eşdeğer miktarda elektrik üretebilecek bir rüzgar santrali kurulduğu taktirte sera gazı emisyonlarında yıllık 2.3 megaton azalma olabileceği sonucuna varılmıştır.

Weisser [42] fosil yakıt, su, biyokütle, nükleer, rüzgar ve solar fotovoltaik kaynaklı elektrik üretim tekniklerinin sera gazı emisyonlarını incelemiş su, nükleer ve rüzgar

kaynaklı elektrik üretim tekniklerinin küresel ısınmaya olan etkisinin diğer sistemlere oranla oldukça düşük olduğunu gözlemlemiştir.
Beccali vd. [43] Sicilya'daki yenilenebilir enerji politikalarını ve yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektriğin çevresel etkilerini incelemiş, yaptıkları çalışma sonucunda rüzgar enerjisi ile elektrik üretim yönteminin fotovoltaik, biyokütle ve solar termal kaynaklı elektrik üretim tekniklerine oranla atmosfere çok daha az miktarda CO_2 salınımı yaptığınını belirlemişlerdir.

Granovskii vd. [44] yaptıkları diğer bir çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen elde etme teknolojisinin ekserjitik yaşam döngü analizini yapmışlardır. Bu çalışmaya göre hidrojen kaynaklı yakıt hücresi ve benzin yakıtlı içten yanmalı motor kullanılan araçlar karşılaştırıldığında araçların verimleri dikkate alınmak koşuluyla içten yanmalı motorda yakıt olarak benzin yerine hidrojen kullanıldığı taktirde, hidrojen rüzgar enerjisinde elde edilirse sera gazı emisyonlarında 23 kat güneş enerjisinden elde edilirse 8 kat azalma gözlemlenmiştir.

Goralczyk [45] hidroelektrik, fotovoltaik, ve rüzgar güç sistemlerinin yaşam döngü analizini incelemiş, elde ettiği sonuçları petrol yakıtlı, kömür yakıtlı ve doğal gaz yakıtlı konvansiyonel elektrik üretim teknikleri ile karşılaştırmıştır. Hidroelektrik, fotovoltaik, ve rüzgar güç sistemlerinin net sera gazı emisyonları sırasıyla 1.27, 29 ve 1.69 $kgCO_2$ olarak hesaplanmıştır. Elde ettiği sonuçları, net sera gazı emisyonları sırası ile 261, 316 ve 278 olan petrol yakıtlı, kömür yakıtlı ve doğal gaz yakıtlı konvansiyonel elektrik üretim teknikleri ile karşılaştırmış ve yenilenebilir enerji üretim teknolojilerin çevreye olan olumsuz etkilerinin daha az olduğu sonucuna varmıştır.

Ozbilen vd. [46] bakır-klor çevrimli termokimyasal su ayrıştırma yöntemi kullanarak gerçekleştirilen hidrojen üretim prosesinin çevresel etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada üç, dört ve beş kademeli bakır-klor çevrimleri ele alınmış, ele alınan sistemler GaBi4 YDA programı ile modellenmiş ve sonuçlar asitlenme potansiyeli, ötrofikasyon potansiyeli ve küresel ısınma potansiyelleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, dört kademeli bakır-klor termokimyasal su ayrıştırma yönteminin üç ve beş kademeli çevrimlere oranla çevreye olan olumsuz etkilerinin daha az olduğu ve hidrojen üretim tesis kapasitesinin ve ömrünün arttırılmasının üretilen her 1 kg hidrojen başına düşen çevresel etki miktarında dikkate değer bir azaltma meydana getirmediği

gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak hidrojen üretiminin yaşam döngü analizi Ozbilen vd. [47-49], Hocatoglu vd. [50] ve Cetinkaya vd. [51] tarafından da yapılmıştır.

3.5. Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimine Dayalı Sistemlerinin Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Martinez vd. [52] kuzey İspanyada bulunan Munilla rüzgar tarlasında kurulu Gamesa G8X model 2 MW kapasiteli bir rüzgar türbininin yaşam döngü analizini incelemişlerdir. Ele alınan türbin, 80 m kanat yarıçapına, 5027 m^2 süpürme alanına ve 70 m kule yüksekliğine sahiptir. Bu çalışmada SimaPro 7.0 YDA programı ve veritabanı kullanılmış, rüzgar türbininden üretilen 1kWh elektrik fonksiyonel birim olarak varsayılmış, türbin ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiş ve ele alınan türbinin yılda 4 GWh elektrik üreteceği tahmin edilmiştir. Sistem rüzgar türbini elemanlarının imalatı, nakliyesi, türbinin kurulumu, çalışması, bakım işlemleri ve geri dönüşüm süreçleri dikkate alınarak modellenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, modellenen rüzgar türbini sisteminde çevresel etkisi en fazla olan alt sistemin türbin temel yapımı, temel bileşenleri içerisinde de çevresel etkisi en fazla olan malzemenin kullanılan çimento olduğu görülmüştür. Aynı şekilde kule kısmında çelik, nasel kısmında ise bakır, çevresel etkileri en fazla olan malzemeler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, enerji geri kazanım süresi 0.40 yıl olarak hesaplanmış, 20 yıl kabul edilen türbin ömrü içerisinde %2 paya sahip olan bu sürenin dikkate değer biçimde düşük olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak çevresel etkileri fazla olan malzemelere alternatif malzemeler kullanarak veya bu malzemelerin üretim tekniklerini ve kullanılan miktarlarını değiştirerek rüzgar türbinlerinin çevreye olan olumsuz etkilerinin azalabileceği belirtilmiştir. Ayrıca Martinez vd. [53] aynı rüzgar türbin sisteminin yaşam döngü analizini Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Enstitüsü tarafından geliştirilen CML Leiden 2000 metodunu temel alarak incelemişler ve seçilen sistemin çevresel etkilerini konvansiyonel elektrik üretim tekniklerinin çevresel etkileri ile karşılaştırmışlardır. Ele alınan rüzgar türbin sistemi, Martinez vd. [52] ile benzer şekilde modellenmiş ve benzer varsayımlar yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda enerji geri kazanım süresi 0.58 yıl olarak hesaplanmış, resin ve fiberglastan üretilen kanatların geri dönüşümünün olmaması sebebiyle çevresel etkilerinin dikkate değer biçimde fazla olduğu vurgulanmış, bu malzemelerin geri dönüşüm oranlarının arttırılması ile çevresel etkilerinin azalabileceği

belirtilmiştir. Aynı şekilde naselde kullanılan bakırın da çevreye olan olumsuz etkilerinin fazla olduğu belirtilmiş fakat bu malzemenin geri dönüşümünün olması sebebiyle çevreye olan olumsuz etkilerinin azabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, seçilen rüzgar türbini sisteminin aynı miktarda enerji üreten konvansiyonel güç santrallerine oranla çevresel etkilerde etki kategorisine göre %89 ile %99 arasında azalma sağladığı hesaplanmıştır.

Tremeac ve Meunier [54] güney Fransa'da kurulduğu varsayılan 4.5 MW ve 250 W kapasiteli iki rüzgar türbininin çevresel etkilerini karşılaştırarak yaşam döngü analizlerini incelemişlerdir. 4.5 MW kapasiteli türbininin 113 m kanat çapına, 124 m kule yüksekliğine ve yıllık 11.7 GWh elektrik üretimine sahip olduğu varsayılmıştır. 250 W kapasiteli türbin olarak Windside WS-0.3C marka dikey eksenli iki kanatlı türbin seçilmiş ve yıllık elektrik üretim kapasitesi 120 kWh olarak varsayılmıştır. Ayrıca, hesaplamalar İsviçre'de bulunan Lausanne Federal Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilen IMPACT 2002+ metodu esas alınarak ve SimaPro YDA programı kullanılarak yapılmış, türbinlerden üretilen 1 kWh elektrik fonksiyonel birim olarak seçilmiş ve her iki türbinin ömrü 20 yıl olarak varsayılmıştır. Yapılan hesaplamalarda, 1 kWh elektrik üretimi başına düşen CO_2 emisyonları 4.5 MW ve 250 W kapasiteli türbinler için sırası ile 15.8 g ve 46.4 g olarak hesaplanmıştır, bu değerler, nükleer enerji kaynaklı elektrik üretim sistemlerinde ortalama 10 gCO_2/kWh ve fosil yakıt kaynaklı elektrik üretim sistemlerinde ortalama 400-1000 gCO_2/kWh arasında olan emisyonlarla karşılaştırılmış ve rüzgar türbinlerinin çevresel etkilerinin oldukça makul olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, enerji geri kazanım süreleri 4.5 MW kapasiteli türbin için 0.58 yıl, 250 W kapasiteli türbin için 2.29 yıl olarak hesaplanmış ve türbin imalat safhasının işletme, nakliye ve geri dönüşüm safhalarına oranla daha fazla çevresel etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Guezuraga vd. [55] 1.8 MW ve 2 MW kapasiteli iki rüzgar türbinini malzeme kullanımı oranları, CO_2 emisyonları ve enerji geri kazanım süreleri açısından karşılaştırmıştır. Türbinlerin ömrü 20 yıl kabul edilmiş ve her iki sistem de GEMIS (Global Emission Model of Integrated System) YDA programı ile modellenmiştir. Yapılan hesaplamalarda 1 kWh elektrik üretimi başına düşen CO_2 emisyonları her iki türbin için 9 g, enerji geri kazanım süreleri 0.58 yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca, imalat işlemlerinin toplam enerji girdilerinde %84.4 oranla ilk sırada yer aldığı sonucuna varılmıştır.

Fleck ve Huot [56] bir evin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek şebekeden bağımsız 400 W kapasiteli bir rüzgar türbini ve dizel jeneratör sisteminin çevresel etkilerini karşılaştırmışlardır. Fonksiyonel birim olarak aylık üretilen 162.5 kWh elektrik enerjisi seçilmiş ve sistemlerin ömrü 20 yıl olarak varsayılmıştır. Rüzgar türbini sisteminin dizel jeneratör sistemine oranla %93 daha az sera gazı emisyonuna sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Ardente vd. [57] Sicilya'da kurulu bir rüzgar tarlasının enerji performansını ve çevresel etkilerini incelemiştir. Ele alınan bu rüzgar tarlası kule yüksekliği 55 m, kanat çapı 50 m olan 660 kW kapasiteli 11 adet türbin içermektedir. Rüzgar tarlasından bir yılda üretilen elektrik farklı rüzgar potansiyeli tahminlerine göre 10,494 ile 16,400 MWh olarak hesaplanmış, fonksiyonel birim ise şebekeye verilen her 1 kWh'lik elektrik olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda türbin imalatının, kurulum işlemlerinin ve nakliye gereksinimlerinin sırası ile %61, %32.5 ve %6.5 oranlarında enerji gereksinimlerinin olduğu ve bu enerji gereksinimlerinin ele alınan sistemle üretilen enerji ile bir yılda dengelenebileceği hesaplanmıştır. Ayrıca CO_2 emisyonlarının 8.8 ile 18.5 g/kWh arası değiştiği hesaplanmıştır.

Songlin vd. [58] 2 MW kapasiteli türbinlerden oluşan ve Çin'de kurulu bulunan Fuzhou rüzgar tarlası ile 600 MW kapasiteli kömür yakıtlı bir termik santralin çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Yapılan hesaplamalarda, her 1 kWh elektrik üretiminde 600 MW kapasiteli termik santrale oranla rüzgar tarlasından 0.3839 kg kömür-eşdeğer tasarruf sağlandığı görülmüştür.

Lenzen ve Wachsmann [59] Enercon firması tarafından üretilen E-40 model 600 kW kapasiteli bir rüzgar türbininin farklı coğrafi bölgelerde üretilip kurulmasını beş farklı senaryo modelleyip incelemişlerdir. Bu senaryolar: 1-Rüzgar türbininin Almanya'da üretilmesi ve kurulması 2- Rüzgar türbininin Almanya'da üretilmesi Brezilya'da kurulması, 3-Jeneratör ve naselin Almanya'da üretilmesi, diğer parçaların Brezilyada üretilmesi ve türbinin Brezilya'da kurulması 4- Rüzgar türbininin Brezilyada üretilmesi ve kurulması 5-Rüzgar türbininin Brezilya'da üretilip kurulması ancak kullanılan çeliğin geri dönüşüm oranının çok fazla olması.şeklindedir. Ele alınan rüzgar türbininin elemanlarının enerji tüketimleri %30-40 oranlarında kule, %25-30 oranlarında jeneratör,

%10-15 oranlarında nasel ve %5 civarında hesaplanmıştır. Ayrıca, beşinci senaryoda modellenen rüzgar türbini 0.002 kgCO_2/kWh ile üretilen her 1 kWh birim elektrik için en az CO_2 salınımı yapan türbin olarak hesaplanmıştır.

Lenzen ve Munksgaard [60] rüzgar türbinlerinin enerji ve CO_2 yaşam döngü analizleri hakkında yapılmış 72 adet çalışmayı rüzgar türbininin ömrü, yük faktörü, türbin gücü, türbininin imal edildiği ülke, türbin parçalarının enerji gereksinimleri ve yapılan analizlerdeki metotlar gibi parametreleri ele alarak incelemişlerdir. Rüzgar türbini sisteminin ömründeki ve yük faktöründeki artışın türbinin çalışma hayatı boyunca üreteceği elektrik enerjisi miktarını arttıracağı için enerji gereksinimlerini azaltacağı belirtmişlerdir. Türbin çıkış gücünün, kule yüksekliği, kanat çapı ve türbinin kurulduğu bölgedeki rüzgar potansiyeline bağlı olduğunu bu parametrelerin uygun seçimi ile sistemin enerji gereksinimlerinin en aza indirilebileceğini gözlemlemişlerdir. Türbinin imal edildiği ülkenin, nakliye için enerji gereksinimlerine etkisinin toplam enerji gereksinimleri içerisinde %5 civarında olduğu, türbin elemanlarının imalatının enerji gereksinimlerinin ülkeler arasında farklılıklar gösterebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, kanatlardaki fiberglasın epoksi resinin ve PVC'nin geri dönüşümünün yeterli miktarda ve kalitede yapılamadığı, türbin temelinin geri dönüşümüne harcanan enerjinin geri dönüşümden kazanılabilecek enerjiyi karşılayamadığı için enerji kayıplarına neden olduğu ancak sistemde bulunan çelik, bakır ve alüminyumun geri dönüşümü ile dikkate değer biçimde enerji kazancı sağlanabileceği gözlemlenmiştir.

Crawford [61] 850 kW ve 3 MW kapasiteli iki türbini ele almış ve sistemlerin sera gazı emisyonlarını, enerji gereksinimlerini, enerji verimlerini incelemiş ve sistemin büyüklüğünün enerji verimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Ele alınan rüzgar türbinlerinin rotor (hub ve kanatlar), nasel (jeneratör, dişli kutusu, fren sistemi, elektronik kontrol mekanizması, transformatör ve kontrol sistemi), kule ve temel ana bileşenlerinden oluştuğu, türbinlerin yatay eksenli, 3 kanatlı ve ömürlerinin 20 yıl olduğu dişli kutusunun bir defa değişeceği, yağlama işlemlerinin ise her 5 yılda yapılacağı tahmin edilmiştir. Ayrıca, türbinlerin güneybatı Avustralya kıyılarında bulunan Victoria bölgesine kurulduğu varsayılmıştır, bu bölgenin ortalama rüzgar hızı 7.75 m/s'dir ve bölgenin rüzgar hız dağılımı Weibull dağılım parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. 850 kW kapasiteli ve 3 MW kapasiteli rüzgar türbinlerinin yıllık elektrik üretim miktarları sırası ile 9486 MWh ve 32,915 MWh olarak, enerji geri

kazanım süreleri her iki türbin için yaklaşık 12 ay olarak hesaplanmıştır. Rüzgar türbinlerinin ömrü kabul edilen 20 yıl boyunca çalışmaları sonucu atmosfere verilmesi önlenen emisyonlar 850 kW kapasiteli türbin için 35,265 tonCO_2-eşdeğer, 3 MW kapasiteli türbin için 122,961 tonCO_2-eşdeğer olarak belirlenmiştir.

Arvesen ve Hertwich [62] 2000 ile 2012 yılları arasında yapılmış olan ve rüzgar türbinlerinin çevresel etkilerini içeren 44 adet çalışmayı incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, ortalama CO_2 emisyonlarının karada kurulu rüzgar türbinleri için 2 ile 30 g/kWh arasında değiştiği, denizde kurulu rüzgar türbinleri için ise 4.7 ile 19.3 g/kWh arasında değiştiği belirtilmiştir. Yazarlar, rüzgar enerjisinden elektrik üreten sistemler hakkında yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak Avrupa'da üretilmiş ve kurulmuş türbinler üzerinde yapıldığı, 3 MW kapasiteli türbinlerden daha büyük kapasiteli türbinler ve karada kurulu olmayan türbinler üzerinde yapılmadığı, bu çalışmalarda özellikle karada kurulu olmayan sistemlerin kurulum, işletme ve bakım safhalarının yeterince incelenmediğini mevcut çalışmaların eksiklikleri olarak gözlemlemişlerdir.

Raadal vd. [63] rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin çevresel etkileri ile ilgili 1990 ile 2010 yılları arasında yapılmış 63 adet çalışmayı ve su gücü ile elektrik üretimi ile ilgili 1996 ile 2010 yılları arasında yapılmış 39 adet çalışmayı incelemişlerdir. Su gücü ile elektrik üretimi ile ilgili incelenen çalışmaların 28 tanesi barajda kurulu, 11 tanesi ise akarsu üzerine kurulu hidroelektrik santralleridir. Yapılan analizler sonucu ele alınan rüzgar santrallerinin sera gazı emisyonlarının 4.6 ile 55.4 gCO_2-eşdeğer/kWh arasında değiştiği, baraja kurulu hidroelektrik santrallerinin sera gazı emisyonlarının 4.2 ile 152.4 gCO_2-eşdeğer/kWh arasında değiştiği ve akarsu üzerine kurulu hidroelektrik santrallerinin sera gazı emisyonlarının ise 0.3 ile 13 gCO_2-eşdeğer/kWh arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Wang ve Sun [64] dört farklı rüzgar tarlasının yaşam döngü analizini yapmışlar, bu rüzgar tarlalarının CO_2 emisyonlarını hesaplamışlar ve sonuçları konvansiyonel elektrik üretim teknikleri ile karşılaştırmışlardır. Ele alınan rüzgar tarlaları dört farklı senaryo içerisinde değerlendirilmiştir, bunlar: 1-Vestas V82 model 1.65 MW kapasiteli, 186 adet türbinden oluşan ve yılda 1073 GWh elektrik üreten karada kurulu rüzgar tarlası, 2-Vestas V90 model 3.0 MW kapasiteli, 100 adet türbinden oluşan ve yılda 1423 GWh

elektrik üreten okyanusta kurulu rüzgar tarlası, 3- Vestas V90 model 3.0 MW kapasiteli, 100 adet türbinden oluşan ve yılda 789 GWh elektrik üreten karada kurulu rüzgar tarlası, 4-Vestas V52 model 850 kW kapasiteli 116 adet türbinden oluşan ve yılda198 GWh elektrik üreten karada kurulu rüzgar tarlasıdır. Çalışma sonucunda, tüm senaryolar için emisyonların en fazla imalat işlemlerinden kaynaklandığı, okyanusta rüzgar hızlarının daha yüksek olmasına rağmen okyanusta kurulu rüzgar tarlalarının inşaat, kablolama ve trafo çalışmaları sırasında karada kurulu rüzgar tarlalarına oranla daha fazla malzeme ve enerji harcandığı için ikinci senaryoda ele alınan sistemden üretilen elektrik enerjisi fazla olmasına rağmen üretilen birim elektrik başına oluşan CO_2 emisyonlarının üçüncü senaryoda ele alınan sistemde daha az olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, rüzgar tarlalarından üretilen birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 miktarlarının, kömür, petrol ve gaz yakıtlı santrallerden üretilen birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 miktarlarına oranla sırası ile 154, 117 ve 96 kat daha az olduğu ve elektrik üretiminde fosil yakıtlar yerine rüzgar enerjisi kullanılmasının çevresel problemleri azaltabileceği belirtilmiştir.

Kabir vd. [65] üç farklı senaryo oluşturarak rüzgar enerjisinden 100 kW'lık elektrik üretiminin yaşam döngü analizini incelemişlerdir. Bu senaryolar: Endurance marka 5 kW kapasiteli 20 adet, Jacobs (JA) marka 20 kW kapasiteli 5 adet ve Northern Power (NP) marka 100 kW kapasiteli 1 adet türbinin kurulumu şeklindedir. Tasarlanan senaryolardaki türbinlerin Kanada'nın Halkirk bölgesinde kurulduğu ve ömürlerinin 25 yıl olduğu varsayılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu, üçüncü senaryoda ele alınan sistemin enerji gereksinimlerinin sırası ile birinci ve ikinci senaryodaki sistemlerin enerji gereksinimlerinden %69 ve %41 oranlarında daha az olduğu, üçüncü senaryodaki sistemin küresel ısınma potansiyelinin 17.8 gCO_2-eşdeğer/kWh ile birinci ve ikinci senaryodaki sistemlere oranla sırası ile %58 ve %29 daha az olduğu bulunmuştur.

Khan vd. [66] 500 kW kapasiteli rüzgar-yakıt hücresi entegre sisteminin yaşam döngü analizini incelemişlerdir. Ele alına sistemin Kanada'da kurulu ve ömrünün 20 yıl olduğu varsayılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu, sistemin küresel ısınma potansiyeli 40.6 gCO_2 eşdeğer/kWh olarak hesaplanmıştır. Yakıt hücresinin, elektrolizörün ve rüzgar türbininin küresel ısınmaya olan etkileri sırası ile %49, %26 ve %25 oranlarındadır. Ayrıca, elektrolizörün, yakıt hücresinin ve rüzgar türbininin enerji gereksinimleri sırasıyla %95, %3.8 ve %1.2 olarak hesaplanmıştır.

Deniz ve okyanuslardaki rüzgar potansiyelinin karadakine oranla daha uygun olmasından dolayı son yıllarda su üzerine rüzgar türbini kurulumu çalışmaları hızlanmıştır. Su üzerine kurulu rüzgar türbini sistemlerinin daha karmaşık türbin temel imalatına, sualtı kablolama işlemlerine ve su üzerine trafo kurulumuna ihtiyaç duyması ayrıca bakımın daha karmaşık olmasından dolayı enerji ve malzeme girdileri karada kurulu türbinlere oranla oldukça fazladır. Ancak, deniz ve okyanusların karaya oranla daha iyi rüzgar potansiyeline sahip olması su üzerine kurulu rüzgar türbinlerinden üretilen toplam elektriğin karada kurulu olan rüzgar türbinlere oranla daha fazla olmasını sağlamış bu da üretilen birim elektrik başına düşen enerji girdilerinin ve çevresel etkilerin dengelenmesini sağlamıştır [71]. Karada kurulu bulunan rüzgar türbinleri için yapılan çalışmaların yanı sıra denizde ve okyanusta kurulu bulunan rüzgar türbini sistemleri için de birçok çalışma yapılmıştır.

Hassing ve Varming [67] Danimarka'nın en batı noktasının Kuzey Denizi kıyısından 15 km içerde bulunan Horns Rev bölgesinde kurulu Vestas marka 2 MW kapasiteli bir rüzgar türbininin yaşam döngü analizini incelemişlerdir. Yazarlar, seçilen türbin tarafından üretilen elektriği yılda 8 GWh ve türbin ömrünü 20 yıl olarak varsaymışlardır. Rüzgar türbin sisteminin yaşam döngü analizini Danimarka Teknik Üniversitesi Ürün Geliştirme Enstitüsü tarafından geliştirilen EDIP metodunu temel alarak incelemişlerdir Yapılan çalışma sonucu, ele alınan türbin sisteminin çevresel etkilerinin yapısındaki çelik miktarından dolayı en fazla temel, kule ve nasel kısımlarından kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Properzi ve Hansen [68] Danimarka'da bulunan 150 MW kapasiteli Nysted rüzgar tarlasının yaşam döngü değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmalarında, sistemin elektrik üretimini 500 GWh/yıl, ömrünü 20 yıl kabul etmişler, analizlerinde EDIP metodunu ve ISO 14040 standartlarını temel almışlardır. İncelenen rüzgar tarlasının çevresel etkilerinin en fazla İmalat ve hizmetten çıkarma işlemleri sebebiyle meydana geldiği ayrıca kütlesel atıkların rüzgar türbini kulesinin, türbin temelinin ve iletim kablolarının yapısında bulunan çeliğin imalatından kaynaklandığı, küresel ısınma etmenlerinin ise kanat, kule ve temel yapımında kullanılan elektriğin üretilmesi için tüketilen fosil yakıtlardan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Schleisner [69] karada ve suda kurulu bulunan iki rüzgar tarlasının yaşam döngü analizlerini yapmıştır. Karada kurulu rüzgar tarlasını incelemek için Danimarka'nın Jutland Yarımadasında bulunan Fjaldene rüzgar tarlası seçilmiştir, Bu rüzgar tarlası, 41.5 m kule yüksekliğine sahip, 500 kW kapasiteli 18 adet rüzgar türbininden oluşmaktadır. Sistemin yıllık elektrik üretim miktarı 19,800 MWh olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde suda kurulu rüzgar tarlasını incelemek içinse Jutland yarımadasından 6 km açıkta bulunan Tuno Knob rüzgar tarlası seçilmiştir. Seçilen bu rüzgar tarlası 40.5 m kule yüksekliğine sahip 10 adet 500 kW kapasiteli rüzgar türbininden oluşmaktadır. Tuno Knob rüzgar tarlasının yıllık elektrik üretim miktarı 12,500 MWh olarak hesaplanmıştır. Her iki sistemin de ömrü 20 yıl olarak varsayılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu karada ve suda kurulu sistemlerin enerji geri kazanım süreleri sırası ile 0.26 yıl ve 0.39 yıl olarak hesaplanmıştır. Üretilen birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 ve SO_2 emisyonları karada kurulu bulunan Fjaldene rüzgar tarlası için sırası ile 9.7 gCO_2/kWh ve 0.02 gSO_2/kWh, suda kurulu Tuno Knob rüzgar tarlası içinse sırası ile 16.5 gCO_2/kWh ve 0.02 gSO_2/kWh olarak hesaplanmıştır.

Weizettel vd. [70] diğer çalışmalardan farklı olarak suda yüzen rüzgar türbinlerinin yaşam döngü değerlendirmesini yapmışlar ve elde ettikleri sonuçları suda kurulu sabit rüzgar türbini sistemleri ve doğalgaz çevrimli elektrik üretim santralleri ile karşılaştırmışlardır. Ele alınan sistem, Norveç firması olan Sway Company tarafından dizayn edilmiş, 5 MW kapasiteli 40 adet türbinden oluşmuş, kıyıdan 50 km açıkta kurulmuş ve sistemin ömrü 20 yıl olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sistem SimaPro paket programı ile modellenmiş,etki değerlendirmesi CML 2000 V2.03 esas alınarak yapılmış ve fonksiyonel birim şebekeye verilen 1 MJ elektrik olarak belirlenmiştir.. Yapılan hesaplamalar sonucunda, sistemin harcanan enerjiyi geri kazanım süresi 5.2 ay olarak hesaplanmış, küresel ısınmaya etki potansiyelinin en fazla %47 ile kule imalatı için düşük alaşımlı çelik üretimi işlemlerinden ve %14 ile kablo üretiminden kaynaklandığı bulunmuştur. Küresel ısınma etkisi 5 MW kapasiteli yüzen rüzgar türbini için 3.2x10-3 $kgCO_2$-eşdeğer/MJ olarak hesaplanmış, suda kurulu rüzgar türbini ve doğalgaz çevrimli elektrik santrali için sırası ile, 3.8x10-3 $kgCO_2$-eşdeğer/MJ ve 1.2x10-1 $kgCO_2$-eşdeğer/MJ olan küresel ısınma potansiyeli değerleri ile karşılaştırıldığında yüzen rüzgar türbinlerinin suda kurulu türbinlerle yakın küresel ısınma potansiyeline sahip

olduğu ancak doğalgaz çevrimli santrallerden oldukça az miktarda küresel ısınma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer çevresel etmenlerden 3 tanesinde suda kurulu yüzen rüzgar türbininin doğalgaz çevrim santraline oranla insan üzerinde zehirlilik potansiyelinde 2 kat, tatlı su zehirlilik potansiyelinde 5.6 kat, toprağa olan zehirlilik potansiyelinde ise 5 kat fazla olumsuz çevresel etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Wagner vd. [71] Kuzey Denizinde bulunan, REpower ve Multibrid firmaları tarafından imal edilmiş altışar adet 5 MW kapasiteli toplam 12 adet rüzgar türbininden oluşan ve Almanya'nın ilk su üstü rüzgar santrali olan Alpha Ventus rüzgar tarlasının yaşam döngü analizini yapmışlardır. Sistem, GaBi YDA programı ile modellenmiş ve ISO 14040 ve ISO 14044 standartları çerçevesinde analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu, enerji geri kazanım süresi 10 ay, atmosfere verilen sera gazlarının geri kazanım süresi ise 10.5 ay olarak bulunmuştur. Küresel ısınma potansiyeli 32 gCO_2-eşdeğer/kWh olarak hesaplanmış bu değer Almanya'nın elektrik piyasasının genel küresel ısınma potansiyeli değeri olan 665 gCO_2-eşdeğer/kWh ile karşılaştırılmış ve incelenen sistemin küresel ısınma potansiyelinin diğer elektrik üretim tekniklerinin küresel ısınma potansiyellerine oranla çok daha az olduğu vurgulanmıştır.

4. BÖLÜM

KAYSERİ İLİ PINARBAŞI İLÇESİ İÇİN RÜZGAR ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİNİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

4.1. Giriş

Bu çalışmada Kayseri ili Pınarbaşı ilçesinde kurulduğu varsayılan 330, 500, 810, 2050 ve 3020 kW kapasiteli beş farklı rüzgar türbininin 50, 80 ve 100 m kule yükseklikleri için 15 farklı senaryo oluşturularak yaşam döngü analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu nedenle ilk olarak bölgenin rüzgar potansiyeli belirlenecek ve bu rüzgar potansiyeline uygun rüzgar türbinleri seçilecektir. Daha sonra seçilen rüzgar türbinlerinden bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı hesaplanacaktır. Her bir senaryo için GaBi4 bilgisayar programı kullanılarak farklı YDA modelleri oluşturup seçilen türbinlerin çevresel etkileri incelenecektir.

4.2. Pınarbaşı'nın Yeri ve İklim Yapısı

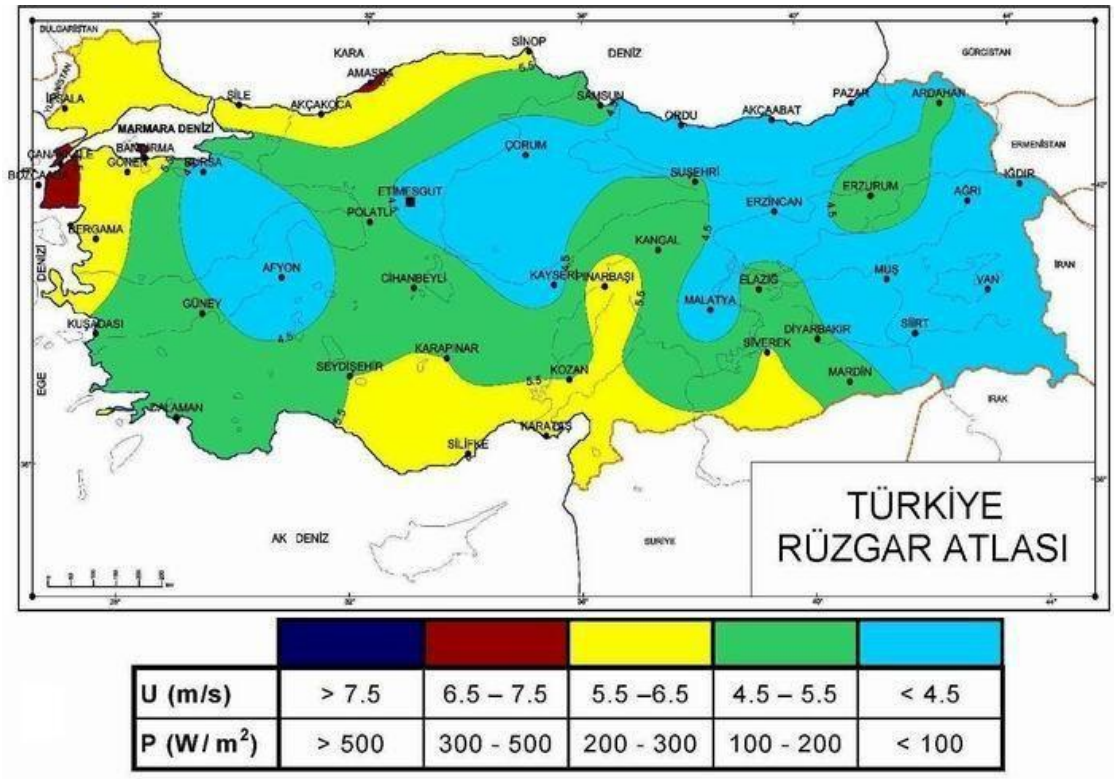
Pınarbaşı, Kayseri iline bağlı bir ilçe olup il merkezine 90 km uzaklıktadır. Pınarbaşı $38^{o}43'$ enlem ve $36^{o}24'$ boylamlarında bulunmakta olup ilçenin yüzölçümü 3328 km^{2}'dir. İlçe merkezi deniz seviyesinden 1546 m yüksektedir. İlçe merkezi düz alanda kurulmuş olmasına rağmen ilçeye bağlı yerleşim birimleri genel olarak dağlık ve engebeli alanlarda bulunmaktadır. Pınarbaşı'nda Doğu Anadolu ikliminin karakteri olan karasal iklim hakimdir. Kışları soğuk, yazları kurak ve serindir. Yıllık yağış ortalaması metrekare başına 492 kg'dır. İlçeden geçen demir yolu hattının bulunmaması, devlet

yatırımının olmaması ve özel sektör yatırımının az olması nedeniyle ilçe ekonomisi gelişememiştir [72].

4.3.Pınarbaşı İlçesinin Rüzgar Potansiyeli

Pınarbaşı, coğrafi özellikleri bakımından rüzgar potansiyeli olarak uygun değerlere sahiptir. Bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemek için daha önce çalışmalar yapılmış ve yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir [10, 16, 35].

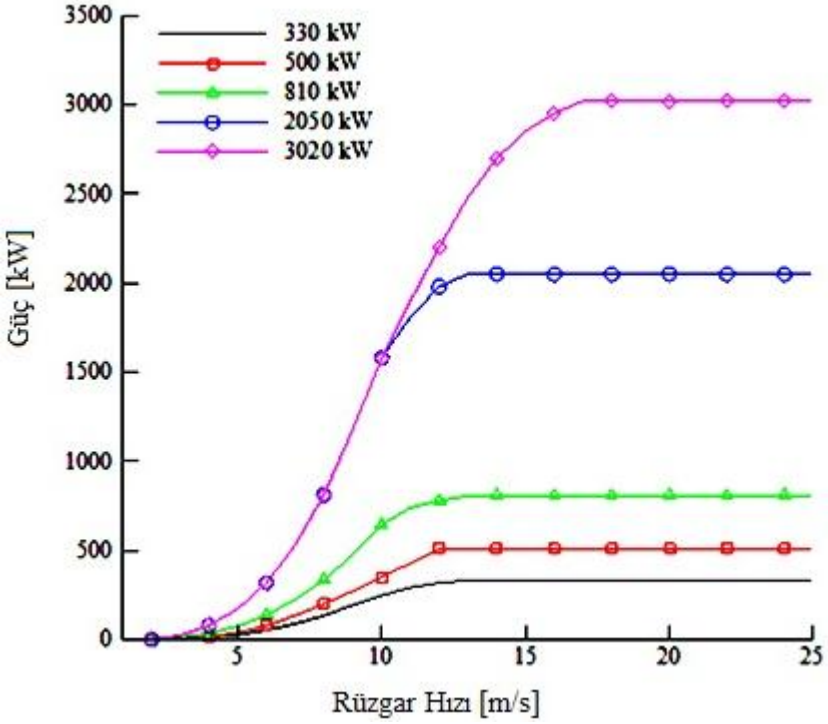
Şekil 4.1'de verilen ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye rüzgar atlasına göre Pınarbaşı bölgesinin yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Türkiye Rüzgar Atlası (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki açık yüzeyler için rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları) [73]

4.4. Seçilen Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilebilecek Enerji

Seçilen rüzgar türbinlerinden üretilebilecek güç bölgenin rüzgar potansiyeline ve türbinlerin karakteristik özelliklerine bağlıdır. Şekil 4.2'de ele alınan rüzgar türbinlerinin güç eğrileri, Tablo 4.1'de bu türbinlerin karakteristik özellikleri görülmektedir.



Şekil 4.2. Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Güç Eğrileri [74]

Türbin üretici firmaları tarafından verilen bu güç eğrileri kullanılarak Bölüm 2.6'da anlatıldığı gibi her türbin için altıncı dereceden hız-güç ilişkisini veren denklemler elde edilmiş, elde edilen bu denklemlerde saatlik rüzgar verileri yerlerine koyularak rüzgar türbininden üretilebilecek güç hesaplanmıştır. Daha sonra Denklem 2.8 kullanılarak her bir türbinden bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisi hesaplanmıştır.

Tablo 4.1. Seçilen Türbinlerin Karakteristik Özellikleri [74]

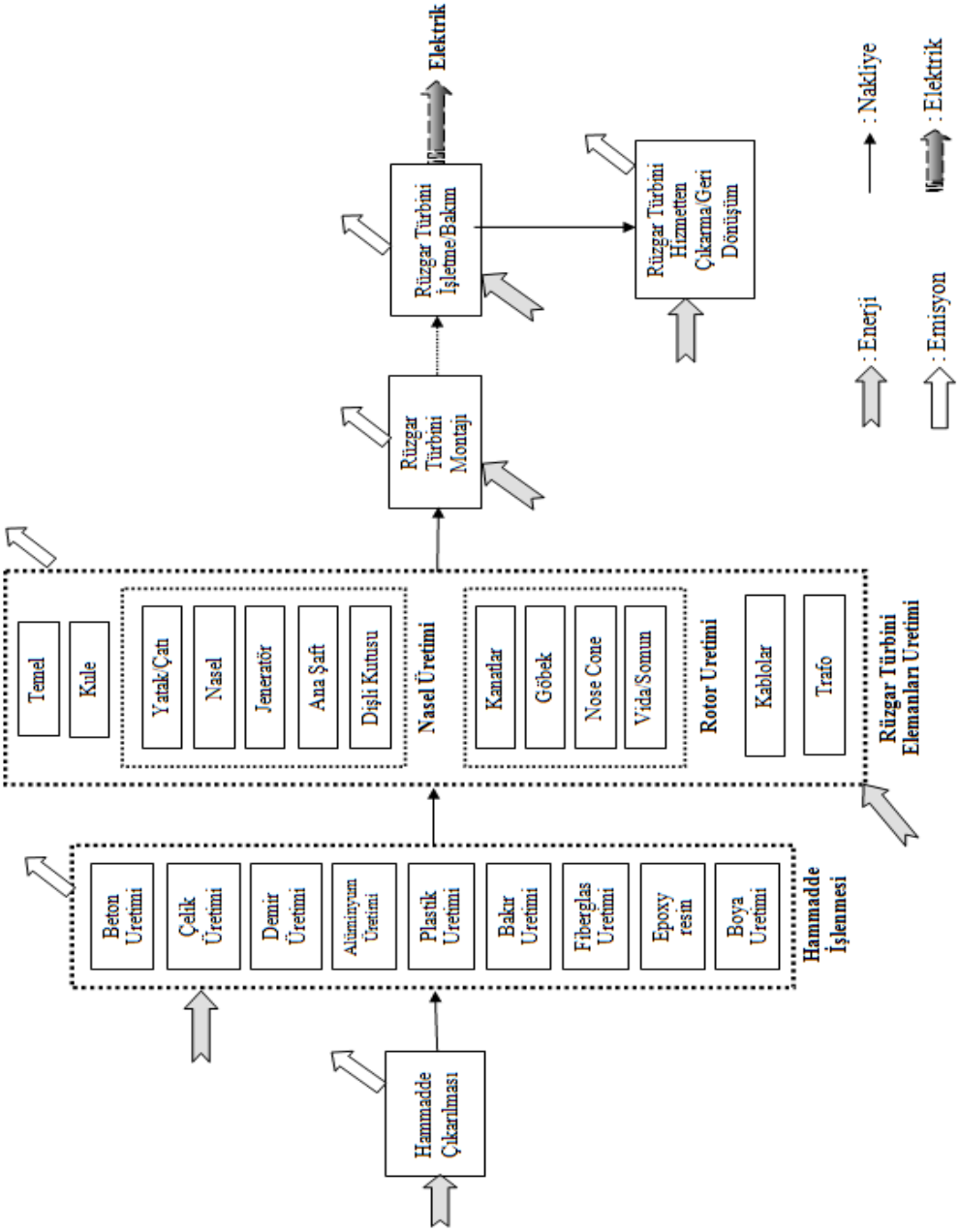
	330 kW (Enercon E33)	500 kW (Soyut Wind)	810 kW (Enercon E53)	2050 kW (Enercon E82)	3050 kW (Enercon E82)
Kapasite [kW]	330	500	810	2050	3020
Rotor Çapı [m]	33	48	53	82.00	82.00
Süpürme Alanı [m^2]	876	1560	2198	5281	5281
Güç Üretmeye Başlama Hızı [m/s]	3	3	2	2	2
Güç Üretmeyi Bitirme Hızı [m/s]	25	25	25	25	25
Maksimum Güç Üretme Hızı [m/s]	13	12	13	13	17

4.5. Kayseri İli Pınarbaşı İlçesi İçin Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yaşam Döngü Analizi

Bu çalışmada, Kayseri ili Pınarbaşı ilçesi için rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim sistemlerinin yaşam döngü analizleri yapılmıştır. Bu amaçla sistemlerin modellenmesi ve hesaplamaların yapılabilmesi için GaBi4 paket programı seçilmiştir. Bu programın seçilmesinin nedeni yaygın olarak kullanılması, güncel ve doğru veri tabanlarına sahip olmasıdır.

4.5.1. Amaç ve Kapsam

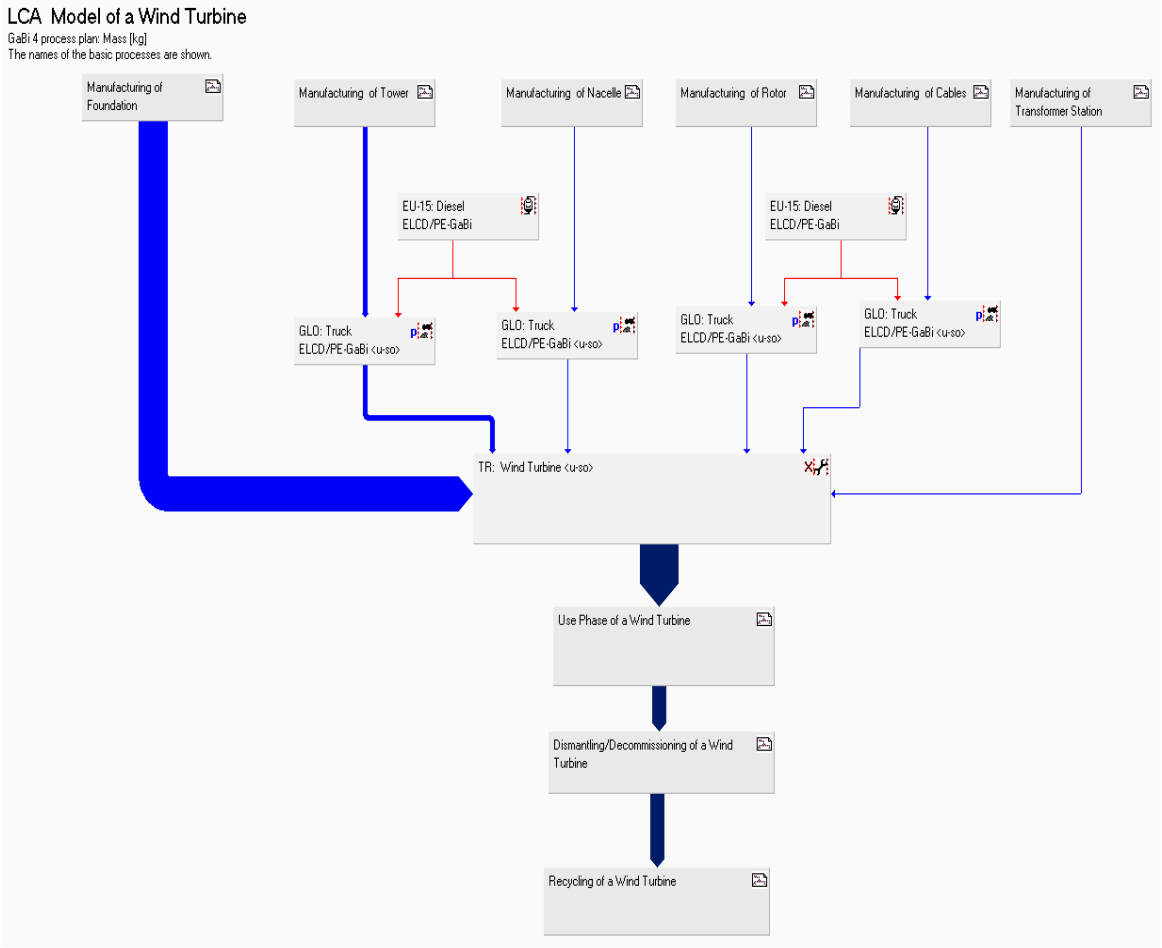
Bu çalışmada 330, 500, 810, 2050 ve 3020 kW kapasiteli beş farklı rüzgar türbininin 50, 80 ve 100 m kule yükseklikleri için yaşam döngü analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçları türbin üretici firmalar, üniversiteler, yatırımcılar ve devlet kurumları kullanabilecektir. Fonksiyonel birim, seçilen türbinlerden üretilip şebekeye verilecek 1 kWh elektrik enerjisi olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucu elde edilecek sonuçlar bu fonksiyonel birime göre değerlendirilecektir. Rüzgar türbinlerinin ömürleri üretici firma verilerine göre 20 yıl olarak kabul edilmiş ve bir defa dişli kutusu değişmesi öngörülmüştür. Ele alınan türbinlerin genel sistem sınırları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Rüzgar Türbini Sistem Sınırları [74]

Şekil 4.3'den görüleceği gibi bu tez çalışmasında sistem sınırları türbin bileşenlerini imalat etmek için hammadde çıkarılmasından sistemin geri dönüşümünü tamamlamasına kadar olan süreçteki enerji giriş çıkışını ve çevresel etkileri kapsamaktadır. Nakliye sürecinde, tüm mesafeler, taşıt tipleri ve kapasiteleri dikkate alınmıştır. Rüzgar türbini işletme ve bakım sürecinde türbinin yılda iki kere kontrol edildiği ve bakımının yapıldığı varsayılmış kullanılan malzeme ve nakliye girdileri

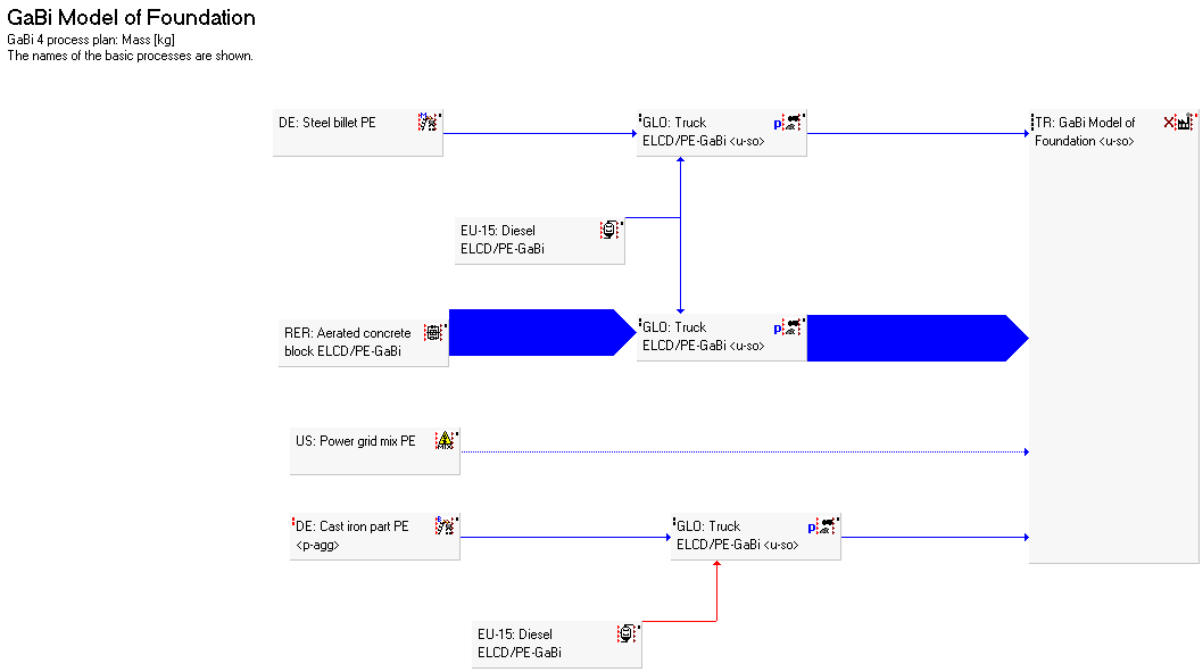
dikkate alınmıştır. Rüzgar türbini hizmetten çıkarma ve geri dönüşüm işlemleri daha önce yapılmış çalışmalardan [55, 57, 65, 70] ve bazı varsayımlardan yola çıkılarak modellenmiştir. Bu varsayımlar, geri dönüşümü yapılabilen malzemelerin %90 oranında geri dönüşümünün yapılıp tekrar hammadde olarak kullanılabilecek durumda olması geri kalan %10'luk kısmın ise toprakta bertaraf edilmesi ve geri dönüşüm işlemlerinin türbinin kurulduğu bölgeden 250 km mesafede yapılması şeklindedir. GaBi4 paket programı ile modellenen genel bir rüzgar türbini sistemi Şekil 4.4'de verilmiştir.



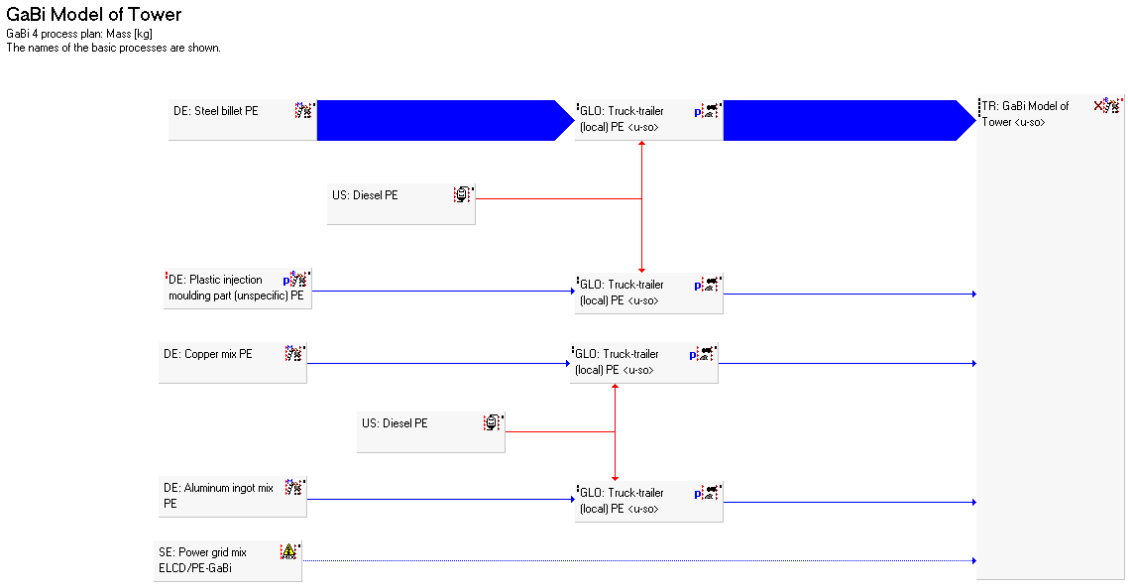
Şekil 4.4. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Genel Bir Rüzgar Türbini Sistemi

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi sistem temel üretimi, kule üretimi, nasel üretimi, rotor üretimi, kabloların üretimi, nakliye, türbin montajı, işletme ve bakım, hizmetten çıkarma, söküm ve geri dönüşüm alt sistemlerinden meydana gelmektedir.

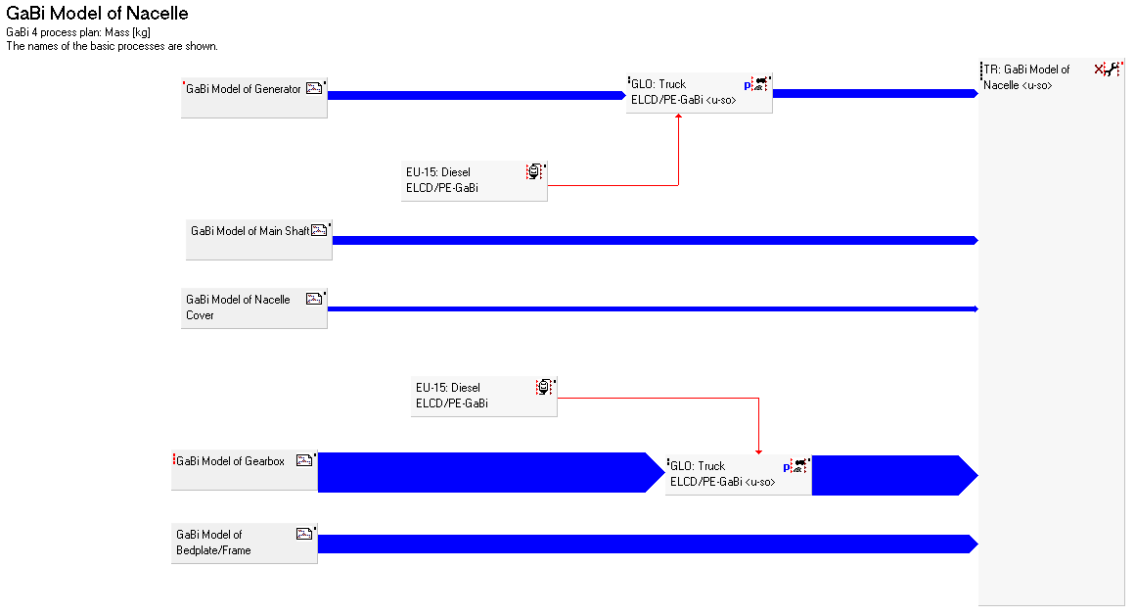
GaBi4 programı ile modellenen türbinin temel kısmı Şekil 4.5’te, kule kısmı Şekil 4.6’da, nasel kısmı Şekil 4.7’de, rotor kısmı Şekil 4.8'de ve bu bileşenlerin montaj edilmiş hali Şekil 4.9'da verilmiştir.



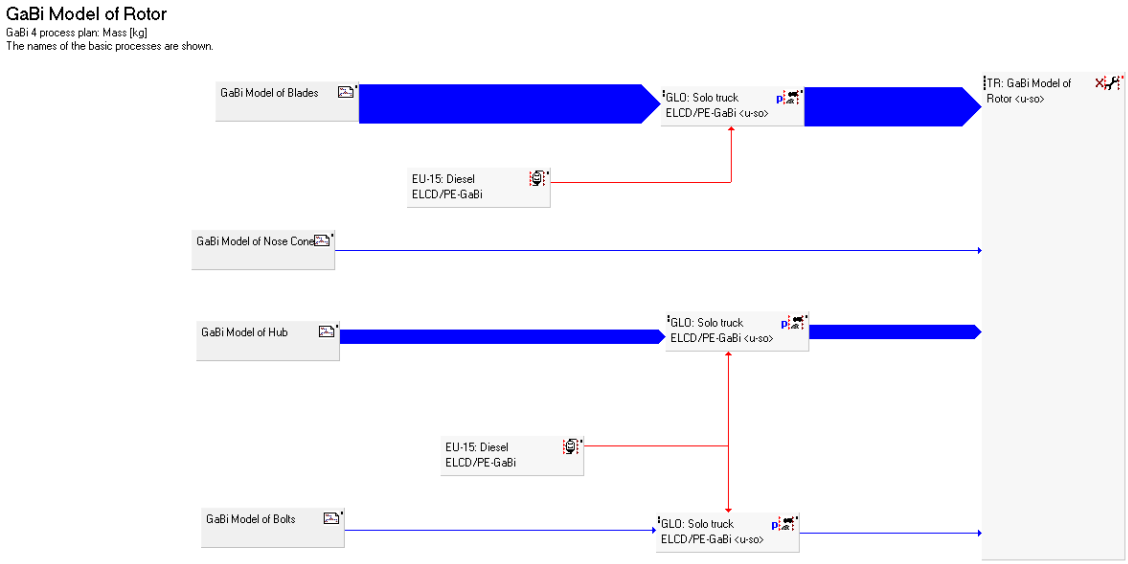
Şekil 4.5. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Temel Kısmı



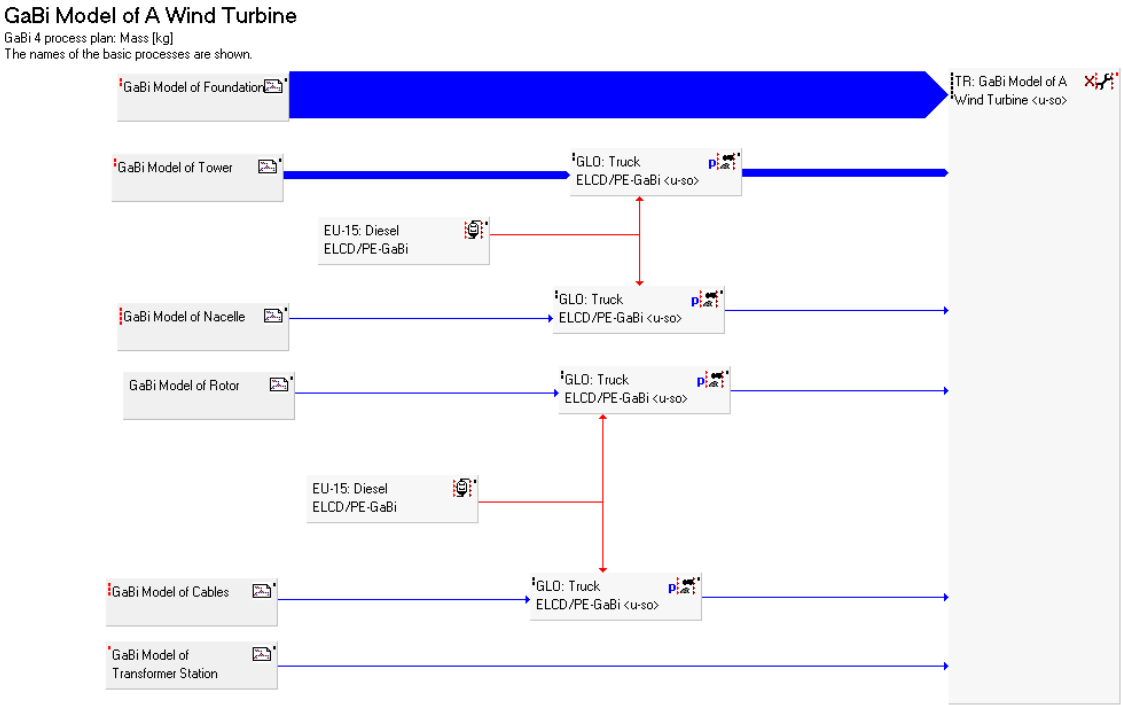
Şekil 4.6. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Kule Kısmı



Şekil 4.7. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Nasel Kısmı



Şekil 4.8. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Türbinin Rotor Kısmı



Şekil 4.9. GaBi4 Paket Programı ile Modellenen Rüzgar Türbini

4.5.2. Envanter Analizi

Modellenen sistemin tüm süreçleri için gerekli olan girdiler üretici firmalardan ve daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilmiştir. Envanter analizi, yaşam döngü analizinin en önemli safhası olduğundan elde edilen verilerin kaynaklarının doğruluğu oldukça önemlidir. Bu nedenle farklı kaynaklardan da veriler doğrulanmıştır. Tablo 4.2'de 330 kW, 500 kW ve 810 kW kapasiteli rüzgar türbinlerinin yüzde olarak malzeme girdileri verilmiştir.

Tablo 4.2. 330 kW, 500 kW ve 810 kW Kapasiteli Rüzgar Türbinlerine Yüzde Olarak Malzeme Girdileri [74]

Türbin Ana Elemanları	Malzemeler	330 kW			500 kW			810 kW		
		Kule Yüksekliği [m]			Kule Yüksekliği [m]			Kule Yüksekliği [m]		
		50	80	100	50	80	100	50	80	100
Temel	Beton	78.27	76.57	75.74	76.17	75.34	74.86	76.85	75.57	74.88
	Çelik	2.20	2.62	3.03	2.27	2.81	2.91	2.36	2.59	2.94
	Demir	1.42	2.18	2.65	1.99	2.28	2.49	1.58	2.06	2.06
Kule	Çelik	13.33	13.33	13.15	13.26	12.99	13.47	11.82	12.49	12.65
	Alüminyum	0.13	0.17	0.19	0.19	0.21	0.22	0.19	0.21	0.24
	Plastik	0.09	0.11	0.11	0.09	0.13	0.15	0.13	0.17	0.20
	Bakır	0.08	0.10	0.10	0.08	0.11	0.13	0.11	0.15	0.18
	Boya	0.21	0.20	0.23	0.15	0.18	0.20	0.16	0.21	0.24
Nasel	Çelik	3.03	2.75	2.65	3.75	3.53	3.43	3.92	3.95	4.10
	Bakır	0.08	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12	0.10	0.11	0.12
	Alüminyum	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
	Demir	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Epoksi/Resin	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fiberglas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rotor	Çelik	0.95	0.80	0.69	0.88	0.82	0.77	0.83	0.80	0.77
	Fiberglas	0.54	0.46	0.40	0.59	0.54	0.52	0.66	0.64	0.61
	Epoksi/Resin	0.43	0.36	0.32	0.40	0.37	0.35	0.36	0.35	0.34
Diğer Elemanlar	Alüminyum	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07
	Bakır	0.14	0.15	0.15	0.12	0.14	0.14	0.13	0.15	0.16
	Plastik	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	Çelik	0.26	0.31	0.34	0.30	0.35	0.37	0.32	0.35	0.38

Tablo 4.2'de 330 kW, 500 kW ve 810 kW kapasiteli rüzgar türbini sistemlerini oluşturan ana bileşenler ve bu bileşenleri oluşturan malzemeler gösterilmiştir.

Tabloda görüldüğü gibi türbinlerin nasel kısımlarının sadece çelik, bakır ve alüminyum malzemelerinden meydana geldiği varsayılmıştır. Tablo 4.3'te 2050 kW ve 3020 kW kapasiteli rüzgar türbini sistemlerini oluşturan ana bileşenler ve bu bileşenleri oluşturan malzemelerin sisteme olan girdileri yüzde olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.3. 2050 kW ve 3020 kW Kapasiteli Rüzgar Türbinlerine Yüzde Olarak Malzeme Girdileri [74]

Türbin Ana Elemanları	Malzemeler	2050 kW			3020kW		
		Kule Yüksekliği [m]			Kule Yüksekliği [m]		
		50	80	100	50	80	100
Temel	Beton	75.50	74.48	72.12	69.34	67.49	65.99
	Çelik	2.48	2.52	2.78	3.27	3.32	4.17
	Demir	1.15	1.47	2.39	1.89	2.29	2.65
Kule	Çelik	10.97	11.56	12.93	12.89	13.82	14.41
	Alüminyum	0.17	0.21	0.24	0.52	0.63	0.76
	Plastik	0.09	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23
	Bakır	0.09	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23
	Boya	0.17	0.19	0.21	0.17	0.19	0.22
Nasel	Çelik	3.93	3.78	3.64	5.50	5.45	5.61
	Bakır	0.25	0.25	0.25	0.31	0.31	0.31
	Alüminyum	0.23	0.22	0.21	0.18	0.17	0.17
	Demir	0.92	0.89	0.88	1.03	1.04	1.07
	Epoksi/Resin	0.12	0.16	0.16	0.26	0.27	0.28
	Fiberglas	0.08	0.11	0.14	0.21	0.22	0.23
Rotor	Çelik	0.95	0.87	0.79	0.89	0.82	0.79
	Fiberglas	0.94	0.85	0.78	0.89	0.81	0.78
	Epoksi/Resin	1.40	1.27	1.16	1.23	1.13	1.09
Diğer Elemanlar	Alüminyum	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09
	Bakır	0.15	0.16	0.17	0.21	0.21	0.21
	Plastik	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12	0.12
	Çelik	0.35	0.37	0.43	0.43	0.47	0.58

4.5.3. Etki Değerlendirmesi

Etki değerlendirmesi safhasında envanter analizinde toplanan veriler GaBi4 programı ile analiz edilmiş, sonuçlar CML2001 YDA metoduna göre hesaplanmıştır. Tüm malzeme ve enerji girdileri varsayımlara ve sınırlamalara bağlı kalınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çevresel etkiler ve enerji değerleri açısından fonksiyonel birim esas alınarak karşılaştırılmıştır.

4.5.3.1. Enerji Geri Kazanım Süresi

Enerji geri kazanım süresi, rüzgar türbini sistemini oluşturmak için tüketilen enerjiyi geri kazanım süresi olarak ifade edilmektedir. Bu kavram sistemin, kullandığı enerjiyi ne kadar sürede dengeleyebileceğini hesaplamak açısından önemlidir.

4.5.3.2. Çevresel Etkiler

Asitleşme potansiyeli (AP) asitleştirici kirleticilerin toprakta, suda, organizmalarda ve ekosistemde birikmesidir. NH_x, NO_x, SO_2 ve HCl başlıca asitleştirici bileşenlerdir. Bu etki kategorisinin birimi sülfür dioksit-eşdeğer (kgSO_2-eşdeğer)'dir.

Ötrofikasyon potansiyeli (EP) çevreye olan zararlı emisyonlardan dolayı azot ve fosfor gibi bileşenlerin toprakta ve suda normal sınırların dışında bulunmasıdır. Bu maddelerdeki artış, bazı canlı türlerinin dengesiz çoğalmasına neden olmakta ve ekosistem bu durumdan olumsuz etkilenmektedir. Bu etki kategorisi fosfat-eşdeğer (kgFosfat-eşdeğer) birimi ile ifade edilmektedir.

Küresel ısınma potansiyeli (GWP) atmosferde bulunan sera gazlarının etkisiyle dünyanın sıcaklığının artmasıyla ilgili etki kategorisidir. Küresel ısınma iklim değişikliklerine ve canlılar üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Küresel ısınma potansiyelinin birimi karbondioksit-eşdeğer (kgCO_2-eşdeğer)'dir.

Temiz suda yaşayan canlıların zehirlenme potansiyeli (FAETP) çevreye olan zararlı emisyonlardan dolayı tatlı suda yaşayan canlıların olumsuz etkilenmesi ile ilgili bir etki kategorisidir. Bu etki kategorisinin birimi 1.4-diklorobenzen-eşdeğer (kgDCB-eşdeğer)'dir.

İnsan zehirlenmesi potansiyeli (HTP) zararlı emisyonların insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini belirten etki kategorisidir. Bu etki kategorisinin birimi 1.4-diklorobenzen-eşdeğer (kgDCB-eşdeğer)'dir.

Fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (POCP) ozon gibi reaktif kimyasalların güneş ışığı etkisi ile oluşması ile ilgili bir etki kategorisidir. Oluşan bu reaktif maddelerin

insan sağlığına oldukça fazla zararları vardır. Bu etki kategorisi kgEtilen-eşdeğer birimi ile ifade edilmektedir.

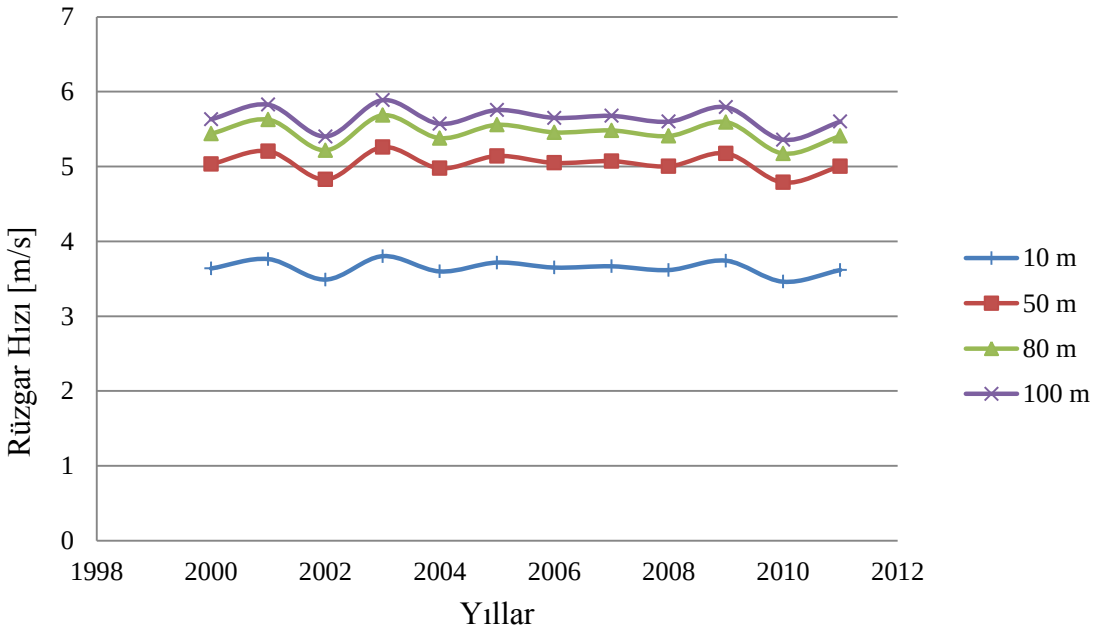
Karada yaşayan canlıların zehirlenme potansiyeli (TETP) atmosfere olan zararlı emisyonlardan dolayı karada yaşayan canlıların sağlığının bozulmasıyla ilgili bir çevresel etki kategorisidir ve 1.4-diklorobenzen-eşdeğer (kgDCB-eşdeğer) birimi ile ifade edilir.

5. BÖLÜM

BULGULAR

5.1. Pınarbaşı Bölgesinin Rüzgar Potansiyeli İle İlgili Bulgular

Bu çalışmada Pınarbaşı'nın rüzgar potansiyelini belirlemek amacıyla 2000 ile 2011 yılları arasında 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar verileri kullanılmıştır. 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızları Bölüm 2.5'de anlatıldığı gibi Denklem 2.6 kullanılarak türbin yükseklikleri olan 50 m, 80 m ve 100 m için hesaplanmıştır. Bu denklemde yüzey pürüzlülük katsayısı (z_s) bölgenin coğrafi koşullarına uygun olarak 0.15 seçilmiştir. Şekil 5.1'de 2000 ile 2011 yılları arasında 10 m yükseklikte ölçülen ve 50 m, 80 m ve 100 m için hesaplanan yıllık ortalama rüzgar hızları verilmiştir.



Şekil 5.1. Pınarbaşı Bölgesi için 2000 ile 2011 Yılları Arasında 10 m, 50 m, 80 m ve 100 m Yükseklilerde Yıllık Ortalama Rüzgar Hızları [74]

5.2. Ele Alınan Türbinlerden Üretilebilecek Enerji İle İlgili Bulgular

Seçilen türbinlerden üretilebilecek enerji saatlik rüzgar verileri ve türbin güç eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda bölgede kurulması en makul türbin 100 m kule yüksekliğindeki 2050 kW kapasiteli türbindir. Seçilen türbinlerden bir yılda üretilebilecek elektrik enerjisi miktarları Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi kule yüksekliğinin artmasıyla türbinlerden üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı da artmaktadır. 2050 ve 3020 kW kapasiteli türbinlerin 100 m kule yüksekliğindeki ürettikleri elektrik enerjisi birbirine yakın olmalarına rağmen 2050 kW kapasiteli türbinin kapasite faktörü daha yüksek olduğu için bu türbin seçilen türbinler arasında Pınarbaşı'na kurulması en uygun türbin olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.1. Seçilen Türbinlerden Üretilebilecek Elektrik enerjisi Miktarları

Türbin	Kule Yüksekliği [m]	Türbinden Üretilebilecek Güç [MWh]	Kapasite Faktörü(C_f) [%]
330 kW	50	471.05	16.29
	80	608.18	21.04
	100	678.16	23.46
500 kW	50	693.14	15.83
	80	902.63	20.61
	100	1008.12	23.02
810 kW	50	1180.01	16.63
	80	1509.09	21.27
	100	1674.60	23.60
2050 kW	50	2754.52	15.34
	80	3555.67	19.80
	100	3963.15	22.07
3020 kW	50	2726.14	10.30
	80	3558.86	13.45
	100	3988.89	15.08

5.3. Yaşam Döngü Analizi İle İlgili Bulgular

5.3.1. Enerji İle İlgili Bulgular

Seçilen türbinlerin tükettikleri enerjiyi geri kazanma süreleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Enerji Geri Kazanım Süreleri

Türbin	Kule Yüksekliği [m]	Enerji Geri Kazanım Süresi [Ay]
330 kW	50	35.6
	80	32.0
	100	29.7
500 kW	50	34.0
	80	27.9
	100	26.2
810 kW	50	23.0
	80	18.8
	100	17.9
2050 kW	50	17.3
	80	14.9
	100	14.6
3020 kW	50	26.0
	80	21.6
	100	20.4

Tablo 5.2'den görüldüğü gibi seçilen türbinler içerisinde tüm ömrü boyunca tükettiği enerjiyi en kısa sürede karşılayan türbin 2050 kW kapasiteli 100 m kule yüksekliğindeki türbindir. Bu türbin elektrik üretmeye başladıktan 14.6 ay sonra kurulması için gerekli olan enerjiyi dengeleyecektir.

Seçilen türbinlerin bileşenlerinin enerji girdileri yüzde olarak Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Genel olarak tüm türbinlerin temel kısmındaki enerji girdilerinin fazla olmasının nedeni bu kısmın yapısında bulundurduğu çelik ve beton oranlarının fazla olmasıdır, aynı şekilde kule ve nasel kısımlarının çelik oranlarının fazla olması enerji girdilerinin de artmasına neden olmuştur.

Tablo 5.3. Türbin Bileşenlerinin Yüzde Olarak Enerji Girdileri

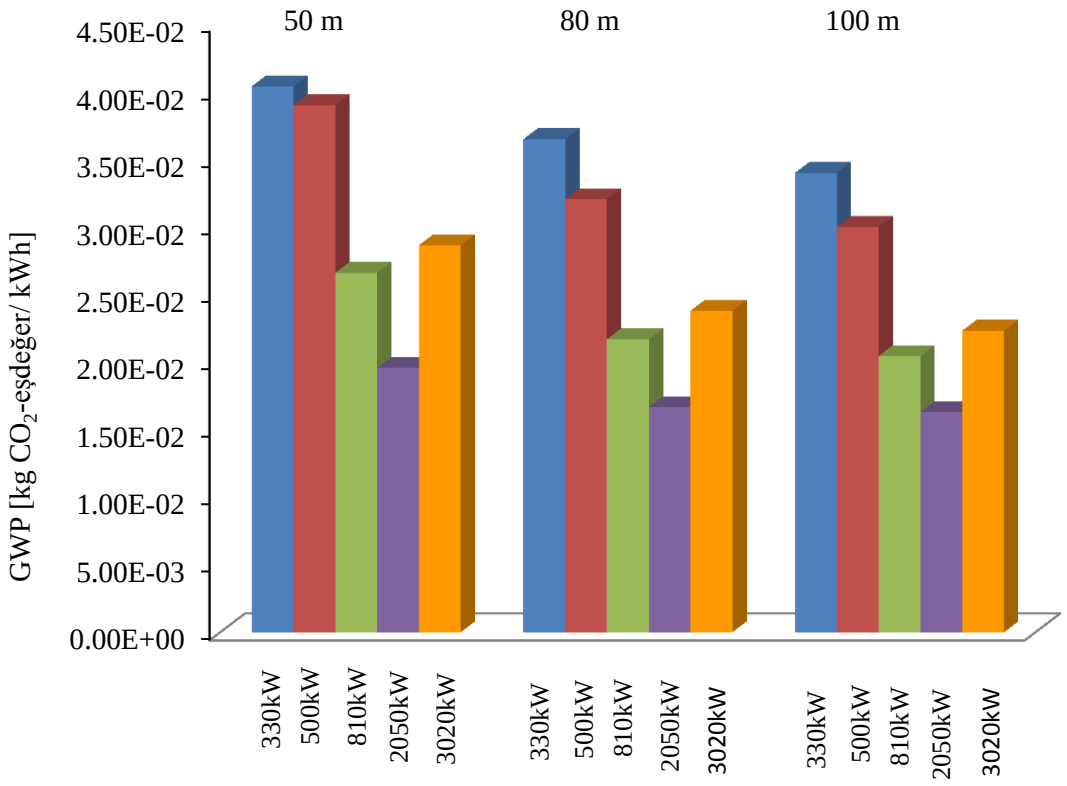
Türbin	Kule Yüksekliği [m]	Enerji Girdileri [%]				
		Temel	Kule	Nasel	Rotor	Diğer Bileşenler
330 kW	50	35.30	30.68	18.41	10.95	4.66
	80	37.49	32.49	16.48	9.45	4.09
	100	39.06	33.64	15.35	8.31	3.65
500 kW	50	34.52	30.13	21.87	10.03	3.46
	80	35.46	31.02	20.91	9.36	3.25
	100	36.22	32.18	20.83	8.94	3.23
810 kW	50	36.70	28.77	22.57	8.91	3.05
	80	36.53	30.16	21.88	8.49	2.93
	100	36.46	31.13	21.50	8.08	2.82
2050 kW	50	27.37	18.83	30.20	18.58	5.03
	80	27.44	23.24	28.35	16.65	4.56
	100	28.05	25.33	27.02	15.36	4.45
3020 kW	50	25.03	26.14	29.38	15.02	4.44
	80	25.70	28.13	28.22	13.83	4.28
	100	25.60	29.53	27.85	13.10	4.22

5.3.2. Çevresel Etkiler İle İlgili Bulgular

GaBi4 YDA programında modellenen rüzgar türbinlerinin çevresel etki kategorileri ve bu çevresel etkilerin miktarları Tablo 5.4'de verilmiştir. Bu değerler fonksiyonel birim tarafından normalleştirilmiş değerlerdir. Her bir çevresel etki değeri ele alınan türbinler tarafından üretilen ve şebekeye verilen 1 kWh elektrik enerjisi başına düşen değerlerdir. Tablo 5.4'e bakıldığında kule yüksekliğinin artmasıyla çevresel etkilerin azaldığı gözlemlenmektedir. Kule yüksekliğinin artmasıyla rüzgar türbini üretiminde kullanılan malzeme ve enerji girdileri de artmaktadır ancak kule yüksekliği arttıkça üretilebilecek elektrik enerjisi de artmakta ve birim elektrik enerjisi başına düşen çevresel etkiler de azalmaktadır. Bu duruma örnek olarak küresel ısınma potansiyelinin türbin kule yüksekliğiyle değişimi Şekil 5.2'deki grafikte, asitleşme potansiyelinin türbin kule yüksekliğiyle değişimi Şekil 5.3'teki grafikte gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Rüzgar Türbinlerinin Çevresel Etki Kategorileri ve Bu Çevresel Etkilerin Miktarları [74]

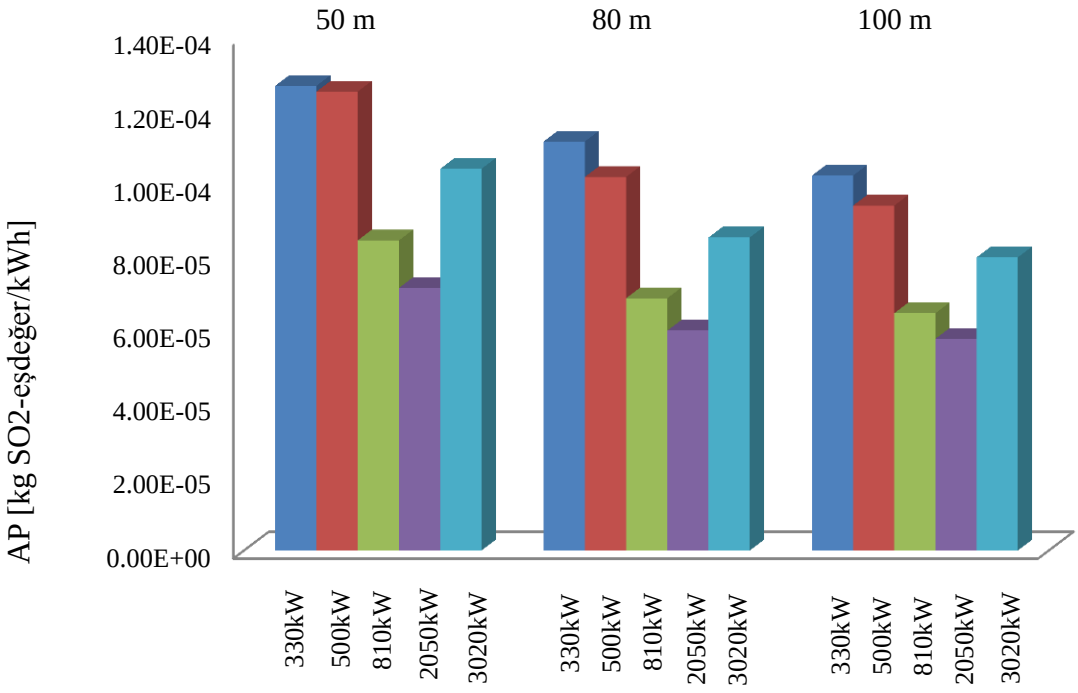
Etki Kategorisi [CML2001]	Kule Yüksekliği [m]	330 kW	500 kW	810 kW	2050 kW	3020 kW
AP [$kgSO_2$/kWh]	50	1.27E-04	1.25E-04	8.46E-05	7.17E-05	1.04E-04
	80	1.12E-04	1.02E-04	6.89E-05	6.00E-05	8.55E-05
	100	1.02E-04	9.41E-05	6.48E-05	5.78E-05	8.00E-05
EP [kgFosfat/kWh]	50	1.27E-05	1.25E-05	8.56E-06	6.77E-06	9.53E-06
	80	1.11E-05	1.01E-05	6.94E-06	5.58E-06	7.76E-06
	100	1.01E-05	9.29E-06	6.49E-06	5.39E-06	7.19E-06
GWP [$kgCO_2$/kWh]	50	4.04E-02	3.90E-02	2.66E-02	1.95E-02	2.86E-02
	80	3.65E-02	3.20E-02	2.17E-02	1.66E-02	2.38E-02
	100	3.40E-02	3.00E-02	2.04E-02	1.63E-02	2.23E-02
FAETP [kgDCB/kWh]	50	7.18E-05	7.05E-05	5.05E-05	4.19E-05	7.14E-05
	80	6.36E-05	5.88E-05	4.19E-05	3.74E-05	5.92E-05
	100	5.90E-05	5.56E-05	4.00E-05	3.63E-05	5.64E-05
HTP [kgDCB/kWh]	50	2.02E-03	2.01E-03	1.43E-03	1.22E-03	2.05E-03
	80	1.79E-03	1.68E-03	1.18E-03	1.09E-03	1.70E-03
	100	1.66E-03	1.23E-03	1.12E-03	1.05E-03	1.63E-03
POCP [kgEtilen/kWh]	50	1.38E-05	1.36E-05	9.09E-06	7.16E-06	1.09E-05
	80	1.23E-05	1.11E-05	7.43E-06	6.11E-06	9.08E-06
	100	1.14E-05	1.04E-05	7.03E-06	5.97E-06	8.55E-06
TETP [kgDCB/kWh]	50	4.82E-05	4.62E-05	3.24E-05	2.62E-05	3.74E-05
	80	4.28E-05	3.80E-05	2.62E-05	2.22E-05	3.06E-05
	100	3.95E-05	3.54E-05	2.44E-05	2.12E-05	2.86E-05



Şekil 5.2. Küresel Isınma Potansiyelinin Türbin Kule Yüksekliğiyle Değişimi

Şekilden görüldüğü gibi kule yüksekliği arttıkça üretilen birim elektrik başına düşen küresel ısınma potansiyeli tüm türbinlerde azalmaktadır. 3020 kW kapasiteli türbinin küresel ısınma potansiyeli değerlerinin 2050 kW kapasiteli türbinden fazla olmasının nedeni türbinden üretilen elektrik enerjisinin küresel ısınmaya neden olan emisyonları dengeleyememesidir.

Şekil 5.3'te asitleşme potansiyelinin türbin kapasitesi ve kule yüksekliği ile olan değişimi gösterilmiştir. Türbin kapasitesinin ve kule yüksekliğinin artmasıyla malzeme ve enerji girdileri artmasına rağmen türbinlerden üretilen birim elektrik başına asitlenme potansiyelleri azalmaktadır bunun nedeni türbin kapasitesinin ve kule yüksekliğinin artmasıyla türbinden üretilen elektrik enerjisinin de artmasıdır.



Şekil 5.3. Asitleşme Potansiyelinin Türbin Kule Yüksekliğiyle Değişimi

Seçilen rüzgar türbini elemanlarının yüzde olarak çevresel etki değerleri 50 m kule yüksekliği için Tablo 5.5'te, 80 m kule yüksekliği için Tablo 5.6'da ve 100 m kule yüksekliği için Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Rüzgar Türbini Elemanlarının 50 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri [74]

Etki Kategorisi [CML2001]	Rüzgar Türbini Elemanları	330 kW	500 kW	810 kW	2050kW	3020 kW
AP [kgSO_2/kWh]	Temel	30.91	29.06	31.16	20.64	19.60
	Kule	23.43	23.47	22.26	12.64	20.16
	Nasel	29.57	33.89	34.52	47.08	43.37
	Rotor	9.00	8.49	7.56	13.13	11.10
	Diğer Elemanlar	7.09	5.09	4.50	6.51	5.77
EP [kgFosfat/kWh]	Temel	37.06	34.84	36.53	25.78	24.73
	Kule	19.99	19.65	17.94	12.80	16.49
	Nasel	26.63	30.89	32.53	36.97	37.14
	Rotor	12.28	11.46	10.17	20.35	17.80
	Diğer Elemanlar	4.04	3.16	2.83	4.10	3.83
GWP [kgCO_2/kWh]	Temel	46.64	45.01	47.19	35.47	33.13
	Kule	24.21	24.34	22.76	17.18	22.10
	Nasel	17.10	20.09	20.57	28.90	28.84
	Rotor	8.17	7.71	6.83	14.31	12.11
	Diğer Elemanlar	3.88	2.85	2.65	4.14	3.81
FAETP [kgDCB/kWh]	Temel	23.54	22.32	22.55	13.84	12.10
	Kule	29.30	29.84	30.28	18.74	26.63
	Nasel	32.24	36.26	37.47	53.93	47.61
	Rotor	5.92	5.21	4.45	5.70	4.57
	Diğer Elemanlar	9.00	6.37	5.25	7.80	9.09
HTP [kgDCB/kWh]	Temel	29.10	27.01	27.59	16.67	14.45
	Kule	25.58	26.54	26.84	16.60	25.84
	Nasel	33.60	37.57	38.04	57.09	49.25
	Rotor	3.47	3.15	2.74	3.57	2.88
	Diğer Elemanlar	8.25	5.74	4.78	6.07	7.58
POCP [kgEtilen/kWh]	Temel	28.70	27.29	29.48	21.04	19.60
	Kule	32.12	31.88	30.38	21.77	26.63
	Nasel	20.35	23.49	24.62	34.04	32.88
	Rotor	14.71	14.34	12.84	20.98	17.19
	Diğer Elemanlar	4.12	3.00	2.69	4.18	3.69
TETP [kgDCB/kWh]	Temel	59.58	56.48	58.12	39.36	36.26
	Kule	13.06	14.07	13.53	9.28	14.91
	Nasel	18.70	21.95	21.95	38.03	36.53
	Rotor	5.85	5.46	4.67	10.65	9.29
	Diğer Elemanlar	2.82	2.04	1.74	2.68	3.00

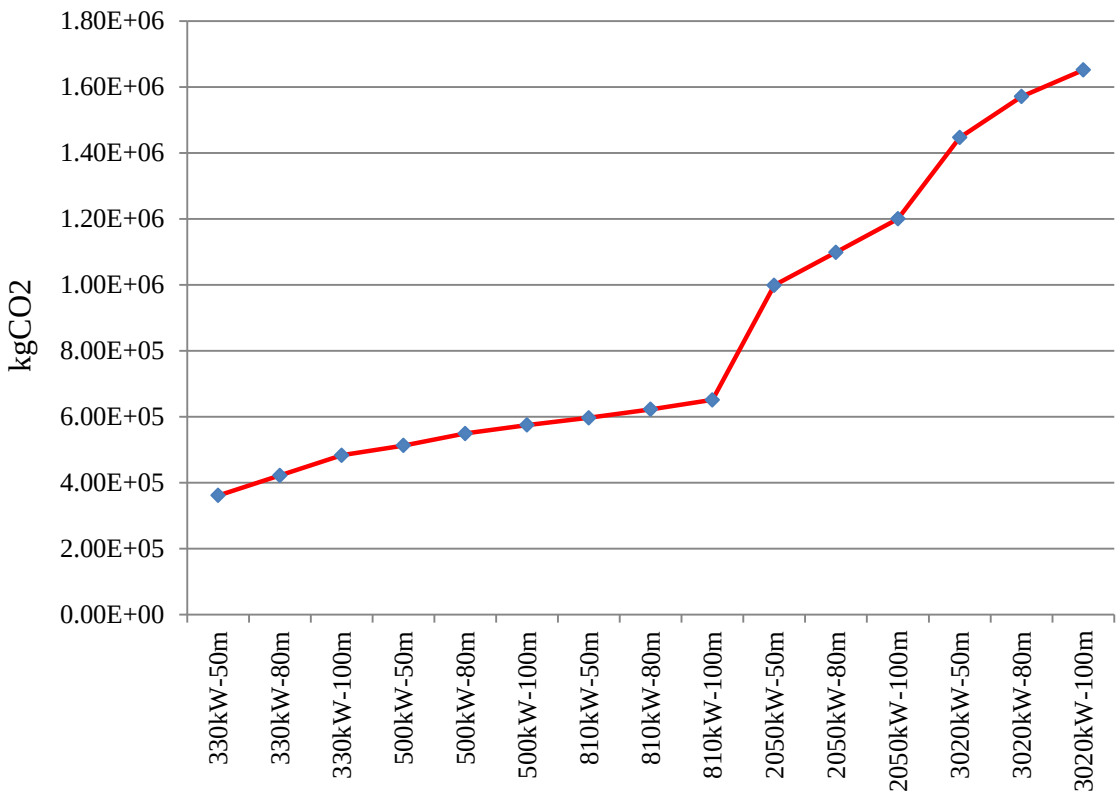
Tablo 5.6. Rüzgar Türbini Elemanlarının 80 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri [74]

Etki Kategorisi [CML2001]	Rüzgar Türbini Elemanları	330 kW	500 kW	810 kW	2050kW	3020 kW
AP [kgSO_2/kWh]	Temel	33.39	30.15	31.28	20.93	20.36
	Kule	25.58	24.30	23.53	17.69	22.35
	Nasel	26.77	32.70	33.57	43.92	41.49
	Rotor	7.92	8.01	7.26	12.01	10.36
	Diğer Elemanlar	6.34	4.84	4.36	5.45	5.45
EP [kgFosfat/kWh]	Temel	39.65	36.02	36.53	26.76	25.59
	Kule	21.54	20.18	19.08	14.73	17.94
	Nasel	24.20	29.73	31.80	35.90	36.02
	Rotor	10.86	10.83	9.81	19.20	16.75
	Diğer Elemanlar	3.74	3.23	2.78	3.42	3.71
GWP [kgCO_2/kWh]	Temel	48.97	45.81	47.08	36.19	33.91
	Kule	25.45	25.26	23.76	19.27	23.81
	Nasel	15.20	19.11	20.05	27.50	27.58
	Rotor	7.00	7.16	6.55	13.19	11.16
	Diğer Elemanlar	3.38	2.67	2.56	3.85	3.55
FAETP [kgDCB/kWh]	Temel	25.18	22.32	21.89	14.63	12.29
	Kule	32.55	33.30	33.66	20.17	30.51
	Nasel	29.05	33.80	35.36	52.35	44.57
	Rotor	5.23	4.76	4.16	5.47	4.22
	Diğer Elemanlar	7.99	5.83	4.92	7.38	8.41
HTP [kgDCB/kWh]	Temel	30.87	27.18	26.94	17.17	14.53
	Kule	28.45	29.22	29.73	17.69	29.96
	Nasel	30.30	35.39	36.22	54.18	45.87
	Rotor	3.07	2.91	2.58	3.35	2.65
	Diğer Elemanlar	7.32	5.31	4.52	7.61	6.99
POCP [kgEtilen/kWh]	Temel	31.03	28.49	29.59	21.54	20.37
	Kule	34.21	32.58	31.56	24.10	28.70
	Nasel	18.35	22.62	23.98	32.06	31.65
	Rotor	12.77	13.47	12.28	18.91	15.84
	Diğer Elemanlar	3.64	2.84	2.59	3.54	3.44
TETP [kgDCB/kWh]	Temel	61.12	57.08	57.66	40.40	36.41
	Kule	14.65	14.94	14.71	10.34	17.19
	Nasel	16.66	20.96	21.48	36.74	34.89
	Rotor	5.10	5.10	4.52	10.05	8.69
	Diğer Elemanlar	2.48	1.92	1.69	2.47	2.82

Tablo 5.7. Rüzgar Türbini Elemanlarının 100 m Kule Yüksekliğindeki Çevresel Etki Yüzdeleri [74]

Etki Kategorisi [CML2001]	Rüzgar Türbini Elemanları	330 kW	500 kW	810 kW	2050kW	3020 kW
AP [kgSO_2/kWh]	Temel	35.27	31.21	31.49	22.30	20.45
	Kule	26.96	25.40	24.40	17.62	23.90
	Nasel	24.99	31.52	32.93	42.82	40.57
	Rotor	7.05	7.77	6.96	11.45	9.87
	Diğer Elemanlar	5.73	4.10	4.22	5.80	5.22
EP [kgFosfat/kWh]	Temel	41.58	37.31	36.63	28.09	25.69
	Kule	22.67	21.16	19.74	15.48	18.82
	Nasel	22.53	29.18	31.42	35.33	35.74
	Rotor	9.72	10.57	9.45	18.30	16.11
	Diğer Elemanlar	3.50	1.78	2.76	2.81	3.64
GWP [kgCO_2/kWh]	Temel	50.54	46.25	47.00	37.81	33.99
	Kule	26.24	26.04	24.46	19.39	24.54
	Nasel	14.09	18.34	19.81	26.74	27.37
	Rotor	6.13	6.77	6.26	12.40	10.68
	Diğer Elemanlar	3.00	2.60	2.47	3.67	3.41
FAETP [kgDCB/kWh]	Temel	26.30	22.80	21.87	17.03	12.26
	Kule	35.24	34.98	34.99	13.24	32.54
	Nasel	26.68	32.24	34.41	55.99	43.15
	Rotor	4.65	4.58	3.99	5.78	4.02
	Diğer Elemanlar	7.13	5.41	4.73	7.95	8.03
HTP [kgDCB/kWh]	Temel	32.32	27.59	26.83	18.48	14.15
	Kule	30.24	31.05	31.06	18.14	33.39
	Nasel	28.11	33.66	35.28	53.69	43.45
	Rotor	2.74	2.79	2.48	3.29	2.47
	Diğer Elemanlar	6.58	4.91	4.35	6.39	6.54
POCP [kgEtilen/kWh]	Temel	32.75	29.41	29.85	21.90	20.39
	Kule	35.52	33.61	32.30	23.71	30.01
	Nasel	17.19	21.70	23.65	30.77	31.31
	Rotor	11.26	12.87	11.69	17.49	15.00
	Diğer Elemanlar	3.28	2.40	2.50	3.57	3.28
TETP [kgDCB/kWh]	Temel	62.24	57.64	57.13	42.81	35.80
	Kule	15.72	15.75	15.70	7.97	19.14
	Nasel	15.33	19.99	21.11	36.78	34.06
	Rotor	4.51	4.88	4.36	9.91	8.30
	Diğer Elemanlar	2.21	1.74	1.64	2.53	2.70

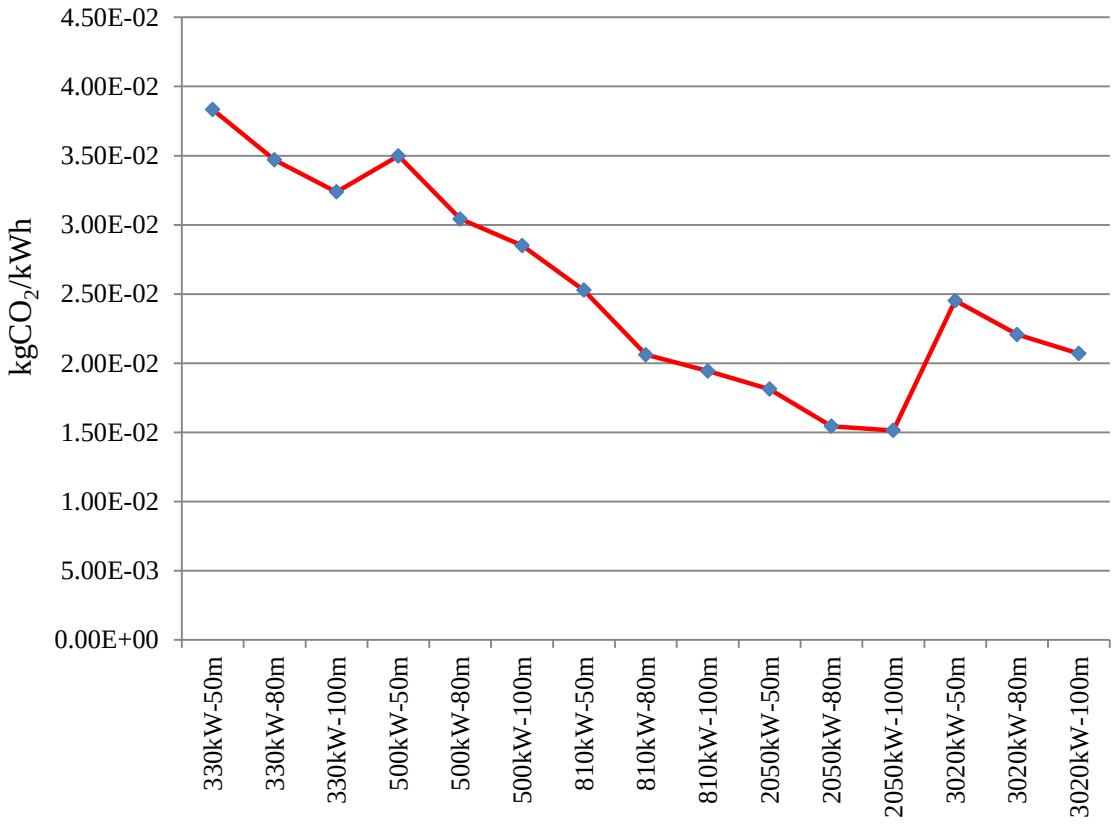
Şekil 5.4’te ele alınan türbinlerin kule yüksekliğindeki değişime bağlı olarak atmosfere salınan CO_2 emisyon miktarları gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Türbin Kule Yüksekliğine Bağlı Olarak CO_2 Emisyonlarındaki Değişim

Şekil 5.4’ten görüldüğü gibi atmosfere salınan CO_2 miktarları türbin kapasitesi ve kule yüksekliği ile birlikte artmaktadır. 2050 kW kapasiteli rüzgar türbininden sonra CO_2 miktarlarında meydana gelen ani artışın nedeni türbin kapasitelerinin oldukça fazla büyümesi buna bağlı olarak da malzeme ve enerji girdilerindeki artışlardır.

Şekil 5.5’te seçilen türbinlerden üretilebilecek birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 miktarları gösterilmiştir. Şekil 5.4'den görüldüğü gibi genel olarak türbin kapasitesinin ve kule yüksekliğinin artmasıyla üretilen birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Ancak 500 kW kapasiteli türbinin ve 3020 kW kapasiteli türbinin 50 kule yüksekliklerindeki ürettikleri elektrik enerjisi atmosfere salınan CO_2 miktarlarını dengeleyememektedir.



Şekil 5.5. Üretilen Birim Elektrik Başına Atmosfere Salınan CO_2 Miktarları

6. BÖLÜM

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Değerlendirme

Bu çalışmada Kayseri iline bağlı Pınarbaşı ilçesinin 2000 ile 2011 yılları arasındaki rüzgar hız verileri derlenmiş ve bölgenin rüzgar potansiyelinin elektrik üretmek için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Rüzgar hızları yüksekliğe bağlı olarak artmakta buna bağlı olarak da türbinlerden üretilebilecek elektrik enerjisi artmaktadır. Aynı türbinden 80 m'de üretilebilecek enerji miktarı 3555.7 MWh/yıl iken 100 m'de üretilebilecek enerji miktarı 3963.1 MWh/yıl olmaktadır.

Türbin yüksekliğine bağlı olarak türbin üretiminde kullanılan malzeme miktarı da artmakta buna bağlı olarak da enerji girdileri ve çevresel etkiler de artmaktadır. Ancak türbin yüksekliğinin artmasıyla üretilen enerji miktarı da artmakta bu da fonksiyonel birim olan 1 kWh elektrik üretimi başına düşen emisyonları ve enerji girdilerini azaltmaktadır.

Ele alınan türbinlerin neden olduğu çevresel etkiler ve enerji girdileri kullanılan malzemelerin miktarında ve çeşidinde değişiklik yapılarak ve üretim süreçleri değiştirilerek azaltılabilir. Çevreye daha az zarar verebilecek malzemeler geliştikçe bu değerlerde azalmalar gözlenecektir.

Bu çalışmada rüzgar enerjisine dayalı elektrik üretim sistemlerinin diğer elektrik üretim sistemlerine oranla çevreye daha az zarar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre üretilen birim elektrik başına atmosfere salınan CO_2 miktarları diğer elektrik üretim tekniklerine göre makul seviyelerdedir. Bu değerler Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Üretilen Birim Elektrik Başına
Atmosfere Salınan CO_2 Miktarları [39,64,74]

Elektrik Üretim Sistemi	$kgCO_2/kWh$
Rüzgar (Bu Çalışma)	0.0151-0.0383
Rüzgar	0.0097-0.1237
Solar Fotovoltaik	0.0534-0.25
Solar Termal	0.0236-0.202
Hidro	0.0037-0.237
Kömür Yakıtlı	0.9753
Petrol Yakıtlı	0.7421
Gaz Yakıtlı	0.6076
Nükleer	0.0242

Seçilen türbinler arasında 100 m kule yüksekliğine sahip 2050 kW kapasiteli türbinin hem enerji girdileri ve çevresel etkiler açısından hem de üretilen elektrik enerjisi bakımından bölgeye kurulabilecek en makul rüzgar türbini olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışması sonucunda Science Citation Indexinde taranan Journal of Cleaner Production isimli dergide, "Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri" başlıklı bir adet uluslararası yayın 2013 yılı içerisinde basılmıştır [74].

KAYNAKLAR

1. Global Wind Statistics,2012., Global Wind Energy Council (GWEC), Web Sayfası: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats 2012_english.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
2. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Ocak 2013. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Web Sayfası: http://www.tureb.com.tr/attachments/ article/206/Istatistik%20Raporu%202013_Statistics%20Report%202013.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
3. Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgar ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ, Web Sayfası: http://www.mgm.gov.tr/FILES/kurumsal/mevzuat/teblig-2012-01.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
4. Web Sayfası: http://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/definitions9and3.shtml. Erişim Tarihi: Haziran 2013.
5. WebSayfası:http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/meteorologie/forschung/stationen/bilder/kurios_3dpropneu/image_view, Erişim Tararihi: Haziran 2013.
6. Web Sayfası: http://www.apptech.com/pdf-files/SATItechdesc_g.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
7. Web Sayfası: http://www.novalynx.com/pdf/200-81000.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
8. Web Sayfası: http://odelco.co/products/productdetails_qpSdow==.html, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
9. Shata, A.S.A, Hanitsch, R., 2006. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt. **Renewable Energy**, 31: 1183–1202.
10. Genç, M.S., Gökçek, M., 2009. Evaluation of wind characteristics and energy potential in Kayseri, Turkey. **Journal of Energy Engineering-ASCE, 135:** (2), 33-43.

11. Leung, Y.C.D., Yang, Y., 2012. Wind energy development and its environmental impact: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:** 1031-1039.
12. Web Sayfası: http://www.greenenergyohio.org/page.cfm?pageId=341, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
13. Rüzgâr ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri Ders Notu, Web Sayfası: http://www.yildiz.edu.tr/~tanriov/RG1.pdf. Erişim Tarihi: Haziran 2013.
14. Web Sayfası: http://www.floatingwindfarms.com/vawt.html, Erişişm Tarihi: Haziran 2013.
15. Web Sayfası: http://www.enercon.de/p/downloads/EN_TuS_en_web.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
16. Gökçek, M., Genç, M.S., 2009. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECs) in Central Turkey. **Applied Energy, 86:** 2731-2739.
17. Ozerdem, B., Turkeli, H.M., 2005. Wind energy potential estimation and micrositting on Izmir Institute of Technology Campus, Turkey. **Renewable Energy, 30:** 1623-1633.
18. Ozerdem, B., Ozer, S., Tosun, M., 2006. Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94:** 725-743.
19. Sahin, B., Bilgili, M., Akilli, H., 2005. The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93:** 171–83.
20. Ucar, A., Balo, F., 2009. Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey. **Applied Energy, 86:** 333-339.
21. Celik, A.N., 2007. A techno-economic analysis of wind energy in Southern Turkey. **International Journal of Green Energy, 4:** 233-247.
22. İlkiliç, C., Türkbay, İ., 2010. Determination and utilization of wind energy potential for Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:** 2202-2207.
23. İlkiliç, C., 2012. Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:** 1165-1173.

24. Karsli, V.M., Geçit, C., 2003. An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey. **Renewable Energy, 28:** 823-830.
25. Akpinar, E.K., Akpinar S., 2004. Determination of the wind energy potential for Maden-Elazig, Turkey. **Energy Conversion and Management, 45:** 2901-2914.
26. Bekele, G., Palm, B., 2009. Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia. **Applied Energy, 86:** 388–396.
27. Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Theoharopoulos, D., Matthopoulos, D., Mihalakakou, G.K., 2007. Electricity generation using wind energy conversion systems in the area of Western Greece. **Energy Conversion & Management, 48:** 1640-1655.
28. Rehman, S., El-Amin, I.M., Ahmad, F., Shaahid, S.M., Al-Shehri, A.M., Bakhashwain, J.M., 2007. Wind power resource assessment for Rafha, Saudi Arabia. **Renewable & Sustainable Energy Reviews, 11:** 937–50.
29. Jowder, F.A.L., 2009. Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. **Applied Energy, 86:** 538-545.
30. World Energy Outlook, 2012, (Web Sayfası: http://www.worldenergyoutlook.org/ media/weowebsite/2012/WEO2012_Renewables.pdf), (Erişim Tarihi: Haziran 2013).
31. Web Sayfası: http://www.gwec.net/global-figures/wind-in-numbers, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
32. Global Wind Statistics, 2012, Web Sayfası: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012_english.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
33. Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi, Web Sayfası: http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Arz_Guvenligi_Strateji_Belgesi.pdf , Erişim Tarihi: Haziran 2013.
34. EÜAŞ Elektrik Üretim Sektör Raporu, 2012, Web Sayfası: http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_EUAS_2012.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.

35. Genç, M.S., 2010. Economic analysis of large-scale wind energy conversion systems in central Anatolian Turkey, pp. 131–54. In: Clean energy systems and experiences (Ed: K. Eguchi). Sciyo, Croatia.
36. United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janerio, Brazil, 3 to 14 June 1992, Agenda 21, Web Sayfası: http://sustainabledevelopment.un.org/ content/documents/Agenda21.pdf, Erişim Tarihi: Haziran 2013.
37. ISO 14040 Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-İlkeler ve Çerçeve, 2007.
38. ISO 14044 Çevre Yönetimi-Hayat Boyu Değerlendirme-Gerekler ve Kılavuz, 2007.
39. Varun, Bhat, I.K., Prakash, R., 2009. LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:** 1067–1073.
40. Varun, Prakash, R., Bhat, I.K., 2009. Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:** 2716-2721.
41. Granovskii, M., Dincer, İ., Rosen, M.A., 2007. Greenhouse gas emissions reduction by use of wind and solar energies for hydrogen and electricity production: Economic Factors**. International Journal of Hydrogen Energy, 32:** 927-931.
42. Weisser, D., 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. **Energy, 32:** 1543-1559.
43. Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., 2007. Environmental effects of energy policy in sicily: The role of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:** 282-298.
44. Granovskii, M., Dincer, İ., Rosen, M.A., 2007. Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from renewables. **Journal of Power Sources, 167:** 461-471.
45. Go´ralczyk, M., 2003. Life-cycle assessment in the renewable energy sector. **Applied Energy, 75:** 205–211.
46. Ozbilen, A., Dincer, I., Rosen, M.A., 2011. Evaluation of hydrogen production via thermochemical water splitting using the Cu-Cl cycle: A parametric study. **International Journal of Hydrogen Energy, 36:** 9514-9528.

47. Ozbilen, A., Dincer, I., Rosen, M.A., 2012. Life cycle assessment of hydrogen production via thermochemical water splitting using multi-step Cu-Cl cycles. **Journal of Cleaner Production, 33:** 202–216.

48. Ozbilen, A., Dincer, I., Rosen, M.A., 2012. Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process. **International Journal of Hydrogen Energy, 37:** 5665-5675.

49. Ozbilen, A., Dincer, I., Rosen, M.A., 2011. A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a Cu-Cl cycle. **International Journal of Hydrogen Energy, 36:** 11321-11327.

50. Hocatoglu, K., Rosen, M.A., Dincer, I., 2012. Comparative life cycle assessment of hydrogen and other selected fuels. **International Journal of Hydrogen Energy, 37:** 9933-9940.

51. Cetinkaya, E., Dincer, I., Naterer, G.F., 2012. ife cycle assessment of various hydrogen production methods. **International Journal of Hydrogen Energy, 37:** 2071-2080.

52. Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimanez, E., Blanco, J., 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. **Renewable Energy, 34:** 667-673.

53. Martinez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jimenez, E., Blanco, J., 2009. Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method**. International Journal of Life Cycle Assessment, 14:** 52–63.

54. Tremeac, B., Meunier, F., 2009. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 MW wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:** 2104–2110.

55. Guezuraga, B., Zauner, R., Polz, W., 2012. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines**. Renewable Energy, 37:** 37–44.

56. Fleck, B., Huot, M., 2009. Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use. **Renewable Energy, 34:** 2688–2696.

57. Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Lo Brano, V., 2008. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm**. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 12:** 200–217.

58. Songlin, T., Xiliang, Z., Licheng, W., 2011. Life cycle analysis of wind power: A case of Fuzhou. **Energy Procedia, 5:** 1847–1851.

59. Lenzen, M., Wachsmann, U., 2004. Wind turbines in Brazil and Germany: an example of geographical variability in life-cycle assessment. **Applied Energy, 77:** 119–130.

60. Lenzen, M., Munksgaard, J., 2002. Energy and CO_2 life-cycle analyses of wind turbines-review and applications. **Renewable Energy, 26:** 339–362.

61. Crawford, R.H., 2009. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:** 2653– 2660.

62. Arvesen, A., Hertwich, E.G., 2012. Assessing the life cycle enviromental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6:** 5994–6006.

63. Raadal, H.L., Gagnon, L., Modahl, I.S., Hanssen, O.J., 2011. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15**: 3417–3422.

64. Wang, Y., Sun, T., 2012. Life cycle assessment of CO_2 emissions from wind power plants: Methodology and case studies. **Renewable Energy, 43:** 30–36.

65. Kabir, M.R, Rooke, B., Malinga Dassanayake, G.G., Fleck, B.A., 2012. Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. **Renewable Energy, 37:** 133–141.

66. Khan, F.I., Hawboldt, K., Iqbal, M.T., 2005. Life cycle analysis of wind-fuel cell integrated system. **Renewable Energy, 30:** 157–177.

67. Hassing, H., Varming, S., 2001. Life cycle assessment for wind turbines. 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition. Bella Center, Copenhagen, Denmark.

68. Propperzi, S., Herk-Hansen, H., 2001. Life cycle assessment of a 150 MW Offshore Wind Turbine Farm at Nysted/Roedsand, Denmark. European Wind Energy Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark.

69. Schleisner, L., 2000. Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. **Renewable Energy, 20:** 279–288.

70. Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., Hertwich, E.G., 2009. Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. **Renewable Energy, 34:** 742–747.

71. Wagner, H.J., Baack, C., Eickelkamp, T., Epe, A., Lohmann, J., Troy, S., 2011. Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus**. Energy, 36:** 2459–2464.

72. Web Sayfası: http://www.kayseripinarbasi.gov.tr/default_B0.aspx?content=110, Erişim Tarihi: Haziran 2013.

73. Web Sayfası: http://www.mgm.gov.tr/ arastirma/yenilenebilir-enerji.aspx?s= ruzgaratlasi, Erişim Tarihi: Haziran 2013.

74. Demir, N., Taşkın, A., 2013. Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri. **Journal of Cleaner Production, 54:** 253-263.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Akif TAŞKIN
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 1 Temmuz 1984, Ankara
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 505 540 1990
email: taskinakif@yahoo.com

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	--
Lisans	Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği	2009
Lise	Sümer Lisesi, Kayseri	2002

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
06/2011-Halen	2'nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı/KAYSERİ	Bakım /Onarım Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce