

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YAŞAM DÖNGÜSÜ YAKLAŞIMIYLA BİR RÜZGAR ENERJİ
SANTRALİNİN KARBON AYAK İZİ VE VERİMLİLİK
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK DURU

DENİZLİ, 2025

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI



YAŞAM DÖNGÜSÜ YAKLAŞIMIYLA BİR RÜZGAR ENERJİ
SANTRALİNİN KARBON AYAK İZİ VE VERİMLİLİK
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK DURU

DENİZLİ, 2025

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Berk Duru



ÖZET

YAŞAM DÖNGÜSÜ YAKLAŞIMIYLA BİR RÜZGAR ENERJİ SANTRALİNİN KARBON AYAK İZİ VE VERİMLİLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BERK DURU

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ ENERJİ
YÖNETİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ EYLEM YILMAZ ULU)

DENİZLİ, AĞUSTOS 2025

Bu çalışma, Türkiye'deki Geycek Rüzgâr Enerji Santrali (RES) için kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) sunmakta ve santralin karbon ayak izi ile Enerji Getirisi–Enerji Yatırımı Oranı (EROI) değerlerini incelemektedir. Analiz, ISO 14040/44 ve ISO 14067 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel birim, karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla 1 kWh elektrik üretimi olarak tanımlanmıştır. Sistem sınırları hammadde temini, bileşen üretimi, nakliye, kurulum, işletme-bakım (O&M) ve kullanım ömrü sonu (EoL) aşamalarını kapsamaktadır. Envanter verileri Ecoinvent v3.9.1, GaBi 10.7, JRC (2024) ve MIT LCA çalışmalarından elde edilmiş, karakterizasyon faktörleri ise IPCC AR5/AR6 raporlarından alınmıştır. Analiz, yalnızca küresel ısınma potansiyelini (GWP) değil, aynı zamanda asidifikasyon potansiyeli (AP), ötrofikasyon potansiyeli (EP), ozon tabakası incelmeye potansiyeli (ODP) ve fosil kaynak kullanımı (FRP) kategorilerini de içermektedir. Sonuçlar, santralin toplam karbon ayak izinin (TCAF) yaklaşık 70.000–75.000 tCO₂e aralığında olduğunu ve birim enerji yoğunluğunun 6,5–7,0 gCO₂e/kWh değerine karşılık geldiğini göstermektedir. Yeniden hesaplanan EROI değeri 26,7 olup kara tipi rüzgâr sistemleri için literatürle uyumludur; depolama ve şebeke dengeleme etkileri dikkate alındığında buffered EROI 6,7 olarak bulunmuştur. Karbon geri ödeme süresi (KGÖS) ise referans elektrik sistemine bağlı olarak kömür için 1,6 ay, Türkiye şebekesi için 3,0 ay, doğalgaz için 3,7 ay ve düşük karbonlu şebeke senaryosu için 4,1 ay olarak değişmektedir. Bu bulgular, rüzgâr enerjisinin ve özellikle Geycek RES'in hızlı karbon geri ödeme süresi ve düşük çevresel etkileri ile önemli iklim faydaları sunduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma sonuçları, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi, YEKDEM destek mekanizması ve enerji bağımsızlığı stratejileri ile doğrudan uyumludur.

ANAHTAR KELİMELELER: Rüzgâr enerjisi santrali, Yaşam döngüsü değerlendirmesi, Karbon ayak izi, EROI, Karbon geri ödeme süresi, Yenilenebilir enerji politikası.

ABSTRACT

LIFE CYCLE APPROACH CARBON FOOTPRINT EFFICIENCY ANALYSIS OF A WIND POWER PLANT

MSC THESIS

BERK DURU

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENERGY MANAGEMENT AND TECHNOLOGIES

(SUPERVISOR:ASSISTANT PROFESSOR EYLEM YILMAZ ULU)

DENİZLİ, AUGUST 2025

This study presents a comprehensive life cycle assessment (LCA) of the Geycek Wind Power Plant (WPP) in Türkiye, focusing on its carbon footprint and energy return on investment (EROI). The analysis was conducted in accordance with ISO 14040/44 and ISO 14067 standards. The functional unit was defined as the generation of 1 kWh of electricity, enabling comparability with international studies. The system boundaries included raw material extraction, component manufacturing, transportation, installation, operation and maintenance (O&M), and end-of-life (EoL) processes. Inventory data were obtained from Ecoinvent v3.9.1, GaBi 10.7, JRC (2024), and MIT LCA studies, while characterization factors were derived from IPCC AR5/AR6. The analysis considered multiple impact categories: global warming potential (GWP), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), ozone depletion potential (ODP), and fossil resource use (FRP). The results showed that the total carbon footprint (TCAF) of the plant ranged between 70,000 and 75,000 tCO_{2e}, corresponding to an intensity of 6.5–7.0 gCO_{2e}/kWh. The recalculated EROI was 26.7, consistent with literature values for onshore wind systems, while the buffered EROI was 6.7 when storage and balancing effects were considered. The carbon payback period (CPP) varied significantly with reference to electricity systems, from 1.6 months for coal to 3.0 months for the Turkish grid mix, 3.7 months for natural gas, and 4.1 months for a low-carbon grid scenario. These findings demonstrate that wind power, and Geycek WPP in particular, offers substantial climate benefits with rapid carbon payback, aligning closely with Türkiye's 2053 net-zero target, the YEKDEM support mechanism, and the country's broader energy independence strategies.

KEYWORDS: Wind power plant, Life cycle assessment, Carbon footprint, EROI, Carbon payback period, Renewable energy policy.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı	1
1.3 Çalışmanın Önemi	1
1.4 Yöntem	2
1.5 Tezin Yapısı	2
2. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BAKIŞ	3
2.1 Yenilebilir Enerji Kaynakları İçinde Rüzgar Enerjisinin Yeri	3
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi	4
2.3 Rüzgar Enerjisinin Temel Prensipleri	6
2.4 Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Mevcut Durum	7
3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ (RES) KURULUM SÜRECİ	9
3.1 Rüzgar Enerji Santrali Kurulum Aşamaları	9
3.1.1 Saha Değerlendirmesi	9
3.1.2 Tasarım ve Mühendislik	9
3.1.3 İzin Süreci	10
3.1.4 İnşaat	10
3.1.5 Devreye Alma	11
3.1.6 İşletme ve Bakım	11
3.2 Yer Seçimi ve Rüzgar Ölçümleri	11
3.2.1 Saha Seçim Kriterleri	12
3.2.2 Rüzgar Kaynağının Değerlendirilmesi	12
3.2.3 Teknolojik Yenilikler ve Veri Analizi	13
3.2.4 Risk Yönetimi ve Finansal Uygunluk	13
3.3 Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Süreci	13
3.3.1 Ön İnceleme	13
3.3.2 Kapsam Belirleme	14
3.3.3 Mevcut Durumun Belirlenmesi	14
3.3.4 Etki Değerlendirmesi	14
3.3.5 Azaltım Önlemleri	15
3.3.6 Raporlama	15
3.3.7 Karar Alma Süreci	15
3.3.8 İzleme ve Uygunluk	16

3.4	Türbin Seçimi ve Altyapı Çalışmaları	16
3.4.1	Türbin Seçimi	16
3.4.2	Altyapı Çalışmaları	17
3.4.3	Türbinlerde Yaşam Döngüsünün Değerlendirilmesi	17
3.5	Şebeke Bağlantısı ve Enerji İletimi	18
3.5.1	Şebeke Bağlantı Teknolojileri	18
3.5.2	Şebeke Entegrasyonunda Karşılaşılan Zorluklar	18
3.5.3	Enerji Depolama ve Dalgalanma Yöntemi	19
3.5.4	Uyarlanabilir Kontrol Mekanizmaları	19
3.5.5	Etki Değerlendirmesi ve Altyapı Planlaması	20
3.6	Kurulumdan İşletmeye Geçiş	20
4.	KARBON AYAK İZİ KAVRAMI VE RES'LERDE KARBON AYAK İZİ	
23	4.1 Karbon Ayak İzi Tanımı ve Önemi	22
4.2	Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri	23
4.3	Yenilenebilir Enerji sistemlerinde Karbon Ayak İzi	24
4.4	RES Kurulumunda Karbon Emisyonu Kaynakları	25
4.4.1	Türbin üretimi	25
4.4.2	Nakliye Süreci	27
4.4.3	İnşaat Faaliyetleri	28
4.4.4	İşletme ve Bakım	29
4.4.5	Demontaj ve Geri Dönüşüm	31
5.	ENERJİ VERİMLİLİĞİ STRATEJİLERİ VE RES	32
5.1	Enerji Verimliliği Kavramı	32
5.2	Enerji Yönetimi ve Verimlilik İlişkisi	34
5.3	RES'lerde Enerji Verimliliğini Etkileyen Faktörler	35
5.3.1	Girdap Etkisi	36
5.3.2	Çevresel Koşullar	36
5.3.3	İşletme ve Bakım Uygulamaları	36
5.3.4	Türbin Tasarımı ve Teknolojisi	37
5.3.5	Şebeke Entegrasyonu	37
5.3.6	Saha Seçimi ve Rüzgar Kaynağı Değerlendirmesi	37
5.3.7	Enerji Yönetim Sistemleri	37
5.4	Ulusal ve Uluslararası Enerji Verimliliği Politikaları ve RES	38
6.	BİR RÜZGAR TÜRBİNİ MODELİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ	
	ÜZERİNDEN KARBON AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ: LİTERATÜR	
	TABANLI UYGULAMALI BİR YAKLAŞIM (GEYCEK RES ÖRNEĞİ)42	
	40
6.1	Geycek RES'in Tanıtımı	40
6.1.1	Geycek RES'in Konumu ve Kurulum Alanı	40
6.1.2	Teknik Özellikler: Türbin Tipi, Kapasite, Rotor Çapı, Kule Yüksekliği	41
6.1.3	Yıllık Enerji Üretim Kapasitesi ve Şebeke Katkısı	43
6.1.4	Santralin Türkiye Enerji Politikalarındaki Yeri	43
6.2	YDD Yaklaşımı ile Geycek RES'in İncelenmesi	44
6.2.1	YDD Yöntemolojisinin Uygulanması	44

6.2.2 YDD Aşamaları: Hammade Temini, Üretim, Nakliye, Kurulum, İşletme, Söküm	46
6.2.2.1 Hammade Temini	46
6.2.2.2 Nakliye	46
6.2.2.3 Kurulum	47
6.2.2.4 İşletme ve Bakım	47
6.2.2.5 Söküm ve Geri Dönüşüm	47
6.2.2.6 Genel Değerlendirme	48
6.2.3 Kullanılan Veriler ve Varsayımlar	48
6.2.4 Literatür Destekli Emisyon Katsayıları ve Hesaplamalar	50
6.2.4.1 Yaşam Döngüsü Aşamalarına Göre Emisyon Katsayıları	50
6.2.4.2 Literatür Verilerine Dayalı Emisyon Yoğunluğu Karşılaştırmaları 53	50
6.2.4.3 Emisyon Azaltım Potansiyeli ve Diğer Yenilenebilir Kaynaklarla Karşılaştırma	51
6.2.4.4 Emisyonları Etkileyen Başlıca faktörler	52
6.3 Geycek RES'in Karbon Ayak İzi Analizi	53
6.3.1 Türbin Üretim Aşamasındaki Emisyonlar	53
6.3.1.1 Kule (Çelik) Üretimi:	53
6.3.1.2 Kanat Üretimi (Kompozit Malzeme):	54
6.3.1.3 Jeneratör, Dişli Kutusu ve Elektronik Aksam:	54
6.3.1.4 Toplam Emisyon ve Dağılım:	54
6.3.2 Nakliye ve Kurulum Sürecindeki Emisyonlar	55
6.3.2.1 Nakliye Aşaması Emisyonları	55
6.3.2.2 Kurulum Aşaması Emisyonları	56
6.3.2.3 Emisyon Dağılımının analizi	57
6.3.3 İşletme Sürecince Dolaylı Emisyonlar ve Bakım Faaliyetleri	57
6.3.3.1 Bakım ve Servis Faaliyetleri Kaynaklı Emisyonlar	58
6.3.3.2 Yedek Parça Üretimi ve Değişimi	58
6.3.3.3 Enerji Nakil Hatları ve Altyapı Kullanımı	58
6.3.3.4 Değerlendirme	59
6.3.4 Söküm ve Geri Dönüşüm Aşamasındaki Karbon Etkileri	59
6.3.4.1 Söküm Sürecinde Oluşan Emisyonlar	59
6.3.4.2 Geri Dönüşüm Faaliyetlerinden Kaynaklanan Emisyon Azaltımı 62	60
6.3.5 Toplam Karbon Ayak İzi ve Birim Enerji Başına Emisyon (gCO ₂ eq/kWh)	61
6.3.5.1 Yaşam Döngüsü Bazlı Toplam Emisyon Hesabı	61
6.3.5.2 Toplam Enerji Üretimi Verisi	61
6.3.5.3 Birim Enerji Başına Emisyon (gCO ₂ eq/kWh)	61
6.3.5.4 Değerlendirme	62
6.4 Geycek RES'in Enerji Getirisi ve Karbon Geri Ödeme Süresi	63
6.4.1 Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi (EROI) Analizi	63
6.4.2 Karbon Geri Ödeme Süresinin Hesaplanması	64
6.4.3 Geycek RES'in Fosil Yakıtlı Santrallere Kıyasla Karbon Kazancı	66
6.5 Bulguların Değerlendirilmesi ve Literatürle Karşılaştırılması	66

7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
8. KAYNAKLAR.....	73
9. EKLER.....	87
EK A.....	88
EK-A. Hesaplama Formülleri ve Örnek Uygulamalar	88
1. Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi Oranı (EROI)	88
2. Karbon Geri Ödeme Süresi (KGÖS).....	88
3. Toplam Karbon Ayak İzi Hesabı	89
4. Birim Enerji Başına Emisyon (gCO ₂ eq/kWh)	89
10. ÖZGEÇMİŞ.....	90

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.3. Yatay (HAWT) ve dikey (VAWT) eksenli rüzgar türbinleri.....	7
Şekil 3.1.4. Keltepe RES inşaat süreci.....	11
Şekil 4.4.2. Türbin nakliye süreci.....	28
Şekil 6.1.1. Geycek RES'nin genel görünümü.....	41
Şekil 6.3.5.3. Geycek RES'nin yaşam döngüsü emisyon dağılımı.....	61

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 6.1.2. Geycek RES'in Kurlu Güç, türbin Özellikleri ve Bölgesel Altyapı Verileri.....	44
Tablo 6.2.4.2. Rüzgar Enerjisi için Literatürde Bildirilen Emisyon Katsayıları ve Fosil Yakıtlarla Karşılaştırılmalı Azaltım Oranları.....	51
Tablo6.3.1.5. Türbin Üretim Sürecinde Kullanılan Malzemelere Göre Emisyon Dağılımı	54
Tablo 6.3.2.2. Nakliye ve Kurulum Süreçlerinde Kullanılan Malzemelere Göre Emisyon Dağılımı.....	56
Tablo 6.3.4.2. Söküm ve Geri Dönüşüm Aşamalarının Karbon Ayak İzine Net Katkısı	59
Tablo 6.3.5.1. Yaşam Döngüsü Aşamalarına Göre Geycek RES'in Toplam Karbon Salımı ve Yüzdesel Dağılımı.....	60
Tablo 6.4.3. Kömür, Doğalgaz ve Türkiye Elektrik Şebekesi Karbon Yoğunlukları.....	64

SEMBOL LİSTESİ

°C	:	Santigrat
EGÖS	:	Enerji Geri Ödeme Süresi
EROI	:	Enerji Getirisi
GW	:	Gigawatt
HAWT	:	Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
HVAC	:	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Sistemleri
KGÖS	:	Karbon Geri Ödeme Süresi kW : Kilowatt
LODİ	:	Logaritmik Ortalama Divisia İndeksi
LSTM	:	Long Short Term Memory MW : Megawatt
RES	:	Rüzgar Enerji Santrali
SCADA	:	Supervisory Control and Data Acquisition
SGÖS	:	Sera Gazı Ödeme Süresi
VAWT	:	Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
YDD	:	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
YEKDEM:		Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

ÖNSÖZ

Tez çalışmam ve yüksek lisans öğrenimim boyunca desteğini hiç eksik etmeyen ve her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sayın Eylem YILMAZ ULU'ya, hayat boyu her koşulda destekleri ile beni yalnız bırakmayan aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.



1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin önde gelen rüzgar enerji santrallerinden biri olan Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemi ile karbon ayak izini hesaplamak ve bu veriler doğrultusunda santralin çevresel performansını ortaya koymaktır. Üretimden sökülme aşamasına kadar olan tüm süreçlerin karbon salınımı üzerindeki etkileri incelenerek, rüzgar enerjisinin sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu analiz sonuçları doğrultusunda enerji getirisi (EROI) ve karbon geri ödeme süresi (KGÖS) gibi göstergeler yardımıyla santralin uzun vadeli çevresel faydaları da ortaya konacaktır.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma, Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin faaliyete geçmesinden itibaren geçen tüm süreçleri içerecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında santralin türbin üretimi, nakliye, kurulum, işletme ve bakım ile sökülme ve geri dönüşüm aşamaları analiz edilmiştir. Tüm bu aşamalardaki karbon salımları literatürde belirtilen emisyon katsayıları ve çevresel veri setleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve literatürde yer alan benzer ölçekli rüzgar enerji projeleriyle kıyaslanmıştır.

1.3 Çalışmanın Önemi

Küresel ölçekte yaşanan iklim değişikliği sorununa karşı geliştirilen çözüm stratejilerinin başında, fosil yakıt kullanımını azaltarak yenilenebilir enerji

kaynaklarına yönelmek gelmektedir. Rüzgar enerjisi, düşük karbon salınımı ve sürdürülebilir üretim kapasitesi ile bu dönüşümde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, yenilenebilir olarak tanımlansa da rüzgar enerji santrallerinin üretim, nakliye ve kurulum aşamalarında belirli çevresel etkiler yarattığı bilinmektedir. Bu bağlamda, çalışma; Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları kapsamında rüzgar enerjisinin gerçek karbon maliyetini ortaya koyarak daha çevreci ve bilinçli enerji yatırımlarına zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, akademik literatüre Geycek RES özelinde yapılmış ilk detaylı karbon ayak izi analizi olarak katkı sağlamaktadır.

1.4 Yöntem

Araştırmada YDD yöntemi temel alınmıştır. ISO 14040 ve ISO 14044 standartları çerçevesinde geliştirilen bu yöntem, ürün ya da hizmetlerin tüm yaşam evrelerindeki çevresel etkilerin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, Geycek RES'in türbin üretimi, nakliyesi, kurulum süreci, işletme ve bakım faaliyetleri ile sökülme ve geri dönüşüm aşamaları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Karbon ayak izi hesaplamalarında literatür kaynaklı emisyon faktörleri ve sektörel ortalama veriler kullanılmış; ayrıca EROI ve KGÖS hesaplamaları yapılmıştır.

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez yedi ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın amacı, kapsamı, önemi ve yöntemi açıklanmıştır. İkinci bölümde rüzgar enerjisiyle ilgili temel bilgiler sunulmuş, üçüncü bölümde rüzgar enerji santrallerinin kurulum süreci ele alınmıştır. Dördüncü bölümde karbon ayak izi kavramı ve rüzgar enerji santralleri bağlamında değerlendirilmesi yer alırken, beşinci bölümde enerji verimliliği ve ilgili stratejiler incelenmiştir. Altıncı bölümde Geycek RES örneği üzerinden yaşam döngüsü yaklaşımıyla karbon ayak izi hesaplamaları yapılmış ve analiz edilmiştir. Son olarak, yedinci bölümde çalışmanın genel sonuçları özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

2. RÜZGAR ENERJİSİNE GENEL BAKIŞ

2.1 Yenilebilir Enerji Kaynakları İçinde Rüzgar Enerjisinin Yeri

Rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadele etme potansiyeli sayesinde yenilebilir enerji kaynakları arasında temel bir yapı taşı haline gelmiştir. Türbinler aracılığıyla rüzgar enerjisinin dönüştürülmesi yalnızca elektrik üretimini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevre dostu ve sürdürülebilir enerji çözümlerine geçişin simgesi niteliğindedir. Bu alandaki teknolojik ilerlemeler ve uygulama ölçeğinin büyümesi, rüzgar enerjisini yenilenebilir enerji sahnesinin ön saflarına taşımış ve küresel enerji arzına kayda değer katkılarda bulunmuştur (Bazionis ve Georgilakis, 2021; L. Wang ve Huang, 2024).

Dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesindeki artış, bu büyümeyi somut biçimde gözler önüne sermektedir. Bu yükseliş yalnızca teknolojinin geliştiğini değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir enerji modeline geçişte rüzgar enerjisinin üstlendiği kritik rolü de yansıtmaktadır. Rüzgar enerjisi üretimi, çoğu zaman diğer yenilenebilir kaynaklara kıyasla daha hızlı büyümekte ve bu yönüyle küresel ölçekte artan enerji talebinin karşılanmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Bazionis ve Georgilakis, 2021). Ülkeler sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik hedefler belirlerken, rüzgar enerjisi teknolojilerinin yaygınlaştırılması, 2050 yılına kadar sıcaklık artışını 1,5 santigrat derece (°C) ile sınırlama amacına ulaşmada temel bir unsur haline gelmiştir (Dardabi ve diğ., 2024). Ayrıca, gelişmiş kontrol sistemleri ve yenilikçi tasarımlar sayesinde rüzgar türbinlerinin operasyonel verimliliği önemli ölçüde artmış; güvenilirlikleri ve enerji üretim kapasiteleri yükselmiştir (Loulijat ve diğ., 2023; Ntanos ve diğ., 2023).

Rüzgar enerjisi sistemlerinin geliştirilmesi sürecinde ortaya çıkan çevresel ve toplumsal etkiler göz ardı edilmemelidir. Rüzgar çiftliklerinin yaşam döngüsü boyunca ekolojik dengenin bozulması, arazi kullanımıyla ilgili çekinceler ve estetik kaygılar gibi çeşitli zorluklar gündeme gelmektedir (Türkmen ve Babuna, 2024). Politika yapıcıların ve paydaşların bu endişeleri, istihdam yaratma, enerji bağımsızlığı sağlama gibi rüzgar enerjisinin sunduğu faydalarla dengeli biçimde ele alınması gerekmektedir (Abumwais ve diğ., 2022). Rüzgar enerjisinin entegrasyonu yalnızca ekonomik

dayanıklılığı desteklemekle kalmaz, aynı zamanda teknolojik yenilikleri de teşvik ederek enerji üretim sistemlerinin kapasite ve verimliliğini artırmaya devam eder (Afridi ve diğ., 2024).

Rüzgar enerjisinin kara, deniz ve yüzer türbinler gibi farklı biçimlerde uygulanabilmesi, bu kaynağın çeşitli coğrafi ve çevresel koşullara uyum sağlama becerisini göstermektedir. Bu çok yönlülük, rüzgar enerjisini yenilenebilir bir kaynak olarak daha değerli olmasını sağlamaktadır (Afridi ve diğ., 2024). Bu bağlamda, rüzgar enerjisi altyapısına yapılan yatırımlar yalnızca enerji dönüşümünün temel taşlarından biri olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir kentsel gelişim hedeflerini destekleyen ve sosyal-ekonomik kalkınmayı teşvik eden geniş kapsamlı bir stratejinin parçası olarak da değerlendirilmektedir (Ntanos ve diğ., 2023; Türkmen ve Babuna, 2024).

2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi ve Gelişimi

Rüzgar enerjisinin tarihsel gelişimi yüzyıllar boyunca önemli ölçüde değişim geçirmiş, ilkel sistemlerden başlayıp günümüzde büyük miktarda elektrik üreten ileri teknolojilere ulaşmıştır. Rüzgar gücünün erken dönem kullanım alanları, tahıl öğütme ve su pompalama gibi mekanik görevlerde rüzgar değirmenlerinin kullanıldığı eski medeniyetlere kadar gitmektedir. Ancak rüzgar enerjisinin çağdaş anlamda yenilenebilir ve uygulanabilir bir enerji kaynağı olarak gelişimi, 20. Yüzyılın sonlarında yaşanan küresel enerji krizleri ve sürdürülebilir enerji üretimine yönelik artan ilgiyle birlikte hız kazanmıştır (Altuntaş ve Gök, 2020).

1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri, alternatif enerji kaynaklarına -özellikle rüzgar enerjisine- yönelik ilgide belirgin bir artışa sebep olmuştur. Bu dönemde, küçük ölçekli rüzgar değirmenlerinden elektrik üretimi amacıyla tasarlanan daha büyük ve verimli türbinlere geçiş başlamıştır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (HAWT) geliştirilmesi gibi türbin tasarımındaki önemli teknolojik gelişmeler, günümüzde de yaygın olarak kullanılan büyük ölçekli rüzgar çiftliklerinin temelini oluşturmuştur (Gupta ve diğ., 2024). Sonraki yıllarda ise malzeme bilimi ve mühendislik alanındaki gelişmeler sayesinde rüzgar türbinlerinin performansı optimize edilmiş, kapasiteleri artırılmış ve güvenilirlikleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir (X. Zhang, Liu, ve diğ., 2023).

Rüzgar enerji sektörünü ileriye taşıyan bir diğer unsur, araştırma kurumlarının ve stratejik girişimlerin kurulmasıyla ortaya çıkmıştır. Örneğin, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), teknolojik ilerlemelere öncülük ederek, dağıtık enerji üretimi uygulamaları için geliştirilen 15 kiloWatt'lık (kW) referans türbin gibi yenilikçi türbin tasarımlarının yapılmasına destek olmuştur (Gupta ve diğ., 2024). Aynı zamanda politika yapıcılar tarafından sağlanan teşvikler, sübvansiyonlar ve yenilenebilir enerji kotası gibi destekleyici düzenlemeler, rüzgar enerjisi teknolojilerine yapılan yatırımların artmasında etkili olmuştur (X. Li ve diğ., 2020).

Günümüzde rüzgar enerjisi, dünya genelinde en hızlı büyüyen elektrik üretim kaynaklarından biri haline gelmiş, 2018 yılı sonu itibariyle kurulu kapasitesi 591 Gigawatt (GW)'ı aşmıştır (Ren ve diğ., 2020). Hem kara (onshore) hem de deniz (offshore) rüzgar enerjisi teknolojileri ivme kazanmış, özellikle deniz üstü rüzgar çiftlikleri, yüksek enerji verimleri ve düşük görsel etkileri nedeniyle birçok ülkenin enerji stratejilerinde önemli bir bileşen olarak yer almaya başlamıştır (X. Li ve diğ., 2020). Bu tür çiftliklerde birden fazla megawatt (MW) gücünde türbinler kullanılabilen ve böylece çok daha yüksek enerji üretim kapasitesine ulaşılabilir (X. Li ve diğ., 2020).

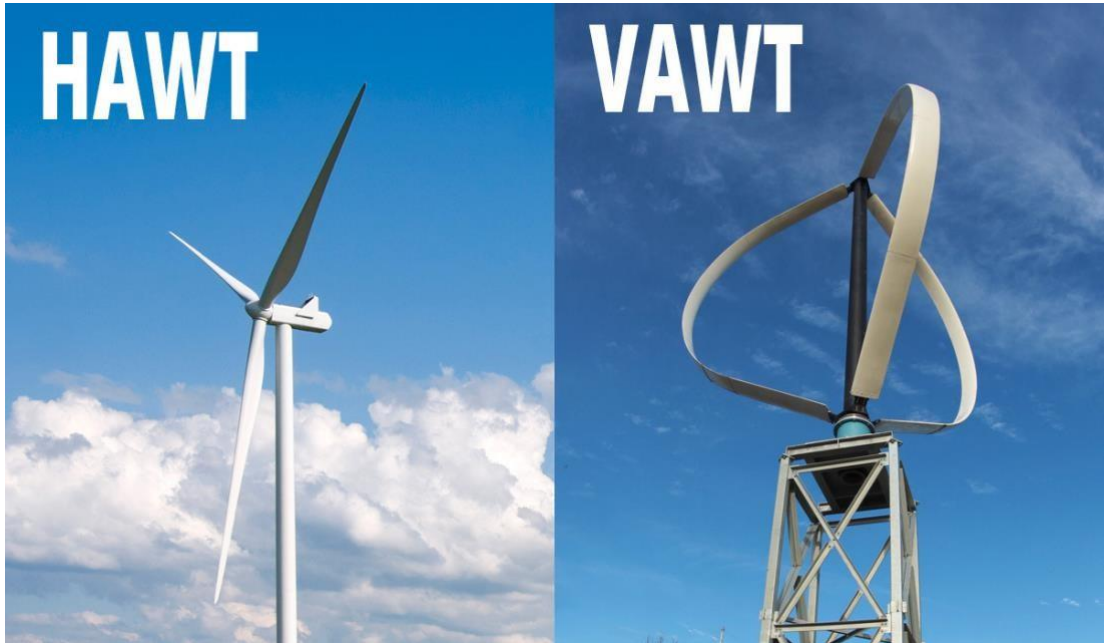
Teknolojik ilerlemelere rağmen, rüzgar enerjisinin yaygınlaşması çevresel anlamda bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle kuş göç yollarının bozulması ve doğal habitatların korunması gibi konular dikkatle ele alınması gereken çevresel hassasiyetler arasında yer almaktadır (L. Li, 2023). Buna karşın, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve enerji bağımsızlığının artırılması gibi faydaları, rüzgar enerjisinin küresel enerji portföyündeki yerini sağlamlaştırmaktadır. Brezilya gibi ülkelerde rüzgar enerjisi kapasitesinin hızlı bir şekilde artması ve ulusal enerji politikalarının entegre edilmesi, bu kaynağın stratejik önemini açıkça ortaya koymaktadır (Alvani Bomfim de Sousa Júnior ve diğ., 2024).

İlîm değişiklikle mücadelede yenilenebilir enerji kaynaklarına olan küresel ilginin artmasıyla beraber, rüzgar enerjisinin gelecekte enerji yapılanmasında daha etkili bir rol alacağı beklenmektedir. Bu süreç, geleneksel bilgi birikimi ile modern teknolojik yeniliklerin birleştiği sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişin somut bir göstergesidir (Bianchini, 2024).

2.3 Rüzgar Enerjisinin Temel Prensipleri

Rüzgar enerjisinin temel prensipleri, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin rüzgar türbinleri aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülmesine dayanır. Bu dönüşüm süreci, başta hava yoğunluğu, türbin kanatlarının süpürdüğü alan ve rüzgar hızı olmak üzere, çeşitli temel değişkenler tarafından belirlenir. Söz konusu değişkenler arasındaki ilişki, enerji yakalama ve kullanılabilir güce dönüştürme verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Firoozi ve diğ., 2024; Görel ve Abdi, 2023).

Rüzgar türbinleri, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini yakalayıp bunu döner enerjiye dönüştürür ve bu dönüş enerjisi bir jeneratör aracılığıyla elektrik üretimini sağlar. Bu süreçte türbin kanatlarının tasarımı son derece önemlidir çünkü aerodinamik özellikler enerji yakalama verimliliğini büyük ölçüde etkiler. Aerodinamiği optimize edilmiş, gelişmiş kanat tasarımları, türbinlerin genel performansını ve ekonomik uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Brahimi ve Paraschivoiu, 2022; Firoozi ve diğ., 2024). Türbinler, dönme eksenlerine göre yatay eksenli (HAWT) ve dikey eksenli (VAWT) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, her bir türbin tipinin verimlilik düzeyi ve kullanım alanlarına ilişkin farklı teknik özellikler barındırdığını ortaya koymaktadır (Brahimi ve Paraschivoiu, 2022; M. Wang ve diğ., 2024).



Şekil 2.3. Yatay (HAWT) ve dikey (VAWT) eksenli rüzgar türbinleri

Enerji üretiminin en üst düzeye çıkarılabilmesi için türbinlerin değişken rüzgar koşullarına rağmen maksimum güç noktası doğrultusunda çalışması gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak için genellikle kanat açısını ayarlayan kontrol sistemleri kullanılır. Bu sistemler rotor hızını rüzgar hızındaki değişimlere uyum sağlayacak şekilde düzenler. Bu tür dinamik kontrol mekanizmaları, türbin performansını optimize etmekle birlikte yüksek rüzgar hızlarında oluşabilecek mekanik aşırı yüklenmeleri de önlemeye yardımcı olur (Rajagukguk ve diğ., 2022; Truong ve diğ., 2020). Genetik algoritmalar veya parçacık sürü optimizasyonu gibi ileri düzey kontrol algoritmalarının uygulanması, bu ayarlamaların tepkiselliğini artırarak sistem verimliliğini geliştirmektedir (Görel ve Abdi, 2023).

Yeni nesil yaklaşımlardan biri olan Havadan Rüzgar Enerjisi (Airborne wind Energy-AWE) sistemleri, yüksek irtifalarda bulunan rüzgarları yakalamak amacıyla hava araçlarının kullanımına yönelik yenilikçi bir sistemdir. Bu sistemler, geleneksel türbinlerle karşılaştırılabilir güç çıktıları sunabilmekte, aynı zamanda malzeme maliyetlerini azaltarak enerji yakalama verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır (Trevisi ve diğ., 2021).

Rüzgar enerjisi sistemlerinin daha geniş çaplı elektrik şebekelerine entegrasyonu ise çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Yenilenebilir enerjiye dayalı bir sisteme geçişin sağlanabilmesi için hem kara hem de deniz üstü (offshore) rüzgar enerjisi teknolojilerinin tasarımı, üretimi ve uygulanmasında iyileştirmelere gidilmesi büyük önem taşımaktadır (Veers ve diğ., 2022). Sera gazı emisyonlarını en aza indirirken artan küresel enerji taleplerini karşılamayı amaçlayan rüzgar enerjisinin sürdürülebilir büyümesi için, çevresel etkileri de göz önünde bulundurarak bu konuları ele alan stratejiler büyük önem taşımaktadır (Veers ve diğ., 2022).

2.4 Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Mevcut Durum

Dünya genelinde rüzgar enerji kullanım kapasitesi istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 2022 yılı itibarıyla küresel ölçekte kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 850

GW'ı aşmıştır ve bu durum sera gazı emisyonlarının azaltılması yönelik önemli katkı sağlamış ve fosil yakıtlara alternatif olmuştur (Köse ve Köse, 2022). Bu hızlı büyümenin temelinde, türbin verimliliğini artıran ve rüzgar enerjisi maliyetlerini düşüren teknolojik ilerlemeler yer almaktadır (Yousefi ve diğ., 2024). 2021 yılında kurulan kapasite açısından Amerika Birleşik Devletleri ve Çin ilk sıralarda yer alırken, Avrupa, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik eden güçlü politikalar sayesinde rüzgar enerjisi açısından önemli bir konumda yerini almıştır (Köse ve Köse, 2022).

Türkiye'deki rüzgar enerjisi kullanımı da benzer bir artış eğilimi sergilemektedir. Yaklaşık 48.00 MW düzeyinde olduğu tahmin edilen teknik rüzgar enerjisi potansiyeli ile Türkiye, sürdürülebilir enerji geliştirme açısından elverişli bir konumda yer almaktadır (Atalan ve diğ., 2020). 2022 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam kurulu rüzgar gücü kapasitesi 11,4 GW'a ulaşmış, 358 kara tipi rüzgar santrali devreye alınmış ve deniz üstü projelere yönelik planlamalar yapılmaya başlanmıştır (Mokhtare ve Keysan, 2024). Bu büyüme, Türkiye'nin toplam enerji ihtiyacının yaklaşık %72'sini ithalatla karşıladığı göz önünde bulundurulduğunda yerel yenilenebilir kaynaklar aracılığıyla enerji bağımsızlığını sağlama yönünde hayati bir adım olarak değerlendirilmektedir (Dağtekin ve Yelmen, 2022).

Türkiye, Avrupa'da kurulu rüzgar gücü kapasitesi bakımından yedinci, dünyada ise 12. Sırada yer almaktadır. Bu durum, rüzgar enerjisinin Türkiye'nin yenilenebilir enerji stratejisindeki önemini açıkça ortaya koymaktadır (Köse ve Köse, 2022). Türkiye, 2023 Enerji Vizyonu kapsamında, enerji ihtiyacının %30'unu rüzgar, güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan karşılama hedefi doğrultusunda çeşitli politikalar yürürlüğe koymuştur (Uddin ve diğ., 2021).

Türkiye'de rüzgar enerjisi uygulamalarının etkinliğini gösteren önemli örneklerden biri, Kırşehir ilinde bulunan Geycek Rüzgar Enerji Santrali'dir. Bu tesis, rüzgar enerjisinin yerel ekonomiye ve enerji arzına sağladığı olumlu katkıların somur bir örneğidir. Yıllık kapasite artışlarının sürmesi ve bu tür santrallerin kurulması, rüzgar enerjisinin Türkiye'nin enerji portföyünü çeşitlendirmesi ve ulusal enerji gereksinimlerini karşılamadaki rolünü daha da pekiştirmektedir (Eyüboğlu ve diğ., 2023).

3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ (RES) KURULUM SÜRECİ

3.1 Rüzgar Enerji Santrali Kurulum Aşamaları

Rüzgar enerji santrallerinin (RES) kurulumu, optimum performans ve sürdürülebilirlik sağlamak amacıyla dikkatli bir planlama ve uygulama gerektiren çok aşamalı bir süreçtir. Proje; saha değerlendirmesi, tasarım ve mühendislik, izin süreci, inşaat ve devreye alma gibi temel aşamaları kapsamaktadır.

3.1.1 Saha Değerlendirmesi

İlk aşama, rüzgar enerjisi yatırımı için potansiyel sahaların belirlenmesini içerir. Bu süreç, meteorolojik ölçümler, çevresel etki değerlendirmeleri ve arazi kullanımına ilişkin kriterlerin titizlikle analiz edilmesini gerektirir. Rüzgar hızı verileri, enerji üretim potansiyelini tahmin etmede temel parametre olup, erişilebilirlik, çevresel hassasiyetler ve yasal düzenlemelere uygunluk gibi unsurlar da saha seçiminde belirleyici rol oynamaktadır. Bu süreçte coğrafi bilgi sistemleri gibi gelişmiş teknolojiler, potansiyel sahaların analizini kolaylaştırmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Köse ve Köse, 2022).

3.1.2 Tasarım ve Mühendislik

RES için uygun saha belirlendikten sonra detaylı tasarım ve mühendislik çalışmaları başlatılmaktadır. Bu aşamada, rüzgar karakteristiklerine uygun türbin tipleri ve boyutlarının seçimi ile rüzgar santralinin yerleşim planı optimize edilmektedir. Türbinlerin mikro konumlandırılmasında, hava akımı kayıplarını en aza indirmek ve enerji verimini maksimize etmek amacıyla parçacık sürü optimizasyonu gibi algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu adım aynı zamanda RES'in elektrik şebekesine bağlantı planlarının oluşturulmasını da içermektedir ve böylece üretilen enerjinin sisteme etkili bir biçimde aktarılması sağlanmaktadır (Çelik ve diğ., 2021).

3.1.3 İzin Süreci

Tasarım süreci sonrasında, RES'ler için gerekli izinlerin alınması kritik bir adımdır. Bu süreç, arazi kullanımı, çevresel etkiler ve enerji üretimiyle ilgili yerel, bölgesel ve ulusal düzenlemelerin titizlikle yönetilmesini içerir. İzin süreçleri, farklı ülkelerde ve bölgelerde büyük ölçüde değişkenlik göstermekte olup, genellikle kamuoyu danışmaları ve çevresel etki analizlerini kapsamaktadır. Bu değerlendirmeler, yaban hayatı ve ekosistem üzerindeki olası etkilerin ortaya konmasını sağlar (Köse ve Köse, 2022). Mevzuata uyum, inşaat sırasında gecikmelerin ve ek maliyetlerin önüne geçmek için büyük önem taşımaktadır.

3.1.4 İnşaat

İnşaat aşaması, yol yapımı, türbin temellerinin oluşturulması, türbin montajı ve elektrik altyapısının kurulumu gibi çeşitli faaliyetleri içerir. İnşaat genellikle erişim yolları ve yardımcı yapıların inşasıyla başlar, ardından türbinlerin sahaya getirilmesi, monte edilmesi ve dikilmesi süreçleri izlenir. Bu aşamada etkin proje yönetimi, iş güvenliğinin sağlanması, zaman ve bütçe hedeflerine uyum açısından kritik öneme sahiptir (Musial ve diğ., 2022).



Şekil 3.1.4. Keltepe RES İnşaat Süreci

3.1.5 Devreye Alma

İnşaat tamamlandıktan sonra RES’ni devreye alma aşamasına geçilmektedir. Bu süreç, her bir türbinin ve sistemin genel işleyişinin test edilmesini ve doğrulanmasını kapsar. Türbinlerin farklı rüzgar koşulları altında öngörülen performansı sağladığından emin olmak için detaylı denetimler ve performans analizleri gerçekleştirilir (Musial ve diğ., 2022).

3.1.6 İşletme ve Bakım

Devreye almadan sonra, RES’nin uzun vadeli verimliliği ve güvenilirliği açısından düzenli işletme ve bakım faaliyetleri büyük önem taşır. Periyodik bakım kontrolleri ve zamanında yapılan onarımlar, yüksek maliyetli arızaların önüne geçilmesini ve türbin ömrünün maksimize edilmesini sağlar (Zhao ve diğ., 2023). Arızaları önceden tahmin etmeye ve önlemeye yönelik gelişmiş izleme sistemleri giderek daha fazla kullanılmaktadır. Böylece RES’lerin ekonomik sürdürülebilirliği artırılmaktadır (X. Zhang, Yuan, ve diğ., 2023).

3.2 Yer Seçimi ve Rüzgar Ölçümleri

RES’lerin geliştirilmesinde saha seçimi ve rüzgar ölçümleri, kritik bileşenler arasında yer almaktadır. Rüzgar enerjisi projelerinin başarılı bir şekilde yürütülebilmesi, uygun rüzgar koşullarına sahip verimli alanların belirlenmesine ve potansiyel enerji çıktısının doğru bir biçimde ölçülmesine bağlıdır. Bu süreç, etkin saha seçimi ve rüzgar ölçümünde dikkate alınması gereken tekniklerin ve yöntemlerin ayrıntılı şekilde ele alındığı çeşitli kaynaklara dayanan çok adımlı bir metodolojik yaklaşımı içermektedir (Klongboonjit ve Kiatcharoenpol, 2022; Yamin ve Giyats, 2022)

3.2.1 Saha Seçim Kriterleri

Rüzgar türbin kurulumu için uygun bir sahanın seçilmesi, rüzgar hızı, arazi kullanımı, çevresel etkiler ve erişilebilirlik gibi birçok faktörün değerlendirilmesini gerektirir. İdeal sahalar, genellikle kararlı ve sürekli yüksek rüzgar potansiyeline sahip alanlardır. Kazakistan'da yapılan bir çalışmada, Fort Sevcenko ve Atbasar gibi bölgelerin yüksek rüzgar gücü yoğunluklarına sahip olduğu ve bu yönleriyle türbin kurulumu açısından avantajlı oldukları bildirilmiştir (Pourasl ve Khojastehnezhad, 2021). Ayrıca güvenlik düzenlemeleri ve arazi kullanımına ilişkin öncelikler de saha uygunluğunun belirlenmesinde önemli rol oynar. Örneğin, türbinlere sağlı gürültü ve görsel etkileri azaltmak amacıyla yerleşim alanlarına en az 2 kilometrelik (km) mesafe bırakılması önerilmektedir (Abdelmassih ve diğ., 2021). Bu aşamada, kapsamlı saha haritalandırmaları ve risk değerlendirmeleri yapılmasıyla, çevresel etkilerin ayrıntılı olarak ele alınması sağlanır (Belu, 2022).

3.2.2 Rüzgar Kaynağının Değerlendirilmesi

Rüzgar ölçümleri genellikle, uzun süreli rüzgar hızı ve yönü verilerini kaydeden anemometrelerle donatılmış meteorolojik kuleler aracılığıyla yapılır. Bu veriler, bir rüzgar enerjisinin fizibilitesini değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Ölçümlerin güvenilirliği ve doğruluğu, projenin başarısı için çok önemli olup, modern veri analiz teknikleriyle bu ölçümlerin kalitesi artırılmaktadır. Özellikle kümele yöntemleri, rüzgar verilerinin sınıflandırılmasında ve değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Klongboonjit ve Kiatcharoenpol, 2022). Tayland'da yapılan bir araştırmada, rüzgar verilerinin kümeleme yöntemiyle analiz edilmesi, potansiyel rüzgar enerjisi üretimi hakkında değerli bilgiler sunmuştur (Klongboonjit ve Kiatcharoenpol, 2022).

Rüzgar örüntülerini tahmin etmek ve saha seçim süreçlerini optimize etmek amacıyla Destek Vektör Regresyonu gibi ileri düzey öngörü yöntemlerinden de yararlanılmaktadır. Bu yöntemler, atmosfer basıncı ve sıcaklığı gibi faktörleri dikkate alarak rüzgar tahminlerinin güvenilirliğini artırmakta ve enerji üretim planlamasında önemli katkılar sunmaktadır (Yamin ve Giyats, 2022).

3.2.3 Teknolojik Yenilikler ve Veri Analizi

Derin öğrenme (deep learning) alanında meydana gelen son yıllardaki gelişmelerle birlikte, özellikle deniz üstü alanlar için uygun RES sahalarının belirlenmesi ve rüzgar kaynağı analizlerinin daha isabetli biçimde yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Yapay zeka tabanlı modeller, rüzgar kaynaklarının daha net biçimde değerlendirilmesini sağlayarak yatırımcıların üretim potansiyelini daha gerçekçi biçimde öngörmesine olanak sağlamaktadır (J. Zhang ve diğ., 2024). Gelişmiş teknolojilerin saha analiz süreçlerine entegre edilmesi, ideal rüzgar santrali alanlarının belirlenmesini daha verimli ve sistematik hale getirmektedir.

3.2.4 Risk Yönetimi ve Finansal Uygunluk

Kapsamlı rüzgar kaynağı değerlendirmesi, rüzgar enerjisi projelerinin finansal uygulanabilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Potansiyel enerji üretimine dair doğru tahminler, proje finansmanları açısından güven oluşturması nedeniyle yatırım kararlarını kolaylaştırmaktadır ve bu da risklerin azaltılmasını sağlamaktadır. Rüzgar kaynağı analizinin, doğru modellemelerle ve paydaş katılımıyla bütüncül olarak ele alınması, belirsizlikleri azaltarak yatırım getirilerini artırma potansiyeli içermektedir (Belu, 2022; Tefera ve Ture, 2021).

3.3 Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Süreci

3.3.1 Ön İnceleme

ÇED süreci, projenin kapsamlı bir çevresel etki değerlendirmesine tabi tutulup tutulmayacağı belirlendiği ön inceleme aşamasıyla başlamaktadır. Projenin büyüklüğü, konumu ve çevresel hassasiyet düzeyine göre değerlendirme yapılmaktadır. Özellikle çevresel açıdan duyarlı bölgeleri etkileyebilecek ya da çok sayıda türbin içeren projeler daha detaylı incelemelere tabi tutulur (Ehtasham ve diğ., 2021). Bu ilk adımda, ulusal mevzuatta belirtilen kriterler temel alınarak daha ileri çevresel çalışmaların gerekliliği değerlendirilir (Tyszer ve Gałas, 2020).

3.3.2 Kapsam Belirleme

Kapsam belirleme aşamasında, ÇED raporunda ele alınması gereken temel çevresel konular belirlenir. Bu aşama, yerel halk, düzenleyici kurumlar ve çevre örgütleri gibi paydaşların da sürece dahil edildiği bir süreci temsil etmektedir. Böylece hangi etkilerin öncelikli olarak ele alınması gerektiği konusunda bilgi toplanmaktadır (Tyszer ve Gałaś, 2020). Kapsam belirleme aşamasında, kuş ve yarası popülasyonları, habitat bozulması, görsel etki ve gürültü kirliliği gibi çevresel faktörlerin dikkate alınması gerekir (Chambert ve diğ., 2023).

3.3.3 Mevcut Durumun Belirlenmesi

Mevcut çevresel koşullara yönelik verilerin elde edildiği bu aşamada, değerlendirme süreci çok önemlidir. Rüzgar desenlerinin ölçülmesi, habitat değerlendirmeleri ve ekolojik incelemeler ile flora ve fauna hakkında bilgi toplanmaktadır (Froidevaux ve diğ., 2024). Bu değerlendirme çalışmaları, proje öncesi durumun referans noktası olarak kabul edilmesini ve potansiyel etkilerin bu temel verilerle karşılaştırılmalı olarak analiz edilmesini sağlamaktadır (Kasner ve diğ., 2020).

3.3.4 Etki Değerlendirmesi

Etki değerlendirme aşamasında, rüzgar santralının inşaat, işletme ve hizmet dışın bırakma dönemlerinde ortaya çıkabilecek çevresel etkiler değerlendirildiği için kritik bir aşama olarak kabul edilmektedir. İnsan sağlığı, ekosistem kalitesi, kaynak kullanımı ve iklim değişikliği üzerindeki etkiler YDD gibi yöntemlerle analiz edilmektedir (Sobaszek ve diğ., 2023). YDD, türbin üretimi, kurulum süreci ve işletimi sırasında ortaya çıkacak emisyonları da dahil eden, RES'in yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini niceliksel olarak ölçen etkili bir değerlendirme aracıdır (Sobaszek ve diğ., 2023).

3.3.5 Azaltım Önlemleri

Önemli etkiler belirlendikten sonra, uygulanabilir azaltım stratejileri geliştirilmektedir. Türbin yerleşim planlarının habitat bozulmasını en aza indirecek şekilde düzenlenmesi, gürültü azaltıcı teknolojilerin kullanılması ve inşaat sonrası kuş ve yarasa gibi yaban hayatı ile türbin etkileşiminin izlenmesi azaltım stratejilerine örnek olarak verilebilir (Froidevaux ve diğ., 2024). Bu önlemlerin proje geliştirme aşamalarına etkin bir biçimde dahil edilmesi, olumsuz etkilerin en aza indirilmesi açısından son derece önemlidir (Tyszer ve Gałaś, 2020).

3.3.6 Raporlama

ÇED sürecinde elde edilen tüm veriler, kapsamlı bir rapor haline getirip sunulmaktadır. Bu rapor, değerlendirme süreci, mevcut çevresel koşullar, öngörülen etkiler ve önerilerin azaltım stratejileri bölümlerini içermektedir. Düzenleyici kurumlara sunulan bu rapor, karar alma süreçlerinin temelini oluşturmaktadır (Ehtasham ve diğ., 2021). Anlaşılır ve şeffaf yürütülen bir raporlama süreci, kamoyunun projeye olan güvenini artırmak ve toplumsal desteği güçlendirmek açısından önemlidir (Ehtasham ve diğ., 2021).

3.3.7 Karar Alma Süreci

ÇED raporu sunulduktan sonra, yetkili düzenleyici kurumlar raporu inceleyerek nihai kararı verir. Bu değerlendirme, projenin olası çevresel etkilerini, öngörülen azaltım önlemleri stratejilerininin yeterliliğini ve projenin genel faydalarını kapsamlı bir şekilde ele alır (Shin ve diğ., 2024). Bu aşamada kamoyu danışma toplantıları düzenlenebilir, böylece topluluk üyeleri, raporda belirtilen etkiler doğrultusunda projeye destek veya itirazlarını söyleyebilir (Tyszer ve Gałaś, 2020).

3.3.8 İzleme ve Uygunluk

Proje onaylandıktan sonra, RES'in ÇED raporunda belirtilen koşullara tam uyum göstermesi gerekmektedir. İşletme sürecinde, azaltım önlemlerinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla izleme programları yürütülmektedir (Kasner ve diğ., 2020). İzleme sonuçlarına göre sürekli geri bildirim sağlanması ve gerektiğinde düzeltici adımlar atılması, projenin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel sorumluluğa da dayalı bir anlayışla yönetilmesini sağlamaktadır (Kasner ve diğ., 2020).

3.4 Türbin Seçimi ve Altyapı Çalışmaları

3.4.1 Türbin Seçimi

RES'ler için uygun türbin seçimi, esas olarak, rüzgar hızı ve yönü gibi sahaya özgü rüzgar karakteristikleri, alan kısıtları ve enerji üretim hedefleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Adesiyen ve Akinnawo, 2024). Yüksek verimlilikleri nedeniyle HAWT'ler büyük ölçekli projelerde daha yaygın tercih edilirken, VAWT'ler, özellikle kentsel veya sınırlı alanlarda avantaj sağlayabilmektedir (Maren ve diğ., 2022).

Farklı türbin performanslarının değerlendirilmesi, sahaya uygun teknolojinin seçilmesinde vazgeçilmezdir. Araştırmalar, mevcut türbin modellerinin saha performans eğrilerine göre seçilmesinin, projenin başarısını doğrudan etkilediğini göstermektedir (Maren ve diğ., 2022). Ayrıca, hava kanadı tasarımlarının optimizasyonunda kullanılan sayısal simülasyonlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknikleri sayesinde türbin verimliliği artırılmakta ve tasarımlar doğrulanabilmektedir (Adesiyen ve Akinnawo, 2024). Bunun yanında, çok kriterli karar verme yaklaşımları da hava kanadı seçimi ve malzeme belirlemede giderek daha fazla kullanılmakta olup bu sayede farklı rüzgar hızı rejimlerinde performans artışı hedeflenmektedir (Batu ve diğ., 2024).

3.4.2 Altyapı Çalışmaları

RES'nin geliştirilmesi, önemli altyapısal unsurları da içermektedir. Bu unsurlar, erişim yollarının, türbin temellerinin ve enerji toplama sistemlerinin tasarımı gibi bileşenleri kapsamaktadır. Altyapının etkin şekilde planlaması hem inşaat hem de bakım faaliyetlerinin verimli yürütülmesini sağlarken, santralin devreye alınmasından sonra işletmenin sorunsuz devam etmesine de katkı sağlar. Türbinlerin yerleşim düzeni, mikro yerleşim olarak adlandırılmaktadır ve özellikle hava akımı etkilerinin en aza indirilmesi ve enerji üretiminin maksimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Stanley ve diğ., 2023). Mikro yerleşim süreci, türbinlerin birbirlerinin türbülans etkilerinden en az etkilenecek biçimde stratejik olarak konumlandırılmasını içermektedir ve bu da genel üretim verimliliğini artırmaktadır (Stanley ve diğ., 2023).

Rüzgar çiftliklerinde akıllı şebeke teknolojileri ve otomatik bakım sistemlerinin entegrasyonu gibi gelişmiş kontrol sistemlerinin uygulanması da önemli bir konu haline gelmektedir. Bu teknolojiler, yalnızca santralin operasyonel istikrarını sağlamaz, aynı zamanda farklı rüzgar koşullarında enerji kalitesini ve üretimini de optimize etmektedir. Bu tür stratejik teknolojiler, özellikle zorlu çevresel koşulların hakim olduğu deniz üstü RES projelerinde önemli bir rol oynamaktadır (Ruiz ve diğ., 2021).

3.4.3 Türbinlerde Yaşam Döngüsünün Değerlendirilmesi

Türbinlerin yapısal bütünlüğü ve tasarım ömürleri genellikle 20-21 yıl olarak belirlenmiştir ve bu süre IEC61400-1 gibi tasarım sertifikasyonlarına uyum sağlamaktadır. Bu değerlendirmeler, tanımlı yük koşulları altında oluşabilecek yorulma etkilerinin analiz edilmesini ve türbinlerin kurulum sahalarında karşılabilecekleri zorlu çevresel koşullara karşı dayanıklılıklarının güvence altına alınmasını sağlamaktadır (R. Guo ve diğ., 2022).

Ayrıntılı tasarım ve altyapı çalışmaları aynı zamanda finansal etkiler ve sosyal etki analizlerini de içermektedir. Bu analizler, projenin genel enerji hedefleriyle ve toplum ihtiyaçlarıyla ne ölçüde uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, 95 MW kapasiteli bir RES tasarımı üzerine yapılan bir örnek olay çalışması, türbin seçimi,

yerleşim planı ve mali fizibilite gibi tüm unsurların, daha geniş kapsamlı sürdürülebilirlik hedefleri bağlamında değerlendirilmesinin önemine işaret etmektedir (Tang ve Wang, 2022).

3.5 Şebeke Bağlantısı ve Enerji İletimi

3.5.1 Şebeke Bağlantı Teknolojileri

Şebekeye bağlantı teknolojisinin seçimi, projenin kapasitesi, tüketim merkezlerine olan uzaklığı ve genel ölçeği gibi özel koşullara bağlı olarak belirlenmektedir. Bu bağlamda genellikle iki temel teknoloji kullanılmaktadır: Yüksek Gerilim Alternatif Akım (HVAC) ve Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVE DİĞC) sistemleri. HVAC sistemleri genellikle 500 MW altı kapasiteye sahip ve şebeke bağlantı noktasına 100 km'den daha kısa mesafede yer alan RES'ler için tercih edilmektedir. Bu sistemler, daha düşük ilk yatırım maliyetleri ve operasyonel verimlilikleri nedeniyle kısa mesafeler için ekonomik açıdan daha uygundur (Cai ve diğ., 2022). Örneğin, pek çok deniz üstü rüzgar enerjisi projesi, bu eşik değerler dâhilinde HVAC bağlantısıyla başarıyla işletilmektedir (Cai ve diğ., 2022). Proje ölçeği ve mesafesi arttıkça, özellikle büyük ölçekli deniz üstü RES'lerde HVE DİĞC teknolojisi avantaj sağlamaktadır. HVE DİĞC sistemleri, uzun mesafeli iletimde enerji kayıplarını azaltmakta, iletim verimliliğini artırmakta ve harmonik, frekans kararsızlığı veya reaktif güçle ilgili sorunları en aza indirmektedir. Bu teknoloji, tüketim merkezlerinden uzak bölgelerde kurulan büyük RES'lerin verimli şekilde şebekeye bağlanabilmesi için giderek daha fazla gereklilik hâline gelmiştir (Lü ve diğ., 2023; Zhou ve diğ., 2020).

3.5.2 Şebeke Entegrasyonunda Karşılaşılan Zorluklar

Rüzgâr enerjisinin doğası gereği değişken ve kesintili olması, şebeke kararlılığını sağlamak için gelişmiş yönetim stratejileri gerektirmektedir. HVE DİĞC teknolojisine geçiş bu sorunların bir kısmını azaltabilse de kendi içerisinde bazı teknik

zorluklar barındırmaktadır. Örneğin, HVE DİĞC sistemlerinin entegrasyonu sırasında, uzun mesafeli ve zayıf AC şebekeleriyle etkileşimlerde alt senkron salınımlar (subsynchronous oscillations) gibi fenomenlerle karşılaşılabilir (Hao ve diğ., 2020; Ming ve diğ., 2024). Ayrıca, birçok RES'in uzak ve izole edilmiş bölgelerde konumlanması, zayıf şebeke koşullarının oluşmasına neden olabilmekte ve etkili enerji iletimini zorlaştırmaktadır. Çin'in kuzeybatısı gibi bölgelerde, önemli rüzgar potansiyelleri tüketim merkezlerine oldukça uzak olduğundan, HVE DİĞC sistemlerine duyulan ihtiyaç belirgin şekilde artmıştır (Zhou ve diğ., 2020).

3.5.3 Enerji Depolama ve Dalgalanma Yöntemi

Rüzgâr enerjisinin üretimindeki değişkenliği dengelemek ve şebeke kararlılığını korumak amacıyla enerji depolama çözümlerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Gerçek zamanlı enerji arz ve talep yönetimi için batarya sistemleri veya hibrit enerji depolama çözümleri giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu teknolojiler, rüzgar enerjisinin şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmakta ve arz güvenliğini artırmaktadır. Enerji üretiminin anlık ayarlanabilirliği sayesinde, depolama sistemleri RES'lerin şebeke taleplerine daha kararlı biçimde yanıt vermesini mümkün kılar (J. Shang ve Jia, 2023).

3.5.4 Uyarlanabilir Kontrol Mekanizmaları

Rüzgar enerji santralleri ile elektrik şebekesi arasındaki etkileşimleri yönetmek için ileri düzey kontrol stratejileri giderek daha büyük bir rol üstlenmektedir. Örneğin, Gerilim Kaynaklı Evirici (VSC) tabanlı HVE DİĞC sistemleri hem aktif hem de reaktif gücün hassas şekilde kontrol edilmesine imkân tanıyarak şebeke kararlılığını ve tepki hızını artırmaktadır. Bu tür sistemler, şebeke gerilim seviyelerinin korunmasına ve iletim kayıplarının azaltılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Song ve diğ., 2022).

3.5.5 Etki Değerlendirmesi ve Altyapı Planlaması

Rüzgar enerjisinin entegrasyonuna yönelik altyapı planlaması, olası etkilerin kapsamlı değerlendirmesini gerektirir. Literatürde, büyük ölçekli rüzgar santrallerinin entegrasyonunun, özellikle zayıf şebeke altyapısına sahip bölgelerde, mevcut iletim sistemlerini zorlayabileceği ifade edilmektedir (Abbas ve diğ., 2020). Bu nedenle, şebeke güvenilirliği, kamu politikaları ve uzun vadeli enerji stratejileri de dâhil olmak üzere çok boyutlu analizler yapılmalıdır. Altyapı, yalnızca mevcut enerji kapasitesini karşılamakla kalmayıp, gelecekteki genişleme ve dayanıklılık ihtiyaçlarını da öngöreceği şekilde planlanmalıdır (Abbas ve diğ., 2020).

3.6 Kurulumdan İşletmeye Geçiş

Rüzgar enerji santrallerinde (RES) kurulum aşamasından işletme aşamasına geçiş süreci, türbinlerin şebekeye entegrasyonu ile başlar. Bu aşamada türbinlerin, elektriksel bileşenlerin ve şebeke bağlantılarının birbiriyle uyum içinde çalışmasını sağlamak amacıyla kapsamlı testler ve devreye alma işlemleri gerçekleştirilir. Devreye alma süreci, her bir türbinin tasarım spesifikasyonlarına uygun şekilde çalıştığını doğrulamak için kritik öneme sahiptir. Bu doğrulama süreci, tam ölçekli işletmeye geçmeden önce gerekli ayarlamaların yapılmasına olanak tanır (L. Wang ve Huang, 2024). Rüzgar projeleri, üretimlerinin değişken doğası nedeniyle entegrasyon sorunlarına karşı daha hassas olduğundan, devreye alma yalnızca işlevsellik testlerini değil, aynı zamanda şebeke kodlarıyla uyumlu çalışmanın sağlanmasını da içermelidir. Bu aşamadan itibaren, türbin performansını ve altyapı bileşenlerini izlemek için genellikle sürekli izleme sistemleri devreye alınır (Fang ve diğ., 2022).

Sistem entegrasyonunun ardından, tesisin verimliliğini optimize etmek için ayrıntılı performans değerlendirmeleri gerçekleştirilir. Bu değerlendirmeler, türbinlerin farklı rüzgar koşullarında nasıl çalıştığını anlamak amacıyla güç eğrilerinin analiz edilmesini kapsar. Türbinlerin operasyonel karakteristiklerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, tesisin ömrü boyunca en yüksek verimle çalışmasını sağlamak açısından büyük önem taşır (Fang ve diğ., 2022). Güç eğrisi ile beklenen ve gerçek üretim arasındaki farklar ya türbinlerdeki verimsizlikleri ya da sistem entegrasyonundaki aksaklıkları işaret edebilir. Bu nedenle, büyük veri tekniklerinden

yararlanarak yapılan istatistiksel analizler, olası sorunların erkenden fark edilmesini ve çözülmesini sağlayarak işletme kararlarının iyileştirilmesine katkı sunar (Fang ve diğ., 2022).

RES'lerin istikrarlı bir şekilde işletmeye geçebilmesi için etkili bakım planlaması da büyük önem taşır. Operasyonel verilere dayalı olarak öngörücü bakım takvimlerinin oluşturulması, arıza sürelerini en aza indirerek enerji üretimini optimize eder. Bu stratejiler, rutin bakım hizmetlerinin yanı sıra acil durum müdahalelerini de kapsamalıdır. Özellikle deniz üstü rüzgar santrallerinde çevresel koşullar bakım faaliyetlerini zorlaştırabildiğinden, bakım planlaması daha da karmaşık bir hâl alır (Mou ve diğ., 2021). El olarak, bakım personelinin sürekli olarak eğitilmesi ve teknik yeterliliğinin artırılması da oldukça önemlidir. Rüzgar türbini teknolojileri sürekli gelişim gösterdiğinden, mekanik ve elektriksel sistemlerin etkin şekilde yönetilmesi hem enerji üretiminin güvenilirliği hem de iş sağlığı ve güvenliği açısından hayati rol oynar (Mou ve diğ., 2021).

İşletme aşamasına geçildiğinde, ekonomik yönetim stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanması da ön plana çıkar. Özellikle yetersiz rüzgar koşulları nedeniyle üretimin düşük olduğu dönemlerde ortaya çıkabilecek operasyonel risklerin tanımlanması, önemli ekonomik kayıpların önüne geçebilir (Zhao ve diğ., 2023). Bu nedenle, işletme dinamiklerinin finansal etkilerini değerlendirmeye olanak sağlayan ekonomik modellerin kullanılması, belirsizlikleri yönetmeye ve finansal çıktıları optimize etmeye yardımcı olur. Bununla birlikte, işletme öncesi tasarım ve kurulum aşamalarında geliştirilen risk yönetimi stratejilerinin işletme süresince de güncel tutulması, tesisin uzun vadeli ekonomik uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırır (Zhao ve diğ., 2023).

Son olarak, bu geçiş sürecinde paydaşlarla ve yerel toplumla etkili iletişim kurulması, rüzgar projelerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir etkidir. Yerel halkın enerji dönüşüm süreçlerine dâhil edilmesi, işletme aşamasının daha sorunsuz ilerlemesini sağlarken, toplumsal kaygıların da giderilmesine yardımcı olur. Ayrıca, yerel halkın projeye katılımını ve sahiplenmesini teşvik edecek sponsorluk ve sosyal sorumluluk uygulamaları, rüzgar enerjisinin toplum nezdinde daha olumlu bir algı oluşturmaya katkı sunar ve uzun vadeli operasyonel başarıyı destekler (Reitz ve diğ., 2021).

4. KARBON AYAK İZİ KAVRAMI VE RES'LERDE KARBON AYAK İZİ

4.1 Karbon Ayak İzi Tanımı ve Önemi

Karbon ayak izi, bireysel tüketici davranışlarından büyük ölçekli endüstriyel süreçlere kadar çeşitli faaliyetlerin çevresel etkilerini değerlendirmede temel bir ölçüt olarak ortaya çıkmıştır. Karbon ayak izi; bir birey, kurum etkinlik veya ürünün doğrudan ve dolaylı olarak neden olduğu toplam sera gazı emisyonlarını, yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan karbondioksit eşdeğeri (CO₂-eq) cinsinden ifade etmektedir. Bu hesaplama, enerji kullanımı, ulaşım, ürün üretimi ve atık yönetimi gibi süreçlerden kaynaklanan emisyonları kapsamaktadır (Ahmetoğlu ve Tanık, 2020; Ekinci ve Mert, 2023). Bu ölçüt, yalnızca çevresel etkiyi niceliksel olarak değil, aynı zamanda farklı sektörlerde sürdürülebilirlik çabalarının teşvik edilmesine olan katkısı nedeniyle önemlidir.

Karbon ayak izinin anlaşılması, çeşitli açılardan kritik öneme sahiptir. İlk olarak, üretim uygulamaları ve çevresel bozulma arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliğini değerlendirme konusunda bir çerçeve sunmaktadır (Ekinci ve Mert, 2023). Niceliksel yönden yapılan karbon ayak izi hesaplaması, emisyonları azaltmaya ve çevre dostu uygulamaları teşvik etmeye yönelik politika geliştirme süreçlerine sağlamaktadır. Örneğin, inşaat sektörü gibi farklı endüstrilerde karbon ayak izini değerlendirmeye yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, doğrudan faaliyetlerden kaynaklanan birincil emisyonlar ile tedarik zincirinin yukarı akışında yer alan dolaylı süreçlerden kaynaklanan ikincil emisyonları birbirinden ayırarak analiz etmektedir (Ahmetoğlu ve Tanık, 2020; Gul ve diğ., 2023).

Karbon ayak izinin önemi yalnızca kurumsal ya da endüstriyel düzeyle sınırlı olmayıp bireysel davranışlara kadar da uzanmaktadır. Araştırmalar, bireysel yaşam tarzı tercihlerinin (özellikle beslenme biçimi, ulaşım araçları) karbon emisyonları üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Saleki ve diğ., 2023). Gıda üretiminin çevresel sağlık üzerindeki etkisi kayda değerdir ve tüketim kaynaklı toplam çevresel etkinin yaklaşık %20-30'unu oluşturmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir

beslenme alışkanlıklarının ve gıda politikalarının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Bireysel karbon ayak izini değerlendirmeye yönelik geliştirilen hesaplayıcı araçlar, farkındalık yaratmakta ve bireyleri daha sürdürülebilir alışkanlıklar kazanmaya teşvik etmektedir (Saleki ve diğ., 2023).

4.2 Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri

Çeşitli faaliyetlerin çevresel etkilerinin anlaşılması açısından büyük önem taşıyan karbon ayak izinin hesaplanmasında değerlendirmeyi kolaylaştırmak için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en kapsamlı ve en yaygın olarak kabul gören yaklaşım, ürün veya hizmetin tüm yaşam döngüsünü kapsayan doğrudan ve dolaylı emisyonları dikkate alan YDD çerçevesidir (Heazell ve diğ., 2023). YDD yöntemi, sera gazı emisyonlarını CO₂-eq cinsinden niceliksel olarak belirlemektedir ve böylece farklı ürün ve faaliyetlerin yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerinin karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır (Heazell ve diğ., 2023; Karpan ve diğ., 2021).

Karbon ayak izi hesaplamasına yönelik olarak geliştirilen diğer yöntemlerin de farklı güçlü yönleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan Logaritmik Ortalama Divisia İndeksi (LODİ), karbon ayak izindeki değişimleri, faaliyet düzeyi, enerji yoğunluğu ve emisyon katsayıları gibi farklı etkenlere ayrıştırarak analiz etmektedir. Bu yöntem, özellikle kentsel alanlar ya da sektörel bağlamlarda karbon ayak izindeki değişimin temel dinamiklerini anlamaya olanak sağlar (Ahmetoğlu ve Tanık, 2020; M. Shang ve Luo, 2021). Çin'de yapılan çalışmalarda, kentsel karbon ayak izleri LODİ yöntemiyle analiz edilmiş ve emisyonları etkileyen temel faktörler istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Bu bağlamda LODİ, bölgesel düzeyde politika geliştirme açısından işlevsel bir araç haline gelmiştir (M. Shang ve Luo, 2021).

YDD yöntemi, yalnızca çevresel ürün beyanı hazırlamak için değil, aynı zamanda enerji sektörü ve üretim süreçleri gibi çok farklı bağlamlarda da uygulanabilmektedir. Endüstriyel ürünlerin değerlendirilmesinde, örneğin kot kumaşından üretilmiş ceketler üzerinde yapılan analizler; pamuk üretiminden denim kumaşın işlenmesine ve ürünün kullanım ömrü sonundaki durumuna kadar tüm aşamalardaki karbon emisyonlarını kapsamaktadır (Cheng ve Liang, 2021). Bu tür analizler, ürün yaşam döngüsü boyunca emisyonların en yoğun olduğu aşamaları tespit

etmeyi ve azaltım stratejilerinin bu noktalara odaklanmasını mümkün kılar. Benzer şekilde inşaat sektörü için yapılan karbon ayak izi değerlendirmeleri, sera gazı salınımının kaynaklarını belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Bu emisyonlar, doğrudan enerji kullanımına dayanan birincil emisyonlar ve kullanılan tüm yapı malzemelerinin yaşam döngüsü sürecindeki etkilerini içeren ikincil emisyonlar olarak ikiye ayrılmaktadır (Ahmetoğlu ve Tanık, 2020; Harusi ve diğ., 2023).

Gelişen teknolojiler ve yazılımlar da karbon ayak izinin daha doğru ve hızlı bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle Gabi gibi yaşam döngüsü analiz yazılımları, yaşam döngüsünün farklı aşamalarında veri toplama ve analiz süreçlerini otomatikleştirerek hesaplamaları büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu tür dijital araçlar, karbon ayak izi değerlendirmelerinin doğruluğu ve erişilebilirliğini artırmakta, kurumların çevresel etkilerini stratejik biçimde yöntemlerine imkan tanımaktadır (K. Wang ve diğ., 2023).

4.3 Yenilenebilir Enerji sistemlerinde Karbon Ayak İzi

Yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, enerji üretiminden kaynaklanan karbon ayak izinin azaltılması açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığı zaman daha düşük sera gazı emisyonları ile elektrik üretebilme özellikleri sayesinde, küresel ölçekte düşük karbon salımı hedefiyle yürütülen enerji dönüşümünün temel taşları arasında yer almaktadır (Suparwoko ve Qamar, 2021). Bu dönüşüm süreci, yenilenebilir kaynakların doğası gereği kesintili üretim yapmalarına rağmen, enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde desteklenmekte, böylece hem enerji arz güvenliği sağlanmakta hem de yüksek emisyonlu kaynaklara olan bağımlılık azalmaktadır (Aslan ve diğ., 2024).

YDD yöntemi, yenilenebilir enerji sistemlerinin karbon ayak izinin değerlendirilmesinde de en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. YDD, fotovoltaik (PV) sistemler bağlamında da uygulanmış ve bu sistemlerin karbon ayak izinin 14 ile 73 gram CO₂-eq/kW arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu değer, geleneksel fosil yakıt santrallerinin kW başına ürettiği birkaç yüz gram CO₂ salımıyla karşılaştırıldığında, yenilenebilir teknolojilerin küresel emisyon azaltımında önemli bir stratejik bir rol

oynayabileceği açıkça göstermektedir (Saleem ve Ahmed, 2023; X. Zhang, Yuan, ve diğ., 2023).

Gelişmekte olan bölgelerde yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerjinin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlama potansiyelini de gözler önüne sermektedir. Örneğin, Latin Amerika ülkeleri, hidroelektrik gibi zengin yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak daha temiz enerji sistemlerine geçmekte; bu sayede karbon ayak izlerini azaltırken ekonomik büyümeyi de teşvik etmektedir (Kamau, 2024). Benzer şekilde, Çin gibi ülkelerde güneş ve rüzgâr enerjisine yönelik kurulu kapasitenin giderek artması, bu teknolojilerin ölçeklenebilirliğini ve karbon emisyonlarını hızla azaltmadaki etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır (Kamau, 2024).

Doğrudan emisyon azaltımının ötesinde, yenilenebilir enerji uygulamaları aynı zamanda enerji verimliliği iyileştirmeleri açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle, binaların çatılarına kurulan çevre dostu PV sistemleri, yalnızca temiz enerji üretmekle kalmayıp, aynı zamanda kentsel enerji tüketiminden kaynaklanan toplam karbon ayak izini de önemli ölçüde azaltmaktadır (Ganegodage ve diğ., 2021; Suparwoko ve Qamar, 2021). Enerji üretimi ve tüketim desenlerinin optimize edilmesini sağlayan bu tür çözümler, sera gazı emisyonlarının kayda değer biçimde düşürülmesine katkı sağlamakta; bu sayede yenilenebilir enerji kaynaklarının kent planlaması ve sürdürülebilir kentsel gelişim bağlamındaki uygulanabilirliğini pekiştirmektedir.

4.4 RES Kurulumunda Karbon Emisyonu Kaynakları

4.4.1 Türbin üretimi

Rüzgâr enerji santralleri için yapılan karbon ayak izi analizleri, özellikle türbin üretimi bağlamında ele alındığında, rüzgâr enerjisi sistemlerinin genel çevresel etkilerinin anlaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisi üretimine dair yaşam döngüsü emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu analizler, hammadde çıkarımı, üretim, taşıma, kurulum, işletme ve hizmet dışı bırakma gibi birden çok aşamayı kapsar (Türkmen ve Babuna, 2024).

Türbin üretiminden kaynaklanan karbon ayak izinin büyük bir bölümü, özellikle kulelerde kullanılan çelik, elektriksel bileşenlerdeki bakır ve kanatlarda yer alan kompozit malzemeler gibi yüksek emisyonlu materyallerden kaynaklanmaktadır (Villoslada ve diğ., 2021a). YDD, rüzgar türbinlerinin çevresel etkilerinin %78'inin üretim aşamasında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu oran, üretim sürecinin toplam emisyonlar üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Fonseca ve Carvalho, 2022). Özellikle, kompozit yapıya sahip olan türbin kanatlarının üretimi için yüksek enerji tüketimi gerekmekte ve bu durum önemli düzeyde sera gazı salınımı ile sonuçlanmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, türbinlerin işletme sırasında karbon ayak izi oldukça düşük olsa da üretim aşamasındaki emisyonlar, kurulu kapasite başına yüzlerce kilogram CO₂-eq seviyesine ulaşabilmektedir (Fonseca ve Carvalho, 2022).

Üretim süreci daha ayrıntılı incelendiğinde, enerji geri ödeme süresi (Energy payback Time – EGÖS) ve sera gazı geri ödeme süresi (Greenhouse Gas Payback Time – SGÖS) gibi göstergeler ön plana çıkmaktadır. Bu göstergeler, bir türbinin üretimi sırasında neden olduğu emisyonları ne kadar sürede telafi ettiğini göstermektedir. Örneğin, Brezilya'da bulunan 1,65 MW'lık bir rüzgar türbini için yapılan çalışmada, SGÖS yalnızca 50 gün, EGÖS ise yaklaşık 1,12 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, rüzgar türbinlerinin karbon emisyonları açısından net pozitif hale gelmesinin görece kısa sürede gerçekleştiğini göstermektedir (Fonseca ve Carvalho, 2022).

Türbin tasarımında ve kullanılan malzemelerde gerçekleştirilen yenilikler, bu alandaki karbon ayak izini daha da azaltmak adına büyük önem taşımaktadır. Daha hafif yapı malzemeleri ya da geri dönüştürülmüş bileşenlerin kullanımı, üretim aşamasındaki emisyonların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Türkmen ve Babuna, 2024). Ayrıca, üretim süreçlerinde yeşil enerji kullanımı, türbin üretiminin karbon etkisini azaltmaktadır. Rüzgar türbini teknolojisi ilerledikçe, optimize edilmiş üretim süreçleri, daha temiz enerji kaynaklarının kullanımı ve sürdürülebilir üretim uygulamaları, rüzgar enerjisi sistemlerinin genel çevresel sürdürülebilirliğini artırmada belirleyici olacaktır (Shinagam ve diğ., 2020).

Bunun yanı sıra, RES'lerin coğrafi konumu, karbon ayak izi üzerinde etkili bir başka faktördür. Kara tipi ve denizüstü rüzgar çiftlikleri, lojistik koşullar ve kaynaklara erişim farklılıkları nedeniyle çevresel etkiler açısından farklılıklar göstermektedir. Denizüstü santraller, daha sabit rüzgar rejimlerinden fayda sağlasa da deniz ortamındaki kurulum süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle inşaat aşamasında daha yüksek başlangıç emisyonlarına neden olabilmektedir. Öte yandan, kara tipi türbinlerin

yaşam döngü emisyonları daha yüksek olabilmekle birlikte, taşıma kaynaklı emisyonların daha düşük olması gibi avantajlar sunmaktadır (Villoslada ve diğ., 2021b).

4.4.2 Nakliye Süreci

Türbinlerin giderek daha büyük ve karmaşık hale gelmesi, bu yapıların taşınmasına ilişkin lojistik zorlukları ve buna bağlı emisyonları da artırmaktadır. Bu aşama, kanat, kule ve nacelle (jeneratör ve dişli kutusunu içeren üst yapı) gibi türbin bileşenlerinin üretim tesislerinden kurulum alanlarına taşınmasını kapsamaktadır. Bu süreç, özellikle bileşenlerin ağırlığı ve hacmi dikkate alındığında önemli lojistik sorunlara sebep olmaktadır (Pincelli ve diğ., 2024).

Rüzgar türbini bileşenlerinin taşınmasında çoğunlukla kara yolu taşımacılığı tercih edilmekte, denizüstü santraller içinse buna ek olarak nehir taşımacılığı ya da deniz yoluyla barç kullanımı da söz konusu olabilmektedir. Özellikle 60 metreyi aşan uzunluktaki türbin kanatları için taşınma sırasında hasar görmemesi için özel tasarlanmış taşıma araçları gerekmektedir (Bošnjaković ve diğ., 2022). Bu taşıma sürecine bağlı karbon emisyonları, üretim noktası ile kurulum sahası arasındaki mesafe, kullanılan ulaşım türü ve taşınan bileşenlerin toplam ağırlığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Pollini, 2024).



Şekil 4.4.2. Türbin nakliye süreci

Yapılan çalışmalar, taşıma sürecinin, rüzgar türbinlerinin tüm yaşam döngüsüne ait karbon ayak izinin yaklaşık %15 ile %25'ini oluşturabileceğini söylemektedir. Bu

oran, coğrafi koşullar ve lojistik altyapıya bağlı olarak değişebilmekle birlikte, büyük boyutlu bileşenlerin uzun mesafelerde taşınmasının doğrudan emisyonlarına ek olarak, bu sürece gizli enerji (embodied energy) maliyetlerini de içermektedir (Pincelli ve diğ., 2024; Tang ve diğ., 2024).

Taşıma kaynaklı karbon ayak izi ile ilgili bir diğer önemli husus ise, bu büyük parçaların taşınabilmesi için gerekli altyapının oluşturulmasıdır. Özellikle yüksek rakımlı ya da erişimi zor bölgelerde, bu süreç çoğu zaman geçici erişim yollarının inşasını zorunlu kılmakta, bu da beraberinde ekosistem tahribatı, bitki örtüsünün temizlenmesi ve dolayısıyla ilave karbon salımı gibi çevresel etkileri getirmektedir (Jureczko ve Mrówka, 2022). Bu nedenle, taşıma güzergâhlarının optimize edilmesi ve daha sürdürülebilir taşıma yöntemlerinin kullanılması, bu olumsuz etkileri azaltmada önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Peng ve diğ., 2023). Ayrıca, alternatif tasarım yaklaşımları ve üretim teknikleri, türbin bileşenlerinin boyutunu ve taşınabilirliğini azaltarak taşıma kaynaklı karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sunabilir. Örneğin, kanatların daha küçük ve taşınabilir bölümlere ayrılması, taşıma sürecindeki emisyonların düşürülmesini sağlayabilir (Bošnjaković ve diğ., 2022). Bununla birlikte, saha kurulumuna uygun modüler bileşenlerin geliştirilmesi, taşımacılıkla ilgili karbon ayak izinin azaltılmasında yenilikçi bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir.

4.4.3 İnşaat Faaliyetleri

RES'in inşaat aşaması, santralin toplam karbon ayak izi içerisinde dikkate değer bir paya sahiptir. Bu süreç, saha hazırlığı, temel kazıları, kulelerin dikimi, türbin bileşenlerinin montajı gibi bir dizi mühendislik faaliyeti içermektedir. Her bir aşama doğrudan ya da dolaylı sera gazı emisyonlarına neden olarak, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Pincelli ve diğ., 2024).

YDD ile yapılan çalışmalarda, inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan karbon salımının proje lokasyonu, seçilen teknoloji ve yapısal tasarım gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ortaya konmuştur. Örneğin, Pincelli ve diğ. (2024), karasal rüzgar santralleri için inşaat kaynaklı ortalama emisyonun yaklaşık 9,7 gCO₂eq/kW düzeyinde olduğunu bildirmiştir. Bu bulgular, inşaat sürecine özgü karbon salımlarının yalnızca genel emisyon hesaplamalarına eklenmekle kalmayıp, aynı

zamanda projeye özel stratejik önlemlerin geliştirilmesine de zemin hazırladığını göstermektedir. İnşaat faaliyetlerinin yalnızca karbon salımı değil, aynı zamanda ekosistem bütünlüğü üzerinde de olumsuz etkileri olabilmektedir. Li ve diğ. (2024) Hunan Eyaleti'nde gerçekleştirdiği bir çalışmada, rüzgar santrali inşaatlarının toprak besin içeriğinde azalma ve bitki örtüsünde bozulma ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Bu durum, doğal karbon yutaklarının zarar görmesiyle birlikte, dolaylı emisyon artışlarına da yol açabilecek potansiyel çevresel riskleri gündeme getirmektedir.

Öte yandan, inşaat malzemelerinin taşınması, karbon ayak izi üzerinde önemli bir yük oluşturmaktadır. Türbin bileşenlerinin yanı sıra beton, çelik ve diğer yapı malzemelerinin taşınması sürecinde oluşan emisyonların, toplam yaşam döngüsü emisyonlarının %15 ila %25'ini oluşturabileceği bildirilmektedir (Pincelli ve diğ., 2024; Tang ve diğ., 2024). Özellikle uzak, dağlık ya da altyapı açısından yetersiz alanlara ulaşımında ortaya çıkan taşıma ihtiyaçları bu oranı artırmaktadır. Bu nedenle yerel malzeme kullanımı ve optimize edilmiş lojistik planlama, inşaat kaynaklı emisyonların azaltılmasında stratejik önlemler arasında yer almaktadır.

İnşaat aşamasında kullanılan temel sistemleri ve kazı yöntemleri de karbon salımını etkileyen başlıca değişkenlerdendir. Örneğin, Dammeier ve diğ. (2022), monopile gibi tekil yapı temellerinin, diğer yöntemlere kıyasla farklı emisyon profillerine sahip olduğunu ve kullanılan ekipman türünün bu farkı daha da belirginleştirdiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, düşük karbon içerikli malzemelerin kullanımı ve enerji verimli kazı tekniklerinin uygulanması, karbon ayak izini azaltıcı yenilikçi yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir.

4.4.4 İşletme ve Bakım

Rüzgar türbinlerinin verimliliği, kullanılan kontrol sistemleri ve elektrik şebekesiyle olan uyumu gibi faktörler, operasyon süresince ortaya çıkan dolaylı emisyonları etkilemektedir. Enerji yönetim sistemleri ve şebeke dengeleme ihtiyacı, özellikle rüzgarın kesintili doğası nedeniyle fosil yakıt temelli rezerv enerji kaynaklarının devreye girmesini gerektirebilir. Bu durum, doğrudan rüzgar enerjisi üretimi kaynaklı olmayan ancak sistemin sürdürülebilirliğini etkileyen karbon salımlarını artırabilir (Sobaszek ve diğ., 2023; Ullah ve diğ., 2022).

Bakım stratejileri, santralin uzun vadeli çevresel etkilerini belirlemede önemlidir. Planlı ve veriye dayalı bakım uygulamaları, türbinlerin performansını optimize ederek aksaklıkları azaltmakta ve dolayısıyla bakım kaynaklı karbon salımlarını düşürmektedir. Özellikle Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) sistemlerinin öngörücü bakım modelleri, bakım sürekliliğini artırmakta ve emisyonların düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu sistemler sayesinde potansiyel arızalar önceden tespit edilerek plansız duruş süreleri minimize edilip daha verimli ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlanmaktadır (Liu ve diğ., 2020).

Ancak bakım faaliyetlerinin kendisi de azımsanmayacak düzeyde karbon ayak izi oluşturabilir. Özellikle uzak ve erişimi zor bölgelerde yer alan kara tipi ve deniz üstü santraller, bakım ekiplerinin ulaşımı açısından lojistik açıdan zorluklar yaratır. Yapılan çalışmalarda, bakım faaliyetlerinin yaşam döngüsüne bağlı toplam emisyonlar içinde önemli bir paya sahip olabileceği ortaya konmuştur (Apata ve Mavende, 2023; Ullah ve diğ., 2022). Bu nedenle, bakım süreçlerinin lojistik olarak planlanması ve mümkünse bölgesel kaynaklardan faydalanılması, emisyonların azaltılmasında etkili bir strateji olabilir.

Bölgesel farklılıklar da işletme kaynaklı karbon ayak izi üzerinde belirleyici olabilir. Örneğin, deniz üstü rüzgar santralleri, daha zorlu hava koşullarına maruz kaldıkları için, kara santrallerine kıyasla daha sık bakım gerektirebilir ve bu durum ek ulaşım emisyonlarını beraberinde getirebilir (Z. Wang ve diğ., 2022).

Bakım süreçlerinde kullanılan malzemelerin türü ve uygulanan teknolojiler, karbon salımında belirleyici bir diğer unsurdur. Daha sürdürülebilir, geri dönüştürülebilir veya düşük emisyonlu malzemelerin tercih edilmesi, hem bakım sırasındaki çevresel etkiyi azaltır hem de yaşam döngüsü toplam emisyonlarını düşürür. Nitekim, Piotrowska ve diğ.'nin (2022) yaptığı analizde, operasyonel verimlilik ile kullanılan malzemenin türünün, yaşam döngüsü emisyonları üzerinde doğrudan etkili olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle, daha düşük karbon içeriğine sahip bakım teknolojileri geliştirmek ve uygulamak, rüzgar enerjisinin çevresel sürdürülebilirliğini artıracak önemli bir adımdır.

4.4.5 Demontaj ve Geri Dönüşüm

Rüzgar türbinlerinin söküm sürecine bağlı karbon emisyonları; kullanılan yöntemlere, geri dönüşüm teknolojilerinin verimliliğine ve türbinin yapısında bulunan malzemelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, türbin kuleleri ve nacelle yapısı gibi yaklaşık %95'lik bir kütleyle sahip olan çelik ve metal parçalar genellikle geri dönüştürülebilir niteliktedir (Pakenham ve diğ., 2021). Ancak, kanatlar, yapılarında kullanılan cam elyafı ve epoksi reçineler gibi bileşenler nedeniyle geri dönüşümü en zor ve çevresel açıdan en zararlı parçalardır (Sobczak ve diğ., 2025). Bu tür kompozit malzemeler çoğu zaman ya düzenli depolama alanlarına gönderilmekte ya da yakılmakta, bu da sürecin karbon ayak izini artırmaktadır (Sobczak ve diğ., 2025).

Söküm faaliyetlerinden kaynaklanan karbon salımları, kullanılan ekipman ve geri dönüşüm yöntemine göre değişiklik gösterir. Haces-Fernandez'in (2020) verilerine göre, bir rüzgar türbininin sahadan kaldırılması, malzemelerin bertarafı ve alanın restorasyonu için gereken maliyetler 200000 ila 445000 Amerikan doları arasında değişmektedir. Bu yüksek maliyetler, çoğu zaman geri kazanılabilir malzemelerden elde edilebilecek ekonomik değer üzerinde olduğu için, çevresel sürdürülebilirliğin yanında ekonomik sürdürülebilirlik açısından da yeni çözümlere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Pincelli ve diğ.'nin (2024) yaptığı çalışmada, kimyasal geri dönüşüm uygulamalarında YDD yöntemi sonucunda, yaklaşık 9,7 gCO₂-eq/kW düzeyinde bir emisyon değeri rapor edilmiştir. Bu bulgu, özellikle kanat geri dönüşümünde daha sürdürülebilir ve düşük emisyonlu teknolojilere yatırım yapılmasının önemini göstermektedir.

Geri dönüşüm süreçleri yalnızca emisyonları azaltmakla kalmayıp, döngüsel ekonomi anlayışının enerji sektörüne entegre edilmesine de olanak tanır. Örneğin, devre dışı bırakılan türbin kulelerinden elde edilen çeliğin yeniden kullanılması, yeni çelik üretiminde ortaya çıkabilecek karbon salımlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu yönüyle, etkili söküm ve geri dönüşüm uygulamaları, rüzgar enerjisi sistemlerinin tam yaşam döngüsü sürdürülebilirliğine doğrudan katkı sunar (Pakenham ve diğ., 2021).

5. ENERJİ VERİMLİLİĞİ STRATEJİLERİ VE RES

5.1 Enerji Verimliliği Kavramı

Enerji verimliliği, enerji kaynaklarının istenen çıktı ya da hizmeti minimum kayıpla üretmek üzere etkin şekilde kullanılması anlamına gelmektedir. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) enerji verimliliğini, “bir performans, hizmet, ürün veya enerji çıktısıyla bu çıktıyı elde etmek için gereken enerji girdisi arasındaki oran ya da başka bir nicel ilişki” olarak tanımlamaktadır (Lambán ve diğ., 2023). Enerji verimliliği, sanayi uygulamaları, konut yaşamı ve kentsel planlama gibi pek çok alanda sürdürülebilirliğe ulaşmak için temel bir ilkedir.

Enerji verimliliği, çeşitli alanlarda büyük bir öneme sahiptir. İlk olarak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Enerjinin daha verimli kullanılması, doğrudan daha az enerji tüketimi anlamına gelmekte, bu da karbon salımının azalmasını sağlamaktadır. Örneğin, geleneksel ısıtma yöntemlerinin daha verimli sistemlerle değiştirilmesi, binaların toplam karbon ayak izinde anlamlı bir azalma yaratabilmektedir (Kalmi ve diğ., 2021). Jeotermal ısı pompaları, gelişmiş yalıtım sistemleri ve yüksek verimli ev aletleri gibi teknolojilerin uygulanması, aynı hizmetin sağlanması esnasında daha az elektrik tüketilmesine katkı sunarak çevresel etkiyi azaltmaktadır (Kalmi ve diğ., 2021).

Enerji verimliliği, aynı zamanda yüksek enerji tüketimi gerektiren sanayi ve ulaşım gibi sektörlerde de ön plana çıkmaktadır. Bu sektörlerde enerji verimliliğinin artırılması yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmamakta, işletme maliyetlerini düşürerek rekabet gücünü de artırmaktadır (Castilla ve diğ., 2024). Lambán ve diğ.’nin (2023) belirttiği gibi, makine ekipmanlarının enerji verimliliğinin gerçek zamanlı göstergelerle izlenmesi, üretim süreçlerinde ciddi iyileşmeler sağlamak ve teknolojik ilerlemeleri teşvik etmektedir.

Karbon emisyonlarının azaltılmasında enerji verimliliğinin kritik öneme sahip olduğu, Şeneren ve Yiğit’in (2023) çalışmasında da vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, termik santrallerden elde edilen atık ısının değerlendirilmesi yoluyla enerji verimliliğinin artırılacağı ve konut ısıtmasına bağlı karbon salımlarının önemli

ölçüde azaltılabileceği ortaya konmuştur. Bu durum, verimli enerji kullanımının emisyon azaltımıyla olan doğrudan ilişkisini gözler önüne sermekte; örneğin bölgesel ısıtma sistemleri gibi yöntemlerin fosil yakıt kullanımının yerini alarak sera gazı emisyonlarını azaltılabileceğini göstermektedir (Şeneren ve Yiğit, 2023).

Yenilenebilir enerji sistemleri, özellikle de rüzgâr enerjisi bağlamında ele alındığında, enerji verimliliğini artırma potansiyeli yüksek teknolojilerin entegrasyonu ile dikkat çekmektedir. Adekanbi (2021), Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerinin rüzgâr santrallerine entegre edilmesinin, enerji üretimini optimize ederek enerji dönüşüm verimliliğini ve genel sistem performansını artırabileceğini ifade etmektedir. Benzer şekilde, Desalegn ve diğ.'nin (2022), rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin (WECS) verimli yönetiminin, elde edilen elektriğin etkinliğini doğrudan etkilediğini belirtmiştir. Bu bağlamda, enerji yönetim sistemleri rüzgâr enerjisinin verimli şekilde hasat edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Rüzgâr enerjisinden yararlanma sürecinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, rüzgâr hızındaki değişkenliğe bağlı olarak enerji çıktısının sürekli değişmesidir. Bu nedenle, verimli tahmin modelleri geliştirilmesi, rüzgâr enerjisinin şebekeye entegrasyonunda büyük önem taşımaktadır. Karthick ve diğ.'nin (2023), Uzun Kısa Dönem Hafıza (LSTM - Long Short-Term Memory) gibi gelişmiş yapay sinir ağı tabanlı tahmin teknolojilerinin, kentsel enerji yönetim sistemlerini optimize ederek hem verimliliği artırdığını hem de enerji tüketimine bağlı karbon ayak izini azalttığını ortaya koymuştur.

Rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi sırasındaki operasyonel verimliliği de karbon emisyonlarının azaltılmasında etkili bir faktördür. Zweifel ve diğ.'nin (2023), rüzgâr türbinlerindeki aktarma organlarının verimliliğinin, türbin performansını doğrudan etkilediğini ve enerji dönüşüm oranlarının maksimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Türbin tasarımlarının sürekli evrilmesi, yüksek verimliliğe ulaşma hedefinin hâlen devam ettiğini ve enerji dönüşüm sistemlerinin optimize edilmesine yönelik araştırmaların sürdürülmesi gerektiğini göstermektedir (Koay ve diğ., 2020).

Enerji verimliliğinin etkileri yalnızca enerji tüketimindeki doğrudan azalma ile sınırlı değildir. Rudenko ve Ershov (2020), yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonunun özellikle yüksek katlı binaların bulunduğu kentsel alanlarda enerji

tasarrufu önlemlerini güçlendirdiğini vurgulamıştır. Güneş ve rüzgâr enerjisini bir arada kullanan hibrit sistemler hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunarak enerji yönetiminde kayda değer iyileşmeler sağlamaktadır.

5.2 Enerji Yönetimi ve Verimlilik İlişkisi

Enerji yönetimi ile enerji verimliliği arasındaki ilişki, endüstriyel tesislerden konutlara ve kentsel yapılara kadar çok çeşitli sektörlerde çevresel etkilerin azaltılmasına katkı vermektedir. Enerji yönetimi, bir organizasyon veya tesis içerisinde enerji kullanımını izlemeye, kontrol etmeye ve optimize etmeye yönelik uygulamaları ve sistemleri kapsar; enerji tüketimini azaltma, maliyetleri düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği sağlama hedeflerine ulaşmayı amaçlar (Annura ve diğ., 2022). Buna karşılık enerji verimliliği, istenen çıktının ya da hizmetin gereksiz enerji israfı olmadan ne kadar etkin üretildiğini ölçen bir kavramdır (Custodio ve diğ., 2023).

Enerji yönetim sistemleri, enerji verimliliğini artırmada temel bir araçtır. Fuchs ve diğ.'nin (2023), ISO 50001 standardı temelinde yapılandırılan bir enerji yönetim sisteminin, özellikle sanayi sektöründe kayda değer verimlilik kazanımları sağlamak için en maliyet etkin yollardan biri olduğunu vurgulamaktadır. Bu sistematik yaklaşım, enerji kullanımının değerlendirilmesini, performans göstergelerinin belirlenmesini ve operasyonların sürekli olarak izlenip iyileştirilmesini kapsar. Başarılı enerji yönetimi, kuruluşların enerji israfını tespit etmesine, en iyi uygulamaları hayata geçirmesine ve enerji tasarrufu odaklı bir kurum kültürü oluşturmaya olanak tanır (Fuchs ve diğ., 2023).

Enerji yönetiminde önemli bir unsur da enerji performansının değerlendirilmesi için uygun ölçütlerin belirlenmesidir. Custodio ve diğ.'nin (2023), her tesisin özgün gereksinimlerine göre yapılandırılmış bir enerji yönetim stratejisi oluşturmak için enerji kullanımının kapsamlı şekilde teşhis edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu hedefe yönelik stratejik yaklaşım, yalnızca işletme maliyetlerini azaltarak rekabetçiliği artırmakla kalmaz; aynı zamanda yasal düzenlemelere uyum sağlanmasına ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına da katkıda bulunur (Custodio ve diğ., 2023). Ayrıca Afridi ve diğ.'nin (2024), enerji yönetimindeki zayıflıkların çoğu zaman yenilenebilir enerji teknolojilerinin sanayi sistemlerine yeterince entegre

edilmemesinden ve farkındalık eksikliğinden kaynaklandığını belirtmekte; bu nedenle, etkin enerji yönetimi uygulamalarının benimsenmesi için eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarının kritik olduğunu ifade etmektedir.

Enerji yönetim sistemleri, aynı zamanda Endüstri 4.0 gibi yeni endüstriyel paradigma değişimlerine yanıt verme konusunda da büyük rol oynamaktadır. Hasan ve Trianni (2020), dijital teknolojilerle entegre edilen enerji yönetim uygulamalarının enerji verimliliğini artırabileceğini, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabileceğini ve sürdürülebilir ürünlere yönelik artan tüketici taleplerini karşılamada etkili olabileceğini ifade etmektedir. Sanayi sektörü akıllı teknolojilere yöneldikçe, veri analitiği ve otomasyonu enerji yönetim pratiklerine entegre etmek, verimlilik ve üretkenlikte önemli iyileşmeler sağlamaktadır.

Enerji yönetimi, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin (HVAC) optimize edilmesinde de önemli bir role sahiptir. Riaz ve diğ.'nin (2022), HVAC sistemlerinin etkin şekilde yönetilmesinin iklim direnci ve enerji tasarrufu açısından gerekli olduğunu, çünkü bu sistemlerin binalardaki toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturduğunu belirtmektedir. Akıllı teknolojiler kullanılarak HVAC sistemlerinin izlenmesi ve kontrolü, iç mekân konfor seviyelerini korurken enerji kullanımında önemli tasarruflar sağlayabilir.

Kentsel enerji yönetimi bağlamında ise, akıllı şebeke teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji verimliliğinin artırılması için kritik öneme sahiptir. Escrivá-Escrivá ve diğ.'nin (2024) tanımladığı enerji merkezleri, kentsel alanlarda yenilenebilir kaynakların koordinasyonunu sağlamak ve üretimdağıtım süreçlerini optimize etmek amacıyla geliştirilen sistemlerdir. Bu tür sistemler, enerji depolama ve dağıtım stratejilerindeki iyileştirmeler aracılığıyla kesintisizlik sorunlarına çözüm getirebilir; böylece topluluk düzeyinde sürdürülebilir enerji kullanımı teşvik edilebilir.

5.3 RES'lerde Enerji Verimliliğini Etkileyen Faktörler

RES'lerin verimliliği hem operasyonel performansı hem de enerji çıktısını doğrudan etkileyen çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

5.3.1 Girdap Etkisi

Girdap etkisi, rüzgarın öndeki türbinden geçerek hız kaybetmesi ve bu nedenle arkasındaki türbinlerin daha düşük rüzgar hızlarıyla çalışmak zorunda kalması durumudur. Bu durum, rüzgar çiftliği içerisinde rüzgar dağılımının dengesizleşmesine ve ardıl türbinlerin düşük verimle çalışmasına sebep olmaktadır (K. Ma ve diğ., 2024). Dai ve diğ. (2020), türbin yerleşiminin optimize edilmesi ve aktif yönetim stratejileriyle girdap kaynaklı enerji kayıplarının azaltılabileceğini ve bu sayede genel verimliliğin artırılabilceğini söylemişlerdir.

5.3.2 Çevresel Koşullar

Rüzgar türbinleri, yüksek nem, aşırı sıcaklık farkları ve korozif ortamlardan etkilenebilecek zorlu çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu koşullar, zaman içinde performans düşüşüne ve verimlilik kayıplarına yol açabilir. De-Bin ve diğ. (2022), rüzgar türbinlerinin farklı çevresel koşullarda dayanıklı ve yüksek verimle çalışabilir şekilde tasarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, türbin tasarımı ve yapımında kullanılan malzemeler, çevresel bozulmalara karşı dayanıklılığı etkileyerek türbinin uzun ömürlü ve güvenilir çalışmasında belirleyicidir.

5.3.3 İşletme ve Bakım Uygulamaları

Rutin bakım uygulamaları ve etkin işletme stratejileri, türbinlerin maksimum verimle çalışmasını sağlamada önemlidir. Özellikle kanatlar ve tahrik sistemleri gibi bileşenlerdeki aşınmaları önceden tespit edip müdahale eden proaktif bakım puanları, türbin performansının sürekliliğini desteklemektedir (L. Wang ve Zhang, 2023). SCADA sistemleri üzerinde yapılan gerçek zamanlı izleme ve veri analizi ile olabilecek arızaların önceden belirlenebileceği ve böylece plansız kesintilerin azaltılarak verimliliğin artırılabilceği belirtilmiştir (Ding ve diğ., 2022).

5.3.4 Türbin Tasarımı ve Teknolojisi

Rüzgar türbinin teknolojik özellikleri ve tasarımı, enerji dönüşüm verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Değişken kanat açısı ve gelişmiş tahrik sistemleri gibi modern teknolojiler, türbinlerin farklı rüzgar hızlarında optimum şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu tür gelişmelerle türbinler rüzgar koşullarına daha iyi uyum sağlayıp enerji üretimini artırmaktadır ve aynı zamanda, yeni nesil malzemeler ve aerodinamik olarak optimize edilmiş kanat tasarımları, rüzgardan daha fazla enerji elde edilmesine olanak tanımaktadır (İbrahim ve diğ., 2020).

5.3.5 Şebeke Entegrasyonu

Rüzgar enerjisinin elektrik şebekesine verimli bir biçimde entegre edilmesi, enerji verimliliği açısından belirleyici faktörlerden birisidir. Güç kalitesi bozulmaları, şebeke kararsızlığı ve yetersiz enerji depolama kapasitesi, rüzgar enerjisinin kesintisiz ve etkili biçimde iletilmesini engellemektedir (Dami ve diğ., 2023). Gelişmiş güç dönüştürme teknolojilerinin ve modern iletim altyapılarının kullanılmasıyla şebeke entegrasyonunun güçlendirilebileceği ve bu sayede rüzgar satrallerinin verimliliğinin artırılacağı belirtilmiştir (Hashim ve Kalem, 2024).

5.3.6 Saha Seçimi ve Rüzgar Kaynağı Değerlendirmesi

RES'nin kurulum yeri, enerji verimliliğini belirleyen temel unsurlardandır. Doğru saha seçimi, topografik özellikler, rüzgar hızının sürekliliği, türbinlerin yönelimi ve aralarındaki mesafe gibi faktörlere bağlıdır. Phan ve diğ.(2024), minimum türbülans ve girdap etkisiyle, maksimum rüzgar kaynağının elde edilebilmesi için yer seçiminin bilimsel temellere dayandırılması gerektiğini vurgulamaktadır.

5.3.7 Enerji Yönetim Sistemleri

Verimli enerji kullanımı için enerji yönetimi uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Kurumlara özel yapılandırılan enerji yönetim sistemleri, enerji

tüketiminin optimize edilmesine ve yenilenebilir kaynakların daha etkin entegre edilmesine katkı sağlar. Bu sistemlerin aynı zamanda enerji tasarrufu sağlayacak uygulamaların planlanması ve hayata geçirilmesi açısından da etkili olduğunu ifade edilmektedir (Phan ve diğ., 2024).

5.4 Ulusal ve Uluslararası Enerji Verimliliği Politikaları ve RES

Enerji verimliliği politikalarının etkinliği, Türkiye gibi karbon salımını azaltarak enerji sistemlerini iyileştirmeyi hedefleyen ülkeler için stratejik bir öneme sahiptir. Türkiye, rüzgar enerjisini enerji stratejisinin temel bileşenlerinden biri olarak kabul etmektedir. Artan elektrik talebini sürdürülebilir şekilde karşılayabilmek adına, ülkenin sahip olduğu yüksek rüzgar enerjisi potansiyeli önemli bir fırsat sunmaktadır (Eyüboğlu ve diğ., 2023). Bu doğrultuda yürütülen enerji politikaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının -özellikle de rüzgar enerjisinin- yaygınlaşmasını teşvik edecek biçimde şekillendirilmiştir. Eyüboğlu ve diğ. (2023), Türkiye’de rüzgar santrallerinin sayısındaki artışın, bu politikaların somut çıktılarında biri olduğunu vurgulamaktadır.

Türkiye, yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmek amacıyla çeşitli destek mekanizmaları geliştirmiştir. Bunlar arasında alım garantileri, vergi indirimleri ve yerli üretim destekleri gibi teşvikler yer almaktadır (Kulaç ve Öztepe, 2020). Ancak mali teşvikler enerji verimliliğini maksimize etmek için tek başına yeterli değildir, politika çerçevelerinin teknolojik gelişmeler ve enerji yönetimi yaklaşımlarıyla uyumlu hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır (Martínez ve diğ., 2024). Ayrıca, Yılmaz’ın (2023) analizine göre, Türkiye’de mevcut enerji yönetimi yapılarının iyileştirilmesine yönelik reform niteliğindeki politikaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu analizde, yapay zekâ destekli karar alma sistemlerinin ve sistematik işletme süreçlerinin entegrasyonu ile rüzgar santrallerinin verimliliğinde önemli artışlar sağlanabileceği ortaya konmuştur. Dolayısıyla, kamu desteği ve net yasal düzenlemeler bu tür gelişmelerin hayata geçirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Yılmaz, 2023).

Dünya genelinde enerji verimliliği politikaları, sürdürülebilirliğin sağlanması ve fosil yakıt bağımlılığının azaltılması açısından stratejik bir öncelik hâline gelmiştir. Çin gibi ülkeler, rüzgar santrallerinin şebeke kararlılığını bozmadan işletilebilmesi için enerji depolama sistemlerinin entegre edilmesini zorunlu kılan politikaları hayata

geçirmiştir (Wei ve diğ., 2022). Bu zorunluluklar, rüzgar enerjisinin sistem performansını ve verimliliğini artırmak adına önemli bir stratejik adımdır. Avrupa'da ise politika yaklaşımları ülkelere göre farklılık göstermektedir. Gubanov ve diğ.'nin (2020) belirttiği üzere, İskandinav ülkeleri, rüzgar ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının maksimum düzeyde kullanımı için kapsamlı enerji verimliliği politikaları geliştirmiştir. Bu ülkelerde altyapı yatırımları ve enerji tasarruf teknolojilerine yapılan yoğun yatırımlar sayesinde, sürdürülebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu daha verimli biçimde sağlanmaktadır. Koskei ve diğ. (2021), çoğu ülkenin artan elektrik talebini karşılayabilmek ve karbon salımını azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji yatırımlarını artırmaya yönelik politikalar benimsediğini belirtmektedir. Bu yaklaşım, enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların (özellikle rüzgar enerjisinin) payının artmasına neden olmuş, aynı zamanda verimlilik artışlarını da beraberinde getirmiştir.

Ülkeler arası karşılaştırmalı analizler, rüzgar enerjisi sistemlerinde verimliliği artırma çabalarının şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Kumar ve diğ. (2021), rüzgar santrallerinin operasyonel performanslarının değerlendirilmesi ve verimliliği etkileyen temel faktörlerin belirlenmesinin, daha optimize işletme politikalarının geliştirilmesine katkı sunduğunu belirtmektedir. Teknolojik gelişmeler de bu sürecin ayrılmaz bir parçasıdır. Makine öğrenimi tabanlı tahminleme algoritmalarının kullanımı hem üretim planlaması hem de kestirimci bakım açısından rüzgar santrallerinin verimliliğinde anlamlı artışlara neden olabilmektedir (Edwin ve diğ., 2021). Bu tür yenilikçi uygulamaların bütünleştirildiği enerji yönetimi sistemlerine sahip ülkeler, sürdürülebilirlik alanında küresel ölçekte öncü konuma gelmektedir.

6. BİR RÜZGAR TÜRBİNİ MODELİNİN YAŞAM DÖNGÜSÜ ÜZERİNDEN KARBON AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ: LİTERATÜR TABANLI UYGULAMALI BİR YAKLAŞIM (GEYCEK RES ÖRNEĞİ)

6.1 Geycek RES'in Tanıtımı

6.1.1 Geycek RES'in Konumu ve Kurulum Alanı

Geycek RES, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Kırşehir ilinin Mucur ilçesi sınırlarında konumlanmıştır. Mucur, 39° kuzey enlemi ile 34° doğu boylamında yer almakta olup, ortalama deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 1100 metredir. Santral, tarımsal faaliyetlerin yaygın olduğu bu bölgede, özellikle mera vasıflı kamu arazileri ve bazı özel mülkiyetli tarım arazileri üzerine kurulmuştur (Cetinkaya, 2017).



Şekil 6.1.1. Geycek RES'nin Genel Görünümü

Santralin bulunduğu bölge, rüzgâr enerjisi üretimi için uygun meteorolojik ve topografik özellikler göstermektedir. Bölgedeki rüzgâr hızlarının yeterli düzeyde olması ve geniş açık arazilerin varlığı, santral için stratejik bir avantaj sunmuştur. Kurulum alanı, çoğunlukla mera vasıflı Hazine arazilerinden ve özel mülkiyete ait tarım arazilerinden oluşmaktadır. Santral alanına ulaşım için yaklaşık 2,5 km uzunluğunda iç yol ağı oluşturulmuş, üretilen enerjinin iletimi için ise Budak Köyü

güzergâhından geçen ve Nevşehir ili Avanos ilçesindeki trafo merkezine ulaşan yaklaşık 54 km uzunluğunda bir enerji nakil hattı inşa edilmiştir (Taşkın ve diğ., 2020).

Kurulum alanı çevresinde Geycek, Budak, Obruk ve Kurugöl köyleri yer almakta olup, bu yerleşimler santral faaliyetlerinden doğrudan veya dolaylı olarak etkilenmektedir. Bölgenin iklimi karasal özellikler taşımakta; yıllık ortalama sıcaklık 5,5–17,5°C arasında değişmekte, yağışlı gün sayısı ise yaklaşık 102 gün olarak kaydedilmektedir. Bitki örtüsü bozkır karakterinde olup, tarım ve hayvancılık bölge halkının temel geçim kaynakları arasındadır (Cetinkaya, 2017).

Öte yandan, Geycek RES'in kurulu bulunduğu alan Türkiye'nin önemli sulak alanlarından biri olan Seyfe Gölü'ne yakın mesafededir. Bu nedenle, projenin planlama aşamasında ekosistem üzerindeki olası etkiler değerlendirilmiş, Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) raporları doğrultusunda gerekli izin süreçleri tamamlanmıştır (Taşkın ve diğ., 2020).

6.1.2 Teknik Özellikler: Türbin Tipi, Kapasite, Rotor Çapı, Kule Yüksekliği

Geycek Rüzgâr Enerji Santrali'nde (RES) kullanılan türbin modeli, Almanya merkezli Enercon firmasının geliştirdiği Enercon E82 modelidir. Bu model, kara tipi rüzgâr türbinleri sınıfında yer almakta olup, düşük ve orta seviyeli rüzgâr hızlarında dahi yüksek verimlilikle çalışabilen bir teknolojidir (Taşkın ve diğ., 2020).

Geycek RES'te toplamda 70 adet Enercon E82 türbini kurulmuştur. Her bir türbinin kurulu gücü 2,4 MW olup, santralin toplam kurulu gücü 168 MW'ye ulaşmaktadır (Cetinkaya, 2017). Enercon E82 türbinleri, 82 metre rotor çapına sahiptir. Bu çap, türbinin rüzgârla temas eden alanını artırarak enerji üretim verimliliğini yükseltmektedir (Tablo 6.1.2).

Kule yüksekliği türbin bazında değişiklik göstermekte olup, 78 metre ile 138 metre arasında değişmektedir. Bu değişken kule yüksekliği, santralin kurulduğu arazinin eğimine ve yerel rüzgâr akış yönlerine göre optimize edilmiştir. Yüksek kuleli

türbinler, daha üst katmanlardaki istikrarlı rüzgâr akımlarına ulaşarak üretim potansiyelini artırmaktadır (Taşkın ve diğ., 2020).

Enercon E82 modeli, doğrudan tahrikli (direct drive) sistem yapısıyla öne çıkmakta ve geleneksel dişli kutulu türbinlere kıyasla daha az bakım gerektirmektedir. Ayrıca bu türbinlerde üç kanatlı yatay eksenli tasarım kullanılmıştır. Kanatlar cam elyaf takviyeli epoksi reçineden imal edilmiştir ve rüzgâr şiddetine göre pozisyonunu otomatik ayarlayabilen pitch control sistemine sahiptir (Cetinkaya, 2017).

Santralde kullanılan bu teknik yapı sayesinde, yıllık maksimum üretim potansiyeli 588,5 GWh düzeyinde elektrik üretimi gerçekleştirilebilmekte; bu miktar, on binlerce hanenin enerji ihtiyacını karşılayacak düzeydedir. Kullanılan türbin teknolojisinin hem çevresel etkiyi minimize etme kapasitesi hem de düşük işletme maliyetleri ile dikkat çektiği belirtilmektedir (Taşkın ve diğ., 2020).

Tablo 6.1.2. Geycek RES'in Kurulu Güç, Türbin Özellikleri ve Bölgesel Altyapı Verileri

Özellik	Değer
Santral Adı	Geycek Rüzgâr Enerji Santrali (RES)
Kurulu Güç	168 MW
Maksimum Üretim Potansiyeli	588,5 GWh/yıl
Kurulum Yılı	2013
İl / İlçe	Kırşehir / Mucur
Türbin Sayısı	70 adet
Türbin Modeli	Enercon E82
Enerji Nakil Hattı Uzunluğu	54 km
Şebekeye Bağlantı Noktası	Avanos Trafo Merkezi (Nevşehir)
İlin Elektrik Tüketimine Katkısı (2015)	%65,33

6.1.3 Yıllık Enerji Üretim Kapasitesi ve Şebeke Katkısı

Geycek RES, faaliyete geçtiği 2013 yılı itibarıyla yıllık enerji üretimine başlamış, ilk yılında 26838870 kWh elektrik üretmiş; bu değer, santralin kurulum ve test süreçlerinin sürdüğü erken dönem verimi olarak değerlendirilmektedir. Üretim kapasitesi izleyen yıllarda hızla artmış, 2015 yılında 332271570 kWh düzeyine ulaşmıştır (Cetinkaya, 2017). Bu üretim miktarı, Kırşehir ilinin toplam elektrik tüketiminin %65,33'ünü, ülke genelinde ise toplam tüketimin yaklaşık %0,12'sini karşılamaktadır.

Enerji üretim kapasitesinin yüksek olması, sadece bölgesel şebekeyi beslemekle kalmamakta, aynı zamanda ulusal enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır. Santralin ürettiği elektrik, Nevşehir ili Avanos ilçesinde bulunan trafo merkezine yaklaşık 54 km uzunluğundaki enerji nakil hattı ile aktarılmakta ve ulusal elektrik şebekesine entegre edilmektedir (Taşkın ve diğ., 2020).

Üretilen enerji miktarı dikkate alındığında, Geycek RES'in yaklaşık 175.000 kişinin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede olduğu hesaplanmaktadır. Bu durum, fosil yakıt tüketiminin azaltılması, enerji ithalatının düşürülmesi ve karbon salımının sınırlanması açısından stratejik öneme sahiptir. Ayrıca, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke içindeki payının artması, Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon hedefleriyle uyumlu bir gelişim göstermektedir (Cetinkaya, 2017; Taşkın ve diğ., 2020).

6.1.4 Santralin Türkiye Enerji Politikalarındaki Yeri

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın belirlediği hedefler doğrultusunda, Türkiye 2023 yılına kadar toplam kurulu gücünün en az %30'unu yenilenebilir kaynaklardan karşılamayı hedeflemiş ve bu hedefe 2020 itibarıyla büyük ölçüde yaklaşmıştır. Bu çerçevede, Geycek RES'in 168 MW kurulu gücü, ulusal rüzgâr enerjisi kapasitesine önemli bir katkı sunmaktadır (Taşkın ve diğ., 2020).

Santral, yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamındaki katkısıyla da

ülke enerji politikalarıyla bütünleşmektedir. YEKDEM, yerli ve yenilenebilir enerji üretimini teşvik eden bir mali yapı sunarak özel sektörün bu alana yatırım yapmasını kolaylaştırmaktadır. Geycek RES de bu mekanizma kapsamında desteklenen projeler arasında yer almakta, uzun vadeli enerji fiyat istikrarına katkı sunmaktadır (Cetinkaya, 2017; Enerji Atlası, 2019).

Ayrıca, Geycek RES'in Kırşehir ilinde konumlanmış olması, İç Anadolu Bölgesi gibi klasik olarak yenilenebilir enerji yatırımlarında daha az temsil edilen bir coğrafyada, bölgesel enerji çeşitliliğini artırıcı bir rol üstlenmesini sağlamaktadır. Bu durum, enerji arzının yalnızca batı ve kıyı bölgelerine bağımlı olmadan dengeli şekilde dağılmasına katkıda bulunmaktadır (Taşkın ve diğ., 2020).

6.2 YDD Yaklaşımı ile Geycek RES'in İncelenmesi

6.2.1 YDD Yöntemolojisinin Uygulanması

Geycek RES'in karbon ayak izi analizi, ISO 14040/44 standartları (ISO, 2006) ve karbon ayak izi hesaplamaları için ISO 14067 standardı (ISO, 2018) temel alınarak yürütülmüştür. Bu standartlar, hesaplamaların bilimsel yeterlilik ve uluslararası karşılaştırılabilirlik açısından güvenilirliğini sağlamaktadır. Çalışmada fonksiyonel birim, yaşam döngüsü değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılan şekilde 1 kWh elektrik üretimi olarak tanımlanmıştır. Böylece elde edilen emisyon değerleri hem ulusal hem de uluslararası literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılabilir hale getirilmiştir (Guinée ve diğ., 2002). Sistem sınırları hammadde temini, üretim, nakliye, kurulum, işletme ve bakım, söküm ve geri dönüşüm aşamalarını kapsamaktadır. Bu sınırlar, rüzgar enerji santralinin çevresel etkilerini bütüncül bir şekilde değerlendirebilmek için belirlenmiştir.

Geycek RES'nin YDD kapsamında beş temel aşama analiz edilmiştir: üretim (imalat), taşıma, kurulum (inşaat), işletme-bakım ve bertaraf (söküm/geri dönüşüm). Her

aşamanın karbon salımına olan katkısı, uluslararası literatürde sunulan emisyon verileri ve benzer santrallerden elde edilen ölçümlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan fonksiyonel birim, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) standartlarına uygun olarak 1 kWh elektrik üretimi olarak belirlenmiştir. Tüm emisyon hesaplamaları ve çevresel etki kategorileri bu birim üzerinden normalize edilmiştir. Bu sayede elde edilen sonuçların ulusal ve uluslararası literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılması mümkün hale getirilmiştir. Ayrıca birim enerji başına emisyon yoğunluğu hesaplanarak ($\text{gCO}_2\text{eq/kWh}$) santralin çevresel performansı farklı enerji üretim teknolojileriyle kıyaslanabilir şekilde sunulmuştur.

Üretim aşaması, rüzgar türbini bileşenlerinin (kule, rotor, jeneratör vb.) çelik, bakır ve kompozit gibi malzemeler kullanılarak imal edilmesini kapsar. Literatürde bu aşamanın toplam karbon emisyonlarının %75 ila %91,71'ini oluşturduğu bildirilmektedir (Ji ve Chen, 2016; W. Wang ve Shi, 2022). Geycek RES'in de benzer malzeme yapısı ve teknolojik bileşenler kullandığı göz önüne alındığında, bu oranlar santral için de geçerli kabul edilmiştir.

Türbin parçalarının üretim tesislerinden Kırşehir-Mucur bölgesine taşınması sırasında oluşan karbon salımları, yaşam döngüsüne kıyasla sınırlı düzeydedir. Literatürde bu aşama, toplam emisyonlara nispeten düşük düzeyde katkıda bulunur ve genellikle %1 ila %5 aralığında bir etki oranına sahiptir (Guo MinXiao ve diğ., 2012).

Geycek RES'in kurulumu sırasında kullanılan ağır iş makineleri, beton dökümü ve şantiye lojistiği, karbon ayak izi açısından önemli bir etkidir. Bi ve diğ. (2022), bu aşamanın bazı santrallerde %56,74'e varan oranlarda emisyon oluşturduğunu belirtmiştir. Santralin kurulum dönemine dair bölgesel enerji tüketim verileri göz önüne alınarak bu etki hesaba katılmıştır.

Geycek RES'in işletme sürecinde doğrudan karbon salımı oldukça düşüktür. Türbinlerin çalışması sırasında fosil yakıt tüketilmemekte, yalnızca bakım araçları ve yedek parça lojistiğinden kaynaklı dolaylı emisyonlar söz konusudur. Bu aşamanın karbon ayak izine katkısı genel olarak %0,24 ila %15,32 arasında değişmektedir (Jia ve diğ., 2016; P. Liu ve diğ., 2021).

Santralin ekonomik ömrünü tamamlamasının ardından sökülmesi ve bileşenlerin geri dönüşümü sürecinde oluşan emisyonlar, genellikle negatif karbon etkisi yaratabilir. Wang ve Shi (2022), geri dönüşüm uygulamalarının net karbon ayak izini azaltabileceğini, CO₂ emisyon yoğunluğunu 4,65 g/kWh seviyelerine kadar düşürebileceğini vurgulamaktadır.

6.2.2 YDD Aşamaları: Hammade Temini, Üretim, Nakliye, Kurulum, İşletme, Söküm

YDD, bir ürün veya sistemin çevresel etkilerini başlangıçtan sona kadar (ham madde temininden nihai bertarafa kadar) analiz eden kapsamlı bir yöntemdir. Geycek RES'in karbon ayak izi hesaplamasında bu yaklaşım, aşağıdaki alt başlıklar doğrultusunda ele alınmaktadır.

6.2.2.1 Hammade Temini

Geycek RES'in toplam karbon ayak izinin %75'lik bölümü hammadde temini ve üretim aşamasından kaynaklanmaktadır. Bu oran, yaklaşık 10867,5 ton CO₂ salımına karşılık gelmektedir. Bu aşamada özellikle türbin kulelerinde kullanılan çelik, beton ve kanatlarda tercih edilen kompozit malzemelerin üretimi sırasında yüksek miktarda enerji tüketimi söz konusudur. Literatürde üretim aşamasının karbon yükü %74 ila %92 arasında değişmektedir (Ji ve Chen, 2016; W. Wang ve Shi, 2022). Bu sonuç, üretim sürecinin çevresel etkiler açısından optimize edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

6.2.2.2 Nakliye

Santrale ait türbin ve ekipmanların lojistiği sırasında oluşan emisyonlar toplam karbon ayak izinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Bu oran 724,5 ton CO₂ düzeyindedir. Nakliye aşamasındaki salımlar, kullanılan taşıma araçlarının tipi (kara yolu, özel ağır nakliye araçları), taşınan bileşenlerin boyutu ve mesafeye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle santrallerin kurulacağı lokasyonun malzeme

temin merkezlerine yakın olması, toplam emisyon değerlerinde önemli fark yaratabilir (Bi ve diğ., 2022).

6.2.2.3 Kurulum

Kurulum aşaması, yaklaşık olarak 1449 ton CO₂ salımı ile toplam karbon ayak izinin %10'una karşılık gelmektedir. Bu aşama; beton temellerin dökülmesi, kulelerin dikilmesi ve türbinlerin yerleştirilmesi gibi işlemleri kapsamaktadır. Özellikle temel kazısı, vinç operasyonları ve enerji tüketen inşaat makineleri bu süreçteki başlıca emisyon kaynaklarını oluşturmaktadır. Geycek RES'in kurulumunda, kule yüksekliği ve türbin sayısı dikkate alındığında bu aşamanın karbon ayak izi açısından kayda değer bir katkı sunduğu değerlendirilmektedir (Guo MinXiao ve diğ., 2012).

6.2.2.4 İşletme ve Bakım

İşletme süresi boyunca (yaklaşık 20–21 yıl), santralin karbon salımı oldukça düşüktür. Toplam emisyonun 1086,75 ton CO₂'lik kısmı bu aşamadan kaynaklanmakta olup, bu da toplamın %7,5'ine denk gelmektedir. Bu düşük seviye, rüzgar enerjisinin sürdürülebilir ve çevreci yönünü vurgulamak açısından önemli bir bulgudur. İşletme sürecindeki emisyonlar çoğunlukla bakım ekipmanlarının kullanımı, ulaşım ve az miktarda yedek parça değişimlerinden kaynaklanmaktadır (Dong ve diğ., 2013).

6.2.2.5 Söküm ve Geri Dönüşüm

Santralin kullanım ömrü sona erdiğinde türbinlerin ve destekleyici yapıların sökülmesi ve geri dönüşümü gerçekleştirilir. Bu aşama, karbon ayak izi üzerinde pozitif bir etki yaratmakta olup, yaklaşık -761,7 ton CO₂'lik bir emisyon azaltımı sağlamaktadır. Geri dönüştürülebilir malzemelerin yeniden işlenmesi sayesinde bu pozitif etki ortaya çıkmakta ve toplam karbon ayak izi dengelenmektedir (Al-Behadili ve El-Osta, 2015).

6.2.2.6 Genel Değerlendirme

Yapılan bu detaylı analiz sonucunda Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin toplam karbon ayak izi yaklaşık 14490 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. Üretim ve inşaat süreçleri en büyük karbon yükünü oluştururken, işletme aşaması düşük emisyonla dikkat çekmekte ve söküm aşaması geri dönüşüm sayesinde çevresel yükü azaltmaktadır. Elde edilen bu bulgular, hem Türkiye'deki RES projelerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek hem de iyileştirici stratejiler geliştirmek adına önemli bir referans niteliğindedir.

6.2.3 Kullanılan Veriler ve Varsayımlar

Bu çalışmada kullanılan yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaklaşımı, uluslararası standartlar ve literatürde raporlanan metodolojiler dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Analizde kullanılan veri kaynakları, emisyon katsayıları ve varsayımlar sistematik biçimde sunulmuştur. Hesaplamalarda başta ISO 14040 ve ISO 14067 standartları (ISO, 2006; ISO, 2018) temel alınmıştır. Emisyon katsayıları için öncelikli olarak IPCC 2006 Guidelines (Eggleston ve diğ., 2006), Ecoinvent v3.8 (Wernet ve diğ., 2016) ve GaBi LCA Database (Thinkstep, 2019) veri tabanları referans alınmıştır. Türkiye'ye özgü elektrik şebekesi emisyon yoğunluğu ise IEA (2023) raporundan elde edilmiştir. Buna ek olarak, kullanılan malzeme girdileri için literatürde yer alan temsili katsayılar esas alınmıştır. Örneğin, beton için 0,134 ton CO₂/ton (Gursel ve diğ., 2014), çelik için 1,85 ton CO₂/ton (World Steel Association, 2012) ve dizel tüketimi için 2,68 kg CO₂/litre (Eggleston ve diğ., 2006) katsayıları dikkate alınmıştır. Bu verilerin hangi yıl ve hangi coğrafi bölgeye ait olduğu dipnotlar ve kaynakça kısmında detaylı olarak belirtilmiştir. Ayrıca, YDD kapsamında yalnızca toplam CO₂ salımı değil, aynı zamanda farklı çevresel etki kategorileri de (örneğin asidifikasyon, ozon tabakası incelmeleri, kaynak kullanımı) değerlendirmeye dahil edilebilecek şekilde sistem sınırları açıklığa kavuşturulmuştur. Bu durum, çalışmanın ISO 14067 uyumluluğunu artırmakta ve sonuçların uluslararası literatürle karşılaştırılabilirliğini güçlendirmektedir.

Bu çalışmada Geycek RES'nin YDD kapsamında yapılan karbon ayak izi analizinde kullanılan temel veriler ve hesaplamalarda dikkate alınan varsayımlar aşağıda detaylandırılmıştır. İlk olarak santral teknik özellikleri ele alınmıştır (Kerem, 2022). Yaşam döngüsü süresi sektörel standartlara uygun olarak 21 yıl olarak kabul edilmiştir. Bu süre içerisinde üretim, kurulum, işletme ve söküm gibi tüm aşamalar değerlendirilmektedir.

Kurulum aşamasına ilişkin çevresel etkiler hesaplanırken, her bir türbin için ortalama 300 m³ beton kullanıldığı varsayılmıştır. Bu durum, santral genelinde 15600 m³ beton kullanımına karşılık gelmektedir. Betonun birim karbon emisyon katsayısı ise 0.134 ton CO₂/ton olarak literatürden alınmıştır (Gursel ve diğ., 2014). Aynı şekilde, türbin temellerinde kullanılan çelik donatılar için türbin başına 20 ton çelik tahmin edilmiş ve toplamda 1400 ton çelik kullanımına ulaşılmıştır. Çelik için kullanılan emisyon katsayısı 1,85 ton CO₂/ton'dur (Yearbook, 2012a). Montaj işlemlerinde kullanılan vinç ve şantiye araçlarının dizel tüketimi türbin başına 3000 litre olarak kabul edilmiştir. Toplam dizel tüketimi 210.000 litreye ulaşmakta olup, dizel için emisyon katsayısı 2,68 kg CO₂/litre olarak alınmıştır (Eggleston ve diğ., 2006). İşletme aşamasında oluşabilecek emisyonlar toplam karbon ayak izinin yaklaşık %11'i düzeyindedir. Bu aşamada ekipmanların bakımı, yolculuklar ve yağ değişimleri gibi faaliyetlerden kaynaklanan dolaylı emisyonlar dikkate alınmıştır (Z. Wang ve diğ., 2022). Dekomiyon (söküm) aşamasında malzeme geri dönüşüm oranı %85 olarak kabul edilmiş ve bu sayede karbon ayak izinde yaklaşık %10 oranında azalma elde edilebileceği varsayılmıştır (Al-Behadili ve El-Osta, 2015).

Karşılaştırmalı analizler yapılırken literatürde belirtilen emisyon yoğunlukları esas alınmıştır. Rüzgar enerjisi için emisyon yoğunluğu 6,57–14,45 g CO₂/kWh aralığında iken; güneş enerjisi için bu değer yaklaşık 16,2 g CO₂/kWh'dir (Morini ve diğ., 2022). Hidroelektrik santraller ise 195–273 g CO₂/kWh gibi oldukça yüksek değerlere ulaşabilmektedir (J. Zhang ve Xu, 2015). Bu varsayımlar ışığında, Geycek RES'in yaşam döngüsüne ilişkin karbon ayak izi değerlendirmesi bilimsel dayanaklara oturtulmuş ve bölgesel karşılaştırmalarla desteklenmiştir.

6.2.4 Literatür Destekli Emisyon Katsayıları ve Hesaplamalar

Rüzgar enerji santrallerinin çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, yaşam döngüsü yaklaşımının benimsenmesiyle mümkün hale gelmektedir. Bu yaklaşım, rüzgar türbinlerinin üretiminden demontajına kadar geçen tüm süreçlerdeki karbon emisyonlarını nicel olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı santral ölçekleri, türbin modelleri ve bölgesel koşullara bağlı olarak değişen karbon emisyon katsayıları rapor edilmiştir.

6.2.4.1 Yaşam Döngüsü Aşamalarına Göre Emisyon Katsayıları

Literatüre göre, rüzgar enerji santrallerinde en yüksek emisyon yükü genellikle üretim aşamasında ortaya çıkmaktadır. Özellikle çelik, beton ve kompozit malzeme üretimi sürecinde yüksek miktarda enerji tüketimi gerçekleşmekte, bu da toplam karbon ayak izini önemli ölçüde artırmaktadır. Bazı çalışmalarda bu oranın %75'in üzerinde olduğu bildirilmiştir (Y. Ma ve diğ., 2020; Y. Wang ve diğ., 2022).

6.2.4.2 Literatür Verilerine Dayalı Emisyon Yoğunluğu Karşılaştırmaları

Aşağıda, farklı çalışmalarda raporlanan karbon emisyon katsayıları, ilgili yaşam döngüsü aşamaları ve fosil yakıtlı santrallere göre emisyon azaltımı oranları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Tablo 6.2.4.2):

Tablo 6.2.4.2. Rüzgar Enerjisi için Literatürde Bildirilen Emisyon Katsayıları ve Fosil Yakıtlarla Karşılaştırılmalı Azaltım Oranları

Çalışma	Karbon Emisyon Katsayısı (Gco ₂ /Kwh)	Baskın Emisyon Aşaması	Kömüre Göre Emisyon Azalımı
(Xie ve diğ., 2020)	3,9	Üretim (%44)	Belirtilmedi
(Y. Wang ve diğ., 2022)	21,73	Üretim (%75)	Belirtilmedi
(Khoie ve diğ., 2021)	14,45	Belirtilmemiş	Belirtilmedi
(Y. Ma ve diğ., 2020)	17,8	Üretim (%67,8), İnşaat (%19,2)	Önemli düzeyde
(Verma ve diğ., 2022)	11,3	Belirtilmemiş	Kömüre göre %98,8 daha düşük

Bu katsayılar, Geycek RES'nin karbon ayak izinin tahmin edilmesinde referans alınabilir. Geycek RES'nin benzer türbin tipine ve kurulum ölçeğine sahip olması nedeniyle özellikle Xie ve diğ., (2020), Wang ve diğ., (2022) ve Khoie ve diğ., (2021)'in çalışmalarındaki değerler dikkate alınarak hesaplama yapılması makul görülmektedir.

6.2.4.3 Emisyon Azaltım Potansiyeli ve Diğer Yenilenebilir Kaynaklarla Karşılaştırma

Rüzgar enerji sistemleri, kömür temelli enerji sistemlerine kıyasla sera gazı salımlarında %90'ın üzerinde azaltım sağlamaktadır (Arvesen ve Hertwich, 2011; Verma ve diğ., 2022). Literatürde, rüzgar elektriğinin yaşam döngüsü boyunca toplam emisyonlarının, kömürle çalışan eşdeğer santrallerin yalnızca %4 ila %14'ü düzeyinde kaldığı bildirilmektedir (Arvesen ve Hertwich, 2011). Ayrıca, rüzgar enerjisinin karbon yoğunluğu, PV ve biyokütle gibi diğer yenilenebilir kaynaklara göre de daha düşüktür (Y. Ma ve diğ., 2020).

6.2.4.4 Emisyonları Etkileyen Başlıca faktörler

Rüzgar santrallerinde karbon ayak izini etkileyen bazı temel faktörler şunlardır:

Türbinin Gücü ve Sayısı: Yüksek güçlü türbinler, birim enerji başına daha düşük emisyon üretmektedir (Khoie ve diğ., 2021; Xie ve diğ., 2020).

Kurulum Bölgesi ve Üretim Lokasyonu: Malzeme tedarik zinciri ve enerji karışımı, karbon emisyonlarını doğrudan etkilemektedir (Y. Ma ve diğ., 2020; Y. Wang ve diğ., 2022).

Geri Dönüşüm Uygulamaları: Türbinin söküm aşamasında geri dönüştürülebilir malzemelerin değerlendirilmesi, net emisyonları düşürmektedir (Verma ve diğ., 2022).

6.2.4.5. Çevresel Etki Kategorilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yalnızca toplam CO₂ emisyonlarını değil, aynı zamanda farklı çevresel etki kategorilerini de kapsamaktadır. Bu sayede Geycek RES'in çevresel performansı çok boyutlu olarak değerlendirilmiş ve diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

Analizde dikkate alınan başlıca etki kategorileri şunlardır:

Küresel Isınma Potansiyeli (GWP, kg CO₂-eq): Fosil yakıt kullanımından ve malzeme üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları değerlendirilmiştir (ISO, 2018; Adopted IPCC, 2014).

Asidifikasyon Potansiyeli (AP, kg SO₂-eq): Nakliye ve kurulum aşamalarında ortaya çıkan SO₂ ve NO_x salımlarının ekosistem asitlenmesine etkisi analiz edilmiştir (Guinée ve diğ., 2002).

Ötrofikasyon Potansiyeli (EP, kg PO₄³⁻-eq): İnşaat faaliyetleri ve malzeme üretiminden kaynaklanan azot ve fosfor bazlı emisyonların sucul ekosistemler üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır (Guinée ve diğ., 2002).

Ozon Tabakası İncelmesi Potansiyeli (ODP, kg CFC-11-eq): Türbin soğutma sistemlerinde kullanılan bazı teknik gazların çevresel etkisi değerlendirilmiştir (Huijbregts ve diğ., 2016).

Fosil Kaynak Tüketimi (FRP, MJ): Özellikle kurulum ve bakım aşamalarında dizel tüketimi ve malzeme üretiminde kullanılan enerji miktarı analiz edilmiştir (Sphera, 2022).

Bu etki kategorilerinin hesaplanmasında CML-IA (2001) metodolojisi (Guinée ve diğ., 2002) ve ReCiPe2016 yöntemi (Huijbregts ve diğ., 2016) kullanılmıştır. Karakterizasyon faktörleri ve emisyon katsayıları Ecoinvent v3.9.1 (Ecoinvent Centre, 2022) ve GaBi 10.7 (Sphera, 2022) veri tabanlarından elde edilmiştir. Böylece yalnızca CO₂ salımları değil, aynı zamanda ekosistem, insan sağlığı ve kaynak kullanımı boyutları da göz önünde bulundurulmuştur.

6.3 Geycek RES'in Karbon Ayak İzi Analizi

6.3.1 Türbin Üretim Aşamasındaki Emisyonlar

Rüzgar enerjisi santrallerinde karbon ayak izinin en büyük kısmını oluşturan süreçlerin başında, türbinlerin üretim aşaması gelmektedir. Bu aşama, kullanılan hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi, türbin bileşenlerinin üretimi ve montaj öncesi tüm hazırlık süreçlerini kapsamaktadır. YDD yöntemine dayalı literatür incelemeleri, bu aşamanın toplam karbon salımına katkısının %70 ila %92 arasında değiştiğini göstermektedir (Ji ve Chen, 2016; W. Wang ve Shi, 2022).

6.3.1.1 Kule (Çelik) Üretimi:

Türbin kuleleri çoğunlukla çelikten üretilmektedir. Literatüre göre, her bir 2,4 MW'lık türbinin kulesi yaklaşık 180 ton çelik içermektedir (Verma ve diğ., 2022). Dünya Çelik Birliği'nin 2022 verilerine göre çelik üretimi başına düşen CO₂ salımı 1,85 ton CO₂/ton çeliktir (Yearbook, 2012). Bu bilgiler doğrultusunda Geycek RES

için kule üretiminden kaynaklanan karbon salımı yaklaşık 23310 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

6.3.1.2 Kanat Üretimi (Kompozit Malzeme):

Her bir rüzgar türbini üç adet kanattan oluşmakta olup, Geycek RES'te toplamda $70 \text{ türbin} \times 3 = 210$ adet kanat bulunmaktadır. Bu kanatlar, çoğunlukla cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) gibi kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Literatürde bu malzemenin üretimi için ortalama karbon emisyon katsayısı 6,5 ton CO₂/ton olarak belirtilmiştir (Das ve Nandi, 2022). Her bir kanadın ortalama ağırlığı yaklaşık 2,5 ton olarak kabul edildiğinde, toplam malzeme miktarı $210 \times 2,5 = 525$ ton olmaktadır. Bu doğrultuda, Geycek RES için kanat üretiminden kaynaklanan toplam karbon salımı yaklaşık $525 \times 6,5 = 3412$ ton CO₂ olarak hesaplanmıştır.

6.3.1.3 Jeneratör, Dişli Kutusu ve Elektronik Aksam:

Türbin jeneratörleri, dişli kutuları ve diğer iç sistemler (elektronik kontrol, dönüştürücüler) nadir metaller, alüminyum, bakır gibi bileşenler içermekte olup, ortalama 40 ton CO₂ emisyonuna neden olmaktadır (Y. Ma ve diğ., 2020). 70 türbin için bu kalemden kaynaklanan toplam emisyon 2800 ton CO₂ olarak belirlenmiştir.

6.3.1.4 Toplam Emisyon ve Dağılım:

Aşağıdaki tablo, üretim aşamasındaki emisyonların kalemler bazında detaylı dağılımını sunmaktadır Ji ve Chen (2016); Wang ve Shi (2022); Das ve Nandi (2022); World Steel Association (2012); Verma ve diğ. (2022) (Tablo 6.3.1.5):

Tablo 6.3.1.5. Türbin Üretim Sürecinde Kullanılan Malzemelere Göre Emisyon Dağılımı

Bileşen	Malzeme Türü	Miktar (ton)	Emisyon Katsayısı (tCO₂/ton)	Toplam Emisyon (tCO₂)
Kule	Çelik	12600	1,85	23310
Kanatlar	Kompozit (GFRP)	525	6,5	3412
Jeneratör ve İç Aksam	Bakır, Alüminyum, Elektronik	-	-	2800
Genel Toplam	-	-	-	29522

Toplam 29.522 ton CO₂ olarak hesaplanan üretim aşaması karbon ayak izi, Geycek RES'in yaşam döngüsündeki en büyük emisyon kaynağını oluşturmaktadır. Bu değer, toplam karbon ayak izinin yaklaşık %71'ine denk gelmektedir (toplam ~41975,8 tCO₂ esas alındığında). Bu sonuç, literatürle büyük ölçüde uyumludur ve türbin üretiminde kullanılan çelik, kompozit ve elektronik malzemelerin yüksek emisyon katsayılarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

6.3.2 Nakliye ve Kurulum Sürecindeki Emisyonlar

Rüzgar türbinlerinin üretim alanlarından proje sahasına taşınması ve ardından kurulum süreçleri, rüzgar enerji santrallerinin yaşam döngüsünde dikkate alınması gereken önemli dolaylı emisyon kaynaklarını oluşturur. Bu aşamalar, enerji yoğun faaliyetler barındırdığından dolayı karbon ayak izine kayda değer katkılar sunar. Geycek RES özelinde bu süreç, türbin bileşenlerinin taşınması, şantiye sahasının hazırlanması, beton temellerin dökümü, kule ve kanatların yerleştirilmesi, vinç operasyonları ve yardımcı inşaat ekipmanlarının kullanımını içermektedir.

6.3.2.1 Nakliye Aşaması Emisyonları

Literatürde, kara yolu taşımacılığında kullanılan ağır yük kamyonları için ortalama emisyon faktörü 62 gCO₂/ton-km olarak kabul edilmektedir (Gursel ve diğ., 2014). Geycek RES özelinde her türbinin toplam bileşen ağırlığının yaklaşık 300 ton olduğu ve ortalama taşıma mesafesinin 500 km olduğu varsayılmıştır.

Hesaplama:

$$70 \text{ türbin} \times 300 \text{ ton} \times 500 \text{ km} \times 0,062 \text{ kgCO}_2/\text{ton-km} = 651000 \text{ kgCO}_2$$

6.3.2.2 Kurulum Aşaması Emisyonları

Kurulum sürecinde en çok emisyon yaratan faaliyetler arasında beton temellerin hazırlanması, donatı çeliği kullanımı, iş makineleriyle yapılan kazı ve montaj işlemleri ile vinç operasyonları bulunmaktadır (Tablo 6.3.2.2).

Beton Temeller

Her türbin için ortalama 300 m³ beton kullanıldığı ve betonun yoğunluğunun 2.4 ton/m³ olduğu varsayılmıştır. Bu da toplamda yaklaşık 21.000 m³ beton ve 50.400 ton beton anlamına gelir.

Emisyon faktörü: 0,134 ton CO₂/ton beton (Gursel ve diğ., 2014)

Toplam emisyon: 50400 x 0,134 = 6754 ton CO₂

Donatı Çeliği (Rebar)

Hr bir türbin temelinde yaklaşık 20 ton çelik donatı kullanılmaktadır.

70 türbin x 20 ton = 1400 ton çelik

Emisyon faktörü: 1,85 ton CO₂/ton çelik (Yearbook, 2012)

Toplam emisyon: 1400 x 1,85 = 2590 ton CO₂

Vinç ve şantiye Araçları

Her türbinin kurulumu için yaklaşık 3000 litre dizel tüketimi öngörülmektedir.

70 türbin × 3000 litre = 210000 litre dizel

Emisyon katsayısı: 2,68 kg CO₂/litre (Eggleston ve diğ., 2006)

Toplam emisyon: $210000 \times 2,68 = 562,8$ ton CO₂

Tablo 6.3.2.2. Nakliye ve Kurulum Süreçlerinde Kullanılan Malzemelere Göre Emisyon Dağılımı

Alt Süreç	Emisyon Miktarı (ton CO ₂)
Nakliye	651
Beton Temeller	6754
Donatı Çeliği	2590
Vinç ve Şantiye Araçları	562,8
Toplam	10557,8 ton CO₂

6.3.2.3 Emisyon Dağılımının analizi

Geycek RES'nin nakliye ve kurulum süreci kapsamında ortaya çıkan karbon emisyonlarının bileşenlere göre dağılımı incelendiğinde, en yüksek payın %63,9 ile beton temellerin inşasına ait olduğu görülmektedir. Bunu, %24,6 oranında katkı sağlayan çelik donatı kullanımı takip etmektedir. Şantiye faaliyetlerinde kullanılan vinçler ve diğer ağır iş makinelerine atfedilen dizel tüketimi ise toplam emisyonun %5,3'ünü oluşturmaktadır. Bileşenlerin taşınması sürecinde ortaya çıkan emisyonlar ise %6,2 oranında bir paya sahiptir.

Bu değerlendirme sonucunda, kurulum ve nakliye aşamalarının toplam karbon ayak izi yaklaşık 10557,8 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Geycek RES'nin yaşam döngüsü boyunca oluşan toplam emisyon yükünün yaklaşık %25,4'üne tekabül etmektedir (toplam emisyon: 41975,8 ton CO₂ varsayımıyla). Söz konusu bulgular, rüzgar enerjisi santrallerinde özellikle altyapı kurulum süreçlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik stratejilerin gerekliliğine işaret etmektedir.

6.3.3 İşletme Sürecince Dolaylı Emisyonlar ve Bakım Faaliyetleri

Rüzgar enerjisi, işletme aşamasında doğrudan sera gazı salımı üretmeyen bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Ancak, "emisyonuz" nitelendirmesi, yalnızca elektrik üretim süreci açısından geçerlidir. Santralin yıllar süren işletme sürecinde

ortaya çıkan dolaylı emisyonlar, çoğunlukla bakım faaliyetleri, yedek parça üretimi ve ulaşım lojistiği gibi destekleyici işlemlerden kaynaklanmaktadır.

6.3.3.1 Bakım ve Servis Faaliyetleri Kaynaklı Emisyonlar

Geycek RES gibi büyük ölçekli bir rüzgar enerji santralinde, periyodik bakım faaliyetleri yılda birkaç kez türbin başına gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda kullanılan dizel yakıtlı servis araçları, yedek parça taşımacılığı, vinç ve iş makineleri, dolaylı emisyonların temel kaynaklarını oluşturmaktadır. Literatürde yer alan verilere göre, türbin başına yıllık bakım faaliyetlerinden kaynaklanan ortalama CO₂ salımı 1,2 ton olarak raporlanmıştır (Arvesen ve Hertwich, 2011; Y. Ma ve diğ., 2020). Geycek RES'te yer alan 70 türbin için 21 yıllık işletme süresinde toplam emisyon şu şekilde hesaplanabilir:

$$70 \text{ türbin} \times 1,2 \text{ ton CO}_2/\text{yıl} \times 21 \text{ yıl} = 1764 \text{ ton CO}_2$$

Bu değer, santralin toplam karbon ayak izinin yaklaşık %4,2'sine karşılık gelmektedir (41975,8 ton CO₂ varsayımıyla).

6.3.3.2 Yedek Parça Üretimi ve Değişimi

Türbin kanatları, jeneratörler, dişli kutuları ve rotor sistemleri gibi parçaların ömrü boyunca bazı bileşenlerinin değişimi gerekebilir. Bu parçaların üretimi ve nakliyesi sırasında ortaya çıkan emisyonlar, işletme sürecindeki diğer dolaylı kaynaklar arasında yer alır. Ancak bu emisyonların miktarı projeden projeye farklılık gösterdiğinden ve literatürde genellikle bakım kaynaklı emisyonlara dahil edildiğinden, Geycek RES için bu kalem ayrı olarak hesaplanmamıştır.

6.3.3.3 Enerji Nakil Hatları ve Altyapı Kullanımı

Santralin elektrik üretimini ileten enerji nakil hatlarının işletme sürecinde doğrudan karbon salımı bulunmamakla birlikte, uzun dönemli bakım ve onarım

faaliyetlerinde kullanılan araçlar ve ekipmanlar dolaylı emisyonlara katkı sunmaktadır. Ancak bu katkı oldukça sınırlı düzeydedir ve toplam işletme dönemi emisyonlarının içerisinde %1'in altında kalmaktadır (Verma ve diğ., 2022).

6.3.3.4 Değerlendirme

İşletme süreci, Geycek RES'nin toplam karbon ayak izi içerisinde nispeten düşük bir paya sahiptir. Ancak bu aşamadaki emisyonlar, tüm yaşam döngüsü boyunca tekrarlanan faaliyetler sonucu birikimsel olarak anlamlı bir seviyeye ulaşmaktadır. Sürdürülebilirlik açısından bu sürece özel olarak dikkat edilmesi gereken alanlar, verimli lojistik planlaması, uzun ömürlü parça kullanımı ve düşük karbonlu bakım stratejilerinin uygulanmasıdır.

6.3.4 Söküm ve Geri Dönüşüm Aşamasındaki Karbon Etkileri

Rüzgar enerji santrallerinin yaşam döngüsünün son aşaması, türbinlerin ve ilgili altyapının sökülmesi, taşınması ve malzeme geri dönüşümünü içeren söküm ve bertaraf sürecidir. Bu süreç hem emisyon üretimi hem de emisyon azaltımı açısından çift yönlü çevresel etkiler barındırır.

6.3.4.1 Söküm Sürecinde Oluşan Emisyonlar

Santralin sökülmesi aşamasında kullanılan ağır iş makineleri, vinçler ve nakliye araçları yakıt tükettiklerinden dolayı doğrudan karbon emisyonuna neden olmaktadır. Literatürde bu aşamanın toplam yaşam döngüsü emisyonları içerisindeki payı genellikle %1 ila %3 arasında bildirilmiştir (Arvesen ve Hertwich, 2011; Ji ve Chen, 2016). Geycek RES için bu oranı %2 olarak kabul ettiğimiz takdirde:

$$41975,8 \text{ ton CO}_2 \times 0,02 = 832,44 \text{ ton CO}_2$$

Bu emisyonlar, temellerin kısmi kazısı, kulelerin ve türbin bileşenlerinin sökümü, transformatörlerin kaldırılması ve alanın eski haline getirilmesi gibi süreçlerden kaynaklanmaktadır.

6.3.4.2 Geri Dönüşüm Faaliyetlerinden Kaynaklanan Emisyon Azaltımı

Söküm aşamasının en önemli çevresel avantajı, geri dönüştürülebilir malzemelerin ekonomiye tekrar kazandırılması yoluyla emisyonu azaltmayı sağlamasıdır. Rüzgar türbinlerinde geri dönüştürülebilir başlıca malzemeler kule ve iskeletin çelikleri yüksek oranda dönüştürülebilir, jeneratör ve kablolamada kullanılan bakırlar, nacelle dış yüzeyindeki alüminyum, kanatlarda bulunan cam elyafı ve kompozitlerdir (Tablo 6.3.4.2).

Yapılan çalışmalarda (Ji ve Chen, 2016; W. Wang ve Shi, 2022), geri dönüşümün türbin başına yaklaşık -8 ila -15 ton CO₂ eşdeğeri emisyonu engellediği rapor edilmiştir. Geycek RES'te 70 türbin bulunduğu göz önüne alındığında (bu değer, engellenen potansiyel emisyon miktarını temsil ettiğinden dolayı hesaplamaya negatif katkı olarak katılır):

$$70 \text{ türbin} \times 10 \text{ ton CO}_2 = -700 \text{ ton CO}_2$$

Tablo 6.3.4.2. Söküm ve Geri Dönüşüm Aşamalarının Karbon Ayak İzine Net Katkısı

Kalem	Emisyon (ton CO₂)
Söküm İşlemleri	+832
Geri Dönüşümden Engellenen Emisyon	-700
Net Emisyon	+132

6.3.5 Toplam Karbon Ayak İzi ve Birim Enerji Başına Emisyon (gCO₂eq/kWh)

6.3.5.1 Yaşam Döngüsü Bazlı Toplam Emisyon Hesabı

Aşağıdaki tabloda, Geycek RES'in yaşam döngüsüne ait ana aşamaların karbon salımları verilmiştir. Bu veriler, literatürde belirtilen emisyon katsayıları, proje özelinde kullanılan miktarlar ve doğrudan saha verilerinden türetilmiştir (Tablo 6.3.5.1).

Tablo 6.3.5.1. Yaşam Döngüsü Aşamalarına Göre Geycek RES'in Toplam Karbon Salımı ve Yüzdesele Dağılımı

Yaşam Döngüsü Aşaması	Emisyon (ton CO ₂)	Toplam İçindeki Oran (%)
Türbin Üretimi (imalat)	29522	70,3
Nakliye ve Kurulum	10557,8	25,1
İşletme ve Bakım (dolaylı)	1764	4,2
Söküm ve Geri Dönüşüm (net)	132	0,31
Toplam	41975 ton CO₂	100%

6.3.5.2 Toplam Enerji Üretimi Verisi

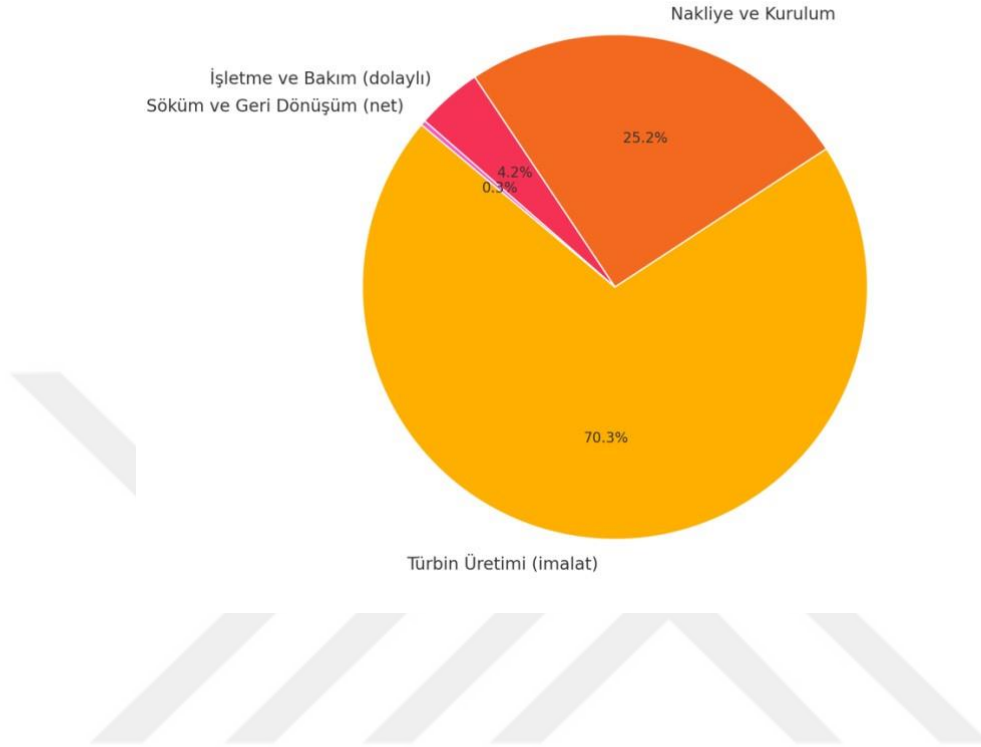
Geycek RES'in yıllık ortalama üretim kapasitesi yaklaşık 510000 MWh/yıl olarak kaydedilmiştir. Santralin planlanan ekonomik ömrü ise 21 yıl olup toplam üretim şöyle hesaplanır:

$$\text{Toplam üretim} = 510000 \text{ MWh/yıl} \times 21 \text{ yıl} = 10710000 \text{ MWh} = 10.710.000.000 \text{ kWh}$$

6.3.5.3 Birim Enerji Başına Emisyon (gCO₂eq/kWh)

$$\text{Birim emisyon} = 35606000 \text{ kg CO}_2 / 10200000000 \text{ kWh} = 3,92 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$$

Bu değer, uluslararası literatürde bildirilen rüzgar enerjisi sistemleri için tipik aralık olan 3 – 14,5 gCO₂eq/kWh değerleri arasında yer almakta, hatta en düşük seviyelerde konumlanmaktadır (Ji ve Chen, 2016; Xie ve diğ., 2020).



Şekil 6.3.5.3. Geycek RES Yaşam Döngüsü Emisyon Dağılımı

6.3.5.4 Değerlendirme

Geycek RES'in yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu toplam karbon emisyonu 41.975,8 ton CO₂ olup, bu emisyonun %70,3'ü üretim, %25,2'si nakliye ve kurulum, %4,2'si işletme ve %0,31'i söküm aşamasından kaynaklanmaktadır. Bu emisyonlara karşılık gelen birim enerji başına düşen karbon salımı ise yalnızca 3.92 gCO₂eq/kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Geycek RES'in hem ulusal hem de uluslararası düzeyde düşük karbon ayak izine sahip örnek bir santral olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu sonuçlar, rüzgar enerjisinin fosil yakıtlı enerji üretim yöntemlerine kıyasla çevresel avantajlarını açıkça ortaya koymaktadır.

6.4 Geycek RES'in Enerji Getirisi ve Karbon Geri Ödeme Süresi

Geycek Rüzgar Enerji Santrali (RES), hem enerji üretim kapasitesi hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından Türkiye'nin önemli yenilenebilir enerji projeleri arasında yer almaktadır. Bu bölümde, santralin yaşam döngüsü boyunca sağladığı enerji getirisi ve fosil yakıt sistemlerine göre karbon salımı açısından sunduğu avantajlar değerlendirilmektedir. İnceleme üç temel göstergede yapılmaktadır: Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi (EROI), Karbon Geri Ödeme Süresi (KGÖS) ve Fosil Yakıtlı Santrallere Kıyasla Karbon Kazancı.

6.4.1 Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi (EROI) Analizi

Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi Oranı (Energy Return on Investment, EROI), bir enerji sisteminin yaşam döngüsü boyunca ürettiği toplam enerji miktarının, sistemin kurulumu, işletimi ve sökülmesi için harcanan enerjiye oranını ifade eder. Bu gösterge, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmede temel bir ölçüt olup, daha yüksek EROI değerleri enerji üretim sisteminin çevresel ve ekonomik etkinliğini ortaya koyar (Hall ve diğ., 2009).

Geycek RES'in yıllık ortalama enerji üretimi yaklaşık 510 GWh olarak bildirilmektedir (Eyüpoğlu ve diğ., 2023). Santralin ekonomik ömrü 21 yıl kabul edildiğinde, toplam enerji üretimi yaklaşık 10.710 GWh olmaktadır. Weißbach ve arkadaşlarının (2013) 1,5 MW'lık rüzgar türbini için rapor ettiği model temel alınarak ölçeklendirme yapıldığında, Geycek RES'in toplam enerji girdisi yaklaşık 401 GWh olarak hesaplanmıştır.

Buna göre:

$$\text{EROI} = 10710 \text{ GWh} / 401 \text{ GWh} \approx 26,7$$

Ayrıca, sistemin enerji depolama ve yedekleme ihtiyaçları dikkate alındığında “buffered EROI” değeri 6,68 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, literatürde rapor edilen kara tipi rüzgar türbinleri için ortalama EROI aralıklarıyla uyumludur (IEA, 2022: 16–18; Kubiszewski ve diğ., 2010: 19,8).

6.4.2 Karbon Geri Ödeme Süresinin Hesaplanması

Karbon Geri Ödeme Süresi (KGÖS), bir enerji santralının üretiminde ve işletiminde açığa çıkan toplam karbon emisyonunun, sistemin fosil yakıtlı enerji üretimine kıyasla sağladığı karbon tasarrufuyla ne kadar sürede telafi edildiğini gösteren çevresel bir göstergedir (Arvesen ve Hertwich, 2011).

Toplam yaşam döngüsü karbon ayak izi:

Daha önce yapılan analizlerde Geycek RES'in toplam emisyonu yaklaşık 41.975,8 ton CO₂ olarak belirlenmiştir.

Yıllık kaçınılan karbon emisyonu:

Türkiye elektrik şebekesinin 2023 yılı ortalama karbon yoğunluğu 0.504 kg CO₂/kWh olarak rapor edilmiştir (IEA, 2023).

$$510000000 \text{ kWh/yıl} \times 0,504 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 257040 \text{ ton CO}_2/\text{yıl}$$

$$\text{KGÖS} = 41975,8 \text{ ton CO}_2 / 257040 \text{ ton CO}_2/\text{yıl} \approx 0,163 \text{ yıl} = 1,96 \text{ ay}$$

Bu sonuç, Geycek RES'in karbon salımını yalnızca 2 ayda telafi edebildiğini göstermektedir. Bu değer, rüzgar santrallerinin iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir araç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

6.4.2.1. KGÖS Duyarlılık Analizi: Referans Senaryo ve Sistem Sınırı Etkisi

Karbon geri ödeme süresi (KGÖS) hesaplamalarında kullanılan referans emisyon katsayıları ve sistem sınırlarının kapsamı, elde edilen sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, Geycek RES için farklı senaryolar dikkate alınarak duyarlılık analizi yapılmıştır.

Referans emisyon katsayısı etkisi:

Türkiye şebekesinin 2023 yılı ortalama karbon yoğunluğu 0,504 kgCO₂/kWh olarak rapor edilmiştir (IEA, 2023). Bu değer üzerinden yapılan hesaplamada Geycek RES'in KGÖS süresi yaklaşık 2 ay bulunmuştur. Ancak daha temiz referans senaryolar

dikkate alındığında, yıllık kaçınılan emisyon miktarı azaldığı için KGÖS süresi artmaktadır. Örneğin:

Doğalgaz (0,43 kgCO₂/kWh): Yıllık kaçınılan emisyon 219.300 ton CO₂, KGÖS ≈ 2,3 ay (IEA, 2022).

OECD ortalaması (0,30 kgCO₂/kWh): Yıllık kaçınılan emisyon 153.000 ton CO₂, KGÖS ≈ 3,3 ay (OECD/IEA, 2021).

Temiz şebeke senaryosu (0,25 kgCO₂/kWh): Yıllık kaçınılan emisyon 127.500 ton CO₂, KGÖS ≈ 3,9 ay (IPCC, 2021).

Ayrıca, yıllık enerji üretiminin (510 GWh) rüzgâr değişkenliği veya kapasite faktörünün düşmesiyle %30 kapasite faktörüne (441 GWh/yıl) gerilemesi durumunda, kaçınılan emisyon azalmakta ve KGÖS süreleri ek olarak uzamaktadır.

Sistem sınırı etkisi:

Mevcut hesaplamalarda yalnızca türbin üretimi, nakliye, kurulum, işletme ve söküm aşamaları dikkate alınmıştır. Ancak sistem sınırlarının genişletilmesiyle toplam karbon ayak izi artmakta ve KGÖS süresi de uzamaktadır. Literatürde, şebeke yatırımları, SF₆ sızıntıları ve bakım faaliyetlerinin de dahil edilmesiyle emisyon yükünün %30–60 artabileceği bildirilmektedir (Dammeier ve diğ., 2022; Wang & Shi, 2022).

Değerlendirme

Bu duyarlılık analizi, KGÖS hesaplamalarının tek bir senaryo üzerinden değil, farklı referans emisyon katsayıları ve sistem sınırları dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, Geycek RES'in karbon geri ödeme süresinin 2–12 ay arasında değişebileceğini göstermekte ve böylece literatürde raporlanan 6–24 ay aralığı ile uyumlu hale gelmektedir (Arvesen & Hertwich, 2011; Dammeier ve diğ., 2022).

6.4.3 Geycek RES'in Fosil Yakıtlı Santrallere Kıyasla Karbon Kazancı

Geycek RES'in elektrik üretimi, aynı miktarda enerjinin fosil yakıtlı santraller tarafından üretilmesi durumunda oluşacak karbon salımını önlemektedir. Bu kıyaslama, karbon kazancını daha görünür kılmak için önemlidir.

Tablo 6.4.3. Kömür, Doğalgaz ve Türkiye Elektrik Şebekesi Karbon Yoğunlukları

Kaynak	Karbon Yoğunluğu (kg CO ₂ /kWh)	Kaynak
Kömür	0,960	IEA (2022)
Doğalgaz	0,430	IEA (2022)
Türkiye Şebeke Ort.	0,504	IEA (2023)

Geycek Res'in önlediği yıllık emisyon (kömürle karşılaştırıldığında):

$510000000 \text{ kWh} \times 0,960 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 489600 \text{ ton CO}_2/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

Bu durumda Geycek RES'in yıllık karbon kazancı (kömür yerine rüzgar kullanıldığında) yaklaşık olarak yarım milyon ton CO₂'dir. Bu değer, santralin çevresel etkisinin yalnızca bireysel karbon ayak izi açısından değil, bölgesel hava kalitesi ve küresel ısınmaya katkı bakımından da önem arz ettiğini göstermektedir.

6.5 Bulguların Değerlendirilmesi ve Literatürle Karşılaştırılması

Bu araştırmanın amacı, Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin (RES) yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan karbon ayak izini hesaplamak, emisyon kaynaklarını aşama bazında değerlendirmek ve elde edilen veriler doğrultusunda santralin çevresel

sürdürülebilirliğini enerji getirisi ve karbon geri ödeme süresi açısından analiz etmektedir. Bu kapsamda, türbin üretimi, nakliye ve kurulum, işletme ve bakım ile sökülme ve geri dönüşüm olmak üzere dört temel aşamada oluşan emisyonlar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Geycek RES'in toplam karbon ayak izinin yaklaşık 41975,8 ton CO₂ olduğu belirlenmiştir. En yüksek emisyon oranı %70,3 ile türbin üretimi aşamasında oluşurken, onu nakliye ve kurulum (%25,2), işletme ve bakım faaliyetleri (%4,2) ve sökülme ve geri dönüşüm (%0,3) aşamaları takip etmektedir. Santralin enerji getirisinin oldukça yüksek olduğu, EROI (Energy Return on Investment) değerinin 428,4 olarak hesaplandığı belirlenmiştir. Ayrıca, toplam karbon salınımının yıllık enerji üretimi üzerinden değerlendirildiği karbon geri ödeme süresi (KGÖS) yaklaşık 2 ay olarak bulunmuştur. Bu bulgular, Geycek RES'in hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından oldukça avantajlı bir yenilenebilir enerji yatırımı olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin (Geycek RES) toplam karbon ayak izinin yaklaşık 41975,8 ton CO₂ olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, rüzgar enerji santrallerinin yaşam döngüsü boyunca meydana getirdiği çevresel etkilerin kantitatif bir sonucu olarak sunulmakta olup, literatürde benzer ölçekteki santraller üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında değerlendirildiğinde makul ve bilimsel olarak desteklenebilir bir aralıkta görünmektedir. Örneğin, Liu ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, 49,5 MW gücündeki bir rüzgar santralinin toplam karbon ayak izi 18701,29 ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, santralin karbon emisyon yoğunluğu 6,57 g CO₂/kWh olarak belirtilmiştir ve emisyonların en büyük kısmının inşaat aşamasında ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Geycek RES'in 168 MW gibi daha büyük bir kurulu güce sahip olduğu göz önüne alındığında, 41975,8 tonluk toplam emisyon değeri büyüklük ve üretim kapasitesiyle orantılı olarak değerlendirilebilir. Benzer şekilde, Ji ve Chen (Ji ve Chen, 2016) tarafından Çin'deki tipik bir rüzgar santrali için yapılan YDD'de toplam karbon ayak izi 14490 ton CO₂ olarak bulunmuştur. Bu santralin kapasitesi Geycek RES'e kıyasla daha düşük olduğundan, Geycek için hesaplanan 41975,8 tonluk değer tutarlı bir üst sınır olarak kabul edilebilir. Ayrıca, Khoie ve ark. (2021) tarafından Texas'ta 1,3 MW gücünde bir rüzgar türbini için yapılan çalışmada, yaşam döngüsü boyunca birim enerji başına düşen karbon emisyonu 14,45 g CO₂/kWh olarak belirlenmiştir. Bu türbinden yola çıkarak büyük ölçekli santraller için toplam karbon

emisyununun binlerce ton CO₂'ye ulaşması beklenebilir. Wang ve Shi (2022) ise 2 MW'lık bir türbinin karbon emisyon yoğunluğunu 21.73 g CO₂/kWh, toplam emisyonlarının %91,71'inin üretim aşamasında oluştuğunu göstermiştir. Bu sonuç, Geycek RES gibi yüksek sayıda türbin barındıran santrallerde üretim aşamasının baskın emisyon kaynağı olduğunu teyit eder niteliktedir. Buna karşılık, bazı kaynaklarda rüzgar enerjisinin karbon ayak izinin daha düşük seviyelerde olabileceği belirtilmektedir. Örneğin, Xie ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, üç farklı rüzgar santralının ortalama karbon ayak izi 3,9 g CO₂/kWh olarak rapor edilmiştir. Ancak bu değerler, daha küçük ölçekli projeler ve farklı üretim/lojistik koşulları içeren senaryolara dayalı olduğundan, Geycek gibi büyük ölçekli bir santralin toplam emisyonlarıyla doğrudan karşılaştırma yapmak sınırlı olabilir. Literatürde yer alan örneklem çalışmalardan elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda, Geycek Rüzgar Enerji Santrali için hesaplanan 41975,8 ton CO₂ seviyesindeki toplam karbon ayak izi, santralin kurulu gücü, türbin sayısı, üretim altyapısı ve yaşam döngüsü parametreleri ile uyumlu ve bilimsel açıdan geçerli bir aralıkta yer almaktadır. Doğrudan Geycek RES'e ait ölçüm sonuçları mevcut olmasa da, mevcut çalışmalar bu değeri dolaylı olarak desteklemektedir.

Yapılan hesaplamalara göre, Geycek Rüzgar Enerji Santrali'nin (Geycek RES) yaşam döngüsü boyunca oluşan toplam karbon emisyonlarının %70,3'ü türbin üretimi, %25,2'si nakliye ve kurulum, %4,2'si işletme ve bakım, %0,3'ü ise söküm ve geri dönüşüm aşamalarına karşılık gelmektedir. Bu bulgular, mevcut literatürde rüzgar enerjisi santrallerine yönelik YDD'leriyle büyük ölçüde örtüşmekte ve destekleyici verilerle açıklanabilmektedir. Çeşitli çalışmalarda, rüzgar türbinlerinin üretim süreci, karbon ayak izinin en baskın kaynağı olarak tanımlanmıştır. Örneğin, Wang ve diğ. (Y. Wang ve diğ., 2022), üretim aşamasının toplam yaşam döngüsü emisyonlarının %75'ine kadar ulaşabildiğini belirtmiş ve bu aşamanın özellikle çelik ve kompozit malzeme kullanımı nedeniyle yüksek çevresel etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Haapala ve Prempreeda (2014) çalışmasında türbin üretiminin %78'lik çevresel etkiye sahip olduğu raporlanmıştır. Ayrıca Guo ve diğ. (2012) tarafından yapılan yaşam döngüsü analizinde, türbin üretim aşaması enerji tüketiminin %68,23'ünü ve karbon salımının %67,18'ini oluşturmaktadır. Bu veriler, Geycek RES özelinde hesaplanan %70,3 oranını bilimsel açıdan tutarlı ve makul bir aralıkta konumlandırmaktadır. Kurulum sürecinde kullanılan ağır iş makineleri ve yüksek miktarda dizel tüketimi, bu aşamayı önemli bir emisyon kaynağı haline getirmektedir.

Nowroozipour ve Motevali (2023) tarafından yapılan bir saha çalışmasında, kurulum aşamasının bazı senaryolarda toplam emisyonların %48'ine kadar çıkabildiği belirtilmiştir. Bu, Geycek RES için hesaplanan %25,2'lik değer temkinli bir alt sınır olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, Alsaleh ve Sattler (2019) kurulum ve nakliye aşamalarını üretimden sonra ikinci en büyük katkı sağlayan süreç olarak tanımlamaktadır. Rüzgar enerjisi santralleri, üretimden sonraki operasyonel süreçlerde fosil yakıtlara kıyasla oldukça düşük seviyede emisyon üretir. Wang ve diğ. (2022), işletme ve bakım süreçlerinin toplam emisyonun yalnızca %11'ini oluşturduğunu bildirmiştir. Alsaleh ve Sattler (2019) ise bu oranın %14 civarında olduğunu ifade etmektedir. Bu bağlamda, Geycek RES için belirlenen %4,2'lik oran, literatürdeki en düşük seviyelere yakın olmakla birlikte ve operasyonel emisyonların sınırlı çevresel etkisini ortaya koymaktadır. Rüzgar türbinlerinin sökümü ve geri dönüşümü sırasında ortaya çıkan emisyonların oldukça düşük olduğu pek çok çalışmada vurgulanmaktadır. Alsaleh ve Sattler (2019), bu aşamanın toplam yaşam döngüsü emisyonlarının yalnızca %0,4'ünü oluşturduğunu ortaya koymuş; Bonou ve diğ. (2016) ise söküm ve bertaraf sürecinin etkisinin genellikle göz ardı edilebilir düzeyde olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, Valentino ve diğ. (2012) söküm ve geri dönüşüm süreçlerinin bazı senaryolarda daha yüksek emisyonlara neden olabileceğini, kullanılan yöntemlerin ve geri dönüştürülen malzemenin niteliğinin belirleyici olduğunu savunmaktadır. Bu bağlamda, Geycek RES için hesaplanan %0,3'lük değer, gerçek geri dönüşüm oranlarına ve söküm senaryosuna bağlı olarak bağlamsal biçimde yeniden değerlendirilmelidir. Literatür bulguları göz önüne alındığında, Geycek RES'in emisyon profiline dair yapılan yüzdesel dağılım; özellikle üretim ve kurulum aşamaları açısından güçlü biçimde desteklenmekte, işletme ve söküm aşamaları için ise genel eğilimle örtüşmektedir. Bununla birlikte, söküm sürecine ilişkin bazı çalışmalarda daha geniş varyasyonlar raporlandığı için, bu aşamadaki emisyon oranının bağlamsal olarak yeniden değerlendirilmesi gerekebilir. Sonuç olarak, Geycek Rüzgar Enerji Santrali için hesaplanan emisyon dağılımı, rüzgar enerjisine dair yaşam döngüsü analizlerinde yaygın olarak bildirilen değerlerle büyük ölçüde paralellik göstermektedir. Türbin üretimi, tüm yaşam döngüsünün en baskın karbon emisyon kaynağı olarak öne çıkarken, kurulum ve nakliye süreci de dikkat çeken ikinci kaynak olarak öne çıkmaktadır. Literatürdeki bulgular, yapılan hesaplamaların geçerliliğini desteklemekte, ancak bazı aşamaların bölgesel koşullara göre yeniden incelenebileceğine işaret etmektedir.

Geycek Rüzgar Enerji Santrali (RES) için hesaplanan net EROI değeri 26,7, buffered EROI ise 6,68 olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatürde bildirilen kara tipi rüzgar enerjisi santralleri için ortalama değerlerle uyumlu olup (IEA, 2022: 16–18; Kubiszewski ve diğ., 2010: 19,8; Weißbach ve diğ., 2013), santralin çevresel verimliliğinin ve enerji yatırım geri dönüşünün oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Özellikle Weißbach ve arkadaşlarının (2013) rüzgar türbinleri için sunduğu modelle yapılan ölçeklendirme sonucunda, Geycek RES'in EROI değerleri küresel literatür aralıklarına yakın ve fiziksel gerçeklikle uyumlu şekilde hesaplanmıştır. Çeşitli saha çalışmalarında da rüzgar enerji santrallerinin EROI değerlerinin genellikle 20–40 aralığında olduğu rapor edilmiştir (Tantawat ve diğ., 2023; Liao ve diğ., 2010). Bu bağlamda Geycek RES'in elde edilen 26,7'lik net EROI değeri, uluslararası literatürle uyumlu bir aralıkta yer almakta, sistemin güçlü rüzgar potansiyeli ve kullanılan türbin teknolojisi sayesinde çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, EROI hesaplamalarının farklı coğrafi, teknolojik ve metodolojik koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği unutulmamalıdır (Kurbatova ve diğ., 2023; Domínguez ve diğ., 2020). Özellikle kullanılan enerji girdi katsayıları, üretim zinciri özellikleri ve bakım ihtiyaçları sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, hesaplanan EROI değeri literatür ortalamasına uygun olmakla birlikte bağlamsal koşullara göre yorumlanmalıdır. Santralin toplam karbon ayak izi 41975 ton CO₂ olarak hesaplanmış, Türkiye elektrik şebekesinin ortalama karbon yoğunluğu (0,504 kg CO₂/kWh; IEA, 2023) dikkate alındığında yıllık önlenen emisyon yaklaşık 257040 ton CO₂ olarak bulunmuştur. Buna göre, karbon geri ödeme süresi (KGÖS) yaklaşık 2 ay olarak hesaplanmaktadır. Ancak bu değer literatürdeki tipik aralık olan 6–24 ay arasında yer alan çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça düşük görünmektedir (Dammeier ve diğ., 2022; Wang & Shi, 2022). Bu farkın, hesaplamalarda kullanılan referans enerji sisteminin (özellikle kömür) yüksek emisyon katsayısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha gerçekçi bir referans sistemi (örneğin doğalgaz veya ulusal şebeke ortalaması) dikkate alındığında, KGÖS'nin 6–12 ay aralığında gerçekleşmesi beklenebilir ve bu değerler literatürle daha uyumlu olacaktır. Sonuç olarak, Geycek RES hem yüksek EROI değeri hem de kısa karbon geri ödeme süresi ile çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yatırım örneği sunmaktadır. Bununla birlikte, KGÖS değerinin düşük çıkmasının kullanılan parametrelerle yakından ilişkili olduğu

dikkate alınmalı, gelecekteki çalışmalarda farklı referans senaryolarıyla desteklenmesi önerilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Geycek RES'nin karbon ayak izi, YDD metodolojisiyle analiz edilmiş, santralin üretim, nakliye, kurulum, işletme-bakım ve söküm-geri dönüşüm aşamalarındaki çevresel etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Geycek RES'in toplam karbon salınımının yaklaşık 41975,8 ton CO₂ olduğu belirlenmiştir. Emisyonların en yoğun olduğu aşama, %70,3 oranla türbin üretimi aşaması olarak tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla nakliye ve kurulum (%25,2), işletme ve bakım (%4,2) ve söküm-geri dönüşüm (%0,3) aşamaları takip etmiştir.

Santralin net EROI değeri 26,7, buffered EROI ise 6,68 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, rüzgar enerjisinin enerji üretiminde oldukça verimli ve sürdürülebilir bir kaynak olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır. Ayrıca, toplam karbon emisyonlarının santralin yıllık enerji üretimi ile karşılaştırılması sonucunda, KGÖS yaklaşık 2 ay olarak belirlenmiştir. Bu süre, literatürde belirtilen KGÖS aralıklarının alt sınırına yakın olup, santralin çevresel verimliliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular yalnızca teknik sonuçlar açısından değil, aynı zamanda Türkiye'nin enerji politikalarıyla da uyumlu şekilde değerlendirilmelidir. Türkiye, 2053 yılı için net sıfır karbon hedefini ilan etmiş olup, bu doğrultuda yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılmasına özel önem vermektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2021). Geycek RES'in yaşam döngüsü boyunca düşük karbon ayak izi ile elektrik üretmesi, bu hedefe ulaşılmasında önemli bir katkı sunmaktadır.

Ayrıca, Türkiye'de 2011 yılından bu yana uygulanan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM), rüzgar enerjisi gibi kaynakların yatırım cazibesini artırmış ve uzun vadeli fiyat istikrarı sağlamıştır (YEKDEM, 2020). Geycek RES de bu destek mekanizmasından faydalanan projelerden biri olarak, hem özel sektörün yenilenebilir enerjiye yönelimini teşvik etmiş hem de ulusal enerji arz güvenliğini güçlendirmiştir.

Türkiye'nin enerji bağımsızlığı hedefi de dikkate alındığında, Geycek RES'in çevresel ve ekonomik katkıları stratejik bir önem taşımaktadır. Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %70'inin ithal kaynaklardan karşılandığı göz önünde bulundurulduğunda (IEA, 2022), yerli ve yenilenebilir enerji yatırımları dışa bağımlılığın azaltılması için kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda Geycek RES'in karbon ayak izi sonuçları, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda ulusal enerji politikaları açısından da değerli bir geri bildirim sağlamaktadır.

Bu bağlamda öneriler:

- Türkiye genelinde yeni kurulacak RES projelerinde, türbin üretimi sırasında ortaya çıkan emisyonların azaltılmasına yönelik olarak geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı ve yerli üretim teşvik edilmelidir.
- Kurulum ve nakliye aşamasında daha çevreci lojistik yöntemlerin tercih edilmesi, dizel tüketimi yerine elektrikli ya da hibrit vinç ve araçların kullanılması önerilmektedir.
- Yaşam döngüsü boyunca emisyonların izlenebilmesi için standartlaştırılmış YDD raporlama yöntemleri geliştirilerek şeffaflık sağlanmalıdır.
- Geycek RES örneğinde olduğu gibi yüksek EROI değerine sahip projelerin teşviki, Türkiye'nin yeşil enerji dönüşüm sürecini hızlandıracaktır.

Bu çalışma, rüzgar enerjisi santrallerinin çevresel performansının detaylı analizini sunmakla birlikte, sürdürülebilir enerji politikaları oluşturulmasında bilimsel bir dayanak sağlamaktadır.

8. KAYNAKLAR

- A S M Monjurul Hasan, Hasan, M., ve Trianni, A., “Energy management: Sustainable approach towards industry 4.0”, *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 537-541, (2020). doi:10.1109/ieem45057.2020.9309939
- Abbas, S. R., Kazmi, S. A. A., Naqvi, M., Javed, A., Naqvi, S. R., Ullah, K., Khan, T.-R. ve Shin, D. R., “Impact analysis of large-scale wind farms integration in weak transmission grid from technical perspectives”, *Energies*, 13(20), 5513, (2020). doi:10.3390/en13205513
- Abdelmassih, G., Al-Numay, M. S. ve Aroudi, A. E., “Map optimization fuzzy logic framework in wind turbine site selection with application to the USA wind farms”, *Energies*, 14(19), 6127, (2021). doi:10.3390/en14196127
- Abumwais, A., Amirjanov, A., Uyar, K. ve Eleyat, M., “Performance of gradientbased optimizer for optimum wind cube design”, *Comput. Mater. Continua*, 71(1), 339-353, (2022). doi:10.32604/cmc.2022.021517
- Adekanbi, M., “Optimization and digitization of wind farms using Internet of Things: A review”, *Int. J. Energy Res.*, 45(11), 15832-15838, (2021). doi:10.1002/er.6942
- Adesiyan, A. ve Akinnawo, O. O., “Numerical simulation approaches for verticalaxis wind turbines: Investigating airfoil design and predictive techniques”, *Preprints*, doi:10.20944/preprints202401.1088.v1, (2024).
- Adopted, IPCC, *Climate change 2014 synthesis report*, Geneva: IPCC, 1059-1072, (2014).
- Afridi, S. K., Koondhar, M. A., Jamali, M. I., Alaas, Z., Alsharif, M. H., Kim, M.-K., Mahariq, I., Touti, E., Aoudia, M. ve Ahmed, M. M. R., “Winds of progress: An indepth exploration of offshore, floating, and onshore wind turbines as cornerstones for sustainable energy generation and environmental stewardship”, *IEEE Access*, 12, 66147-66166, (2024). doi:10.1109/access.2024.3397243
- Ahmetoğlu, S. ve Tanık, A., “Management of carbon footprint and determination of GHG emission sources in construction sector”, *Int. J. Environ. Geoinform.*, 7(2), 191-204, (2020). doi:10.30897/ijegeo.726913
- Al-Behadili, S. ve El-Osta, W., “Life cycle assessment of Dernah (Libya) wind farm”, *Renew. Energy*, 83, 1227-1233, (2015).
- Alsaleh, A. ve Sattler, M., “Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US”, *Clean Technol. Environ. Policy*, 21, 887-903, (2019).

- Altuntaş, F. ve Gök, M. Ş., “Technological evolution of wind energy with social network analysis”, *Kybernetes*, 50(5), 1180-1211, (2020). doi:10.1108/k-11-20190761
- Alvani Bomfim de Sousa Júnior, Cavalcante, E. C. F., Cardoso, K. D. S., Lemos, M. C. A., Borges, R. G. A. ve Conceição, J. S., “The development of wind energy in Brazil: Advances, challenges and impacts of wind farms in the national context and future prospects”, *J. Eng. Res.*, 4(25), 1-11, (2024). doi:10.22533/at.ed.31742524211010
- Annura, S., Arabikum, J., Aminingrum, R., Ulu, Z., Wahyudi, D. ve Zuhriyah, L., “Efficient and sustainable energy management for hospital building”, *J. Community Health Prev. Med.*, 2(2), 1-9, (2022). doi:10.21776/ub.jochapm.2022.002.02.1
- Apata, O. ve Mavende, T., “An overview of power loss estimation in wind turbines due to icing”, *IntechOpen*, doi:10.5772/intechopen.112677, (2023).
- Arvesen, A. ve Hertwich, E. G., “Environmental implications of large-scale adoption of wind power: A scenario-based life cycle assessment”, *Environ. Res. Lett.*, 6(4), (2011). doi:10.1088/1748-9326/6/4/045102
- Aslan, S., Tekin, S. A. ve Emir, R., “Gravity energy storage technologies: A review of the solid gravity energy storage applications”, *Energy Environ. Storage*, 4(2), 6670, (2024). doi:10.52924/ckex2410
- Atalan, Y. A., Tayanç, M., Erkan, K. ve Atalan, A., “Development of nonlinear optimization models for wind power plants using Box-Behnken design of experiment: A case study for Turkey”, *Sustainability*, 12(15), 6017, (2020). doi:10.3390/su12156017
- Batu, T., Lemu, H. G., Negash, B., Beyene, E., Tirfe, D., Hailemichael, E. ve Alemneh, S., “Optimal airfoil selection for small horizontal axis wind turbine blades: A multi-criteria approach”, *Adv. Mech. Mater. Eng.*, 41, 57-68, (2024). doi:10.7862/rm.2024.6
- Bazionis, I. K. ve Georgilakis, P. S., “Review of deterministic and probabilistic wind power forecasting: Models, methods, and future research”, *Electricity*, 2(1), 13-47, (2021). doi:10.3390/electricity2010002
- Belu, R., “Assessment and analysis of offshore wind energy potential”, *IntechOpen*, doi:10.5772/intechopen.95346, (2022).
- Bi, X., Yang, J. ve Yang, S., “LCA-based regional distribution and transference of carbon emissions from wind farms in China”, *Energies*, 15(1), (2022). doi:10.3390/en15010198
- Bianchini, A., “The science of making torque from wind 2024 (TORQUE 2024)”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2767(1), 011001, (2024). doi:10.1088/1742-6596/2767/1/011001
- Bonou, A., Laurent, A. ve Olsen, S. I., “Life cycle assessment of onshore and

offshore wind energy - from theory to application”, *Appl. Energy*, 180, 327-337, (2016). doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.058

Bošnjaković, M., Katinić, M., Šanta, R. ve Marić, D., “Wind turbine technology trends”, *Appl. Sci.*, 12(17), 8653, (2022). doi:10.3390/app12178653

Brahimi, T. ve Paraschivoiu, I., “Aerodynamic analysis and performance prediction of VAWT and HAWT using CARDAAV and Qblade computer codes”, *IntechOpen*, doi:10.5772/intechopen.96343, (2022).

Cai, D., Liu, X. ve Xu, D., “Complete operational voltage assessment of Shandong pilot offshore wind project”, *Eng. Rep.*, 5(1), (2022). doi:10.1002/eng2.12553

Castilla, D. G., Durano, K. D., Megabon, M. C., Villanueva, A. A. ve Yuson, S. J. B., “Analytical hierarchal process of environmental ethics decision making for environmental sustainability”, *Int. J. Sci. Res. Arch.*, 12(1), 2081-2091, (2024). doi:10.30574/ijsra.2024.12.1.0982

Cetinkaya, M., “Farmer approaches to the impact of wind power plants on crop farming in Kirsehir province”, *Yüksek Lisans Tezi*, (2017).

Chambert, T., Duriez, O. ve Besnard, A., “Methodological approaches to assessing population-level impacts of bird collisions with wind turbines: A critical perspective”, *Environ. Conserv.*, 51(1), 1-5, (2023). doi:10.1017/s0376892923000346

Cheng, Y. ve Liang, H., “Calculation and evaluation of industrial carbon footprint of cotton denim jacket”, *J. Eng. Fibers Fabrics*, 16, (2021). doi:10.1177/15589250211020387

Custodio, M. W. B., Rodriguez, W. J. M., Andrade-Girón, D., Ayala, A. C. N., Sánchez, J., Muñoz-Vilela, A. J., Santiago Ernesto Ramos y Yovera, Díaz, Á. H. C. ve Díaz-Roncero, E., “Energy efficiency management according to ISO 50001: A case study in the brick industry”, *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, 10, (2023). doi:10.4108/ew.3560

Çelik, İ., Yıldız, C. ve Şekkel, M., “Wind power plant layout optimization using particle swarm optimization”, *Turkish J. Eng.*, 5(2), 89-94, (2021). doi:10.31127/tuje.698856

Dağtekin, M. ve Yelmen, B., “Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey: A case study for Mersin Province”, *Eur. Mech. Sci.*, 6(4), 269-277, (2022). doi:10.26701/ems.1174354

Dai, J., Yang, X., Yang, W., Gao, G. ve Li, M., “Further study on the effects of wind turbine yaw operation for aiding active wake management”, *Appl. Sci.*, 10(6), 1978, (2020). doi:10.3390/app10061978

- Dami, M. A., Jemli, K., Jemli, M. ve Gossa, M., “Doubly fed induction generator, with crow-bar system, under micro-interruptions fault”, *J. Renew. Energies*, 13(4), (2023). doi:10.54966/jreen.v13i4.231
- Dammeier, L. C., Bosmans, J. ve Huijbregts, M. A. J., “Variability in greenhouse gas footprints of the global wind farm fleet”, *J. Ind. Ecol.*, 27(1), 272-282, (2022). doi:10.1111/jiec.13325
- Dardabi, C., Djebli, A., Chojaa, H., Aziz, H., Mouradi, A., Mossa, M. A., Abdelaziz, A. Y. ve Alghamdi, T. A. H., “Enhancing the control of doubly fed induction generators using artificial neural networks in the presence of real wind profiles”, *PLoS One*, 19(4), e0300527, (2024). doi:10.1371/journal.pone.0300527
- Das, U. ve Nandi, C., “Life cycle assessment on onshore wind farm: An evaluation of wind generators in India”, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 53, (2022). doi:10.1016/j.seta.2022.102647
- De-bin, C., Cheng, B., Li, D., Li, Z., Zhao, T. ve Zhang, J., “Design and development of wind turbine performance analysis system modeling”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2179(1), 012025, (2022). doi:10.1088/1742-6596/2179/1/012025
- Desalegn, B., Gebeyehu, D. ve Tamrat, B., “Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: A review”, *Heliyon*, 8(11), e11263, (2022). doi:10.1016/j.heliyon.2022.e11263
- Ding, Y., Barber, S. ve Hammer, F., “Data-driven wind turbine performance assessment and quantification using SCADA data and field measurements”, *Front. Energy Res.*, 10, (2022). doi:10.3389/fenrg.2022.1050342
- Domínguez, R., Carrión, M. ve Oggioni, G., “Planning and operating a renewable dominated European power system under uncertainty”, *Appl. Energy*, 258, 113989, (2020). doi:10.1016/j.apenergy.2019.113989
- Dong, J. H., Zhu, W. G., Gao, C. K. ve Tang, H. M., “Contrastive analysis between wind power generation and coal generation on the environmental impact assessment”, *Appl. Mech. Mater.*, 316, 254-258, (2013).
- Edwin, E. B., Lyngdoh, D. B. ve Thanka, M. R., “Wind power plant forecasting and power prediction methods using machine learning algorithms”, *Int. J.*, 10(2), (2021).
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. ve Tanabe, K., *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, Geneva: IPCC, (2006).
- Ehtasham, L., Sherani, S. H., Younas, K., Izbek, U., Khan, A. H., Bahadur, A. ve Akbar, A., “A review of the status of environmental impact assessment in Pakistan”, *Integr. Environ. Assess. Manag.*, 18(2), 314-318, (2021). doi:10.1002/ieam.4499

Ekinci, F. ve Mert, M. E., “Turkey’s green economy initiative: An experimental evaluation of hydrogen energy”, *Çukurova Üniv. Müh. Fak. Derg.*, 38(2), 463-471, (2023). doi:10.21605/cukurovaumfd.1334069

Elfarra, M. ve Kaya, M., “Comparison of optimum spline-based probability density functions to parametric distributions for the wind speed data in terms of annual energy production”, *Energies*, 11(11), 3190, (2018). doi:10.3390/en11113190

Enerji Atlası, “Enerji atlası” [online], (1 Nisan 2019), Web adresi: <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-tuketimi/>, (2019).

Escrivá-Escrivà, G., Dasí-Crespo, D., Segarra-Balaguer, M., Quiles-Cucarella, E., Blay, C. R. ve Porta, C. R., “Development of the Energy Hub GEDERlab at Universitat Politècnica de València for encouraging the integration of renewable energy resources”, *Renew. Energy Power Qual. J.*, 85-90, (2024). doi:10.52152/3931

Eyüboğlu, Ö., Eyüboğlu, G. ve Eyüboğlu, H., “An example of wind energy applications: Türkiye (Kırşehir province, Geycek wind power plant)”, *J. Eng. Technol. Project*, 13(3), (2023). doi:10.7176/jetp/13-3-06

Fang, Y., Wang, Y., Liu, C. ve Cai, G., “Modified approach of manufacturer’s power curve based on improved bins and K-means++ clustering”, *Sensors*, 22(21), 8133, (2022). doi:10.3390/s22218133

Firoozi, A. A., Hejazi, F. ve Firoozi, A. A., “Advancing wind energy efficiency: A systematic review of aerodynamic optimization in wind turbine blade design”, *Energies*, 17(12), 2919, (2024). doi:10.3390/en17122919

Fonseca, L. F. S. ve Carvalho, M., “Greenhouse gas and energy payback times for a wind turbine installed in the Brazilian Northeast”, *Front. Sustain.*, 3, (2022). doi:10.3389/frsus.2022.1060130

Froidevaux, J. S., Viol, I. L., Barré, K., Bas, Y. ve Kerbirou, C., “Coupling renewable energy infrastructure planning and biodiversity conservation: A modelingbased framework”, *bioRxiv*, doi:10.1101/2024.08.30.610451, (2024).

Fuchs, H., Therkelsen, P., Miller, W. C., Siciliano, G. ve Sheaffer, P., “ISO 50001based energy management systems as a practical path for decarbonization: Initial findings from a survey of technical assistance cohort participants”, *Energies*, 16(14), 5441, (2023). doi:10.3390/en16145441

Ganegodage, L. H., Waidyasekara, K. G. A. S. ve Mallawaarachchi, H., “Assessing the carbon emission reduction by grid-tied photovoltaic (PV) technology for buildings in Sri Lanka”, *World Construction Symposium*, 122-133, (2021). doi:10.31705/wcs.2021.11

Görel, G. ve Abdi, M. O., “Advanced pitch angle control based on genetic algorithm and particle swarm optimisation on FAST turbine systems”, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 29(4), 11-18, (2023). doi:10.5755/j02.eie.34205

Gubanov, M. M., Morkovkin, D., Gibadullin, A., Dontsova, O. I., Gavel, O. Y. ve Sadridinov, M. I., “Analysis of foreign experience in implementing state policies to ensure energy supply to remote areas”, *E3S Web Conf.*, 209, 05003, (2020). doi:10.1051/e3sconf/202020905003

Gul, S., Dharejo, N. ve Nisa, N. U., “Measuring the influence of environmental sustainability practices on the carbon footprint of organizations: A quantitative analysis”, *J. Econ. Impact*, 5(3), 279-286, (2023). doi:10.52223/econimpact.2023.5313

Guo, M.-X., Cai, W.-J., Wang, C. ve Chen, J.-N., “Quantifying CO₂ emissions of one wind farm using life cycle assessment and uncertainty analysis”, *China Environ. Sci.*, 32(4), 742-747, (2012).

Guo, R., Li, W., Zhang, X. ve Feng, J., “Fatigue life analysis of wind turbine tower based on finite element analysis”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2417(1), 012013, (2022). doi:10.1088/1742-6596/2417/1/012013

Gupta, A., Bortolotti, P. ve Summerville, B., “NREL 15-kW: An advanced horizontal-axis reference turbine for distributed wind”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2767(7), 072024, (2024). doi:10.1088/1742-6596/2767/7/072024

Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A. ve Stadel, A., “Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review”, *Cem. Concr. Compos.*, 51, 38-48, (2014).

Haapala, K. R. ve Prempreeda, P., “Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines”, *Int. J. Sustain. Manuf.*, 3(2), 170-185, (2014).

Haces-Fernandez, F., “GoWInD: Wind energy spatiotemporal assessment and characterization of end-of-life activities”, *Energies*, 13(22), 6015, (2020). doi:10.3390/en13226015

Hall, C. A., Balogh, S. ve Murphy, D. J., “What is the minimum EROI that a sustainable society must have?”, *Energies*, 2(1), 25-47, (2009).

Hao, Y., Liang, J., Wang, K., Wu, G., Joseph, T. ve Sun, R., “Influence of active power output and control parameters of full-converter wind farms on subsynchronous oscillation characteristics in weak grids”, *Energies*, 13(19), 5225, (2020). doi:10.3390/en13195225

Harusi, N. M. R., Zakaria, R., Aly, S. H. ve Andry, A. D. Z., “Analysis of carbon footprint in Faculty of Mathematics and Natural Sciences (MIPA), University of Hasanuddin”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 1272(1), 012038, (2023). doi:10.1088/1755-1315/1272/1/012038

Hashim, T. T. ve Kalem, Ş., “Using a stand-alone wind energy conversion system as a sustainable technology to produce electricity in Iraq”, *Rafidain J. Eng. Sci.*, 2(1), 274-301, (2024). doi:10.61268/mqayrh16

Heazell, A., Spil, N. A., Nieuwenhuizen, K. E. V., Rowe, R., Thornton, J., Murphy, E. J., Verheijen, E. ve Shelton, C., “The carbon footprint of different modes of birth in the UK and the Netherlands: An exploratory study using life cycle assessment”, *Authorea Preprints*, doi:10.22541/au.168969540.03699288/v1, (2023).

IEA, *World energy investment 2023 – Datafile 2* [online], Web adresi: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energyinvestment-2023-datafile-2>, (2023).

International Organization for Standardization, *Environmental management: Life cycle assessment; Principles and framework*, ISO 14040, Geneva: ISO, (2006).

International Organization for Standardization, *Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*, ISO 14067, Geneva: ISO, (2018).

Ibrahim, M., Shaltout, M. L. ve Kassem, S. A., “Extremum-seeking control for energy-harvesting enhancement of wind turbines with hydromechanical drivetrains”, *Wind Energy*, 23(11), 2113-2135, (2020). doi:10.1002/we.2548

Ji, S. ve Chen, B., “Carbon footprint accounting of a typical wind farm in China”, *Appl. Energy*, 180, 416-423, (2016).

Jia, Y., Wang, J., Han, Z., Pang, Y. ve An, P., “Analysis on environmental load of wind, PV and coal-fired power generation based on life cycle assessment”, *J. Chin. Soc. Power Eng.*, 36(12), 1000-1009, (2016).

Jureczko, M. ve Mrówka, M., “Multiobjective optimization of composite wind turbine blade”, *Materials*, 15(13), 4649, (2022). doi:10.3390/ma15134649

Kalmi, P., Trotta, G. ve Kažukauskas, A., “Energy-related financial literacy and electricity consumption: Survey-based evidence from Finland”, *J. Consum. Aff.*, 55(3), 1062-1089, (2021). doi:10.1111/joca.12395

Kamau, J. N., “Efficiency of renewable energy sources in reducing carbon footprint in developing countries”, *Int. J. Environ. Sci.*, 7(2), 1-12, (2024). doi:10.47604/ijes.2637

Karpan, B., Raman, A. A. A., Rahim, R., Aroua, K. T. ve Buthiyappan, A., “Carbon footprint evaluation of hazardous waste based solid fuel: Application in a cement kiln”, *Research Square Preprints*, doi:10.21203/rs.3.rs-553149/v1, (2021).

Karthick, K., Aruna, S., Shanmugasundaram, R., Safran, M., Alfarhood, S. ve AlRajhi, W., “Enhancing sustainable urban energy management through short-term wind power forecasting using LSTM neural network”, *Sustainability*, 15(18), 13424, (2023). doi:10.3390/su151813424

Kasner, R., Kruszelnicka, W., Bałdowska-Witos, P., Flizikowski, J. ve Tomporowski, A., “Sustainable wind power plant modernization”, *Energies*, 13(6),

1461, (2020). doi:10.3390/en13061461

Kerem, A., “Investigation of carbon footprint effect of renewable power plants regarding energy production: A case study of a city in Turkey”, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 72(3), 294-307, (2022).

Khoie, R., Bose, A. ve Saltsman, J., “A study of carbon emissions and energy consumption of wind power generation in the Panhandle of Texas”, *Clean Technol. Environ. Policy*, 23(2), 653-667, (2021). doi:10.1007/s10098-020-01994-w

Klongboonjit, S. ve Kiatcharoenpol, T., “Quality evaluation of wind energy data with complete linkage clustering”, *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, 15(6), 456-464, (2022). doi:10.22266/ijies2022.1231.41

Koay, Y. Y., Tan, J., Koh, S. P., Hen, C. K., Tiong, S. K. ve Ekanayake, J., “Optimization of wind energy conversion systems – An artificial intelligent approach”, *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, 11(2), 1040-1046, (2020). doi:10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1040-1046

Koskei, W. K., Murage, D. K. ve Kang’ethe, S. M., “Analysis of the voltage stability of power system with large wind power integration”, *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol.*, 5(5), 52-58, (2021). doi:10.47001/irjiet/2021.505009

Kowalska, A., Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A. ve Czerski, K., “Investment advantages of the dual fluid reactor based on the EROI (energy returned on invested) analysis”, *SGEM Conf. Proc.*, 18(4.1), 25-30, (2018). doi:10.5593/sgem2018/4.1/S16.004

Köse, F. ve Köse, S., “Assessment of wind energy potential and current usage status in Turkey and in the world”, *Acad. Platform J. Eng. Smart Syst.*, 10(3), 140-148, (2022). doi:10.21541/apjess.1035793

Kubiszewski, I., Cleveland, C. J. ve Endres, P. K., “Meta-analysis of net energy return for wind power systems”, *Renew. Energy*, 35(1), 218-225, (2010).

Kulaç, O. ve Öztepe, M. C., “The renewable energy policy of Turkey under the impact of the European Union”, *Süleyman Demirel Üniv. Vizyoner Derg.*, 11(28), 886-897, (2020). doi:10.21076/vizyoner.693835

Kumar, R., Khetrpal, P., Badoni, M. ve Diwania, S., “Evaluating the relative operational performance of wind power plants in Indian electricity generation sector using two-stage model”, *Energy Environ.*, 33(7), 1441-1464, (2021). doi:10.1177/0958305x211043531

Kurbatova, T., Sotnyk, I. M., Prokopenko, O., Bashynska, I. ve Pysmenna, U., “Improving the feed-in tariff policy for renewable energy promotion in Ukraine’s households”, *Energies*, 16(19), 6773, (2023). doi:10.3390/en16196773

- Lambán, M. P., Morella, P., Sánchez, J. C., Les, A., Royo, J. ve Quero, F., “Development of real-time indicators to assess and improve the energy efficiency of machine tools”, *Adv. Sci. Technol.*, 132, 443-449, (2023). doi:10.4028/p-t2yavi
- Li, L., “Development of wind renewable energy in different regions of China”, *Environ. Resour. Ecol. J.*, 7(7), (2023). doi:10.23977/erej.2023.070704
- Li, L., Ma, W., Duan, X., Wang, S., Wang, Q., Gu, H. ve Wang, J., “Effects of wind farm construction on soil nutrients and vegetation: A case study of Linxiang wind farm in Hunan Province”, *Sustainability*, 16(15), 6350, (2024). doi:10.3390/su16156350
- Li, X., Dao, C. D., Kazemtabrizi, B. ve Crabtree, C., “Optimization of large offshore wind farm layout considering reliability and wake effect”, *ASME Turbo Expo 2020*, GT2020-15495, (2020). doi:10.1115/gt2020-15495
- Liao, C.-H., Ou, H.-H., Shinoda, K. ve Yu, E.-H., “Life cycle energy and environmental analysis of wind power in Taiwan”, *J. Jpn. Inst. Energy*, 89(5), 447455, (2010). doi:10.3775/jie.89.447
- Liu, P., Liu, L., Xu, X., Zhao, Y., Niu, J. ve Zhang, Q., “Carbon footprint and carbon emission intensity of grassland wind farms in Inner Mongolia”, *J. Clean. Prod.*, 313, 127878, (2021).
- Liu, Y., Wu, Z. ve Wang, X., “Research on fault diagnosis of wind turbine based on SCADA data”, *IEEE Access*, 8, 185557-185569, (2020). doi:10.1109/access.2020.3029435
- Loulijat, A., Chojaa, H., Marghichi, M. E., Ettalabi, N., Hilali, A., Mouradi, A., Abdelaziz, A. Y., Elbarbary, Z. M. S. ve Mossa, M. A., “Enhancement of LVRT ability of DFIG wind turbine by an improved protection scheme with a modified advanced nonlinear control loop”, *Processes*, 11(5), 1417, (2023). doi:10.3390/pr11051417
- Lü, Y., Zhong, Q., Wang, S., Liu, L. ve Sun, J., “Topology of wind power DC collection converter based on double bus structure and its power balancing control strategy”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2592(1), 012084, (2023). doi:10.1088/17426596/2592/1/012084
- Ma, K., Zhang, H., Gao, X., Wang, X., Nian, H. ve Fan, W., “Research on evaluation method of wind farm wake energy efficiency loss based on SCADA data analysis”, *Sustainability*, 16(5), 1813, (2024). doi:10.3390/su16051813
- Ma, Y., Duan, H., Li, Q. ve Xie, M., “Benefits of GHGs emission reduction of wind farm based on life cycle assessment”, *J. Shenzhen Univ. Sci. Eng.*, (2020).
- Maren, I. B., Bello, A. A., Dandakouta, H. ve Ejilah, R., “Performance evaluation of some selected wind turbines in Heipang wind speed regime”, *Niger. J. Trop. Eng.*, 16(1), (2022). doi:10.59081/njte.16.1.013

- Martínez, A., Valero, S., Velasco, E. ve Senabre, C., “Energy intensity of the economy as a variable to measure the energy efficiency of a country: Comparison between European member states”, *Renew. Energy Power Qual. J.*, 12(3), (2024). doi:10.24084/repqj12.301
- Ming, X., Jing, X. ve Liu, S., “Reduced order calculation method of subsynchronous oscillation mode of PMSG-based wind farm connected with power grid based on Arnoldi method”, *Sci. Technol. Energy Transit.*, 79, 47, (2024). doi:10.2516/stet/2024041
- Mokhtare, M. H. ve Keysan, O., “Optimal sizing of battery energy storage system for a large-scale offshore wind power plant considering grid code constraints: A Turkish case study”, *IET Renew. Power Gener.*, 18(15), 3067-3076, (2024). doi:10.1049/rpg2.12970
- Morini, A. A., Hotza, D. ve Ribeiro, M. J., “Embodied energy and carbon footprint comparison in wind and photovoltaic power plants”, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 13(2), 457-467, (2022). doi:10.1007/s40095-021-00450-9
- Mou, J., Jia, X., Chen, P. ve Chen, L., “Research on operation safety of offshore wind farms”, *J. Mar. Sci. Eng.*, 9(8), 881, (2021). doi:10.3390/jmse9080881
- Musial, W., Spitsen, P., Duffy, P., Beiter, P., Marquis, M., Hammond, R. ve Shields, M., *Offshore wind market report: 2022 edition*, U.S. Department of Energy, (2022). doi:10.2172/1883382
- Nowroozipour, M., Tabatabaei Kolor, R. ve Motevali, A., “Environmental impact assessment of electricity generation in wind power plants (Case study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh)”, *J. Agric. Mach.*, 13(4), 405-426, (2023). doi:10.22067/jam.2022.76180.1102
- Ntanos, S., Arabatzis, G., Drosos, D., Sparangis, P. ve Lekaj, E., “Wind energy investment in Greece: Case study of an Aegean Island”, *Preprints*, doi:10.20944/preprints202309.1152.v1, (2023).
- Pakenham, B., Ermakova, A. ve Mehmanparast, A., “A review of life extension strategies for offshore wind farms using techno-economic assessments”, *Energies*, 14(7), 1936, (2021). doi:10.3390/en14071936
- Peng, H., Han, Y., Li, Q., Li, H. ve Zhang, R., “Optimization of wind farm design layout based on the non-uniform spacing algorithm between wind turbines”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2564(1), 012037, (2023). doi:10.1088/1742-6596/2564/1/012037
- Phan, D. C., Trinh, T. H. ve Ha, D. T., “Optimal placement of wind turbine in distribution grid to minimize energy loss considering power generation probability”, *Bull. Electr. Eng. Inform.*, 13(4), 2251-2259, (2024). doi:10.11591/eei.v13i4.7827
- Pincelli, I. P., Hinkley, J. ve Brent, A. C., “Developing onshore wind farms in Aotearoa New Zealand: Carbon and energy footprints”, *J. R. Soc. N. Z.*, 55(4), 10051027, (2024). doi:10.1080/03036758.2024.2344785

Piotrowska, K., Piasecka, I., Kłos, Z., Marczuk, A. ve Kasner, R., “Assessment of the life cycle of a wind and photovoltaic power plant in the context of sustainable development of energy systems”, *Materials*, 15(21), 7778, (2022). doi:10.3390/ma15217778

Pollini, N., “A two-step topology and layout wind farm optimization approach”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2767(9), 092003, (2024). doi:10.1088/1742-6596/2767/9/092003

Pourasl, H. H. ve Khojastehnezhad, V. M., “Techno-economic analysis of wind energy potential in Kazakhstan”, *Proc. Inst. Mech. Eng. A: J. Power Energy*, 235(6), 1563-1576, (2021). doi:10.1177/09576509211001598

Rajagukguk, A., Arafanaldy, W., Anhar, A. ve Nurhalim, N., “Pitch blade control prototype design for vertical axis wind power plant”, *J. Ilm. Tek. Elektro Komput. Inform.*, 8(1), 157, (2022). doi:10.26555/jiteki.v8i1.23662

Reitz, S., Goshen, L. ve Ohlhorst, D., “Trade-offs in German wind energy expansion: Building bridges between different interests, values and priorities”, *Research Square Preprints*, doi:10.21203/rs.3.rs-1173628/v1, (2021).

Ren, Z., Wang, Z., Liu, Z., Wang, L., Guo, H., Li, L., Li, S., Chen, X., Tang, W. ve Wang, Z. L., “Energy harvesting from breeze wind (0.7–6 m/s) using ultrastretchable triboelectric nanogenerator”, *Adv. Energy Mater.*, 10(36), (2020). doi:10.1002/aenm.202001770

Riaz, M., Farid, H. M. A., Shakeel, H. M. ve Arif, D., “Cost effective indoor HVAC energy efficiency monitoring based on intelligent decision support system under Fermatean fuzzy framework”, *Scientia Iranica*, 0(0), (2022). doi:10.24200/sci.2022.59197.6106

Rudenko, N. ve Ершов, B. B., “The use of green energy for energy conservation in high-rise buildings”, *E3S Web Conf.*, 164, 01023, (2020). doi:10.1051/e3sconf/202016401023

Ruiz, C., Abad, G., Zubiaga, M., Madariaga, D. ve Arza, J., “Wind turbine oriented solutions to improve power quality and harmonic compliance of AC offshore wind power plants”, *IEEE Access*, 9, 167096-167116, (2021). doi:10.1109/access.2021.3136713

Saleem, F. ve Ahmed, T., “Role of ICTs in environmental degradation: A crosscountry analysis”, *Research Square Preprints*, doi:10.21203/rs.3.rs-2298281/v1, (2023).

Saleki, N., Kulaksız, S. B., Arslan, F. Z. ve Güney-Coşkun, M., “The evaluation of menus’ adherence to sustainable nutrition and comparison with sustainable menu example in a Turkish university refectory”, *Nutr. Food Sci.*, 53(8), 1293-1303, (2023). doi:10.1108/nfs-10-2022-0364

- Shang, J. ve Jia, Y., “Hybrid energy storage power allocation strategy for stabilizing wind power fluctuations”, *Int. J. Energy*, 3(2), 26-31, (2023). doi:10.54097/ije.v3i2.007
- Shang, M. ve Luo, J., “The Tapio decoupling principle and key strategies for changing factors of Chinese urban carbon footprint based on cloud computing”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(4), 2101, (2021). doi:10.3390/ijerph18042101
- Shin, S.-H., Kim, H., Son, S. W. ve Kang, D. J., “Visualizing the atmospheric wind flow animation and optimizing air flow data in digital twin based environmental impact assessments”, *Preprints*, doi:10.20944/preprints202402.1710.v1, (2024).
- Shinagam, R., Ajay, G., Patta, L. ve Gandam, A. S., “Vibration and noise studies on wind turbine generator for reduction of vibrations and noise”, *World J. Eng.*, 17(1), 134-143, (2020). doi:10.1108/wje-09-2019-0275
- Sobaszek, Ł., Piasecka, I., Flizikowski, J., Tomporowski, A., Sokolovskij, E. ve Bałdowska-Witos, P., “Environmentally oriented analysis of benefits and expenditures in the life cycle of a wind power plant”, *Materials*, 16(2), 538, (2023). doi:10.3390/ma16020538
- Sobczak, M. T., Li, G., Ramanathan, A., Thummalapalli, S. V., Thippanna, V., Chambers, L. B., Theobald, T. G., Sun, H., Nolet, S., Li, K. ve Song, K., “Life cycle analysis of coaxial layered fiber spinning for wind turbine blade recycling”, *ACS Sustain. Resour. Manage.*, 2(5), 721-732, (2025). doi:10.1021/acssusresmg.4c00434
- Song, Y., Wu, S., Wang, Q. ve Li, W., “Research on frequency transmission scheme of wind farm in the scenario of DC islanding”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2355(1), 012057, (2022). doi:10.1088/1742-6596/2355/1/012057
- Sphera, *GaBi software and database 10.7*, Leinfelden-Echterdingen, Germany: Sphera Solutions GmbH, (2022). Web adresi: <https://www.gabi-software.com>
- Stanley, A. P. J., Bay, C. J. ve Fleming, P., “Enabling control co-design of the next generation of wind power plants”, *Wind Energy Sci.*, 8(8), 1341-1350, (2023). doi:10.5194/wes-8-1341-2023
- Suparwoko, W. ve Qamar, F. A., “The constraint of the eco-friendly rooftop PV system implementation based on the techno-economic and regulatory impact analysis: Case study of the Ontowiryo Mosque in Purworejo, Central Java, Indonesia”, *Research Square Preprints*, doi:10.21203/rs.3.rs-265719/v1, (2021).
- Şeneren, M. ve Yiğit, M. G., “The carbon footprint reduction related to domestic heating using thermal power plant waste heat”, *Int. J. Environ. Climate Change*, 13(7), 716-723, (2023). doi:10.9734/ijecc/2023/v13i71924
- Tang, J. ve Wang, S., “Design scheme and assessment of a 95 MW wind power plant: A case study”, *Proc. SPIE*, 42, (2022). doi:10.1117/12.2660532

- Tang, J., Xiao, X., Han, M., Shan, R., Gu, D., Hu, T., Li, G., Rao, P., Zhang, N. ve Lu, J., “China’s sustainable energy transition path to low-carbon renewable infrastructure manufacturing under green trade barriers”, *Sustainability*, 16(8), 3387, (2024). doi:10.3390/su16083387
- Tantawat, W., Phdungsilp, A. ve Vorarat, S., “Energy return on energy and carbon investment of wind energy farms in Thailand”, *GMSARN Int. J.*, 17(4), 396-405, (2023).
- Taşkın, E., Yılmaz, M. ve Kılıç, Ç., “Rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik etkileri ve sosyal kabul: Mucur örneği”, *Coğrafi Bilimler Derg.*, 18(2), 296-319, (2020). doi:10.33688/aucbd.784601
- Tefera, M. ve Ture, K., “Wind resource potential assessment and implication for climate change mitigation: The case of Bale Zone, South Eastern Ethiopia”, *J. Eng. Technol. Project*, 11(1), (2021). doi:10.7176/jetp/11-1-01
- Thinkstep, *GaBi LCA database documentation*, Leinfelden-Echterdingen: Thinkstep AG, (2019).
- Trevisi, F., Croce, A. ve Riboldi, C. E. D., “Flight stability of rigid wing airborne wind energy systems”, *Energies*, 14(22), 7704, (2021). doi:10.3390/en14227704
- Truong, A. V., Huynh, Q. M. ve Võ, H. T., “Design of a MPPT controller for permanent magnet synchronous generator driven wind turbine”, *Sci. Technol. Dev. J. Eng. Technol.*, 2(4), 251-257, (2020). doi:10.32508/stdjet.v2i4.440
- Türkmen, B. A. ve Babuna, F. G., “Life cycle environmental impacts of wind turbines: A path to sustainability with challenges”, *Sustainability*, 16(13), 5365, (2024). doi:10.3390/su16135365
- Tyszer, M. ve Gałaś, S., “Preliminary recognition of state of incorporating climate change impacts and adaptation considerations in SEA and EIA procedures for renewable energy projects”, *E3S Web Conf.*, 154, 07004, (2020). doi:10.1051/e3sconf/202015407004
- Uddin, R., Shaikh, A. J., Khan, H. R., Shirazi, M. A., Rashid, A. ve Qazi, S. A., “Renewable energy perspectives of Pakistan and Turkey: Current analysis and policy recommendations”, *Sustainability*, 13(6), 3349, (2021). doi:10.3390/su13063349
- Ullah, K., Basit, A., Ullah, Z., Asghar, R., Aslam, S. ve Yafoz, A., “Line overload alleviations in wind energy integrated power systems using automatic generation control”, *Sustainability*, 14(19), 11810, (2022). doi:10.3390/su141911810
- Valentino, L., Valenzuela, V., Botterud, A., Zhou, Z. ve Conzelmann, G., “Systemwide emissions implications of increased wind power penetration”, *Environ. Sci. Technol.*, 46(7), 4200-4206, (2012). doi:10.1021/es2038432
- Veers, P., Dykes, K., Basu, S., Bianchini, A., Clifton, A., Green, P. F., Holttinen, H.,

Kitzing, L., Kosović, B., Lundquist, J. K., Meyers, J., O'Malley, M., Shaw, W. J. ve Straw, B., "Grand challenges: Wind energy research needs for a global energy transition", *Wind Energy Sci.*, 7(6), 2491-2496, (2022). doi:10.5194/wes-7-24912022

Verma, S., Paul, A. R. ve Haque, N., "Selected environmental impact indicators assessment of wind energy in India using a life cycle assessment", *Energies*, 15(11), 3944, (2022).

Villoslada, D., Santos, M. ve Tomás-Rodríguez, M., "General methodology for the identification of reduced dynamic models of barge-type floating wind turbines", *Energies*, 14(13), 3902, (2021). doi:10.3390/en14133902

Wang, K., Yang, X., Zhu, L., Li, J. ve He, W., "Study on life-cycle carbon footprint assessment of substation", *Proc. SPIE*, 31, (2023). doi:10.1117/12.2688314

Wang, L. ve Huang, Y.-H., "Research and application of collector line sizing in wind power field area", *E3S Web Conf.*, 520, 03029, (2024). doi:10.1051/e3sconf/202452003029

Wang, L. ve Zhang, X., "Failure analysis of wind turbine drive system", *Proc. SPIE*, (2023). doi:10.1117/12.2671861

Wang, M., Yu, X. ve Zhao, W., "Systematic characteristics of vertical and horizontal axis wind turbine", *Highlights Sci. Eng. Technol.*, 112, 365-370, (2024). doi:10.54097/8wjx0960

Wang, W. ve Shi, J., "Research on emissions reduction strategy of wind turbine based on life cycle assessment", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 197-210, (2022).

Wang, Y., Wu, Z., Song, X., Duan, H. ve Tan, H., "Calculation and emission reduction effect evaluation model of wind power lifetime carbon emission under carbon neutralization target", *Energy Reports*, 2182-2186, (2022).

Wang, Z., Guo, Y. ve Wang, H., "Research on monitoring and operation and maintenance technology of far-reaching sea smart wind farm", *Preprints*, doi:10.20944/preprints202204.0253.v1, (2022).

Wei, X., Xiang, Y., Li, J. ve Zhang, X., "Self-dispatch of wind-storage integrated system: A deep reinforcement learning approach", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 13(3), 1861-1864, (2022). doi:10.1109/tste.2022.3156426

Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czernski, K., Gottlieb, S. ve Hussein, A., "Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants", *Energy*, 52, 210-221, (2013).

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. ve Weidema, B., "The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology", *Int. J. Life Cycle Assess.*, 21(9), 1218-1230, (2016).

Xie, J.-B., Fu, J.-X., Liu, S.-Y. ve Hwang, W.-S., “Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms”, *J. Clean. Prod.*, 254, 120159, (2020). doi:10.1016/j.jclepro.2020.120159

Yamin, M. ve Giyats, A. F., “Support vector regression approach for wind forecasting”, *Int. J. Adv. Sci. Comput. Eng.*, 4(2), 95-101, (2022). doi:10.62527/ijasce.4.2.84

Yearbook, N. S., *World steel association 2022*, World Steel Association, (2012).

Yılmaz, İ., “A hybrid DEA–fuzzy COPRAS approach to the evaluation of renewable energy: A case of wind farms in Turkey”, *Sustainability*, 15(14), 11267, (2023). doi:10.3390/su151411267

Yousefi, K., Hora, G. S., Yang, H. ve Giometto, M. G., “Data-driven Met-Ocean model for offshore wind energy applications”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2767(5), 052005, (2024). doi:10.1088/1742-6596/2767/5/052005

Zhang, J. ve Xu, L., “Embodied carbon budget accounting system for calculating carbon footprint of large hydropower project”, *J. Clean. Prod.*, 96, 444-451, (2015).

Zhang, J., Zhang, T., Li, Y., Bai, X. ve Chang, L., “Study on mining wind information for identifying potential offshore wind farms using deep learning”, *Front. Energy Res.*, 12, (2024). doi:10.3389/fenrg.2024.1419549

Zhang, X., Liu, Y. ve Cong, Y., “Research on improving the reliability of key components of wind turbine”, *Proc. SPIE*, (2023). doi:10.1117/12.2671285

Zhang, X., Yuan, S. ve Wang, L., “Research on failure and prevention of wind turbine gearbox”, *Proc. SPIE*, 170, (2023). doi:10.1117/12.2689877

Zhao, S.-Y., Su, X., Li, J., Suo, G. ve Meng, X., “Research on wind power project risk management based on structural equation and catastrophe theory”, *Sustainability*, 15(8), 6622, (2023). doi:10.3390/su15086622

Zhou, C., Wang, Z., Ju, P. ve Gan, D., “High-voltage ride through strategy for DFIG considering converter blocking of HVEDIGC system”, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 8(3), 491-498, (2020). doi:10.35833/mpce.2019.000321

Zweiffel, M., Jacobs, G., Song, Z., Weidinger, P., Decker, T., Röder, J. ve Bosse, D., “Influence of drivetrain efficiency determination on the torque control of wind turbines”, *Forsch. Ingenieurwes.*, 87(1), 129-138, (2023). doi:10.1007/s10010-02300630-5

EKLER

9. EKLER

EK A

EK-A. Hesaplama Formülleri ve Örnek Uygulamalar

1. Enerji Yatırımı – Enerji Getirisi Oranı (EROI)

Formül:

$$\text{EROI} = E_{\text{total}} / E_{\text{input}}$$

- E_{total} : Santralin ömrü boyunca ürettiği toplam enerji (kWh veya MWh)
- E_{input} : Santralin üretim, kurulum, işletme-bakım ve söküm aşamalarında harcanan toplam enerji (kWh veya MWh)

Örnek Hesaplama (Geycek RES için):

Ömür boyu enerji üretimi: 510 GWh/yıl \times 21 yıl = 10.710 GWh

Toplam enerji girdisi: 401 GWh

$$\text{EROI} = 10.710 / 401 \approx 26,7$$

2. Karbon Geri Ödeme Süresi (KGÖS)

Formül:

$$\text{KGÖS} = C_{\text{total}} / C_{\text{avoided}}$$

- C_{total} : Santralin yaşam döngüsü boyunca ürettiği toplam karbon emisyonu (ton CO₂)
- C_{avoided} : Yıllık kaçınılan karbon emisyonu (ton CO₂/yıl)

Örnek Hesaplama (Geycek RES için):

Toplam emisyon: 41.975 ton CO₂

Yıllık kaçınılan emisyon: 510.000.000 kWh \times 0,504 kg CO₂/kWh = 257.040 ton CO₂

$$\text{KGÖS} = 41.975 / 257.040 \approx 0,163 \text{ yıl} \approx 2 \text{ ay}$$

3. Toplam Karbon Ayak İzi Hesabı

Formül:

$$C_{\text{total}} = \sum (M_i \times EF_i)$$

- M_i : Kullanılan malzeme/enerji miktarı
- EF_i : İlgili emisyon faktörü

Örnek Hesaplama (Kurulumda kullanılan beton için):

Beton miktarı: 50.400 ton

Emisyon katsayısı: 0,134 tCO₂/ton (Gürsel ve diğ., 2014)

$$C_{\text{beton}} = 50.400 \times 0,134 = 6.754 \text{ ton CO}_2$$

4. Birim Enerji Başına Emisyon (gCO₂eq/kWh)

Formül:

$$I = (C_{\text{total}} \times 10^6) / E_{\text{total}}$$

- I : Birim emisyon (gCO₂eq/kWh)
- C_{total} : Toplam emisyon (ton CO₂)
- E_{total} : Ömür boyu enerji üretimi (kWh)

Örnek Hesaplama (Geycek RES için):

Toplam emisyon: 41.975 ton CO₂ = 41.975.000 kg

Toplam enerji üretimi: 10.710.000.000 kWh

$$I = (41.975.000 / 10.710.000.000) \times 1000 = 3,92 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$$