

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE RÜZGÂR ENERJİ
SANTRALLERİNDE YAŞAM SONU STRATEJİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren DEDE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Bilim Dalı

ŞUBAT 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE RÜZGÂR ENERJİ
SANTRALLERİNDE YAŞAM SONU STRATEJİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren DEDE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN

ŞUBAT 2023

Eren DEDE tarafından hazırlanan “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerji Santrallerinde Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması 03.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK**
Düzce Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerji Santrallerinde Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(03/02/2022).

Eren DEDE

Çok değerli aileme...

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans ve lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Sektörde gerçekleşen gelişmeleri, yenilikleri tartıştığım ve bu konuda bana farklı bakış açısı kazandıran, aynı zamanda paylaştığı verilerle tez çalışmama önemli katkısı olan Dost Enerji Genel Müdür Yardımcısı İsa ALKAN'a teşekkür ederim.

Yine tez çalışması sürecinde önemli katkılarda bulunan Mühendis Mümin RAİF'e ve Polat Enerji'de İşletme ve Bakım Şefi Şevket ADIGÜZEL'e de teşekkür ederim.

Eren Dede

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yeniden Güçlendirme ve Diğer Yaşam Sonu Stratejileri	4
1.2. Literatür Taraması	9
1.3. Yeniden Güçlendirmeye ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerine Etkiyen Unsurlar ve Bu Çalışmalarda Dikkat Edilmesi Gereken Parametreler	13
1.3.1. Ekonomik analiz	18
1.4. Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Potansiyel Etkileri ve Sonuçları	23
2. RÜZGÂR ENERJİSİ ANALİZİ	29
2.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi	29
2.1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisinde Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi	38
2.1.1.1. Almanya	39
2.1.1.2. Danimarka	46
2.1.1.3. İspanya	48
2.1.1.4. Diğer Avrupa ülkeleri	49
2.1.1.5. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)	50
2.1.1.6. Diğer ülkeler	52
2.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi	52
2.2.1. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinde Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi	62
3. ÖRNEK BİR SAHADA YENİDEN GÜÇLENDİRME ANALİZİ	71
3.1. Saha Bilgileri	71
3.2. Materyal ve Yöntem	72
3.3. Çalışmanın Çıktıları	73
3.4. Çıktıların Yorumlanması	78
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	85
EKLER	93
ÖZGEÇMİŞ	97

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AG	: Alçak gerilim
AOSM	: Ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti
BRP	: Borç risk primi
CAPEX	: Yatırım harcamaları (Capital expenses)
DECEX	: Sökme harcamaları (Decommissioning expenses)
EEG	: Alman Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yasası
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ETYS	: Eşdeğer tam yüklenme saati
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
GMY	: Gereken minimum yıl
GÖS	: Geri ödeme süresi
GW/GWh	: Giga Watt / Giga Watt saat
İEKO	: İskonto edilmiş karlılık oranı
İVO	: İç verim oranı
KF	: Kapasite faktörü
KVM	: Kurumlar vergisi maliyeti
KW/KWh	: Kilo Watt / Kilo Watt saat
MW/MWh	: Mega Watt / Mega Watt saat
NBD	: Net bugünkü değer
OG	: Orta gerilim
OPEX	: İşletme harcamaları (Operation expenses)
PPA	: Enerji Satın Alma Anlaşması (Power Purchase Agreement)
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
ROA	: Gerçek opsiyonlar yaklaşımı (Reel Options Approach)
RT	: Rüzgâr türbini
SEM	: Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti

SGRE	: Siemens Gamesa Yenilenebilir Enerji
SÖ	: Standart Ömür
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TFS	: Toplam finansman sermayesi
TL	: Türk lirası
TÜFE	: Tüketici fiyat endeksi
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
ÜFE	: Üretici fiyat endeksi
ÜRP	: Ülke risk primi
YAM	: Yıllık amortisman maliyeti
YBM	: Yıllık bakım maliyeti
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kanunu
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
YES	: Yenilenebilir enerji sistemleri
YEÜ	: Yıllık elektrik üretimi
YFM	: Yıllık finansal maliyet
YG	: Yüksek gerilim
YGF	: Yıllık geri ödeme fiyatı
YİM	: Yıllık işletme maliyeti
YSM	: Yıllık sermaye maliyeti
YTG	: Yıllık toplam gelir
YTM	: Yıllık toplam maliyet

SİMGELER

A	: Rotor kanatlarının süpürdüğü alan [m^2]
b_a	: Borcun ağırlığı
b_m	: Borcun maliyeti
c	: Weibull ölçeği parametresi
e_o	: Enflasyon oranı
f_o	: Faiz oranı
H	: Yeni yükseklik değeri
H_0	: Referans yükseklik değeri
k	: Weibull şekil parametresi
K_p	: Türbin verimi – kapasite faktörü [%]
m	: referans yıl geri ödeme süresi
N_a	: Nakit akışı
$N_{a,u}$: İndirimli Nakit Akışı
$ök_a$: Özkaynak ağırlığı
$ök_m$: Özkaynak maliyeti
P	: Kümülatif olasılık (Probability)
P_{net}	: Bir rüzgâr türbininin ürettiği net güç [KW/MW]
$P_{rüzgar}$: Bir rüzgâr türbininin ürettiği ortalama güç [KW/MW]
p_p	: Piyasa primi
r_o	: Risksiz oran
V, v	: Rüzgâr hızı [m/s]
V_0	: Referans rüzgâr hızı değeri
v_x	: Sabit vergi değeri
a	: Yüzey pürüzlülük sabiti
β_1	: Kaldıraçlı öz sermaye
ρ	: Hava yoğunluğu [kg/m^3]
φ_{el}	: Elektrik spot fiyatı
γ_{amort}	: Amortisman yüzdesi

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Enerji türlerinin yatırım ve birim maliyet karşılaştırması.....	53
Tablo 2.2. Türkiye'de bulunan ve faaliyette olan en yüksek kurulu güce sahip rüzgâr santrallerinin verileri	56
Tablo 2.3. Türkiye'de illere göre rüzgâr santrali potansiyel verileri.	58
Tablo 2.4. Türkiye'de yer alan en eski türbinlerin yaş-güç dağılımı.	67
Tablo 3.1. Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim verileri (v, sabit). 73	
Tablo 3.2. Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim değerleri, sahada kullanılacak türbin adedi, toplam RES üretim değeri ve santral yıllık kazanç verisi (v, sabit).....	74
Tablo 3.3. Çalışmanın asıl çıktı verileri (Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim değerleri, kullanılacak türbin adedi, toplam RES üretim değeri ve santral yıllık kazanç verisi).	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1.** Kara tabanlı rüzgâr projelerinde ortalama türbin göbek (hub) yüksekliği, rotor çapı ve türbin kapasitesi değerlerinin yıllara göre değişimi..... 2
- Şekil 1.2.** Yıllara göre rüzgâr türbini evrimi (güç ve toplam yükseklik bakımından). 2
- Şekil 1.3.** Bir rüzgâr enerji santralının yaşam döngüsü seçenekleri. 5
- Şekil 1.4.** Ömrünün sonuna gelen rüzgâr santralinde izlenebilecek yollar ve oluşan alternatifler. 8
- Şekil 2.1.** Rüzgâr enerjisinde son 7 yılda dünyadaki toplam kümülatif kapasite. 30
- Şekil 2.2.** Rüzgâr enerjisinin son 7 yılda dünyadaki toplam büyüme yüzdesi. 30
- Şekil 2.3.** Rüzgâr enerjisinde öncü ülkelerin son 4 yıldaki rüzgâr kapasite verileri (2021 yılı eklenen rüzgâr gücü, 2021 yılı rüzgâr enerjisi artış yüzdesi ve toplam kapasite). 31
- Şekil 2.4.** Ülkelere göre 2020 yılında rüzgâr enerjisiyle üretilen elektriğin (MWh cinsinden) değerleri..... 32
- Şekil 2.5.** Avrupa’da en eski rüzgâr türbin kurulumlarına sahip 7 ülkedeki rüzgâr santralleri yaş dağılımı 33
- Şekil 2.6.** 2018 verilerine göre Almanya’da bulunan rüzgâr türbinlerinin yaş ve güç dağılımı. 34
- Şekil 2.7.** Yıllara göre İspanya’da ömürlerinin sonuna gelinen veya gelecek olan rüzgâr enerjisi kapasite değerleri. 34
- Şekil 2.8.** Rüzgâr enerjisinde lider ülkelerin 2019 yılındaki kümülatif rüzgâr enerjisi kapasite değerleri ve kapasitelerin yüzde olarak sahip olduğu yaş oranları. 35
- Şekil 2.9.** 2022 verilerine göre tüm dünyadaki kurulu ve kümülatif kapasite değerleri ve gelecek yıllarda Net Zero vizyonunu gerçekleştirmek adına beklenen kapasite miktarları..... 37
- Şekil 2.10.** Almanya’da 2021 yılı rüzgâr enerjisi projelerinin verileri ve toplam kümülatif kapasite değeri. 39
- Şekil 2.11.** Almanya’da 2022 yılı ilk yarısı rüzgâr enerjisi projelerinin verileri ve toplam kümülatif kapasite değeri. 40
- Şekil 2.12.** Almanya’da yıl bazında rüzgâr enerjisi kurulumlarının, hizmetten çıkarılan santrallerin ve yeniden güçlendirilen projelerin kapasiteleri ve yüzde olarak yeniden güçlendirme payı. 41
- Şekil 2.13.** Almanya’da yıllara göre rüzgâr enerjisi kurulumlarının, hizmetten çıkarılan santrallerin, yeniden güçlendirilen projelerin ve toplam kurulu kapasitenin değerleri. 42
- Şekil 2.14.** Almanya’da 2022 yılı ilk yarısı verilerine göre işletimde olan eski sahaların yaşlarının durumu ve sökülen türbinlerin kapasite değerleri. 42

Şekil 2.15. Almanya’da bölge bazında yapılan yeniden güçlendirme, hizmetten çıkarma, yeni santral kurma çalışmalarının ve toplam kurulu kapasitenin verileri.	43
Şekil 2.16. 2021 yılı kurulan rüzgâr türbinlerinin geçtiğimiz yıla göre ortalama olarak teknik parametrelerinin değişimleri.....	43
Şekil 2.17. 2022 yılı ilk yarısına kadar kurulan rüzgâr türbinlerinin geçtiğimiz yıla göre ortalama olarak teknik parametrelerinin değişimleri.....	44
Şekil 2.18. Rhineland-Palatinate’de yapılan yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel.....	44
Şekil 2.19. Altenbruch’taki yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel.....	45
Şekil 2.20. Galmsbüll bölgesinde bulunan bir yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel.....	45
Şekil 2.21. Galmsbüll bölgesinde bulunan bir yeniden güçlendirme çalışmasının öncesi ve sonrası verileri.	46
Şekil 2.22. Danimarka’da yapılan bir yeniden güçlendirme projesinde türbin temelinde olan bir çalışma.....	47
Şekil 2.23. Türkiye’de enerji türlerine göre kurulu güç oranları.	54
Şekil 2.24. Türkiye’de rüzgâr enerjisinin yıllara göre kurulu güçteki payının oransal değişimi.....	54
Şekil 2.25. Türkiye’de 2022 yılı ortasına kadar ortaya çıkan rüzgâr enerjisi verileri	55
Şekil 2.26. Türkiye’nin sahip olduğu rüzgâr enerjisi toplam kurulu kapasitesinin yıllara göre değişimi	55
Şekil 2.27. Türkiye’de 2022 yılında rüzgâr enerjisi üretiminin tüm enerji türlerine göre kullanım yüzdesi.....	56
Şekil 2.28. Türkiye’de kurulu rüzgâr türbinleri markaları ve onlara karşılık gelen kurulu güç değerleri.....	57
Şekil 2.29. Türkiye Rüzgâr Atlası.....	57
Şekil 2.30. EMO’nun güncel döviz kuru üzerinden yaptığı hesaplamaya göre eski ve yeni YEKDEM karşılaştırma şeması.....	60
Şekil 2.31. YEK belgeli üretim tesisleri için güncellemeye esas YEK destekleme mekanizması ile yerli katkı fiyatları ve uygulama süreleri.....	60
Şekil 2.32. Alize Çeşme-Germiyan RES.	63
Şekil 2.33. Alaçatı Ares RES.	64
Şekil 2.34. Bozcaada RES.....	64
Şekil 2.35. Mare Manastır RES.	65
Şekil 2.36. Anemon RES.	66
Şekil 2.37. Burgaz RES.....	66
Şekil 2.38. Dares Datça RES.	67
Şekil 3.1. Yuntdağ RES.	71
Şekil 3.2. Örnek rüzgâr türbinlerine göre türbin enerji üretim verileri.....	76
Şekil 3.3. Örnek rüzgâr türbinlerine göre sahada kullanılacak türbin adetleri.	77
Şekil 3.4. Örnek rüzgâr türbinlerine göre RES’te toplam üretilen enerji değerleri. ..	77
Şekil 3.5. Örnek rüzgâr türbinlerine göre yıllık bazda elde edilecek kazanç değerleri.	78

DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNDE YAŞAM SONU STRATEJİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Tüm dünyada yenilenebilir enerji üzerine olan yatırımlar her geçen gün hızla artmaktadır ve genel olarak yenilenebilir kaynakların kullanımı günümüzde pek çok ülkede yaygın hale gelmiştir. Özellikle bu yenilenebilir enerji sistemlerinden rüzgâr enerjisi üzerine olan girişimler ve projeler, Türkiye’nin de arasında yer aldığı gelişmekte olan ülkeler ve gelişmiş ülkelerin yenilenebilir enerji yatırımlarında oldukça ciddi bir pay sahibi olmuştur. Zira güncel verilere dayanarak Dünyadaki elektrik üretimlerinin yaklaşık %7-8’i rüzgâr enerjisinden sağlanmaktadır ki bu değer her geçen yıl daha da artmaktadır.

İlk olarak 1990’lı yıllarda Danimarka, Almanya ve ABD’nin proje ve yatırımlarına başladığı rüzgâr enerjisine olan yatırımlar diğer ülkelerde de zamanla ciddi bir şekilde yapılmaktadır. Ancak ilk kurulumundan uzun süreler sonra türbinlerin verimlerinde meydana gelen düşüşlerden veya bazı idari ve proje kaynaklı sorunlardan dolayı santral ömürleri sonlarına gelmektedir. Zira bu süre standart olarak bir rüzgâr santralının teknik faydalı ömrü olan 20-25 yıldır. Dolayısıyla bir santralin faydalı ömrünün sonuna gelindiğinde yatırımcıların bundan sonra işleyecekleri politikalar oldukça önem arz etmektedir. Literatürde bu aşamada meydana gelebilecek birden fazla yaşam sonu değerlendirme uygulaması vardır ve küresel tecrübelerle bakıldığında yaşam sonu değerlendirmelerinden yeniden güçlendirme çalışmaları en yaygın olan yöntemler olarak dikkat çekmektedir. Dünyada en çok uygulanmış olması dolayısıyla bu çalışmada yaşam sonu stratejilerinden yeniden güçlendirme üzerine daha çok durulmuştur.

Literatürde “Repowering on Wind Farms; Rüzgâr Santralinde Yeniden Güçlendirme” olarak tanımlanan bu kavram bütünü, bir rüzgâr enerji santralinde mevcut rüzgâr türbinlerinin demonte edilmesi ve bu demonte edilen eski türbinlerin yerlerine veya yakınlarına yeni nesil büyük güçte türbinlerin kurulması anlamına gelmektedir. Dünyada bu alanda yapılan çalışmalar ilk olarak rüzgâr enerjisinde öncü olan Danimarka ve Almanya’da başlamışken gün geçtikçe eskiyen rüzgâr santrallerinin sayısının artmasıyla yeniden güçlendirme pek çok ülkede uygulamalarına başlanan bir yöntem haline gelmektedir. Türkiye açısından da standart ömrünün sonuna gelen rüzgâr enerji santrallerinin yavaş yavaş artacak olmasıyla bu alanda yakın gelecekte çalışmalara başlanacağı öngörülmektedir.

Şimdiye dek yapılan işlerden ve uygulamalardan elde edilen verilere göre yeniden güçlendirme yönteminin oldukça fazla olumlu yanı vardır. Yine de bazı proje sahipleri ve yatırımcılar yeniden güçlendirme ile ortaya çıkacak bu pozitif etkilerin fazla olabilme durumuna rağmen farklı yaşam sonu değerlendirme yöntemlerini uygulamaktadırlar veya yeni santral kurma teşebbüsünde bulunmaktadırlar. Ancak sektör tecrübelerine göre belli koşullar altında proje sahiplerinin yeni santral kurmak

yerine mevcut sahalarda bir yaşam sonu değerlendirmesiyle yeniden güçlendirme yapımları daha tercih edilebilir konumdadır. Bu çalışmaların her ne kadar çok fazla artıları olsa da elbette ki bazı dezavantajları veya olumsuz etkileri de bulunmaktadır.

Bu çalışmada rüzgâr enerjisi sistemlerinde yeniden güçlendirmenin ve diğer yaşam sonu senaryolarının nasıl yöntemler oldukları, uygulamalarında dikkat edilmesi gereken kriterlerin, bu çalışmalara etkiyen unsurların ve bu çalışmaların ortaya çıkaracakları etki ve sonuçların neler olduğu açıklanmaktadır. Buna ilaveten, tüm dünyada bu alanda yapılan çalışmaların incelenmesi yanı sıra aynı zamanda Türkiye'nin potansiyel yeniden güçlendirme ve diğer yaşam sonu stratejilerinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu bağlamda Türkiye'de yer alan örnek bir saha üzerinden olası bir yeniden güçlendirmenin oluşturabileceği potansiyel sonuçlar irdelenmektedir. Temel olarak bu çalışma sonunda ortaya çıkan sonuçlar umumiyetle pozitif çıksa da bu hususta değerlendirilecek pek çok unsurun olduğu vurgulanmış ve analizleri yapılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda yeniden güçlendirme ve diğer yaşam sonu senaryolarına etki eden en önemli teknik ve idari unsurlar belirlenmiştir. Bunlar; sahanın mevcut durumu, eski türbinlerin servis ve bakım sözleşmesinin kalan geçerlilik süresi, mevcut türbinlerin her birinin kapasite faktöründeki yıllara göre değişim oranı, devletin bu uygulamalara yönelik çıkaracağı mevzuat ve yönetmelikler, yine devletin yatırımcıya uygulayacağı teşvik mekanizmasının durumu ve ek sübvansiyonların olup olmayacağı vb. olmak üzere ifade edilmektedir.

Ek olarak bu çalışmada en belirleyici mali etkenlerin ise mevcut türbinlerin satılması veya geri dönüştürülmesi hususu için piyasa pazarının durumu, yeni türbinlerin maliyetleri, elektrik piyasa fiyatlarının seviyesi, yeniden güçlendirme için yatırım maliyetleri ve ömür uzatma için işletme maliyetleri olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın çıktısı olarak, büyük güçte yeni nesil örnek türbin modelleri kullanımıyla beraber, santral kurulu gücü korunsa dahi tam yeniden güçlendirmeyle birlikte elektrik üretiminde ciddi miktarlarda artış söz konusu olmaktadır. Bununla beraber elbette yıllık finansal getirinin de oldukça arttığını söylemek mümkün olmuştur.

Son olarak bu tez çalışmasında gelecek çalışmalara da önerilerde bulunulmuştur. Ayrıca bu tez henüz Türkiye'de bu alanda herhangi bir çalışmanın yürütülmemiş olmasından dolayı gelecekte Türkiye'de yapılacak çalışmalara öncü olacak niteliktedir.

EVALUATION OF END OF LIFE STRATEGIES IN WIND POWER PLANTS IN THE WORLD AND IN TURKEY

SUMMARY

Renewable energy systems are one of the most important energy systems in which many countries around the world create their energy investment strategies and plans. Renewable energy systems have become very important on the planet in a short time due to the multiple positive effects they have created. It should also be noted that in order to overcome the energy crisis that has been experienced all over the world recently, especially this energy crisis that has increased tremendously as a result of the Russia-Ukraine war, the states have taken very fast and big steps to reduce fossil fuel consumption and increase the use of green energy. Therefore, studies on renewable energy are increasing day by day.

The types of renewable energy that countries naturally benefit from the most in line with their geography, underground wealth and resources are changing. However, it should be noted that the most widely used renewable energy sources all over the world are; water (hydroelectric), wind, solar, biomass and geothermal. In particular, wind energy systems are among the most used energy systems in renewable energy systems investments in the world in this direction. Wind energy systems are one of the important factors that determine the energy investment strategies of countries at this point. As a matter of fact, Turkey has been increasing its investments in this field, especially in the last 10 years, and it is expected to increase for the future.

Thousands of wind turbines have been installed and put into operation in the last 30-35 years all over the world on Wind Energy Systems. Since then, wind turbines used in this field have changed with the developing technology. Small sized wind turbines with a nominal power of 200-300 kW used in the first installations in the past have been replaced by huge turbines with a nominal power of 7000-8000 kW these days. These developments in a short time show how important the wind energy sector is.

It should also be known that a wind turbine has a useful life of about 20 years, but this period can be up to 25 years with some development and regulation studies. In fact, with the new turbine technologies produced in line with new research, this period may extend up to 30-35 years. Technically, this time depends on component design margins, wind farm location, meteorological conditions, maintenance record and etc. However, industry experience in general shows that the useful life of a wind turbine is 20-25 years as standard.

As a result of the studies and projects in this field, it has been observed that, like every technology, these systems are also subject to aging over time, and besides, there is a decrease in parameters such as efficiency and usability over time. Because it is claimed that with each passing year, the average load factors and annual energy production of wind turbines decrease by 1-2%. In addition, as turbines age and turbines require more

maintenance, turbine downtime increases. Thus, operating costs increase over time. All these explanations and this rapid development of wind energy systems in general reveal that turbines will become technologically obsolete before they even reach half of their useful life.

In line with these problems and situations, when the age of the power plant increases and its operational life comes to an end, the project and property owners have to go to some new searches. In this context, three main options appear before them. The first is decommissioning, which is to remove infrastructure and reinstate land. The second is the extending of the life span of a wind power plant, without changing its physical characteristics (without increasing the amount of energy production), but with some changes, which increases the current planning time. And finally, the third option is repowering, which is applied to replace existing aging turbines with new, more efficient and generally larger turbines, by increasing or keeping production capacity at the same level.

As stated, there are multiple applications that may occur at this stage, but when global experiences are taken into account, repowering studies are the most common methods among end-of-life assessments. Since it is the most applied in the world, this study focuses more on repowering, one of the end-of-life strategies.

This concept, which is defined as "Repowering in a Wind Power Plant" in the literature, means disassembling the existing wind turbines in a wind power plant and installing new generation high-power turbines in the places or close to these disassembled old turbines. While studies in this field in the world first started in Denmark and Germany, which are pioneers in wind energy, repowering is becoming a method that has been started to be applied in many countries with the increase in the number of wind power plants that are getting old day by day. In terms of Turkey, it is foreseen that the wind power plants, which are coming to the end of their standard life, will gradually increase and work in this area will begin in the near future.

According to the data obtained from the works and applications done so far, the repowering method has many positive aspects. Nevertheless, some project owners and investors apply different end-of-life evaluation methods or attempt to build new power plants, despite the fact that these positive effects that will emerge with repowering may be high. However, according to industry experience, under certain conditions, it is more preferable for project owners to retrofit (extend the life of the wind farm by upgrading some components) their existing sites with an end-of-life assessment instead of building a new power plant. Although these studies have many advantages, there are of course also some disadvantages or negative factors.

In this study, it is explained how repowering and other end-of-life scenarios in wind energy systems are methods, the criteria to be considered in their applications, the factors affecting these studies and the effects and results of these studies. In addition to this, besides examining the studies done all over the world in this field, it also evaluates Turkey's potential repowering and other end-of-life strategies. In this context, the potential consequences of a possible repowering over an exemplary site in Turkey are examined. Basically, although the results obtained at the end of this study are generally positive, it has been emphasized that there are many factors to be evaluated in this regard and their analyzes have been made.

As a result of this thesis, the most important technical and administrative factors affecting repowering and other end-of-life scenarios were evaluated. These; the current status of the field, the remaining validity period of the service and maintenance contract of the old turbines, the rate of change and decrease in the capacity factor of each of the existing turbines according to the years, the legislation and regulations to be issued by the government for these applications, the status of the incentive mechanism that the government will apply to the investor and whether there will be additional subsidies, and etc, however, it is very important to make a financial analysis in order to make the study economically reasonable in addition to all these parameters in line with the researches. The most decisive financial factors in this study are the state of the market for the sale or recycling of existing turbines, the costs of new turbines, the level of electricity market prices, the investment costs for repowering and the operating costs for life extension.

As the output of this study, with the use of new generation turbine models with high power, even if the installed power of the power plant is preserved, there is a significant increase in electricity production with full repowering. Also, of course, it has been possible to say that the annual financial return has increased considerably.

Finally, in this content, suggestions were made for future studies. In addition, this thesis will be a pioneer for future studies in Turkey, since no study has been carried out in this field in Turkey yet.

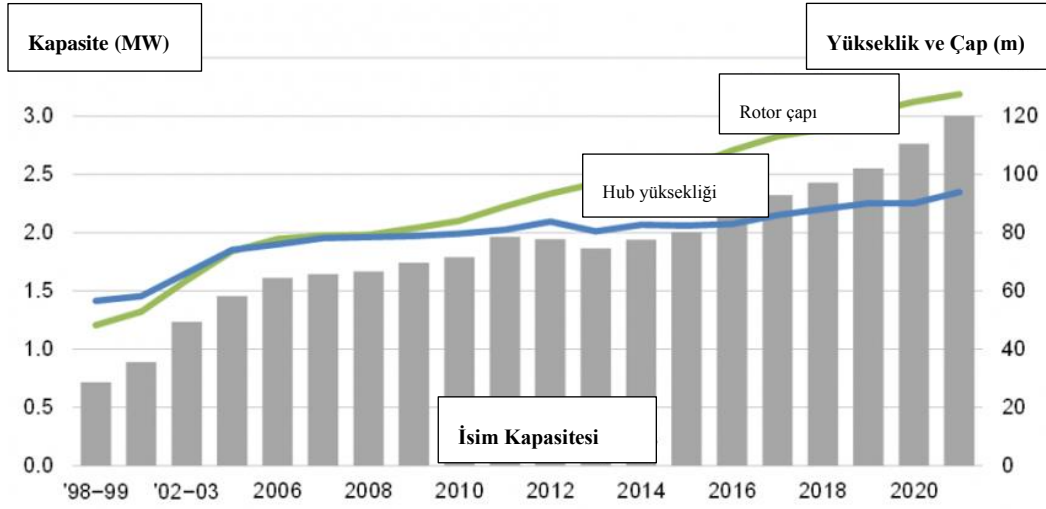
1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji sistemleri Dünya genelinde pek çok ülkenin enerji yatırım stratejilerini ve planlarını oluşturdukları en önemli enerji sistemlerinden biridir. Meydana getirdikleri birden fazla pozitif etki sebebiyle yenilenebilir enerji sistemleri kısa sürede gezegende çok önemli bir hal almıştır. Ayrıca belirtmek gerekir ki, son zamanlarda tüm dünyada yaşanan enerjini krizini (özellikle Rusya-Ukrayna savaşı neticesinde inanılmaz artan bu enerji krizini) yıkmak için devletler fosil yakıt tüketimini azaltmak ve yeşil enerji kullanımını artırmak üzere çok hızlı ve büyük adımlar atmışlardır. Dolayısıyla yenilenebilir enerji üzerine yapılan çalışmalar günbegün artmaktadır.

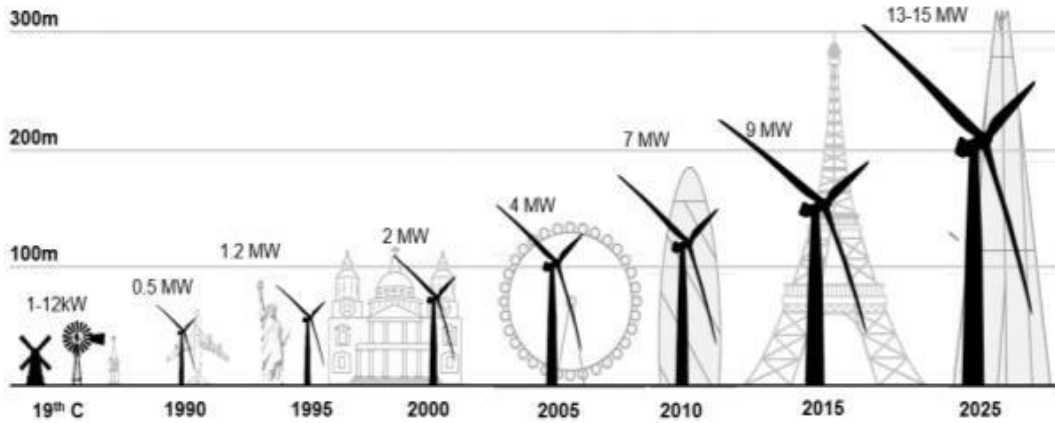
Ülkelerin doğal olarak kendi coğrafya, yer altı zenginlikleri ve kaynakları doğrultusunda en çok faydalandıkları yenilenebilir enerji türleri değişmektedir. Fakat belirtmek gerekir ki tüm dünyada en yaygın olarak değerlendirilen yenilenebilir enerji kaynakları; su (hidroelektrik), rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal olmak üzeredir. Özellikle de rüzgâr enerjisi sistemleri bu doğrultuda dünyada yenilenebilir enerji sistemleri yatırımlarında en çok kullanılan enerji sistemlerindedir. Zira görece olarak özellikle yeni teknolojilerle oldukça verimli çıktılar veren ve sanayinin yıllar geçtikçe çok gelişmiş olmasından enerji sektöründeki tüm paydaşlar açısından yürütülmesi ve değerlendirilmesi son derece makul olan rüzgâr enerjisi sistemleri bu noktada ülkelerin enerji yatırım stratejilerini belirleyen önemli unsurlardan biridir. Nitekim Türkiye de özellikle son 10 yılda bu alanda yaptığı yatırımları artırmaktadır ve de muhakkak ki gelecek için de artırması beklenmektedir.

Rüzgâr enerji sistemleri üzerine tüm dünyada son 30-35 yılda binlerce rüzgâr türbinleri kurulmuş ve faaliyete geçmiştir. O zamandan günümüze kadar olan süre zarfında bu alanda kullanılan rüzgâr türbinleri gelişen teknolojiyle değişmiştir. Geçmişte ilk kurulumlarda kullanılan 200-300 kW'lık güce sahip küçük ebatlardaki rüzgâr türbinleri yerlerini bugünlerde artık 7-8 MW'lık nominal güce sahip devasa boyutlardaki türbinlere bırakmışlardır. Kısa sürede gerçekleşen bu gelişmeler rüzgâr enerjisi sektörünün ne denli önemli bir enerji sektörü olduğunu göstermektedir.

Şekil 1.1 ve 1.2’de bu gelişmeler yıl bazında kabaca gösterilmektedir [1,2].



Şekil 1.1. Kara tabanlı rüzgâr projelerinde ortalama türbin göbek (hub) yüksekliği, rotor çapı ve türbin kapasitesi değerlerinin yıllara göre değişimi [1].



Şekil 1.2. Yıllara göre rüzgâr türbininin evrimi (güç ve toplam yükseklik bakımından) [2].

Ayrıca bilinmelidir ki, bir rüzgâr türbininin yaklaşık 20 yıllık bir faydalı ömrü vardır, fakat bu süre bazı geliştirme ve düzenleme çalışmalarıyla 25 yıla kadar çıkabilmektedir. Hatta yeni araştırmalar doğrultusunda üretilen yeni türbin teknolojileriyle birlikte bu süre 30-35 yıla kadar da uzayabilmektedir. Teknik olarak bu süre bileşen tasarım marjları, rüzgâr enerji santrali yerleşimi, meteorolojik koşullar, bakım kaydı vb. faktörlere bağlıdır. Lakin, genel manada sektör tecrübeleri gösteriyor ki bir rüzgâr türbininin faydalı ömrü standart olarak 20-25 yıldır.

Bu alanda yapılan çalışmalar ve projeler neticesinde gözlemlenmiştir ki, her teknoloji gibi bu sistemler de zamanla eskimeye maruz kalmaktadırlar ve bunun yanında yine zamanla verim, kullanılabilirlik gibi parametrelerde de azalma meydana gelmektedir. Zira öne sürülen o ki, rüzgâr türbinlerinde her geçen yıl ortalama yük faktörleri ile yıllık enerji üretimlerinin %1-2 kadar düşmesi söz konusudur. Ek olarak türbinlerin yaşı arttıkça ve türbinler daha fazla bakıma ihtiyaç duydukça türbinlerin arıza süresi artmaktadır. Böylelikle işletme maliyetleri de zamanla artmış olur. Tüm bu açıklananlar ve rüzgâr enerji sistemlerinin genel olarak bu hızlı gelişimi, türbinlerin faydalı ömürlerinin yarısına bile ulaşmadan teknolojik olarak demode hale geleceğini de gün yüzüne çıkartmaktadır.

Bu problemler ve durumlar doğrultusunda santralin yaşı arttığında ve işletmeye dayalı ömrünün de sonuna gelindiğinde proje ve mülk sahipleri bazı yeni arayışlara gitmek durumunda olurlar. Bu bağlamda karşılarına üç ana seçenek çıkmaktadır. İlki, altyapıyı kaldırmak ve araziye eski durumuna çevirmek olan hizmetten çıkarma işlemleridir. İkincisi, bir rüzgâr enerji santralinin fiziksel niteliklerinde bir oynama yapmadan (enerji üretim miktarını yükseltmeden) fakat bazı değişimler ile mevcut planlama süresini artıran yaşam süresinin uzatılmasıdır. Ve son olarak üçüncü opsiyon, üretim kapasitesini artırarak veya aynı seviyede tutarak mevcut eskiyen türbinleri daha randımanlı ve genelde daha büyük, yeni türbinlerle değiştirmek üzere uygulanan yeniden güçlendirmedir.

Bu çalışmada Bölüm-1’de rüzgâr enerji santrallerinde diğer yaşam sonu stratejileriyle birlikte yeniden güçlendirme kavramının ne olduğu, ne anlam ifade ettiği, bu çalışmaların nasıl gerçekleştirilebileceği ve bu alanda literatürde yer alan araştırmalar ele alınacaktır. Ayrıca yeniden güçlendirmeye etkileyen ve bu çalışmaların uygulanmasında dikkat edilmesi gereken unsurlara değinilecektir. Son olarak bu bölümde yeniden güçlendirme çalışmalarının etkileri ve potansiyel sonuçları incelenecektir. Bölüm-2’de Dünyada ve Türkiye’de genel olarak rüzgâr enerjisi ve yeniden güçlendirme analizleri yapılacaktır. Dünyada bu alanda yapılan çalışmalar somut verilerle irdelenecektir. Türkiye açısından ise potansiyel yeniden güçlendirme değerlendirmesi yapılacaktır. Bölüm-3’te Türkiye açısından yeniden güçlendirme potansiyeli örnek bir saha üzerinden pekiştirilecektir ve örnek saha verileri üzerinden

bu çalışmanın sonuçları değerlendirilecek ve tartışması yapılacaktır. Son olarak Bölüm-4'te ise genel hatlarıyla tüm çalışmanın sonuçları açıklanacaktır ve gelecekte yapılması muhtemel araştırmalara önerilerde bulunulacaktır.

1.1. Yeniden Güçlendirme ve Diğer Yaşam Sonu Stratejileri

Bir rüzgâr enerji santrali kurulduğunda başlangıç olarak, rüzgâr kaynağı birkaç yıl süresince gözlemlenir ve o alana bir santral kurmanın teknik ve ekonomik olarak uygun olup olmadığının değerlendirilmesi yapılır. Eğer uygunsa, bazı kısıtlamalar ve etken unsurlar göz önünde bulundurularak rüzgâr türbinlerini en optimal şekilde o alana yerleştirme modellemesi düzenlenir. Ardından inşaat, elektrik, çevre ve tüm altyapı projeleri, inşaat yapılmadan önce ve inşaat yapıldıktan sonra olmak üzere planlanır ve uygulanır. Santralin inşası bittikten sonra, anlaşılan elektrik satın alma sözleşmesi (PPA-Power Purchase Agreement) gereğince saha faaliyete koyulmaya hazır hale gelir. Fakat bu süre sona erdiğinde yani sahanın sözleşme süresinin sonuna geldiğinde ve ayrıca bir önceki kısımda da bahsedilen türbinlerin de faydalı ömürlerinin sonuna geldiğinde, rüzgâr enerji santrali sahibi bu aşamada uygulanması gereken en doğru stratejiye karar vermelidir.

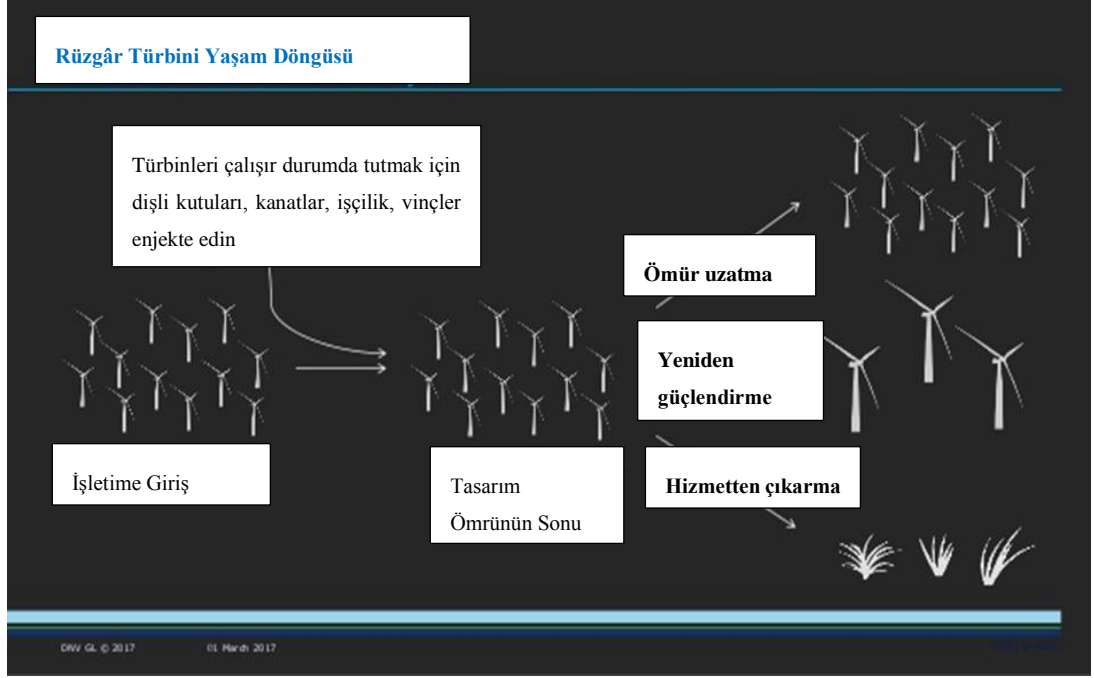
Genel olarak bir rüzgâr enerji santralinin ömrünün sonunda değerlendirilecek üç temel plan vardır:

1. Rüzgâr çiftliğini veya santralini kanun ve standartlara uygun olarak tamamen devreden çıkarmak manasına gelen hizmetten çıkarmadır. (Decommissioning)
2. Rüzgâr türbininin ana bileşen parçalarını geliştirerek veya bu ekipmanları en son teknolojiyle güncelleyerek bir rüzgâr türbininin faydalı ömrünü uzatmadır. (Life time extension)
3. Bir rüzgâr enerji santralinde mevcut rüzgâr türbinlerini demonte etmek ve demonte edilen türbinlerin yerlerine veya çevresine yeni teknoloji ile daha büyük ebatla ve genelde daha az sayıda yeni nesil türbinler kurmak olan yeniden güçlendirmedir. (Repowering)

Yukarıda bahsi geçen üç temel yaşam sonu stratejisine ek olarak, projelerde pek uygulanmayan ancak yine de bir metot olan başarısız çalıştırma, işletme ve bakım

maliyetleri gelirlerden daha yüksek olana kadar tüm santrali çalışır vaziyette bırakma durumudur.

Tüm bu yöntemler esas olarak Şekil 1.3'te gösterilmektedir [3].



Şekil 1.3. Bir rüzgâr enerji santralının yaşam döngüsü seçenekleri [3].

Hizmetten çıkarma, proje sahipleri tarafınca mevcut sahanın belli başlı etkenlerden dolayı daha fazla kullanılmaması gerektiği düşünüldüğünde uygulanan bir yöntemdir. Bu noktada saha eski yapısına geri dönmek üzere çalışmalar yürütülür ve öte yandan sökülen türbinler de geri dönüşüm ile veya türbinlerin gelişmemiş ülkelere pazarlanması ile proje sahiplerine gelir getirebilmektedir.

Faydalı ömür uzatma, standart işletme ve bakım faaliyetlerinden biraz daha farklıdır. Esas olarak türbinde yer alan bazı temel bileşenlerin değişimi ve güncellenmesi ile santralin bir süre daha çalışmasına olanak sağlayan bir yöntem olarak nitelendirilebilmektedir.

Faydalı ömür uzatma seçeneğinde yer alan senaryolar değerlendirilirse, ilk etapta bileşenlerin genel olarak muayenesi ve temizliği, rulmanlar, dişliler, sensörler ve valfler gibi görece olarak küçük parçaların değiştirilmesi ile hafif bir revizyon yapılmış olunur. İkinci olarak bu hafif revizyonlara ilaveten jeneratör, dişli kutusu, ünite trafosu

gibi daha kritik ve çok daha önemli bileşenlerin değişmesi ile daha yoğun bir ömür uzatma çalışması gerçekleştirilir. Son olarak tüm bunlara ek olarak rotor ve kanat ekipmanlarının da değişmesi ile daha kapsamlı bir faydalı ömür uzatma çalışması tamamlanmış olunur.

Mevcut rüzgâr türbinlerini ve/veya türbin ekipmanlarını yenileriyle ve daha efektif olanlarıyla değiştirerek rüzgâr enerji santrallerinin ömürlerini uzatmanın bir diğer yolu yeniden güçlendirmedir. Bu eskiyen bir projenin güncellenmesi anlamına da gelmektedir. İlâveten yeniden güçlendirme ile şebeke ilettim hattı ve diğer elektrik altyapıları daha modernleştirilebilir, yeni yollar yapılabilir veya mevcut altyapı restore edilebilir. Kısmi ve tam yeniden güçlendirme olmak üzere iki farklı çeşidi vardır.

Kısmi yeniden güçlendirmede mevcut türbine yeni bir güç aktarım sistemi aktarılır, rotor ve kanatlar takılır. Üstelik gerekli olursa kulede de mimari olarak bazı değişiklikler yapılabilmektedir. Tam yeniden güçlendirmede ise rüzgâr türbinlerinin kule ve yapı temeli dahil olacak şekilde bütünüyle sökülmesi ve sökülen türbinlerin yerlerine veya yakınlarına daha büyük ve yeni nesil teknoloji türbinler yerleştirilmesi söz konusudur. Temel olarak rahatlıkla anlaşılabilir ki, mevcut sisteme kıyasla kısmi yeniden güçlendirmeyle daha yüksek performans ile daha iyi çıktılar alınabilirken aynı durum kısmi yeniden güçlendirme yerine tam yeniden güçlendirme yapılırsa da olmaktadır. Ayrıca belirtmelidir ki, yeniden güçlendirme ile eski kurulu güç kapasitesi artırılabilirken aynı zamanda aynı değerde de tutulabilmektedir.

Genel olarak yeniden güçlendirme çalışmalarında uygulanabilecek yöntemler şu şekildedir:

a) Yapılan planlamayla sahada yer alan tüm türbinler sökülür, yerlerine veya yakınlarına daha az adette ve daha yüksek kapasite gücünde yeni nesil türbinler kullanılır. (Toplam kapasite değişebilir veya sabit kalabilir.) Bu metot tam yeniden güçlendirme olarak tabir edilmektedir.

b) Öncelikli olarak türbinlerde bakım yapılır. Bakım ve analizler neticesinde bazı türbinlerin bir miktar daha - lisans süresine bağlı olarak - faaliyette kalmasına karar kılınır, ancak diğer türbinlerin değiştirilmesine kanaat getirilir. Böylelikle sökülen türbinlerin yerlerine veya yakınlarına daha büyük güce sahip türbinler getirilir ve

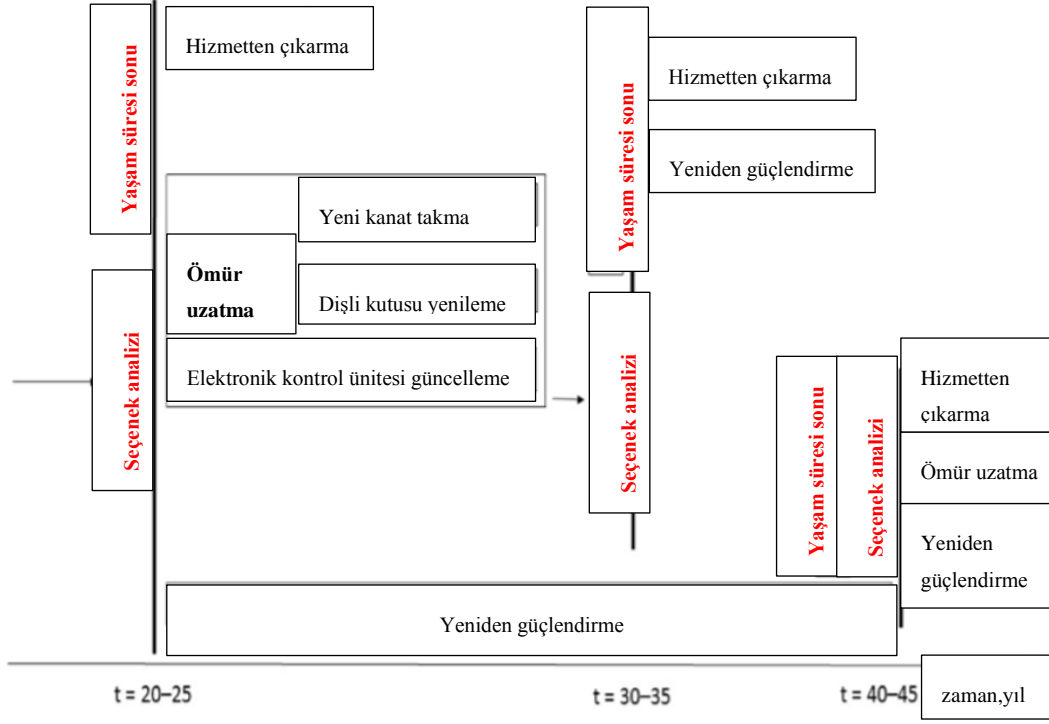
monte edilir. Sökülmeyen türbinler de zamanla yeniden güçlendirme ile sahaya katkı verecektir. Bu yöntem aynı zamanda kademeli olarak sahayı yeniden güçlendirme olarak da nitelendirilebilmektedir.

c) İlk olarak türbinlerde bakım çalışmaları yapılır. Sahada belli sebeplerden kaynaklı (teknik, ekonomik, lojistik, coğrafik vb.) tam yeniden güçlendirme yerine kısmi yeniden güçlendirme yapılması uygun görülür. Bakım sonrası düşük verimde çalışan türbinlerde yer alan bazı temel bileşenlerin değişiminin gerektiğine karar kılınır. Bu senaryoda kule ve temelde bir değişikliğe gerek yoktur, lakin kulede yapısal olarak bazı değişiklikler yapılabilmektedir. Daha ayrıntılı olarak bu senaryonun alt yöntemleri esasen şu şekildedir:

- Nasel (Nacelle) değişimi
- Kanat değişimi
- Kanat ve Nasel (Nacelle) değişimi

Yaşam sonu stratejilerinden yeniden güçlendirme, bir sahanın verimliliğini, üretkenliğini ve kazanım potansiyelini önemli ölçüde artırabileceği için oldukça mantıklı olan yöntemlerin başında gelmektedir, fakat elbette bu konuda da değerlendirilmesi gereken oldukça fazla kriter ve husus vardır. Tüm bunların ışığında genel olarak tüm senaryolar incelenmeli ve en optimal çözüm niteliğindeki yöntem belirlenmeli ve uygulanmalıdır.

Tüm bu yaşam sonu stratejilerini daha iyi gözlemleme açısından izlenebilecek yöntemlerin şeması Şekil 1.4'te verilmiştir [4].



Şekil 1.4. Ömrünün sonuna gelen rüzgâr santralinde izlenebilecek yollar ve oluşan alternatifler [4].

Literatürde yer alan çalışmalar ve araştırmalar neticesinde gözlemlenmiştir ki, ömür sonu stratejilerinden faydalı ömür uzatma ve kısmi yeniden güçlendirme kavramlarını açıklama hususunda bazı farklılıklar ve çelişkiler olmuştur. Temel olarak iki kavramın da neler ifade ettiği bu çalışmada açıklanmıştır ve sonuçta bu iki kavramın anlam olarak birbirlerine benzedikleri nettir fakat, aradaki farkı belirtmek gerekirse faydalı ömür uzatmanın genelde proje ömrünün sonuna gelindiğinde alınan bir karar olduğu, kısmi yeniden güçlendirmenin ise belli başlı etkenlerden kaynaklı olarak proje süresi devam ederken alınan bir karar olduğudur.

Tüm bu teknik bilgilerin yanı sıra bilinmelidir ki, Dünyada ilk olarak 1990'lı yıllarda Danimarka ve ABD'de ortaya çıkan ve üçüncü milenyumun başlarında Almanya ve Hollanda'nın da çalışmalarını sürdürdükleri rüzgâr enerji santrallerinde yeniden güçlendirme projeleri tez zamanda Çin, Brezilya, İspanya ve Hindistan gibi pek çok ülkenin gündemine oturmuştur. Keza ilerleyen yıllarda da bu alanda yapılacak çalışmaların tüm dünyada oldukça artacağı öngörülebilmektedir.

1.2. Literatür Taraması

Bu kısımda literatürde bulunan yeniden güçlendirme ve diğer yaşam sonu stratejileri üzerine yapılan çalışmaların genel değerlendirilmesi yapılmıştır. Tecrübeler sektör genelinde yeniden güçlendirme üzerine daha fazla yoğunlaştığını göstermektedir, dolayısıyla bu tez çalışmasında da diğer stratejilerinden daha çok yeniden güçlendirme üzerinde durulmuştur. Yine sektör deneyimlerine bakılarak bu çalışmaların özellikle Danimarka, Almanya ve İspanya gibi bazı Avrupa ülkelerinde oldukça fazla oldukları gözlemlenmektedir. Buna ilaveten önceden yapılan projelerin açık deniz (offshore) rüzgâr çiftliklerinden ziyade çoğunlukla kara (onshore) rüzgâr çiftliklerinde olmaları sebebiyle yine bu çalışmaların daha çok kara sahalarında yürütüldükleri anlaşılabilmektedir.

L. M. Abadie ve N. Goicoechea [4], gelecekteki saatlik elektrik fiyatları ve yük faktörleri mevsimsel olarak değiştiğinde, İspanya'nın İber Yarımadası'nda yer alan bir rüzgâr enerji santralının ömrünü uzatma veya tam yeniden güçlendirme yapma arasındaki farkları ve alınması gereken kararları incelemektedirler.

G. de Novaes ve ark. [5], Brezilya'da yer alan rüzgâr enerji santrallerinin verileri üzerinden çeşitli bakım ve yeniden güçlendirme aşamalarını ömür sonu stratejileri olarak değerlendirerek, birden fazla faydalı ömür uzatma vakasının özellikle ekonomik uygulanabilirliğini Sobol yöntemi diye adlandırılan bir duyarlılık analizi ile ele almaktadırlar.

H. Doukas ve ark. [6], yeniden güçlendirme çalışmalarının olası etkilerini ve çalışmalar sonucu elde edilen tecrübeleri pek çok açıdan, bazı Avrupa ülkelerinde gerçekleşen çalışmalar üzerinden analiz etmektedirler. Çalışmada bu alanda gelişmeler kat eden Almanya, Danimarka, İspanya ve İtalya gibi ülkelerin yanı sıra bu alanda yakın zamanda çalışmalar yürütmesi muhtemel olan Yunanistan açısından yeniden güçlendirme konusu detaylıca irdelenmektedir.

C. Stetter ve ark. [7], oldukça detaylı yerleşim yapılarını kullanan ileri seviye bir coğrafi bilgi sistemi doğrultusuyla, Almanya'da kısıtlayıcı yasal minimum mesafe düzenlemelerinin yeniden güçlendirme projeleri üzerindeki etkilerini araştırmaktadırlar.

A. Philpott ve R. Windemer [8], kara rüzgâr projelerinde halk ve topluluk hissedarlığının değerini yükseltmek için yeniden güçlendirme çalışmalarını eleştiriye dayalı bir şekilde değerlendirmektedirler.

J. Ramirez ve ark. [9], İspanya açısından bir rüzgâr enerji santralının faydalı ömrünün sonuna gelmesiyle ilgili değerlendirilecek olan en optimal yaşam sonu stratejilerini belirlemek amacıyla birden fazla yöntemi teknik ve ekonomik analizlerle ortaya koymaktadırlar. Bu yöntemler, mevcut türbinlerin faydalı ömürlerinin bir on sene kadar daha uzatılması, eski türbinlerin yenileriyle değiştiği bir yeniden güçlendirme senaryosu gibi olmaktadır.

J. H. Piel ve ark. [10], bir coğrafi bilgi sistemi üzerinden bireysel türbin seviyesinde detaylı analizleri ortaya koyan ve mekâna dayalı en uygun ömür sonu stratejilerinin belirlenmesine katkı veren bir çalışma oluşturmaktadırlar. Çalışmada ayrıca Almanya'nın Aşağı Saksonya bölgesinde yer alan binden fazla rüzgâr türbini için 2020 yılı sonu itibariyle finansman süresinin sona ermesiyle en uygun finansman sonu opsiyonlarının değerlendirilmesi de yapılmaktadır.

L. Kitzing ve ark. [11], uygun yaşam sonu stratejisini seçmek anlamında teknoloji açısından bakmaktan ziyade sosyal ve politik açıdan değerlendirmenin daha kritik olduğunun altını çizmektedirler. Gelecekte global olarak yeniden güçlendirme pazarı hakkında bazı tahminler ve öngörüler yapmaktadırlar. Danimarka'daki sahaları ele alan bu çalışma ayrıca yeniden güçlendirmenin meydana getirdiği zorlukları ve fırsatları da kaleme almaktadır.

T. Fitzgerald ve M. Giberson [12], yeniden güçlendirme çalışmalarını desteklemek için oluşan politika araçlarını ve bu tarz teşvik mekanizmalarının ne denli önemli bir unsur olduğunu araştırmaktadırlar. Bu çalışmada, A.B.D'nin Texas eyaletinde bulunan rüzgâr çiftlikleri üzerinden hem politika hem de ticari manada uzun vadede yapılabilecek planlar ele alınmaktadır.

C. Fuchs ve ark. [13], Almanya'da yeniden güçlendirme yapılan bir rüzgâr enerji santralinde ekonomik bir analiz yapmaktadırlar. Bu analiz neticesinde yeniden güçlendirmeyi etkileyen en önemli parametrenin tarife garantisi (feed-in tariff) olduğu vurgulanmaktadır.

P. del Rio ve ark. [14], İspanya'daki kara RES'lerin (Rüzgâr Enerji Santrali) yeniden güçlendirilmesini desteklemek amacıyla çeşitli seçeneklere temel olarak değinmektedirler ve teorik bir analiz ortaya koymaktadırlar.

G. Herbert ve ark. [15], rüzgâr enerji santrallerinde saha ve türbin performansını, güvenilirliğini ve mali değerleri incelemektedirler ve eskiyen rüzgâr türbinlerinin zamanla performans ve verimliliğinin düştüğünü tespit etmektedirler.

M. I. Blanco [16], yeniden güçlendirme ile ilgili olan teknik, ekonomik ve diğer faktörler bazında Avrupa'nın çeşitli topraklarındaki üretim maliyetlerini araştırmaktadır.

L. Serri ve ark. [17], yeniden güçlendirme opsiyonları geliştirmekte ve İtalya'da yer alan rüzgâr enerji santrallerinin teknik ve ekonomik çerçevede değerlendirilmesini yapmaktadırlar. Yüksek yatırım maliyeti ve nispeten karmaşık bir proje süreci içermesi analizler sonucu çalışmanın en büyük sorunları olarak belirtilmektedir.

T. Rubert ve ark. [18], yaşam sonu stratejilerinden faydalı ömür uzatma seçeneğine değinmektedirler ve bu bağlamda bir metodoloji sunmaktadırlar.

L. Ziegler ve ark. [19], Almanya, İspanya, Danimarka ve Birleşik Krallık gibi bazı ülkelerin birbirlerine benzer yeniden güçlendirme politikaları olduğunu vurgulamaktadırlar. Çalışmada, bu ülkelerin gelecekte atacakları yeniden güçlendirme adımları gözden geçirilmektedir ve elektrik spot piyasası fiyatlarının değişikliklerinin ve belirsizliklerinin yaşam sonu stratejilerine en çok etki yapacak olan unsur olabileceği belirtilmektedir.

M. de Simon-Martin ve ark. [20], yeniden güçlendirme opsiyonunu İspanya'daki fırsat maliyeti üzerinden desteklenen bir model ile değerlendirmektedirler. Çalışmada rüzgâr enerji santrallerinin yarısından fazlasında yeniden güçlendirmenin daha kârlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

C. Schwarz ve E. Badia [21], bir yaşam sonu stratejisi olarak rüzgâr çiftliklerinin hizmetten çıkarılmasının maliyetlerini ve etkilerini araştırmaktadırlar. Bu çalışmada Almanya, İspanya ve Romanya'da daha önceden hizmetten çıkarılan santrallerin raporları üzerinden bir analiz yapılmaktadır.

J. P. Jensen [22], rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümlerinin etkilerini incelemektedir ve yapılan inceleme neticesinde bileşenlerin çoğunluğunun geri dönüştürülebilir olduğunu ve gelirlerin büyük ölçüde hurda malzeme pazarıyla bağlantılı olduğunu onaylamaktadır.

R. Wiser ve ark. [23], ABD’de rüzgâr enerjisi pazarına yönelik yayımlanan yıllık raporlarını incelemektedirler ve yeniden güçlendirme kararlarına en çok etkileyen hususun vergiye dayalı teşviklere erişimin olduğunu belirtmektedirler. Aynı zamanda ABD’deki yeniden güçlendirme çalışmalarında önceden alınan kararların ışığında, mevcut projeler 20-25 yaşına ulaştığında sahada bir güncelleme yapmanın daha makul olduğuna işaret etmektedirler.

J. Mauritzen [24], Danimarka rüzgâr enerji santralleri verilerini kullanarak, yeni ve uygun sahaların kısıtlı olması dolayısıyla, yeni sahalar oluşturmaktan ziyade eskiden kurulan ve daha eski ve daha küçük türbinlere sahip olan sahalarda çalışmalar yürütmenin daha efektif olunacağına değinmektedir.

S. D. Hamilton ve ark. [25], daha eski türbinler bulunduran sahalarda yılda %0,5 civarı bir kapasite düşüşü varken, yeni türbinlere sahip santrallerin yılda %0,15’lik bir performans ve verim düşüşü olduğunu gözlemlemektedirler. Çalışma sonuçları teknolojik gelişmelerin alınacak yaşam sonu kararlarında önemli bir karar olduğunu vurgulamaktadır.

B. Frantal [26], Çekya’daki rüzgâr enerji santral çalışanları ile yeniden güçlendirmeye ilişkin yapılan bir anketin sonuçlarını analiz etmektedir. Analiz sonucu pozitif anlamda ortaya çıkan verilerin negatif verilerden daha fazla olduğu belirtilmektedir.

T. Prabu ve S. Kottayil [27], tam yeniden güçlendirmeden ziyade kısmi yeniden güçlendirmenin daha makul bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadırlar. Buna rağmen çalışmada tam yeniden güçlendirmenin, Hindistan açısından elektrik üretim kapasitesini artırmaya yönelik politikalara daha uygun olduğuna dikkat çekmektedirler.

A. Colmenar Santos ve ark. [28], rüzgâr enerjisinin İspanya enerji sistemi açısından daha önemli ve daha sağlam bir hal alması amacıyla yeniden güçlendirme çalışmalarının pek çok açıdan değerlendirilmesini yapmaktadırlar ve nihayetinde yeni

santraller kurmak yerine mevcut sahaları yeniden güçlendirmenin daha mantıklı bir çözüm olduğu kanaatine varmaktadırlar.

S. Himpler ve R. Madlener [29], Danimarka'da yeniden güçlendirme çalışmalarının uygulanmasında en optimal zamanı belirlemek için Gerçek Opsiyonlar Yaklaşımı (ROA) tekniğini kullanarak, proje gelirlerinin yatırım maliyetlerinin iki katı bir değerde olduğu sürede yeniden güçlendirme yatırımlarının oldukça makul olabileceklerini vurgulamaktadırlar.

1.3. Yeniden Güçlendirmeye ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerine Etkiyen Unsurlar ve Bu Çalışmalarda Dikkat Edilmesi Gereken Parametreler

Önceki bölümlerde değinilen ve örneklenen rüzgâr çiftliklerinde yaşam sonu stratejilerinin analizini yapmak üzere bu çalışmalara etki edecek öğeler bu kısımda değerlendirilmektedir. Ancak bunun öncesinde bir rüzgâr çiftliğini yeniden güçlendirme, ömrünü uzatma veya hizmetten çıkarma gibi stratejilerin ortaya çıkmasına yol açan etken maddeleri belirtmekte fayda vardır. Bu etken faktörler şu şekilde sıralanabilir:

- Devlet desteğinin sona ermesi,
- Yapı ruhsatının sona ermesi,
- Arazi kiralama lisansının sonu,
- İşletme ve bakım sözleşmesinin sona ermesi
- Türbin çalışma ömrünün sona ermesidir.

Bu faktörler neticesinde rüzgâr enerji santral sahipleri ve işletmecileri gelecek yatırımlarına ilişkin alınacak kararlar hakkında bir öngörüye sahip olmaktadır. Nitekim bir santral arazi kiralama lisansının sona ermesi ile mevcut lisansın süresini artırma teşebbüsünde bulunup bu durum kabul görürse yatırımcı o alanda farklı fizibilitelere yönelir, zira bu yeniden güçlendirme veya faydalı ömür uzatma gibi çalışmalar olabilmektedir. Lakin arazi kiralama lisansının süresi dolduktan sonra bu sürenin artırılmasına yönelik girişimler reddedilirse bu sahadaki türbinler hizmetten çıkarılma durumuna tabi tutulacaktır. Veya bir santralde işletme ve bakım sözleşmesinin sona ermesiyle ve mevcut firmayla sözleşme yenileme opsiyonuna gidilmiyorsa, mevcut türbinlerde ileriki zamanlarda aynı firma tarafınca bakım

çalışmaları yapılamayacağı için o türbinlerde bir yeniden güçlendirme veya ömür uzatma çalışmaları yapılabilir ve farklı bir servis firması ile yeni bir sözleşme yapılabilir. Dolayısıyla genel olarak yukarıda bahsi geçen yatırımda belirleyici etkenleri doğru bir şekilde değerlendirmek gerekmektedir.

Başlangıçta bu yönelimlere tesir edecek en temel kriterleri belirttikten sonra bir rüzgâr santralinin faaliyette kalmasını veya hizmetten çıkarılmasını etkileyecek diğer önemli hususlara değinmek gerekmektedir. Nitekim bu çalışmalara etki yapacak teknik, idari, çevresel, toplumsal, politik ve ekonomik olmak üzere pek çok unsur bulunmaktadır. Şayet tüm bu olası etkiler yatırımcı ve mal sahipleri tarafından düzgün bir şekilde yorumlanır ve analiz edilirse en uygun fizibilitiyi belirlemek kolay olacaktır.

Öncelikle bir rüzgâr elektrik santralının yaşam sonu stratejisini belirlemek için ve hesaplamaları yapabilmek adına pek çok teknik kriter öne çıkmaktadır. Bunlar:

Sahanın arazisi, sahanın rüzgâr kaynağı, mevcut kurulu güç, türbinlerin kapasite faktörleri ve verimleri, yeni teknoloji türbin seçimi, yeniden güçlendirmeden sonra veya ömür uzatma çalışmasından sonra santral kurulu kapasitesinin tahmini, yıllık enerji üretim verilerinin tahmini, enerji-verim oranı vs. olmak üzeredir.

Bir süredir türbinlerin faaliyette olduğu mevcut sahalarda rüzgârın kaynağının bilinmesi ve böylelikle muhtemel ki yüksek rüzgâr potansiyeline sahip bu sahaların kullanımına devam edilmesi, yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi çalışmalara etki yapacak bir unsurdur.

$$P_{net} = K_p \times P_{rüzgar} = K_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (1.1)$$

Yukarıda yer alan Denklem 1.1 bir rüzgâr türbininin ürettiği güç değerini ortaya koymaktadır. Bu denklemde verilen $P_{rüzgar}$ ve P_{net} verileri sırasıyla rüzgâr türbininin üretmiş olduğu güç ve net güç değerlerini sembolize etmektedirler ve Watt cinsinden bir değer ortaya çıkarmaktadırlar. Denklemin içerdiği diğer değişken parametreler ve bu parametrelerin birimleri şöyledir:

K_p : Türbin verimi-kapasite faktörü (%)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A: Rotor kanatlarının süpürdüğü alan (m^2)

v: rüzgâr hızı (m/s)

Yukarıda belirtilen rüzgâr türbininden üretilen net güç değerini ifade eden denkleme göre, gücü ve dolayısıyla enerji üretimini artıran en önemli yapısal unsurun rotor çapındaki artış olduğu gözlemlenebilmektedir. Zira rüzgâr türbin kanat uzunluğunun artırılmasıyla süpürülen alanın metre kare bazında daha da genişlemesi söz konusu olacağından ve süpürme alanı değişkeninin üretilen güç ile doğrudan bağlantısı olduğu gerçeği ile bu yargıya varılmaktadır. Bunun yanında yeni nesil son teknoloji türbinlerin verimleri ve kapasite faktörleri oldukça fazla olacağından enerji üretimini artıracak bir diğer teknik ve yapısal unsur da türbin verimi olmaktadır.

Yeniden güçlendirme özelinde bir diğer irdelenmesi gereken teknik kriter uygun modellemeyi türbinleri doğru konumlandırarak şekilde ayarlamaktır. Bu, terminolojide mikro konumlandırma (micrositing) adıyla geçmektedir. Mikro konumlandırma sahada pek çok kritere göre türbinlerin yerleştirilmesi gereken en uygun yeri belirleme açısından oldukça vahimdir, ki mikro konumlandırma ile ve coğrafik kısıtlamalara göre sahada kullanabilecek ideal sayıda türbin adedini de belirlemek işten bile olmayacaktır. Türbin konumlandırma analizini doğru şekilde yapmak çok önemlidir, zira büyük türbinler oluşturabilecekleri iz etkisi (wake effect) ve olası yüksek rüzgâr türbülansı gibi bazı parametrelerle mevcut sahada bulunan diğer türbinlerin verimlerini negatif anlamda etkileyebilmektedirler ki bu da enerji üretimini azaltmaktadır. Teknik olarak belirtmekte fayda var ki, rüzgâr türbinlerini hâkim rüzgâr yönüne dik olan hattaki rüzgâr türbin rotor çapının iki-üç katı uzunluğunda bir mesafe olacak şekilde konumlandırılmaları iz etkisi ve türbülans etkilerini azaltmaya yararmaktadır.

Rüzgâr türbinleri tarafından üretilen enerji, enterkonnekte bir sisteme taşınırken, mevcut şebekenin bileşenleri, başta rüzgâr türbinleri olmak üzere diğer enerji üretim tesisleri tarafından gün geçtikçe artırılmaktadır. Bu artış veya olası bir üretim-tüketim dengesizliği hem şebeke tarafında hem de yük tarafında bozucu bir etki meydana getirebilmektedir ve arızalara yol açabilmektedir ki bu en istenmeyen durumdur. Bir

tesisin enterkonnekte bir sisteme dahil olması bu nedenle genellikle çok önemli bir olaydır.

Esasen yaşam sonu stratejilerinin ve özellikle yeniden güçlendirme çalışmalarının enterkonnekte sisteme bağlanmasında veya mevcut sahanın şalt merkezindeki ve elektriksel altyapısındaki gerçekleştirilecek yeniden yapılanmada temel elektriksel bileşenlerin (güç-iletişim-topraklama şebekeleri, iletim hatları, kablo uzunlukları, kablo kalınlıkları, trafo merkezi) ve tüm şebekelere (AG-OG-YG) dair hesaplamaların ve modellemelerin oldukça önemli olduğu da bir gerçektir.

Buna rağmen mevcut kurulu gücü sabit tutan bazı yeniden güçlendirme çalışmalarında altyapı ve teknik detaylarla ilgili işlemler daha basit ve kısa olmaktadır. Zira toplam güçte bir değişikliğin olmaması mevcut şalt merkezinin ve mevcut şebeke bağlantılarının korunuyor olduğu anlamına gelir fakat bazı bileşenlerin değişimi veya yenilenmesi de söz konusu olabilmektedir.

Ömür uzatma yönteminde uygulanabilecek adımlar neticesinde türbinlerde kullanılabilir geliştirilmiş teknoloji ürünlerinin şebeke özelinde düzenlenmesini sağlıklı bir şekilde yapmak gerekmektedir. Zira elektriksel-elektroniksel yapılarda değişiklik veya güncelleme söz konusu ise tüm santral dengesini (santral-şebeke gerilim ve frekans dengesi) korumak ve gerekli kontrollerini yapmak önem arz etmektedir.

Ayrıca değerlendirilmesi gereken bir diğer etken, yeni nesil türbinlerin karakteristikleridir. Olası bir yeniden güçlendirme çalışmasında kullanılacak olan yeni ve son teknoloji türbinler öncekilerden çok daha az arıza yapmaktadırlar, dolayısıyla bu durumun elbette finansal ve teknik olarak çok getirisi olur, lakin önemli olan mevcut saha özelinde kullanılması en optimal olan türbin modelini seçmek ve o türbinin sahaya uygun olup olmadığını belirlemektir. Ayrıca elektriksel ve mekanik aksam ile kule, rotor kanadı ve gövde gibi yapısal olarak önemli bileşenler de temel olarak irdelenmelidir. Bu bağlamda örnek olması açısından bazı son teknoloji türbinler ve karakteristikleri Ek A'da yer almaktadır.

Rüzgâr enerji santrallerinde yaşam sonu çalışmalarına etkiyen bir diğer ana unsur lisans alma ve yenileme, sözleşme yenileme ve feshetme, proje için izin alma işlemleri

gibi bazı temel idari ve bürokratik girişimlerdir. Buna ek olarak mevcut projenin saha kontrol belgelerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, yaşam sonu stratejilerine tesir edebilecek kısıtlayıcı faktörleri belirlemek adına oldukça önemlidir. Bu standart işlemler yeni bir rüzgâr santrali kurma konusunda da önem arz ederken yeniden güçlendirme ve diğer ömür sonu değerlendirme opsiyonlarında da muhakkak ki farklılıklar göstermektedir. Ancak belirtmek gerekir ki, yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi çalışmalarda bu süreçlerin işleyişi yeni bir santral kurmaya nazaran daha kolay olabilmektedir. Zira mevcut sahada fiilen bir süredir faaliyette olan bir saha söz konusu olduğu için ve bu sahada daha önceden tüm bu resmi adımlar hukuken başarılı bir şekilde tamamlandığı için gelecek çalışmalarda aynı sahada benzer işlemleri sürdürmek daha basit olacaktır. Öte yandan mevcut bir sözleşme, yeni türbin ilaveleriyle ilgili sınırlamalara sahip olabilir veya sahanın yeniden yapılandırılmasına ilişkin yasaklar içerebilmektedir.

Ayrıca, projenin yeni bir tasarımını ve mevcut rüzgâr türbinlerinin devreden çıkarılmasını gerektirebilecek rüzgâr çiftliğinin yeniden geliştirilmesi ve güçlendirilmesi çalışmaları, yeni müzakereleri ve anlaşmaları beraberinde getirebilmektedir. Veya bir faydalı ömür uzatmada bile bazı yeni resmi süreçlerden geçilmesi gerekebilmektedir. Bu süreçlerin de sağlıklı bir şekilde yönetilmesi için tüm standart işlemlerin takibi ve yürütülmesi de çok önemlidir. Şayet yanlış veya eksik yapılan bir adım çalışmayı hukuksal boyutta sıkıntıya düşürebilir.

Buna ek olarak, ömür sonu stratejilerinden yeniden güçlendirme ve ömür uzatma projelerine devletin destekleyici bir mekanizma ile teşvik vermesi çok önemli bir husustur. Yeniden güçlendirmede kurulu gücü artırmaya yönelik veya kurulu gücü aynı değerde tutmaya yönelik çalışmaların ve de faydalı ömür uzatma çalışmalarının lisanslama sürelerinin devlet kurumları tarafından basitleştirilmesi ve tüm çalışmalara dengeli bir politika ile yaklaşılması önemli olmaktadır. Zira herhangi bir denge kaybı neticesinde zorunlu olarak yatırımcılar tüm seçenekleri değerlendirmekten bile yoksun kalabilmektedirler. Bu bağlamda devlet tarafından gerekli destek mekanizmalarını sağlamak oldukça kıymetlidir.

Bu destek ve teşvik mekanizmaları aynı zamanda bu çalışmalara ekonomik destek verdiği için bu çalışmalara olan yönelimleri belirleyecek ana unsurlardır. Zira mevcut

projeye yeterli seviyede ekonomik bir kalkındırma sağlayamayan bir sistem, çalışmanın tüm fizibilitesini alt üst edebilmektedir. Dolayısıyla potansiyel ömür sonu yaklaşımlarını mali açıdan değerlendirmek oldukça önemlidir. Bu bağlamda teşvik mekanizmaları haricinde ekonomik olarak bu çalışmaları etkileyecek diğer ögeler elektrik satış ve tarife fiyatı, işletme-bakım maliyetleri (Opex), yatırım maliyetleri (Capex), mevcut türbin endüstrisi pazarının durumu vb. olmak üzeredir.

Yeni nesil türbinlerin ve türbin bileşenlerinin daha az arıza oranına sahip olmaları ve çok daha güvenilir olmaları proje sahipleri açısından işletme ve bakım maliyetlerini ciddi bir şekilde azaltmak amacıyla sahalarda değerlendirilmesi potansiyel bir durum arz eden yeniden güçlendirme veya ömür uzatma çalışmalarına yön vermektedir.

Finansal olarak genel manada yeniden güçlendirme ve kullanım ömrü uzatma seçenekleri arasındaki seçim özellikle elektrik ve tarife fiyatları, destek rejimi ve proje planlama ve maliyet politikalarına (Opex, Capex) da bağlı olmaktadır, ki bu parametreler projeden projeye, ülkeden ülkeye muhakkak ki değişkenlik göstermektedir. Buna ilaveten hizmetten çıkarma veya yeniden güçlendirmede esas olan hizmetten çıkarma maliyetlerini (Decex) de ele almak gerekmektedir.

Öte yandan, gelir kaybı yaşanması ihtimaline karşın işletme gideri mevcut yıl gelirini aşana kadar tesisi kullanma ve türbinleri hizmetten çıkarmama sahada değerlendirilebilen bir durumdur fakat sahadaki türbinleri hizmetten çıkarma söz konusu ise eski türbinlerin oluşturduğu sökme maliyetini yatırımcılar ve proje sahipleri o türbinleri bazı ülkelere pazarlayarak veya türbinleri geri dönüştürerek belirli bir kazanç elde ederek çalışmayı bir noktada ekonomik anlamda makul bir seviyede tutmayı amaçlamaktadırlar.

Sektör tecrübelerine ve yapılan araştırmalara dayanarak bir yaşam sonu stratejisini belirlemek amacıyla ekonomik bazda bir analiz yapmak adına aşağıda bazı etken parametreler detaylıca incelenmektedir.

1.3.1. Ekonomik analiz

Yaşam sonu stratejilerini belirlemek adına yapılacak bir ekonomik analiz öncesinde bazı teknik hesaplamaları göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bunlar şu şekildedir:

Denklem 1.2, Weibull olasılık fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu denklemde yer alan değişkenler;

k: Weibull şekil parametresi (birimsiz)

c: Weibull ölçeği parametresi (m/s)

v: Rüzgâr hızı (m/s) olmak üzeredir.

$$P(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.2)$$

Böylelikle ilk olarak her bir türbinin Weibull dağılım grafiği k, c, v, eksponansiyel (e) gibi parametrelerle ortaya konur ve akabinde buna bağlı olarak kümülatif olasılık (Probability) P değeri saptanır.

Türbinin güç eğrisine dayanarak ve önceki hesaplamalar doğrultusunda her bir türbinin yıllık enerji üretim verisi çıktısı alınır. (Tüm rüzgâr hızı aralığı boyunca tüm bu aralıkların gücü tahmin edildikten sonra, tüm güç değerlerinin toplamı yıllık rüzgâr türbini güç üretimini vermektedir. Bu sonuç, her türbinin yıllık enerji üretimi değerini elde etmek için son olarak bir yıldaki toplam saat sayısı olan 8760 ile çarpılmalıdır.)

Kapasite faktörü elde edilir. (Kapasite faktörü (KF), bir RES tarafından belirli bir süre boyunca (tipik olarak bir yıl) üretilen toplam enerji ile bu RES'in bu aynı zaman diliminde sürekli olarak anma gücünde çalışması halinde üreteceği enerji arasındaki orandır. KF belirli bir yerde bir RES'in teknik ve ekonomik uygulanabilirliği hakkında bilgi sağlar.)

Eşdeğer tam yüklenme saatleri elde edilir. (RES performansına genel bir bakış sağlayan bir diğer önemli parametre, eşdeğer tam yük saatleridir (ETYS). Bu parametre, KF değeri bir yıldaki toplam saat sayısı ile çarpılarak elde edilir.)

Tüm bu parametreler hesaplandıktan sonra fizibilitenin teknik olarak uygulanabilirliği dışında ayrıca ekonomik anlamda bir fizibilite değerlendirmesi yapma adına tüm finansal kriterler analiz edilmelidir. Bu ekonomik model temel olarak, enerji satışından elde edilen toplam gelirler, gerekli yatırımlar ile ilgili sermaye maliyetleri, işletme ve bakım maliyetleri ve projede yer alan amortisman, finans ve kurumlar vergisi maliyetleri dikkate alınarak belirlenmektedir.

İlk olarak türbinin yıllık elektrik üretimi ($YEÜ$) ve elektriğin spot fiyatı (φ_{el}) üzerinden yıllık toplam gelir (YTG) elde edilir (Denklem 1.3). Bu veri t zaman domeninde n günlük referans süre bazında elde edilir. (Ek olarak, eski varlıkların (türbin, malzeme vs.) satışından elde edilen gelir, projenin başlangıcında ve dikkate alınan yaşam sonu stratejisine göre dahil edilir.)

$$YTG_t = \sum_{i=1}^n YEÜ_{i,t} \times \varphi_{el} \quad (1.3)$$

Yıllık sermaye (YSM), işletme ve bakım maliyetleri ($YİM - YBM$) üzerinden yıllık toplam maliyetler (YTM) elde edilir (Denklem 1.4). Sermaye maliyetleri (YSM), eski ekipman ve bileşenlerin sökülme maliyetleri, yeni ekipmanın satın alma maliyetleri, inşaat mühendisliği maliyetleri, elektrik altyapı maliyetleri, mühendislik ve denetim maliyetleri ve beklenmedik durum maliyetleri eklenerek elde edilir.

$$YTM_t = YSM_t + YİM_t + YBM_t \quad (1.4)$$

İşletme maliyetleri ($YİM$), RES'i işletmek için gereken tüm yıllık maliyetleri içerir.

Bakım maliyetleri (YBM), rüzgâr türbinlerinin bakımı ve elektrik altyapısının bakımı dahil olmak üzere RES'in bakımı için gereken tüm yıllık maliyetleri toplar.

Ardından yıllık amortisman maliyeti (YAM) elde edilir ve bu maliyet dikkate alınan standart süre sonunda RES'in öngörülebilir hurda değerine bağlıdır. Doğrusal bir yıllık amortisman, toplam sermaye maliyetleri üzerinden bir yüzde oranı (γ_{amort}) olarak kabul edilmektedir.

Bunun akabinde yıllık finansal maliyet elde edilir. Yıllık finansal maliyetler (YFM), bir kredi tarafından finanse edilen toplam finansman sermayesine (TFS) bağlıdır (Denklem 1.5). (YFM), sabit bir faiz oranı (f_o) ve tanımlanmış sayıda m yıllık bir geri ödeme süresi dikkate alınarak tahsis edilmektedir. Burada (YGF), yıllık geri ödeme fiyatını temsil etmektedir ve Denklem 1.6'da hesaplaması gösterilmektedir.

$$YFM_t = TFS \times YGF(f_o, m) \quad (1.5)$$

$$YGF(f_o, m) = \frac{f_o(1 + f_o)^m}{(1 + f_o)^m - 1} \quad (1.6)$$

Sonrasında kurumlar vergisi maliyetleri (KVM) elde edilir. (KVM, vergi öncesi yıllık kazanca sabit bir vergi (v_x) uygulandığında yıllık maliyet olarak kabul edilmektedir.)

Ardından enflasyon oranı (e_o) elde edilir. (RES'in standart süre üzerindeki nakit akışının (N_a) hesaplanmasında, RES'in işletilmesiyle ilgili tüm gelir ve giderlere bir enflasyon oranı göz önünde bulundurulmakta ve uygulanmaktadır.)

Akabinde ömür sonu stratejilerinin karlılığını değerlendirmek için net bugünkü değer (NBD), iskonto edilmiş karlılık oranı (İEKO), iç verim oranı (İVO) ve geri ödeme süresi (GÖS) olmak üzere farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ek olarak, seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (SEM) değerlendirilir.

NBD, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi, RES'in standart yaşam süresi üzerinden gelecekteki girdi ve çıktı verilerinin tahmini dikkate alınarak (N_a) ve ağırlıklı ortalama sermaye maliyetine (AOSM) eşit bir iskonto oranı uygulanarak hesaplanır (Denklem 1.7 ve 1.8). NBD pozitif ise proje uygundur. (SÖ: Standart Ömür)

$$NBD = \sum_{t=0}^{t=S\ddot{o}} N_a (1 + AOSM)^{-t} \quad (1.7)$$

$$N_a = (YTG_t - YTM_t - YAM_t - YFM_t) \times (1 - v_x) + YAM_t \quad (1.8)$$

Burada ağırlıklı ortalama sermaye maliyeti (AOSM) hesaplanır (Denklem 1.9). (AOSM, borcun ağırlığının (b_a), borcun maliyetinin (b_m), özkaynak ağırlığının ($\ddot{o}k_a$) ve özkaynak maliyetinin ($\ddot{o}k_m$) fonksiyonu olarak değerlendirilir.)

$$AOSM = b_a b_m (1 - v_x) + \ddot{o}k_a \ddot{o}k_m \quad (1.9)$$

Burada, borç maliyeti ve özkaynak maliyeti risksiz oran (r_o), borç risk primi (BRP), ülke risk primi (ÜRP), kaldıraçlı öz sermaye beta (β_1), ve piyasa primi (p_p) aşağıdaki gibidir (Denklem 1.10 ve 1.11).

(BRP, NBD ile ilk nakit akışı (N_a) arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Projenin tüm standart süresi için peşin maliyetlerin iadesini sağlar.)

$$b_m = r_o + BRP + ÜRP \quad (1.10)$$

$$ök_m = r_o + \beta_1 p_p + ÜRP \quad (1.11)$$

(İç Verim Oranı (İVO), Denklem 1.12'de gösterildiği gibi, NBD'yi sifıra eşitleyen iskonto oranı ile hesaplanır. İVO, AOSM değerinden büyükse projeye yatırım yapılabilmektedir.)

$$NBD_0 = \sum_{t=0}^{t=SÖ} N_a (1 + İVO)^{-t} = 0 \quad (1.12)$$

GMY, kümülatif nakit akışlarının hesaplanmasında zaman etkisi dikkate alınarak, projenin peşin maliyetlerinin geri kazanılması için gereken minimum yıl sayısını ifade etmektedir. GMY ne kadar kısa olursa, proje o kadar çekici olur (Denklem 1.13). ($N_{a,u}$ indirimli nakit akışını temsil etmektedir.)

$$\sum_{t=0}^{t=GMY} N_{a,u} = 0 \quad (1.13)$$

Son olarak, SEM, RES'in yaşam süresi üzerindeki tüm yatırım ve işletme maliyetlerini hesaba katmaktadır (Denklem 1.14).

$$SEM = \frac{TSM + \sum_{t=1}^{t=SÖ} YİM(1 + AOSM)^{-t}}{\sum_{t=1}^{t=SÖ} \sum_{i=1}^n YEÜ_{i,t}(1 + AOSM)^{-t}} \quad (1.14)$$

Ayrıca belirtmekte fayda var ki, türbine özgü güç eğrisi, saatlik rüzgâr hızı gibi verilerle elde edilen ve iz etkileri (wake effect), türbin kullanılabilirliği ve teknik

verimliliği kapsayan beklenen elektrik verimine dayalı olarak, eski türbinlerin her bir konumu için standartlara göre saha kalitesi hesaplanmaktadır. Sonrasında bu veriler hem kullanım ömrü uzatma hem de yeniden güçlendirme projeleri için sermaye harcamalarını (Capex) ve işletme harcamalarını (Opex) elde etmek için kullanılmaktadır.

Yukarıda sırayla izlenilmesi gereken ekonomik analiz adımları ve verilen tüm bu mali kriterler her proje özelinde değerlendirilmeli ve çalışma fizibilitesinin ekonomik olarak uygun olup olmadığı kararına varılmalı ki ona göre gelecek yatırımlar şekillenmelidir.

Son olarak bu çalışmalara etki edebilecek bir diğer unsur yerel toplulukların görüşleridir. Belli başlı sebeplerden ötürü yerel halk bölgede yeniden güçlendirme çalışmalarını veya diğer ömür sonu stratejilerin projelerini engelleyebilmektedir veyahut aksine destekleyebilmektedir. Keza aynı sahada gerçekleşecek yeni projeler o bölgede yaşayan yerel insanlar için yeni iş anlamında fırsatlar oluşturabilmektedir.

1.4. Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Potansiyel Etkileri ve Sonuçları

Rüzgâr enerji santralleri faydalı ömürlerinin sonunda şu ana kadar yapılan uygulamalardan gözlemlendiği üzere pek çok çeşitli pozitif etkiler ortaya çıkmıştır, ancak elbette bunun yanında bazı olumsuz yönde dikkat çeken hususlar da söz konusudur. Bu kısımda bu tarz çalışmaların ortaya çıkardığı tüm bu etkiler ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Öncelikle bazı olumsuz yönleri belirtmek gerekirse, ömür uzatma senaryolarında, özellikle yeniden güçlendirmede mevcut sahada yeni bir proje tasarımı ve modellenmesi, yeni lisans ve sözleşme yenileme ve değiştirme gibi çeşitli standart işlemlerin tekrarlanması ve hatta belki de bu süreçlerin daha farklı ve daha karmaşık bir hal almasına yol açabilmektedir. Ancak elbette ki bu dezavantaj bu tarz çalışmalara yönelimin yakın sürede başladığından ve çok eski bir dayanağı olmadığından kaynaklanmaktadır. Zira belli bir zamandan sonra projeye dayalı resmi ve bürokratik süreçlerin işleyişinin daha basit olması beklenmektedir.

Bu hususun yanında yeni türbin teknolojisi ile güçlendirilmiş santrallerde bazı elektriksel bileşenlerden kaynaklı olarak yüksek harmonik bozulma meydana gelebilmektedir ki bu şebekenin dengesini bozmaktadır, lakin bu durum yeni nesil güç elektroniği ekipmanları ve harmonik filtre tasarımları ile bir sorun olmaktan kolaylıkla çıkabilmektedir.

Farklı bir boyuttan, bu tarz çalışmaların ortaya koyduğu bir diğer olumsuz yön de artan türbin boyutunun kuşların hava sahasını daha fazla ihlal etmesi ve dolayısıyla kuş ölümlerinin artması durumu ve ayrıca mevcut sahanın görüntüsünün yerel halk tarafından rahatsız edici olmasıdır.

Tüm bu ortaya çıkabilecek negatif etkilerin yanı sıra bu tarz yaşam sonu stratejilerinin uygulanması üzerine ortaya çıkan oldukça fazla sayıda olumlu sonuç vardır. Şayet günümüze kadar bu çalışmaların son derece arttığı düşünüldüğünde aksi durum pek de mantıklı gelmeyecektir.

Yeniden güçlendirme senaryolarında, özellikle tam yeniden güçlendirme sonucunda son teknoloji yüksek kapasite faktörlerine sahip türbinlerin kullanımıyla birlikte rüzgâr enerji santralının ürettiği enerji miktarının, santral performansının ve veriminin artması bu çalışmaların en büyük artılarından. Bu üretim artışı teknik olarak daha önce de bahsedildiği üzere hem daha yüksek kapasite faktörüne sahip türbin kullanımından hem de daha uzun kanatların oluşturacağı daha geniş süpürme alanından kaynaklanmaktadır. Ayrıca daha uzun kanatların daha yüksekte olan rüzgârı yakalaması ve bunun üzerine rüzgâr hızının da enerji üretim değerinde önemli bir parametre olduğu düşünüldüğünde enerji üretim değeri çok daha yüksek seviyelere gelebilmektedir.

Faydalı ömür uzatma veya kısmi yeniden güçlendirme çalışmalarında şüphesiz ki bu enerji üretim değeri tam yeniden güçlendirmede çıkan değer kadar olmamaktadır lakin, yine de türbin verimini önemli ölçüde artıran bileşenlerin eklenmesi ve daha yeni ekipmanların monte edilmesi ile enerji üretimi çok ciddi bir artışa da gelebilmektedir. Zira bazı deneyimlerde bu durum net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Buna ilaveten yeniden güçlendirmede teknik olarak yine son teknoloji türbin kullanımının getirdiği diğer önemli avantajlar, yeni nesil türbinlerin şebeke

entegrasyonuna daha uyumlu halde dahil olacak şekilde tasarlanmış olmaları ve de yeni nesil türbinlerin öncekilere nazaran daha güvenilir ve daha az bakım gerektirmeleridir. Ayrıca belirtmek gerekir ki, yeniden güçlendirme yoluyla güncellenen santralin daha düşük bir reaktif güç tüketimine ve daha az gerilim değişimine sahip olması potansiyel artırlardır. Kısmi yeniden güçlendirme veya faydalı ömür uzatma seçeneğinde tam yeniden güçlendirmeye kıyasla, yeni nesil türbin değil ama yine de yeni nesil türbin elemanları kullanılıyor olduğundan, yani özellikle gelişmiş kontrol mekanizmaları ve en yeni sensörler doğrultusuyla aynı sahada benzer pozitif etkiler yakalamak pek olasıdır.

Tam yeniden güçlendirme ile mevcut sahada yer alan türbin adedinde bir azalış meydana gelebilmektedir. Bu durum, türbinlerin arasındaki mesafenin daha da artmasıyla ve buna ilaveten uygun bir mikro konumlandırma ile türbinlerde rüzgâr türbülans ve iz etkisini azaltarak santralin performansını yükseltmektedir. Bu pozitif etki diğer yaşam sonu stratejilerinde meydana gelmemektedir, zira diğer yaşam sonu stratejilerinde türbinlerin sökülmesi ve yeni türbin montajı durumu söz konusu değildir.

Toplam kurulu gücü korumaya yönelik yapılacak bir yeniden güçlendirme çalışmasında tamamen olmasa da belli bir oranda mevcut elektriksel ve inşaat altyapısından faydalanılabilmektedir. Ancak toplam kapasitenin artması durumunda mevcut altyapının kullanımının oranı da muhakkak ki daha düşük olmaktadır. Kuşku yok ki, kısmi yeniden güçlendirmede ve ömür uzatma opsiyonunda ise bu altyapılar daha büyük oranda değerlendirilmektedir. Zira bu uygulamalarda gerçekleşen çalışmalar çok kapsamlı olmamaktadır.

Buna ek olarak çalışmaları yürürlükte olan mevcut santralin yıllardır işletimde olması, o sahanın tüm koşullarının ve o sahadaki rüzgâr kaynağının iyi bilinmesi hizmetten çıkarma hariç tüm yaşam sonu stratejilerinde devam edecek potansiyel çalışmalarda santral enerji üretim verilerinin daha iyi bir şekilde tahmin edilmesini de sağlayarak çok önemli bir avantaj sunmaktadır.

Mevcut sahanın ilerleyen zamanlarda bir yaşam sonu senaryosu üzerinden değerlendirilmesi saha koşullarının iyi bilinmesinden kaynaklı teknik artılar

kazandırmanın yanı sıra aynı zamanda proje yatırım maliyetini ve proje riskini de düşük tutmaktadır. Bunların sebebi daha önceden de bahsedildiği üzere mevcut altyapı ve sistemlerin belli oranda kullanımına devam edilmesi ve sözleşme ve izin prosedürlerinin daha önceden tecrübe edilmesidir.

Bu finansal etkiler dışında eklenecek bir diğer pozitif sonuç, son teknoloji yeni nesil türbinlerin kullanımıyla beraber rüzgâr santralinde işletme ve bakım maliyetlerinin ciddi bir şekilde düşmesidir. Elbette ki bu etki tam yeniden güçlendirme yapıldığında daha yüksek olmaktadır ancak yine de mevcut türbinlerde sadece yeni bileşenler kullanımıyla da bu maliyetler belli bir oranda düşüş yaşamaktadır.

Bir diğer önemli husus esasında ömür uzatma stratejilerinden hangisinin daha fazla getirisi olacağını analizidir. Bu doğrultuda belirtmek gerekir ki kısmi yeniden güçlendirme veya ömür uzatma çalışmaları, kullanılan ekipman ve yapılan yatırımlar dolayısıyla tam yeniden güçlendirmeye kıyasla daha düşük maliyette olabilmektedirler lakin, tam yeniden güçlendirme yoluyla çalışmalarına devam edilen rüzgâr santralinde enerji üretim verilerinin çok daha fazla artış göstermesi ve ideal bir teşvik mekanizması, makul bir kredi geri ödeme planı, yüksek bir elektrik piyasa fiyatı gibi optimum finansal etkenlerle çok yüksek finansal bir getiri kazanılması çok muhtemel bir sonuç olabilmektedir. Dolayısıyla yatırımcı bazında kısa veya uzun vadede bu planlar muhakkak ki derin bir şekilde analiz edilmelidir ki ona göre bir politika belirlensin.

Tam yeniden güçlendirme ile geliştirilen sahada ekonomik anlamda mevcut türbinlerin sökülmesinden kaynaklı olarak bir maliyet (Decex) oluşmaktadır. Fakat bu sökme maliyetini tolere etmek için bazı yöntemlere gidilebilmektedir. Bunlardan ilki sökülen türbinleri ve bileşenleri geri dönüştürerek değerli atığın değerlendirilmesinden kaynaklı finansal getiri sağlamaktır. Bunun yanı sıra hem endüstride ikincil bir pazar oluşturup dünya ekonomisine katkı sağlamak ve temiz enerjiye yönelimin tüm dünyada artmasını sağlamak için hem de bireysel olarak daha fazla kazanç elde etmek amacıyla türbinlerin farklı ülkelere satılması opsiyonudur. Bu durum teknik ömrü sona eren bir türbin için pek mümkün değildir, lakin temel olarak bir süre daha çalışabilecek seviyede olan türbinler için kesinlikle bir seçenek oluşturmaktadır.

Faydalı ömür uzatmada ise demonte edilen veya kullanımına devam edilmeyecek olan türbin bileşenleri de projeye ekonomik anlamda bir artı getirmesi amacıyla ikinci el olarak satılabilmektedir veya geri dönüştürülerek de mali kazanç elde edilebilmektedir. Örneğin bir ömür uzatma veya kısmi yeniden güçlendirme çalışması neticesinde sökülen türbin kanatlarının geri dönüştürülme yoluyla mali bir katkı vermesi söz konusu olabilmektedir.

Aynı zamanda mevcut sahada çalışma faaliyetlerine hizmetten çıkarma hariç diğer yaşam sonu planlarıyla devam edilecek olunması o bölgede elde edilen belediye arazilerinden gelen vergi gelirleri gibi bazı yerel gelirlerin de devamlılığını sağlayacaktır.

Bireysel anlamda ekonomik etkinin yanı sıra toplum ekonomisine katkı olarak sökülen türbinler bazı yerel topluluklara bağışlanabilir ve sökülen türbin ekipmanları okul vb. eğitim kurumlarına veya farklı kurumlara bağışlanabilir. Böylelikle bazı yerel topluluklar tarafından bile temiz enerji üretimine yönelik girişimler gerçekleştirilebilir ve bu topluluklar finansal getiriler elde edebilirler. Ayrıca bu doğrultuda öğrencilerin ve halkın rüzgâr enerjisine ve yenilenebilir enerji üzerine olan eğilimleri ve bilgileri artacaktır ve gelecekte bu alanda çok daha fazla projeler yapılabilecektirler.

Tüm bu mali etkilerin ışığında vurgulanmalıdır ki, ekonomik artılar çalışmaların sürdürülebilirliği açısından çok önemlidir, şayet çalışmanın ekonomik bir artı getirememesi veya kâr payının düşük olması bu uygulamaların fizibilitelerini yok etmektedir.

Ayrıca çevresel açıdan da bu çalışmaları değerlendirmek gerekmektedir. Bu bağlamda yeniden güçlendirme yoluyla rüzgâr santrallerinin temiz enerji üretme kapasitesinin artması genel bir çevresel kazanç sağlamanın yanı sıra ülkelerin temiz enerji kullanımını artırma ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik politikalarına destek vermektedir. Ömür uzatma ve kısmi yeniden güçlendirme opsiyonlarıyla ise bu çevresel etki daha düşük olmaktadır.

Tam yeniden güçlendirme ile mevcut sahada kullanılan fazla miktarda olan türbinler yerine yeni jenerasyon, büyük güçte ve az sayıda türbin kullanımıyla sahanın peyzaj kalitesi de artmaktadır. Ek olarak belirtildiği üzere türbin adedinin azalmasıyla türbin

ve kanatlara çarpacak kuş adedinin de yüksek oranda azalması öngörülebilir ki bu bazı bilim adamlarınca gözlemlenen bir olgu olmuştur. Bu türbinlerin ayrıca daha düşük bir gürültü seviyesine sahip olması da diğer bir pozitif sonuçtur.

Mevcut altyapının korunduğu durumlarda sahada elektrik ve inşaat işlerinin azalması dolayısıyla çevresel anlamda dezavantajlar da azaltılmaktadır, lakin altyapının çoğunun değiştirilmesi gereken çalışmalar söz konusu olduğunda bu çevresel etkiler olumsuz yönde artabilmektedir. Bu özellikle tam yeniden güçlendirmede değerlendirilen bir husustur.

Son olarak bu kısımda en başta olumsuz bir etki olarak belirtilen mevcut sahada proje izin, sözleşme ve lisanslama işlemlerinin olumlu yönlerini söylemek gerekir. Sektör deneyimleri göz önüne alındığında pek çok yatırımcı açısından bir dezavantaj haline gelen bu proje izin, lisans alma gibi idari işlemlerin süreleri bazen çok uzun olabilmektedir ve proje sahipleri açısından can yakıcı bir hal almaktadır, ancak daha önceden tüm bu aşamaların başarılı bir şekilde izlendiği ve uygulandığı mevcut santrallerde yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi çalışmaların sürmesi bu resmi süreçlerin daha kısa sürede tamamlanacağına bir katkı sağlayabilmektedir. Bu aşamada tüm bu bürokratik ve idari işlemlerin takibini sürdüren kuruluşların da bu manada daha hızlı ve sağlam adımlar atmasıyla tüm bu işlemler çok daha başarılı ve kısa sürede tamamlanabilmektedir.

Kısaca özetlemek gerekirse faydalı ömür uzatma ve kısmi yeniden güçlendirme çalışmalarında lisanslama ve izin işlemleri tam yeniden güçlendirmeye kıyasla daha çabuk ve basit olacaktır. Zira tam yeniden güçlendirme esasında bir bakıma yeni bir santral kurma çalışmasına çok benzerdir. Dolayısıyla bu süreç tam yeniden güçlendirmede biraz daha uzun sürebilmektedir, fakat mevcut sahada önceden bu proseslerin izlenilmiş olması ve önceki işlemlerin başarılı takibi gelecek yatırımlarda daha hızlı adımlar atılmasına olanak sağlayabilmektedir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ ANALİZİ

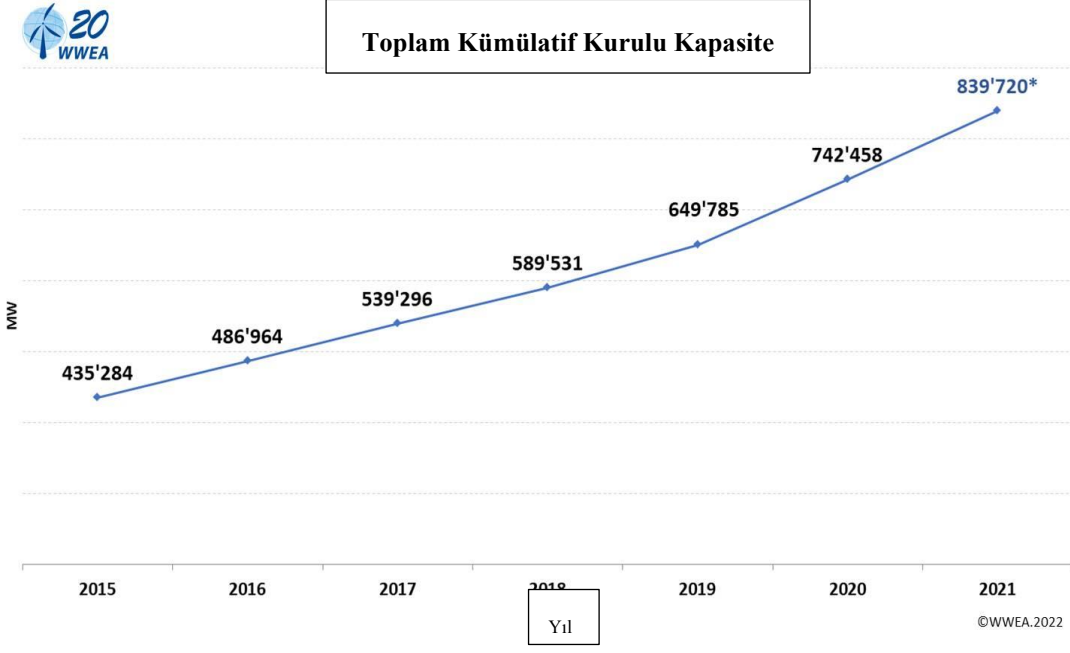
Çalışmanın bu kısmında tüm dünyada rüzgâr enerjisi üzerine olan gelişmelerin ve politikaların değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda ülkelerin kendi gündemlerine aldıkları hususlar analiz edilmiştir. Dünyada çalışmaları süren rüzgâr enerji santrali yaşam sonu stratejileri irdelenmiştir, özellikle kara rüzgârında yeniden güçlendirme çalışmalarının somut verilerle ayrıntılı analizleri yapılmıştır. Keza Türkiye açısından da genel olarak rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Yaşam sonu stratejilerinden daha çok yeniden güçlendirme üzerine durulmuş ve Türkiye'nin yeniden güçlendirme potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu bağlamda Türkiye bazında genel bir analiz yapılmıştır.

2.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi

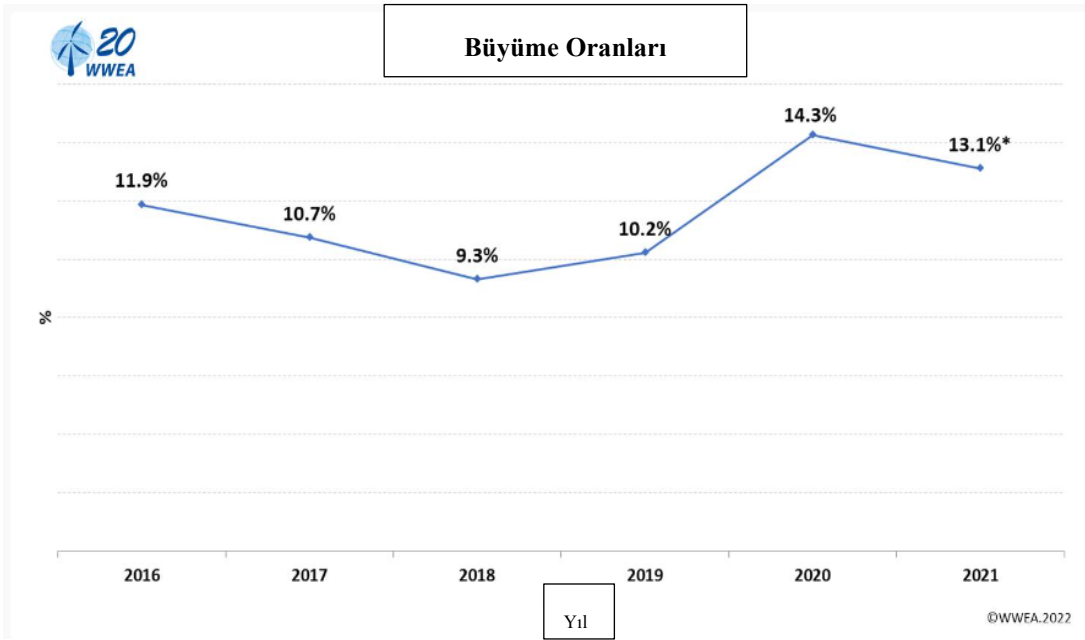
Rüzgâr enerjisi 1990'lı yılların başından beri tüm dünyada özellikle başlangıçta Avrupa'da olmak üzere çok önemli bir enerji yatırım kaynağı olmuştur. Günümüze kadar tüm dünyada bu alanda oldukça fazla sayıda projeler yürütülmüş ve faaliyete geçmiştir ve hatta bu çalışmalara yönelimde bulunmayan gelişmiş veya gelişmekte olan ülke neredeyse kalmamıştır.

İstatiksel verilere dayanarak son 5 yılda tüm dünyada rüzgâr enerjisi kapasitesi yaklaşık olarak 310 GW artış göstermişken son 6 yılda bu değer yaklaşık olarak 405 GW olarak gözlemlenmiştir. Dolayısıyla açıkça anlaşılabilir ki, dünyada 2021 yılı toplam eklenen rüzgâr enerjisi kapasite değeri %13,1'lik bir büyüme ile yaklaşık 97 GW olmuştur. 2022 yılı başındaki veriler göz önüne alındığında dünyada rüzgâr enerjisi toplam kurulu güç değeri ise yaklaşık 840 GW'a ulaşmıştır. Ayrıca belirtmek gerekir ki, bunların 775 GW'lık kısmı kara rüzgâr projelerindedir, geri kalan yaklaşık yüzde 8'lik kısım deniz üstü rüzgâr enerjisi projelerine aittir.

Rüzgâr enerjisinde bu değişimleri ve en güncel verileri Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'ten görmek mümkündür [30].



Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisinde son 7 yılda dünyadaki toplam kümülatif kapasite [30].



Şekil 2.2. Rüzgâr enerjisinin son 7 yılda dünyadaki toplam büyüme yüzdesi [30].

Ülke/Bölge	2021	Yeni Kapasite 2021	Büyüme Oranları 2021	2020	2019	2018
China*	343'829	55'800	19.4%	288'029	236'029	209'529
United States***	134'846	12'518	10.2%	122'328	105'433	96'363
Germany	63'924	1'716	2.8%	62'208	61'357	59'313
India	40'100	1'475	3.8%	38'625	37'529	35'129
Spain	28'196	750	2.7%	27'446	25'808	23'494
United Kingdom	26'812	2'645	10.9%	24'167	23'515	20'743
Brazil**	21'365	3'355	18.6%	18'010	15'452	14'707
France	19'081	1'132	6.3%	17'949	16'646	15'313
Canada	14'304	677	5.0%	13'627	13'413	12'816
Sweden	12'097	2'175	21.9%	9'922	8'985	7'406
Rest of the World*	135'166	15'019	12.5%	120'147	105'618	94'719
Total*	839'730	97'272	13.1%	742'458	649'785	589'547

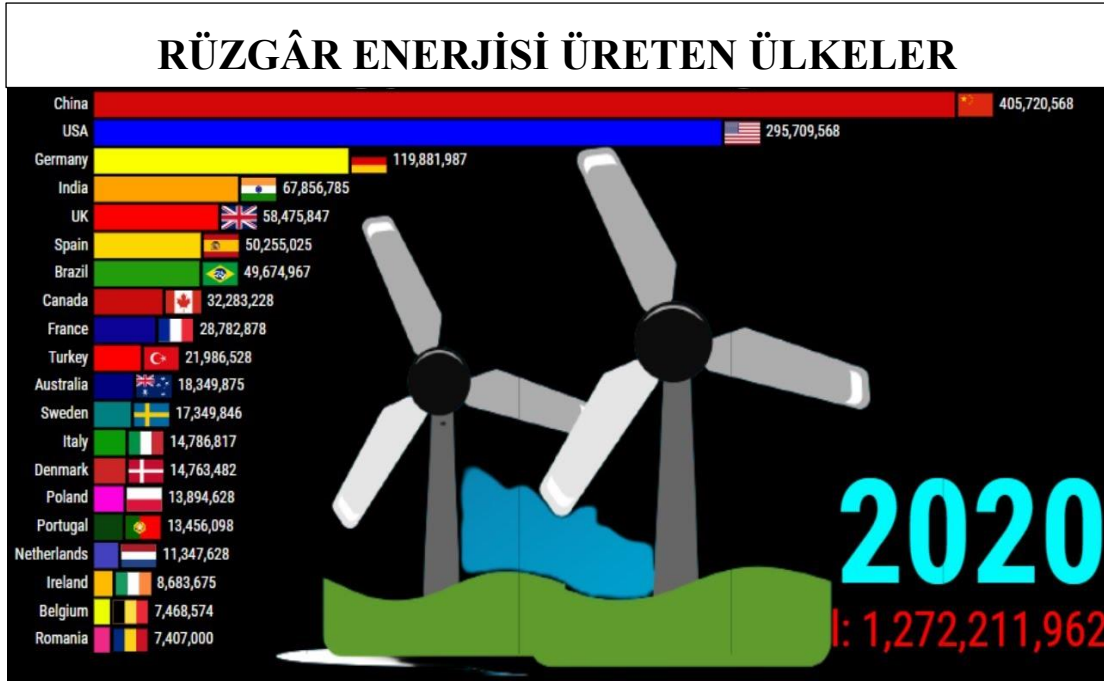
* Preliminary, ** By November 2021, ***excl. Puerto Rico

©WWEA.2022

Şekil 2.3. Rüzgâr enerjisinde öncü ülkelerin son 4 yıldaki rüzgâr kapasite verileri (2021 yılı eklenen rüzgâr gücü, 2021 yılı rüzgâr enerjisi artış yüzdesi ve toplam kapasite) [30].

2015 yılı verilerine göre toplam kurulu güç değeri yaklaşık 435 GW'tı ve bu kapasite değerinin yüzde 40 kadarını AB ülkeleri oluşturmaktaydı, lakin bugüne kadar olan süreçte özellikle Çin Halk Cumhuriyeti, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya ve Hindistan gibi ülkelerin kapasitelerini inanılmaz arttırdıklarından bu oran yüzde 25-30 aralığına kadar düşmüştür.

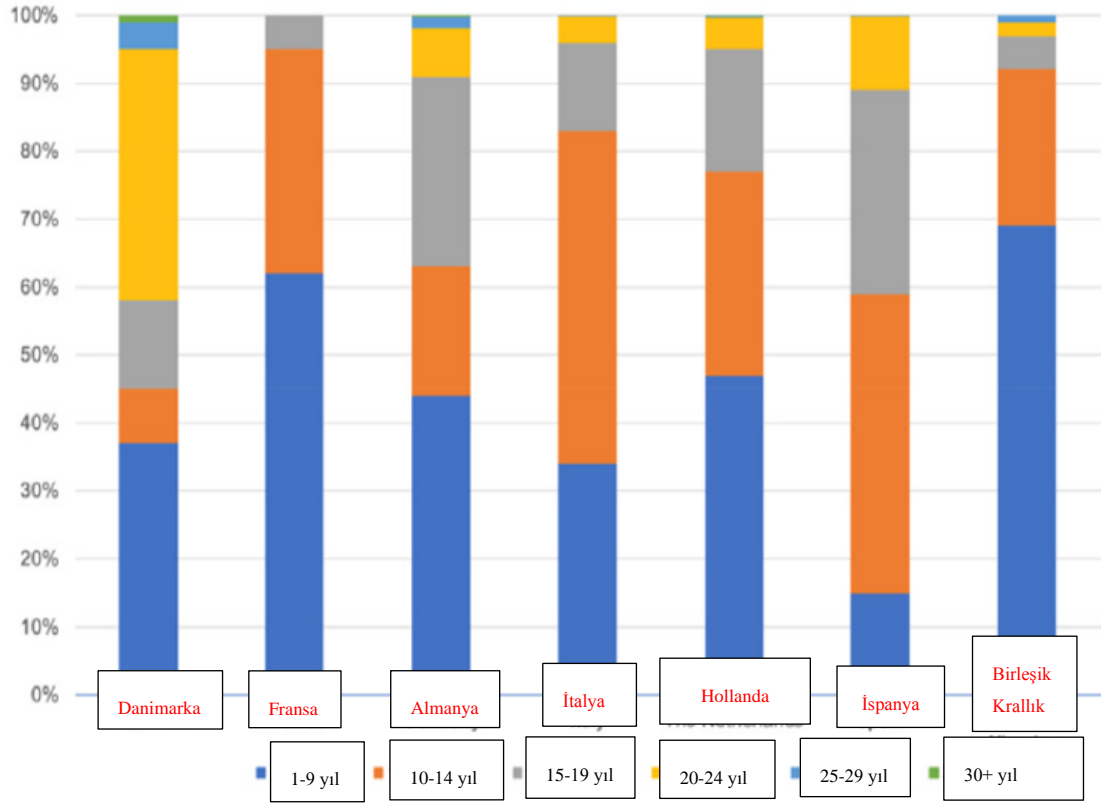
Bu verilere ilaveten 2020 yılı için ülkeler bazında rüzgâr enerji santrallerinde üretilen enerji değerleri MWh/yıl cinsinden gösteren veriler Şekil 2.4'te verilmiştir [31].



Şekil 2.4. Ülkelere göre 2020 yılında rüzgâr enerjisiyle üretilen elektriğin (MWh cinsinden) değerleri [31].

Yukarıda belirtildiği üzere dünyada rüzgâr enerjisine olan yatırımlar her geçen gün inanılmaz artışlar göstermektedir. Zira ülkelerin enerji krizi ile boğuşmasını ortadan kaldıracak yenilenebilir enerji ile temiz enerji ve sürdürülebilir kaynaklar üretmesi çok önemli bir hal almıştır. Nitekim rüzgâr enerjisi bu talebi büyük ölçüde karşılamaktadır. Fakat, farkında olunması gereken bir gerçek var ki, bu zamanla rüzgâr enerji santrallerinin geçerliliklerinin sonuna yaklaşması ve ömürlerinin sonuna gelmesi durumudur.

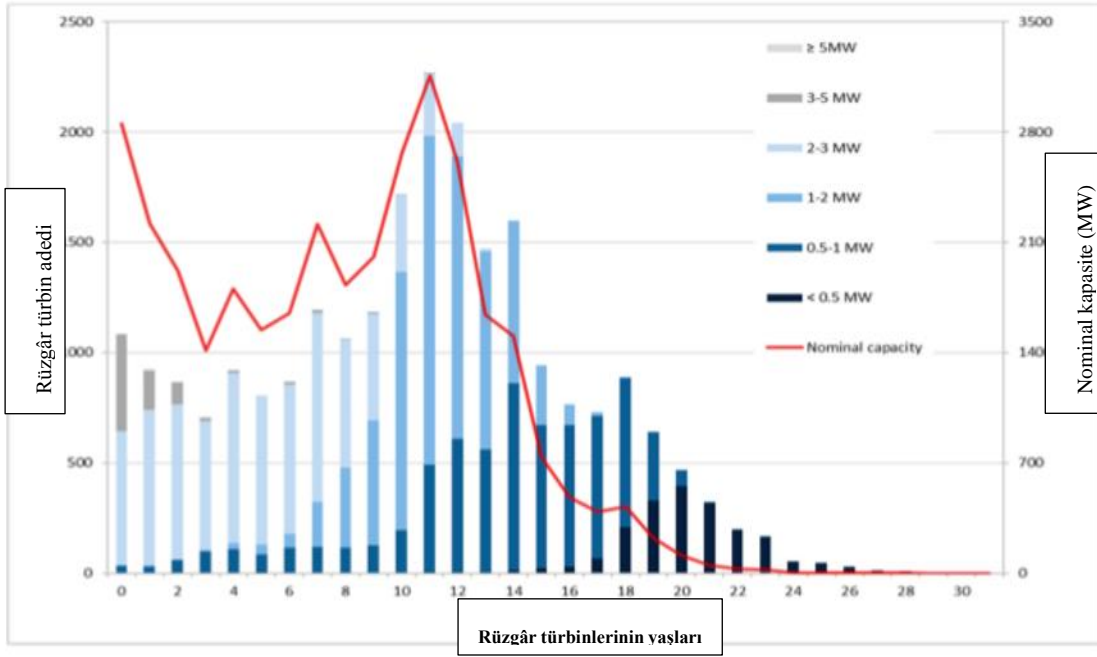
Şekil 2.5 Avrupa'da yer alan bazı ülkelerdeki rüzgâr türbinlerinin yaş dağılımlarını göstermektedir [6].



Şekil 2.5. Avrupa’da en eski rüzgâr türbin kurulumlarına sahip 7 ülkedeki rüzgâr santralleri yaş dağılımı [6].

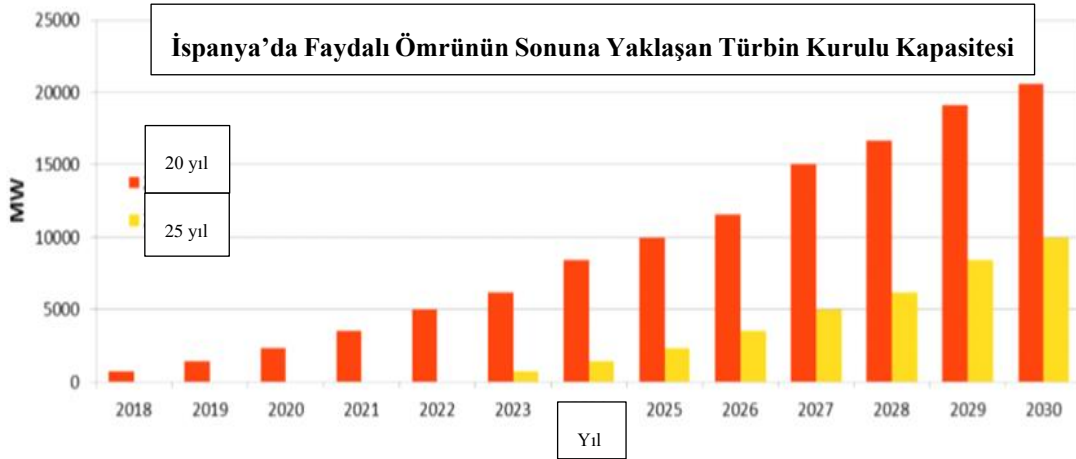
Almanya’da, 2030 yılının sonunda yaklaşık 22 GW’a tekabül eden 16-17 bin kara rüzgâr türbini için, Alman Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yasası’ndan (EEG) temin edilen tarife garantisi fonu sona ermektedir. 2025 yılına kadar bu türbinlerin yarısından fazlasının finansmanı durdurulmakta ve pek çok türbin faydalı ömürlerinin sonuna yaklaşmaktadır. Avrupa genelinde ise 2030 yılına kadar 60.000’den fazla türbin ömrünün sonuna gelinmektedir ve yaklaşık 75 GW toplam kapasitedeki türbinler için tarife garantisi finansmanı son bulmaktadır.

Sıradaki iki görselde (Şekil 2.6 ve 2.7) ise 2018 yılı verilerine göre sırasıyla Almanya’da ve İspanya’da bulunan rüzgâr türbinlerinin yaş-güç çizelgeleri gösterilmiştir [32,33]. İspanya için gelecek tahminler de ifade edilmiştir.



Şekil 2.6. 2018 yılı verilerine göre Almanya'da bulunan rüzgâr türbinlerinin yaş ve güç dağılımı [32].

İspanya'daki rüzgâr enerji santrallerinde toplam kurulu kapasitenin yaklaşık yarısının önümüzdeki 4-5 yıl içinde en az 20 yaşında olacağı ve dolayısıyla rüzgâr santrali işletim ömürlerinin sonuna geldiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca 2021 sonu ile İspanya'da takriben 4 GW'lık kısmın çoktan 20 yılı tamamladığı da görülmektedir.



Şekil 2.7. Yıllara göre İspanya'da ömürlerinin sonuna gelinen veya gelecek olan rüzgâr enerjisi kapasite değerleri [33].

İspanya, Almanya yanı sıra yukarıda Avrupa genelinde bahsedildiği gibi Fransa, Danimarka, İtalya ve Portekiz gibi diğer Avrupa Birliği ülkelerinde de mevcut senaryoları görmek mümkünken Avrupa’da yer almayan ülkelerde de bu durum gözlemlenmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri’nde 2000 yılında yaklaşık 2.5 GW olan rüzgâr enerjisi üretim kapasitesi 2020 yılı sonunda yaklaşık 130 GW’a ulaşmıştır ve bu kapasitenin takriben %30’u minimum 10 yaşına ulaşmıştır. Bu rakam günümüzde 35-40 GW civarındadır.

Brezilya’da ise 1 GW’lık kapasiteye tekabül eden rüzgâr türbinleri önümüzdeki birkaç yıl içerisinde 15 yıldır faaliyette olacakken, bu değer 2035 yılına kadar 15 GW’a kadar yükselecektir.

Şekil 2.8’de 2019 verilerine göre bazı ülkelerdeki rüzgâr enerji kapasitesinin oransal olarak yüzde kaçının ne kadar yaşta olduğu belirtilmektedir [11].

		Danimarka	Almanya	İspanya	AB28	ABD	Çin
2019’da kurulu kümülatif kapasite (GW)		4.4	53.2	23.5	160.7	97.7	206.8
Kümülatif kapasitenin payı							
>	10 yıl	55%	43%	73%	39%	34%	7%
>	15 yıl	53%	26%	27%	17%	6%	0.4%
>	20 yıl	23%	4%	3%	3%	1%	0.2%

Şekil 2.8. Rüzgâr enerjisinde lider ülkelerin 2019 yılındaki kümülatif rüzgâr enerjisi kapasite değerleri ve kapasitelerin yüzde olarak sahip olduğu yaş oranları [11].

Rüzgâr enerjisi çalışmaları neticesinde dünyada zamanla rüzgâr türbinlerinin ömürlerinin ve santrallerin geçerliliklerinin sonuna gelinecek olması dışında gelişen bir durum daha bulunmaktadır. Bu durum zamanla rüzgâr türbin teknolojisinin çok gelişmiş olmasıdır ve halen de çok yeni teknolojilerle gelişecek olmasıdır. Nitekim sadece 30 yıl içinde 50-100 kW’lık kapasiteye sahip makinelerin yerlerini artık

günümüzde 8-10 MW'lık kapasiteye sahip türbinler almaktadır. Bu teknolojik ilerleme yakın gelecekte 20 MW'ı bulacak türbinlerle daha da gelişecektir.

Rüzgâr enerjisi endüstrisinin gün geçtikçe gelişmesi, yeni firmaların ve yeni yatırımların oluşması, rekabetin artması sektöre çok katkı sağlamıştır. Özellikle ekonomik yönden bu katkının sağlandığını vurgulamak gerekir ki zamanla türbinlerin sermaye maliyeti de ciddi oranda azalmalar göstermiştir. Rüzgâr türbini ana ve yardımcı bileşen üretimlerinin gün geçtikçe pek çok ülkede artış göstermesi ve bu pazarların oluşması neticesinde ekonomik anlamda proje geliştiriciler ve yatırımcıların daha uygun fiyatlarla malzeme tedariki etmeleri önemli bir avantajdır.

Bunun yanı sıra aynı zamanda yeni bir gelişme olan Siemens Gamesa Yenilenebilir Enerji (SGRE) firmasının mühendislerinin "RecyclableBlade" adında tamamen geri dönüştürülebilir türbin kanadı tasarımları ve üretmeleri sektör adına çok değerli olmuştur. Zira türbin kanatlarının geri dönüşümü içerdiği malzemelerden (reçine, cam ve karbon fiberleri içeren kompozit malzemeleri) ötürü endüstri açısından bir sıkıntı ortaya koymaktaydı, lakin bu gelişmeyle birlikte ve diğer kanat üretici firmaların yeni tasarımlarıyla birlikte pek çok üretici, yatırımcı firma bu dezavantajı ortadan kaldıracaktır.

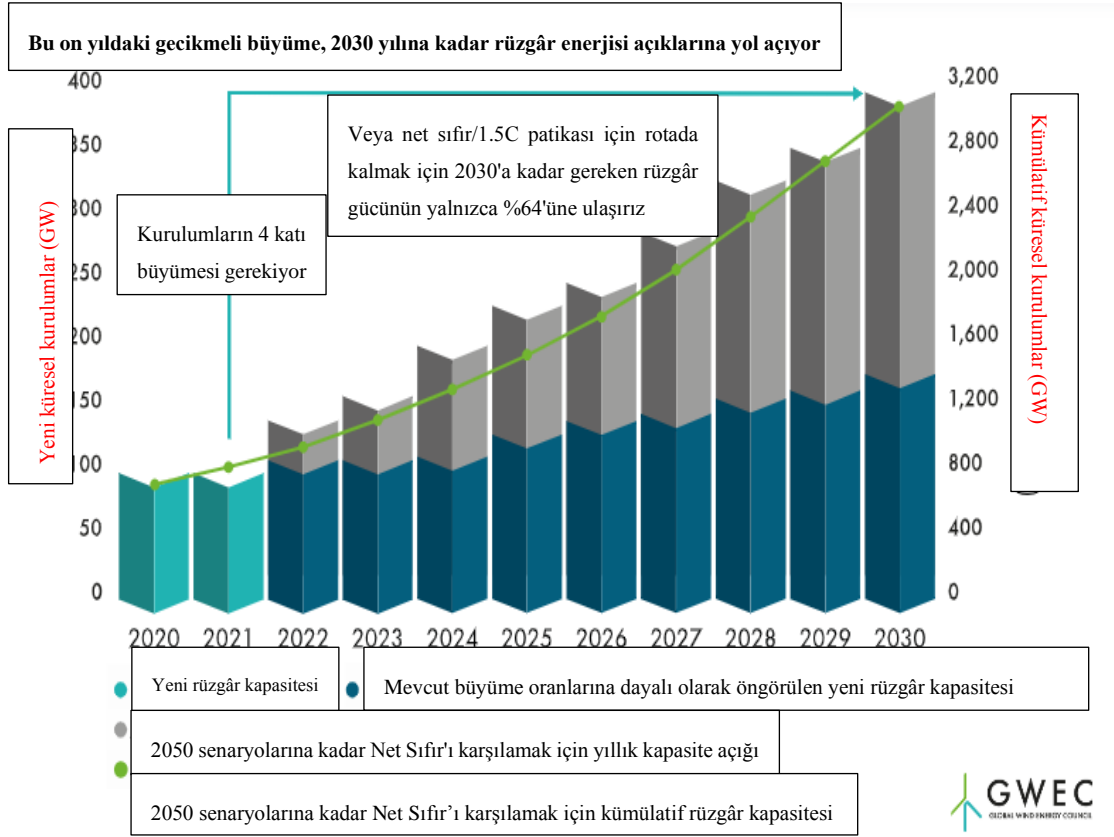
Tüm bu gelişmelerin yanında belirtmekte fayda var ki, ülkelerin kendi rüzgâr enerji yatırımlarını yönlendirecek taktikler ve politikalar da çok önemli bir hal almıştır. Bu doğrultuda oluşan bazı hedefler ve politikalar şu şekildedir;

Almanya ve genel olarak Avrupa Birliği ülkeleri Avrupa Yeşil Anlaşması kapsamında 2050 yılına kadar %100 yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretme hedefi belirlemişlerdir (Net Zero 2050). Bu doğrultuda Almanya'nın 2030 yılına kadar üreteceği elektriğin en az yaklaşık %25'ini rüzgâr enerjisinden sağlaması gerekmektedir ki, bu değer toplam kapasitenin yaklaşık 75 GW'a gelmesi ile gerçekleşecektir.

ABD'de ise Kaliforniya Eyaleti Valisi'nin 2045 yılına kadar tamamen yenilenebilir enerji üretimi yapılmasına yönelik bir açıklaması olmuştur. Bunun yanı sıra ABD Başkanı da ABD'nin 2035 yılına kadar "karbon kirliliği içermeyen bir enerji sektörü"

ve 2050 yılına kadar “net sıfır” hedefleri ile bu rüzgâr enerjisi alanındaki girişimlere ihtiyacının olduğunu vurgulamıştır.

Bu doğrultuda Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi’nin hazırlamış olduğu veriler Şekil 2.9’da net bir şekilde ifade edilmiştir [34].



Şekil 2.9. 2022 verilerine göre tüm dünyadaki kurulu ve kümülatif kapasite değerleri ve gelecek yıllarda Net Zero vizyonunu gerçekleştirmek adına beklenen kapasite miktarları [34].

Tüm bu küresel ve yerel hedeflerin karşılanması amacı, mevcut santrallerin ekonomik ve teknik ömürlerinin sonuna gelinecek olunması ve rüzgâr türbin teknolojisinin son derece gelişmiş olması ile rüzgâr enerjisi yatırımlarında tüm dünyada yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi yaşam sonu stratejileriyle rüzgâr enerjisi üzerine yapılacak yatırımların ve gelecekte projelerin oldukça fazlalaşmasına katkıda bulunması beklenmektedir. Yeni sahalar üzerinden rüzgâr enerjisi yatırımlarını sürdürmek de pek tabidir, hatta bu durum, ülkelerin özellikle net sıfır hedeflerine yaklaşmalarını sağlayacak bir değer olmaktadır, fakat yukarıda bahsedildiği gibi hem

santral ve türbinlerin ömürlerinin sonuna gelinmesi hem de Almanya, Danimarka gibi bazı Avrupa ülkelerinde coğrafi kısıtlamalardan ötürü yeni santral sahası bulma sıkıntısı yeniden güçlendirme ve ömür uzatma çalışmaları penceresinden sektöre gelişim kazandırma yolundadır. Zira WindEurope CEO'su, bugüne kadar geliştiricilerin kısa vadeli planlara daha çok konsantre olduğunu fakat bundan sonra endüstrinin uzun vadeli gelecek yatırımlara özellikle yeniden güçlendirme ile daha fazla odaklandığını vurgulamıştır [35].

Bu doğrultuda bir sonraki kısımda dünyada yaşam sonu stratejilerine bilhassa yeniden güçlendirmeye yönelik atılımlar ve örnek niteliği taşıyan çalışmalar somut verilerle değerlendirilmektedir.

2.1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisinde Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi

Dünyada yeniden güçlendirme 2000'li yılların başında, en eski santralleri bulundurmalarından dolayı Almanya ve Danimarka'da başlamıştır. Zamanla İspanya, İtalya ve Birleşik Krallık gibi diğer büyük pazarlara sahip Avrupa ülkeleri de bu çalışmalara yönelmişlerdir. Ancak günümüzde Avrupa kıtasında yeniden güçlendirme adına en öncü ülkeler, kara sahalarında sahip oldukları eski santral sayıları ve toplam kurulu güç değerlerinin çok fazla olmasıyla Almanya ve İspanya'dır. Sırasıyla iki ülkenin de toplam kurulu güç değerleri 2021 sonu verilerine göre 63.9 GW, 28.2 GW'tır.

Ayrıca belirlemekte fayda var ki, Avrupa'da rüzgâr enerjisi kullanımını destekleyen bir kuruluş olan WindEurope, bu alanda yani yeniden güçlendirme ve ömür uzatma üzerine yürütülecek tüm çalışmaları ve önerileri destekleyeceğini belirtmektedir. Dolayısıyla Almanya, Danimarka ve İspanya gibi öncü ülkelerin tecrübelerinden faydalanarak ve teşvik kurumlarının destekleriyle yeniden güçlendirmenin Avrupa'da oldukça yayılması beklenmektedir.

Avrupa dışındaki ülkelere bakılacak olunursa, ABD özellikle son birkaç yılda yeniden güçlendirme adına inanılmaz adımlar atmıştır. Ömür uzatma kavramını kısmi yeniden güçlendirme olarak nitelendiren ABD'li proje geliştiriciler bu alanda oldukça fazla yeniden güçlendirme uygulaması yürütmüştür. Öte yandan Brezilya, Hindistan ve Çin

gibi diğerk büyük ülkeler de yeniden güçlendirme adına projeler yürütmekteler ve yakın zamanda bu alanda ciddi yatırımlar yapılacağını bildirmektelerdir.

Bu alanda gelişmeler kat eden bazı öncü ülkelerin yeniden güçlendirme ve diğerk yaşam sonu değerlendirmeleri aşağıda genel istatistikler ve bazı örnek uygulamalarla birlikte detaylıca incelenmektedir.

2.1.1.1. Almanya

Bu çalışmada yeniden güçlendirme adına istatistiksel verilerle bir değerlendirme ilk olarak Almanya bazında yapılmaktadır. Zira şu ana kadar en fazla yeniden güçlendirme çalışması yürüten ve bu alanda en geniş pazara sahip olan ülke Almanya'dır. 2021 yılı sonu raporuna göre Alman şebekesine eklenen 1925 MW'lık (484 türbin) toplam kurulum kapasitesinin 244 MW'lık (64 türbin) kısmını yeniden güçlendirme payı oluşturmuştur. 230 türbine tekabül eden 233 MW değerinde kapasite ise faaliyetten çıkmıştır. 2022 yılı ilk yarısı verilerine göre ise şebekeye eklenen 977 MW'lık (238 türbin) toplam kurulum kapasitesinin 133 MW'lık (35 türbin) kısmını yeniden güçlendirme payı oluşturmuştur. 82 türbine tekabül eden 99 MW değerinde kapasite ise faaliyetten çıkmıştır.

Şekil 2.10 ve 2.11'de tüm bu veriler gösterilmiştir [36,37].

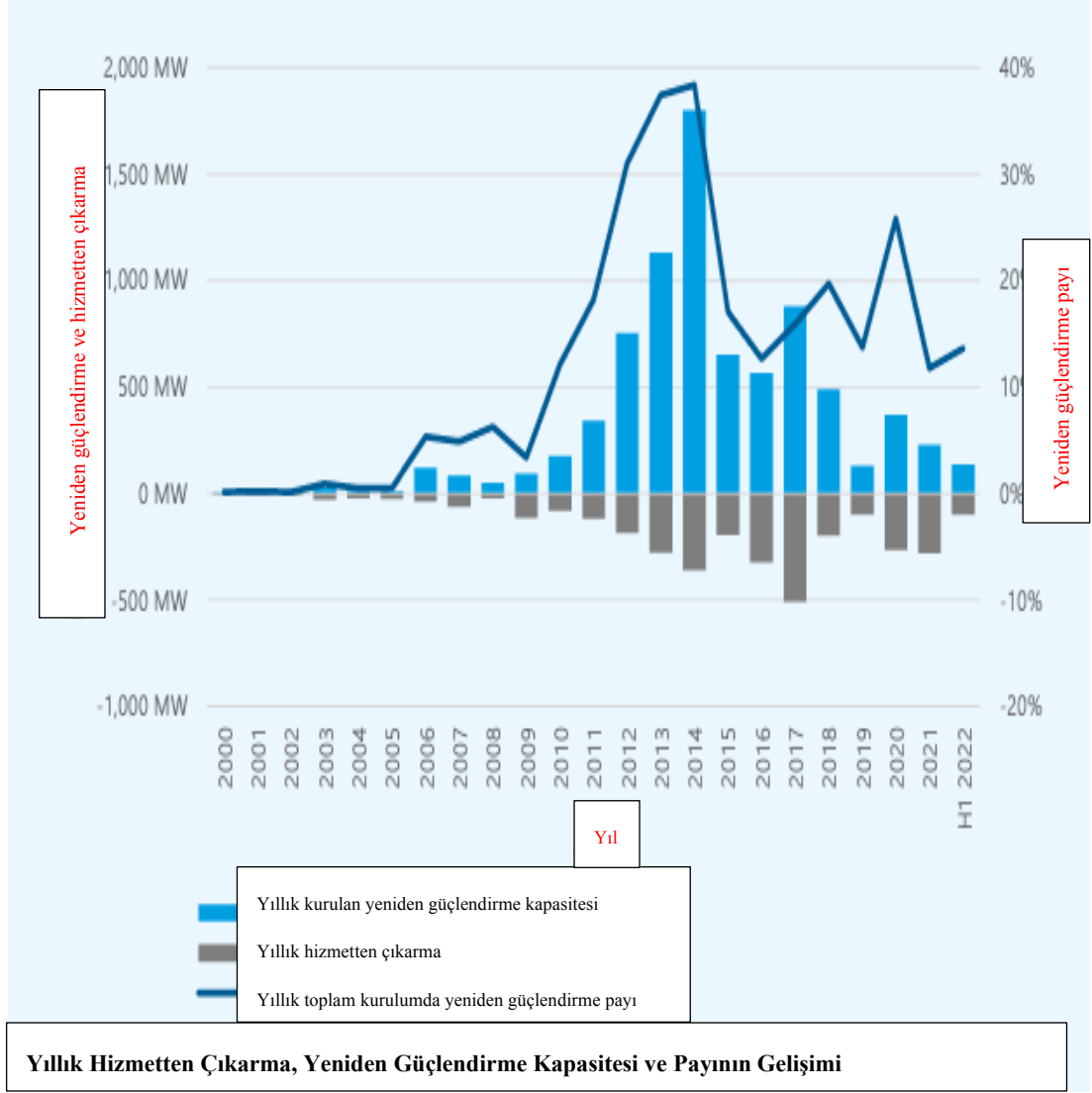
Kara Rüzgâr Enerjisi Gelişiminin Durumu			
		Kapasite	Miktar
Gelişim 2021	Toplam kurulumlar	1,925 MW	484 WTG
	Yeniden güçlendirme payı	244 MW	64 WTG
	Hizmetten çıkarma	233 MW	230 WTG
	Net toplam kurulumlar	1,692 MW	254 WTG
Kümülatif 31-12-2021	Kümülatif portfolyo	56,130 MW	28,230 WTG

Şekil 2.10. Almanya'da 2021 yılı rüzgâr enerjisi projelerinin verileri ve toplam kümülatif kapasite değeri [36].

Kara Rüzgâr Enerjisi Gelişiminin Durumu			
		Kapasite	Miktar
Gelişim 2022 ilk yarısı	Toplam kurulumlar	977 MW	238 WTG
	Yeniden güçlendirme payı	133 MW	35 WTG
	Hizmetten çıkarma	99 MW	82 WTG
	Net toplam kurulumlar	878 MW	156 WTG
Kümülatif 30-06-2022	Kümülatif portfolyo	56,848 MW	28,287 WTG

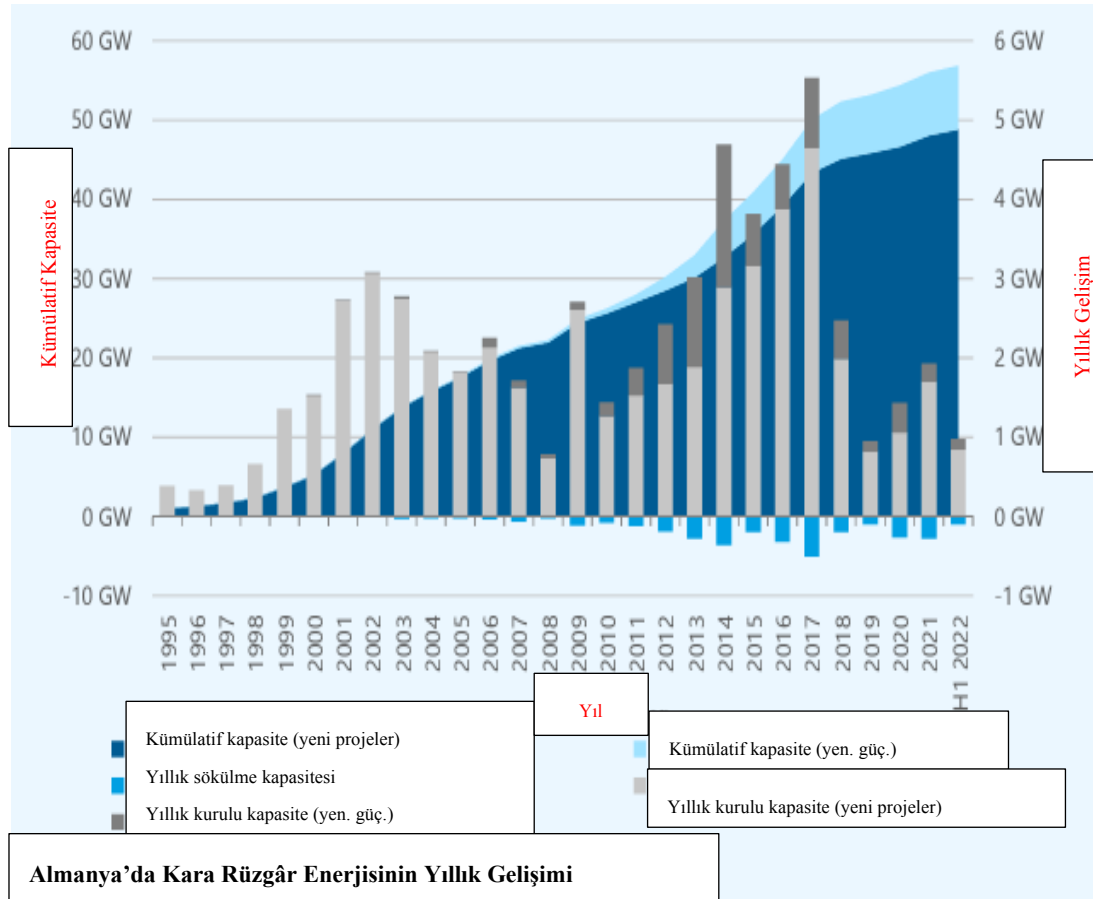
Şekil 2.11. Almanya’da 2022 yılı ilk yarısı rüzgâr enerjisi projelerinin verileri ve toplam kümülatif kapasite değeri [37].

Aynı zamanda Almanya’da yeniden güçlendirmenin brüt kapasite eklemelerindeki payı 2020 yılında yaklaşık %25’lere ulaşmışken 2022 yılı ilk yarısı verilerine göre bu oran %13’e kadar düşmüştür. Almanya bazında geçmişten günümüze kadar olan süreçte yeniden güçlendirme payı ve hizmetten çıkarılan türbinlerin yüzdesi Şekil 2.12’de gösterilmiştir [37].



Şekil 2.12. Almanya’da yıl bazında rüzgâr enerjisi kurulumlarının, hizmetten çıkarılan santrallerin ve yeniden güçlendirilen projelerin kapasiteleri ve yüzde olarak yeniden güçlendirme payı [37].

Şekil 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 ve 2.17’de sırasıyla; Almanya’da yıllara göre yeni rüzgâr santral kurulumları, yeniden güçlendirilen santrallerin gücü ve hizmetten çıkarılan santrallerin gücü; 2022 yılı ilk yarısına göre sökülen ve işletimde olan türbinlerin yaşları; Almanya’da bulunan eyaletlere göre kurulan ve sökülen türbinlerin güçleri ve miktarı ve bunun yanında yeniden güçlendirme payı; Son iki yılda rüzgâr türbin teknik verilerinin ortalama olarak değişimi belirtilmektedir [36,37].



Şekil 2.13. Almanya'da yıllara göre rüzgâr enerjisi kurulumlarının, hizmetten çıkarılan santrallerin, yeniden güçlendirilen projelerin ve toplam kurulu kapasitenin değerleri [37].

Sökülen ve Mevcut Olan Türbinlerin Yaşları					
Yaş (Yıl)	Sökülmüş 2022 ilk yarısı		İşletimde 2022 ilk yarısı		
	Kapasite	Adet	Kapasite	-	Adet
>20 Years, no funding claim (COD ≤ 2001)	38 MW	39 WTG	5,540 MW	-	6,084 WTG
15 - 20 Years (COD 2002 - 2006)	45 MW	35 WTG	11,273 MW	-	7,058 WTG
10 - 15 Years (COD 2007 - 2011)	16 MW	8 WTG	8,374 MW	-	4,218 WTG
5 - 10 Years (COD 2012 - 2016)	0 MW	0 WTG	18,374 MW	-	6,877 WTG
0 - 5 Years (COD 2017 - 2022)	0 MW	0 WTG	13,287 MW	-	4,050 WTG

Şekil 2.14. Almanya'da 2022 yılı ilk yarısı verilerine göre işletimde olan eski sahaların yaşlarının durumu ve sökülün türbinlerin kapasite değerleri [37].

Almanya Federal Eyaletlerinde Toplam ve Net Kurulum, Sökülme ve Yeniden Güçlendirme										
2022 ilk yarısı			Toplam kurulumlar			Sökülme ve net kurulumlar			Yeniden güçlendirme	
Federal Eyaletler	Kapasite Kurulu	Yeni RT sayısı	Yüzde pay	Kapasite Sökülme	Sökülen RT sayısı	Yeni Kurulum	Kapasite Yen. güçl.	Yen. güçl. RT adet	Yen. güçl. payı	
1	Schleswig-Holstein	280 MW	72 WTG	29%	47 MW	33 WTG	233 MW	71 MW	20 WTG	25%
2	North Rhine-Westphalia	187 MW	47 WTG	19%	11 MW	14 WTG	177 MW	17 MW	4 WTG	9%
3	Brandenburg	172 MW	38 WTG	18%	3 MW	3 WTG	169 MW	21 MW	4 WTG	12%
4	Lower Saxony	142 MW	30 WTG	15%	6 MW	8 WTG	136 MW	0 MW	0 WTG	0%
5	Rhineland-Palatinate	42 MW	11 WTG	4%	1 MW	1 WTG	41 MW	8 MW	2 WTG	20%
6	Thuringia	38 MW	9 WTG	4%	2 MW	1 WTG	36 MW	0 MW	0 WTG	0%
7	Saxony-Anhalt	34 MW	9 WTG	3%	28 MW	21 WTG	6 MW	17 MW	5 WTG	49%
8	Mecklenburg-Western Pomerania	30 MW	8 WTG	3%	0 MW	0 WTG	30 MW	0 MW	0 WTG	0%
9	Baden-Württemberg	21 MW	5 WTG	2%	0 MW	0 WTG	21 MW	0 MW	0 WTG	0%
10	Bavaria	9 MW	3 WTG	1%	0 MW	0 WTG	9 MW	0 MW	0 WTG	0%
11	Saarland	8 MW	2 WTG	1%	0 MW	0 WTG	8 MW	0 MW	0 WTG	0%
12	Hesse	8 MW	2 WTG	1%	0 MW	0 WTG	8 MW	0 MW	0 WTG	0%
13	Saxony	7 MW	2 WTG	1%	1 MW	1 WTG	6 MW	0 MW	0 WTG	0%
	Berlin	0 MW	0 WTG	0%	0 MW	0 WTG	0 MW	0 MW	0 WTG	-
	Bremen	0 MW	0 WTG	0%	0 MW	0 WTG	0 MW	0 MW	0 WTG	-
	Hamburg	0 MW	0 WTG	0%	0 MW	0 WTG	0 MW	0 MW	0 WTG	-
	Germany	977 MW	238 WTG		99 MW	82 WTG	878 MW	133 MW	35 WTG	14%

DEUTSCHE
WINDGUARD

* Share of gross capacity installations per federal state in total gross capacity installation

** Share of repowering capacity per federal state in gross capacity installation per federal

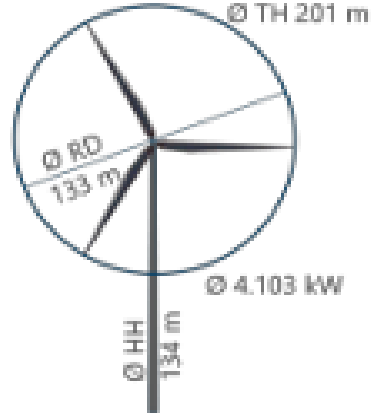
5

Şekil 2.15. Almanya’da bölge bazında yapılan yeniden güçlendirme, hizmetten çıkarma, yeni santral kurma çalışmalarının ve toplam kurulu kapasitenin verileri [37].

Ortalama Rüzgâr Türbin Karakteristiği		
Ortalama Karakteristik	Kurulumlar 2021	Önceki yıla göre değişimler
Türbin kapasitesi	3,978 kW	+17%
Rotor çapı	133 m	+10%
Hub yüksekliği	140 m	+4%
Tip (uç) yüksekliği	206 m	+6%

Şekil 2.16. 2021 yılı kurulan rüzgâr türbinlerinin geçtiğimiz yıla göre ortalama olarak teknik parametrelerinin değişimleri [36].

Ortalama Rüzgâr Türbin Karakteristiği	
Kurulumlar 2022 ilk yarısı	Önceki yıla göre değişimler
Türbin kapasitesi	+3%
Rotor çapı	+0%
Hub yüksekliği	-4%
Tip (uç) yüksekliği	-3%



Şekil 2.17. 2022 yılı ilk yarısına kadar kurulan rüzgâr türbinlerinin geçtiğimiz yıla göre ortalama olarak teknik parametrelerinin değişimleri [37].

Almanya’da örnek bir uygulama olarak 2010 yılında Rhineland-Palatinate eyaletinde yer alan Schneebergerhof rüzgâr santralinde bulunan beş adet E66 1.5 MW’lık türbin sökülmüş ve aynı sahaya yine 5 adet E126 7.5 MW’lık türbinler kurulmuştur. Çalışmanın sonucunda yeni türbinlerle, eski türbinlerin yaklaşık 7 katı miktarda enerji üretildiği gözlemlenmiştir. Bu enerji üretim değeri önceden 3 GWh iken, yeni türbinlerle 20 GWh olmuştur. Bu çalışmaya dair bir görsel Şekil 2.18’de verilmiştir [38].



Şekil 2.18. Rhineland-Palatinate’de yapılan yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel [38].

Yine bir örnek olarak ilk kurulumundan 18 sene sonra 2015 yılında, Almanya'nın Cuxhaven şehrine yakın Altenbruch bölgesindeki rüzgâr santralinde 16 adet N60/1300 türbinin yerini 9 adet N117/3000 türbin almıştır. Çalışma neticesinde toplam kurulu güç 20.8 MW'tan 27 MW'a çıkmıştır. Ve yine Almanya'da Galmsbüll bölgesinde yapılan bir yeniden güçlendirme çalışması ile 38 türbinden oluşan ve toplam 12.4 MW kurulu güce sahip bir saha, 21 türbinden oluşan ve toplam 60 MW kapasiteye sahip olacak şekilde güncellenmiştir. Bu iki örnek çalışmaya dair birer görsel Şekil 2.19 ve 2.20'de verilmiştir [39,40].



Şekil 2.19. Altenbruch'taki yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel [39].



Şekil 2.20. Galmsbüll bölgesinde bulunan bir yeniden güçlendirme çalışmasına dair görsel [40].

Galmsbüll bölgesinde uygulanan çalışmanın verileri Şekil 2.21’de verilmiştir [32].

Karakteristikler	Yen. güç. önce	Yen. güç. sonra
Rüzgâr türbini sayısı	38	21
Kurulu kapasite	12.4 MW	60 MW
Elektrik üretimi	25,000 MWh/a	155,000 MWh/a

Şekil 2.21. Galmsbüll bölgesinde bulunan bir yeniden güçlendirme çalışmasının öncesi ve sonrası verileri [32].

Almanya’da en güncel yürütülen yeniden güçlendirme çalışmalarından biri ise, Schleswig-Holstein’in kuzeydoğusundaki Lensahner Berg/Gaarz rüzgâr çiftliğinin yeniden güçlendirme projesidir. Bu sahadaki eski türbinler yerlerini 11 adet V162-6.2 MW türbinlere bırakmaktadır. Bu proje kapsamında müşteriler, Vestas EnVentus platformuyla yapılacak yeniden güçlendirme ile proje sahasının hem ömrünü hem de enerji üretimini artırmaktadırlar.

Farklı bir yaşam sonu stratejisi olarak yapılan bir örnek çalışma da Almanya’da bazı sahalardaki türbinlerin hizmetten çıkarıldığıdır. Bu türbinler hizmet dışı bırakıldıktan sonra hizmetten çıkarma maliyetlerini dengelemek adına Polonya’ya satılmıştır. Alternatif olarak bazı değerli eski malzemeler de hurda olarak satılmıştır ve bazı malzemeler geri dönüştürülerek hizmetten çıkarma maliyetini azaltmıştır.

2.1.1.2. Danimarka

Rüzgâr enerji santralleri yeniden güçlendirme çalışmalarında Almanya’nın yanı sıra bir diğer öncü niteliğindeki ülke Danimarka’dır. Zira Danimarka’nın Almanya’yla birlikte en eski sahalara sahip olduğu gerçeği bu durumu net bir şekilde açıklamaktadır. Ayrıca bilinmesi gerekir ki Danimarka yeniden güçlendirme çalışmalarını ilk teşvik eden ülke unvanına sahiptir. Bu bağlamda Danimarka’da 2000 yılından önce kurulan türbinlerin yarısından bir miktar daha fazlası ve 1995 yılından önce kurulan türbinlerin %80’inden biraz daha fazlası 2018 yılına kadar kaldırılmıştır ve bazı sökülen türbinlerin bulunduğu bölgelere yeni türbinler kurulmuştur. Dolayısıyla Danimarka’nın bu alanda oldukça tecrübeli olduğunu söylemek çok doğru olur.

Bu tecrübelerden biri Danimarka'nın şu ana kadar yaptığı en büyük yeniden güçlendirme çalışmalarından biri olan Kuzey Jutland bölgesindeki Klim rüzgâr santrali projesidir. Bu proje kapsamında 37 adet eski Vestas V44/600 türbin yerlerini 22 adet 3.2 MW'lık Siemens türbinlere bırakmıştır. Bu çalışmada sökülen eski türbinlerin temelleri yıkılmıştır ve yol malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca bu proje 7 ay sürmüştür. Bu çalışmaya dair bir görsel Şekil 2.22'de verilmiştir [41].



Şekil 2.22. Danimarka'da yapılan bir yeniden güçlendirme projesinde türbin temelinde olan bir çalışma [41].

Başka bir uygulama 2015 yılında Danimarka'nın Esbjerg bölgesinde V25-200 kW'lık bir rüzgâr türbini yerini V164-8 MW türbinine bırakmıştır. Bu yeniden güçlendirme uygulaması mevcut çalışmalara göre çok aşırı değer olarak göze çarpmaktadır. Nitekim Avrupa'daki tecrübelerle dayanarak ortalama olarak sökülen türbin gücü 800-1200 kW arasındayken, yeniden güçlendirme ile yeni kurulan türbin gücü 2500-3500 kW arasındadır.

Danimarka açısından değinilmesi gereken bir önemli nokta da 2014 ve 2015 yıllarından itibaren Danimarka'nın teşvik ve destek sistemlerindeki düzenlemelerden kaynaklı daha düşük özgül güce sahip türbinleri tercih etmesidir. Bu tercihin yapılmasındaki gaye, türbin bazında özgül gücü azaltarak yüksek kapasite faktörüne sahip olmak ve düşük özgül güç değerleri ile üretimi maksimumda değil optimum

değerde tutmaktır. Böylelikle santrallerin dayanımı süre bazında daha uzun olmaktadır.

2.1.1.3. İspanya

Almanya ve Danimarka'dan sonra Avrupa'da hem genel olarak rüzgâr enerjisi bazında çok büyük bir pazar olan hem de yeniden güçlendirme adına çalışmaları ve gelecek potansiyeli büyük olan İspanya dikkat çekmektedir. Zira bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere İspanya'nın 2030 yılına kadar yaklaşık 20 GW'lık rüzgâr kapasitesi 20 yaşını dolduracaktır ki, bu istatistik yeniden güçlendirmenin İspanya özelinde ne denli önemli bir husus olduğunu açıkça göstermektedir. Lakin belirtmek gerekir ki, yatırımcılar ve proje geliştiriciler hem daha düşük maliyetler hem de halihazırda daha esnek bir lisanslama sistemi teşkil ettiği için faydalı ömür uzatma seçeneğine de son zamanlarda pek sıcak bakmaktadırlar. Nitekim bu doğrultuda Siemens Gamesa kısa bir süre önce 20 yaşına gelen türbinlerin faydalı ömürlerini 30 yıla kadar çıkarmak adına bir sözleşme imzalamıştır. İspanya'nın Zaragoza ve Teruel ilçelerinde ve bazı bölgelerde bu çalışmalara yakın zamanda başlanacağı da bildirilmiştir.

Diğer bir yeni gelişme olarak, İspanya'nın Navarre bölgesindeki Serralta rüzgâr çiftliğinde bir yeniden güçlendirme çalışması yürütülmektedir. Bu çalışma kapsamında yaklaşık 320 kW çıkış gücüne sahip mevcut 51 türbin yerini, yaklaşık 1.83 MW çıkış gücüne sahip 9 adet türbine bırakmaktadır ve toplam kurulu güç değeri olan 16.5 MW korunmaktadır. Toplam kapasite korunsa da yapılan ön analizlerle saha enerji üretiminin mevcut santral üretiminden yaklaşık % 35 kadar daha fazla olacağı tahmin edilmiştir.

Yine farklı bir örnek olarak İspanya'nın Cadiz bölgesinde bulunan ve ilk olarak 1995'te faaliyete geçen 90 adet 330 kW'lık rüzgâr türbinleri yerine 2018 yılında gerçekleşen yeniden güçlendirme çalışmasıyla 8 adet Nordex 3 MW'lık ve 4 adet Nordex 1.5 MW'lık çıkış güçlerine sahip türbinler kurulmuştur. Sahanın toplam kurulu güç değeri 30 MW'ta kalmıştır, ancak enerji üretim değerinin %15 kadar arttığı ve yeni santralin çevreye olan olumsuz etkisinin karbon emisyonunda olan düşüştür kaynaklı daha da azaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca literatürde yapılan bir yeniden güçlendirme çalışması olarak 2001 yılında işletime alınan, İspanya’da Albacete ilinde bulunan Virgen de Belen I rüzgâr enerji santralının değerlendirilmesi yapılmıştır. Araştırma kapsamında bu saha özelinde yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi yaşam sonu senaryoları analiz edilmiştir. İlk iki senaryoda kanatların ve elektriksel-elektroniksel kompartmanların değişimi ve yenilenmesini içeren ömür uzatma veya kısmi yeniden güçlendirme durumları değerlendirilmişken, son senaryoda eski türbinlerin yeni türbinlerle bir tam yeniden güçlendirme yoluyla değiştirilmesi durumu incelenmiştir. Nitekim bu tam yeniden güçlendirme modellemesi ile 660 kW nominal güce sahip 35 adet G47-Siemens Gamesa türbinlerinin oluşturduğu ve toplam kurulu gücü 23.1 MW olan saha yerini her biri 2.3 MW olan 10 adet Enercon E-82 türbinine bırakmıştır. Bu çalışmanın yaklaşık 8 ay boyunca süreceği tahmin edilmiştir ve santral toplam kurulu gücü korunacak olmasına rağmen çok ciddi enerji üretim artışının olacağı da tahmin edilmiştir ki, bu durum sahanın çok yüksek rüzgâr kapasitesine sahip olduğu dolayısıyla oldukça doğaldır.

2.1.1.4. Diğer Avrupa ülkeleri

Diğer Avrupa ülkelerinden Birleşik Krallık şu ana kadar mevcut lisans çerçevesinin yeniden güçlendirme adına birkaç engel teşkil etmesinden kaynaklı olarak bu projelerin uygulanmasında nispeten yavaş kalmaktadır. Lakin yapılan analizlere göre özellikle 2021 yılı itibariyle Birleşik Krallık’ta yeniden güçlendirme talebinin ciddi bir artışa geçmesi muhtemeldir. Nitekim şu aşamada 1.2 GW’lık kapasitede kara rüzgâr enerjisi santralleri yeniden güçlendirmek için geliştirilme aşamasındadır. Ayrıca Birleşik Krallık’ta bir örnek uygulama olarak 1991’de faaliyete geçen Delabole rüzgâr çiftliğinde 2009-2011 yılları arasında yapılan yeniden güçlendirme çalışması ile toplam santral kurulu gücü 4 MW’tan 9.2 MW’a artmıştır.

İtalya’da yeniden güçlendirme ve özellikle ömür uzatma çalışmaları da artmıştır. Nitekim İtalya, ömür boyu uzatma projeleri için somut bir teşvik sunan az sayıda AB üye devletlerinden biridir. Örnek bir çalışma olarak ise İtalya’da Chieti bölgesinde bulunan rüzgâr çiftliğinde her biri 660 kW güce olan 24 adet Vestas V47-660 rüzgâr türbini yerine her biri 3.3 MW güce sahip olan 9 adet V112-3.3 türbini dahil olmuştur. Böylece santralde hem türbin sayısı azalmış hem de toplam kurulu güç değeri yaklaşık

iki katına çıkmıştır ve dolayısıyla üretilen elektrik miktarı da önemli ölçüde artışlar göstermiştir.

Hollanda’da ise örnek bir uygulama olarak, 2016 yılında Ijsselmeer Gölü kıyısındaki Noordoostpolder rüzgâr çiftliğinde bulunan 50 adet 30 m hub (göbek) yüksekliğine, 25 m rotor çapına sahip olan WindMaster-300 kW rüzgâr türbini kaldırılmış ve o bölgeye 48 adet Siemens 3 MW açık deniz türbini ve 38 adet Enercon E-126 7.5 MW’lık türbinler konulmuştur. Bölgede hem projeye ilave yapılmıştır hem de yeniden güçlendirme ile eski türbinler yenilenmiştir.

2.1.1.5. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

Avrupa dışında rüzgâr santrali yaşam sonu uygulamalarında gelişmekte olan ve bazı çalışmalar yürüten en önemli ülke ABD olmuştur. Zira 1990’lı yıllarda özellikle Kaliforniya ve Teksas eyaletlerinde yapılan ilk kurulumlar neticesinde ABD, son birkaç yılda inanılmaz seviyede yeniden güçlendirme çalışmalarına yönelmiştir. Spesifik olarak son çalışmalar neticesinde gözlemlenmiştir ki kısmi yeniden güçlendirme üzerine büyük bir eğilim vardır, nitekim 2020 yılında gerçekleşen 36 adet yeniden güçlendirme projesinden yalnızca üçü bir sahanın tam yeniden güçlendirmesini içermiştir, kalan büyük kısım ise kısmi yeniden güçlendirme çalışmalarından oluşmuştur.

ABD’de şimdiye dek gerçekleşmiş uygulamalara örnek olarak 2019 yılında Illinois, Lee County’de bulunan Mendota Hills rüzgâr çiftliğinde bulunan 63 adet G52-800 kW Gamesa türbinleri yerine 29 adet SG-2.6/126 rüzgâr türbinleri getirilmiştir. Sahanın kapasitesi 50 MW’tan 76 MW’a çıkarılmıştır. Çalışma neticesinde son birkaç yılın verilerine bakıldığında tesisin performansının ciddi oranda arttığı ve işletme maliyetleri de olmak üzere bazı giderlerin azaldığı gözlemlenmiştir. Yine Illinois’da bulunan ve ilk olarak 2005’te hizmete giren Crescent Ridge rüzgâr çiftliğinde ise, bulunan 33 adet Vestas V82/1650 türbinde bir yeniden güçlendirme senaryosu modellenmiştir. Bu doğrultuda 9 türbin hizmet dışı bırakılırken geri kalan 24 türbin üzerinden bir saha güncellenmesi planlanmıştır ve 2022 itibarıyla 4 adet yeni Vestas türbin monte edilmiştir. Böylelikle gözlemlenebilir ki bu sahada hem bir ömür uzatma çalışması hem de bir yeniden güçlendirme çalışması yapılmıştır.

Farklı bir çalışma olarak, 2003 yılında faaliyete konulan, ABD’de Güneybatı Oklahoma’da bulunan Blue Canyon II rüzgâr çiftliğinde 2022’de gerçekleşen bir kısmi yeniden güçlendirme projesi kapsamında 84 adet Vestas V80-1.8 türbinin 73’ünde nasel, kanat ve üst kule değişimi yapılmıştır. Değişim yapılan türbinlerde kullanılan model, V110-2 MW Vestas’tır. Böylelikle projenin ömrü 20 ila 30 yıl kadar artırılmıştır. Yine benzer bir şekilde, 2005’ten beri işletimde olan ve Teksas, Nolan County’de bulunan Sweetwater 3 sahasında bulunan 90 adet GE-1.5 MW türbinde bir kısmi yeniden güçlendirme uygulanmıştır. Bu uygulama kapsamında 2020 yılında 90 adet türbinde temellere dokunulmayacak şekilde mevcut ana bileşenler değiştirilmiştir ve toplam kurulu güç 135 MW’tan 146 MW’a çıkmıştır.

ABD’de yakın zamanda gerçekleşecek uygulamalara örnek olarak, Washington’daki Goodnow Hills rüzgâr çiftliğindeki on yıllık Senvion türbinleri yerlerini V110-2.2 MW Vestas türbinlerine bırakacaktır. Sahada toplam kurulu güç değeri 94 MW’tan 103 MW’a çıkacaktır. 2024’ün sonunda tamamlanması beklenen bir çalışmada Kaliforniya eyaletindeki yaklaşık 40 yıllık Gonzaga Ridge rüzgâr çiftliğinde ise toplam 16.5 MW kapasiteye sahip 162 adet türbin sökülmesi ve o bölgeye daha az miktarda yeni nesil türbinler konulması planlanmaktadır. Bu yeniden güçlendirme ile santral toplam kurulu güç değeri 50 MW artı depolama ile 197.5 MW’a ulaşacaktır. Yine benzer olarak yakın zamanda yürütülecek ve tüm tesisin enerji çıkışının %60 artırılması planlanan bir çalışmada Wyoming, Carbon County’de bulunan, ilk olarak 1999’da faaliyete geçen Foote Creek I rüzgâr çiftliğindeki 69 adet 600 kW’lık Mitsubishi rüzgâr türbinleri kaldırılarak yerlerine 13 adet yeni nesil türbinler eklenecektir ve bu uygulama muhtemelen 2023 yılında tamamlanacaktır.

Illinois’de yapılacak bir kısmi yeniden güçlendirme çalışmasında Big Sky rüzgâr çiftliğinde bulunan toplam 239.4 MW kurulu güce tekabül eden 114 adet S88/2100 Suzlon türbin naselleri (nacelle) 2022’de sökülmüştür ve yakın zamanda yerlerine yeni Vestas türbin naselleri monte edilecektir. Ayrıca sahada kullanılan kule ve temellerde bir değişim olmayacaktır. 2009 yılında hizmete geçen Batı Teksas’taki Panther Creek III rüzgâr çiftliğinde ise GE-1.5 MW türbinlerde daha uzun kanatların takılması ve mevcut dişli kutularının yenilenmesi gibi ana bileşenlerin değiştirilmesi durumu olacaktır. Yakın zamanda faaliyete geçecek olan bu uygulamada sökülen kanatlar GE

Yenilenebilir Enerji'nin Veolia Kuzey Amerika firması ile yaptığı anlaşma bünyesinde geri dönüştürülecektir. Son olarak 2009'da işleme giren Teksas, Kenedy County'de bulunan Gulf rüzgâr çiftliğindeki çalışma ile 118 adet Mitsubishi MWT-92/2.4 MW türbin 2021 yılında nasel, kule ve kanatlar olmak üzere sökülüştür. Yerlerine ise yakın zamanda 80 m'lik kulelerde ve 108 m'lik kanatlara sahip Siemens Gamesa 2.3 MW türbinler yerleştirilecektir.

2.1.1.6. Diğer ülkeler

ABD hariç ve diğer Avrupa ülkeleri dışında yeniden güçlendirme ve diğer yaşam sonu senaryolarına yönelik önemli çalışmalarda bulunan ülkeler Hindistan ve Brezilya'dır. Zira iki ülkede de özellikle Hindistan'da ilk kurulan santrallerin gittikçe yaşlanması ve bu sahaların çok verimli rüzgâr verilerine sahip olmaları bu iki ülkeyi de bu yola sürüklemiştir.

Yapılan bir uygulama olarak Hindistan'ın Kayathar bölgesinde 2000 yılından önce kurulmuş olan bir rüzgâr santralinde bulunan her biri 200 kW kapasiteye sahip 30 adet Micon türbin ve her biri 225 kW olan 6 adet Vestas türbin yerine 8 adet 2 MW çıkış gücüne sahip yeni türbin yerleştirilmiştir. Bu tam yeniden güçlendirme çalışmasıyla santral toplam kurulu güç değeri yaklaşık olarak iki katına çıkmıştır ve elektrik üretim değerinin de yaklaşık 4 kat daha arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sahanın ortalama kapasite faktörü değeri de %10-15'lik bir artış göstermiştir. Brezilya'da gerçekleşen bir çalışmada ise Taiba bölgesinde bulunan bir rüzgâr santralindeki 10 adet 500 kW çıkış gücüne sahip türbin yerlerini 2 adet 3 MW güce sahip türbinlere bırakmıştır. Bu çalışma sonucunda eski santrale kıyasla mali açıdan daha yüksek getirilerin olduğu ortaya çıkmıştır.

2.2. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Yenilenebilir enerji sistemleri kullanımı, Türkiye'de de tüm dünyada olduğu gibi gün geçtikçe dikkat çekici bir artış göstermektedir. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgârın kullanımı ile Türkiye'de son zamanlarda oldukça önemli ve fazla sayıda yatırımlar yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin birim enerji maliyetinin makul bir seviyede olması ve projelerin zamanla yüksek kazançlar sağlaması yenilenebilir enerji üzerine olan yatırımların bu alanda fazlalaşmasını mantıklı kılan

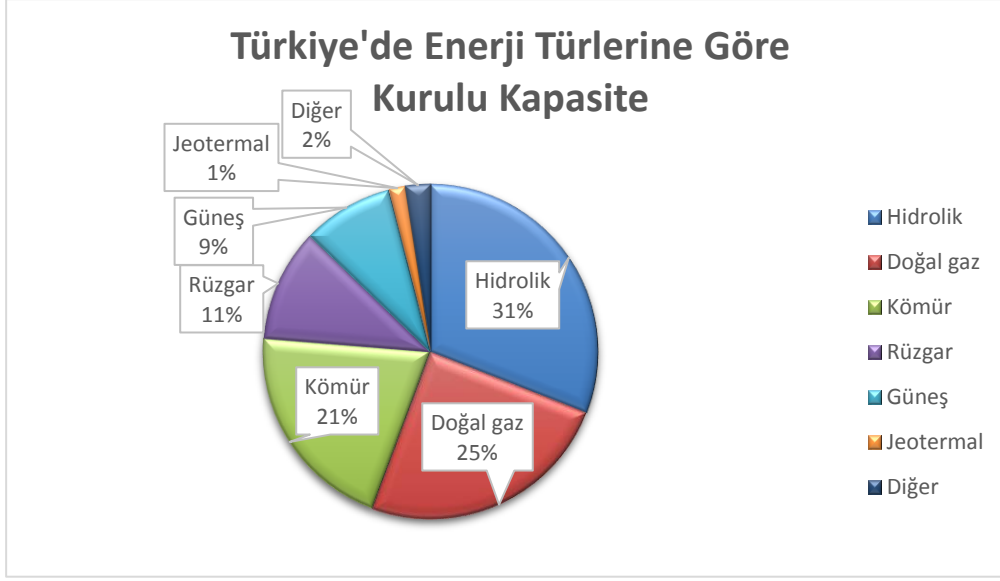
hususlardır. Bu doğrultuda Tablo 2.1’de enerji türlerinin yatırım ve birim maliyet karşılaştırması irdelenmiştir [42].

Tablo 2.1. Enerji türlerinin yatırım ve birim maliyet karşılaştırması [42].

Enerji Türü	Yatırım Bedeli (\$/kW)	Birim Enerji Maliyeti (cent/kWh)
Petrol	1500-2000	6
Kömür	1400-1600	2,5-3
Doğalgaz	600-700	3
Nükleer	3000-4000	7,5
Hidrolik	750-1200	0,5-2
Güneş	Yüksek	10-20-
Jeotermal	1500-2000	2,2-4
Rüzgâr	1000-1200	3,5-4,5

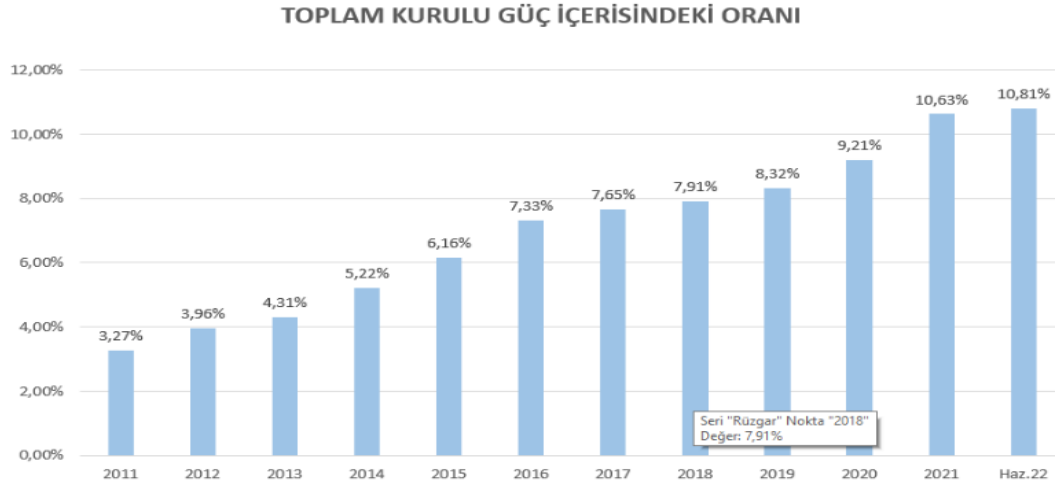
Rüzgâr enerjisine olan yatırımları önemli kılan diğer farklı noktalar; rüzgâr enerjisi yatırımlarıyla, genel olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artmasıyla beraber gelen çevresel boyutta olumlu sonuçlar sağlama, bu kaynakların kullanımıyla enerjide dışa bağımlılığın azalması ve yerli üretimin artmasıyla enerji krizini sönmümlendirme, temiz enerji üretimi ile daha düşük maliyetle ve daha yüksek getiri elde etmenin yanında daha da verimli elektrik üretim değerleri sağlama olarak nitelendirilebilmektedir.

Türkiye kurulu gücünde rüzgâr enerjisinin diğer fosil yakıt ve yenilenebilir enerji türlerine göre payı Şekil 2.23’te gösterilmiştir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’ndan paylaşılan bilgide 2022 yılı Eylül ayı sonu itibarıyla Türkiye’de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı; %30,9’u hidrolik enerji, %24,7’si doğal gaz, %20,6’sı kömür, %10,9’u rüzgâr, %8,8’i güneş, %1,6’sı jeotermal ve %2,4’ü ise diğer kaynaklar şeklindedir.



Şekil 2.23 Türkiye’de enerji türlerine göre kurulu güç oranları

Şekil 2.24’te ise haziran sonu verilerine göre rüzgâr enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki oranının son on yılda ortaya koyduğu eğilim gösterilmektedir [43].

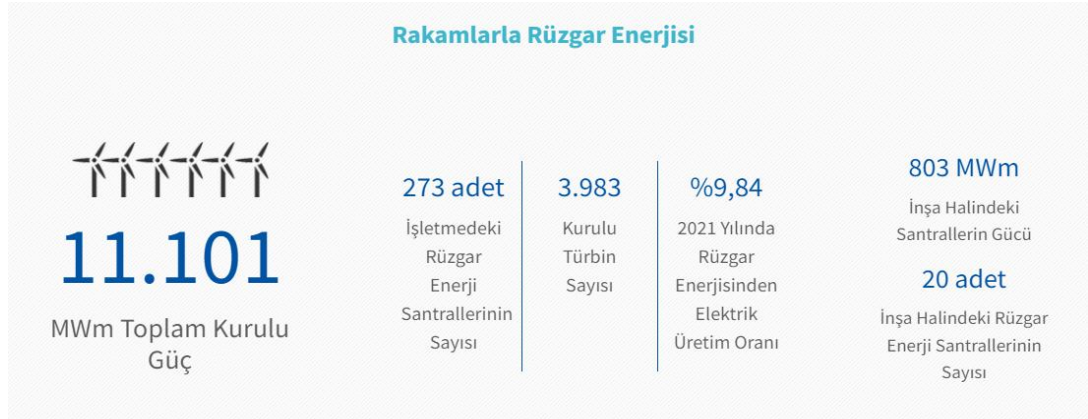


Şekil 2.24. Türkiye’de rüzgâr enerjisinin yıllara göre kurulu güçteki payının oransal değişimi [43].

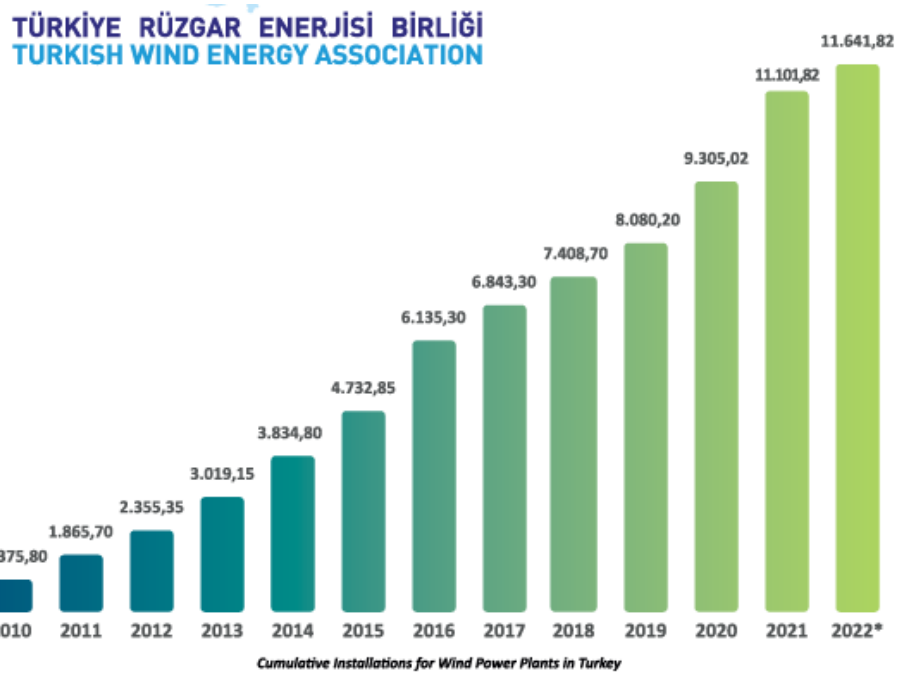
Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) tarafından 2022 yılının ikinci yarısında yayımlanan Türkiye Rüzgâr İstatistiği raporuna göre Türkiye’de toplam rüzgâr enerjisi kapasitesi 11.101 MW’tır ancak, 2022 yılı ilk yarısında devreye alınan 540 MW’lık kapasite de eklenirse bu değer yıl sonu yakınen 11.641 MW’a ulaşması beklenmektedir.

Bunun yanı sıra 2022 ilk yarısında rüzgârdan elde edilen toplam elektrik üretim değeri 16.459.762 MWh'a ulaşmışken, bu değer Türkiye'de üretilen toplam elektriğin yüzde 10.72'sini oluşturmuştur.

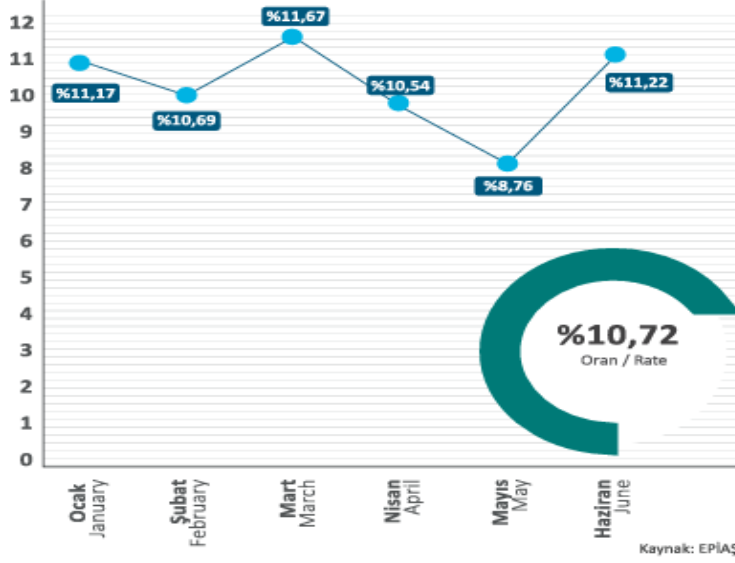
Tüm bu istatistikler Şekil 2.25, 2.26 ve 2.27'de daha net bir şekilde gözlemlenebilir [44,45].



Şekil 2.25. Türkiye'de 2022 yılı ortasına kadar ortaya çıkan rüzgâr enerjisi verileri [44].



Şekil 2.26. Türkiye'nin sahip olduğu rüzgâr enerjisi toplam kurulu kapasitesinin yıllara göre değişimi [45].



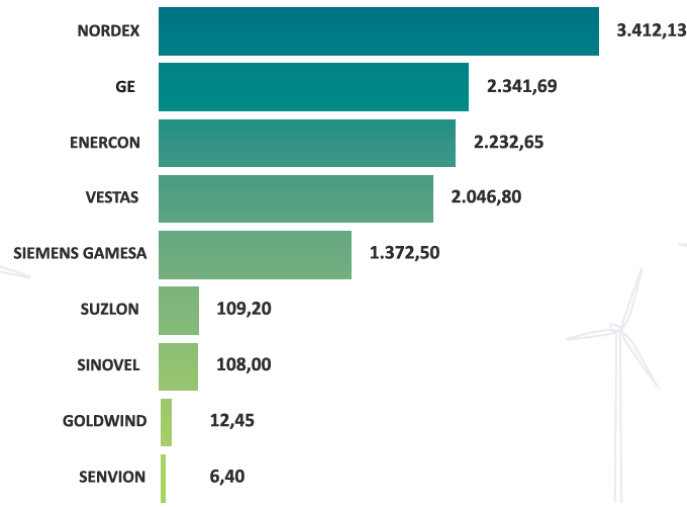
Şekil 2.27. Türkiye’de 2022 yılında rüzgâr enerjisi üretiminin tüm enerji türlerine göre kullanım yüzdesi [45].

Türkiye’de rüzgâr enerjisi üzerine güncel olan diğer istatistiksel veriler aşağıda verilmektedir. İlk olarak Tablo 2.2’de Türkiye’de yer alan en büyük kapasitedeki 11 sahanın bilgileri verilmiştir [46].

Tablo 2.2. Türkiye’de bulunan ve faaliyette olan en yüksek kurulu güce sahip rüzgâr santrallerinin verileri [46].

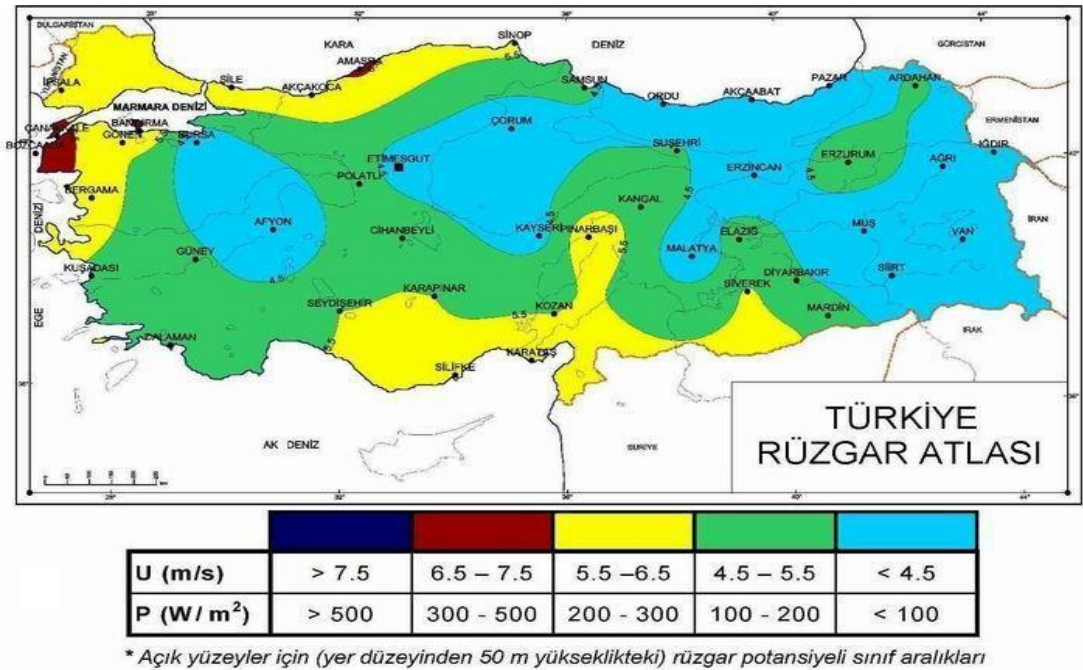
	Santral Adı	Şehir	Firma	Kurulu Güç (MW)
1	Soma RES	Manisa	Polat Enerji	288
2	Karaburun RES	İzmir	Alto Holding	227
3	Dinar RES	Afyonkarahisar	Gürüş Holding	200
4	İstanbul RES	İstanbul	Universal Wind Enerji	200
5	Geycek RES	Kırşehir	Polat Enerji	168
6	Balıkesir RES	Balıkesir	Enerjisa Elektrik	143
7	Osmaniye RES	Osmaniye	Zorlu Enerji	135 (150.6)
8	Saros RES	Çanakkale	Borusan EnBW Enerji	133 (138)
9	Kangal RES	Sivas	Ece Tur İnşaat	128
10	Şamlı RES	Balıkesir	Fernas Enerji	127
11	Bergama RES	İzmir	Bilgin Enerji	120

Şekil 2.28’de de Türkiye’de kurulu olan bazı rüzgâr türbini markaları ve onlara karşılık gelen kurulu güç değerleri belirtilmiştir [45].



Şekil 2.28. Türkiye’de kurulu rüzgâr türbinleri markaları ve onlara karşılık gelen kurulu güç değerleri [45].

Rüzgâr potansiyelini değerlendirme adına faydalanılan Türkiye’nin Rüzgâr Atlası Şekil 2.29’daki gibidir [47]. Hemen sonrasında verilen Tablo 2.3’te ise Türkiye’de illere göre rüzgâr santrali potansiyel verileri verilmiştir [46].



Şekil 2.29. Türkiye Rüzgâr Atlası [47].

Tablo 2.3. Türkiye’de illere göre rüzgâr santrali potansiyel verileri [46].

	İl	Teorik Potansiyel (MW)	Devrede (MW)	İnşaat (MW)	Lisans Alınan (MW)	Ön Lisanslı (MW)	Toplam İşlem (MW)	İşlem/Teori Oranı
1	Balıkesir	13.827	1.345	37	0	0	1.382	%10
2	Çanakkale	13.013	858	236	0	222	1.315	%10
3	İzmir	11.854	1.749	13	0	0	1.762	%15
4	Manisa	5.302	702	1	10	0	712	%13
5	Samsun	5.222	48	4	9	0	61	%1
6	Muğla	5.171	210	34	0	60	303	%6
7	Tekirdağ	4.627	183	96	0	0	279	%6
8	İstanbul	4.177	789	108	1	50	948	%23
9	Bursa	3.882	299	92	0	65	456	%12
10	Mersin	3.531	226	0	0	0	226	%6

Bu verilerden görüleceği üzere sırasıyla İzmir, Balıkesir ve Çanakkale’nin en çok rüzgâr enerjisi kapasitesine sahip iller olduğu anlaşılabilir. Zira Rüzgâr Atlasından da kolaylıkla ifade edileceği üzere rüzgârın en yoğun olduğu bölgeler özellikle Ege ve Marmara olarak dikkat çekmektedir, dolayısıyla rüzgâr enerjisi teorik potansiyeli en yüksek şehirlerin bu bölgede bulunan İzmir, Balıkesir, Çanakkale, Manisa ve İstanbul olduğunu söylemek gayet doğaldır.

Türkiye’de güncel rüzgâr istatistiklerini vermenin yanında belirtilmesi gereken diğer önemli husus da rüzgâr enerjisine olan yatırımların yıllar geçtikçe nasıl ilerlediğidir ve gelecekte Türkiye’yi nelerin beklediğini ifade etmektir.

İlk olarak 1998 ve 2005 yılları arasında Türkiye’de 4 adet santral herhangi bir yasa veya mevzuat olmadan kurulmuş ve işleme geçmiştir. Fakat ondan sonra 2005’te YEK’in (Yenilenebilir Enerji Kanunu) çıkmasıyla hem rüzgâr santrallerinden üretilen elektriğe alım garantisi verilmiş hem de bazı taktikler, politikalar önerilmiştir ve bunun yanı sıra teknolojik gelişmelerle endüstri hızlı bir şekilde ilerlemiştir.

Akabinde 21 Mayıs 2009’da yayımlanan Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Stratejisi Belgesine göre 2023 yılına kadar Türkiye’nin rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 20 MW’a ulaşmasına yönelik bir hedef belirlenmiştir. Bu bağlamda rüzgâr enerjisi ve genel olarak yenilenebilir enerji üretimini artırmak adına bazı teşvik mekanizmaları oluşturulmuştur. Özellikle döviz bazında olan bu desteklerle birlikte bu süreçte rüzgâr enerjisi yatırımlarında oldukça fazla başvuru yapılmıştır. Zira yıllık bazda Türkiye’de Rüzgâr enerjisi kurulumları 2009’dan sonra inanılmaz bir yükselişe geçmiştir.

Ardından 30 Ocak 2021’de Resmî Gazete’de yayımlanan Cumhurbaşkanı kararı ile o ana kadar döviz üzerinden destek veren mekanizma, 31 Haziran 2021’den itibaren TL üzerinden destek verecek şekilde düzenlenmiştir. 30 Haziran 2021 tarihine kadar hizmete girecek olan YES (Yenilenebilir Enerji Sistemleri) belgeli elektrik üretim santrallerine 10 sene boyunca, santral hizmete girdiği tarihten itibaren kilovatsaat başına 7.3 cent ile 13.3 cent olarak yapılan ödemeler devam etmektedir, lakin bu tarihten sonra işletmeye girecek olan tesislere verilen katkı paylarının değeri TL bazında olmaktadır ve bu Şekil 2.30’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu durumdan ötürü yatırımcılar ve proje geliştiricileri mevcut projelerinin en geç 30 Haziran’da işletmeye girecek şekilde çalışmalarını yapmışlardır ve bu bağlamda Türkiye kurulu gücünde 2021 yılında oldukça fazla sayıda tesis kurulmuştur.

Ayrıca yayımlanan bu karara göre, 1 Temmuz 2021-31 Aralık 2025 arasında faaliyete girecek santrallere üçer aylık dönemlerde Üretici Fiyat Endeksi (ÜFE)-Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) oranlarında ve döviz kurlarındaki değişimler dikkate alınarak yapılacak revizyonlara göre TL üzerinden yapılacak ödemeler Şekil 2.31’de gösterildiği gibidir. Burada dikkat çeken husus 5 yıllık bir süreyle uygulanacak olan bir yerli katkı düzeneğinin olmasıdır.

Şekil 2.30 ve 2.31 bu gelişmeleri net bir şekilde gösteren görsellerdir [48,49].

Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi	Yekdem Fiyatı	Yekdem Fiyatı	Fiyat Farkı	Güncelleme Üst Sınır	
	2021 Öncesi* cent/kWh	2021 Sonrası** cent/kWh		cent/kWh***	
a-Hidroelektrik (HES)	7,3	5,5	25%	6,4	
b-Rüzgar (RES)	7,3	4,4	40%	5,1	
c-Biyokütle (BES)	Çöp Gazı-Atık Lastik	13,3	4,4	67%	5,1
	Biyometanizasyon	13,3	7,5	44%	8,6
	Termal Bertaraf	13,3	6,9	48%	8
d-Jeotermal (JES)	10,5	7,5	29%	8,6	
e-Güneş (GES)	13,3	4,4	67%	5,1	

*30.06.2021 tarihine kadar işletmeye girecek olan YEK belgeli elektrik üretim tesislerine 10 yıl süresince ödenecek bedel

**01.07.2021-31.12.2025 tarihleri arasında işletmeye girecek YEK belgeli elektrik üretim tesislerine üçer aylık dönemlerde ÜFE-TÜFE oranları ve döviz kurlarındaki değişimlere göre yapılacak ödeme

***YEKDEM fiyatlarının güncellenmesinde dikkate alınacak üst sınır

Şekil 2.30. EMO'nun güncel döviz kuru üzerinden yaptığı hesaplamaya göre eski ve yeni YEKDEM karşılaştırma tablosu [48].

Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi		YEK Destekleme Mekanizması Fiyatı (Türk Lirası kuru/kWh)	YEK Destekleme Mekanizması Fiyatı Uygulama Süresi (yıl)	Yerli Katkı Fiyatı (Türk Lirası kuru/kWh)	Yerli Katkı Fiyatı Uygulama Süresi (yıl)
a. Hidroelektrik üretim tesisi		40,00	10	8,00	5
b. Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi		32,00	10	8,00	5
c. Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi		54,00	10	8,00	5
d. Biyokütleyle dayalı üretim tesisi	Çöp Gazı / Atık lastiklerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilen kaynaklar	32,00	10	8,00	5
	Biyometanizasyon	54,00	10	8,00	5
	Termal Bertaraf (Belediye atıkları, bitkisel yağ atıkları, gıda ve yem değeri olmayan tarımsal atıklar, endüstriyel odun dışındaki orman ürünleri, sanayi atık çamurları ile arıtma çamurları)	50,00	10	8,00	5
e. Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi		32,00	10	8,00	5

Şekil 2.31. YEK belgeli üretim tesisleri için güncellemeye esas YEK destekleme mekanizması ile yerli katkı fiyatları ve uygulama süreleri [49].

EMO'nun (Elektrik Mühendisleri Odası) bu gelişmeler üzerine yaptığı açıklamalara göre, RES yatırımlarında Piyasa Takas Fiyatının altında verilen fiyatlar için yerli üretim teşviklerinin verilmemesi, yerlilik politikası ile çelişmektedir. Döviz kurunda yaşanan dalgalanmalar ve Covid-19'un etkisiyle artan finansman maliyeti yerine, yerli parçalarda teşvik olmadığı için yatırımcıların, ucuz finansman kaynaklarına ve üretici ülkelerin ihracat kredilerine yönelmesi beklenmektedir. Bunun neticesinde ise yapılan

yorumlara göre EMO, Türkiye'nin yerli rüzgâr endüstrisi yerine yurtdışından parça tedarigi ve ithalatı yapmasını beklemektedir.

2021'in başında bu kararın açıklanmasından bu yana Türkiye'de rüzgâr enerjisi üzerine pek çok gelişme olmuş ve çok fazla proje yürütülmüştür. Ve genel olarak belirtmek gerekir ki, Türkiye rüzgâr enerjisi dahil tüm yenilenebilir enerji kaynağı esaslı üretim yapan yatırımcı ve proje sahipleri kişileri mağdur etmemek ve bu projelerin devamlılığını sağlamak adına yukarıda belirtilen mali katkılarda ve yasal mevzuatlarda da oldukça esnek davranmıştır. Zira Türkiye'de en son 1-2 Kasım 2022 tarihlerinde gerçekleşen 11. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kongresi'nde hem T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanı hem de EPDK Başkanı ve ETKB Bakan Yardımcısı'nın ifadelerine göre Türkiye'nin bu konuda her zaman gereken desteği sağlayacağı vurgulanmış ve yatırımların hem ülke hem de firmalar adına çok katkı sağlayacak şekilde çalışmaların sürdüğü ifade edilmiştir.

İzmir'de gerçekleşen bu önemli kongrede aynı zamanda Türkiye'de yapılması muhtemel gelecek yatırımlar değerlendirilmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi olmak üzere tüm yenilenebilir enerji sistemlerini dengeli bir politika ile kullanarak 2030'a kadar ciddi oranda karbon emisyonlarını azaltma ve özellikle 2053 yılına kadar karbon emisyonlarını sıfıra düşürme vizyonu (Net Zero 2053) doğrultusunda izlenecek adımlar değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda rüzgâr enerjisinden elde edilen hidrojenin geleceği irdelenmiş, rüzgâr ve güneş enerjisi tesislerinde özellikle enerji depolama ve hibrit tesisler oluşturma konuları ele alınmıştır. Hatta belirtmek gerekir ki, bu noktada çok yeni bir gelişme olarak yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji depolama üzerine yasal bir düzenleme yayımlanmıştır.

Ayrıca rüzgâr enerjisinde son yıllarda bazı ülkelerin çok daha fazla elektrik üretmesini sağlayan deniz üstü rüzgâr santralleri yatırımları Türkiye penceresinden incelenmiştir. Ancak belirtmek gerekir ki rüzgâr enerjisinden daha fazla elektrik elde etme adına yapılacak bir çalışma daha bulunmaktadır. O da yeniden güçlendirme çalışmalarıdır. Şayet Türkiye'de de birden fazla saha ve türbin standart ve teknik ömürlerinin sonuna yaklaşmaktadır, dolayısıyla Türkiye'nin bu alanda yakın zamanda faaliyete geçmesi beklenmektedir. Nitekim, Polat Enerji firmasında çalışan yetkili bir mühendis ile gerçekleştirilen görüşme neticesinde Türkiye'nin en ciddi rüzgâr yatırımlarını yapan

firmalardan biri olan Polat Enerji'nin önümüzdeki zamanlarda bir yeniden güçlendirme projesi yürütmek istediği ve bu alanda çalışmalarını sürdürdüğü ifade edilmiştir, hatta yapılacak çalışmanın sadece düşük kapasite faktörlerine sahip türbinlerde bir yeniden güçlendirme uygulanmasıyla gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür.

Bir sonraki kısımda da Türkiye'de bulunan mevcut saha ve türbin bilgilerinden yola çıkılarak Türkiye'nin yeniden güçlendirme potansiyeli değerlendirilmiştir. Aynı zamanda diğer yaşam sonu senaryolarına da değinilmiştir.

2.2.1. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisinde Yeniden Güçlendirmenin ve Diğer Yaşam Sonu Stratejilerinin Değerlendirilmesi

Türkiye'de ilk ve en eski rüzgâr enerji santrali unvanını elinde bulunduran Demirer Holding'e bağlı Alize Çeşme RES veya diğer adıyla Germiyan RES, yapımına İzmir'in Çeşme ilçesinde bulunan Germiyan köyünde 1997 yılında başlanmış ve tesis 1998 yılında işleme geçmiştir. Santral ilk kurulduğu zaman 3 adet E-40 Enercon 500 kW'lık türbinler bulundurmaktaydı ancak sahanın potansiyelinden daha da faydalanmak ve elektrik üretimini artırma adına 2017 yılında 4 adet 2.3 MW'lık kapasiteye sahip Enercon E-82 türbin ilave edilmiştir. Bu doğrultuda tesiste bir bakıma bir yeniden güçlendirme çalışması yapılmış gibi gözlemlenebilmektedir, lakin teknik olarak yalnızca yeni türbin eklemesi ile sahada kapasite artışı gerçekleşmiştir ve ilk kurulan türbinler sökülmemiştir. Ancak belirtilmesi gerekir ki bu sahada yer alan en eski türbinlerin ilk kurulumlarından bu yana neredeyse 25 yıl geçmiştir. Bu demek oluyor ki bu türbinlerin ömrü yakın zamanda muhtemel olarak sona erecektir. Nitekim literatürde bir rüzgâr türbininin standart yaşam ömrü 20-25 yıl olmak üzeredir. Dolayısıyla bu eski türbinlerin sökülmesi ve güncellenmesi üzerine bir yeniden güçlendirme veya bazı bileşenlerinin güncellenmesi yoluyla bir faydalı ömür uzatma çalışması yapılması bu saha için pek yakında gerçekleşecek bir potansiyel ortaya koymaktadır. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 2.32'de verilmiştir [50].



Şekil 2.32. Alize Çeşme-Germiyan RES [50].

Bir diğer 1998 yılında işleme geçmiş olan ve İzmir'in Çeşme-Alaçatı bölgesinde bulunan, kurulumu bakımından Türkiye'de en eski ikinci rüzgâr santrali olan Alaçatı Ares RES, her biri 600 kW'lık çıkış gücüne sahip 12 adet Vestas V-44 türbin bulundurmaktadır. Santral 20.yılıının yani 2018'in sonuna yaklaştığında proje sahibi firma olan Güçbirliği Holding'den Elektrik Üretim Anonim Şirketi'ne (EÜAŞ) devlet tarafından Yap-İşlet-Devret modeli ile devredilmiştir. İşletimine EÜAŞ tarafından devam edilen santralin ilk kurulumundan bu yana yaklaşık 25 sene geçmiştir. Dolayısıyla bu sahada bir yeniden güçlendirme çalışması yapılması gayet olasıdır ki şu sıralarda da bir yeniden güçlendirme çalışması yapılmaktadır. Güncel olarak 2021 yılında EÜAŞ ve Aselsan tarafından yapılan bir anlaşma ile yerli imkanlarla üretilecek ilk türbin uygulaması bu sahada gerçekleşecektir ve bu bağlamda Aselsan ile yapılan görüşmelere göre mevcut sahadaki toplam kapasite olan 7.2 MW, iki adet yeni yerli türbin ilavesi ile sağlanacaktır ki eski türbinler de sökülecektir. Ve yapılan görüşmede teknik olarak bu iki türbinin 4.3 MW'lık kapasiteye sahip olduğu ancak %100 kapasitede çalışmayacakları belirtilmiştir. Bu çalışmanın 2024 yılında tamamlanması planlanmıştır. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 2.33'te verilmiştir [51].



Şekil 2.33. Alaçatı Ares RES [51].

Kronolojik olarak ilerlendiğinde kurulum bakımından sırada en eski üçüncü rüzgâr enerji santrali olan Bozcaada RES gelmektedir. 1998 yılında fizibilite ve izin süreçlerinden geçen bu tesis 2000 yılında elektrik üretmeye başlamıştır. Sahada 17 adet 600 kW'lık nominal güce sahip Enercon E-40 türbin bulunmaktadır ve sahanın toplam kapasitesi 10.2 MW'tır. İlk kurulumundan 20 sene sonrasında yani 2020 yılında saha yine Yap-İşlet-Devret modeli ile devlet tarafından sahanın mülk sahibi Demirer Holding'ten alınıp EÜAŞ'a devredilmiştir ve son birkaç senedir EÜAŞ bünyesinde faaliyet vermektedir. Sahanın ilk kurulumdan bu yana yaklaşık 23 sene geçtiği için birkaç yıl sonrası için gelecek yatırımlar ve planlarda sahada bir yeniden güçlendirme yapılması oldukça yüksek bir potansiyel arz etmektedir. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 2.34'de verilmiştir [52].



Şekil 2.34. Bozcaada RES [52].

Bir diğer değerlendirilen santral Demirer Enerji tarafından 2005 yılında İzmir'in eşme-Alaçatı bölgesinde kurulmuş ve 2006'da üretime başlamış olan Mare Manastır RES'tir. Bu rüzgâr enerji santrali 17 adet 800 kW'lık (E-48) ve 32 adet 900 kW'lık (E-44) ıkış güçlerine sahip Enercon marka türbinlerden oluşmaktadır. Sahanın toplam kurulu gücü bu türbinlerle 39.2 MW'lık bir değere tekabül etmekteyken 2016 yılında 6 adet 2.83 MW Enercon türbinlerin ilave edilmesiyle 56.2 MW'a yükselmiştir. Sahadaki 2006 yılında kurulan türbinlerin řu anda 17 yaşına ulaştığı düşünöldüğünde önümüzdeki 5-10 yıllık süre zarfında bir yeniden güçlendirmeye gidilmesi çok olası bir durumdur. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 2.35'te verilmiştir [63].



Şekil 2.35. Mare Manastır RES [53].

2007 yılında elektrik üretmeye başlayan diğer eski santrallerden bir diğer de Çanakkale İntepe'de kurulmuş olan Anemon RES'tir. Santral her biri 800 kW'lık güce sahip 38 adet Enercon E-48 türbinden oluşmaktadır. Santralin bu kurulumların ardından sahip olduğu kurulu güç değeri 30.4 MW iken, yapılan yeni türbin montajlarıyla 2014 yılında 35 MW, 2016 yılında ise 55.7 MW olmuştur. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 2.36'da verilmiştir [54].



Şekil 2.36. Anemon RES [54].

Bir diğer 2007 yılında faaliyete geçen santral Polat Enerji ve Demirer Enerji ortaklığında Çanakkale Gelibolu'da kurulmuş olan Burgaz RES'tir. 13 adet 800 kW lık güce sahip E-48 ve 5 adet 900 kW'lık güce sahip E-44 Enercon türbinden yani toplamda 18 adet türbinden oluşan bu sahanın toplam gücü 14.9 MW'tır. Ve son bir eski santral örneği olarak 2008 yılında Demirer Enerji tarafından Muğla'nın Datça bölgesinde kurulan Dares Datça RES, 28 tane 800 kW'lık E-48 ve 8 tane 900 kW'lık E-44 Enercon türbinden oluşmaktadır. Bu verilerle sahanın toplam kapasitesi başlangıçta 29.6 MW iken 2017 yılında 12 MW'lık bir ilave kapasiteyle 41.6 MW'a ulaşmıştır. Yine ilk kurulumlarından bu yana 15 yıl geçtiği için bu santrallerde yakın zamanlarda bir ömür uzatma veya yeniden güçlendirme ile mevcut sahada yaşam sonu değerlendirilmesi yapmak muhakkak ki kaçınılmaz olacaktır. Bu iki sahaya dair birer görsel sırasıyla Şekil 2.37 ve 2.38'de verilmiştir [55,56].



Şekil 2.37. Burgaz RES [55].



Şekil 2.38. Dares Datça RES [56].

Türkiye’de kurulmuş ve hala faaliyette olan örnek bu eski santrallerin verilerini belirtmenin yanı sıra aynı zamanda Türkiye’de kurulu olan tüm eski santrallerde bulunan eski nesil, düşük güçte ve düşük verime sahip türbin ve bileşenlerinin değerlendirilmesini yapmak önemlidir. Bu doğrultuda aşağıda verilen Tablo 2.4’te Türkiye’de yer alan en eski türbinlerin yaş-güç çizelgesi yer almaktadır.

Tablo 2.4. Türkiye’de yer alan en eski türbinlerin yaş-güç dağılımı

RT Yaşları	Toplam RT (adet)	<1 MW	>1 MW ve <2 MW	>2 MW ve <3 MW	>3 MW ve <3.5 MW
>20	32	32	0	0	0
16-20	170	108	26	36	0
10-15	1189	153	49	791	196
Toplam	1381	293	75	827	196

TÜREB veri tabanında bulunan Türkiye’de kurulu olan rüzgâr enerji santralleri istatistiklerinden elde edilen bilgilere göre yukarıdaki tabloda gösterildiği üzere kurulumundan bu yana 21-25 yıl olmuş rüzgâr türbini sayısı 32’dir. Bunların hepsi 3 adet 500 kW, 12 adet 600 kW ve 17 adet 600 kW olmak üzere 1 MW’lık kapasitenin altında bir güç değerine sahiptir. İlk kurulumundan bu yana 16-20 yıl geçmiş rüzgâr türbini sayısı ise 170 adettir. Bu türbinlerden 108 tanesi 1 MW’ın altında bir kapasiteye

sahiptir. Geri kalan 26 türbin 1-2 MW arası ve 36 türbin 2-3 MW arasında bir güç değerine sahiptir. Son olarak ise ilk kurulumundan günümüze dek 10-15 yıl olmuş olan türbin sayısı ise 1189'dur. Bunlardan 153 tanesi 1 MW'ın altında bir kapasiteye sahiptir. Dolayısıyla bu verilerden görüleceği üzere özellikle en eski santrallerde kullanılan düşük güçteki bu türbinlerin gün geçtikçe daha da yaşlandıkları ve teknik ömürlerinin sonuna yaklaştıkları anlaşılmaktadır. Daha önceden de bahsedildiği üzere bazı izin ve lisans süreçlerine bağlı olarak veya sözleşmelere bağlı olarak yapılan gelecek yatırımların yanında bu eski türbinlerin yenileriyle değişerek veya eski türbinlerde teknolojik olarak güncellemeler yaparak bir yeniden güçlendirme çalışması yürütmek bu alanda oldukça fazla bir potansiyel ortaya koymaktadır.

Rüzgâr enerjisinde Türkiye'de en eski santrallerin ve türbinlerin yakın zamanda değişime muhtaç olacağı ve proje izin, sözleşme sürelerinin sonuna gelmesi dolayısıyla atılacak olası yeniden güçlendirme adımları yanı sıra yeniden güçlendirmeye ve ömür uzatma çalışmalarına etkiyecek birkaç husus daha vardır.

Öncelikle vurgulamak gerekir ki, çalışmada yer alan Bölüm 1.3'ün sonunda bahsedildiği üzere mevcut sahada yapılacak bir yaşam sonu çalışması potansiyelini değerlendirmek adına mali bir analiz yapılmalıdır, ki en nihayetinde bir kazanç getirisi olmayacak bir çalışmayı yürütmek yatırımcı açısından hiç de mantıklı olmayacaktır. Bu doğrultuda devlet tarafından yapılacak mali teşviklerin, diğer finansman kaynakları, elektrik piyasası ve diğer mali hususların çalışma üzerindeki etkilerini analiz etmek oldukça önemli olmaktadır. Nitekim EPDK Şeffaflık Platformunda verilen gün öncesi piyasası elektrik takas fiyatındaki son verilere bakıldığında saatlik elektrik üretim değeri MWh/yıl cinsinden dikkate değer bir artış göstermiştir. Elbette ki bu artış her zaman olacaktır denemez lakin şu aşamada yapılacak bir yatırımla birlikte özellikle bu elektrik fiyatlarıyla projelerin amortisman süresi daha kısa sürede tamamlanacaktır ve proje, mülk sahibi daha kısa zamanda kazanç elde etmeye başlayacaktır. Bunun yanı sıra özellikle Aselsan firmasının üretimine başladığı yüksek teknoloji ve güce sahip yerli türbinler ile bu yeniden güçlendirme yatırımlarına hız kazandırmak da söz konusu olabilir. Zira yerli türbin kullanımıyla birlikte önemli miktarda yatırım maliyetinden azalma meydana gelecektir ki bu durum çalışmaları elbette çok daha ekonomik kılacaktır. Ayrıca belirtmekte fayda var ki, yapılan

görüşmelere göre bu konuda mevcut bir mevzuat olmaması dolayısıyla olası bir yeniden güçlendirme çalışmasında toplam kurulu gücün artırılmasına gidilmesi şu anda pek mümkün gözükmemektedir.

Son olarak çalışmanın özeti niteliği taşıyan bir açıklama olarak, sektör nabzını ölçme adına yapılan bir görüşmede genel manada rüzgâr enerjisi yatırımlarında yeniden güçlendirmenin ve diğer yaşam sonu stratejilerini uygulamanın gün geçtikçe daha da gündeme geldiği vurgulanmıştır. Özellikle 15-25 yıldır işletimde olan rüzgâr enerji santrallerinde bu faaliyetlerin uygulanmaya başlandığı belirtilmiştir. Esasında tamamen türbinlerin sökülüp yerlerine daha büyük güçte türbinlerin yerleştirilmesi üzerine uygulanan yeniden güçlendirme operasyonları kimi zaman bazı türbin bileşenlerinin değişimi ve yenilenmesi ile de olmaktadır, lakin küresel olarak bu durum nispeten komple türbin değişimine göre az miktarda gerçekleşmiştir.

Ayrıca görüşmede, tamamen türbin değişimi esaslı yeniden güçlendirme (tam yeniden güçlendirme) projelerinin yatırımcılar açısından yeni bir santral kurmaya çok yakın bir çalışma olduğu ifade edilmiştir. Ancak deneyimlere göre yeni bir santral kurmaktan ziyade mevcut bir sahada tam yeniden güçlendirme uygulamak ile birden fazla önemli seviyede olumlu sonuç ortaya çıkmaktadır. Bunlar temel olarak mevcut sahanın verilerinin bilinmesi üzerine daha sağlıklı tahminler yürütmek ve projeyi daha verimli oluşturmak ve de daha yüksek ve daha verimli enerji çıkışı elde etmektedir.

Yapılan görüşmede aynı zamanda Türkiye açısından da bir inceleme yapılmıştır ve Türkiye’de yer alan bazı santrallerde türbin ve saha yaşlarının 15 yılı geçmesi üzerine yakın zamanda bu çalışmalara yönelineceği vurgulanmıştır. Keza mevcut sahaların lisans sürelerinin de yaklaşık 49 yıllık olması sebebiyle bir noktada yaşam sonu stratejilerinin çok detaylı değerlendirileceği ve somut olarak yürütüleceği ifade edilmiştir. Bu aşamada bazı kamu ve özel kuruluşların olabildiğince tüm koşulları ve süreçleri uygun bir şekilde işlemeleri önemli bir husus olarak nitelendirilmiştir.

3. ÖRNEK BİR SAHADA YENİDEN GÜÇLENDİRME ANALİZİ

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi Türkiye’de bulunan en eski RES’lerin bu hususta değerlendirilmesi gelecek yatırımlar adına çok önemli bilgiler sağlamaktadır. Keza bunu daha da genişletmek adına yine kurulumundan bu yana uzun bir süre geçmiş olan örnek bir sahada oluşacak çıktı verilerini değerlendirmek daha da faydalı fikirler sunacaktır. Bu bağlamda çalışmanın bu bölümünde yeniden güçlendirme potansiyelini daha somut olarak değerlendirmek adına bir saha özelinde bu durum örneklenmiştir.

3.1. Saha Bilgileri

Bu çalışmada bilgilerinden ve verilerinden faydalanılan rüzgâr enerji santrali Dost Enerji firmasının işletme sahibi olduğu ve 2008 yılında İzmir, Bergama’da faaliyete giren Yuntdağ RES’tir. Bu santralde 24 adet 2.5 MW’lık N90-2500 Nordex türbin bulunmaktadır ve bu bağlamda santral kurulu gücü 60 MW’tır. Bu sahaya dair bir görsel Şekil 3.1’de verilmiştir [57].



Şekil 3.1. Yuntdağ RES [57].

3.2. Materyal ve Yöntem

İlk kurulumundan bu yana yaklaşık 15 sene geçmiş olan bu santralde yakın gelecekte yani 5-10 yıl içinde mevcut alandan daha da faydalanmak üzere bir yaşam sonu değerlendirmesi yapmak oldukça potansiyel bir durum arz etmektedir. Bu doğrultuda örnek sahaya dair diğer bilgiler, bu sahada yapılan analizin yöntemi ve ortaya çıkan bulgular aşağıda değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın uygulanmasında etken olan parametreler; Santral 2020 yılı elektrik üretim verileri, mevcut sahada bulunan bir türbinin ürettiği ortalama enerji miktarı, mevcut türbin modelinin güç eğrisi, o türbinin yıl içinde maruz kaldığı rüzgâr hızı, sahanın rüzgâr yoğunluğu, yeni nesil son teknoloji bazı türbin modellerinin güç eğrileri ve teknik bilgileri, elektrik spot piyasa fiyatları olmak üzeredir.

Bu çalışmada uygulanan yöntem, sahada bulunan mevcut 24 adet türbinin yerlerinden sökülmesi ve o türbinlerin yerlerine saha kurulu gücünü korumak üzere tam yeniden güçlendirme seçeneğiyle yeni nesil daha büyük güçte türbinlerin kurulması ile ortaya çıkacak muhtemel enerji üretim miktarları ve yıllık kazancın elde edilmesini sağlamaktır.

Bu doğrultuda ilk olarak sahanın saatlik bazda 2020 yılında ürettiği toplam elektrik enerjisi miktarından yola çıkılarak sahadaki bir türbinin ürettiği ortalama enerji değeri yine saatlik bazda olmak üzere saptanmıştır. Mevcut türbin modeli olan N90-2500 Nordex türbinin güç eğrisinden faydalanarak ve türbinin saatlik olarak ürettiği enerji değerlerine göre o saatte ortaya çıkan ortalama rüzgâr hızı verisi belirlenmiştir. Çalışmanın ilk aşaması böylelikle tamamlanmıştır.

İkinci aşamada ise tam yeniden güçlendirme sonucu mevcut sahaya kurulacak örnek türbin modelleri (N131 - 3.6 MW, N149 - 5.9 MW, N163 -5.5 MW, N163 -5.7 MW, GE 158 - 5.3 MW, GE 158 - 5.8 MW, GE 158 - 6.1 MW, GE 164 - 6.0 MW) teker teker analiz edilmiştir. Yani ilk olarak birinci aşamada tespit edilen sahanın saatlik bazda sahip olduğu rüzgâr verilerine göre ve örnek teşkil edecek bir türbin modelinin güç eğrisine göre saatlik bazda ortaya çıkacak güç verileri belirlenmiştir. Bunun akabinde sahada mevcut kurulu gücü korumak adına yeni türbin modelinin gücüne göre sahada kullanılacak toplam türbin adedi doğrultusunda sahanın toplam gücü ve toplam ürettiği enerji miktarları saptanmıştır.

Her bir türbin modeli için bu değerler saptandıktan sonra EPDK-Şeffaflık Platformu-Piyasa Takas Fiyatı 2020 yılı elektrik üretim fiyatları üzerinden ortaya çıkan ortalama yıllık kazanç değerleri ortaya konmuştur.

3.3. Çalışmanın Çıktıları

Çalışmanın tüm bu çıktı verilerinin bulunduğu tablolar (Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3) aşağıda verilmiştir. Verilen bu tablolarda sarı renkte gösterilen satır, mevcut sahada kullanılan referans niteliğindeki türbinin verilerini temsil etmektedir. Diğer satırlarda ise yeni teknoloji örnek teşkil eden türbin modelleri ve bunların ortaya çıkardığı değerler verilmektedir.

Tablo 3.1. Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim verileri (v, sabit)

RT No	RT Modeli	Rüzgâr Türbini Enerjisi (MWh/yıl)	Rüzgâr türbini adedi	Toplam RES Enerjisi (MWh/yıl)
Ref.	N90 - 2.5 MW	9.273,53	24	222.564,76
1	N131 - 3.6 MW	15.853,11	-	-
2	N149 - 5.9 MW	22.903,77	-	-
3	N163 -5.5 MW	23.553,16	-	-
4	N163 -5.7 MW	24.519,25	-	-
5	GE 158 - 5.3 MW	22.956,01	-	-
6	GE 158 - 5.8 MW	24.355,55	-	-
7	GE 158 - 6.1 MW	24.784,57	-	-
8	GE 164 - 6.0 MW	25.502,07	-	-

Tablo 3.1’de, mevcut sahanın enerji üretim verilerinden ve referans türbin güç eğrisinden elde edilen rüzgâr hızı değerleri neticesinde ve diğer türbin güç eğrileri doğrultusunda türbinlerin ortaya koydukları güç ve dolayısıyla ürettikleri enerji miktarları verilmektedir.

Tablo 3.2. Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim değerleri, kullanılacak türbin adedi, toplam RES üretim değeri ve santral yıllık kazanç verisi (v, sabit)

RT No	RT Modeli	Rüzgâr Türbini Enerjisi (MWh/yıl)	Referans güce (60 MW) dayalı olarak RES'te kullanılacak yaklaşık türbin miktarı	Yeni RT miktarlarına göre yeni toplam RES Enerjisi (MWh/yıl), v=sabit	Yıllık Kazanç (TL)
Ref.	N90 - 2.5 MW	9.273,53	-	-	61.311.860,86
1	N131 - 3.6 MW	15.853,11	17	269.502,87	74.377.900,10
2	N149 - 5.9 MW	22.903,77	10	229.037,70	63.153.533,04
3	N163 -5.5 MW	23.553,16	11	259.084,76	71.477.524,25
4	N163 -5.7 MW	24.519,25	11	257.452,13	74.415.597,42
5	GE 158 - 5.3 MW	22.956,01	11	252.516,11	69.680.657,75
6	GE 158 - 5.8 MW	24.355,55	10	243.555,50	67.193.125,24
7	GE 158 - 6.1 MW	24.784,57	10	247.845,71	68.356.568,99
8	GE 164 - 6.0 MW	25.502,07	10	255.020,73	70.363.610,43

Tablo 3.2’de, ilk tabloda gösterildiği gibi yeni türbin modellerinin güç eğrileri vasıtasıyla ve 1. aşamada elde edilen rüzgâr verileri ile bulunan yeni türbinlerin enerjisi gösterilmektedir (3.sütun). Bu sefer saha çıkışını elde etme adına sahada mevcut kurulu güç değeri olan 60 MW’ı korumak adına yeni türbinler ile eklenecek türbin adedi belirlenmiştir (4.sütun). Dolayısıyla bu veriler ışığında santralin toplam ürettiği enerji değerleri tespit edilmiştir (5.sütun). Hemen akabinde ise saatlik bazda elektrik takas fiyatı üzerinden ve enerji üretim verileri ile santralin ortaya koyacağı yaklaşık kazanç değerleri gösterilmiştir (6.sütun).

Fakat bu yukarıdaki tablolarda gösterilen çıktı değerleri gerçeğe yakın değerler olmamaktadır. Burada atlanılmaması gereken husus, birinci aşamada elde edilen sahanın rüzgâr verileri yeni nesil türbinlerin kullanımı ile aynı değerlerde olmamaktadır. Zira yeni türbin modellerinin teknik olarak daha büyük rotor çaplarına ve daha yüksek uzunluklara sahip oldukları düşünüldüğünde bu türbinlerin elde ettikleri rüzgâr hızı daha da artmaktadır, ki bu veri daha önceden (Denklem 1.1’de) vurgulandığı üzere türbinin ürettiği elektrik değerini Denklem 3.1’de gözükeceği gibi ciddi bir şekilde etkilemektedir. Ayrıca türbinin yüksekliği arttığında eski değere göre

yeni rüzgâr hızı verisinin hesaplanması da Denklem 3.2’de verilmektedir. Bu denklemin bileşenleri de denklemin hemen altında verilmiştir. Bunun yanı sıra türbinin boyunun uzamasıyla birlikte daha yüksekte rüzgâr yoğunluğunun azalması da meydana gelmektedir ancak bu değişken çok ciddi bir etki oluşturmamaktadır.

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (3.1)$$

$$V = V_0 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^a \quad (3.2)$$

H_0 : Referans yükseklik değeri (m)

V_0 : Referans rüzgâr hızı değeri (m/s)

H : Yeni yükseklik değeri (m)

V : Yeni rüzgâr hızı değeri (m/s)

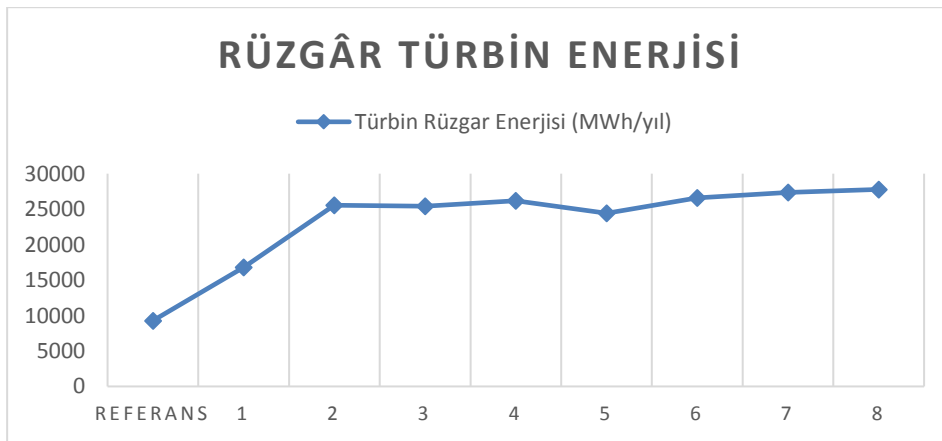
a : Yüzey pürüzlülük sabiti

Bu ifadeler ve hesaplamalar göz önüne alındığında ortaya çıkması gereken asıl çıktı değerleri yaklaşık olarak Tablo 3.3’te verilmiştir. Böylelikle aşağıdaki tabloda bir önceki tabloda verilen çıktı değerlerine göre daha yüksek çıktı değerleri alındığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi az önce de belirtildiği gibi yeni ve büyük türbinlerin daha yüksek rüzgâr hızına maruz kalmalarından kaynaklı daha fazla üretim sağlıyor olmalarıdır. Ayrıca belirtmek gerekir ki yeni türbinlerle kapasite faktörünün de daha fazla olacağını da göz önüne almak gerekmektedir.

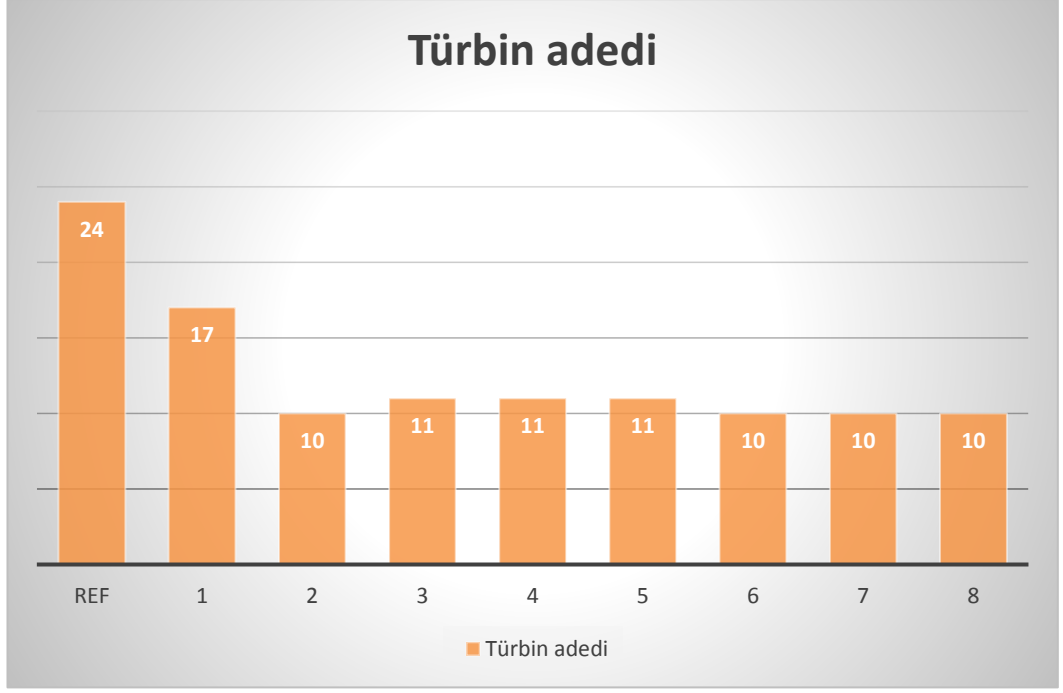
Tablo 3.3. Çalışmanın asıl çıktı verileri (Örnek rüzgâr türbinlerinde ortaya çıkan enerji üretim değerleri, kullanılacak türbin adedi, toplam RES üretim değeri ve santral yıllık kazanç verisi)

RT No	RT Modeli	Rüzgâr Türbini Enerjisi (MWh/yıl)	Referans güce (60 MW) dayalı olarak RES'te kullanılacak yaklaşık türbin miktarı	Yeni RT miktarlarına göre yeni toplam RES Enerjisi (MWh/yıl)	Yıllık Kazanç (TL)
Ref.	N90 - 2.5 MW	9.273,53	24	222.564,76	61.311.860,86
1	N131 - 3.6 MW	16.791,56	17	285.456,50	78.779.235,16
2	N149 - 5.9 MW	25.528,48	10	255.284,80	70.439.418,04
3	N163 -5.5 MW	25.426,58	11	279.692,43	76.533.662,84
4	N163 -5.7 MW	26.191,79	11	288.109,65	79.300.749,32
5	GE 158 - 5.3 MW	24.403,92	11	268.443,10	74.102.519,11
6	GE 158 - 5.8 MW	26.591,24	10	265.912,40	73.392.094,07
7	GE 158 - 6.1 MW	27.349,36	10	273.493,60	75.472.860,45
8	GE 164 - 6.0 MW	27.777,87	10	277.778,70	76.666.583,83

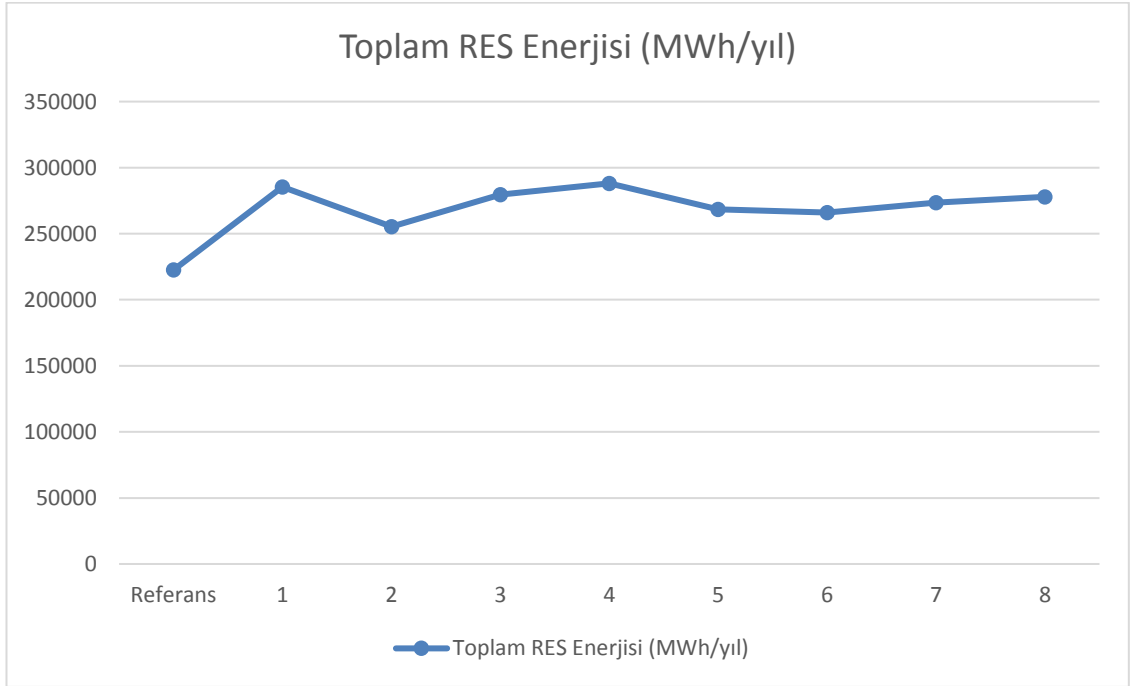
Bu asıl çıktı verilerini oluşturan Tablo 3.3'te diğer tablolara göre 3.sütun değişmiştir. Burada yeni rüzgâr hızları Denklem 3.2'de verilen formüle göre hesaplanmış ve dolayısıyla türbin güç eğrileri doğrultusunda bu rüzgâr hızlarına tekabül eden güç değerleri üzerinden türbin enerji üretim verileri güncellenmiştir. Dolayısıyla bir önceki tabloda verilen diğer parametreler gibi santral toplam enerji çıktısı ve toplam yıllık kazanç değerleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Tüm bu veriler grafik halinde Şekil 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Örnek rüzgâr türbinlerine göre türbin enerji üretim verileri



Şekil 3.3. Örnek rüzgâr türbinlerine göre sahada kullanılacak türbin adetleri



Şekil 3.4. Örnek rüzgâr türbinlerine göre RES'te toplam üretilen enerji değerleri



Şekil 3.5. Örnek rüzgâr türbinlerine göre yıllık bazda elde edilecek kazanç değerleri

3.4. Çıktıların Yorumlanması

Örnek teşkil eden model türbinlerin meydana getirdikleri bu verilere göre, santralde tam yeniden güçlendirme yapılması düşünüldüğünde 24 adet N90-2500 türbin yerine, tablolarda 4 no'lu örnek model olarak verilen GE 158- 5.7 MW türbinden 11 adet kullanılmasıyla en yüksek enerji üretim değerine ve yıllık getiriye ulaşılabileceği gözlemlenmiştir. Enerji üretim bakımından çıktı 222.564,76 MWh/yıl referans değer yerine 288.109,65 MWh/yıl olmak üzere iken yıllık mali getiri bakımından çıktı 61.311.860,86 TL/yıl yerine yaklaşık olarak 79.300.749,32 TL/yıl olmuştur. Bunun yanı sıra tabloda 1 no'lu örnek model olarak verilen N131-3600 türbinden sahada 17 adet kullanılmasıyla da oldukça yüksek çıktılar elde edilmiştir (222.564,76 MWh/yıl yerine 285.456,50 MWh/yıl ve 61.311.860,86 TL/yıl yerine yaklaşık olarak 78.779.235,16 TL/yıl).

Diğerlerine görece en düşük üretim artışı sağlayan türbin modeli ise tabloda 2 no'lu örnek model olan ve sahada 10 adet kullanılması planlanan N149-5.9 MW olmuştur. Enerji üretim bakımından çıktı 222.564,76 MWh/yıl yerine 255.284,80 MWh/yıl olmak üzere iken yıllık mali getiri bakımından çıktı 61.311.860,86 TL/yıl yerine yaklaşık olarak 70.439.418,04 TL/yıl olmuştur.

Bu çalışmanın çıktı verilerinden anlaşılabilir ki, büyük güçte yeni nesil örnek türbin modelleri kullanımıyla beraber, santral kurulu gücü korunsa dahi tam yeniden güçlendirmeyle birlikte elektrik üretiminde ciddi miktarlarda artış söz konusu olmaktadır. Bununla beraber elbette yıllık finansal getirinin de oldukça arttığını

söylemek mümkün. Nitekim en iyi opsiyonla ortaya çıkan enerji üretim artış oranı %29,5 iken en başarısız artış oranı %14,7 olmuştur ve yıllık kazanç bakımından en iyi artış oranı %29,35 iken, en zayıf artış oranı %14,8 olmuştur. Bu bağlamda mevcut sahada kullanılması potansiyel türbin modelinin ve türbin adedinin çok başarılı bir şekilde seçilmesi özellikle daha efektif çıktı verileri alınması açısından oldukça önem arz etmektedir. Özellikle türbin güç eğrileri ve türbinlerin teknik verileri iyi analiz edilmeli, bu türbinlerin mevcut sahada kullanılmasına engel herhangi bir durumun olmamasına dikkat edilmelidir.

Esasında bu çalışmada değerlendirilen yaşam sonu senaryosu kurulu gücü koruyarak bir tam yeniden güçlendirme yapmaktır fakat bu metot dışında çalışmada Bölüm 1’de bahsedildiği gibi birden fazla farklı seçenek bu sahaya uygulanabilir. Santral toplam kurulu gücü koruyarak veya değiştirerek kısmi veya tam yeniden güçlendirme yapmanın yanı sıra mevcut türbinleri daha güncel ve teknolojik bileşenlerle yenileyerek faydalı ömür uzatma genel olarak tüm seçeneklerdir. Yeniden güçlendirme seçeneklerinde sahada yer alan tüm türbinlerin sökülmesinden ziyade daha düşük kapasite faktörüne sahip düşük verimde çalışan türbinlerin değiştirilmesine yönelik bir uygulama da oldukça makul bir seçenek olabilir. Ancak elbette tüm bu opsiyonların genel bir analizi yapılmalıdır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgâr enerji santrallerinde hem türbin hem de santral ömrü bittiğinde proje sahiplerinin bu aşamadan sonra izleyebilecekleri birkaç yol bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, sahada yapılan bir yaşam sonu değerlendirmesi sonucu mevcut türbinlerin sökülmesi ile santralin hizmetten çıkarılmasıdır. İkincisi, mevcut türbin bileşenlerini yenileriyle değiştirerek sahanın ömrünü bir süre daha artırmaktır. Üçüncü olarak ise sahada yer alan türbinleri demonte ederek ve yerlerine yeni nesil büyük güçte türbinler yerleştirerek sahayı tekrardan güçlendirme yöntemidir. Yeniden güçlendirme, şu ana dek yapılan yaşam sonu değerlendirmelerine göre diğer yaşam sonu stratejilerine kıyasla ortaya çıkardığı daha pozitif etkiler ve daha başarılı sonuçlarla en çok uygulanan ve yatırımcılara en makul gelen opsiyon olmuştur. Bu husus dolayısıyla bu çalışmada yeniden güçlendirmeye daha fazla odaklanılmıştır.

Bu tez çalışmasında yeniden güçlendirmeyle birlikte diğer yaşam sonu stratejilerinin anlamları, kıyaslanmaları, ortaya koydukları pozitif ve negatif etkiler, bu çalışmalara etkileyen kriterler ve bu çalışmaların uygulanması ile ortaya çıkabilecek sonuçlar detaylıca değerlendirilmiştir. Özellikle yeniden güçlendirmenin üzerine yoğunlaşıldığı bu çalışmada örnek niteliği taşıması açısından tüm dünyada bu alanda yapılan ve yakın zamanda faaliyete konulacak uygulamaların somut verilerle incelenmesi yapılmıştır. Ayrıca açıkça anlaşılabilir ki, bu yaşam sonu değerlendirmeleri en eski santrallerin karada bulunmaları dolayısıyla kara (onshore) rüzgâr türbinlerinde daha çok irdelenmiştir.

Tüm bunların yanında yeniden güçlendirme ve ömür uzatma gibi mevcut sahadan daha iyi şekilde faydalanma adına yapılacak bu tarz çalışmaların önemi de iyice irdelenmiştir. Zira ülkelerin ulusal karbon emisyon azaltma hedeflerini (Net Sıfır Hedefleri) ve elektrik üretim verilerini artırma adına aldıkları politikaları karşılama adına özellikle yeniden güçlendirme ciddi bir pay sahibi olma konusunda aday çalışma niteliği taşımaktadır. Yalnız belirtmek gerekir ki, bu ulusal ve evrensel politikaları sağlamak için yeniden güçlendirme ve ömür uzatma çalışmalarına sağlanacak yatırım destekleri diğer yatırım desteklerinden daha düşük payda olmamalıdır yani tüm makul

yatırım seçenekleri olabildiğince dengeli bir şekilde ülkeler tarafından desteklenmelidir.

Bu tez çalışması sonucunda yeniden güçlendirme ve diğer yaşam sonu senaryolarına etki eden en önemli teknik ve idari unsurlar değerlendirilmiştir. Bunlar; sahanın mevcut durumu, eski türbinlerin servis ve bakım sözleşmesinin kalan geçerlilik süresi, mevcut türbinlerin her birinin kapasite faktöründeki yıllara göre değişim oranı, devletin bu uygulamalara yönelik çıkaracağı mevzuat ve yönetmelikler, yine devletin yatırımcıya uygulayacağı teşvik mekanizmasının durumu ve ek teşvik mekanizmalarının olup olmayacağı vb. olmak üzere ifade edilmiştir, fakat yapılan araştırmalar doğrultusunda tüm bu parametrelerin yanı sıra çalışmanın ekonomik açıdan mantıklı olması için mali bir analiz yapmak çok önemlidir. Bu çalışmada en belirleyici mali etkenlerin ise mevcut türbinlerin satılması veya geri dönüştürülmesi hususu için piyasa pazarının durumu, yeni türbinlerin maliyetleri, elektrik piyasa fiyatlarının seviyesi, yeniden güçlendirme için yatırım maliyetleri ve ömür uzatma için işletme maliyetleri olduğu belirtilmiştir.

Yine ifade edilmiştir ki, yatırım maliyeti olarak ve teknik, idari işlemler bakımından bir santralde bulunan türbinlerin faydalı ömürlerini uzatmak çok daha makul bir seçenektir, fakat bir yeniden güçlendirme çalışması her ne kadar tüm bu parametrelerde ömür uzatmaya göre biraz daha karmaşık ve negatif gibi gözükse de olası artıları oldukça fazla olmuştur. Nitekim yapılan çalışmalara göre kapasite faktörü ve pek çok teknik verinin gelişmesi hem elektrik üretimindeki ciddi artışlar hem de karbon emisyonlarının azalmasıyla daha olumlu çevresel etkiler sağlamaları dünya genelinde yeniden güçlendirmenin en büyük sonuçları olmuştur. Tüm bunların yanında kısa vadede bir çözüm olmaktan ziyade uzun vadede çok büyük finansal getiri elde edilmesi bu çalışmaları çok parlak yapan bir diğer husustur. Zira yüksek elektrik fiyatları, düşük işletme-bakım maliyetleri ve ek finansmanlarla birlikte projenin çok daha kısa sürede amorti edip yüksek kazanç değerleriyle yatırımcıya kısa zamanda kar elde ettirecek olması da gayet olasıdır. Özetle kullanım ömrünü uzatmak veya kısmi bir yeniden güçlendirme ile türbin ana bileşenlerini değiştirerek bir yaşam sonu fizibilitesi oluşturmak daha az risk teşkil etmektedir lakin, tam yeniden güçlendirme çoğunlukla en iyi ekonomik çıktılarla sonuçlanmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada tüm dünyada olduğu gibi Türkiye açısından da rüzgâr enerji santrallerinde bir yaşam sonu değerlendirmesi yapılmıştır. Dünyada bu alanda ortaya

konulan tecrübeler elde tutulur verilerle değerlendirilmiştir ve rüzgârda öncü Almanya, İspanya, Danimarka, ABD gibi ülkelerin izlediği politikalar irdelenmiştir. Türkiye açısından ise temel olarak yeniden güçlendirme veya ömür uzatma yöntemlerinin nasıl, ne zaman ve nerelerde yapılabileceği açıklanmıştır. Bu bağlamda özellikle kurulu en eski santrallerin analizi yapılmıştır ve yeniden güçlendirme gibi yaşam sonu senaryolarına olan gerekliliğin ne durumda olduğu irdelenmiştir. Tüm bunlar Türkiye'nin mevcut rüzgâr santral verilerinden faydalanarak ortaya konmuştur. Ayrıca Türkiye için bu çalışmalarda hangi unsurların daha önemli ve belirleyici olduğu ifade edilmiştir.

Bunların yanında çalışmanın ana kısmı olarak, örnek niteliği taşıması için Türkiye'de yer alan gerçek bir sahanın verileri üzerinden bir yeniden güçlendirme analizi yapılmıştır. Çıktı olarak, mevcut sahada büyük güçte yeni nesil rüzgâr türbini kullanımıyla beraber, santral kurulu gücü korunsa dahi tam yeniden güçlendirmeyle birlikte elektrik üretiminde ciddi miktarlarda (yaklaşık % 15-30'luk) artış söz konusu olmaktadır. Bununla beraber elbette yıllık finansal getirinin de oldukça (yaklaşık % 15-30'luk bir artışla) yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki eğer çalışma başlangıç açısından hem teknik hem ekonomik yollarla mümkün ise çalışmanın çıktıları da oldukça olumlu olmaktadır.

Tüm bunların ışığında bilinmesi gerekir ki, Türkiye'de 2023 yılı itibariyle kurulumundan bu yana 20-25 yıl geçmiş olan türbinlerin toplam gücü 20.1 MW iken, 15-20 yıl geçmiş olan türbinlerin kapasitesi 463.65 MW ve 10-15 yıl geçmiş olan türbinlerin kapasitesi ise 2535.4 MW olmuştur. Bu istatistiklere dayanarak 5-10 yıl içinde Türkiye'de bulunan rüzgâr santralleri toplam kurulu gücünün %20-25'i 20-25 yıllık olacaktır. Bu veriyi Dünya çapında vermek gerekirse, önümüzdeki 10 yıl içinde 180 GW'lık kurulu kapasite 20 yaşına ulaşacaktır. Dolayısıyla öngörüldüğü üzere hem tüm dünyada hem de Türkiye'de bu alanda yapılacak çalışmaların yakın zamanda hız kazanması beklenmektedir.

Son olarak değinilmelidir ki, her ne kadar yeniden güçlendirme çalışmaları ön planda tutulacak olsa da Türkiye'de bulunan rüzgâr enerji santralleri proje ve mülk sahipleri günümüz koşullarında mevcut varlıkların daha fazla kullanılması stratejisini daha çok benimsemektedirler. Özellikle güncel piyasanın kararsız ve dalgalı bir grafik çiziyor olması varlık sahiplerinin karar mekanizmalarını bu yönde etkilemektedir. Ancak bu

grafik elbette ki daha kararlı bir hal aldığında yeniden güçlendirme veya ömür uzatma çalışmalarını uygulamak gayet tabii olacaktır.

Genel olarak rüzgâr enerjisi santrallerinde yaşam sonu stratejilerini değerlendirme adına henüz Türkiye bazında literatürde herhangi bir analiz yapılmamıştır. Bu bağlamda bu çalışmanın önemi bu boşluğu doldurması açısından çok önemli olmuştur. Zira bundan sonra bu alanda yapılacak projelerin ve yatırımların bu çalışma ile şekillenmesi de ilerleyen zamanlarda söz konusu olabilir.

Bu çalışmanın yanında gelecek çalışmalara önerilerde bulunulması hususunda ayrıca Türkiye’de bir yeniden güçlendirme çalışmasının ekonomik uygulanabilirliğini daha detaylı incelemek adına bazı duyarlılık analizleriyle mali bir rapor hazırlanabilir. Keza yine örnek bir saha verilerinden faydalanarak yeniden güçlendirmenin ve diğer yaşam sonu senaryolarının daha detaylı olarak modellenmesi oluşturulabilir. Gelecek çalışmalarda yeniden güçlendirilen bir rüzgâr çiftliğinin enterkonnekte şebekeye bağlanması durumunda sorun teşkil edecek durumların veya bu hususta nelere dikkat edilmesi gerektiğine daha detaylı yer verilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hartman, L. (2022, 16 Ağustos). Wind turbines: the bigger, the better. <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>
- [2] Pisano, F. (2022, 3 Ekim). Evolution of wind turbine size and power output (from Bloomberg New Energy Finance). https://www.researchgate.net/publication/335812782_Input_of_advanced_geotechnical_modelling_to_the_design_of_offshore_wind_turbine_foundations/figures?lo=1
- [3] Byrne, A. (2021, 19 Temmuz). Partial repowering of wind turbines: technical risks, oppurtunities and trends. <https://www.slideshare.net/AlexByrne12/partial-repowering-of-wind-turbines-technical-risks-opportunities-and-trends>
- [4] Abadie, L. M., ve Goicoechea, N. (2021). Old wind farm life extension vs. Full repowering: A review of economic issues and a stochastic application for Spain. *Energies*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/en14123678>
- [5] Leite, G. de N. P., Weschenfelder, F., de Farias, J. G., ve Ahmad, M. K. (2022). Economic and sensitivity analysis on wind farm end-of-life strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112273>
- [6] Doukas, H., Arsenopoulos, A., Lazoglou, M., Nikas, A., ve Flamos, A. (2022). Wind repowering: Unveiling a hidden asset. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112457>
- [7] Stetter, C., Wielert, H., ve Breitner, M. H. (2022). Hidden repowering potential of non-repowerable onshore wind sites in Germany. *Energy Policy*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113168>
- [8] Philpott, A., ve Windemer, R. (2022). Repower to the people: The scope for repowering to increase the scale of community shareholding in commercial onshore wind assets in Great Britain. *Energy Research & Social Science*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102763>
- [9] Ramírez, F. J., Villena-Ruiz, R., Honrubia-Escribano, A., Pérez-Barroso, A., ve Gómez-Lázaro, E. (2022). Assessment of different end-of-life strategies for wind power plants under uncertainty. *Energy Conversion & Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116158>
- [10] Piel, J. H., Stetter, C., Heumann, M., Westbomke, M., ve Breitner, M. H. (2019). Lifetime Extension, Repowering or Decommissioning? Decision Support for Operators of Ageing Wind Turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 1222(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1222/1/012033>

- [11] Kitzing, L., Jensen, M. K., Telsnig, T., ve Lantz, E. (2020). Multifaceted drivers for onshore wind energy repowering and their implications for energy transition. *Nature Energy*, 5(12), 1012-1021. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00717-1>
- [12] Fitzgerald, T., ve Giberson, M. (2021). Wind project performance with age: Policy, technology, markets, and the maturing wind power industry. *Electricity Journal*, 34(10). <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107047>
- [13] Fuchs, C., Kasten, J., ve Vent, M. (2020). Current state and future prospective of repowering wind turbines: An economic analysis. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123048>
- [14] del Río, P., Silvosa, A. C., ve Gómez, G. I. (2011). Policies and design elements for the repowering of wind farms: A qualitative analysis of different options. *Energy Policy*, 39(4), 1897-1908. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.035>
- [15] Herbert, G. M. J., Iniyar, S., ve Goic, R. (2010). Performance, reliability and failure analysis of wind farm in a developing Country. *Renewable Energy*, 35(12), 2739-2751. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.023>
- [16] Blanco, M. I. (2009). The economics of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1372-1382. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.004>
- [17] Serri, L., Lembo, E., Airoidi, D., Gelli, C., ve Beccarello, M. (2018). Wind energy plants repowering potential in Italy: technical-economic assessment. *Renewable Energy*, 115, 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.031>
- [18] Rubert, T., McMillan, D., ve Niewczas, P. (2018). A decision support tool to assist with lifetime extension of wind turbines. *Renewable Energy*, 120, 423-433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.064>
- [19] Ziegler, L., Gonzalez, E., Rubert, T., Smolka, U., ve Melero, J. J. (2018). Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1261-1271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.100>
- [20] de Simón-Martín, M., de La Puente-Gil, Á., Borge-Diez, D., Ciria-Garcés, T., ve González-Martínez, A. (2019). Wind energy planning for a sustainable transition to a decarbonized generation scenario based on the opportunity cost of the wind energy: Spanish Iberian Peninsula as case study. *Energy Procedia*, 157, 1144-1163. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.282>
- [21] Schwarz, C., ve Badia, E. (2021, 25 Eylül). Decommissioning Of Wind Farms: Costs And Oppurtunities. https://www.academia.edu/40226067/DECOMMISSIONING_OF_WIND_FARMS_COSTS_AND_OPPORTUNITIES
- [22] Jensen, J. P. (2019). Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*, 22(2), 316-326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>
- [23] Wisser, R., Bolinger, M., ve Lantz, E. (2019). Assessing wind power operating costs in the United States: Results from a survey of wind industry experts. *Renewable Energy Focus*, 30, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.05.003>

- [24] Mauritzen, J. (2014). Scrapping a Wind Turbine: Policy Changes, Scrapping Incentives and Why Wind Turbines in Good Locations Get Scrapped First. *The Energy Journal*, 35(2), 157-181. <https://www.jstor.org/stable/24695765>
- [25] Hamilton, S. D., Millstein, D., Bolinger, M., Wiser, R., ve Jeong, S. (2020). How Does Wind Project Performance Change with Age in the United States?. *Joule*, 4(5), 1004-1020. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.005>
- [26] Frantál, B. (2015). Have Local Government and Public Expectations of Wind Energy Project Benefits Been Met? Implications for Repowering Schemes. *Journal of Environmental Policy and Planning*, 17(2), 217-236. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2014.936583>
- [27] Prabu, T., ve Kottayil, S. (2021). Repowering a Windfarm – A Techno-Economic Approach. *Wind Engineering*, 39(4), 385-397. <https://www.jstor.org/stable/90007079>
- [28] Colmenar-Santos, A., Campiñez-Romero, S., Pérez-Molina, C., ve Mur-Pérez, F. (2015). Repowering: An actual possibility for wind energy in Spain in a new scenario without feed-in-tariffs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 319-337. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.041>
- [29] Himpler, S. ve Madlener, R. (2013). Repowering of Wind Turbines: Economics and Optimal Timing. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2236265>
- [30] World Wind Energy Association (2022, 11 Ekim). World market for wind power saw another record year in 2021: 97.3 Gigawatt of new capacity added. <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>
- [31] Top reality (2022, 15 Nisan). Highest wind energy producing countries – Largest producer of wind energy (1985-2020). https://www.youtube.com/watch?v=xXHPdk5_7A0&t=15s
- [32] Madlener, R., Glensk, B., ve Gläsel, L. (2019). Optimal timing of onshore wind repowering in Germany under policy regime changes: A real options analysis. *Energies*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/en12244703>
- [33] Martínez, E., Latorre-Biel, J. I., Jiménez, E., Sanz, F., ve Blanco, J. (2018). Life cycle assessment of a wind farm repowering process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 260-271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.044>
- [34] Global Wind Energy Council (2022, 15 Ekim). Global Wind Report 2022. <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>
- [35] Buchsbaum, L., ve Patel, S. (2016). Wind Turbine Repowering Is on the Horizon. *Power*. <https://www.powermag.com/wind-turbine-repowering-horizon/>
- [36] Deutsche Wind Guard (2022, 6 Ekim). Wind Statistics: Year 2021. <https://www.windguard.com/year-2021.html>
- [37] Deutsche Wind Guard (2022, 6 Ekim). Wind Statistics: Half Year 2022. <https://www.windguard.com/half-year-2022.html>

- [38] Johannsen, K. (2022, 23 Eylül). Rhineland-Palatinate speeds up wind power expansion. <https://www.energategate-messenger.com/news/215162/rhineland-palatinate-speeds-up-wind-power-expansion>
- [39] Matysik, S. (2022, 23 Eylül). Wind turbine N60 from Nordex Acciona WP. <https://en.wind-turbine-models.com/fotos/lm0t9ZkCgdP-nordex-se-nordex-n60-1300-1.3-mw-wind-turbine-generator-repowering-exchange-for-new-nordex-n117-3.0-delta-machines-altenbruch-cuxhaven-germany>
- [40] Franke, D. I. (2022, 23 Eylül). Wind turbines in Galmsbüll, Deutschland. https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Gamsb%C3%BCll_repowering.jpg
- [41] Stenger & Ibsen Construction (2022, 9 Ekim). Klim – Denmark’s Largest Repowering Project. <https://si-construction.com/projekter/klim/>
- [42] Mallahaslan, H. (2018). Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Ekonomik Etkileri. *Eskişehir Teknik Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü*. https://www.researchgate.net/publication/331564590_TURKIYE'DE_RUZGAR_ENERJISININ_EKONOMIK_ETKILERI
- [43] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022, 15 Ekim). Rüzgâr Enerjisine Dayalı Kurulu Güç Gelişimi. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>
- [44] Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (2022, 15 Ekim). Rakamlarla Rüzgâr Enerjisi. <https://tureb.com.tr/anasayfa>
- [45] Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (2022, 15 Ekim). Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu-Temmuz 2022 Özet. <https://tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-temmuz-2022/283>
- [46] Enerji Atlası (2022, 15 Ekim). Devrede olan rüzgâr enerji santralleri. <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>
- [47] Akgün, N., ve Dündar, C. (2022, 15 Ekim). Türkiye Rüzgâr Atlası. https://www.kimyaegitimi.org/sites/default/files/kuresel_isinma_projeleri/probleme_dayali_ogrenme_modeli/turkiye_ruzgar_atlası.pdf
- [48] Elektrik Mühendisleri Odası (2022, 16 Ekim). TL’ye dönüş yetmez; Yekdem suistimali bitmeli. <https://www.tmmob.org.tr/icerik/emo-tlye-donus-yetmez-yekdem-suistimali-bitmeli>
- [49] MC2 Haber (2022, 16 Ekim). Yenilenebilir Enerjili Üretim Tesisleri için YEKDEM Fiyatları Açıklandı. <https://mc2haber.com/yenilenebilir-enerjili-uretim-tesisleri-icin-yekdem-fiyatlari-aciklandi>
- [50] Demirer Holding (2022, 20 Ekim). Türkiyenin ilk rüzgâr enerji santrali Alize Germiyan. <https://www.demirer.com.tr/santral/alize/cesme/index.html>
- [51] Elektrik Üretim A.Ş. (2022, 20 Ekim). Alaçatı Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.euas.gov.tr/santraller/alacati-ruzgar-enerjisi-santrali>
- [52] Demirer Holding (2022, 20 Ekim). Bozcaada Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.demirer.com.tr/santral/bores/index.html>
- [53] Demirer Holding (2022, 20 Ekim). Mare Manastır Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.demirer.com.tr/santral/mare/index.html>
- [54] Demirer Holding (2022, 20 Ekim). Anemon Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.demirer.com.tr/santral/anemon/index.html>

- [55] Demirer Holding, (2022, 20 Ekim). Burgaz Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.demirer.com.tr/santral/dogal/burgaz/index.html>
- [56] Demirer Holding (2022, 20 Ekim). Dares Datça Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.demirer.com.tr/santral/dares/index.html>
- [57] Dost Enerji (2022, 20 Ekim). İnnores EÜAŞ, Yuntdağ Rüzgâr Enerji Santrali. <https://www.dostenerji.com/tr/santraller/yuntdag-res/>
- [58] Ganteng, S. (2022, 7 Ekim). The most suitable wind converter for every location, Enercon product overview, Multi MW E-126. https://www.academia.edu/42920094/The_most_suitable_wind_energy_converter_for_every_location_ENERCON_product_overview_Multi_MW_E_126
- [59] GE Renewable Energy (2022, 7 Ekim). Cypress Onshore Wind Turbine Platform. <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/onshore-wind/cypress-platform>
- [60] Nordex (2022, 7 Ekim). The N163/5.X - Even more power, the long blade variant. <https://www.nordex-online.com/en/product/n163-5-x/>
- [61] Vestas (2022, 7 Ekim). V150 - 6.0 MW - Technical Specifications. <https://www.vestas.com/en/products/enventus-platform/v150-6-0>
- [62] Nivedh, B. S., Devi, R. P. K., ve Sreevalsan, E. (2013). Repowering of Wind Farms - A Case Study. *Wind Engineering*, 37(2), 137-150. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.37.2.137>
- [63] de Bona, J. C., Ferreira, J. C. E., ve Ordoñez Duran, J. F. (2021). Analysis of scenarios for repowering wind farms in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110197>
- [64] Lacal-Arántegui, R., Uihlein, A., ve Yusta, J. M. (2020). Technology effects in repowering wind turbines. *Wind Energy*, 23(3), 660-675. <https://doi.org/10.1002/we.2450>
- [65] Dvorak, P. (2022, 3 Ekim). Power performance upgrades to wind turbines. <https://www.windpowerengineering.com/power-performance-upgrades-wind-turbines/>
- [66] Deutsche Wind Guard (2022, 3 Ekim). Statistics on wind energy development. <https://www.windguard.com/wind-energy-statistics.html>
- [67] Castro-Santos, L., Vizoso, A. F., Camacho, E. M., ve Piegiari, L. (2016). Costs and feasibility of repowering wind farms. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 11(10), 974-981. <https://doi.org/10.1080/15567249.2014.907845>
- [68] Romano, T., Mennel, T., ve Scatasta, S. (2017). Comparing feed-in tariffs and renewable obligation certificates: the case of repowering wind farms. *Economia e Politica Industriale*, 44(3), 291-314. <https://doi.org/10.1007/s40812-017-0071-z>
- [69] Hughes, G. (2022, 11 Ekim). The Performance of Wind Farms in the United Kingdom and Denmark Contents. <https://www.ref.org.uk/attachments/article/280/ref.hughes.19.12.12.pdf>

- [70] Staffell, I. ve Green, R. (2014). How does wind farm performance decline with age?. *Renewable Energy*, 66, 775-786. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.041>
- [71] Bezbradica, M., Kerkvliet, H., Borbolla, I. M., ve Lehtimaki, P. (2016, 14-16, Eylül). Introducing multi-criteria decision analysis for wind farm repowering: A case study on Gotland. A.Maheri (Ed.), *1st International Conference on Multidisciplinary Engineering Design Optimization* içinde. Belgrad, Sırbistan
- [72] Vestas (2022, 4 Ekim). Vestas secures order for 66 MW repowering project in Germany. <https://news.cision.com/vestas-wind-systems-a-s/r/vestas-secures-order-for-66-mw-repowering-project-in-germany,c3636379>
- [73] Brown, C. (2022, 25 Eylül). Repowering with Wind: Leveraging Latest Technology to Reduce Costs Across US Grid. <https://www.renewableenergyworld.com/om/repowering-with-wind-leveraging-latest-technology-to-reduce-costs-across-us-grid/#gref>
- [74] BayWa r.e. (2022, 12 Ekim). Greater Performance, Greater Yields. <https://www.baywa-re.fr/en/services/repowering/wind#areas-of-expertise>
- [75] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). EDP Renewables repowers 2nd phase of Blue Canyon Wind Farm in Oklahoma. <https://www.windpowerengineering.com/edp-renewables-repowers-2nd-phase-of-blue-canyon-wind-farm-in-oklahoma/>
- [76] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). Siemens Gamesa launches recyclable wind turbine blade for onshore projects. [windpowerengineering.com/siemens-gamesa-launches-recyclable-wind-turbine-blade-for-onshore-projects/](https://www.windpowerengineering.com/siemens-gamesa-launches-recyclable-wind-turbine-blade-for-onshore-projects/)
- [77] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). Leeward Renewable Energy repowers and expands Illinois wind farm. <https://www.windpowerengineering.com/leeward-renewable-energy-repowers-and-expands-illinois-wind-farm/>
- [78] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). Repowered California wind farm will produce 9 times the power. <https://www.windpowerengineering.com/repowered-california-wind-farm-will-produce-9-times-the-power/>
- [79] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). Big Sky Wind Farm in Illinois to get repowering facelift and increase output by 60%. <https://www.windpowerengineering.com/big-sky-wind-farm-in-illinois-to-get-repowering-facelift-and-increase-output-by-60/>
- [80] Windpower Engineering & Development (2022, 14 Ekim). RWE Renewables partners with GE Renewable Energy to repower 215-MW wind farm. <https://www.windpowerengineering.com/rwe-renewables-partners-with-ge-renewable-energy-to-repower-wind-farm/>
- [81] Windpower Engineering & Development (2022, 15 Ekim). Leeward Renewable Energy repowering project increases Texas wind farm to 146 MW. <https://www.windpowerengineering.com/leeward-renewable-energy-repowering-project-increases-texas-wind-farm/>

- [82] Windpower Engineering & Development (2022, 15 Ekim). Pattern Energy loses 12 MW after deconstructing, repowering Gulf Wind facility. <https://www.windpowerengineering.com/pattern-energy-loses-12-mw-after-deconstructing-repowering-gulf-wind-facility/>
- [83] Froese, M. (2022, 15 Ekim). PacifiCorp acquires 20-year-old Wyoming wind farm for repowering. <https://www.windpowerengineering.com/pacificorp-acquires-20-year-old-wyoming-wind-farm-for-repowering/>
- [84] Froese, M. (2022, 15 Ekim). Leeward repowers Illinois' Mendota Hills Wind Farm. <https://www.windpowerengineering.com/leeward-repowers-illinois-mendota-hills-wind-farm/>
- [85] Froese, M. (2022, 15 Ekim). EDF Renewables & Phoenix Wind sign O&M deal for Texas wind projects. <https://www.windpowerengineering.com/edf-renewables-phoenix-wind-sign-om-deal-for-texas-wind-projects/>
- [86] Centera, K. (2022, 15 Ekim). Six factors to consider before repowering wind site. <https://www.windpowerengineering.com/six-factors-to-consider-before-repowering-a-wind-site/>
- [87] Froese, M. (2022, 15 Ekim). Bureau Veritas validates multi-year wind repowering projects. <https://www.windpowerengineering.com/bureau-veritas-validates-multi-year-wind-repowering-project/>
- [88] Dede, E., Yalçın, M. A., ve Yavuz, C. (2021, 4-5, Haziran). Faaliyette olan rüzgâr elektrik santrallerinde yeniden güçlendirme çalışmalarının değerlendirilmesi. V. Akman, R. Arora (Ed.), *1 st Istanbul International Modern Scientific Research Congress* içinde. İstanbul, Türkiye.

EKLER

EK A. Yeni nesil türbin modelleri ve karakteristikleri

EK A

Şekil A.1, A.2, A.3, A.4 ve A.5’te bazı yeni nesil rüzgâr türbin karakteristik parametreleri ve türbinlere dair görseller verilmiştir [58,59,60,61].



Şekil A.1. Enercon E-126 ve Türbin Karakteristikleri [58].



Şekil A.2. GE Cypress Rüzgâr Türbini [59].

Cypress platform	GE-158					GE-164
Güç çıkışı	4.9 MW	5.3 MW	5.5 MW	5.8 MW	6.1 MW	6.0 MW
Rotor çapı	158 m					164 m
Hub yüksekliği	From 101 m to 161 m (and site specific)					From 112 m to 167 m (and site specific)
Frekans	50 & 60 Hz					50 Hz
IEC Sınıfı	S					
Gürültü-Azaltım İşlemi	From 107 dB to 98 dB					
IEC Sertifikası	Mevcut			Sürüyor		

Şekil A.3. GE Cypress Rüzgâr Türbini Karakteristikleri [59].

İşletim verileri	Rotor	Dişli kutusu
Rated power: 5.0-5.X MW	Diameter: 163 m	Type: high-speed gearbox
Cut-in wind speed: 3 m/s	Swept area: 20,867 m ²	
Cut-out wind speed: up to 26 m/s		
Generator	Frenleme sistemi	Hub yüksekliği
Construction: Double fed asynchronous generator	Main brake: Aerodynamic brake (pitch)	Hub height: up to 164 m, project – and sitespecific
Cooling system: Liquid/air cooling	Holding brake: Disc brake	
Grid frequency: 50/60 Hz		

Şekil A.4. Nordex N163/5.X Rüzgâr Türbini Karakteristikleri [60].

Güç düzenleme işletim verileri	
Rated power	6,000kW
Cut-out wind speed	3m/s
Cut-out wind speed	25m/s
Wind class	IEC S
Standard operating temperature range	from -20°C* to +45°C

Ses gücü	
Maximum	104.9dB(A)**

Rotor	
Rotor diameter	150m
Swept area	17,672m ²
Aerodynamic brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders

Elektriksel	
Frequency	50/60 Hz
Converter	full scale

Dişli kutusu	
Type	two planetary stages

Kule	
Hub heights	105m (IEC S), 125m (IEC S/DiBt S), 148m (DiBt S) 155m (IEC S), 166m (DiBt S)

Sürdürülebilirlik parametreleri	
Carbon Footprint	7.6g CO ₂ e/kWh
Return on energy break-even	6 months
Lifetime return on energy	42 times
Recyclability rate	89%

Şekil A.5. Vestas V150-6.0 MW Rüzgâr Türbini Karakteristikleri [61].

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Eren DEDE

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- Kasım 2021'den beri Ülke Enerji firmasında servis ve bakım mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Dede, E., Yalçın, M. A., ve Yavuz, C. (2021, 4-5, Haziran). Faaliyette olan rüzgâr elektrik santrallerinde yeniden güçlendirme çalışmalarının değerlendirilmesi. V. Akman, R. Arora (Ed.), *1 st Istanbul International Modern Scientific Research Congress* içinde. İstanbul, Türkiye.