

RÜZGÂR GÜÇ SANTRALLERİ KONUMLANDIRMASININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Onur KOŞAR

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

Temmuz - 2018

KABUL VE ONAY YAZISI

Onur KOŞAR'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı RÜZGÂR GÜÇ SANTRALLERİ KONUMLANDIRMASININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

23/07/2018

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Bölüm Başkanı, Makine Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR
Danışman, Makine Mühendisliği Bölümü

Sınav Komitesi Üyeleri

Doç. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR
Makine Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ
Makine Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Bedri YÜKSEL
Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Makine Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Enver YALÇIN
Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %3 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Doç. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

Onur KOŞAR

RÜZGÂR GÜÇ SANTRALLERİ KONUMLANDIRMASININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Onur Koşar

Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2018

Tez Danışmanı: Doç Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

ÖZET

Bu çalışmada, Kütahya ili için rüzgâr santrali fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü yakınında Kızılbayır mevkiindeki bir rüzgâr ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan rüzgâr verilerinin bölge üzerindeki dağılımı WAsP yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Araştırılan alan üzerindeki en rüzgârlı üç saha için rüzgâr enerjisi tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Güncel pazar verileri ışığında yapılan seviyelendirilmiş enerji maliyeti analizine göre, rüzgâr enerjisi birim maliyeti türbin ve saha seçimine bağlı olarak 0,0248 ile 0,0372 ABD \$/kWh olarak değişim gösterdiği hesaplanmıştır. Seçilen bölge üzerinde, üç farklı güç kapasitesi (25, 50, 75 MW) için rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla MATLAB yazılımı kullanılması ile bir optimizasyon kodu hazırlanmıştır. Her olası türbin noktasındaki arazi yükseklik değeri ve Weibull parametreleri optimizasyon koduna tanımlanmıştır. Nihai optimizasyon kodu yapısını oluşturmadan önce iki farklı rüzgar santrali konumlandırma probleminin çözümlemesi yapılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre, araştırılan arazinin en rüzgârlı bölgesinde kurulacak 25,3 MW'lık güce sahip bir santralin %35 kapasite faktörü ile 77,677 GWh yıllık enerji üreteceği hesaplanmıştır. Artan güç kapasitesi ile birlikte kapasite faktörünün düştüğü ve dolayısı ile birim enerji maliyetinin yükseldiği gözlenmiştir. Ayrıca Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü'nün bir yıl boyunca saatlik elektrik tüketiminin rüzgâr enerjisi ile karşılanabilirliği araştırılmıştır. Kampüs etrafındaki en rüzgârlı yerler WAsP yazılımı ile belirlenmiştir. Bu bölgelerin rüzgâr türbini kurulum uygunluğu, fiziki koşullar ve gürültü yayılımı açısından araştırılmıştır. Yapılan kabuller altında, anlık saatlik tüketiminin %38,9'unu karşılayacak bir türbin modelinin bir yıl boyunca kampüsün yıllık toplam tüketiminin %57,8'i kadar enerji üreteceği hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kütahya, Rüzgâr enerjisi fizibilitesi, rüzgâr hızı kesikliliği, rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu, rüzgâr veri analizi.

NUMERICAL INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE WIND FARM LAYOUT PROBLEM

Onur Koşar

Mechanical Engineering, PhD Thesis, 2018

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

ABSTRACT

In this study, feasibility study of wind farm for Kütahya province of Turkey was carried out. The wind data recorded in a wind measurement station in Kızılbaş region near Dumlupınar University Evliya Çelebi Campus was analyzed using WAsP software. The wind energy techno-economic analysis was carried out for the three windiest sites on the investigated area. According to the levelized cost of energy analysis carried out considering the current market data, wind energy unit cost was calculated to vary from 0.0248 to 0.0372 US \$ / kWh depending on turbine and site selection. Wind farm layout optimization problem solutions for three different power capacities (25, 50, 75 MW) were performed for the selected windiest site. For this purpose, an optimization code was prepared by using MATLAB software. The altitude values and Weibull parameters at each possible turbine locations were defined for the optimization code. Before constructing the final optimization code structure, two different wind farm layout optimization problems were solved. According to the results of the optimization, a wind farm with a power of 25.3 MW installed in the windiest region was estimated to generate 77.677 GWh of annual energy with a capacity factor of 35%. It was observed that with the increased power capacity, the capacity factor was fallen and therefore the unit energy cost was increased. In addition, affordability rate of the Dumlupınar University Evliya Çelebi Campus' hourly electricity demand with wind energy was investigated. The windiest places around the campus were dedected by WASP software. These regions were investigated in terms of installation suitability, physical conditions and noise propagation. Under the assumptions, it was estimated that a turbine model that can meet 38.9% of the instantaneous hourly consumption will generate 57.8% of the total annual consumption of the campus.

Keywords: Kütahya, wind energy feasibility, wind speed intemittency, wind farm layout optimization, wind data analysis.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada yardımını ve bilgisini esirgemeyen ve rüzgâr enerjisi alanında ufkumu genişleten tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa Arif Özgür'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gerek akademik gerek normal hayata dair bilgi ve tecrübelerini öğrencilerinden esirgemeyen Prof. Dr. Ramazan Köse'ye şahsıma kattığı her şey için teşekkürü bir borç bilirim.

Dönem sonu tez izleme sınavlarımı son derece keyif aldığım bilimsel toplantılara çeviren, şahsıma çok şey katan, bilgilerini esirgemeyen Prof. Dr. Recep Yamankaradeniz ve Prof. Dr. Bedri Yüksel'e çok teşekkür ederim.

Tez sürecimde manevi desteklerini hiç esirgemeyen bölüm hocalarım Doç. Dr. Semra Durmuş Acer ve Dr. Öğr. Üyesi Sevda Engin'e çok teşekkür ederim.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde büyük katkısı olan DPÜ-BAP-2017-20 ve DPÜ-BAP-2017-22 numaralı bilimsel araştırma projelerini destekleyen Dumlupınar Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmeme ve bugün olduğum kişi olmama vesile olan babam Selahattin Koşar, annem Kadriye Koşar ve eşim Sıla Koşar'a her şey için teşekkür eder, minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Dünya Enerji Görünümü.....	2
1.2. Türkiye Enerji Görünümü.....	4
2. DÜNYA VE TÜRKİYE’DE RÜZGÂR ENERJİSİ GENEL GÖRÜNÜMÜ.....	11
2.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi.....	11
2.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi.....	17
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	24
4. MATERYAL VE METOT.....	46
4.1. Rüzgâr Verisi ve Arka Plan.....	46
4.2. Rüzgâr Hızı Frekans Dağılımı.....	50
4.2.1. Medyan ve çeyrekler yöntemi.....	51
4.2.2. Moment metodu.....	51
4.2.3. Değiştirilmiş en çok olabilirlik metodu.....	52
4.2.4. Enerji paterni faktörü yöntemi.....	52
4.2.5. WAsP (eşdeğer enerji) metodu.....	52
4.2.6. Parametre tahmin tekniklerinin performans analizi.....	54
4.3. Rüzgâr Makası, Türbülans Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Kesikliliği.....	55
4.4. WAsP Yazılımı İle Rüzgâr Atlası Analizi	57
4.5. Ekonomik Analiz ve Türbinlerin Güç Eğrileri.....	58
4.6. Optimizasyon Yapısı.....	60
4.6.1. Jensen iz bölgesi modeli.....	62
4.6.2. Arazi modellemesi.....	66
4.6.3. Algoritma modelleri.....	71
4.6.4. Kullanılan rüzgâr modelleri.....	77

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.7. Evliya Çelebi Kampüsünün Rüzgâr Enerjisi Fizibilitesi.....	80
4.7.1. Saatlik tüketimin karşılanabilirliği.....	81
4.7.2. Gürültü yayılım analizi.....	81
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	84
5.1. Klasik Rüzgâr Santrali Konumlandırma Probleminin Çözümlemesi.....	84
5.1.1. Jensen iz bölgesi modelinin doğrulanması.....	84
5.1.2. Klasik problem için elde edilen sonuçlar.....	84
5.2. Santral Sınırı Şeklinin Rüzgâr Santrali Konumlandırma Problemine Etkisi.....	89
5.3. Evliya Çelebi Kampüsü’nün Rüzgâr Enerjisi Fizibilitesinin Sonuçları.....	97
5.3.1. Rüzgâr verisi analizi.....	98
5.3.2. Enerji, maliyet ve karşılayabilirlik analizi.....	99
5.3.3. Belirlenen sahaların rüzgâr türbini kurulumu açısından uygunluğu.....	104
5.4. Kütahya’nın Rüzgâr Santral Fizibilitesinin Sonuçları.....	109
5.4.1. Rüzgâr verisinin doğrulanması.....	109
5.4.2. Frekans dağılımı.....	112
5.4.3. Rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı kesiklilik analizi.....	113
5.4.4. Bölgenin kaynak haritaları.....	118
5.4.5. Kütahya rüzgâr santrali fizibilitesi için WAsP sonuçları.....	118
5.4.6. Kütahya rüzgâr santrali fizibilitesi için optimizasyon sonuçları.....	121
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	125
6.1. Sonuçlar.....	125
6.2. Öneriler.....	127
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	128
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

1.1. Dünya nüfusunun değişimi 1950-2018.....	1
1.2. Dünya kişi başı enerji tüketiminin değişimi 1971-2014.....	1
1.3. Küresel birincil enerji tüketimi.....	2
1.4. Birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımının kıyaslaması 2007-2017.....	3
1.5. Küresel karbon salınımı 1960-2014.....	3
1.6. Küresel yenilenebilir enerji gücünün değişimi 2007-2017.....	4
1.7. Küresel yıllık elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı 2017.....	5
1.8. Avrupa ülkelerinin yıllara bağlı birincil enerji tüketimi 2007-2017.....	5
1.9. Türkiye taşkömürü üretim ve ithalat dengesi 2000-2017.....	7
1.10. Türkiye doğalgaz üretim ve ithalat dengesi 2008-2017.....	8
1.11. Türkiye ve Avrupa için yıllara bağlı karbon salınımı kıyaslaması.....	9
2.1. Küresel rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimi.....	11
2.2. Ülkeler bazında rüzgâr kurulu güç dağılımı.....	12
2.3. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin enerji maliyeti kıyaslaması.....	14
2.4. Rüzgâr kapasite eklemeleri için küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörleri değişimi.....	15
2.5. Rüzgâr türbini üreticilerinin pazar payları – 2017.....	16
2.6. Türkiye’de yıllara göre rüzgâr santrali kurulu güç değişimi.....	20
2.7. Türkiye Ocak 2011-2017 arasındaki rüzgâr santrali kurulum gelişimi.....	20
2.8. İşletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu.....	21
2.9. İnşaat halindeki rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu.....	22
2.10. Lisans almış rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu.....	22
2.11. İşletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin türbin markalarına göre dağılımları.....	23
4.1. Türkiye haritası üzerinde Kütahya, Bünelek Tepesi.....	46
4.2. Bünelek Tepesi üzerinde rüzgâr ölçüm istasyonunun yeri.....	47
4.3. Kütahya için 24 aylık rüzgâr verisine dayanan rüzgâr yönü dağılımı.....	48
4.4. Gün içindeki ortalama rüzgâr hızının değişimi.....	49
4.5. Kütahya ve çevresinde araştırılan bölgenin dijital yükseklik ve yüzey pürüzlülüğü haritası.....	58
4.6. Türbinlerin güç eğrileri ve fiyat tahminleri.....	61
4.7. Horns Rev 1 denizüstü rüzgâr çiftliğinden iz bölgesi resimleri.....	63
4.8. Rüzgâr türbini arkasındaki hız profili.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. (a) Jensen iz bölgesi modelinin genel şeması (b) uydurulmuş itki katsayı eğrisi.....	65
4.10. Jensen iz bölgesi modelinin gerçek veriler ile kıyaslanması.....	66
4.11. Literatürde kullanılan bölge modeli örnekleri.....	67
4.12. Düz arazi yaklaşımı.....	69
4.13. Düzensiz arazi modeli işlem basamakları.....	70
4.14. Elitist genetik algoritma akış şeması.....	72
4.15. Bir optimizasyon işlemi esnasında iterasyon gelişimi.....	74
4.16. İterasyon esnasında bir jenerasyonun bütün çözümlerinin değerlendirilmesi.....	74
4.17. Klasik yapay arı kolonisi algoritmasının akış şeması	76
4.18. Klasik problemde kullanılan Rüzgâr Modeli-3.....	79
4.19. İkinci problemde kullanılan rüzgâr modeli.....	79
4.20. Evliya Çelebi Kampüsü'nün elektrik tüketim detayları.....	80
4.21. Ortalama yüksekliğin bulunması.....	83
5.1. Rüzgâr Modeli-1 için iterasyon gelişimleri.....	85
5.2. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-1 için ulaşılan en iyi santral düzenleri.....	86
5.3. Rüzgâr Modeli-3 için iterasyon gelişimleri.....	87
5.4. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-2 için ulaşılan en iyi santral düzenleri.....	88
5.5. Rüzgâr Modeli-3 için iterasyon gelişimi.....	88
5.6. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-3 için ulaşılan en iyi santral düzenleri.....	89
5.7. Amaç fonksiyonu-1 için elde edilen en iyi santral düzenleri.....	91
5.8. Amaç fonksiyonu-1 için iterasyon boyunca önemli tasarım parametrelerinin değişimi.....	92
5.9. Amaç fonksiyonu-2 için iterasyon boyunca tasarım parametrelerinin değişimi.....	93
5.10. Amaç fonksiyonu-2 için elde edilen en iyi santral düzenleri.....	95
5.11. Rüzgâr türbini tipi ve göbek yüksekliğinin seçim frekansları.....	96
5.12. Sonuçların belirleyici parametreler açısından karşılaştırılması.....	96
5.13. Alan şekline bağlı olarak değişen parametrelerin hassasiyet analizi.....	97
5.14. Evliya Çelebi Kampüsü ve incelenen alan.....	98
5.15. Rüzgâr yönü ve hızlarının frekans dağılımları.....	99
5.16. Seçilen türbinlerin güç eğrileri.....	100
5.17. Kampüs çevresinin dijital harita modeli.....	102

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.18. Yerden 55 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası.....	103
5.19. Model-100/1 için saatlik talebin karşılama oranı zaman serilerinin istatistiksel dağılımı..	105
5.20. Belirlenen sahalar üzerinde Model-100/1 modelinin yakın iz bölgesi ve yönlere göre yıllık enerji üretiminin dağılımı	106
5.21. CRES rüzgar çiftliği.....	107
5.22. CRES rüzgâr çiftliğinin dijital yükseklik haritası.....	108
5.23. Gürültü dağılımı hesaplama modelinin doğrulama sonuçları.....	108
5.24. Model-100/1 için gürültü yayılımı tahminleri.....	110
5.25. İki yıllık rüzgâr verisi.....	111
5.26. Anemometrelerden alınan veriler arasındaki ilişki.....	111
5.27. Kütahya için rüzgâr frekans dağılımı ve Weibull dağılım eğrisi.....	112
5.28. Ortalama günlük rüzgâr makas katsayısı.....	113
5.29. Aylık ortalama rüzgâr makas katsayısı.....	114
5.30. Ortalama günlük türbülans yoğunluğu değişimi.....	114
5.31. Rüzgâr hızının zamana bağlı değişimi.....	115
5.32. Rüzgâr hızı farklarının dağılımı.....	115
5.33. Bir yıl için β_U ve β_D değişimi.....	117
5.34. Rüzgâr hızı rampa olaylarının günlük periyodikliği.....	117
5.35. Yerden 30 metre yükseklikte (a) yıllık ortalama rüzgâr hızı (b) Weibull A parametresi kaynak haritası (c) Weibull k parametresi kaynak haritası.....	119
5.36. Seçilen türbinlerin güç eğrileri.....	120
5.37. Güç yoğunluğu haritası üzerinde seçilen sahaların gösterilmesi.....	122
5.38. Üç farklı güç kapasitesi için optimize edilmiş santral düzenleri.....	123
6.1. Kütahya santral fizibilitesi optimizasyon sonuçları.....	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Türkiye kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı 2017 sonu.....	6
1.2. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı 2016-2017....	7
1.3. Türkiye'nin elektrik enerjisi görünümü.....	8
3.1. Türkiye'nin rüzgâr potansiyelini belirlemek amacı ile yapılan akademik çalışmalar.....	25
4.1. Klasik rüzgâr santrali konumlandırma probleminin ana yapısı.....	78
5.1. Literatürdeki çalışmaların sonuçları ile iz bölgesi modelinin doğrulanması.....	84
5.2. Elitist genetik algoritmasının popülasyon parametreleri.....	85
5.3. Klasik arı kolonisi algoritmasının temel parametreleri.....	85
5.4. Kütahya için uzun dönemli maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar.....	98
5.5. Her bir yön için Weibull parametreleri, ortalama hızlar ve frekans dağılımları.....	99
5.6. Seçilen türbinlerin başlıca özellikleri.....	100
5.7. Saatlik tüketimin karşılanabilirlik analizi.....	101
5.8. Seçilen sahalarda için yıllık enerji üretimi, kapasite faktörü ve yıllık enerji üretiminin yıllık tüketime oranı değerleri.....	104
5.9. Farklı aktivitelerin gürültü seviyesi değerleri.....	106
5.10. Ses ölçüm noktalarının türbinlere göre konumları.....	107
5.11. Weibull parametreleri tahmin yöntemlerinin uygunluğunun araştırılması.....	112
5.12. Rüzgâr hızı değişiminin dağılım fonksiyonları ile olan değerlendirilmesi.....	116
5.13. Bölgenin genelleştirilmiş rüzgâr iklimi.....	118
5.14. Seçilen türbinlerin başlıca özellikleri.....	120
5.15. Seçilen üç sahanın rüzgâr enerjisi tekno-ekonomik analiz sonuçları.....	121
5.16. Kütahya için rüzgâr santrali tekno-ekonomik analiz sonuçları.....	124

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
h	Yükseklik (m)
k	Weibull şekil parametresi
A	Weibull ölçek parametresi (m/s)
C_T	İtke katsayısı
$CR_{Yıllık}$	Yıllık karşılama oranı (%)
I	Türbülans yoğunluğu
L	Gürültü basınç seviyesi (db (A))
P	Güç (W)
R	Rotor yarıçapı (m)
T	Zaman
T_D	Aşağı yönlü rüzgâr hızı rampası süresi
T_R	Toplam rüzgâr hızı rampası süresi
T_U	Yukarı yönlü rüzgâr hızı rampası süresi
U	Rüzgâr hızı (m/s)
Z_0	Yüzey pürüzlülüğü
Γ	Gama fonksiyonu
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
σ	Standart sapma
β	Rüzgâr hızı rampası görev oranı
β_D	Aşağı yönlü rüzgâr hızı rampası görev oranı
β_U	Yukarı yönlü rüzgâr hızı rampası görev oranı
α	İz bölgesi genişleme katsayısı

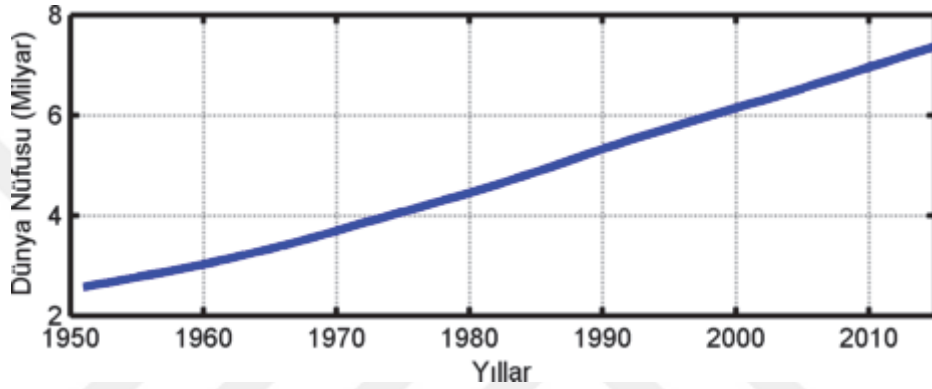
<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
AKO	Arazi kullanım oranı
$AR_{Saatlik}$	Saatlik karşılama oranı
BEM	Birim enerji maliyeti
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
HB	Hız bozukluğu
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilâtı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
KF	Kapasite faktörü
koe	Kilo eş değer petrol
Mtoe	Milyon ton eşdeğer petrol
RES	Rüzgâr enerjisi santrali
RGY	Rüzgâr güç yoğunluğu
SEM	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
SEÜ	Saatlik elektrik üretimi
SET	Saatlik elektrik tüketimi
TCMGM	T. C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü
TP	Türbin fiyatı
TTM	Toplam türbin maliyetleri
TTKGM	Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü
TÜREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
YET	Yıllık enerji tüketimi
YEÜ	Yıllık enerji üretimi

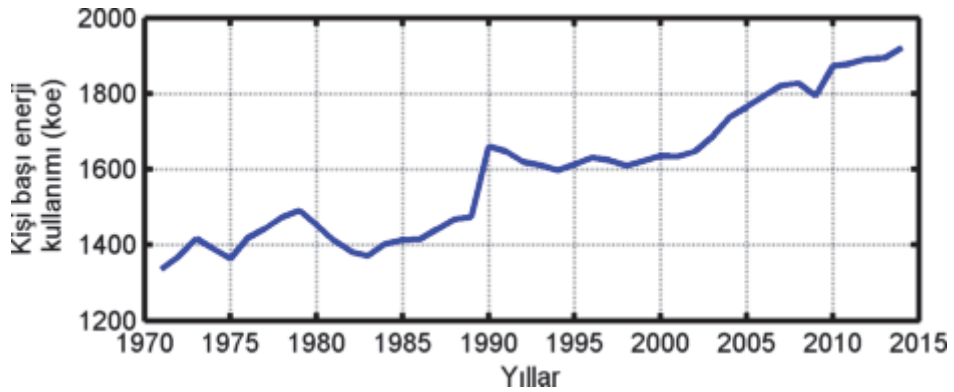
1. GİRİŞ

Dünya nüfusu günden güne hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Şekil 1.1, 1950-2015 yılları arasında dünya nüfusunun değişimini göstermektedir. Görüldüğü üzere, 65 yıllık süreçte dünya nüfusu yaklaşık 2,5 kat artarak 2,5 milyar seviyelerinden 7,4 milyar seviyelerine ulaşmıştır. Yapılan tahminlere göre dünya nüfusunun 2050'de 9,8 milyara ve 2100'e kadar ise 11,2 milyara ulaşması öngörülmektedir (UN, 2017).



Şekil 1.1. Dünya nüfusunun değişimi 1950-2018 (UN,2017).

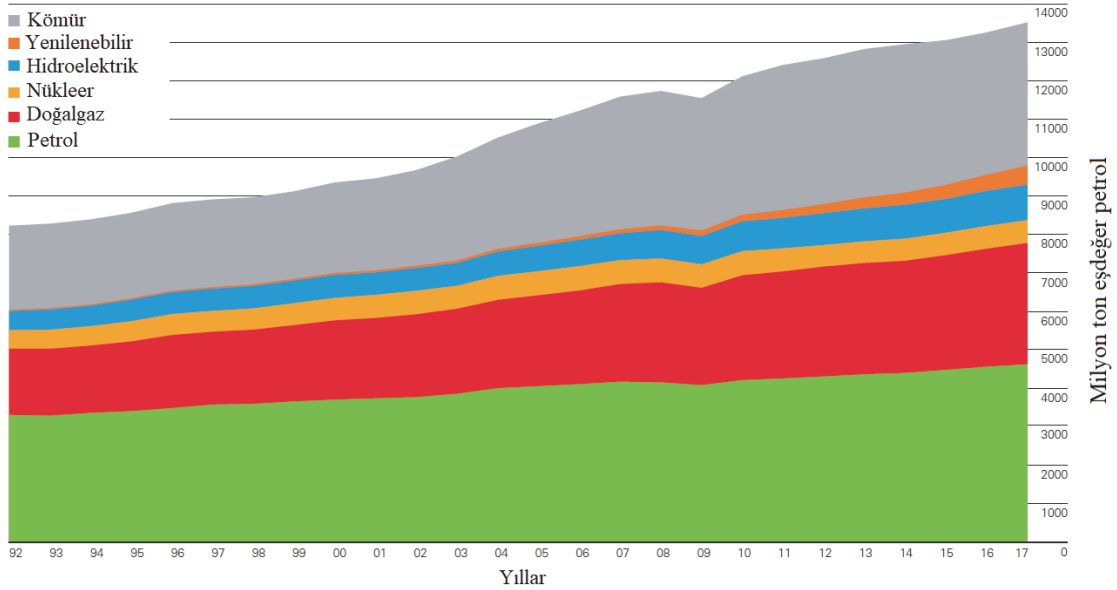
Dünya nüfusunun nicel artışı enerji ihtiyacına olan talebi yükseltmektedir. Buna ek olarak, gelişen teknoloji ve küreselleşme neticesinde artan kişi başı enerji kullanımı da enerji ihtiyacını katlayarak artırmaktadır. Şekil 1.2, 1971-2014 yılları arasında kişi başı enerji tüketimini göstermektedir. Görüldüğü üzere 1971 yılında 1336 kilo eşdeğer petrol (koe) olan kişi başı tüketim 2014 yılında 1920 koe olmuştur. Günümüz teknolojisinin gelişim hızı göz önüne alındığında, bu tüketim değerlerinin daha da artacağını söylemek mantıklı bir çıkarım olacaktır.



Şekil 1.2. Dünya kişi başı enerji tüketiminin değişimi 1971-2014 (World Bank, 2018).

1.1. Dünya Enerji Görünümü

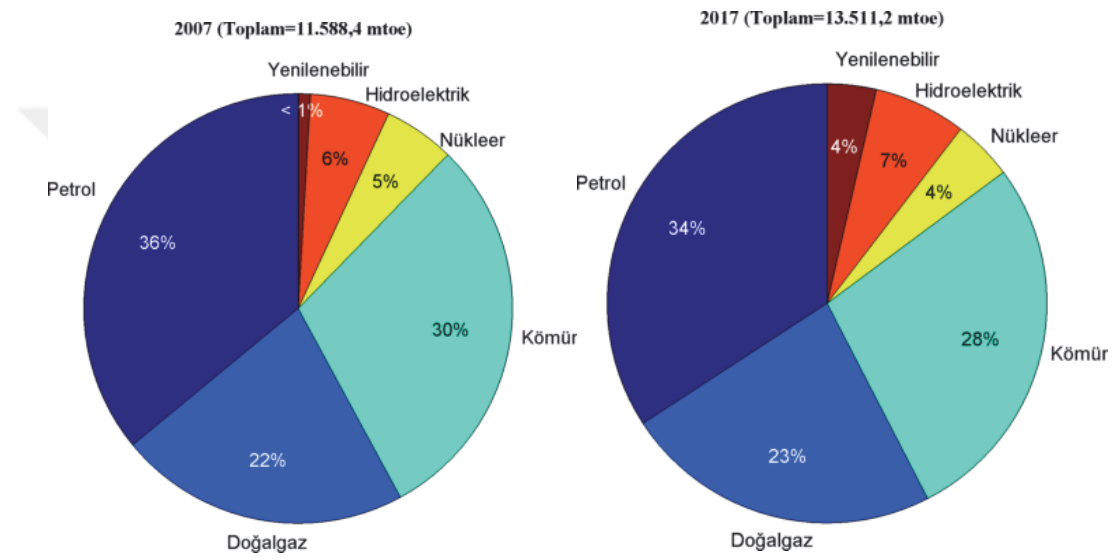
Küresel birincil enerji tüketimi, 2017 yılında, doğal gaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkisiyle %2,2 oranında büyürken, kömürün enerji payındaki oranı azalmaya devam etmiştir. Şekil 1.3, yıllar boyunca değişen küresel birincil enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımını göstermektedir. Şekil 1.3'ten görüldüğü üzere, 2017 yılı sonundaki toplam küresel birincil enerji tüketimi 13.511,2 milyon ton eşdeğer petrol (mtoe) olmuştur (BP Grup, 2018). Birincil enerji tüketimindeki fosil kökenli kaynaklara bağımlılık oldukça yüksektir. Enerji kaynakları bazında, 2007 ve 2017 yıllarındaki birincil enerji tüketiminin oransal dağılımı Şekil 1.4'de verilmiştir. Şekil 1.4 incelendiğinde, 2007 yılında %7'den daha az olan yenilenebilir + hidroelektrik kaynakları oranının, 2017 yılında %11 seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca nükleer, petrol ve kömür kaynaklarının enerji tüketimindeki paylarının düştüğü gözlenmektedir. Bu eğilim, fosil kökenli enerji kaynaklarının çevreye olan kötü etkilerine dair farkındalığın artması ile açıklanabilir.



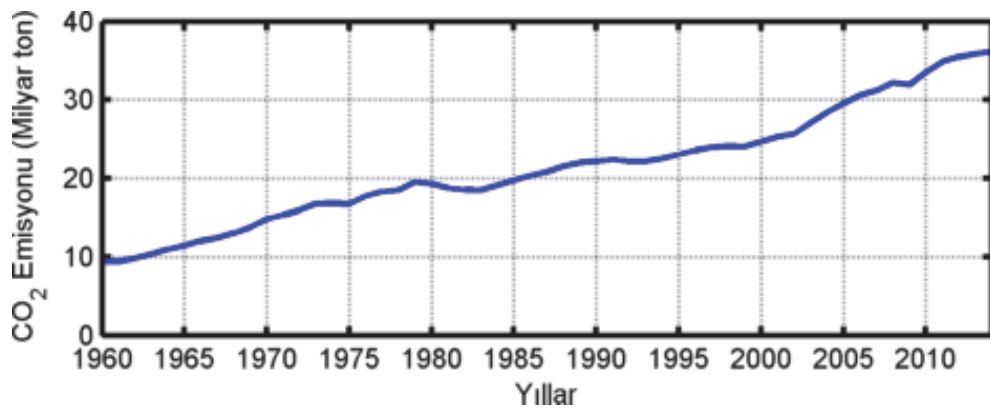
Şekil 1.3. Küresel birincil enerji tüketimi (BP Grup, 2018).

Yıllara bağlı küresel karbon salınımı Şekil 1.5'te verilmiştir. Şekil 1.5 incelendiğinde, 1960'ta yaklaşık 9,4 milyar ton olan karbon salınımının, 2014 yılında 36,2 milyar tona çıktığı görülmektedir. Ayrıca, 2014 ile 2016 arasındaki sıfıra yakın artışa karşın, enerji tüketimi kaynaklı karbon salınımı 2017 yılında %1,6 oranında artmıştır. (BP Grup, 2018). Birçok ülke karbon salınımını azaltmak üzere yeni politikalar geliştirmektedir. Hâlihazırda kullanılan fosil kökenli enerji üretim tesislerinin, çevreye olan zararlarının azaltılmasına yönelik teşvikler geliştirilmiştir.

Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve teknolojisinin gelişimini sağlamak için yasalar ve teşvikler yürürlüğe koyulmuştur. Bu teşvik ve yasalar sayesinde gelişen yenilenebilir enerji sistemleri, birçok pazarda konvansiyonel enerji sistemleri ile rekabet edebilir hale gelmişlerdir. Yaşanan tüm gelişmelere rağmen, birçok gelişmiş ülke de dâhil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları henüz yeteri kadar kullanılamamaktadır. Sürdürülebilir bir enerji-çevre etkileşiminin yakalanması ve sera gazı salınımının azaltılması için bu kaynakların en üst düzeyde kullanılması elzemdir.

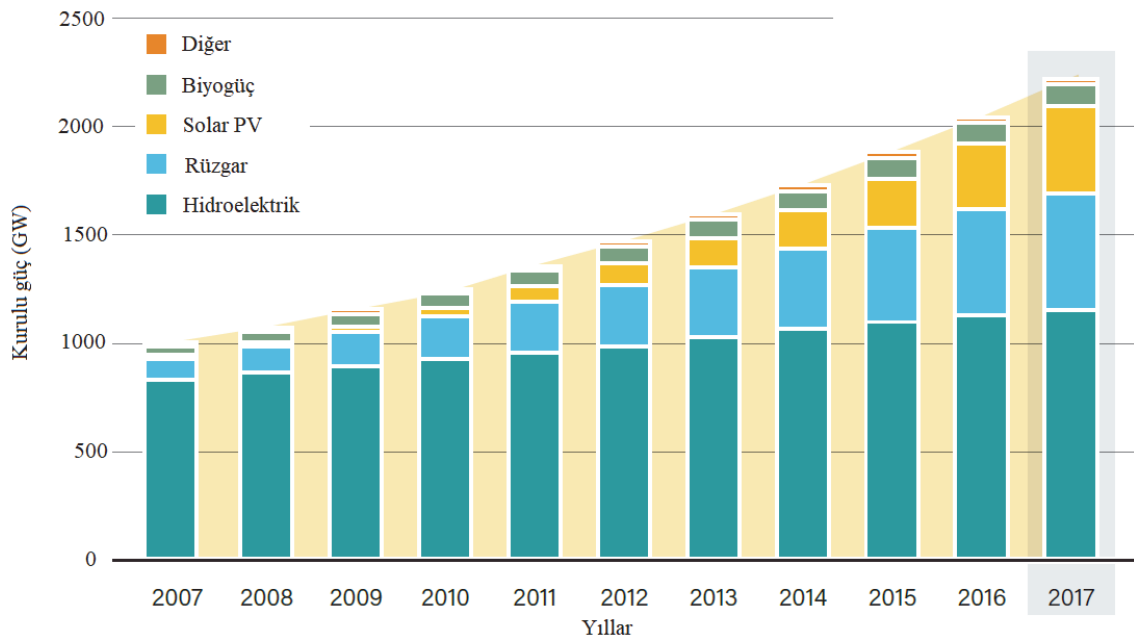


Şekil 1.4. Birincil enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımının kıyaslaması 2007-2017 (BP Grup, 2018).



Şekil 1.5. Küresel karbon salınımı 1960-2014 (CDIAC, 2018).

Küresel yenilenebilir enerji kurulu gücü 2017 yılı sonunda 2195 GW'e ulaşmıştır. Yenilenebilir enerji kurulu gücünün 2007-2017 yılları arasındaki değişimi Şekil 1.6'da verilmiştir. Hidroelektrik santrallerin, 1152 GW kurulu güç ile toplam kurulu güçteki oranı %53'tür. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında gelişmiş teknolojisi ve düşük birim enerji maliyetleri ile öne çıkmaktadır. Rüzgâr kurulu gücünün toplam yenilenebilir enerji kurulu gücündeki oranı 2017 yılı sonunda %23'e ulaşmıştır (IRENA, 2018).



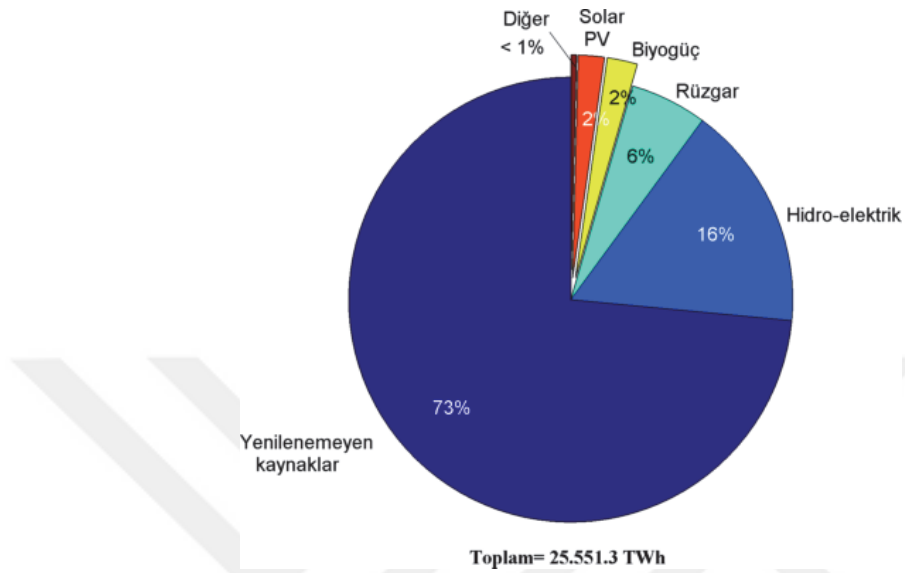
Şekil 1.6. Küresel yenilenebilir enerji gücünün değişimi 2007-2017 (REN21, 2018).

Küresel elektrik üretimi 2017 yılında bir önceki yıla göre % 2,8 artarak 25.551,3 TWh olmuştur (BP Grup, 2018). Bu üretimin %73,5'i yenilenebilir olmayan kaynakların kullanılması ile üretilmiştir. Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.7'de verilmiştir. Şekil 1.7 incelendiğinde, toplam elektrik üretiminin %6'sının rüzgâr enerjisi ile üretildiği görülmektedir.

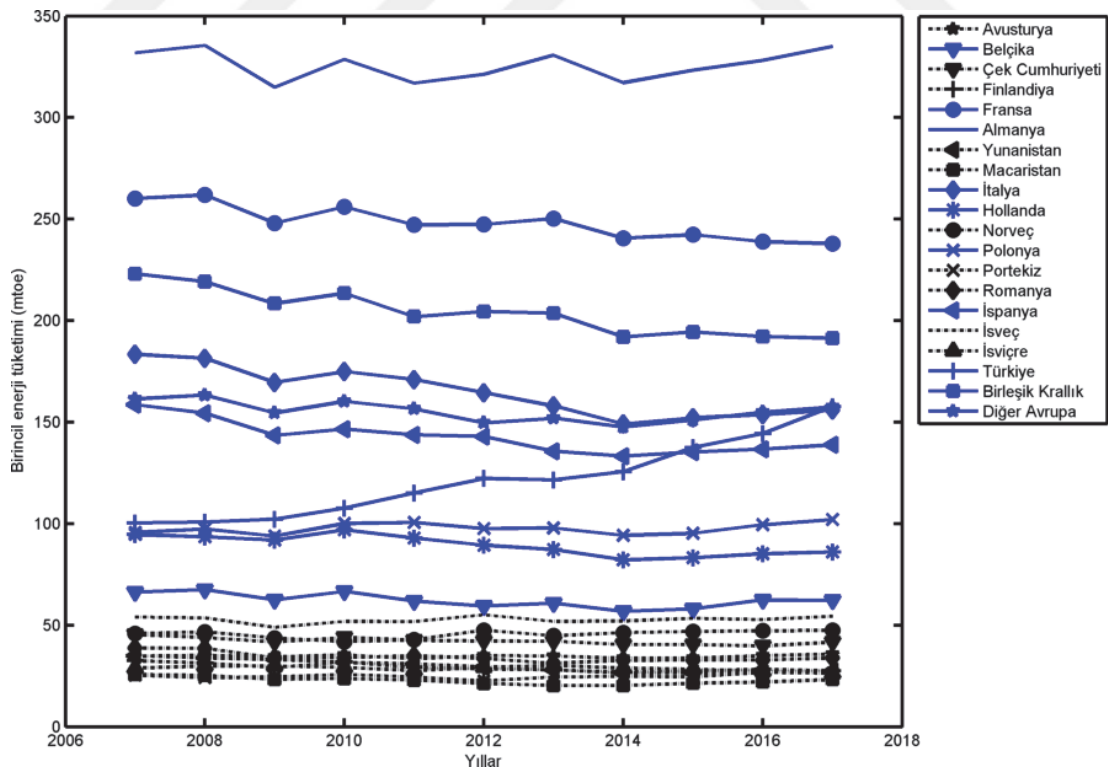
1.2. Türkiye Enerji Görünümü

Türkiye, yaklaşık 81 milyon nüfusu ile Avrupa ülkeleri arasında ilk sıralarda yer almaktadır. 2017 yılındaki yaş ortalaması 31,7 olan Türkiye'nin nüfus artış oranı yine aynı yıl için %1,24 olmuştur. Avrupa ülkelerinin 2007-2017 yılları arasındaki birincil enerji tüketimi Şekil 1.8 ile verilmiştir. Avrupa'nın toplam tüketimi, 2007-2017 arasında 2041,7 mtoe'den 1969,5 mtoe'ye düşmüştür. Türkiye'nin birincil enerji tüketiminin, gelişen ekonomisi ve artan nüfusuna paralel olarak, diğer Avrupa ülkelerine kıyasla ayırt edilebilir şekilde artış eğiliminde

olduğu görülmektedir. On yıllık zaman aralığında, 100,4 mtoe olan tüketim yaklaşık 1,5 kat artarak 157,7 mtoe olmuştur.



Şekil 1.7. Küresel yıllık elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı 2017 (REN21, 2018).



Şekil 1.8. Avrupa ülkelerinin yıllara bağlı birincil enerji tüketimi 2007-2017 (BP Grup, 2018).

Türkiye'nin enerji ihtiyacındaki bu hızlı yükseliş, Türkiye'nin enerji teminindeki dışa bağımlılığını daha da kuvvetlendirmiştir. Türkiye'nin hâlihazırda toplam enerji talebinin yaklaşık %26'sı yerli kaynaklardan karşılanabilmektedir (TCDİB, 2016).

Türkiye kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Çizelge 1.1'de verilmiştir. TEİAŞ'a göre 2017 sonu itibarı ile toplam kurulu güç 85.200 MW'dır. Doğalgaz + LNG kaynaklı güç üretim sistemleri toplam kurulu gücün %27,1'ini oluşturmaktadır. Türkiye'nin önemli düzeyde hidroelektrik santraline sahip olduğu görülmektedir. Hidroelektrik santraller toplam kurulu gücün %32'sini oluşturmaktadır. Kömür temelli güç üretim sistemleri, %21,9'luk oran ile kurulu gücün önemli bir kısmını temsil etmektedirler. Rüzgâr enerjisi kurulu gücünün, toplam kurulu güç içindeki oranı %7,6'dır (TEİAŞ, 2018).

Çizelge 1.1. Türkiye kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı 2017 sonu (TEİAŞ, 2018).

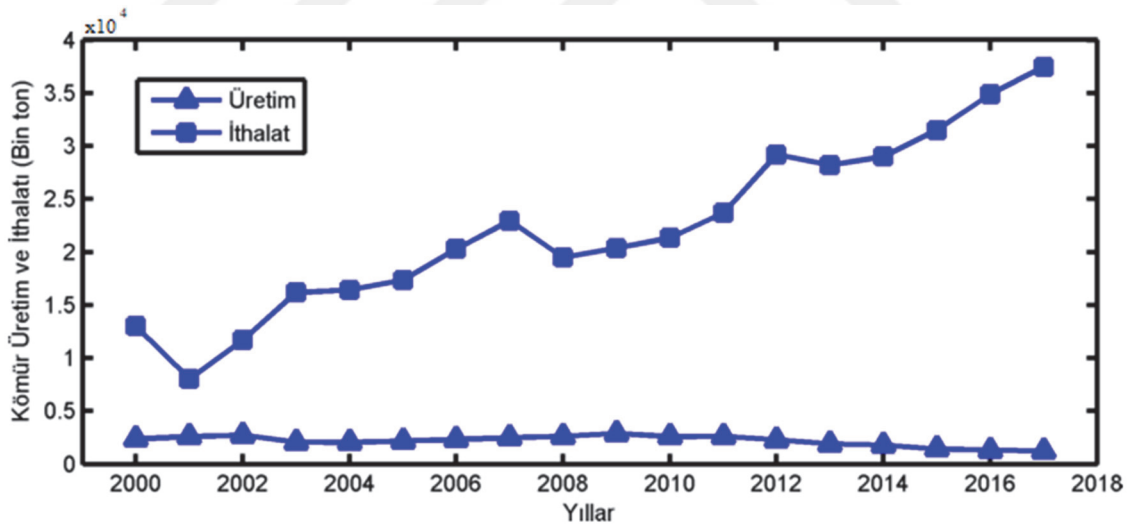
	Kurulu güç (MW)	Oran (%)	Santral sayısı (adet)
Fuel Oil+Nafta+Motorin	303,6	0,4	12
Yerli kömür	9872,6	11,6	30
İthal kömür	8793,9	10,3	11
Doğalgaz+LNG	23.063,7	27,1	243
Yenilenebilir + Atık + Atık ısı	575,1	0,7	98
Çok yakıtlılar katı + sıvı	682,9	0,8	22
Çok yakıtlılar sıvı + doğalgaz	3433,6	4	47
Jeotermal	1063,7	1,2	40
Hidrolik barajlı	19.776	23,2	117
Hidrolik akarsu	7489,7	8,8	501
Rüzgâr	6482,2	7,6	161
Güneş	17,9	0,0	3
Termik (lisanssız)	201,1	0,2	67
Rüzgâr (lisanssız)	34	0,0	46
Hidrolik (lisanssız)	7,4	0,0	10
Güneş (lisanssız)	3402,8	4	3613
TOPLAM	85.200	100	5021

Türkiye elektrik enerjisi üretiminin, birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Çizelge 1.2'de 2016 ve 2017 yılları için verilmiştir. Çizelge 1.2'den görüleceği üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı her ne kadar artış gösterse de henüz yeterli seviyelerde değildir. Elektrik talebi, büyük oranda doğalgaz, kömür ve hidroelektrik santralleri ile karşılanmaktadır. Çizelge 1.1 ve 1.2 incelendiğinde, Türkiye'nin enerji ihtiyacının temininde, fosil kökenli yakıtların önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Türkiye, fosil kökenli yakıtlar bakımından zengin bir ülke değildir. Bu sebeple, Türkiye fosil kökenli kaynak ihtiyacının büyük bölümünü ithalat yaparak karşılamaktadır.

Çizelge 1.2. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı 2016-2017 (TEİAŞ, 2018).

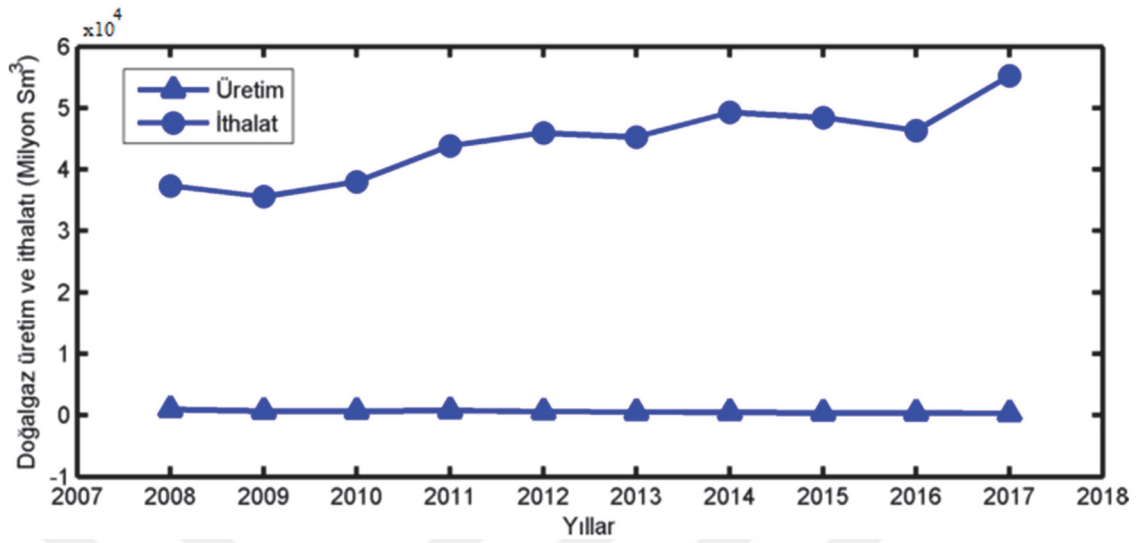
	2016		2017	
	GWh	%	GWh	%
Kömür	92.273,1	33,6	97.476,3	32,8
Sıvı yakıtlar	1926,3	0,7	1199,9	0,4
Doğalgaz	89.227,1	32,5	110.490	37,2
Yenilenebilir + Atık + Atık ısı	2371,6	0,9	2972,3	1
Hidrolik	67.230,9	24,5	58.218,5	19,6
Jeotermal	4818,5	1,8	6127,5	2,1
Rüzgâr	15.517,1	5,7	17.903,8	6
Güneş	1043,1	0,4	2889,3	1
TOPLAM	274.407,7	100	297.277,5	100

Türkiye taşkömürü üretim ve ithalat verileri Şekil 1.9'da verilmiştir. Şekil 1.9 incelendiğinde, 2017 yılı boyunca tüketilen 34.475.000 ton taşkömürünün sadece %3,29'unun yerli kaynaklardan karşılandığı görülmektedir (TTKGM, 2018).



Şekil 1.9. Türkiye taşkömürü üretim ve ithalat dengesi 2000-2017 (TTKGM, 2018).

Benzer bir durum, ülkenin doğalgaz tüketimi için de geçerlidir. Türkiye'nin 2008-2017 yılları arasındaki doğalgaz üretim ve ithalat değişimi Şekil 1.10'da verilmiştir. Doğalgaz üretimi ve ithalatı 2017 yılında sırası ile 354 ve 55.200 Milyon Sm³ olmuştur (EPDKa, 2018). Türkiye, 2017 yılında yaklaşık 29 milyon tonluk petrol ve petrol ürünü üretimi gerçekleştirirken, aynı ürün gruplarındaki toplam ithalat miktarı yaklaşık 43 milyon ton olmuştur (EPDKb, 2018).



Şekil 1.10. Türkiye doğalgaz üretim ve ithalat dengesi 2008-2017 (EPDKa, 2018).

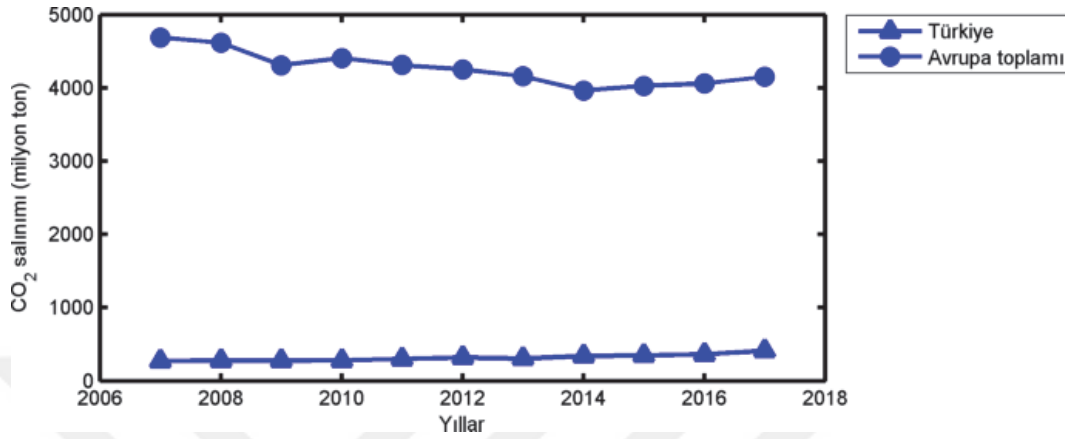
Türkiye'nin elektrik enerjisi görünümü Çizelge 1.3'te verilmiştir. Çizelge 1.3 incelendiğinde, Türkiye elektrik tüketiminin beş yıl içerisinde yaklaşık %14 oranında artarak 273.387 GWh'e ulaştığı görülmektedir (ETKB, 2017). Türkiye'nin 2023 yılındaki elektrik tüketiminin 530.000 GWh seviyelerine ulaşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle Türkiye, 2023 yılına kadar, toplam elektrik üretimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payını %30'a çıkarmak ve 20 GW rüzgâr enerjisi kapasitesine sahip olmak gibi önemli hedefler koymuştur. Bu bağlamda, 2013 yılında yaklaşık 60.000 GWh olan yenilenebilir kaynaklı elektrik üretim değeri 160.000 GWh'e çıkmalıdır. (Melikoğlu, 2013).

Çizelge 1.3. Türkiye'nin elektrik enerjisi görünümü (ETKB, 2017).

Yıl	Üretim (GWh)	İthalat (GWh)	İhracat (GWh)	Tüketim (GWh)	Üretim Artış Oranı (%)	Tüketim Artış Oranı (%)
2012	239.497	5826	2954	242.370	4,4	5,2
2013	240.154	7429	1227	246.357	0,3	1,6
2014	251.963	7953	2696	257.220	4,9	4,4
2015	261.783	7135	3194	265.724	3,9	3,3

Avrupa ve Türkiye karbon emisyonu değerlerinin 2007-2017 arasındaki değişimi Şekil 1.11'de verilmiştir. Toplam Avrupa karbon salınımı 4688,8 milyon tondan 4152,2 milyon tona düşerken, Türkiye karbon salınımı 273 milyon tondan 410,9 milyon tona çıkmıştır. Türkiye, iklim değişikliği ile mücadele etmek için Kyoto Protokolü'nü 2009 yılında kabul etmiş ve ayrıca 2016'da Paris İklim Anlaşması'nı imzalamıştır. Bu bağlamda, Türkiye, sera gazı salınımını

azaltmak için yenilenebilir kaynaklarının kullanım düzeyini arttırmayı hedeflemektedir (IEA, 2016).



Şekil 1.11. Türkiye ve Avrupa için yıllara bağlı karbon salınımı kıyaslaması (BP Grup, 2018).

Sonuç olarak Türkiye, büyüyen nüfusu ve gelişen ekonomisi ile hızlı oranda artan bir enerji talebi ile karşı karşıyadır. Enerji ihtiyacının önemli miktarı, büyük oranda ithalat ile temin edilen fosil kökenli yakıtlara bağımlıdır. Bu durum Türkiye'nin enerji güvenliğini tehdit etmektedir. Ayrıca fosil kökenli yakıtlara olan bağımlılık, ülkenin karbon salınımını yükseltmektedir. Türkiye, enerji güvenliğini sağlamak ve sürdürülebilir bir enerji-çevre etkileşimini temin etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından en üst düzeyde yararlanmalıdır. Bu sebeple, ülkenin yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli hakkında araştırmalar yapılmalıdır ve bu kaynaklar en verimli şekilde işletilmelidir.

Bu çalışmada, son yıllarda oldukça dikkat çeken rüzgâr santrali konumlandırma probleminin optimizasyonu hakkında bir araştırma yapılmıştır. Oluşturulan optimizasyon kodu, seçilen alanın orografik yapısını tanıyarak farklı ticari türbin modellerinin çeşitli göbek yüksekliği değerleri içerisinde seçim yaparak, seçilen bir amaç fonksiyonunu en iyi değerine ulaştıran tasarımı yakalamayı amaçlamaktadır. Optimizasyon aracı, Kütahya ilinin rüzgâr santrali fizibilitesinde kullanılmıştır. Buna ek olarak, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü'nün saatlik elektrik tüketiminin rüzgâr enerjisi ile karşılanabilirliği araştırılmıştır. Kampüs etrafındaki en rüzgârlı bölgeler WAsP yazılımı ile belirlenmiş ve bu bölgelerin türbin kurulumu açısından fiziki uygunluğu araştırılmıştır. Kampüs içindeki binaların kullanım amaçlarının farklılığı sebebi ile gürültü etkilerine karşı olan hassasiyetleri değişim gösterir. Bu sebeple, seçilen alanların gürültü yayılımı açısından uygunluğu araştırılmıştır. Bu bağlamda, ISO standartlarını temel alan bir gürültü yayılım analiz kodu oluşturulmuştur. Kullanılan sayısal modellerin ve rüzgâr verilerinin doğrulaması yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

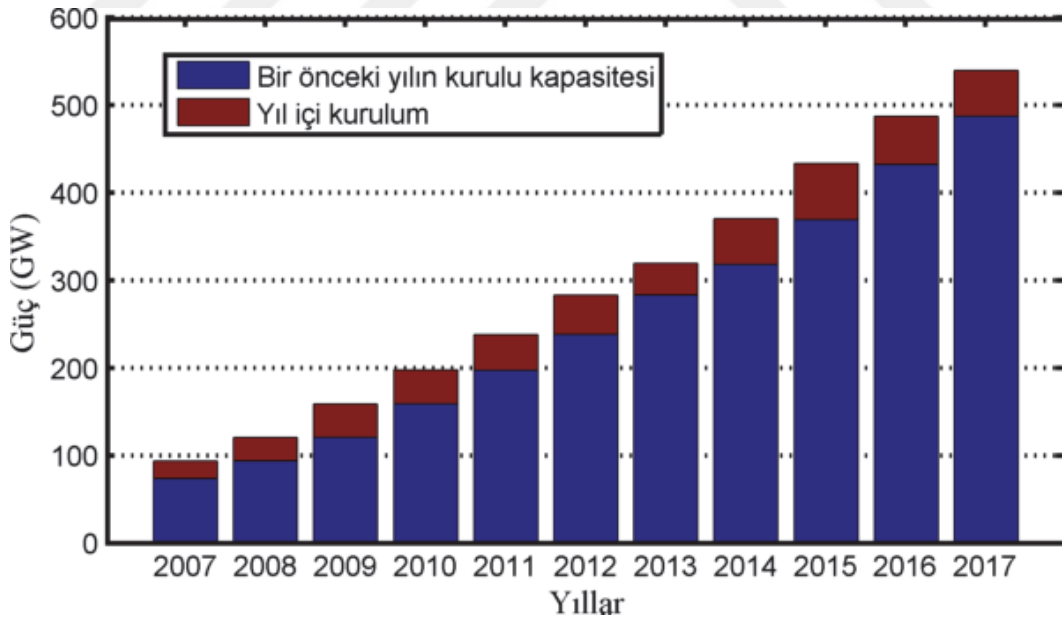
Bölüm 2’de; küresel ve Türkiye rüzgâr enerjisi genel görünümüleri verilmiş, Bölüm 3’de; çalışmada kullanılan metodoloji ile ilgili önceki çalışmaların literatür derlemesi sunulmuş, Bölüm 4’de; kullanılan materyal ve metotlara ait detaylar verilmiş, Bölüm 5’de; yapılan analizler neticesinde elde edilen ana bulgular irdelenmiş, Bölüm 6’da; çalışmanın temel sonuçları ve öneriler verilmiştir.



2. DÜNYA VE TÜRKİYE'DE RÜZGÂR ENERJİSİ GENEL GÖRÜNÜMÜ

2.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi

2017 yılı sonunda küresel rüzgâr kurulu gücü 539.581 GW olmuştur (GWEC, 2018). Dünya genelinde, 2016 yılında 55 GW'lık rüzgâr güç santrali kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu değer, küresel toplam kurulu güç değeri olan 487 GW değerinin %12'sine denk gelmektedir (GWEC, 2017). Bu eklemeler 2015'te görülen kurulum rekorunun (64 GW) %14 altındadır fakat bugüne kadarki en büyük ikinci orandır. 2016 yılı sonunda 90 ülkede ticari rüzgâr enerjisi yatırımları gözlenmiştir (REN21, 2017). 2015 ve 2016 ile karşılaştırıldığında, 2017 yılı daha zayıf bir yıl olarak kayıtlara geçmiştir. Buna rağmen 52 GW'lık yeni kurulum ile en güçlü üçüncü yıl olmuştur. Şekil 2.1, yıllara bağlı küresel rüzgâr kurulu güç değişimini göstermektedir. Çin'deki daralma, yeni kurulumlardaki azalmanın en önemli etkeni olarak görülmüştür. Bu azalmaya rağmen, Avrupa ve Hindistan da dâhil olmak üzere diğer birçok pazarda rekor kurulumlar gerçekleştirilmiştir (REN21, 2018).

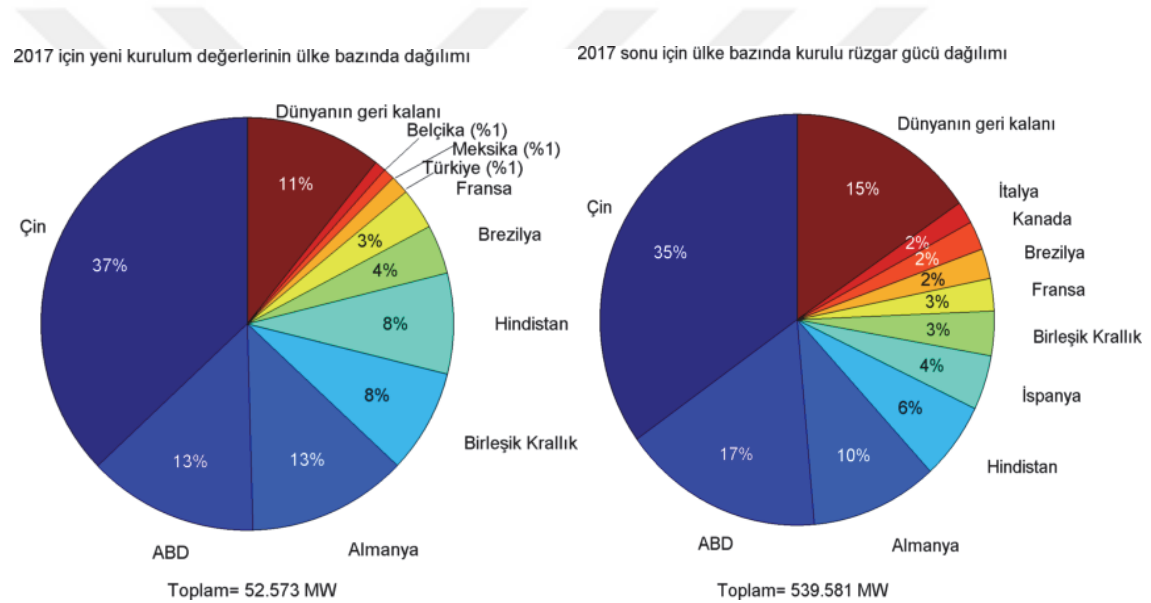


Şekil 2.1. Küresel rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimi (REN21, 2018).

Yeni kurulumlarda liderliğini sürdüren Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Hindistan tarafından takip edilmektedir. Yeni kurulum değerlerinde ilk 10'daki diğer ülkeler ise; Brezilya, Fransa, Türkiye, Hollanda, İngiltere ve Kanada'dır. Yeni marketler; Asya, Afrika, Latin

Amerika ve Orta Doğu’da açılmıştır. Bolivya ve Gürcistan, 2016’da ilk rüzgâr güç santrallerini kurmuşlardır. 2016 yılı sonunda kişi başına güç kapasitesinde önde gelen ülkeler; Danimarka, İsveç, Almanya, İrlanda ve Portekiz olmuştur (REN21, 2017).

Asya bölgesi, günümüzdeki en büyük bölgesel rüzgâr enerjisi pazarıdır ve küresel kurulu gücün %48’ine sahiptir. Asya’yı %30 oran ile Avrupa takip etmektedir. Geri kalan kurulu gücün büyük bölümünü (%14) Kuzey Amerika barındırmaktadır. 2017 yılında, bazı büyük pazarlardaki büyüme oranları, politika ile ilgili yavaşlamalardan etkilense de mali ve çevresel faktörler etkileyici olmuştur. Rüzgârdan güç üretimi, birçok pazarda en düşük güç üretim maliyeti değerine sahip olmuştur (GWEC, 2017; REN21, 2017).



Şekil 2.2. Ülkeler bazında rüzgâr kurulu güç dağılımı (GWEC, 2018).

Ülkeler bazında rüzgâr kurulu gücünün dağılımı ve 2017 yılındaki yeni kurulumların ülke bazında dağılımı Şekil 2.2 ile verilmiştir (GWEC, 2018). Çin 2017 yılında 19,7 GW’lık bir ekleme gerçekleştirmiştir ve kurulu rüzgâr kapasitesi 188,4 GW’a ulaşmıştır. Merkezi hükümetin, rüzgâr enerjisi için yıllık tam yüklü çalışma sürelerini garantilemek için yeni düzenlemeler yapmasına rağmen, zayıf şebeke bağlantıları, iletim altyapısı eksikliği, enerji talebindeki yükselmenin beklenilenden az olması ve şebeke yöneticilerinin tercihleri nedeniyle, rüzgâr türbinlerine uygulanan zorunlu kesintiler 2016 yılında büyük bir sorun olmaya devam etmiştir. Bu zorunlu kesintilere rağmen, rüzgâr gücünün, Çin’in toplam enerji üretimindeki payı son yıllarda istikrarlı bir şekilde artmış ve 2016 yılında 241 TWh ile %4’e ulaşmıştır (REN21, 2017). Asya’nın diğer bir ülkesi Hindistan’da, 2017 yılında 4,1 GW’lık ek kurulum ile toplam kurulu

rüzgâr gücü 32,8 GW'a ulaşmıştır. Pakistan (0,2 GW), Kore Cumhuriyeti (0,1 GW) ve Japonya (0,2 GW) kurulumları ile Asya'nın toplam kurulu gücü 203 GW'ın üzerine çıkmıştır (GWEC, 2018).

Amerika Birleşik Devletleri, 7 GW'lık yeni kurulum ile Çin'in hemen arkasında ikinci sırada yer almıştır. Kurulu güç 89 GW'a ulaşırken, rüzgârdan 2016 yılında 226,5 TWh'lik elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir (AWEA, 2018). Kanada, 0,3 GW'lık yeni kurulum değerine rağmen toplam 12,2 GW kurulu güce ulaşmış ve ilk ondaki yerini korumuştur (CanWEA, 2018).

Avrupa Birliği, 15,6 GW'lık brüt kapasite eklemesi ile 168,7 GW'lık kurulu güce ulaşırken, bu kurulu gücün %91'i kara üstü, %9'u deniz üstü santrallerden oluşmaktadır. Almanya 6,6 GW'lık ek kurulum ile 56,1 GW kapasitesine ulaşmıştır. 2016 yılında AB'nin rüzgârdan ürettiği elektrik enerjisi yaklaşık 353,3 TWh olmuştur (EurObserv'ER, 2018). Birleşik Krallık 2,6 GW karaüstü + 1,7 GW'lık denizüstü santral kurulumu ile toplam 4,3 GW'lık yeni kurulum gerçekleştirmiştir ve böylece kurulu gücü 18,9 GW olmuştur (UKDBEIS, 2018). Fransa, 1,7 GW'lık yeni kurulum ile toplam 13,8 GW kurulu güce ulaşmıştır (REN21, 2018). Türkiye, 2017 yılındaki 0,8 GW'lık kurulum ile yaklaşık 6,9 GW'lık kurulu güce ulaşmıştır (TÜREB, 2018).

Latin Amerika ve Karayipler bölgesinde, yaklaşık 3,1 GW yeni kurulum gerçekleştirmiştir ve 25 ülkenin toplam kurulu gücü 21,9 GW'a ulaşmıştır. Brezilya 2 GW'lık yeni kurulum ile 12,8 GW güce ulaşmış ve ilk ondaki yerini korumuştur (GWEC, 2017). Meksika, 0,5 GW'lık yeni kurulum ile 4 GW kurulu güce ulaşmıştır. Meksika'yı sırası ile Uruguay (0,3 GW), Şili (0,1 GW) ve Kosta Rika (59 MW) takip etmiştir.

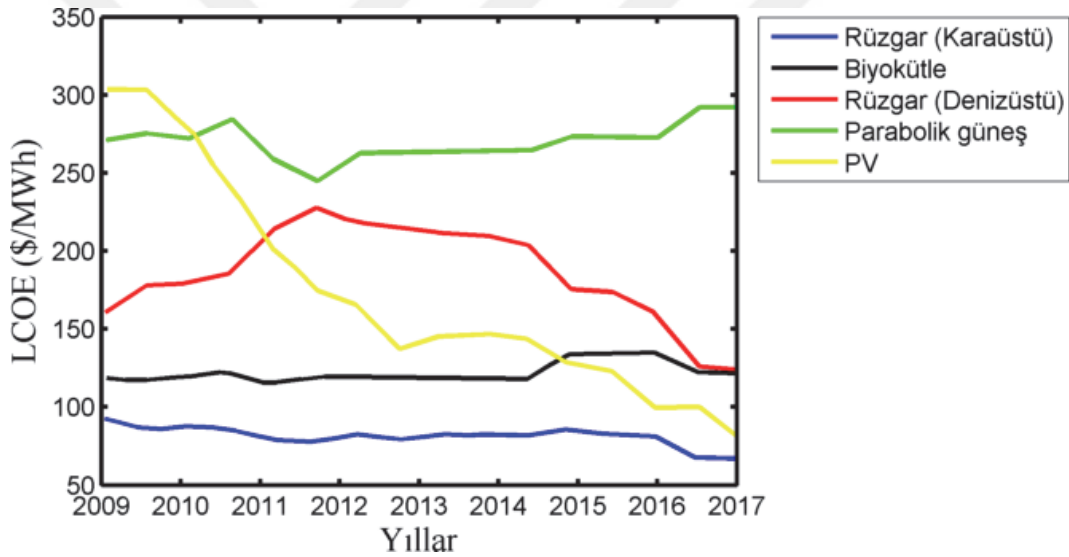
Afrika rüzgâr piyasasında 2017 yılında az miktarda yeni kurulum gözlenmiştir. Güney Afrika, 0,6 GW'lık yeni kurulum ile 2,1 GW kurulu güç değerine ulaşmıştır. 2016 yılında Fas, rekor derecede düşük fiyatlar ile 850 MW'lık rüzgâr projesi ihalesi yapmıştır. Kenya'nın Turkana Gölü projesi kapsamında yapılan 310 MW'lık santralin inşaatı devam etmektedir (REN21, 2018).

Okyanusya bölgesinde yıl boyunca çok az aktivite gözlenmiştir. Sadece Avustralya, 0,6 GW'lık yeni kurulum gerçekleştirmiş ve 4,6 GW kurulu güce ulaşmıştır (GWEC, 2018).

2016 yılında 2,2 GW'lık deniz üstü rüzgâr santrali şebekeye dâhil edilmiştir ve yeryüzündeki toplam deniz üstü kurulu gücü 14,4 GW'a yükselmiştir (EWEA, 2017). Daha önceki yıllarda olduğu gibi kurulumun çoğunluğu Avrupa'da gerçekleşmiştir (1,6 GW). Hızlıca düşen maliyetler neticesinde birçok deniz üstü santralin inşaatı devam etmektedir. Çin, geri kalan 0,6 GW'lık kurulumun çoğunu gerçekleştirmiştir. Kore Cumhuriyeti (Güney Kore) ve Amerika

Birleşik Devletleri, 30 MW'lık ilk deniz üstü santrallerini tamamlamışlardır (AWEA, 2016). Japonya ise 7 MW'lık yüzen türbinin bağlantısını gerçekleştirmiştir. Birleşik Krallık, 5,2 GW kurulu deniz üstü gücü ile dünya liderliğini korurken, Almanya (4,15 GW), Çin (1,9 GW), Danimarka (1,3 GW) ve Hollanda (1,1 GW) tarafından takip edilmektedir (REN21, 2017).

2016 yılı rüzgâr gücü verilerine bakıldığında, rüzgâr santrali yatırımlarının dünyanın her yerinde devam ettiği ve dolayısı ile artan elektrik ihtiyacının karşılanmasında önemli bir role sahip olduğu görülmektedir. 2016 yılında Avrupa Birliği elektrik ihtiyacının yaklaşık %10,4'ü rüzgâr ile karşılanırken, 11 Avrupa Birliği ülkesine ek olarak Uruguay ve Kosta Rika'da bu değere eşit veya daha yüksek oranlar gözlenmiştir. Yine 2016 yılında 24 adet ülkenin yıllık elektrik ihtiyacının %5'i rüzgâr ile karşılanmıştır (REN21, 2017).

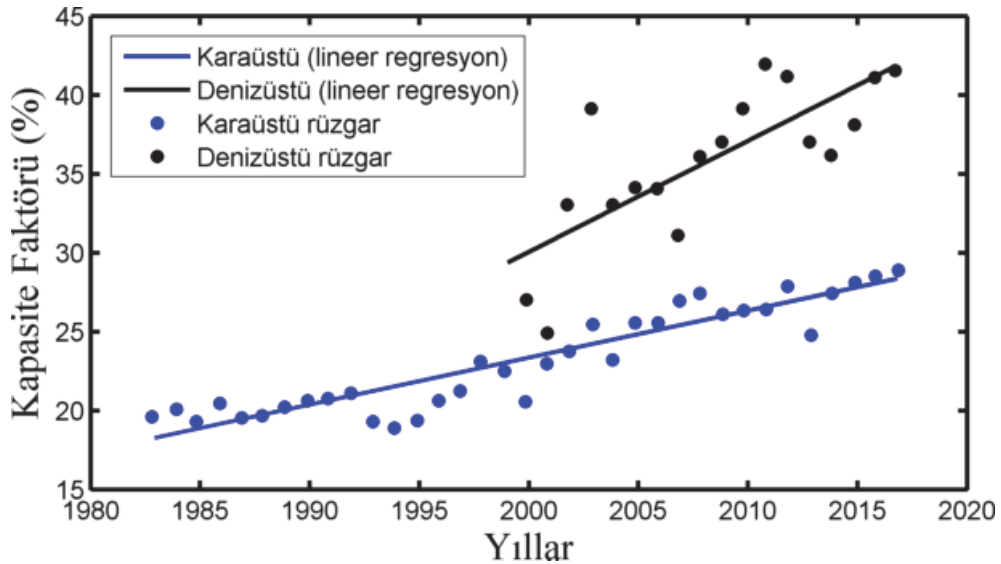


Şekil 2.3. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin enerji maliyeti kıyaslaması (Finance, B.N.E, 2018).

Enerji maliyetleri, rüzgâr kaynağına, yasalara, sermaye maliyetlerine ve diğer yerel etkilere göre büyük ölçüde değişmektedir (BNEF, 2015). 2016 yılında rüzgâr enerjisinin seviyelendirilmiş enerji maliyeti (SEM), konumlandırma ve bakım konularındaki teknik uzmanlığın artmasına paralel olarak düşmeye devam etmiştir. Hem karada hem de denizde, rüzgâr enerjisi için hızla düşen fiyatlar, rüzgâr enerjisini birçok pazarda yeni enerji üretim kapasitesi için en düşük maliyetli seçenek haline getirmiştir. Dünyanın her yerinde, rüzgâr enerjisi hızla olgun ve maliyet bakımından rekabetçi bir teknoloji haline gelmiştir (REN21, 2018). Şekil 2.3, yenilenebilir enerji teknolojilerinin birim elektrik maliyetlerinin yıllara göre değişimini göstermektedir. Buradaki değerler ilgili yılın yatırım kararlarına dayanan değerlerdir ve proje

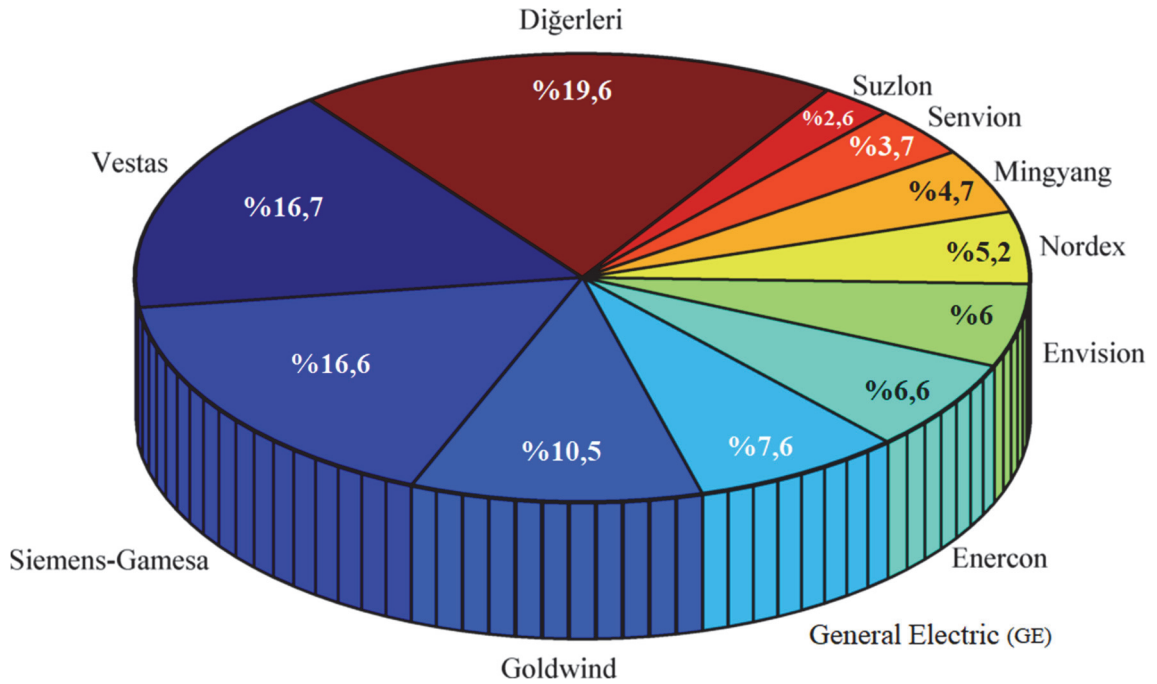
geliştirme, ekipman, inşaat, finansman, işletme ve bakım maliyetlerini içeren seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (SEM) modeli temel alınarak hesaplanmıştır. Karaüstü rüzgâr santrallerinin uzun yıllardır en düşük birim enerji maliyetlerine sahip olduğu görülmektedir. Denizüstü rüzgâr santrali projelerinin, kıyılardan daha derin sulara doğru ilerlemesi ile yıllar boyunca artan bir maliyet eğilimi gözlenmiştir, ancak 2012'deki zirveden beri %44'lük bir düşüş gerçekleşmiş ve birim enerji maliyeti 124 \$/MWh olmuştur (Finance, B.N.E, 2018).

Türbin üretimi daha standart hale gelirken türbin büyüklüğü, verimlilik ve kapasite faktörleri artmıştır. Şekil 2.4, 1983-2017 yılları arasında yeni karaüstü ve denizüstü rüzgâr enerjisi kapasite eklemeleri için küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörleri değişimini göstermektedir (IRENA, 2018). Rüzgâr türbini boyutlarındaki genel eğilim; güç çıkışını artırmak için daha uzun kanatlara, daha yüksek göbek yüksekliğine ve dolayısıyla daha büyük rotor boyutlarına sahip, daha büyük makinelerle doğru devam etmiştir. Bu tür bir eğilim, kapasite faktörü değerlerini önemli ölçüde yükseltmiş ve yeni pazarların yanı sıra, yerleşik pazarlarda daha fazla fırsat yaratmıştır. Örneğin, Brezilya'da işletmede olan rüzgâr çiftlikleri için ortalama kapasite faktörleri, 2015 yılında %38,8 iken 2016'da %40,9'a yükselmiştir. Buna paralel olarak, 2016'da kapasite oranları da yükselmiştir ve pazara sunulan ortalama türbin kapasitesi 2015'e göre % 6,4 artarak 2,16 MW'a çıkmıştır (REN21, 2017).



Şekil 2.4. Rüzgâr kapasite eklemeleri için küresel ağırlıklı ortalama kapasite faktörleri değişimi (IRENA, 2018).

Rüzgâr türbini üretimi genellikle, Çin, Avrupa Birliği, Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşmekte ve nispeten az sayıda üretici arasında yoğunlaşmaktadır (IEA, 2015). Vestas (Danimarka), 2016 yılında, Amerika Birleşik Devletleri pazarında güçlü bir yıl geçirmesine bağlı olarak, Goldwind (Çin) 'den liderliğini geri almıştır. General Electric (Amerika Birleşik Devletleri), bir basamak yükselerek ikinci sırada yer alırken, iki basamak düşen Goldwind üçüncü olmuştur. Goldwind ve diğer önemli Çinli şirketler, ağırlıklı olarak yerel pazara olan bağımlılıklarından ötürü düşüş yaşarken; Vestas, 2016 yılında 34 ülkedeki kuruluşlarıyla en büyük küresel tedarikçi olarak görülmüştür (FTI, 2017). En büyük 10 üreticinin, 2016 yılındaki pazarın %75'ini karşıladığı görülmüştür. Artan rüzgâr enerjisi teknolojisi ve proje taleplerine cevap verebilmek için, türbin tedarikçileri ve proje geliştiricileri, dünya çapında yeni fabrikalar ve ofisler açmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, yedi şirket mevcut üretim tesislerini büyütülmüştür. Avrupa denizüstü endüstrisini desteklemek için Siemens, İngiltere'de yeni bir kanat fabrikası açarken, Fas'ta bir kanat fabrikası kurmak için bir anlaşma imzalamıştır (REN21, 2017). Vestas 2017 yılında liderliğini korumuştur. Siemens-Gamesa, Siemens ve Gamesa'nın birleşmesi ve şirketin 35 ülkede faaliyet göstermesi gibi sebepler ile Vestas'ı çok yakından takip ederek ikinci olmuştur. Önemli rüzgâr türbini üreticilerinin 2017 yılındaki Pazar payları Şekil 2.5 ile verilmiştir (REN21, 2018).



Şekil 2.5. Rüzgâr türbini üreticilerinin pazar payları - 2017 (REN21, 2018).

Rüzgâr enerjisi teknolojisi, küresel rekabetin desteği ile gelişmeye devam etmiştir. Teknoloji geliştiricilerinin şu ana başlıklar altında araştırmalarını yoğunlaştırdığı gözlenmiştir (Pelosi, 2016):

- i. Türbin üretim ve taşımacılığı alanında iyileştirmeler yapılması,
- ii. Düşük rüzgâr hızlarında güç üretiminin optimize edilmesi,
- iii. Şebekeye katılan yenilenebilir enerji sistemlerinin değişken yapısı ile başa çıkmak için gerekli şebeke kodlarının geliştirilmesi.

Aşırı aşınma ve yıpranmaya maruz kalan kanat uçları için yeni malzeme ve tasarımlar üzerine araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca lojistik zorlukları ve ulaşım maliyetlerini azaltmak için iki parçalı kanat tasarımları ve kule yapımı için portatif beton üretim tesisleri içeren fikirler ortaya atılmıştır. Siemens, baykuşların sessiz uçuşundan ilham alan, düşük gürültülü bir kanat tasarımı açıklamıştır. Vestas, nakliye gereksinimlerini azaltmayı ve yapısal maliyetleri en aza indirmeyi amaçlayan dört rotorlu konsept türbini test etmeye başlamıştır (REN21, 2017).

Deniz üstü rüzgâr çiftliklerinde, ölçeklendirme ve standartlaştırma yoluyla maliyetlerin azaltılması ihtiyacı, türbinlerin yanı sıra projelerin büyüklüğünü de arttırmıştır. Avrupa’da inşaat halinde olan deniz üstü santrallerin ortalama rüzgâr türbini kapasitesi 2015’e kıyasla %15 artarak 4,8 MW olmuştur. 2016 yılının ikinci yarısında sipariş edilen türbinlerin ortalama büyüklüğü ise 7,7 MW’dır (EWEA, 2017). Vestas, Siemens, GE ve Adwen’in 8 MW’lık rüzgâr türbinlerinin bazıları pazarda yerini almıştır ya da yılsonu itibarı ile neredeyse ticarileştirilme seviyesine gelmiştir. 2016 yılında 8 MW türbinlerden oluşan ilk deniz üstü santral şebekeye bağlanmıştır. 2017 yılının başında, MHI Vestas Offshore Wind, 8 MW’lık türbinin 9 MW’lık bir nominal güce ulaşabilecek şekilde geliştirilmiş bir versiyonunu piyasaya sunmuştur. Bu türbinin süpürme alanı (164 metre rotor çapı), London Eye dönme dolabından daha büyüktür (REN21, 2017).

Politikaların, küçük ölçekli türbin piyasasını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir (REN21, 2017). 2015 yılı içerisinde bu piyasanın %5 ile %7 arasında büyüdüğü ve kurulu gücün %12 ile %15 arasında arttığı görülmüştür (WWEA, 2017). 2015 yılı sonunda, 935 MW gücüne sahip toplam 995.000’den fazla küçük ölçekli türbinin kullanıldığı tahmin edilmektedir. Çin, 415 MW ile en yüksek paya sahiptir (Orrell vd., 2016).

2.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Enerji üretimi ve güç kapasitesi verilerini paylaşmadan önce Türkiye’nin rüzgâr iklimini kısaca açıklamak faydalı olacaktır. Bu bağlamda, 1990’ların sonu ve 2000’lerin başında

yayınlanan ilgili çalışmalara başvurmak faydalıdır (İncecik ve Erdoğan, 1994; Şen ve Şahin 1997, 1998; Öztopal vd, 2000; Şen 2001; Aras, 2003). Türkiye'nin Akdeniz sahil ovalarından, İstanbul da dâhil olmak üzere neredeyse kuzeybatı kesimine kadar değişen bir Akdeniz iklimi hâkimdir. Bölgenin güney kesimleri, özellikle yılın mevsimlerine bağlı olarak Azores yüksek basınç ve Basra düşük basınç merkezlerinden gelen siklonik bozuklukların neden olduğu güneybatı ve batı rüzgârlarından etkilenmektedir. Öte yandan, Türkiye'nin kuzeybatı kesimi, özellikle Kuzey Ege Denizi'nde, kuzey ve kuzeybatı rüzgârlarına neden olan İzlanda düşük basınç etkisi altındadır. Etesiyen rüzgârları, Bozcaada ve Gökçeada gibi adalar da dâhil olmak üzere en önemli rüzgâr enerjisi potansiyel alanlarını içeren Türkiye'nin Ege kıyılarında önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, kıyı alanları boyunca sık görülen kara ve deniz meltemleri de rüzgâr enerjisi üretimine katkı sağlar. Karadeniz sahil hattı boyunca, Türkiye, Sibirya'dan gelen kuzey ve kuzeydoğu rüzgârlarına maruz kalmaktadır ve Orta Karadeniz menzili, rüzgâr hızının ve dolayısıyla enerjinin çoğunu almaktadır. Yer yer engebeli dağların bulunduğu Türkiye'nin iç kısmında karasal bir iklim hüküm sürmektedir ve bazı vadilerde rüzgâr hızı önemli düzeyde enerji üretebilen seviyelere ulaşabilmektedir. Türkiye'nin yükseklik değerleri genelde, batıda Ege Denizi kıyılarındaki ortalama deniz seviyesinden, doğuda İran sınırındaki Ağrı Dağı'na doğru istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Doğuda yüksek rakım değerleri ile karakterize edilen engebeli yapı rüzgâr santrali kurulumunu güçleştirmektedir. Bir diğer düşük yükseklik değerindeki, rüzgâr enerjisi üretim potansiyelinin yüksek olduğu bölge, Türkiye'nin güneydoğu kesiminde bulunmaktadır.

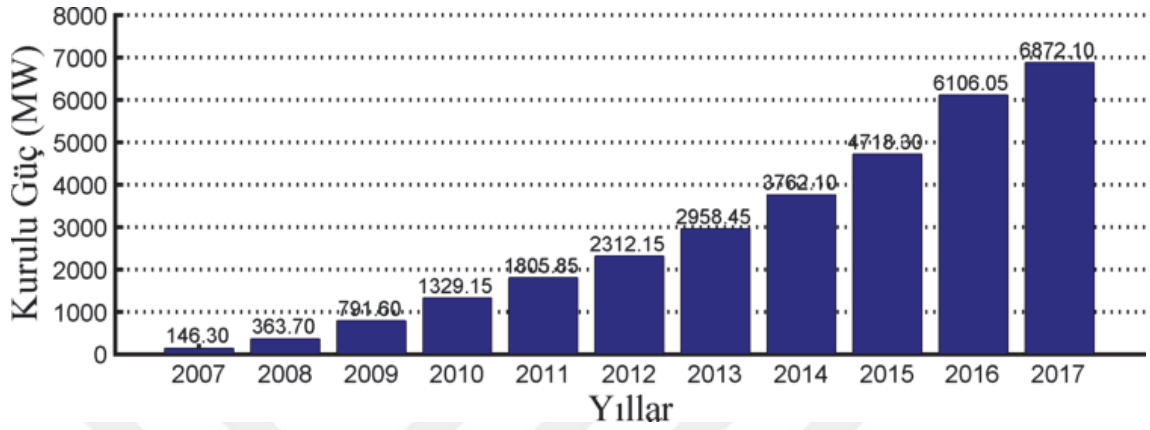
Bölüm 1'de bahsedilen yenilenebilir enerji kaynaklı hedeflere ulaşılması amacı ile çeşitli teşvik mekanizmaları, yürürlüğe giren yeni yasalar çerçevesinde devreye sokulmuştur. Türkiye'de özel sektörün, enerji sektörüne girmesine ve Türkiye Elektrik İdaresi'ne elektrik satmasına 1982 yılında izin verilmiştir. Elektrik sektörü içerisine özel sektör katılımı ile ilgili 3096 numaralı ilk yasa 1984 yılında yürürlüğe girmiştir (Resmi Gazete, 1984). Bu yasa ile özel yatırımcıların yap-işlet-devret sözleşmeleri ile yeni üretim tesisleri kurmaları için yasal dayanak oluşturulmuştur. Enerji projesi finansmanı ve mülkiyeti için iki diğer yol olan yap-sahip ol-işlet ve işletme haklarının devri, 1995 yılında onaylanmıştır (Çanka-Kılıç ve Kaya, 2007). 1997 yılında yürürlüğe giren 4283 numaralı “yap-işlet modeli ile elektrik enerjisi üretim tesislerinin kurulması ve işletilmesi ile enerji satışının düzenlenmesi hakkında kanun” ile birlikte, özel sektörün enerji santrallerinin inşasına ve işletilmesine katılımı kabul edilmiştir (Resmi Gazete, 1997). Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimini teşvik eden ilk yasa Mart 2001'de yürürlüğe giren 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu olmuştur (Resmi Gazete, 2001). Bu yasa ile

yenilenebilir enerji ile ilgili politikalar ortaya konmuştur. Bu kanun ile yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin teşvik edilmesine yönelik yasal çerçeve oluşturulmuş, tarifeler ve satın alma yükümlülükleri belirlenmiş, bağlantı önceliği, azaltılmış lisans ücretleri, küçük ölçekli üreticiler için lisans yükümlülüğünden muaflıklar, proje hazırlama ve arazi edinimi için indirimli ücretler gibi teşvik mekanizmaları uygulanmıştır. Daha sonra, 2005 yılında 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” resmi gazetede yayınlanmıştır (Resmi Gazete, 2005). Bu yasa ile elektrik enerjisi üretmek için kullanılan yenilenebilir enerjinin kullanımını genişletmeyi ve serbest piyasa koşullarını rahatsız etmeden yenilenebilir enerji kullanımının artması amaçlanmıştır. Bu kanuna göre 2011 yılına kadar tarife garantisi verilmiş, ayrıca devlet arazileri satış bedellerine göre kiraya verilmiş veya doğrudan kullanım iznine tabi tutulmuştur. 2007 yılında 5627 numaralı “Enerji Verimliliği Kanunu” yürürlüğe girmiştir (Resmi Gazete, 2007). Bu kanunun amacı, enerji maliyetlerini azaltmak ve çevreyi korumak amacıyla enerji kaynaklarının verimli kullanımını arttırmaktır. Bu kanuna göre, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi için 10 yıl süre ile 5 ile 5,5 EUR/kWh arasında sabit bir alım fiyatı belirlenmiştir. Bu fiyatların, 2011'in sonuna kadar kurulacak tesisler için geçerli olduğu söylenmiştir fakat iki yıl süre ile uzatılabileceği eklenmiştir. Yenilenebilir enerji üretimi için yeni teşvikler getiren yeni bir yasa 2010'da yürürlüğe girmiştir. Yasaya göre, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten bireyler ve tüzel kişiler, ulusal elektrik dağıtım sistemine fazla miktarda elektrik üretilmesi durumunda, tarife garantilerinden yararlanabileceklerdir. Bu teşvik, 18 Mayıs 2005 ile 31 Aralık 2015 tarihleri arasında faaliyete geçecek olan üretim lisansı sahipleri için 10 yıl boyunca geçerli olacaktır (Resmi Gazete, 2011; Şimşek ve Şimşek, 2013).

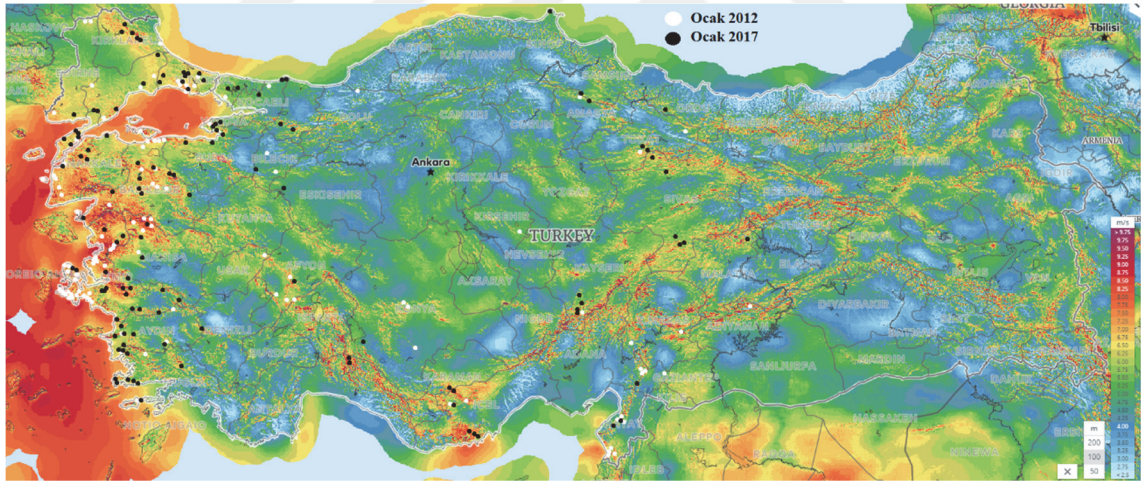
Türkiye'nin teorik olarak ulaşılabilir rüzgâr gücü potansiyelinin 88 GW olduğu tahmin edilmektedir (Hepbaşlı ve Özgener, 2004; GWEC, 2005). Ayrıca, orta ölçekli hava tahmini modeli ve mikro ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılması ile yerden 50 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızının 7,5 m/s'yi aştığı bölgelerde kurulacak 5 MW kapasiteli rüzgâr santralleri kabulü altındaki ekonomik rüzgâr gücü potansiyeli 48 GW olarak hesaplanmıştır (ETKB, 2018). Bu rüzgâr potansiyelinin büyük bir çoğunluğu ülkenin batı kısmında yer alan Marmara, Ege ve Akdeniz Bölgesi'nde yer almaktadır. Şekil 2.6'da yıllara göre Türkiye'nin rüzgâr enerji santrali kurulu gücünün değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere, 2017 sonu itibarı ile Türkiye'nin kurulu rüzgâr güç kapasitesi 6872,1 MW'tır (TÜREB, 2018).

Şekil 2.7'de Danimarka Teknik Üniversitesi ve Dünya Bankası ortaklığı ile oluşturulan küresel enerji atlasının 100 metredeki ortalama rüzgâr hızı haritası üzerinde Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santrallerinin dağılımı verilmiştir. Her bir nokta, işletim koşulu gözetmeksizin (işletmede,

inşaat halinde, lisanslı), bir rüzgâr enerjisi santralinin yaklaşık yerini temsil ederken, beyaz renk ve siyah renk sırasıyla 2011 ve 2017 yıllarının Ocak ayındaki durumu ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Türkiye’de yıllara göre rüzgâr santrali kurulu güç değişimi (TÜREB, 2018).

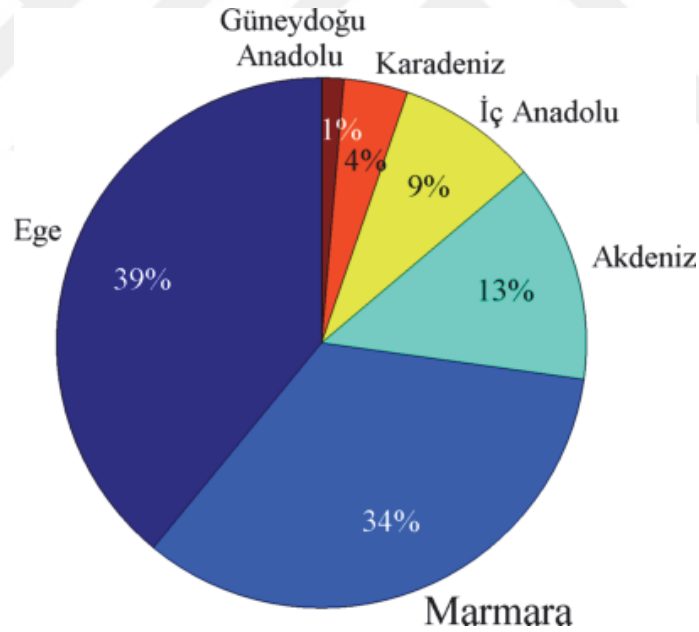


Şekil 2.7. Türkiye Ocak 2011-2017 arasındaki rüzgâr santrali kurulum gelişimi (TÜREB, 2017) (DTU Wind Energy, 2018).

Şekil 2.7’ye göre, Türkiye’nin kuzeybatı köşesinde, Ege Denizi ve Doğu Akdeniz kıyılarında, güneydoğu kesiminde ve kuzeydeki Orta Karadeniz kıyılarında, diğer bölgelere kıyasla daha yüksek yıllık ortalama rüzgâr hızları gözlenmektedir. Ayrıca Türkiye’nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin, topografik yükselti değerleri ile uyuşmadığı görülmektedir. Deniz kıyıları, özellikle Marmara ve Ege Bölgesi kıyıları, önemli rüzgâr enerjisi potansiyeli merkezleri olarak görülmektedir; buna karşılık iç bölgeler, rüzgâr enerjisi üretimi için zayıf bölgelerdir. Örneğin, Türkiye’nin doğusu, Dünya’daki en engebeli ve yüksek bölgelerinden biri olsa da, rüzgâr enerjisi

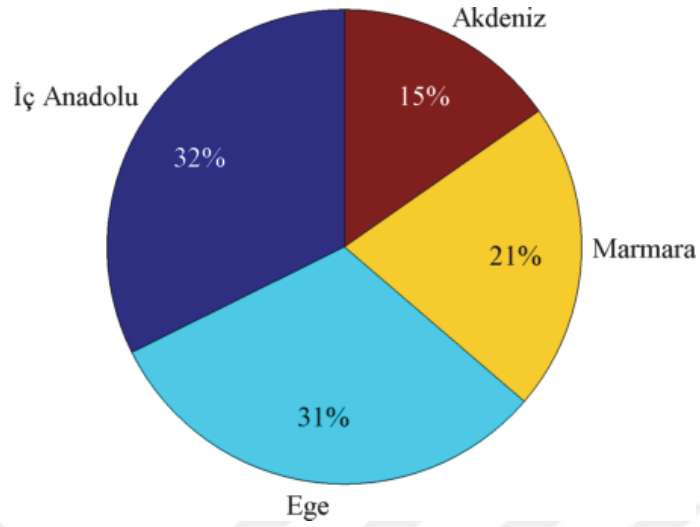
üretim potansiyeli düşüktür. Bu durum, çoğunlukla yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanır ve sonuç olarak türbülans etkileri rüzgâr enerjisini ve etkinliğini etkiler.

2011 yılında işletme halinde olan rüzgâr enerjisi santrallerinin hepsi Marmara, Ege ve Akdeniz Bölgeleri’nde yer almakta iken, günümüzde, Doğu Anadolu Bölgesi dışında her bölgede işletme halinde rüzgâr santrali yer almaktadır. Şekil 2.8, 2017 sonunda işletmedeki santrallerin bölgelere göre dağılım oranlarını göstermektedir. Yeni rüzgâr enerjisi yatırımlarının, ülkenin iç kesimlerine doğru ilerlediği görülmektedir. Gelişen rüzgâr teknolojisi ve düşen maliyetlere ek olarak, uygulamaya konulan yasal teşvikler, ülkenin iç bölgelerinde yeni yatırım fırsatlarını beraberinde getirmiştir. Rüzgâr türbinlerinin büyüyen boyutları ve düşük hızlarda daha verimli çalışan rüzgâr türbini tasarımları, yeni yatırım fırsatlarını beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, özellikle daha karmaşık topografya etkilerinin hâkim olduğu iç bölgelerdeki rüzgâr karakteristiğinin tam olarak bilinmesi, yapılacak yeni yatırımlar öncesindeki karar verme sürecinde faydalı olacaktır.



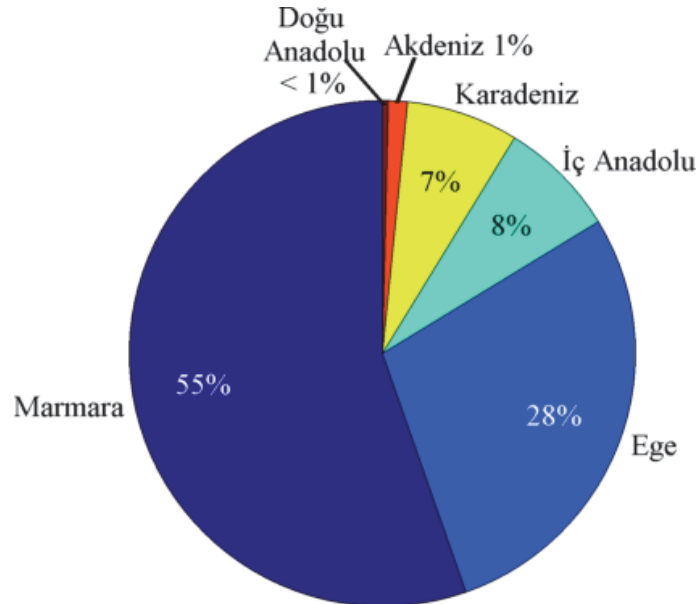
Şekil 2.8. İşletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu (TÜREB, 2018).

Türkiye’de inşaat halindeki rüzgâr enerjisi santrallerinin 2017 sonu itibarı ile toplam güç değeri 552,78 MW’dır. Bu santrallerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2.9 ile verilmiştir. Şekil 2.9 incelendiğinde, inşaat halindeki rüzgâr enerjisi santral yatırımlarının %32 ile en çok İç Anadolu Bölgesi’nde yer aldığı görülmektedir.



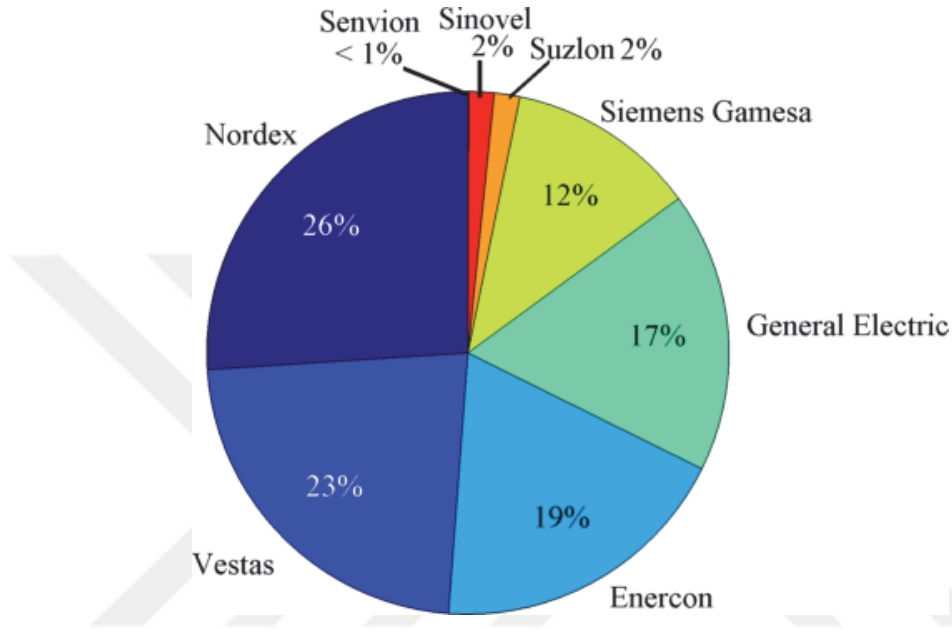
Şekil 2.9. İnşaat halindeki rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu (TÜREB, 2018).

Türkiye’de lisans almış rüzgâr enerjisi santrallerinin 2017 sonu itibari ile toplam güç değeri 2696,8 MW’dır. Bu santrallerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2.10 ile verilmiştir. Şekil 2.10 incelendiğinde, lisans almış rüzgâr enerjisi santral yatırımlarının %55 ile en çok Marmara Bölgesi’nde yer aldığı görülmektedir.



Şekil 2.10. Lisans almış rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2017 sonu (TÜREB, 2018).

Türkiye'nin işletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin 2017 sonu itibari ile türbin markalarına göre dağılımı Şekil 2.11'de verilmiştir. Şekil 2.11 incelendiğinde, Nordex marka türbinlerin %26 oran ile en çok tercih edildiği görülmektedir. Nordex'i, %23 ve %19 kullanım oranları ile Vestas ve Enercon marka türbinler takip etmektedir (TÜREB, 2018).



Şekil 2.11. İşletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin türbin markalarına göre dağılımları (TÜREB, 2018).

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bir rüzgâr santrali kurulumundaki ilk ve en önemli adım, kurulum yapılacak bölgenin seçimidir. Bu seçim rüzgâr santralinin üretim ve maliyet değerlerini doğrudan etkilemektedir. Bu bölümde rüzgâr santrali fizibilite araştırmaları üzerine yapılan yayınların önemli bulguları verilecektir. Yapılan literatür taraması neticesinde araştırmacıların dünyanın hemen hemen her yerinde rüzgâr iklimini belirlemek üzere araştırmalar yaptığı görülmüştür. Bu sebeple rüzgâr santrali tasarımı üzerine yapılan çalışmaları vermeden önce rüzgâr potansiyelini belirleme üzerine yapılan çalışmaları sunmak faydalı olacaktır.

Türkiye'nin rüzgâr potansiyelini belirleme üzerine yapılan akademik çalışmalar 1990'ların sonundan günümüze kadar artış göstererek önemli düzeyde bir bilgi birikiminin temini açısından faydalı olmuştur. Çizelge 3.1, bu çalışmalar hakkında bir derleme sunmaktadır. Bilindiği üzere saha üzerinde uzun süreli rüzgâr verisi ölçümü almak oldukça pahalı bir yöntemdir. Bu sebeple, bu çalışmaların büyük bir kısmı Türkiye Meteoroloji Servisinin gerçekleştirdiği yerden 10 metre yükseklikteki uzun dönemli bir saatlik ortalama rüzgâr hızı ve yönü verilerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar dışında 10 dakikalık ortalama verilerinin kullanıldığı çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar bu veri setlerinin istatistiksel analizi neticesinde elde edilen Weibull olasılık yoğunluk dağılımı parametrelerini sunmuştur. Ayrıca bazı çalışmalarda bu veri setlerine dayanan rüzgârdan enerji üretimi miktarları sunulmuştur.

İncecik ve Erdoğan (İncecik ve Erdoğan, 1994) Weibull dağılımını göz önünde bulundurarak, Anadolu'nun batı kıyısındaki rüzgâr gücünün değişimini kısaca açıklamışlardır. Ortalama aylık rüzgâr gücünün en yüksek değerini 10 metre yükseklikte Şubat ayı için 562 W/m^2 olarak bildirmişlerdir. Buna ek olarak Bozcaada, Gökçeada, Bodrum, Çanakkale ve Ayvalık'ın diğer bölgelere kıyasla daha yüksek enerji potansiyeli sunduğunu söylemişlerdir. Çalışmaları Türkiye Meteoroloji Servisinden alınan verilere dayanmaktadır. Şen ve Şahin (Şen ve Şahin, 1997), Ege Denizi kıyı kesimi boyunca rüzgâr enerjisi potansiyelini, bölgesel değişkenliği göz önüne alarak ve kümülatif semivariogram (CSV) modelleri kullanarak araştırmışlardır. Bu tekniğin kullanılma amacı, herhangi bir yöndeki bölgesel değişimler hakkında ipuçları sağlamasıdır. Türkiye'nin batı kısmındaki toplam 8 adet rüzgâr hızı ölçüm istasyonundan alınan verileri kullanmışlardır. İlk olarak kümülatif semivariogram tekniği ile parametreleri bölgeselleştirmişler ve daha sonra farklı aylar için standart bölgesel bağımlılık fonksiyonları elde etmişlerdir.

Çizelge 3.1. Türkiye'nin rüzgâr potansiyelini belirlemek amacı ile yapılan akademik çalışmalar.

Yazarlar	Yer	Rakım	Anemometre Yüksekliği	Yıl / Veri Zaman aralığı	Weibull parametreleri k / A (m/s)	Yıllık ortalama hız (m/s)/ Güç yoğunluğu (W/m ²)
(İncecik ve Erdoğan, 1995)	Ayvalık Bodrum Bozcaada Çanakkale Dikili Edremit Gökçeada İzmir	-	13,8 10 10 10 10 12 7,45 12	1979-1983/1 sa. 1980-1982/1 sa. 1979-1983/1 sa. 1979-1983/1 sa. 1979-1983/1 sa. 1979-1983/1 sa. 1980-1982/1 sa.	1,57/3,74 (@ 10 m) 1,49/4,52 (@ 10 m) 2,02/7,15 (@ 10 m) 1,78/4,63 (@ 10 m) 1,73/2,76 (@ 10 m) 1,73/2,73 (@ 10 m) 1,70/4,67 (@ 10 m) 2,13/4,11 (@ 10 m)	3,29 / 59,3 (@ 10 m) 4,1 / 114,7 (@ 10 m) 6,36 / 319,5 (@ 10 m) 4,13 / 93,5 (@ 10 m) 2,5 / 20,5 (@ 10 m) 2,44 / 19,8 (@ 10 m) 4,14 / 112,8 (@ 10 m) 3,65 / 53,4 (@ 10 m)
(Durak ve Şen, 2002)	Akhisar	94	-	1997-1998 / 10 dak.	1,73 / 6,8	5,8 / 308
(Karlı ve Geçit, 2003)	Nurdağı	498	10	1995 / 1 sa.	1,38 / 8 (@ 10 m)	7,3 / 222 (@ 10 m)
(Bilgili ve diğerleri, 2004)	Antakya İskenderun	100 4	10 17	1997 – 2001/1 sa.	1,97 / 5,9 (@ 25 m) 0,99 / 3,4 (@ 25 m)	5,2 / 167 (@ 25 m) 3,4 / 149 (@ 25 m)
(Şahin ve diğerleri, 2005)	Antakya İskenderun Karataş Yumurtalık Dörtöl Samandağ Adana	100 4 22 27 28 4 28	10 17 10 10 10 10 8	1997-2001/1 sa.	1,7/3,1 1,21/2,7 1,94/3,1 1,27/2,1 1,34/1,1 2,18/4,6 0,98/0,9	2,8 / 29 2,6 / 37 2,7 / 25 1,9 / 15 0,9 / 2 4 / 71 0,8 / 3
(Özerdem ve diğerleri, 2006)	Urla	460	10/30	2000-2003/1 sa. & 10 dak.	2,05/8,9 (@ 30 m)	7,9 / - (@ 30 m)
Özgür ve Köse, 2006	Kütahya	1100	10/30	2001-2004/10 dak.	1,58/5,36 (@ 30 m)	4,27 / 140,75 (@ 10 m)
(Gökçek ve diğerleri, 2007)	Kırklareli		10	2004/ 1 sa.	1,75/5,25 (@ 10 m)	4,68 / 138,85 (@ 10 m)
(Eskin ve diğerleri, 2008)	Aydıncık Uğurlu Çınaraltı NWS	25 35 250 71	10/30	1994 – 2002/10 dak. 1991 – 1994/10 dak. 1992 – 1994/10 dak. 1979–89 / 1991–93 /10 dak.	1,94/9,81 (@ 50 m) 1,34/9,1 (@ 50 m) 1,3/10,4 (@ 50 m) 1,68/7,4 (@ 50 m)	8,89 / 868 (@ 50 m) 8,3 / 1155 (@ 50 m) 9,7/- (@ 50 m) 6,6 / 415 (@ 50 m)
(Ucar ve Balo, 2009)	Bursa	1877	10	2000-2006/1 sa.	1,78 / 7,97	7,08 / -
(Bilgili ve Şahin, 2009)	Datça Foça Söke Belen Gelendost	-	10	2001 2001 2001 2005 2001	1,71 / 6,31 2,28 / 6,47 1,69 / 4,59 2,01 / 7,87 1,43 / 5,56	5,63 / 248 5,73 / 195 4,1 / 97 6,97 / 394 5,05 / 230
(Genç ve Gökçek, 2009)	Kayseri Develi Pınarbaşı Tomarza Sarız	1093 1180 1500 1347 1500	10	2000-2006/1 sa.	1,16/1,72 (@ 10 m) 1,88/2,97 (@ 10 m) 1,49/4,09 (@ 10 m) 1,2/2,42 (@ 10 m) 1,26/1,87 (@ 10 m)	1,6 / - (@ 10 m) 2,59 / - (@ 10 m) 3,66 / - (@ 10 m) 2,24 / - (@ 10 m) 1,68 / - (@ 10 m)

Çizelge 3.1. Türkiye'nin rüzgâr potansiyelini belirlemek amacı ile yapılan akademik çalışmalar (devam).

Yazarlar	Yer	Rakım	Anemometre Yüksekliği	Yıl / Veri Zaman aralığı	Weibull parametreleri k / A (m/s)	Yıllık ortalama hız (m/s)/ Güç yoğunluğu (W/m^2)
(Uçar ve Balo, 2010)	Çanakkale Balıkesir İstanbul Tekirdağ İzmir Muğla Antakya Mersin Antalya Sinop Bartın Ordu	3 101 91 3 25 646 85 6 43 32 25 10	10	- / 1 sa.	1,82 / 5,46 1,82 / 8,34 1,8 / 3,4 1,86 / 4,1 1,85 / 4,04 1,81 / 3 1,54 / 3,93 1,74 / 3,32 1,82 / 3,48 1,79 / 4,28 1,78 / 2,52 1,84 / 2,58	-/179 -/647,5 -/42,18 -/74,20 -/74,02 -/28,11 -/85,77 -/40,64 -/41,29 -/75,06 -/17,70 -/18,49
(Özgener, 2010)	Muradiye	-	10/20/30	2006 -2007 / 1 sa.	-	2,45 / 19,78 (@ 10 m)
(Çelik, 2011)	Bozcaada Çanakkale	-	10	2000–2005 / 1 sa.	1,61 / 8,07 1,66 / 4,85	-/354 -/139
(Onat ve Ersöz, 2011)	Samandağ Amasra Güney	4 73 825	10	2006–2008 / 1 sa.	-	5,27 / 143 (@ 10 m) 5,2 / 232 (@ 10 m) 4,72 / 140 (@ 10 m)
(Akpınar, 2013)	Sinop Samsun Ordu Giresun Trabzon Hopa	192 6 5 38 25 33	10	(2001-2003/3 sa. 2004-2009/1 sa.) 1991-1999/3 sa. (2001-2003/3 sa. 2004-2009/1 sa.) (2001-2003/3 sa. 2004-2009/1 sa.) 2001-2009/3 sa. 2001-2009/1 sa.	1,47/3,4 (@ 10 m) 1,76/3,28 (@ 10 m) 1,22/2,08 (@ 10 m) 1,47/2,1 (@ 10 m) 1,52/3,35 (@ 10 m) 1,15/2,99 (@ 10 m)	2,85 / 59,9 (@ 10 m) 2,78 / 32,9 (@ 10 m) 1,76 / 12,9 (@ 10 m) 1,72 / 32,6 (@ 10 m) 2,81 / 41,9 (@ 10 m) 2,46 / 42,3 (@ 10 m)
(Yanıktepe ve diğerleri, 2013)	Osmaniye	120	10	2008–2011 / 1 sa.	(1-1,04)/(1.59-1.66) (@ 10 m)	2,23 / 24,58 (@ 10 m)
(Küçükali ve Dinçkal, 2014)	İzmit	77	20/35/50	2008–2009/10 dak.	2,03/6,73 (@ 50 m)	6 / - (@ 50 m)
(Bilir ve diğerleri, 2015)	Ankara	-	20/30	2012 – 2013/1 dak.	~1,6/~3,7 (@ 30 m)	3,32 / 51,28 (@ 30 m)
(Özay ve Çeliktaş, 2016)	Alaçatı	195	30/50/70	2008–2014/ 10 dak.	2,05/9,16 (@ 70 m)	8,1 / - (@ 70 m)

Öztopal ve diğerleri (Öztopal vd., 2000) yerel ve bölgesel yorumlarla Türkiye için elde edilen rüzgâr hızı, topografya ve rüzgâr enerjisi değişim haritalarını vermişlerdir. Türkiye'deki potansiyel rüzgâr enerjisi alanlarının kuzeybatı ve kuzey kısımlarında ve Ege Denizi kıyısındaki yerlerde bulunduğunu belirtmişlerdir. Diğer potansiyel alanların Orta Karadeniz Bölgesi ve Doğu Akdeniz Bölgeleri boyunca bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu deniz kıyısı bölgeler dışında, iç bölgeler arasında, Güneydoğu Anadolu'daki Diyarbakır bölgesinin potansiyel bir alan sağladığını belirtmişlerdir. Şen (2001), rüzgâr hızları ve topografya ile ilgili bölgesel değerlendirmeler yapmak için Nokta Kümülatif Yarı Variogram (PCSV) kavramını uygulamıştır. Türkiye'deki 35 rüzgâr hızı ölçüm sahası için elde edilen sonuçlar yerel yorumlar ve tartışmalarla ayrıntılı olarak sunulmuştur. Uygulama, Türkiye'deki rüzgâr hızlarının bölgesel olarak heterojen olduğunu ve beş kategoriye ayrıldığını ortaya koymuştur. Durak ve Şen (Durak ve Şen, 2002), Türkiye'nin

doğusundaki Akhisar bölgesi için rüzgâr enerjisi araştırması yürütmüşlerdir. WAsP yazılımının kullanılması ile 20 adet 600 kW'lık rüzgâr türbinleri ile yıllık en az 31.436 MWh elektrik enerjisi elde edilebileceğini söylemişlerdir. Karslı ve Geçit (Karslı ve Geçit, 2003), Türkiye'nin güneyindeki Nurdağı/Gaziantep ilçesinin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi için bir çalışma yürütmüşlerdir. Türk Elektrik Gücü Kaynaklar İdaresi Başkanlığından alınan verilere göre 10 m yükseklikteki ortalama rüzgâr hızının 7,3 m/s olduğunu söylemişlerdir. Ortalama güç yoğunluğu ise 222 W/m² olarak raporlanmıştır. Şahin (Şahin, 2003), Türkiye için 10, 12, 15 ve 20 m/s üzerindeki rüzgâr hızı aşma haritalarını oluşturmuştur. Bu haritalara göre, özellikle Türkiye'nin batı bölgesi ve kıyı alanları yapısal durağanlık ve rüzgâr erozyonu açısından riskli yerler olarak görülmüştür. Çalışmalarında Türkiye'nin dört bir yanından 68 ana iklim istasyonu verisi kullanılmıştır. Özerdem ve Türkeli (Özerdem ve Türkeli, 2003), Ege Denizi boyunca uzun kıyı şeridine sahip Çeşme yarımadasında bulunan İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kampüsü'ndeki rüzgârın özelliklerini bir yıl boyunca incelemişlerdir. 10 ve 30 metre yükseklikten toplanan veri setinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlara göre, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kampüs alanının önemli bir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Köse ve arkadaşları (Köse vd., 2004) Kütahya'nın rüzgâr enerjisi potansiyeli hakkında bir inceleme yapmışlardır. Bu nedenle, Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüsü'nde rüzgâr verisi toplamak için bir rüzgâr gözlem istasyonu kurmuşlardır. Rüzgâr hızı ve yönü, ölçüm direklerinin 10 ve 30 metrede 20 ay boyunca ölçülmüştür. Toplanan veriler CALLaLOG 98 ve ALWIN yazılım programları ile değerlendirilmiştir. Rüzgâr enerjisi potansiyeli Weibull ve Rayleigh modellerine dayanılarak çalışılmıştır. Bilgili ve diğerleri (Bilgili vd., 2004), Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesi'nin bazı bölgelerindeki rüzgâr enerjisi kaynaklarının potansiyelini belirlemek ve rüzgâr gücünün değerlendirilmesi için araştırma yürütmüşlerdir. Bu amaçla 1997 ve 2001 yılları arasında Antakya ve İskenderun bölgelerinin meteoroloji istasyonlarından sağlanan saatlik rüzgâr verilerini kullanmışlar ve hâkim rüzgâr yönlerini, rüzgâr hızlarını, rüzgâr potansiyelini ve frekans dağılımlarını belirlemişlerdir. Sonuçlara göre, Antakya ve İskenderun'da ortalama enerji yoğunluğunun 50 metre yükseklikte 700 W/m²'den fazla olduğu bazı bölgeler bulunmaktadır. Hepbaşlı ve Özgener (Hepbaşlı ve Özgener, 2004), Ekim 2003 sonu itibarıyla Türkiye'deki rüzgâr enerjisi gelişimi, Türkiye elektrik piyasasının yeniden yapılandırılması ve rüzgâr enerjisi uygulamaları hakkında bir derleme sunmuşlardır. Türkiye için rüzgâr enerjisinin umut verici bir alternatif olduğunu ve Türk elektrik piyasasının yeniden yapılandırılmasının ardından, rüzgâr enerjisinin güçlü bir şekilde gelişmesinin beklendiğini göstermişlerdir. Özerdem ve Türkeli (Özerdem ve Türkeli, 2005), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kampüs alanı boyunca rüzgâr enerjisi üretim potansiyelini araştırmışlardır. Rüzgâr verilerini 16 aylık bir süre için 10 ve

30 metrelik yükseklikten toplamışlardır. Ortalama rüzgâr hızlarının sırasıyla 10 ve 30 metre yüksekliğinde 7,03 ve 8,14 m/s olduğunu söylemişlerdir. Rüzgâr istatistikleri ve enerji hesaplamaları için "WAsP" ve "WindPRO" yazılımları kullanmışlardır. Sırdaş (Sırdaş, 2005), Türkiye'nin Marmara Bölgesi'ndeki on farklı istasyonda kaydedilen günlük rüzgâr hızı değerlerini modellemek için harmonik analiz kullanmıştır. Marmara Bölgesi'nin batı ve doğu kısımlarının farklı rüzgâr desen özelliklerine sahip olduğunu söylemiştir. Özerdem ve diğerleri (Özerdem vd., 2006), rüzgâr çiftliklerinin teknik ve ekonomik fizibilitesi üzerine İzmir için bir araştırma yapmışlardır. Üç farklı senaryo için yaptıkları hesaplamaları, net bugünkü değer, iç karlılık oranı ve geri ödeme süresi açısından karşılaştırılmışlardır. Bağımsız güç üreticisi senaryosu için yaptıkları hesaplamalarda birim enerji maliyetini 0,0268 \$/kWh olarak bulmuşlardır. Gökçek ve diğerleri (Gökçek vd., 2007), Marmara Bölgesi'ndeki Kırklareli ilinin rüzgâr özelliklerini ve rüzgâr enerjisi potansiyelini, saatlik ortalamaları içeren rüzgâr veri setlerini dikkate alarak analiz etmişlerdir. Çalışmada kullanılan bir yıllık rüzgâr verisini Elektrik Gücü Kaynakları Araştırma ve Geliştirme İdaresinden (EIEİ) almışlardır. Ölçülen rüzgâr verisini yıllık, mevsimsel ve aylık olarak işlemişlerdir. Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarının parametrelerini araştırmışlar ve Weibull şekil parametresi ve ölçek parametresini sırası ile 1,75 ve 5,25 m/s olarak bulmuşlardır. Weibull fonksiyonuna dayalı yıllık ortalama güç yoğunluğunu $138,85 \text{ W/m}^2$ olarak vermişlerdir. Eskin ve diğerleri (Eskin vd., 2008), Kuzey Ege Denizi'ndeki Gökçeada'nın rüzgar enerjisi potansiyelini, dört farklı noktada toplanan rüzgâr verilerini kullanarak hesaplamışlardır. 10 ve 30 metre yükseklikte toplanan rüzgâr verilerini güç yasası kullanılması ile 50 metre yükseklik için genişletmişlerdir. Rüzgâr hızı dağılım eğrilerini bulmak için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu parametrelerini belirlemişlerdir. Gökçek ve Genç (Gökçek ve Genç, 2009), Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'ndeki yedi farklı bölge için seviyelendirilmiş elektrik maliyeti yöntemini kullanarak çeşitli nominal güç kapasitesine sahip rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin değerlendirmesini yapmışlardır. 2000-2006 yılları arası için toplanan rüzgâr hızı verilerini Türkiye Meteoroloji Servisinden almışlardır. Uçar ve Balo (Uçar ve Balo, 2009), Türkiye'nin Güney Marmara Bölgesi'nde bulunan Uludağ'ın rüzgâr karakteristiği ve rüzgâr enerjisi potansiyelini 2000-2006 döneminde toplanan rüzgâr hızı verilerinin kullanılması ile analiz etmişlerdir. Rüzgâr hızı dağılım eğrilerini Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonlarını kullanarak elde etmişlerdir. Weibull şekil parametresini k ve ölçek parametresi A , 2000–2006 dönemi için 1,78 ve 7,97 m/s olarak bulmuşlardır. Yıllık ortalama rüzgâr hızını 7 yıl için 7,08 m/s olarak elde etmişlerdir. Seçilen rüzgâr türbinleri için yapılan maliyet hesaplarına göre birim kWh başına maliyeti 0,255 ile 0,306 \$/kW aralığında bulmuşlardır. Akdağ ve Güler (Akdağ ve Güler, 2010), Türkiye'deki yeni rüzgâr santrali lisans başvurularını

analiz etmişlerdir. Son olarak, Türkiye'deki 14 farklı noktada rüzgâr elektrik üretimi maliyet analizleri gerçekleştirmişlerdir. İncelenen bölgelerin kapasite faktörlerini %19,7 ile %56,8 aralığında hesaplamışlardır. Ayrıca birim kWh başına maliyeti iki farklı rüzgâr makas katsayısı için 0,0173 ile 0,0499 \$/kWh aralığında bulmuşlardır. Özgener (Özgener, 2010), Celal Bayar Üniversitesi Muradiye Kampüsü'nün rüzgâr enerjisi potansiyelini araştırmıştır. 2006 ve 2007 yılları arasında yaptığı deneysel çalışmalara göre 30 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızını 3,21 m/s, Enercon E48 (800 kW) rüzgâr türbini için kapasite faktörünü %14,1 olarak hesaplamıştır. Onat ve Ersöz (Onat ve Ersöz, 2011), Türkiye'deki üç farklı bölgenin rüzgâr iklim özelliklerini ve enerji potansiyelini incelemişlerdir. Bu bölgelerdeki rüzgârın özelliklerini belirlemek için MATLAB-Simulink yazılımı altında kurulan beş katlı Sugeno tipi ANFIS modelini kullanmışlar ve rüzgâr hızı ile diğer iklim değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir. Ayrıca rüzgâr hızı verilerini kullanarak rüzgâr enerjisi potansiyel analizlerini yapmak için WASP yazılımını kullanmışlardır. Akpınar (Akpınar, 2013), Türkiye'nin kuzeydoğusundaki kıyı bölgeleri boyunca rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Türkiye'nin kuzeydoğu kıyı bölgesi boyunca altı meteoroloji istasyonundan (Sinop, Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon ve Hopa) toplanan verileri kullanarak, rüzgâr gücü potansiyellerini ve rüzgâr karakteristiklerini istatistiksel olarak analiz etmiştir. Yanıktepe ve diğerleri (Yanıktepe vd., 2013), Akdeniz Bölgesi'nin doğusunda bulunan Osmaniye ilinde rüzgar hızlarının dağılımı ve rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. Rüzgâr hızı ve yönünün bir saatlik ortalamalarını içeren ve 10 m yükseklikten toplanan rüzgâr verileri, Türkiye Meteoroloji Servisi tarafından Ocak 2008 ve Ağustos 2011 aralığında toplanmıştır. Verilen sonuçlara göre Weibull şekil parametresinin ortalama yıllık değerinin 1,00 ile 1,04 arasında değişirken, ölçek parametresinin yıllık değeri 1,59 ile 1,66 m/s aralığında değiştiğini söylemişlerdir. Ayrıca ortalama rüzgâr hızı ve rüzgâr güç yoğunluğunu sırası ile 2,23 m/s ve 24,587 W/m² olarak vermişlerdir. Küçükali ve Dinçkal (Küçükali ve Dinçkal, 2014), Türkiye'nin Batı Karadeniz Kıyı Bölgesi'nde yer alan İzmit'in rüzgâr enerjisi potansiyelini 50 metre yükseklikteki ölçüm direğinden toplanan rüzgâr verilerinin istatistiksel analizi ile değerlendirmişlerdir. Yıllık ortalama rüzgâr hızını 6 m/s olarak vermişlerdir. Weibull dağılım fonksiyonunun şekil ve ölçek faktörünün parametrelerini sırasıyla 2,03 ve 6,73 m/s olarak bulmuşlardır. Ölçülen rüzgâr hızı verilerini, yakındaki meteoroloji istasyonlarının verileriyle karşılaştırmışlar ve veriler arasında önemli farklar olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca, bir türbülans analizi gerçekleştirmişlerdir ve 50 metre yükseklikteki ortalama türbülans yoğunluğunu 0,116 olarak bulmuşlardır. Üç farklı rüzgâr türbini için enerji üretimi performanslarını araştırmışlardır ve kapasite faktörünün türbin modeline bağlı olarak %17 ile % 34 aralığında değiştiğini söylemişlerdir. İlkılıç ve Aydın (İlkılıç ve Aydın,

2015), Türkiye'nin kıyı bölgelerinde rüzgâr enerjisi potansiyelini incelemişlerdir. Kullanılan rüzgâr verilerini, Türkiye Elektrik Gücü Kaynakları Araştırma ve Geliştirme Dairesinden almışlardır. Rüzgâr yoğunluğu değerlerine göre İstanbul, İzmir, Datça, Bandırma, Antakya, Çanakkale ve Hatay bölgelerinin rüzgâr enerjisi sistemleri için en çok umut veren alanlar olduğunu söylemişlerdir. Bilir ve diğerleri (Bilir vd, 2015), Atılım Üniversitesi Kampüsü'nün yer aldığı Ankara ilinin İncek bölgesinde Weibull parametrelerini kullanarak rüzgâr hızı karakterizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Bir ölçüm istasyonundan 20 m ve 30 m yükseklikte Haziran 2012 ile Haziran 2013 arasında 1 dakikalık ortalama değerler halinde rüzgâr verilerini toplamışlardır. Maksimum güç yoğunluğunun Mart ayında yaklaşık olarak 98 W/m^2 olduğunu söylemişlerdir. Özey ve Çeliktaş (2016), Türkiye'nin İzmir ilindeki Çeşme ilçesinde bulunan Alaçatı yöresinin rüzgâr karakteristiklerini analiz etmek için Weibull istatistik dağılımını kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan rüzgâr verilerini Alaçatı'daki bir rüzgâr ölçüm istasyonundan elde etmişlerdir. Verileri beş buçuk yıl boyunca 10 dakikalık aralıklarla 30, 50 ve 70 metre yükseklikten toplamışlardır. Ortalama rüzgâr hızını 8,11 m/s olarak vermişler ve Weibull şekil ve ölçek parametresini sırası ile 2,05 ve 9,16 m/s olarak hesaplamışlardır.

Görüldüğü üzere özellikle 1990'ların sonlarında yayınlanan öncü çalışmalar ile başlayan Türkiye'nin rüzgâr potansiyelini belirleme çalışmaları genellikle Türkiye Meteoroloji Servisi veya Elektrik Gücü Kaynakları Araştırma ve Geliştirme İdaresinden alınan 1 saat ortalamalı olarak 10 metre yükseklikten toplanan çalışmalara dayanmaktadır. Bu sebeple rüzgârın kısa süreli dinamik karakteristiği hakkında önemli bilgiler sunan rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı rampası hakkındaki veriler çok nadirdir. Çalışmaların odak noktası, genellikle rüzgâr hızı dağılımının Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile karakterize edilmesine ve farklı türbin tipleri için enerji üretimi ve maliyetlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Türkiye için yapılan çalışmaların yanında dünyadaki benzer çalışmaları da araştırmak faydalı olacaktır.

Son yıllarda dünyanın her yerinde rüzgâr enerjisinin fizibilitesi hakkında birçok bilimsel araştırma yayınlanmıştır. Ullah ve Chipperfield (Ullah ve Chipperfield, 2010), Güneydoğu Pakistan'ın rüzgâr enerjisi üretim potansiyelini değerlendirmişlerdir. Yaptıkları hesaplamalar bir yıllık bir süre boyunca ölçülen rüzgâr hızı verilerine dayanmaktadır. Analizler rüzgâr karakteristiklerinin yoğunluk dağılımlarını, mevsimsel değişimlerini ve rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplarını içermektedir. İncelenen bölge için 50 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızını 7,16 m/s ve güç yoğunluğunu 414 W/m^2 olarak vermişlerdir. Ouammi ve diğerleri (Ouammi vd., 2010), İtalya'nın Kuzeybatısındaki Capo Vado'da, Liguria bölgesindeki dört meteoroloji istasyonu için 2002-2008 yılları arasında toplanan rüzgâr hızı verilerini kullanarak rüzgâr karakteristiklerinin aylık ve mevsimsel değişimlerini incelemişlerdir. Elde ettikleri

sonuçlara göre Capo Vado'nun aylık ortalama rüzgâr hızının 10 m yükseklikte 2,80 ile 9,98 m/s arasında değiştiğini söylemişlerdir. Mostafaeipour (Mostafaeipour, 2010), İran'ın orta kesiminde bulunan Yazd ilindeki bazı büyük şehirlerin rüzgâr hızını analiz etmiştir. Bu çalışmada, 1992 ile 2005 arasında 11 istasyondan toplanan yaklaşık 13 yıllık rüzgâr hızı verisini kullanmıştır. 10 metrelik verilerin ekstrapolasyonu ile rüzgâr verilerini 20 ve 40 metre yüksekliklerine genişletmiştir. Sonuç kısmında, istasyonların çoğunun, rüzgâr türbinlerinin kurulumu için kabul edilemez bir değer olduğu düşünülen 4,5 m / s'den daha az yıllık ortalama rüzgâr hızına sahip olduğunu söylemiştir. Herat şehri için 10 m ve 40 m yükseklikte yıllık rüzgâr hızı ortalamasını sırası ile 5,05 m / s ve 6,86 m / s olarak vermiştir. Fakat bu verilerin 1 yıllık olduğu düşünülürse kesin bir kanıya varmadan önce daha uzun süreli veri analiz yapmanın faydalı olacağını söylemiştir. Saleh ve diğerleri (Saleh vd., 2012), Mısır'daki Zafarana rüzgâr çiftliği için optimum rüzgâr çiftliğini tasarlamak için Weibull parametrelerini farklı yöntemlerle hesaplamıştır. Adaramola ve diğerleri (Adaramola vd., 2014), rüzgâr enerjisi potansiyelinin ve rüzgâr türbininin elektrik üretimi için Gana'nın kıyı bölgelerinde seçilmiş yerlerde kullanılmasının ekonomik uygulanabilirliğini 12 m yükseklikte araştırmıştır. Gana Enerji Komisyonundan elde edilen rüzgâr hızı verilerini analiz etmek için iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunu kullanmışlardır. 50 kW ile 250 kW arasında değişen nominal güçlerde, orta büyüklükteki ticari rüzgâr türbini modellerinden üretilen elektrik enerjisi ve birim maliyetini belirlemişlerdir. Boudia ve diğerleri (Boudia ve diğerleri, 2013), Cezayir Sahra'da bulunan dört farklı noktada bulunan meteoroloji istasyonlarından son on yılda toplanan rüzgâr hızı verilerini kullanarak rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından aylık, mevsimsel ve yıllık değişimi incelemişlerdir. Zhang ve arkadaşları (Zhang vd., 2014), bir sahadaki mevcut rüzgâr enerjisinin kalitesini değerlendirmek için rüzgâr enerjisi yoğunluğu yerine rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak adlandırılan yeni bir metnin kullanılmasını önermişlerdir. Rüzgâr koşullarının rastgele değişimini karakterize etmek için rüzgâr hızının ve yönünün ortak bir dağılımını kullanmışlardır. Kurulu kapasite için net enerji üretimini, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönünün farklı dağılımları için en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan sınırlandırılmamış rüzgâr çiftliği düzenleme optimizasyonu yapmışlardır. Carrasco-Díaz ve diğerleri (Carrasco-Díaz vd., 2015) Kuzeydoğu Meksika'da bulunan Tamaulipas sahili boyunca rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirmesini sunmuşlardır. Rüzgâr değişkenliğini tanımlamak ve uygun meteorolojik ölçümlerin mevcut olmadığı kıyı bölgelerindeki rüzgâr potansiyelini tahmin etmek için bir yöntem önermişlerdir. Rüzgâr Enerjisi Analizi ve Uygulama Programını (WAsP) kullanarak 50 metre yüksekliğindeki ortalama güç yoğunluğunu modellemişlerdir. Tamaulipas'ın güney yarısındaki rüzgâr enerjisi potansiyelini kıyıya yakın bazı bölgelerde 200–300 W/m² olarak sınıflandırmışlardır. Ülkenin sadece kuzey yarısının ortalama

güç yoğunluğunu $400-500 \text{ W/m}^2$ olarak verirken, lagün bölgesinin iyi bir potansiyele sahip olduğunu da söylemişlerdir. Velo ve diğerleri (Velo vd.,2014), kısa vadeli rüzgâr verisine bağlı olarak yıllık ortalama rüzgâr hızını hesaplamak için nöral ağ yöntemine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Araştırılan alanın yalnızca kısa süreli verilerin varlığında yıllık ortalama rüzgâr hızını belirlemek için yapay sinir ağı metodunu kullanan bir yöntem sunmuşlardır. Tizpar ve diğerleri (Tizpar vd., 2014), İran'ın Mil-E Nader bölgesindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini, 10 dakikalık kısa vadeli rüzgâr verisine dayanan istatistiksel analizlerle incelemişlerdir. Weibull parametrelerini 40 metre yükseklik için tahmin etmişler ve rüzgâr verilerinin dağılımını tanımlamak için kullanmışlardır. Ek olarak, günlük ve aylık rüzgâr hızı değişimlerini hesaplamışlardır. Solyali ve diğerleri (Solyali vd., 2016), Kuzey Kıbrıs'taki Selvitepe bölgesi için rüzgar enerji potansiyelinin teknik bir değerlendirmesini sunmuşlardır. Rüzgâr hızı verileri, 2007 ve 2014 yılları arasındaki 10 dakikalık ortalamaları temsil etmektedir. Verilerin istatistiksel analizi için maksimum olasılık, en küçük kareler ve WASP olarak adlandırılan 3 farklı algoritma kullanarak Weibull dağılım parametrelerini belirlemişlerdir. Rüzgâr hızı verilerinin standart sapma değerlerinin kullanılması ile, bu bölgenin türbülans kategorisini hesaplamışlardır. Ayrıca makas profili ve yüzey pürüzlülüğünü de analiz etmişlerdir. Khahro ve diğerleri (Khahro vd., 2014), Pakistan'daki Babaurband'ın rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için bir istatistiksel analiz kullanmışlar ve Weibull parametrelerini belirlemişlerdir. Weibull ölçek ve şekil parametrelerini hesaplamak için 5 farklı sayısal yöntem kullanmışlardır. 80 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızını, $6,712 \text{ m/s}$ olarak vermişlerdir. Ayrıca yıllık ortalama rüzgâr gücü yoğunluğunu 310 W/m^2 olarak hesaplamışlardır. Rüzgârdan elde edilen kWh elektrik başına tahmini birim maliyetini $0,0263 \text{ \$/kWh}$ olarak hesaplamışlardır. Shu ve diğerleri (Shu vd., 2015), Hong Kong'un rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için farklı bölgelerdeki rüzgar özelliklerini araştırmışlardır. Tipik arazi koşullarına göre rüzgâr karakteristikleri ve rüzgâr enerjisi potansiyelini istatistiksel olarak değerlendirmişlerdir. Ölçülen rüzgâr hızı verilerinin Weibull dağılımı fonksiyonu ile iyi uyum sağladığını söylemişlerdir. Tepeleri ve açık deniz adalarını, Hong Kong'daki rüzgâr enerjisi gelişimi için umut verici alanlar olarak tanımlamışlardır. Wang ve diğerleri (Wang vd., 2016), Çin'deki dört farklı bölgede rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Boudia ve Guerri (Boudia ve Guerri, 2015), Cezayir'deki Oran'ın rüzgâr gücü potansiyelini araştırmak için Oran meteoroloji istasyonundan toplanan on yıllık rüzgâr verilerini kullanmışlardır. WASP programını, en rüzgârlı bölgeleri bulmak ve bölgenin rüzgâr atlasını analiz etmek için kullanmışlardır. Üç adet rüzgârlı bölgenin rüzgâr potansiyelini irdelemişlerdir. Altı farklı rüzgâr türbin modelini kullanarak üretilen elektrik gücü başına rüzgâr gücü maliyetini değerlendirmişlerdir. Nouri ve diğerleri (Nouri vd., 2016), Fas'ta

iki farklı bölgede bir rüzgâr çiftliği potansiyelinin teknik fizibilitesini incelemişlerdir. Yaptıkları analizler, 30, 50 ve 60 metrelik yüksekliklerde iki direk tarafından toplanan gerçek rüzgâr verilerine dayanmaktadır. Rüzgâr potansiyelini gösteren bölgeler bulmuşlar ve rüzgâr santrali türbin konumlarını WAsP yazılımını kullanarak optimize etmişlerdir. Aukitino ve diğerleri (Aukitino vd., 2017), Kiribati'de iki yerde rüzgâr enerjisi kaynağı değerlendirmelerini Weibull parametrelerini belirlemek için farklı yöntemlerle karşılaştırarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca rüzgâr makas katsayısı ve türbülans yoğunluğu değerlerini hesaplamışlardır.

Bu çalışmalarda görüldüğü gibi, araştırmacılar dünyanın hemen hemen her bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek için araştırmalar yürütmüştür. Bu çalışmalarda da meteorolojik istasyonlardan alınan veriler kullanılmıştır fakat bu verilerin doğruluğuna temkinli yaklaşmıştır. Verilerin doğruluğunu test etmek ve kanıtlamak için rüzgâr verisi belirsizliği araştırmaları yapılmış (Kwon 2010; Jung vd., 2013; Amirinia vd., 2017; Amirinia vd., 2017) ve farklı anemometrelerin verilerinin ilişki seviyeleri kontrol edilmiştir. Ölçüm noktalarının büyük bir alan üzerinde tek bir noktanın rüzgâr iklimini temsil etmesi geniş alanlar üzerinde uygun yerlerin bulunması önünde önemli bir kısıtlamadır. Rüzgâr ölçüm istasyonlarının kurulum maliyetlerinin yüksek olması da araştırmacıların önündeki engellerdendir. Bu sebeple WAsP yazılımı gibi seçilen bir alan üzerinde orografik yapıyı göz önüne alarak yatay yönde rüzgâr verisini yeterli düzeyde hata oranı ile genişleten yazılımların kullanımı yaygındır. Rüzgâr ikliminin dinamik karakteristiği hakkında yapılan araştırmaların sayısı da artmıştır.

1994 yılında Mosetti ve diğerleri (Mosetti vd., 1994), rüzgar santralleri konumlandırma probleminin algoritma yardımı ile çözümlenmesi üzerine yaptıkları bu araştırma alanı için öncül olarak tanımlanırılabilir çalışmaları yayınlamışlardır. Belirli bir sahadaki rüzgâr türbini dağılımını, minimum kurulum maliyetleri için maksimum enerjiyi yakalamak için optimize etmişlerdir. Uyguladıkları optimizasyon işlemi genetik bir algoritma ile iz bölgesi etkilerinin süperpozisyonuna dayanan bir rüzgâr çiftliği simülasyon modelinin ilişkilendirmesine dayanmaktadır. Özetlenecek olursa, bir test vakası olarak, 100 kare hücreye bölünmüş bir düz kare alanı, üç farklı rüzgâr modeli ve özdeş türbin kullanımı ile türbin konumlarını optimize etmişlerdir. Bu problem, bu tez çalışmasında olduğu gibi, birçok araştırmacı tarafından yıllar boyunca çalışılmıştır. Bu problemin detayları bu tezin daha sonraki bölümlerinde detaylı olarak anlatılmıştır. Bu çalışmadan sonra yaklaşık 10 yıl kadar kayda değer bir çalışma yapılmamıştır. 2000'lerin başında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve rüzgâr türbin teknolojisinin gelişmesi ile bu araştırma alanı birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Grady ve diğerleri (Grady vd., 2005), en yüksek üretim kapasitesi için rüzgâr türbinlerinin en uygun şekilde yerleştirilmesini sağlamak için bir tür genetik algoritma yaklaşımı uygulamışlardır. Problem

yapısı olarak Mosetti ve diğerleri (Mosetti vd., 1994) tarafından oluşturulan modelleri kullanmışlardır ve sonuçlarını yine bu çalışma ile karşılaştırmışlardır. Changsui ve diğerleri (Changsui vd., 2011), Jensen iz bölgesi modeline dayanan rüzgâr türbini konumlandırma probleminin “alt modüler” özelliğini açıklamışlardır. Türbin yerleşimi optimizasyonunu gerçekleştirmek için “tembel ağgözlü algoritma modeli” kullanmışlardır. Klasik problem üzerinde çalışmışlardır ve bu modelin önceki araştırmalara kıyasla daha az sürelerde daha iyi çözüm elde ettiğini söylemişlerdir. Modelin uygulama kapsamını genişletmek için, iz bölgesi modelini büyük ölçekli karmaşık araziye uygulanacak şekilde genişletmişlerdir. Diğer algoritma modellerini karmaşık arazinin simülasyonu ile test etmişlerdir. Sonuçlarına göre mevcut yöntemin daha üstün performans gösterdiğini söylemişlerdir. Gao ve diğerleri (Gao vd., 2015), rüzgâr türbini konumlandırma optimizasyonu için bir çoklu popülasyon genetik algoritması (MPGA) önermişlerdir. Algoritma modelleri minimum yatırım maliyetinde maksimum gücü elde etmeyi amaçlamıştır. Klasik problemin çözümü için yapılan hesaplamalar neticesinde önceki çalışmalara kıyasla önerilen modelin etkin bir şekilde çalıştığını söylemişlerdir. Buna ek olarak, Hong Kong için bir deniz üstü rüzgâr çiftliğinde MPGA modelini kullanarak rüzgâr türbini konumlandırma optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 20 yıllık rüzgâr verisine dayanan bir rüzgâr modeli kullanmışlardır. Montoya ve diğerleri (Montoya vd., 2014), farklı rüzgâr türbini modellerinin kombinasyonunu ve farklı zaman aralıklarına göre dağıtılan rüzgar hızlarının kombinasyonunu içeren çok amaçlı evrimsel algoritmaların (MOEA) kullanımını açıklamışlardır. SPEA2 NSGAI, PESA ve msPEA gibi yaygın olarak kullanılan çok amaçlı evrimsel MOEA algoritmaları, 2008 yılı boyunca Cancun'dan (Meksika) toplanan verilere göre araştırmışlar, test etmişler ve karşılaştırmışlardır. Bu modeller arasında, PESA algoritmasının performansının diğer üç algortmadan biraz daha üstün olduğunu söylemişlerdir. Chen ve diğerleri (Chen vd., 2016), rüzgâr türbini konumlandırma optimizasyonunu ağgözlü algoritma kullanarak çoklu göbek yüksekliğine sahip rüzgâr türbinleri için çalıştırmışlardır. Lineer iz bölgesi modelini ve parçacık iz bölgesi modelini, düz arazi ve karmaşık arazi üzerinde sırasıyla iz bölgesi akış hesaplaması için kullanmışlardır. Üç boyutlu ağgözlü algoritmasını, birim güç çıkışı başına maliyeti en aza indirmek için kullanmışlardır. Sonuçları ise önerilen ağgözlü algoritmayı kullanarak genetik algortmaya kıyasla daha iyi sonuçlara daha düşük hesaplama maliyetleri ile ulaşıldığını göstermiştir. Ayrıca çok sayıda göbek yüksekliği seçeneğine sahip rüzgâr türbinlerinin kullanılmasının, özellikle karmaşık arazi üzerindeki rüzgâr çiftliği için toplam güç çıkışını arttırdığını ve birim güç çıkışı başına maliyeti önemli ölçüde azalttığını söylemişlerdir. Chen ve diğerleri (Chen vd., 2013), farklı göbek yüksekliğindeki rüzgâr türbinlerinin rüzgâr santrali güç çıkışına olan etkisini araştırmışlardır. Klasik rüzgâr santrali konumlandırma problemini iç içe

geçmiş genetik algoritma kullanarak analiz etmişler ve sonuçlarına göre farklı göbek yüksekliğinde rüzgâr türbinleri kullanan rüzgâr çiftliğinin güç çıkışının arttırılabileceğini göstermişlerdir. Eroğlu ve Seçkiner (Eroğlu ve Seçkiner, 2013), minimum iz bölgesi etkisi ve maksimum güç üretimine sahip bir rüzgâr çiftliğinin optimize edilmiş bir düzenini elde etmek için bir parçacık filtreleme yaklaşımı kullanmışlardır. Sonuçları, parçacık filtreleme yaklaşımının, literatürde bulunan karınca kolonisi ve evrimsel algoritmalar ile rekabet edebileceğini göstermektedir. Shakoor ve diğerleri (Shakoor vd., 2016), rüzgâr çiftliği şeklinin optimum boyutlarını bulmak için bir alan rotasyon yöntemi önermişlerdir. Çalışma güvenliğini sağlamak için bitişik türbinler arasında zorunlu alan sağlamışlar ve türbinleri maksimumda çalışacak şekilde yerleştirmek için Sabit Nokta Seçimi adlı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerinin amacı rüzgâr çiftliğinde sıfır iz bölgesi etkisi içeren noktaları tanımlamaktır. Önerdikleri yöntem, bir rüzgâr santralinin güç çıkışını önceki yöntemlerden daha etkili bir şekilde arttırdığını göstermiştir. Parada ve diğerleri (Parada vd., 2017), Gauss iz bölgesi modeline dayalı rüzgâr çiftliği konumlandırma optimizasyon problemini çözme yaklaşımı önermişlerdir. Gauss iz bölgesi modeli, iz bölgesi içinde homojen hız profilini kabul eden Jensen iz bölgesi modelinin aksine, hız bozukluklarını değerlendirmek için üstel bir fonksiyon kullanır. Önerdikleri yaklaşımın, çalışılan tüm rüzgâr senaryoları için daha yüksek yıllık enerji üretim ve daha düşük bir hesaplama süresi sağladığını söylemişlerdir. Daha karmaşık bir rüzgâr senaryosu altındaki iyileşmeyi ise nispeten daha az olarak raporlamışlardır. Bu sebep ile rüzgâr santrali konumlandırma probleminin çözümünde daha sağlam bir iz bölgesi modelinin kullanılmasının, gerçek rüzgâr durumlarında daha fazla verimliliğe yol açmayacağını söylemişlerdir. MirHassani ve Yarahmadi (MirHassani ve Yarahmadi, 2017), bir çiftlikte farklı göbek yükseklikteki rüzgâr türbinlerinin toplam güç üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı göbek yüksekliğindeki rüzgâr türbinlerini dikkate alarak iz bölgesi etkileri için etkileşim matrisi açısından tam bir matematiksel formülasyon sunmuşlar ve yeni bir karma tamsayı ikinci dereceden optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Ayrıca modellerini, rüzgâr karakteristiklerini ve belirsiz parametreleri içerecek şekilde genelleştirmişlerdir. Hesaplama sonuçları, neredeyse tüm durumlarda makul bir sürede yüksek kaliteli bir çözüme ulaşılabileceğini göstermektedir. Petkovic ve diğerleri (Petkovic vd., 2016), uyarlamalı bulanık mantık sinir ağını rüzgâr çiftliğindeki türbin sayısına göre rüzgâr çiftliği verimliliğini tahmin etmek üzere tasarlamış ve uyarlamışlardır. Bu hesaplama metodolojisini, MATLAB/Simulink kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Chowdhury ve diğerleri (Chowdhury vd., 2012), Sınırsız Rüzgar Çiftliği Düzenleme Optimizasyonu (UWFLO) adlı yeni bir metodoloji sunmuşlardır. Rüzgâr çiftliği enerji üretim modelini, küçültülmüş bir rüzgâr çiftliğindeki rüzgâr tüneli deneyinden elde edilen verilerle doğrulamışlardır. Parçacık Sürü

Optimizasyonunu (PSO) kullanarak yaptıkları hesaplamaları ile farklı rotor çaplarına sahip rüzgar türbinlerinin optimal bir kombinasyonunun santral verimliliğini önemli ölçüde artırabildiğini bulmuşlardır. Rahbari ve diğerleri (Rahbari vd., 2014), aday seçim yaklaşımıyla rüzgar santrallerindeki türbin konumlandırma probleminin tipik kısıtlama varsayımlarıyla ilgili zorlukları ele almışlardır. Bir başlangıç aday nokta seçimi yaklaşımı ile uygulanabilir bir hibrid evrimsel yöntemi önermişler ve maksimum verimlilik ile en iyi tasarımları elde etmek için dört vaka çalışması uygulamışlardır. Çalışmada iz bölgesi etkileri, türbin göbek yüksekliği ve rotor çapı gibi daha önce kullanılan göstergelere ek olarak, aynı zamanda toprak yük kapasitesi ve yasak yerler ile ilgili kısıtlamalar gibi ek kriterleri de dikkate almışlardır. Sonuçlar, önceki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen algoritma ile üstün performans elde edildiğini göstermektedir. Guirguis ve diğerleri (Guirguis vd., 2016), lineer olmayan matematiksel programlamanın, sürekli-değişken rüzgâr santrali konumlandırma problemlerinin çözümünde, problemin amacının ve kısıtlarının kesin gradyan bilgisini kullanarak etkinliğini araştırmışlardır. Önerilen matematiksel programlamanın üstünlüğünü ortaya çıkan rüzgâr santrali verimliliği ve gereken hesaplama maliyeti ile ortaya koymuşlardır. Song ve diğerleri (Song vd., 2015), karmaşık arazi modeli için rüzgâr türbini konumlandırma problemi üzerine tembel açgözlü algoritmanın performansını incelemişlerdir. İz bölgesi etkileri için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sanal parçacık iz bölgesi modeli kullanmışlardır. Tembel açgözlü algoritma tarafından kullanılan alt modüler özelliğinin geçerliliğini, rüzgâr santrali konumlandırma problemi için tartışmışlardır. Açgözlü algoritma modeli ve sanal parçacık iz bölgesi modelinin, karmaşık arazi üzerinde rüzgâr türbini konumlandırma optimizasyonunda etkili bir model oluşturduğunu söylemişlerdir. Song ve diğerleri (Song vd., 2016), rüzgâr türbinlerinin yerleşimini ve yüksekliklerini optimize ederek rüzgâr çiftliği güç çıkışının maksimize edilmesini araştırmışlardır. Rüzgâr çiftliği düzenini 3 boyutlu uzayda belirleyen bir model kullanmışlardır. İz bölgesi etkilerini modellemek için doğrusal bir 3 boyutlu iz bölgesi modeli kullanmışlardır. Evrimsel bir algoritma kullanarak gerçekleştirdikleri hesapları neticesinde, rüzgâr santrali güç çıkışının farklı yüksekliklere sahip rüzgâr türbinleri seçilerek artırılabilirliğini göstermişlerdir. Gao ve diğerleri (Gao vd., 2014), Hong Kong'daki açık deniz rüzgâr enerjisinin potansiyelini ve fizibilitesini rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonunu kullanarak araştırmışlardır. Deniz üstü rüzgâr çiftliği konumlarını, Hong Kong sularında insan yapımı faaliyetleri göz önünde bulundurarak seçmişlerdir. Maksimum enerji üretimiyle minimum enerji maliyeti (COE) elde etmeyi amaçlayan Çoklu Nüfus Genetik Algoritması (MPGA) kullanarak potansiyel rüzgâr santralinin konumlandırma işlemini bir saatlik ortalamalar ile kaydedilen on yıllık rüzgâr verisi kullanılması ile gerçekleştirmişlerdir. Feng ve Shen (Feng ve Shen, 2015), sürekli formülasyona dayalı bir

rastgele arama algoritması sunmuşlardır. Bu model, ilk olarak uygulanabilir bir düzen ile başlar ve daha sonra uygun bir çözüm alanı için düzenli olarak geliştirilir. Klasik problemin çözüm sonuçlarına göre önerilen metodolojinin daha önce uygulanan genetik algoritmalarla kıyasla daha üstün performans göstermektedir. Pookpunt ve Ongsakul (Pookpunt ve Ongsakul, 2013), bir rüzgâr santralindeki rüzgâr türbinlerinin en iyi düzenine ulaşmak için zamanla değişen hızlanma katsayıları ile bir iki terimli parçacık sürüşü optimizasyonu önermişlerdir. Bir rüzgâr santralindeki maksimum güç çıkışını minimum yatırım maliyeti ile yakalamayı amaçlamışlardır. Klasik problem üzerinde yaptıkları araştırmalarına göre önerilen model ile kurulu güç başına daha düşük yatırım maliyetleri elde etmişlerdir. Serrano Gonzalez ve diğerleri (Serrano Gonzalez vd., 2011), rüzgâr santrali konumlandırma işlemi için bir Evrimsel Algoritma (EA) sunmuşlardır. Net Mevcut Değeri (NPV), önerilen yöntemdeki gelirin bir şekli olarak kullanmışlar ve bu parametrenin tahmini için rüzgâr santrali yaşam döngüsü boyunca başlangıçtaki sermaye yatırımını ve net nakit akışını hesaplamışlardır. Kallioras ve diğerleri (Kallioras vd., 2015), rüzgâr yükünün değişken alanlar kullanılarak uygulandığı kıyı rüzgâr çiftlikleri için en iyi santral tasarımı için yeni bir problem formülasyonu sunmuşlardır. Problemin çözümü için harmoni arama yönteminin ayrı bir varyantına dayanan bir meta-sezgisel arama algoritması kullanmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, rüzgâr çiftliklerinin konumlandırma problemi ile başa çıkmak için meta-sezgisel optimizasyonun değişken rüzgâr yüklemesi ile birleştirilmesinin etkinliğini kanıtlamıştır. Xiaoxia ve diğerleri (Xiaoxia vd., 2016), Gauss fonksiyonunu kullanarak Jensen iz bölgesi modeline dayanan iki boyutlu bir analitik iz bölgesi modeli üzerinde araştırma yapmışlardır. Önerilen Jensen-Gauss iz bölgesi modeli tarafından tahmin edilen hız bozukluklarını, literatürde rüzgâr tüneline deneysel olarak ölçülen verilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçları, model tarafından tahmin edilen hız bozukluğunun, 2,5, 5, 7,5 ve rotor çapı mesafelerde ölçülen verilerle iyi uyduğunu göstermektedir. Daha sonra iki boyutlu Jensen-Gauss iz bölgesi modelini, çoklu popülasyon genetik algoritmasına dayanan bir rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu işleminde uygulamışlardır. Klasik problemin ikinci rüzgâr modeli için yapılan hesaplara göre yeni iz bölgesi modelinin kullanılması ile toplam güç üretimi ve rüzgâr santrali verimliliği daha önceki çalışmalarda verilen sonuçlara göre azalmıştır. Serrano Gonzalez ve diğerleri (Serrano Gonzalez vd., 2010), rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu için evrimsel bir algoritma önermişlerdir. Algoritmanın optimizasyon süreci, ilk yatırım ve santralin yaşam süresi boyunca yıllık net nakit akışının bugünkü değerini kullanan bir maliyet modeline dayanmaktadır. Algoritma modelini hem klasik problem hem de yeni bir problem kullanılması ile test etmişlerdir. Song ve diğerleri (Song vd., 2014), rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu için açgözlü algoritma modeline dayalı bir optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Sanal parçacık iz bölgesi

modelini, rüzgâr türbinlerinin iz bölgesi simülasyonu için kullanmışlar ve böylece mevcut yöntem karmaşık arazilerdeki eşit olmayan akış alanları için geçerli kılmışlardır. Rüzgâr çiftliğinin genel güç çıkışını kapsamlı olarak hedeflemek için optimizasyon sırasında güç çıkışının tahminini iyileştirmek için bağımlı bölge tekniğini uygulamışlardır. Böylece iz bölgesi etkilerinin azaltılmasını amaçlamışlardır. Optimizasyon işlemi sırasında, eklenen türbin hem diğer türbinlerden etkilenmekten hem de diğer türbinleri etkilemekten kaçınacaktır. Sonuçları, mevcut yöntemin, karmaşık arazi üzerinde rüzgâr santrali konumlandırma probleminin çözümü için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Wang ve diğerleri (Wang vd., 2017), arazi sahiplerinin kararlarını göz önünde bulunduran rüzgâr santrali konumlandırma çalışmalarının literatürde nadiren çalışıldığını söylemişlerdir. Daha karmaşık rüzgâr çiftliği sınırlarını ele almak ve iki ortak rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyon yaklaşımını birleştirmek için yeni bir kısıtlama işleme ve amaç fonksiyonu değerlendirme tekniği denemişlerdir. İki adet senaryo üzerinde araştırma yapmışlardır: 1) değişken arazi senaryosu ve 2) ardışık arsa senaryosu. Ardışık arazi arsa senaryosu altında sınırlandırılmamış koordinat yönteminin, en düşük enerji maliyeti ve en büyük rüzgâr santrali verimliliği değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Hou ve diğerleri (Hou vd., 2016), deniz üstü rüzgâr santralleri için rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Rüzgâr çiftliğinin enerji üretimini maksimize etmek amacıyla rüzgâr türbini konumlarını optimize etmişlerdir. Bu çalışmalarında alan modeli üzerinde kısıtlama bölgesi kavramını önermişler ve ceza işlevi yöntemiyle uygulamışlardır. Önerilen yöntemin, enerji verimini %3,84 oranında artırarak referans rüzgâr santralinin başlangıç konumlandırmasının iyileştirilebileceğini söylemişlerdir. Christie ve Bradley (Christie ve Bradley, 2012), iz bölgesi etkilerini göz önüne alarak rüzgâr türbini dizisinin çeşitli tasarımlarından elde edilen teorik maksimum güç yoğunluklarını hesaplamak için basit bir model kullanmışlardır. Birim alan başına enerji üretimini maksimize etmek için tasarlanan bir rüzgâr santralinin, ekonomik kazancı maksimize etmek için tasarlanandan çok farklı olabileceğini söylemişlerdir. Serrano Gonzalez ve diğerleri (Serrano Gonzalez vd., 2017), deniz üstü rüzgâr santrallerinin konumlandırma optimizasyonu için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Daha önceki optimizasyon çalışmalarında verilen en iyi santral düzenlerinin neredeyse tamamı düzensiz dizilişler sergilediklerini fakat hâlihazırda çoğu deniz üstü rüzgâr santralinin simetrik/düzenli bir diziliş ile inşa edildiğini söylemişlerdir. Problemin çözümü için iki meta-sezgisel optimizasyon algoritmasının (Genetik Algoritma ve Parçacık Sürütme Optimizasyonu) davranışlarını karşılaştırmışlar ve optimizasyon algoritmalarının davranışını geliştiren amaç fonksiyonu üzerinde bir dizi iyileştirmeler yapmışlardır. Önerilen metodolojilerin performansı iki durum altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen araçların deniz üstü rüzgâr santrallerini gerçekçi yaklaşımlar ile optimizasyon

becerisini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. Perez ve diğerleri (Perez vd., 2013), iz bölgesi etkilerini en aza indirerek, deniz üstü rüzgâr santrallerinin güç üretimini maksimize etmek için iki adımdan oluşan küresel optimizasyon metodunu önermişlerdir. Bu yöntem, en uygun hale getirilmiş matematiksel programlama tekniklerinden tam anlamıyla yararlanırken, aynı zamanda kolayca paralelleştirilebilen bir küresel optimizasyon yaklaşımı gerçekleştirir. Önerilen modelin performansını, Kuzey Denizi'ndeki Alman deniz üstü rüzgâr çiftliği Alpha Ventus kullanarak test etmişler ve gerçek düzenlemeye göre %3,52'lik yıllık güç artışını öngörmüşlerdir. Salcedo-Sanz ve diğerleri (Salcedo-Sanz vd., 2014), rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu için Mercan Resifleri Optimizasyon (CRO) algoritmasını önermişlerdir. CRO algoritması resif oluşumu ve mercan reproduksiyonunun simülasyonuna dayanan yeni bir biyolojiden esinlenilmiş yaklaşımdır. Bu model Kuzey Avrupa'daki gerçek bir deniz üstü rüzgâr santralının tasarımına uygulanmıştır. Sonuçlarına göre bu model Evrimsel Yaklaşımlar, Diferansiyel Evrim veya Uyum Arama algoritmaları gibi bu problem için uygulanan alternatif algoritma modellerinin sonuçlarını geride bırakmıştır. Emami ve Noghreh (Emami ve Noghreh, 2010), rüzgâr santrali konumlandırma problemini, yeni bir kodlama ve genetik algoritma modelinin yeni bir amaç fonksiyonu ile çözmüşlerdir. Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, sonuçların belirgin bir şekilde iyileştirildiğini söylemişlerdir. Sunulan amaç fonksiyonunun, ayarlanabilir katsayıları ile önceki fonksiyonlara kıyasla rüzgâr santralının maliyeti, gücü ve verimliliği üzerinde daha fazla kontrol sağladığını söylemişlerdir. Rodrigues ve diğerleri (Rodrigues vd., 2016), çok amaçlı bir evrimsel algoritma modelinin (MOEA) farklı özelliklerini rüzgâr santralleri konumlandırma problemi ile incelemişlerdir. Ayrıca, problem boyutunun karmaşıklığının ve farklı türbin yerleştirme ızgara çözünürlüklerinin sunduğu serbestlik dereceleri arasındaki ilişkiyi de incelemişlerdir. Son olarak, problem boyutunun algoritma performansına olan etkisini araştırmışlardır. Kısa süre önce tanıtılan Çok Amaçlı Gen Havuzu Optimal Karışım Evrimsel Algoritmasının (MOGOMEA) iki farklı çeşidinin performansını, Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)'nin geleneksel ve yeni birer çeşitleri ile karşılaştırmışlardır. Farklı deniz üstü rüzgâr santralleri için yapılan araştırmaların sonucunda MOGOMEA'nın bir varyantının, test edilen tüm problem boyutlarında NSGA-II'yi geride bıraktığını söylemişlerdir. Chen ve diğerleri (Chen vd., 2015), çok amaçlı genetik algoritmaya dayalı bir optimizasyon yöntemi önermişler ve gerçek rüzgâr durumu ve ticari rüzgâr türbini parametreleriyle test etmişlerdir. Verilen bir rüzgâr santralinde ihtiyaç duyulan rüzgâr türbinlerinin sayısını araştırmak için dört örnek çalışma yapmışlardır. Sonuçları, önerilen yöntemin, belirli bir rüzgâr santrali düzenini hem normal hem de düzensiz şekillerde gerçek ticari veriler ve rüzgâr koşulları ile optimize edebildiğini ve farklı tip ve göbek yüksekliği

rüzgâr türbinleri seçerek daha iyi bir sonuç elde edebildiğini açıkça göstermektedir. Li ve diğerleri (Li vd., 2017), önceden önerilen yaklaşımlardan farklı olarak, rüzgâr santrali konumlandırma problemini çözmek için seçici hiper-sezgisel olarak bilinen yüksek düzeyli bir arama yöntemi uygulamışlardır. Sonuçları, bu zor problemi çözmek için seçici hiper-sezgisel modellerin başarı potansiyelini göstermiştir. Patel ve diğerleri (Patel vd., 2017), rüzgâr santrali konumlandırma problemini çözmek amacı ile iki farklı meta-sezgisel algoritma modeli önermişlerdir. Bu algoritmalarını, temel öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritmasına değişikliklerin dâhil edilmesiyle geliştirmişlerdir. Önerilen algoritmalarının keşif yeteneğini geliştirmek için, etkin arama tekniklerinin kullanılması ile temel TLBO algoritmasının sınırlamalarını ortadan kaldırmışlardır. Önerilen modelleri, problemin 10 zorlu gerçek kısıtlaması altında incelemişlerdir. Sonuçları, önerilen yöntemin, problemin çözümünde etkili bir teknik olduğunu göstermiştir. Park ve Law (Park ve Law, 2015), rüzgâr santrali gücünü en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr türbinlerinin konumlarını optimize etmek için bir yöntem önermişlerdir. Problemi formüle etmek için, sürekli bir iz bölgesi modeli türetmişler ve rüzgâr türbinlerinin konumları açısından beklenen rüzgâr çiftliği gücünü sürekli ve düzgün bir işlev olarak ifade etmişlerdir. Oluşturulan rüzgâr santrali güç fonksiyonunu, doğrusal olmayan matematik problemi için sıralı dışbükey programlama (SCP) kullanarak maksimuma çıkarmışlardır. SCP'nin verimliliğini değerlendirmek için 80 rüzgâr türbininden oluşan bir rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu yürütmüşlerdir. Optimizasyon neticesinde türetilmiş rüzgâr santral düzeni güç verimliliğini %7,3 arttırmıştır. Kusiak ve Song (Kusiak ve Song, 2010), rüzgâr enerjisi çıkarımını en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr dağılımına dayalı rüzgâr türbini konumlandırma için bir model sunmuşlardır. Türbin konumlandırma tasarımı kısıtlı bir optimizasyon problemi olduğundan, çözme kolaylığını sağlamak adına kısıtlamaları ikinci bir amaç fonksiyonuna dönüştürmüşlerdir. Daha sonra beklenen enerji çıktısını maksimize eden ve kısıtlama ihlallerini en aza indiren dönüştürülmüş iki kriterli optimizasyon problemini çözmek için çok amaçlı bir evrimsel strateji algoritması geliştirmişlerdir. Abdulrahman ve Wood (Abdulrahman ve Wood, 2017), rüzgâr santrali konumlandırma problemine ticari türbin seçimi ve itme katsayısı için yeni yaklaşımlar uygulamışlardır. Ayrıca basit bir saha tabanlı maliyet modeli uygulamışlardır. Sonuçları, farklı türbinlerin ve göbek yüksekliğinin kullanılmasının güç ve maliyet arasında yararlı bir alışveriş olanağı sağlayabileceğini göstermiştir. Mayo ve Daoud (Mayo ve Daoud, 2016), yüzlerce sayıya sahip türbinleri olan daha büyük rüzgâr çiftlikleri için otomatik yaklaşımların gerekli olduğunu söylemişlerdir. İz bölgesi etkilerinden kaynaklanan hız bozulmalarını en aza indirgeyen rüzgâr çiftliği düzenlerini tanımlamak için yeni bir mutasyon operatörü ile evrimsel bir strateji önermişlerdir. Mutasyon operatörü, bir konumlandırma boyunca hız bozukluklarının tahmini

modelini inşa etmeye dayanır ve böylece mutasyonlar, daha iyi düzenlere doğru doğal olarak önyargılıdır. Bu, operatörü rastgele edilmekten çok bilgilendirir. Sonuçları, bilgilendirilmiş mutasyon yaklaşımının etkin bir şekilde çalıştığını ve en düşük toplam hız bozuklukları olan yerleşim yerlerini belirlediğini göstermiştir. Salcedo-Sanz ve diğerleri (Salcedo-Sanz vd., 2013), evrimsel hesaplama tekniklerini kullanılarak Kuzey Avrupa'daki gerçek bir deniz üstü rüzgâr santralinin yerleşim optimizasyonunu sunmuşlardır. Farklı özelliklere sahip çözümler elde etmek için yüksek enerji üretimi ve düşük bağlantı maliyeti gibi farklı yerleşim kalitesi modellerini uygulamışlardır. Sabit sayıda türbin içeren serbest tasarımın daha uygun olduğunu ve nizami tasarımdan daha kaliteli düzenler elde ettiğini söylemişlerdir. Eroğlu ve Seçkiner (Eroğlu ve Seçkiner, 2010), enerji çıkışını maksimize etmek için bir karınca kolonisi algoritması kullanmışlardır. Algoritma modeli, rüzgâr türbini konumlarına ve rüzgâr yönüne bağlı olarak hesaplanabilen iz bölgesi kayıplarını dikkate alır. Sonuçlarına göre, karınca kolonisi algoritmasının, enerji veriminin maksimum değerleri ve iz bölgesi kayıpları açısından mevcut iyi performans göstermiştir. Pookpunt ve Ongsakul (Pookpunt ve Ongsakul, 2016), Güney Tayland'ın doğu kıyısı olan Huasai bölgesinde yeni bir rüzgâr olasılık dağılım haritası kullanılması ile en iyi rüzgâr santrali konumlandırma tasarımını önermişlerdir. Yeni rüzgâr olasılığı dağılım haritaları, izlenen bir alan için hem rüzgâr hızı hem de yön verisi frekansını birleştirir. Bileşen maliyet modeli ve öğrenme eğrisi, rüzgâr türbinlerinin sayısına, kurulu güce, göbek yüksekliğine ve iz bölgesi kaybına bağlı olarak, bir rüzgâr santralinin ilk yatırım maliyetini, seviyelendirilmiş maliyetini ve yıllık enerji üretim maliyetini ifade etmek için kullanılır. Türbin pozisyonuna, büyüklüğüne, göbek yüksekliğine, yıllık enerji üretimine, yatırım bütçesine, arazi kiralama maliyetine, işletme ve bakım maliyetine bağlı kârı maksimize etmek için Zaman Hızla Değişen Hızlanma Katsayıları (BPSO-TVAC) ile İkili Parçacık Sürü Optimizasyonunu önermişlerdir. Test sonuçları, BPSO-TVAC'ın rüzgâr türbinlerini doğrudan yüksek frekanslı rüzgâr hızına ve yönüne en iyi şekilde yerleştirdiğini ve geleneksel rüzgâr çiftliği düzeninden daha yüksek bir kâr sağladığını göstermiştir. Kuo ve diğerleri (Kuo vd., 2016), karmaşık arazilerde rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu gerçekleştirmek için karmaşık tam sayılı programlama (MIP) ile hesaplamalı akışkan dinamiklerini (CFD) birleştiren bir algoritma önermişlerdir. CFD simülasyonlarını, iz bölgesi tahminlerinin doğruluğunu yinelemeli olarak geliştirmek için kullanırlarken, MIP'i optimizasyon işlemi için kullanmışlardır. Önerilen algoritma Kanada'daki bir rüzgâr çiftliği alanında uygulanmıştır. Sonuçları, önerilen algoritmanın karmaşık arazilerde başarılı düzenler üretebildiğini göstermiştir. Wang ve diğerleri (Wang vd., 2015), üç farklı ızgara koşulunu göz önünde bulundurarak, ızgara tabanlı yöntemle en iyi optimizasyon sonuçlarının sınırsız koordinat yöntemiyle bir karşılaştırmasını yapmışlardır.

Sonuçlarına göre daha önce uygulanan 10x10 ızgara durumu yerine 20x20 ızgara durumunun tercih edilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Ayrıca ızgara temelli yöntemin kullanılmasına kıyasla sınırsız koordinat yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda küçük bir iyileşme sağlanacağını söylemişlerdir. Al-Shammari ve diğerleri (Al-Shammari vd., 2016), rüzgâr santralinde meydana gelen iz bölgesi etkilerinin ayrı bölge seviyelerine göre kümeleme yöntemleri uygulamışlardır. İz bölgesi etkilerini yakalamak için temel bileşen analizini uygulamışlar ve daha sonra kümeleri analiz etmek için küme analizini kullanmışlardır. Sonuçlarına göre, iz bölgesinin rüzgâr santralinin enerji üretimi üzerinde on farklı seviyede etkisi olduğu görülmüştür. Pillai ve diğerleri (Pillai vd., 2017), Danimarka'daki Middelgrunden rüzgâr çiftliği için bir rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu uygulamışlardır. Middelgrunden rüzgâr santralindeki mevcut yerleşim planının maliyetini, enerji üretimini ve enerji düzeyini hesaplamak için geliştirilen değerlendirme aracının sonuçlarını, işletmecisi tarafından rapor edilen maliyet ve enerji üretimiyle karşılaştırmışlardır. Yeni santral düzenleri algoritması ve parçacık sürü algoritmasını kullanarak tasarlamışlardır. Alana özel koşulları, kısıtlamaları ve gelecekteki projelerin tipik özelliklerini göz önünde bulundurarak, mevcut yerleşim planına kıyasla daha az enerji maliyetine sahip düzenlerin elde edilebileceğini söylemişlerdir. Du Pont ve diğerleri (Du Pont vd., 2016), rüzgâr santrallerinin konumlandırma optimizasyonunda uygulanabilecek model iyileştirmeleri sistemi sunmuşlardır. Bu iyileştirmeleri, daha doğru maliyet ve güç modellemesi, kısmi iz bölgesi etkileşimi ve değişken atmosferik durağanlık etkilerini içermektedir. Sonuçları, daha gelişmiş modellere sahip bir problemin daha önceki uygulamalara kıyasla avantajlarını göstermektedir.

Rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu üzerine yapılan araştırmalar gerçek fiziki koşulların basitleştirilmiş modelleri ile gerçekleştirilmektedir. 2010'dan beri bu alanda araştırmaların hız kazandığı görülmüştür. Öncül çalışmalarda yapılan basit varsayımlar yerini daha karmaşık modellere bırakmıştır. Ayrıca birçok algoritma modelinin bu problemlerin çözümündeki kabiliyeti üzerine eserler verilmiştir. Optimizasyon probleminin yapısal kısıtları ve varsayımlarının probleme etkileri üzerine incelemeler yapılmıştır. Güncel literatürün, karmaşık arazi etkilerinin hesaba katıldığı, farklı türbin modellerinin çeşitli göbek yüksekliği seçenekleri arasından seçim yapan çok amaçlı algoritma modeller kullanan optimizasyon modelleri üzerine doğru yöneldiği görülmektedir.

Rüzgâr enerjisi çıkışındaki beklenmedik hızlı değişimlere rüzgâr rampası denir (Ferreira vd., 2011). Büyük ölçekli bir rüzgâr enerjisi devreye alma sistemi söz konusu olduğunda, rüzgâr hızının kesikli yapısı, sistem operatörlerinin tahmin edilen ve mevcut rüzgâr enerjisi çıkışı arasındaki olası farklılıklar belirli bir zaman diliminde telafi etmek için işletme rezervlerini

organize etmelerine neden olur (Fabbri vd., 2005). Bu kesikli yapı, rüzgâr enerjisinin güvenilir bir elektrik kaynağı olarak uygulanması için en büyük zorluk haline gelmiştir (Soman Saurabh vd., 2010; Sideratos ve Hatziaargyriou, 2007; Teleke vd., 2010). Karakasidis ve Charakopoulos (Karakasidis ve Charakopoulos, 2009), rüzgâr verisi zaman serilerindeki düşük boyutlu deterministik kaostun varlığını araştırmışlardır. Rüzgâr hızında düşük boyutlu kaotik dinamikler olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Liu ve diğerleri (Liu vd., 2016), rüzgâr hızındaki değişim oranını ölçmek için variogram fonksiyonu kullanmışlardır. Anlık variogram ne kadar yüksekse, rüzgâr hızındaki değişim oranının o kadar hızlı olduğunu söylemişlerdir. Liang ve diğerleri (Liang vd., 2015), rüzgâr gücünün, Hilbert-Huang dönüşümü ve Hurst analizine dayanan ölçek dağılımı için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem ile rüzgâr gücünün çeşitli çok boyutlu kaotik özelliklerini incelemek için daha fazla bilgi elde etmenin mümkün olabileceğini söylemişlerdir. (Shensi vd., 2015), bir zaman dilimi boyunca güç dalgalanmasının hesaplanması için yeni bir aktif güç dağıtım çözüm modeli sunmuşlardır. Yeni çözümün, aşırı güç dalgalanmaları nedeniyle rüzgârı terk etmemek için değerli bir yaklaşım olduğunu bildirmişlerdir. Cui ve diğerleri (Cui vd., 2016), bir sonraki programlama periyotlarında, rüzgâr gücü rampalarını tespit etmek için bir sallanan kapı algoritmasını ve dinamik programlamayı birleştirmişlerdir. Önerilen modelin hem üretim maliyetini düşürdüğünü, hem de ısı birimlerinin üretim programlarını etkilemediğini söylemişlerdir. Ren ve diğerleri (Ren vd., 2017), rüzgâr kesikliliğini, rüzgâr ikliminin en önemli özelliklerinden biri olduğunu vurgulamışlardır. Bununla birlikte, bu önemli özelliğin nicel ölçümlerinin literatürde çok az olduğunu söylemişlerdir. Rüzgâr hızı kesikliliğinin ölçülmesi için rüzgâr hızı rampası görev oranı tanımlaması önermişlerdir. Görüldüğü üzere araştırmacılar, rüzgârın kesikli yapısını tahmin edebilmek ve miktarını ölçebilmek için çeşitli model ve tanımlamalar önermiştir.

Üniversite kampüsleri, eğitim, araştırma ve sosyo-kültürel faaliyetler nedeniyle yoğun elektrik tüketen yapılardır. Tüm dünyada, önemli sayıda üniversite, kısa ve orta vadede sürdürülebilir kampüs hedeflerine ulaşmak için araştırma ve yatırım yapmaktadır (Hasapis vd., 2017). Lukman ve diğerleri (Lukman vd., 2009), Maribor Üniversitesi Mühendislik Kampüsü'nün çevresel performansını yaşam döngüsü esasına göre değerlendirmişlerdir. Odun peletlerinin, güneş enerjisinin ve mevcut ısıtma sisteminde kullanılan doğal gazın yerine iki kaynağın bir arada kullanılmasını araştırmışlardır. Geleneksel gaz yakıtlı kazanın bir kombine odun ve güneş ısıtma sistemi ile değiştirilmesinin, küresel ısınma potansiyelini %82'ye kadar azaltabileceğini söylemişlerdir. Zhou ve diğerleri (Zhou vd., 2013), Guangdong'daki üniversitelerin enerji tüketimini araştırmak için anket temelli bir yaklaşım yürütmüşlerdir. Deshko ve Shevchenko (Deshko ve Shevchenko, 2013), Ukrayna Üniversitelerinin enerji sertifikalandırma sistemi için

bir metodoloji kurmayı amaçlamışlardır. Ulusal koşulları dikkate alarak bir bütün olarak kampüs verilerine araçsal bir yaklaşıma dayanan bir sertifikasyon varyantı önermişlerdir. Sunulan yaklaşımın, kampüslerin kendi enerji performans terimlerini belirleme ve verimliliklerini karşılaştırmalarına izin vereceğini belirtmişlerdir. Chung ve Rhee (Chung ve Rhee 2014), üniversite binalarının mevcut enerji tüketimini belirlemek için bir alan araştırması gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, enerji verimliliğini artırmak ve binaların enerji tasarrufu potansiyellerini analiz etmek için stratejiler uygulamışlardır. Escobedo ve diğerleri (Escobedo vd., 2014), Meksika Ulusal Özerk Üniversitesi (UNAM) Ana Kampüs tesisleri için ilgili sera gazı emisyonlarının incelemişlerdir. Elektrik tüketiminin kategorilere göre dağılımını analiz etmişler ve olası enerji kazanımları için önerilerde bulunmuşlardır. Guan ve diğerleri (Guan vd., 2016), bir Norveç Üniversitesi Kampüsü tarafından kullanılan elektrik, ısıtma ve su ile ilgili uzun vadeli ve gerçek zamanlı verileri analiz etmişlerdir. Yoshida ve diğerleri (Yoshida vd., 2017), Japonya'daki Osaka Üniversitesi'nde sürdürülebilir bir kampüs elde etmek için stratejiler bildirmişlerdir. Sürdürülebilir kampüs hedefine ulaşmak için, üniversitenin enerji tasarrufu uygulamalarına ek olarak yenilenebilir enerji teknolojilerine ihtiyacı olduğunu söylemişlerdir. Mytafides ve diğerleri (Mytafides vd., 2017), Akdeniz iklimindeki bir üniversite binasının enerji tasarrufu yöntemlerini araştırmışlardır. Ayrıca çatıya yerleştirilen PV panellerin binanın enerji ihtiyacının %120'sini karşılayabildiğini de bildirmişlerdir. Hasapis ve diğerleri (Hasapis vd., 2017), Girit Teknik Üniversitesi Kampüsü'nde enerji bağımsızlığı için büyük ölçekli fotovoltaik (PV) enerji üretim tesislerinin tasarımını araştırmışlardır. Bu çalışmaların ortak amacı, kampüslerin enerji tüketimini anlamak ve olası enerji verimliliği mekanizmalarını tanımlamaktır. Bu çalışmalarda, sürdürülebilir kampüs hedeflerine ulaşmanın bir başka gerekliliği yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yoğun kullanılmasıdır.

Pek çok araştırmacı yakın zamanda enerji, çevre ve maliyet faktörlerini göz önünde bulundurarak kampüste PV sistemleri için uygun yerlerin tespit edilmesini araştırmıştır (Talavera vd., 2011; Lee vd., 2016; Mytafides vd., 2017, Hasapis vd., 2017). PV sistemlerinden farklı olarak, rüzgâr türbinleri, iz bölgesi ve çalışma koşullarından kaynaklanan gürültü yayılımı nedeniyle çevreyle dinamik bir etkileşim halindedir. Rüzgâr türbinleri kaçınılmaz olarak aşağı yönde rüzgârın akış karakteristiklerini değiştirir ve serbest akıma kıyasla düşük hız ve yüksek türbülansla tanımlanan iz bölgesi olarak adlandırılan bir bölge oluşturur. Modern rüzgâr çiftliklerinde, uyandırma bölgesinin olumsuz etkilerini azaltmak için en az 3-5 rotor çapında bir mesafe sınırlaması uygulanır (Zhang, 2015). Ayrıca, rüzgâr türbinleri mekanik parçaları ve hava ile etkileşimleri nedeniyle gürültü üretirler. Rüzgâr türbini geliştiricilerinin gürültünün etkisini azaltmak için yaptıkları yoğun çalışmalara karşın (Kaldellis ve ark. 2012) gürültü, yerel

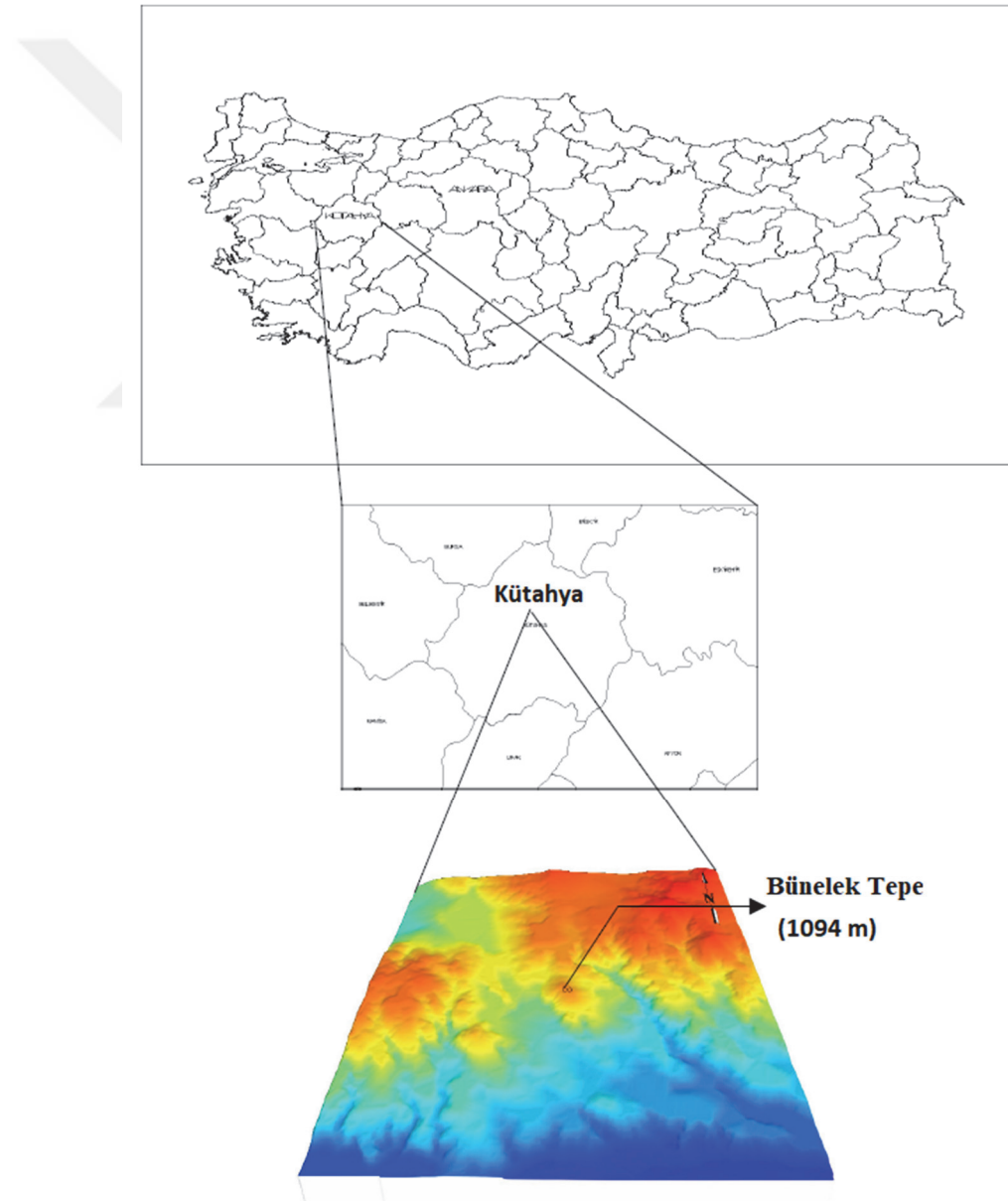
topluluklar ve yasal yetkililer için hala önemli bir sorundur (Kaldellis ve ark. 2001; Jones ve Eiser 2010) ve yeni rüzgâr enerjisi yatırımlarını engelleyebilmektedir (Ansolabehere ve Konisky 2009; Kaldellis ve ark. 2012). Bu nedenle seçilen sahalar üzerinde gürültü yayılım analizleri gerçekleştirilmedi.



4. MATERİYAL VE METOT

4.1. Rüzgâr Verisi ve Arka Plan

Kütahya ($39^{\circ} 42' K$, $29^{\circ} 93' D$, 572.256 nüfuslu (TÜİK, 2018)) Türkiye'nin Ege Bölgesi'nin doğu kesiminde yer almaktadır. Şekil 4.1, Türkiye haritası üzerinde Kütahya'nın yerini ve rüzgâr ölçümünün gerçekleştirildiği Bünelek Tepesi'ni göstermektedir. Özgür (Özgür, 2004) 2001 ve 2004 yılları arasında Bünelek Tepesi'nden (1090 m) 10 ve 30 metre yerden yükseklikte rüzgâr verilerini 10 dakikalık aralıklarla kaydetmiştir (DPÜ-BAP-2001-17).



Şekil 4.1. Türkiye haritası üzerinde Kütahya, Bünelek Tepesi (Özgür, 2006).



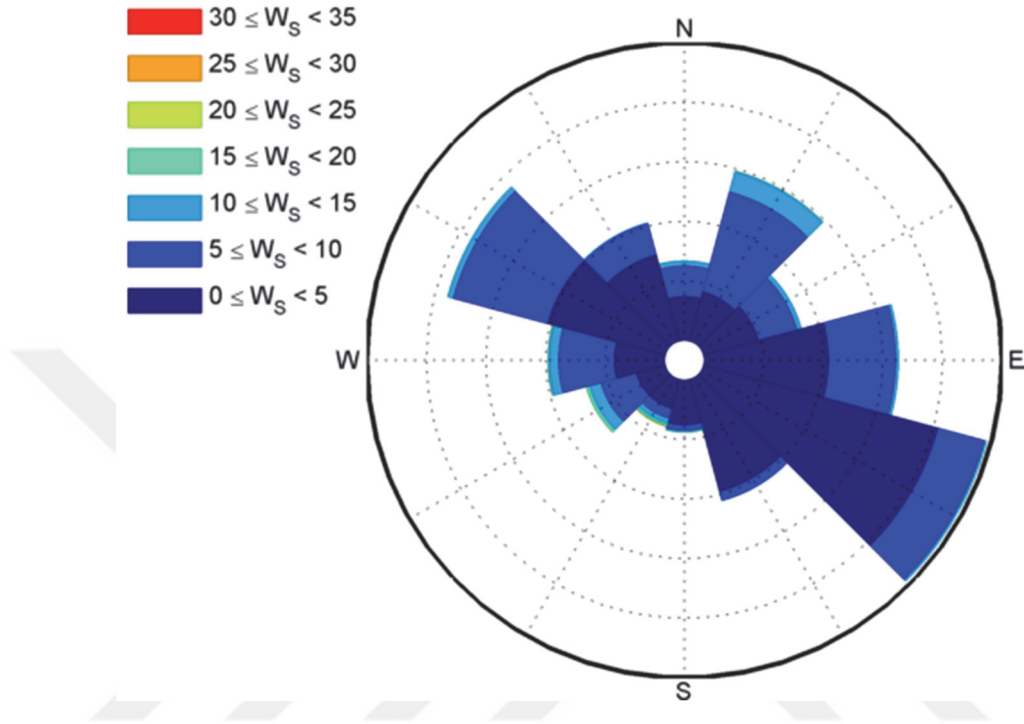
Şekil 4.2. Bünelek Tepesi üzerinde rüzgâr ölçüm istasyonunun yeri.

Şekil 4.2, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü'nün karşısında yer alan Bünelek Tepesi üzerindeki rüzgâr ölçüm istasyonunu göstermektedir. Buradan görüleceği üzere Bünelek Tepesi karmaşık topografya etkilerinden uzak bir yapıya sahip olması sebebi ile rüzgâr verisi ölçümü gerçekleştirmek için oldukça uygun bir yerdir.

Köse (Köse, 2004), Bünelek Tepesi'nden alınan 20 aylık ölçüm verisini CALLaLOG 98 ve ALWIN yazılım paketleri ile değerlendirmiştir. 30 metre yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı 4,62 m/s olarak verilmiştir. 600 kW'lık bir türbin için hesaplanan yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü sırası ile 1372,2 MWh ve %15,6 olarak verilmiştir.

Köse ve diğerleri (Köse vd., 2004), rüzgâr ölçüm sisteminin ekipman özelliklerini ve kurulumu hakkındaki detayları vermişlerdir. Rüzgâr esme frekansı en yüksek olan iki yön kuzeybatı (300°) ve güneydoğu (120°) iken, rüzgârın en kuvvetli olduğu yönler kuzeydoğu (30°) ve güneybatı (240°)'dir. Şekil 4.3, iki yıllık rüzgâr verisi için rüzgâr esme yönü dağılımını göstermektedir. Rüzgâr esme frekansı %17,7 olan 120° rüzgâr yönünün 30 metre için 3,53 m/s

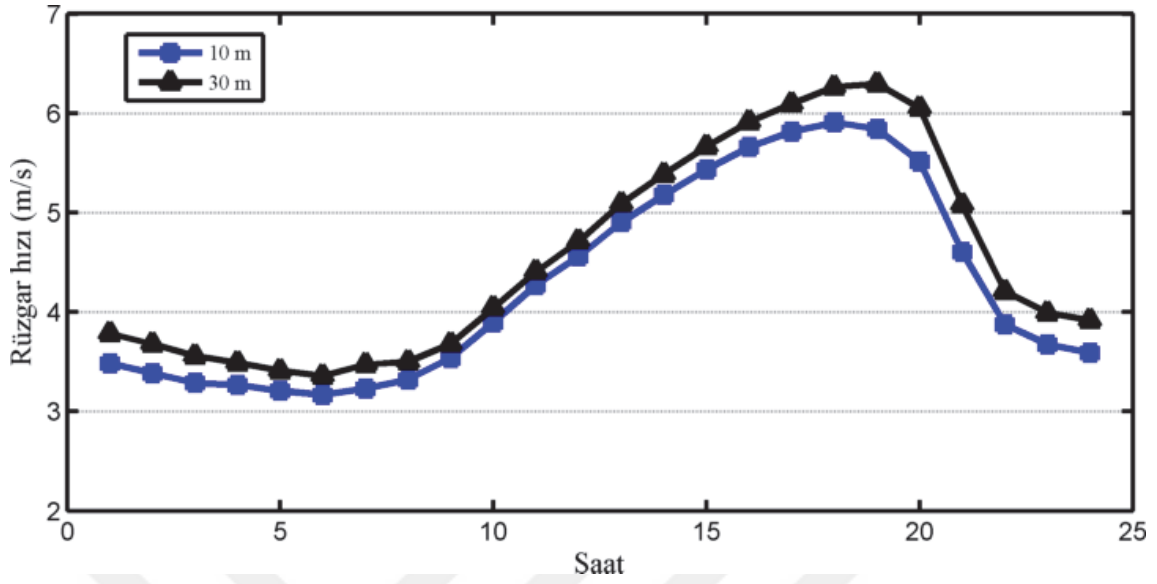
ortalama rüzgâr hızı düşük kapasite faktörünün başlıca sebebidir. 30° ve 240° rüzgâr yönü için ortalama rüzgâr hızları sırası ile 6,46 m/s ve 6,45 m/s'dir.



Şekil 4.3. Kütahya için 24 aylık rüzgâr verisine dayanan rüzgâr yönü dağılımı.

Özgür ve Köse (Özgür ve Köse, 2006) beş farklı rüzgâr türbini için Kütahya Bünelek Tepesi'nin elektrik üretim değerlerini değerlendirmişlerdir. En yüksek kapasite faktörü olan %16,1'e Bonus 300 kW rüzgâr türbini ile ulaşıldığını söylemişlerdir. Ayrıca gün içindeki saatlik ortalama rüzgâr hızı verilerine göre maksimum ortalama rüzgâr hızının saat 18.00'de 6,26 m/s olduğunu söylemişlerdir. Şekil 4.4'te 10 ve 30 metre için gün içindeki saatlik ortalama rüzgâr hızları verilmiştir. 10 metre yükseklikteki maksimum ortalama hız benzer şekilde saat 18.00'de 5,91 m/s'dir. Bölgenin rüzgâr karakteristiğinin büyük ölçüde gün içindeki güneşlenme süresine göre değişen sıcaklık değişimlerine bağlı olduğu açıktır.

Özgür ve diğerleri (Özgür vd, 2009), Bünelek Tepe'den toplanan rüzgâr verisinin istatistiksel değerlendirmesini yapmışlardır. Weibull, Gamma ve Lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonlarının parametre tahminlerini, en çok olabilirlik, en küçük kareler yöntemi ve sağlam asimetrik dağılım parametre tahmin yöntemlerini kullanarak yapmışlardır. Sağlam asimetrik dağılım parametre tahmin yönteminin, diğer metodlara kıyasla daha başarılı olduğunu söylemişlerdir.



Şekil 4.4. Gün içindeki ortalama rüzgâr hızının değişimi.

Rüzgâr verisinin rüzgâr hızının ve rüzgâr yönünün detaylı analizi ilgili referansta bulunmaktadır (Özgür, 2006).

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Bölgenin rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı rampası karakteristiği gibi rüzgârın dinamik yapısı ile ilgili önemli bilgiler veren kavramları araştırılmıştır.
- ii. Kütahya'nın merkez ilçesi etrafındaki gerçek rüzgâr santrali potansiyeli araştırılmıştır.
- iii. İki farklı yükseklikten toplanan rüzgâr verilerinin veri doğrulama analizi yapılmıştır.
- iv. Seçilen potansiyel bölge için rüzgâr santrali planlaması gerçekleştirilmiştir.

Bahsedilen analizleri yapmak için iki farklı yükseklikteki anemometrelerden alınan rüzgâr verilerini kullanarak bir veri doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu parametre tahminini gerçekleştirmek amacı ile farklı metotlar kullanılmıştır. Bu metotların başarısı test edilmiştir. Rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı rampası karakteristiği analiz edilmiştir. Bölgenin gerçek rüzgâr santral potansiyelini belirlemek için rüzgâr atlası oluştururken WAsP yazılımı kullanılmıştır. Kütahya çevresindeki olası santral bölgelerini belirlemeden önce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü etrafındaki rüzgârlı bölgeler araştırılmıştır. Bu bölgelerde konumlanacak rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin kampüsün anlık ihtiyacını karşılayabilirliği analiz edilmiştir. Ayrıca

kampüs içindeki binaların gürültü hassasiyetini göz önünde bulundurmak için rüzgâr türbinlerinin gürültü yayılımını hesaplamak üzere bir model kullanılmıştır. Daha sonra Kütahya çevresinde santral kurulumu için seçilen alan üzerinde rüzgâr santrali konumlandırma problemini çözmek için bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Optimizasyon çalışması genetik temelli bir algoritma modeli kullanarak yıllık enerji üretimi veya birim enerji maliyeti gibi karar verici parametreleri optimize etmeyi amaçlar. Jensen iz bölgesi modeli kullanılması ile iz bölgesi temelli kayıplar modellenir. Farklı ticari türbinlerin farklı yükseklikleri için seçme seçeneği eklenmiştir. Orografik yapı optimizasyon sırasında göz önüne alınır.

4.2. Rüzgâr Hızı Frekans Dağılımı

30 metre yükseklikten toplanan iki yıllık rüzgâr veri seti için Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun parametreleri Medyan ve Çeyrekler Yöntemi (MQ), Moments (MO) method, Modified Maximum Likelihood (MML) method, Energy Pattern Factor (EPF) method ve WAsP tarafından kullanılan Equivalent Energy methodu kullanılarak hesaplanmıştır. Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu denklem 4.1 ile ifade edilir (Özgür, 2006; Solyali vd., 2016):

$$f(U) = \frac{k}{A} \left(\frac{U}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{A}\right)^k} \quad (4.1)$$

Burada $f(U)$ ölçülen rüzgâr hızı U 'nın olasılığı, A Weibull ölçek parametresini, k Weibull şekil parametresini ifade etmektedir. Ölçek parametresi, seçilen bölgenin rüzgârlığını gösteren veri dağılım grafiğinin apsis ölçeğini belirlerken; şekil parametresi, rüzgâr dağılımının tepe noktalarını gösterir ve dağılımının genişliğini tanımlar. İlgili kümülatif dağılım fonksiyonu, denklem 4.2 ile ifade edilebilir:

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{A}\right)^k\right] \quad (4.2)$$

Uzun dönemli ortalama rüzgâr hızı ile Weibull parametreleri arasındaki ilişki denklem 4.3 ile verilir:

$$\bar{U} = A\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (4.3)$$

Burada Γ Gamma fonksiyonudur ve denklem 4.4 ile tanımlanır:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} U^{x-1} e^{-U} dU \quad (4.4)$$

4.2.1. Medyan ve çeyrekler yöntemi

Eğer medyan hız U_m ve çeyrekler $U_{0.25}$ ve $U_{0.75}$ [$P(U \leq U_{0.25}) = 0.25$, $P(U \leq U_{0.75}) = 0.75$] mevcut ise k ve A denklem 4.5 ve 4.6 ile tanımlanabilir (Justus vd, 1978):

$$k = \frac{\ln \left[\frac{\ln(0.25)}{\ln(0.75)} \right]}{\ln \left(\frac{U_{0.75}}{U_{0.25}} \right)} \cong \frac{1.573}{\ln \left(\frac{U_{0.75}}{U_{0.25}} \right)} \quad (4.5)$$

$$A = \frac{U_m}{\ln(2)^{\frac{1}{k}}} \quad (4.6)$$

4.2.2. Moment metodu

Moment metodu genellikle parametre tahmin alanlarında kullanılan bir yöntemdir. $U_1, U_2, \dots, U_n$ 'den oluşan bir veri setinin n inci momentin tarafsız bir tahmini denklem 4.7 ile ifade edilir (Azad vd., 2014):

$$\mu_n = \left(\frac{1}{A} \right)^{-\frac{n}{k}} \Gamma \left(1 + \frac{n}{k} \right) \quad (4.7)$$

İlk ve ikinci momentin bulunması ile k ve A 'nın değeri aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir:

$$\sigma = A \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (4.8)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (4.9)$$

Burada $\bar{U}$ ve σ sırası ile rüzgâr hızının ortalamasını ve standart sapmasını ifade etmektedir. Birkaç iterasyon sonucunda Weibull şekil ve ölçek parametreleri aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir:

$$k = \left(\frac{0.9874}{\frac{\sigma}{\bar{U}}} \right)^{1.0983} \quad (4.10)$$

$$A = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.11)$$

4.2.3. Değiştirilmiş en çok olabilirlik metodu

Rüzgâr hızı veri seti frekans dağılımı şeklinde biliniyorsa değiştirilmiş en çok olabilirlik metodu Weibull parametrelerini belirlemek için kullanılabilir (Ahmed, 2016):

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n U_i^k \ln(U_i) P(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k P(U_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(U_i) P(U_i)}{P(U \geq 0)} \right)^{-1} \quad (4.12)$$

$$A = \left(\frac{1}{P(U \geq 0)} \sum_{i=1}^n U_i^k f(U_i) \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.13)$$

U_i i çubuk grafikteki kutuların merkezindeki rüzgâr hızı, n kutu sayısı, $f(U_i)$ i kutusuna karşılık gelen rüzgâr hızının frekansı, $P(x \geq 0)$ rüzgâr hızının sıfıra eşit veya ondan daha yüksek olması olasılığıdır. Denklem 4.12 iterasyon ile çözümlendikten sonra denklem.13 çözülür.

4.2.4. Enerji paterni faktörü yöntemi

Enerji paterni faktörünün, Weibull parametrelerinin tahmin edilebilmesi için tanımlanması gerekir (Akdağ ve Dinler, 2009):

$$E_{pf} = \frac{\bar{U}^3}{\bar{U}^3} \quad (4.14)$$

$\bar{U}^3$ rüzgâr hızının küpünün ortalaması, $\bar{U}^3$ ortalama rüzgâr hızının küpüdür. Daha sonra şekil ve ölçek parametreleri aşağıdaki deklemler ile hesaplanır:

$$k = \left(1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2} \right) \quad (4.15)$$

$$A = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.16)$$

4.2.5. WAsP (eşdeğer enerji) metodu

"Eşdeğer enerji yöntemi" olarak da adlandırılan WAsP yönteminde, Weibull dağılımı ile elde edilen değerlerin, ölçülmüş rüzgâr hızı verilerine denk olması gerekliliği mevcuttur. WAsP

yöntemi, ölçülen frekans histogramına doğrudan uymaya çalışmaz, ancak şu iki gerekliliğe sahiptir: (i) Uydurulmuş Weibull dağılımı ile gözlemlenen ortalama güç yoğunluğu eşit olmalıdır. (ii) Uydurulmuş Weibull dağılımı ve gözlemlenen dağılımı için ortalama rüzgâr hızının üzerindeki değerlerin oranı eşit olmalıdır.

Aşağıdaki denklemler Weibull dağılımı ve gözlenen rüzgâr hızı dağılımı için ortalama güç yoğunluğunu sabit hava yoğunluğu kabulü altında verir (Solyalı vd., 2016):

$$RGY_{Weibull} = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right) \quad (4.17)$$

$$RGY_{gözlenen} = \frac{1}{2n} \rho \sum_{i=1}^n U_i^3 \quad (4.18)$$

İlk gerekliliği göz önünde bulundurarak denklem 4.17 ve 4.18 yeniden düzenlenirse A parametresi denklem 4.19 ile bulunabilir:

$$A = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^3}{N \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)}} \quad (4.19)$$

Kümülatif dağılım fonksiyonu $F(U)$, U 'dan daha küçük olan değerlerin oranını verir ve dolayısıyla $1-F(U)$, U 'yu aşan değerlerin oranıdır. Yukarıdaki (ii) şartı göz önüne alınırsa, gözlenen ortalama rüzgâr hızını aşan rüzgâr hızlarının oranını temsil eden bir X sembolü tanımlanır:

$$1 - F(\bar{U}) = X \quad (4.20)$$

$$\left(\frac{\bar{U}}{\sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^3}{N \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)}}} \right)^k = -\ln(X) \quad (4.21)$$

İlk önce denklem 4.20 ile X hesaplanır, sonra denklem 4.21 iterasyon ile çözülür ve k parametresi hesaplanır.

4.2.6. Parametre tahmin tekniklerinin performans analizi

Yukarıdaki parametre tahmin yöntemlerinin uygunluk performansını ölçmek için, determinasyon katsayısı (R^2), verimlilik katsayısı (COEF), kare ortalamalarının karekökü metodu (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) değerlendirme yapılmıştır. Determinasyon katsayısı (R^2) regresyon kaynaklı karelerin toplamının ve toplam karelerin toplamının oranı olarak tanımlanır. Bu katsayının 0 ile 1 arasında değer alması gerekir ve 1'e yakın değerler değişimin büyük miktarının model ile hesaplanabileceğini ifade eder (Abraham ve Ledolter, 2005).

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (U_t - \hat{U}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (U_t - \bar{U})^2} \right] \quad (4.22)$$

Verim katsayısı (COEF), gerçek hızlara göre rüzgâr hızlarının tahmininde, tahmin modelinin doğruluğunun bir başka ölçüsüdür. Değerleri genellikle eksi sonsuzdan 1'e kadar değişir. Daha yüksek bir COEF değeri daha iyi uyum olduğunu işaret eder (Fadare, 2008).

$$COEF = \frac{\sum_{t=1}^n (U_t - \bar{U})^2}{\sum_{t=1}^n (U - \bar{U})^2} \quad (4.23)$$

Kare ortalamalarının karekökü metodu (RMSE), Weibull fonksiyonu tarafından elde edilen değerler ile ölçülen veriler arasındaki sapmayı karşılaştırarak yöntemin doğruluğunu tahmin eder. RMSE bu sapma azaldıkça sıfıra yaklaşır (Mohammadi vd., 2016).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\hat{U}_t - U_t)^2} \quad (4.24)$$

Ortalama mutlak hata (MAE), iki değişken arasındaki farkın mutlak bir ölçüsü ve mutlak hataların ortalamasıdır. MAE'nin daha düşük değerleri daha yüksek doğruluğa işaret eder (Prema, 2016).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{U}_t - U_t| \quad (4.25)$$

4.3. Rüzgâr Makası, Türbülans Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Rampası

İki farklı yükseklikten toplanan ortalama rüzgâr hızlarının ($\overline{U_1}, \overline{U_2}$) ve güç yasasının kullanılması ile rüzgâr makası katsayılarının hesaplaması yapılır (Jain, 2016):

$$\alpha = \frac{\ln \overline{U_2} / \overline{U_1}}{\ln h_2 / h_1} \quad (4.26)$$

Türbülans tipik olarak 10 dakikadan daha az, görece küçük zaman ölçeklerinde rüzgâr hızında meydana gelen dalgalanmaları ifade eder. Türbülans temel olarak iki sebepten ötürü gerçekleşir: (i) Dünya yüzeyindeki sürtünme (friction) etkileri sebebi ile akışta meydana gelen değişimler, (ii) hava kütlelerinin yukarı yönlü hareketine neden olan termal etkiler. Genellikle bu iki etki birbirleri ile bağlantılıdır. Türbülansın bireysel rüzgâr türbinlerinin tasarım ve performansı üzerinde olduğu kadar şebekeye iletilen güç kalitesi üzerinde de çok önemli bir etkisi vardır. Türbülans yoğunluğu, genel türbülans seviyesinin bir ölçüsüdür ve denklem 4.27 ile ifade edilir (Burton vd., 2011):

$$I = \frac{\sigma}{\overline{U}} \quad (4.27)$$

Burada σ bir zaman aralığındaki rüzgâr hızı ölçüm verilerinin standart sapmasını, $\overline{U}$ ise ortalama rüzgâr hızını ifade eder.

Bir coğrafya üzerindeki rüzgâr akışı, sürekli olarak hızı ve yönü değişen bir akış yapısı ile tanımlanır. Bir topografya üzerindeki akış incelenirken sahip olduğu kesiklilik ve değişme oranının da bilinmesi oldukça önemlidir. Dolayısı ile ele alınan coğrafya üzerindeki rüzgâr akışının kesiklilik analizini belirlemek için bir çalışma yürütülmesine karar verilmiştir. Daha önce bölge üzerinde yürütülen uzun süreli rüzgâr ölçümünün verileri kesiklilik analizinde kullanılmıştır.

İki çeşit türbülans kesikliliği mevcuttur: dış kesiklilik (Yong-nian ve Ya-dong, 1989) ve iç kesiklilik (Batchelor ve Townsend, 1949). Akış alanı içinde laminar bölge ve tam gelişmiş türbülanslı bölge arasında bir geçiş bölgesi bulunur. Geçiş bölgesi içinde, türbülanslı ve laminar akış değişimli olarak yer alırken, bir uzay alanı içinde birbirleri üzerine yapışmış olmalarına rağmen aralarında açık arayüzler bulunur. Bu fenomen dış kesiklilik olarak adlandırılır ve geçiş bölgesi içinde oluşur. Aynı zamanda laminar fazlar arasındaki kısa düzensiz patlamaların rastgele oluşumu olarak da tanımlanabilir (Tritton, 1988). Bu çalışmalara ek olarak, araştırmacılar tam gelişmiş türbülans alanı içinde başka bir kesikli akış yapısı keşfetmişlerdir. Batchelor ve Townsend (Batchelor ve Townsend, 1949), hız alanına ve türevlerine karşılık gelen dalgalanmalar

elde ettiler ve küçük dalga sayılarıyla ilişkili enerjinin alan boyunca eşit dağılmadığını iddia etmişlerdir. 1981 yılında Siggia nümerik simülasyonlar yardımı ile türbülans enerji yayılımı oranının dağılımını elde etmişlerdir. Nümerik çalışmanın sonucunda enerji yayılımının %95'inin belirli bir alanda olduğu gözlemlenmiştir. Aynı sonuçlar 1991 yılında Meneveau ve Sreenivasan (Meneveau ve Sreenivasan, 1991) tarafında yapılan çalışmada gözlenmiştir. Sonuçlara göre türbülans enerji yayılım oranı, zaman veya mekanda açık bir dalgalanma sergilemektedir. Araştırmacılar bu fenomeni iç kesiklilik olarak tanımlamışlardır (McComb, 1990). İç kesiklilik üzerindeki çalışmalar vortisite veya türbülans enerji yayılımı oranı gibi bazı belirli parametrelere bağlıdır. Türbülansın iç kesikliliğinin esas karakteristiği, bu spesifik parametrelerin zaman ve mekandaki düzensiz dağılımıdır. Diğer bir deyişle zaman ve uzay alanının bazı kısımları içindeki bu parametrenin değeri çok büyüktür. Fakat bu alanların diğer kısımlarında bu değer oldukça küçük veya sıfırdır. 1970 yılında Wyngaard ve Tenekes (Wyngaard ve Tenekes, 1970), atmosferik sınır tabaka içindeki iç kesiklilik fenomenini incelemişlerdir. Daha sonra Meneveau ve Sreenivasan (Meneveau ve Sreenivasan, 1991), bazı deneysel sonuçlara ulaşmışlardır. Hajj (Hajj, 1999), özellikle atmosferik sınır tabaka içindeki kesikliliği rüzgâr hızına bağlı olarak araştırmıştır. Bu kesiklilik, türbülansın bir içsel doğası olarak ele alınmaktadır (Frisch, 1995). Rüzgâr bir türbülans fenomeni olan atmosferik sınır tabaka hareketinin bir çeşididir. Doğal olarak rüzgâr hızındaki kesikliliğin türbülans kesikliliğine kadar izlenebileceği sonucuna varılır. Böylece türbülans kesikliliği tanımı olarak rüzgâr hızı kesikliliği tanımı kullanılabilir (Ren vd., 2017).

Rüzgâr hızındaki kesiklilik, zaman ve uzay alanı içinde rüzgârın bazı istatistiksel parametrelerin dengesiz dağılımının bir karakteristiği olarak tanımlanabilir. Elbette bu tanım rüzgâr hızı kesikliliğinin nitel bir tanımlamasıdır. Bu tanımdan rüzgâr hızı kesikliliğinin ayrıntılı özellikleri elde edilemez. Rüzgâr hızı kesikliliğinin daha iyi anlaşılabilmesi için, aralıkların nicel olarak ölçülmesi için belirli parametreler belirlenebilir. Gerçek güç sistemi göz önüne alındığında, rüzgâr hızı kesikliliği rüzgâr enerjisinin dengesiz ve düzensiz çıkışına neden olur. Bu nedenle, bu metrik parametre hem rüzgâr hızı kesikliliğinin tanımında hem de mühendislik uygulamaları için pratik önemi hesaba katmalıdır (Ren vd., 2017).

Rüzgâr, rüzgâr gücü için birincil tahrik kaynağıdır. Bu yüzden, $\Delta V(t)$ hız farkı, belirlenen bir eşik değerinin üzerine çıktığında rüzgâr rampası gerçekleşmiş olur. Bu sebeple zaman alanı içindeki rüzgâr hızı rampası olaylarının dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Bazı belirli zaman periyotlarında, her periyot süresince rüzgâr hızı rampa olaylarının süresi aynı ise, rüzgâr hızı rampası büyüklüğünün aynı olduğu kabul edilebilir. Başka bir deyişle rüzgâr hızı rampası bu zaman dilimlerinde eşit olarak dağıtılır. Aksine, her periyot süresince rüzgâr hızı rampa olaylarının süresi farklıysa, rüzgâr hızı rampasının zamansal dağılımının dengesiz olduğu

anlamına gelir. Bu nedenle rüzgâr hızı rampası olaylarının süresi, zamansal dağılımın düzgünlüğünü karakterize etmek için kullanılabilir. Görev oranı, bir fenomenin toplam süre içindeki yüzdesini ifade eder. Genellikle zaman alanındaki bir olgunun eşit olmayan dağılımını ölçmek için kullanılır. Burada görev oranı, zaman alanı içindeki rüzgâr hızı rampası olaylarının oranını karakterize etmektir. Görev oranı farkı ne kadar büyük olursa, rüzgâr hızı rampası olaylarının daha eşit olmayan zamansal dağılımı gerçekleştiği söylenir (Ren vd., 2017).

Böylece, rüzgâr hızı aralığını ölçmek için rüzgâr hızı rampası görev oranı (DRWSR (β)) önerilmektedir. β değerinin daha yüksek bir değeri, T zaman dilimindeki rüzgâr hızındaki sert değişikliklerin daha uzun sürdüğünü, yani rüzgâr hızı kesikliğinin daha güçlü olduğunu gösterir. Aksine, daha düşük bir değer, rüzgâr hızındaki kesintinin daha zayıf olduğunu gösterir. Bu şekilde rüzgâr hızı aralıklarının nicel ölçümü gerçekleştirilir (Ren vd., 2017).

$$\beta = T_R \times \frac{100\%}{T} = (T_U + T_D) \times \frac{100\%}{T} \quad (4.28)$$

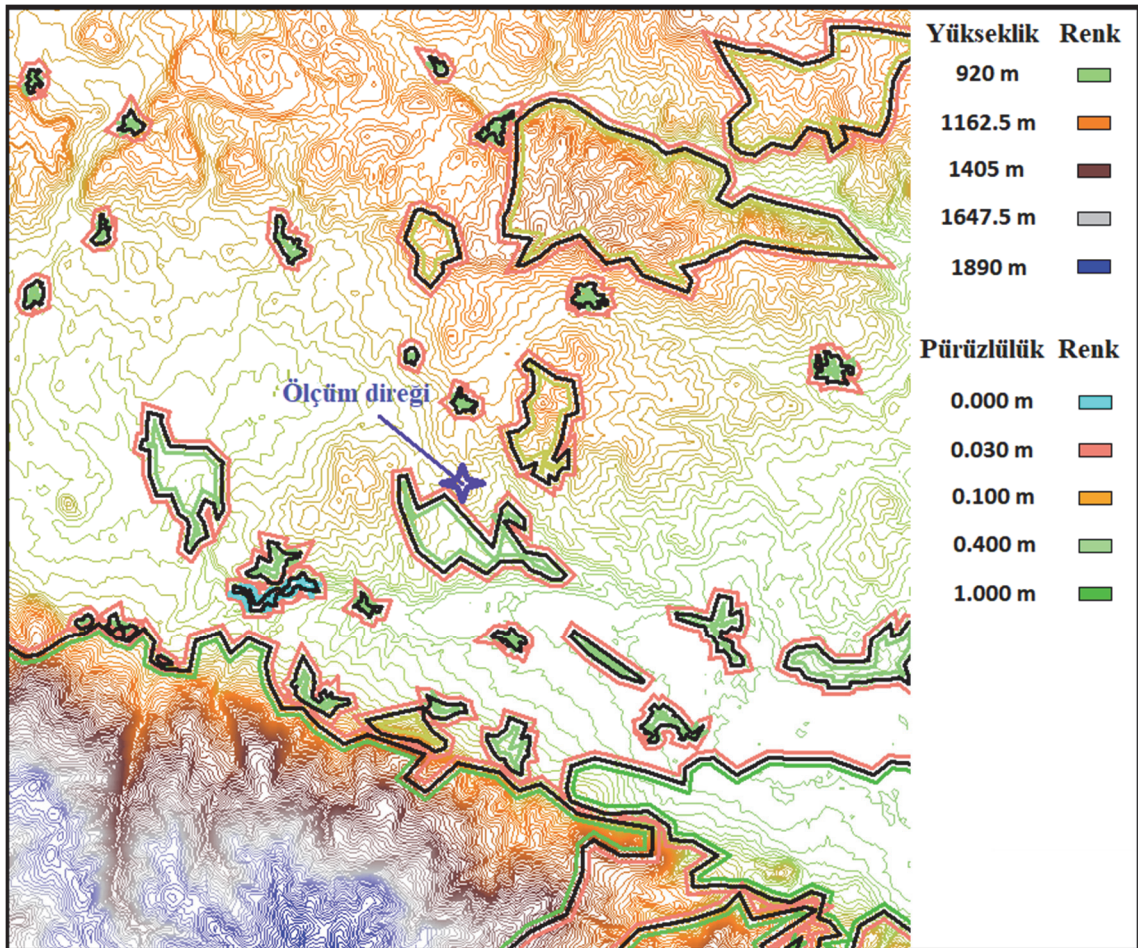
Burada T toplam gözlem süresidir, T_R gözlem süresi boyunca rüzgâr hızı rampası olaylarının gerçekleşme sayısıdır ve U ve D alt indisleri rampanın yönünü gösterir:

$$\beta_U = T_U \times \frac{100\%}{T}, \quad \beta_D = T_D \times \frac{100\%}{T} \quad (4.29)$$

4.4. WAsP Yazılımı ile Rüzgâr Atlası Analizi

WAsP, rüzgâr iklim istatistiklerinin dikey ve yatay tahminlerini yürütmek için tasarlanan bir PC programıdır. Farklı araziler üzerinde rüzgâr akışını tanımlamak için modeller içermektedir. WAsP, gözlemlenen, sahaya özgü rüzgâr ikliminin istatistiksel bir özetini sağlamak için herhangi bir rüzgâr ölçümü veri setinin analizini sağlar. Analiz edilen rüzgâr verileri, genel bir rüzgâr iklimine veya rüzgâr atlası veri setine dönüştürülebilir. WAsP veya başka bir kaynaktan elde edilen bir rüzgâr atlası veri setinin kullanılması ile WAsP, rüzgâr atlası üretmek için kullanılan ters hesaplama uygulayarak herhangi bir belirli noktada ve yükseklikte rüzgâr iklimini tahmin edebilir. Ortalama rüzgârın toplam enerji içeriği WAsP tarafından hesaplanır. Ayrıca, bir rüzgâr türbini için fiili, yıllık ortalama enerji üretiminin bir tahmini elde edilebilir. Rüzgâr türbini ve rüzgâr santrali düzeninin güç ve itme katsayısı eğrileri göz önüne alındığında, WAsP bir santraldeki her türbin için kayıpları hesaplar ve böylece tüm santralin net yıllık enerji üretimini tahmin edebilir. WAsP'in belirli bir alanın topografya özelliğinin rüzgâr üzerindeki etkilerini hesaplaması için, çevre özelliklerinin sistematik olarak tanımlanması gereklidir (Mortensen vd., 2014).

Giriş kısmında verilen daha önceki ilgili çalışmaların birçoğunda WAsP yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışmada WAsP yazılımı kullanılarak bölgenin rüzgâr atlası oluşturulmuştur. En rüzgârlı konumlar belirlendikten sonra beş farklı türbin modeli için tekno-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr ikliminin yatay olarak ekstrapolasyonun yapılması için bölgenin dijital haritasının WAsP'a tanıtılması gereklidir. Kütahya'nın orografi ve pürüzlülük haritaları, WAsP harita editörü aracı kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 4.5'te gösterilen Kütahya'nın dijital haritası, 911 yükseklik kontur çizgisine ve 35 pürüzlülük değişim çizgisine sahiptir. Pürüzlülük değişiklikleri şehir merkezi, banliyöler, çiftlik evleri, çalılar, ağaçlar ve su yüzeylerini tanımlar.



Şekil 4.5. Kütahya ve çevresinde araştırılan bölgenin dijital yükseklik ve yüzey pürüzlülüğü haritası.

4.5. Ekonomik Analiz ve Türbinlerin Güç Eğrisi Modellemesi

Bu çalışmada birçok türbin üreticisinin ticari türbinleri analizlerde kullanılmıştır. Bunlardan bir kısmı WAsP yazılımı ile birlikte gelen türbin veri tabanının kullanılması ile

gerçekleştirilmiştir. Fakat optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilirken herhangi bir üreticinin bütün türbinlerini modelleyebilecek altyapısının oluşturulması gerekmiştir. Bu sebeple WAsP yazılımı veri tabanında bulunmayan 14 adet ticari türbininin güç eğrilerini modellemek üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Birçok türbin üreticisi, ticari türbinlerinin güç eğrilerini rüzgâr hızına bağlı olarak paylaşmaktadır. Bu çalışmada, üreticisi tarafından paylaşılan ticari rüzgâr türbini güç eğrileri MATLAB yazılımına aktarılmış ve bu veriler beşinci dereceden polinom denklemleri olarak ifade edilmiştir:

$$P = \begin{cases} 0, & U < U_{cut-in} \\ c_1U^5 + c_2U^4 + c_3U^3 + c_4U^2 + c_5U + c_6, & U_{cut-in} \leq U < U_{rated} \\ P_{rated}, & U \geq U_{rated} \end{cases} \quad (4.30)$$

Birim rüzgâr enerjisi üretim maliyetini (BEM) hesaplamak için literatürde yaygın olarak kullanılan bir Net Bugünkü Değer (PVC) yöntemi kullanılmıştır (Mohammadi ve Mostafaeipour 2013, Boudia ve Guerri 2015):

$$PVC = I + C_{OMR} \left(\frac{1+i}{r-i} \right) \left(1 - \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^n \right) - S \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^n \quad (4.31)$$

Yatırımlar (I), toplam türbin fiyatına (TTP) ek olarak TTP'nin %20'sine eşit olan diğer kurulum maliyetlerini içerir. Hurda değeri (S) yatırımların %10'u olarak kabul edilir. Operasyonel bakım/onarım maliyetleri (C_{OMR}), TTP'nin yıllık maliyetinin %25'i olarak kabul edilir (toplam türbin fiyatı (TTP) / ömür boyu). Yaşam süresi (n) 20 yıldır. Faiz oranı (r) ve enflasyon oranı (i) sırasıyla %7 ve %9 olarak varsayılmaktadır (Boudia ve Guerri, 2015).

Ticari rüzgâr türbinlerinin fiyat listeleri kamuya açık değildir. Bu sebeple türbin fiyatlarını modelleyebilmek için farklı karmaşıklık düzeylerinde çeşitli maliyet modelleri kullanılmakta (Fingersh vd., 2006; Chaviaropoulos ve Natarajan 2014, Abdulrahman ve Wood 2017) ve bu modeller bazı önemli parametreler kullanılarak türbin fiyatlarını ölçeklendirmektedir. Herhangi bir maliyet ölçekleme yöntemi, kullanılmadan önce mevcut piyasa koşullarına göre düzenlenmelidir. Çoğu pazarda ortalama türbin fiyatları 2017 yılı sonunda 1000 ABD Doları/kW'nin altında olmuştur (IRENA 2018). 2016 yılında, 2,16 MW'lık bir kara rüzgâr türbini için rotor ve kule maliyet oranı sırasıyla 0,26 ve 0,22 olarak verilmiştir (Stehly vd., 2017). Almanya'daki türbin üreticilerinin verilerine göre yapılan bir analizde, daha yüksek güç kapasitesine sahip türbinlerin (3 MW < P < 4 MW), 100 metrenin altında bir hub yüksekliğine

sahip türbinler hariç, diğer türbinlere göre ($2 \text{ MW} < P < 3 \text{ MW}$), kilowatt başına daha az maliyetli olduğu rapor edilmiştir (VDMA ve BWE 2017). Bu bağlamda, basit bir maliyet modeline ulaşmak için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- (1) Referans model olarak 82 m rotor çaplı 2 MW model-82 türbin modeli seçilmiştir.
- (2) Rotor ve kule maliyet oranları sırasıyla 0,26 ve 0,22 olarak alınmıştır.
- (3) birim kW maliyeti 1050 USD / kW olarak kabul edilmiştir.

(4) Farklı rotor çaplarına ve neredeyse aynı güç kapasitesine sahip türbin fiyatları için makul tahminler yapmak amacı ile bir ölçek parametresi tanımlanmıştır. Rüzgâr gücünün rotor yarıçapının karesine bağlı olarak değiştiği bilindiği üzere, referans türbine göre rotor çapı ve güç ilişkisini gösteren bir ölçek parametresi şöyle tanımlanır:

$$sp_i = (R_i^2 / R_{ref}^2) / (P_i / P_{ref}) \quad (4.32)$$

Güç kapasitesine dayalı türbin fiyat tahmini, ölçek parametresi ve göbek yüksekliği tarafından düzenlenir:

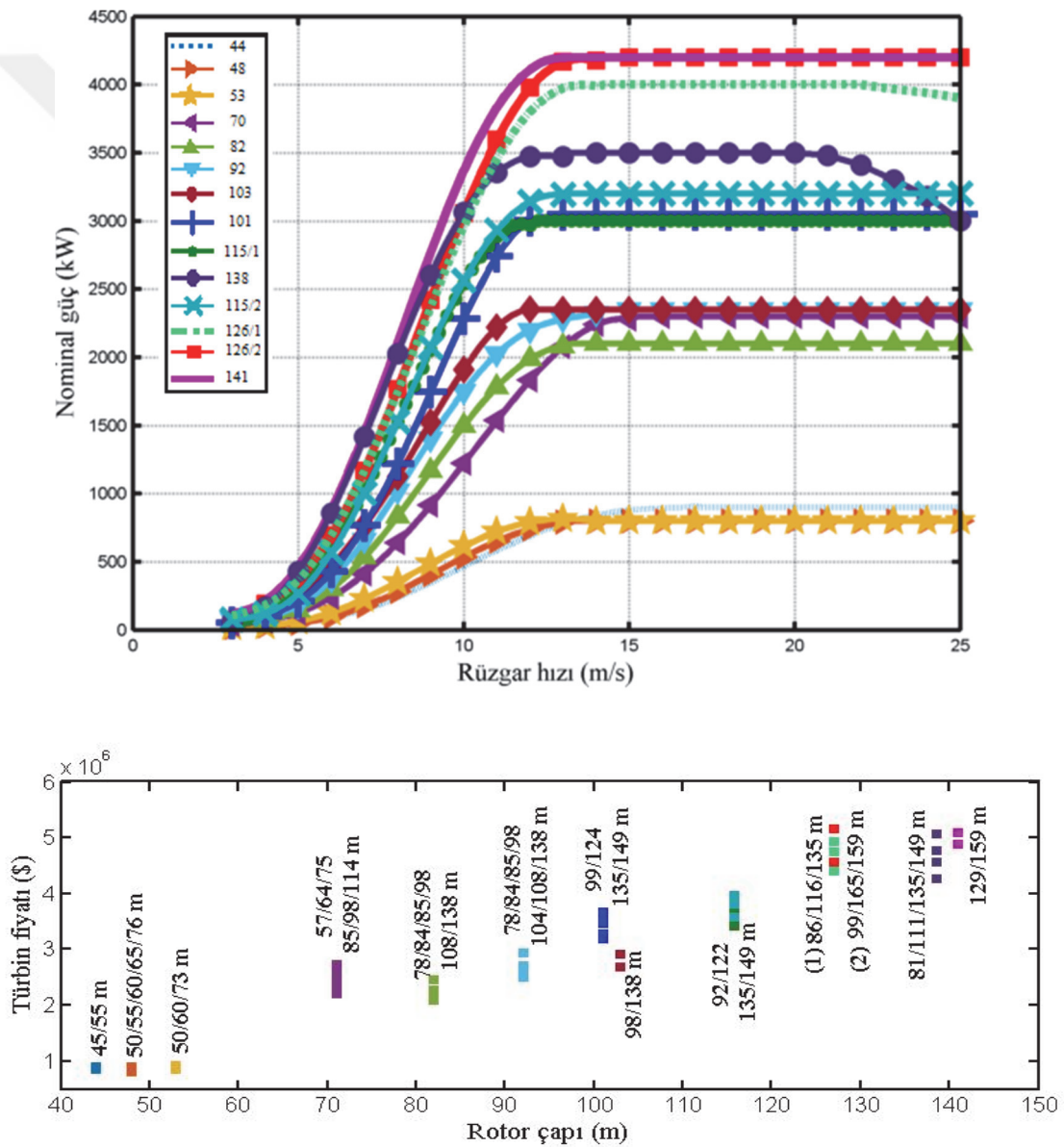
$$TP_i = (1050 P_i) \left(1 + (0.26 (sp_i - 1)) + \left(0.22 \left(\frac{H_{i,j} - H_{min,i}}{H_{min,i}} \right) \right) \right) \quad (4.33)$$

Şekil 4.6, türbinlerin güç eğrilerini ve farklı göbek yükseklikleri için fiyat tahminlerini vermektedir. Türbin tanımlaması rotor çapına göre yapılmıştır. En küçük göbek yükseklikleri için ortalama birim kW maliyeti 1082 USD/kW'tır. Model-92'nin birim güç maliyeti 85 ve 138 m yüksekliği için sırasıyla 1090 ve 1247 \$/kW iken, Model-115/2 için hesaplanan birim güç maliyeti 92 ve 135 m yükseklikte 1167 ve 1224 \$/kW'tır. Bu nedenle, basit model tahminleri son raporlarla iyi bir uyum içindedir.

4.6. Optimizasyon Yapısı

Rüzgâr çiftliği konumlandırma problemleri içerdikleri çok sayıda kısıtlama sebebi ile NP karmaşıklık sınıfında kategorize edilmektedirler. Aşırı derecede yüksek hesaplama süreleri sebebi ile birçok algoritma bu tarz problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır (Horowitz ve Sahni, 1978). Son birkaç on yılda bu problemlerin çözümüne yönelik algoritma modelleri birçok yazar tarafından araştırma konusu olmuştur.

Rüzgâr türbini çiftliği konumlandırma probleminin çözümünde, kullanıcı tarafından oluşturulması gereken modeller yer almaktadır. Çeşitli karmaşık yapılara sahip modellerin en önemlileri: rüzgâr modeli, bölge modeli, iz bölgesi modeli ve güç eğrisi modelidir. Modellerin artan karmaşıklık düzeyi gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlarken hesaplama sürelerinde de artışı beraberinde getirmektedir. Kullanıcı tanımlı modellerin belirlenmesi sonrasında bir optimizasyon modeli belirlenir. Seçilen algoritma modeli kullanıcı tarafından belirlenen bir uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak tek amaçlı veya çok amaçlı olacak şekilde bir optimizasyon çalışması yürütür.



Şekil 4.6. Türbinlerin güç eğrileri ve fiyat tahminleri.

4.6.1. Jensen iz bölgesi modeli

Enerjinin verimli kullanılması, bütün enerji çeşitlerinde olduğu gibi rüzgâr enerjisi santrallerinde de oldukça önemli yer tutar. Bireysel türbinlerden elde edilecek enerjiyi etkileyen iki önemli parametre öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi ve en önemlisi, rüzgârın esme hızıdır. İkinci etken ise, rüzgâr türbini rotorunun süpürme alanıdır. Bu sebeple rüzgâr türbini teknolojisi, atmosferik sınır tabaka etkilerinden daha az etkilenen daha geniş rotor süpürme alanına sahip rüzgâr türbinleri üretmek üzerine gelişmektedir. Ticari rüzgâr türbinlerinin tarihsel gelişimine bakıldığında bu gelişim rahatlıkla gözlenebilir. Rüzgâr türbinleri santralleri, bireysel türbinlerden ziyade birçok rüzgâr türbininin belirli bir alan üzerinde kurulması ile oluşturulan yapılardır. Bu santrallerin kurulma kararını etkileyen çeşitli etki ağırlığı seviyelerine sahip çok sayıda faktör bulunmaktadır (bölgenin rüzgâr potansiyeli, elektrik dağıtım kolaylığı, nakliye ve işletim kolaylığı, görsel beklentiler, ekolojik sınırlamalar vb.). Bölge seçiminden sonra gerçekleştirilecek rüzgâr türbinlerinin konumlandırma işleminin rüzgâr potansiyelinden maksimum düzeyde verim elde edilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Rüzgâr türbininin rotor elemanının varlığı, arkasında bulunan bölgede rüzgâr hızının azalmasına ve hava akışının girdaplı bir yapı almasına sebep olur. Rüzgârın hızında ve yapısında gelen bu değişime iz bölgesi etkileri adı verilmektedir. Bu etkiler sebebi ile aşağıakım yönündeki rüzgâr türbinleri, yapısı değişmiş rüzgâr (ortalama hızı, türbülans seviyesi) sebebi ile daha az enerji üretirler. Şekil 4.7’de Horns Rev 1 rüzgâr türbin santralinin helikopter camından çekilen iki adet görüntüsü verilmiştir. Resimlerden rüzgâr türbini varlığı ile oluşan akış bozulmaları açıkça görülmektedir (Hasager vd, 2013). Bu etkiler, bir rüzgâr türbini çiftliğinin kullanım ömrü göz önüne alındığında oldukça önemli bir hale gelmektedir. Bu sebeple bir rüzgâr türbini çiftliği yatırımından en üst düzeyde enerji elde edimini yakalamak için en iyi çiftlik yapısı elde edilmelidir. Bu edinimin gerçekleştirilmesi için iz bölgesi etkilerinin özellikleri ve aerodinamik doğası çok iyi anlaşılmalıdır. İz bölgesi üzerine gerçekleştirilecek gerçekçi çalışmalar sayesinde iç bölgedeki rüzgâr türbinleri üzerindeki negatif etkilerin giderilmesi mümkün olacaktır (Shakoor vd, 2016).

Rüzgâr türbini çiftliği üzerindeki iz bölgesi etkilerini azaltmak amacı ile iz bölgesi kusurları gerçek ile uyumlu olacak şekilde modellenmelidir. İz bölgesi dinamiğinin daha iyi anlaşılması amacı ile geliştirilen bir takım modeller literatürde kullanılmaktadır. Bu modeller iki ana başlık altında incelenmektedir: analitik/ampirik iz bölgesi modelleri ve hesaplamalı iz bölgesi modelleridir. Bir analitik iz bölgesi modeli, iz bölgesi hız değerlerini bir takım analitik ifade ile karakterize eder. Bu ifadeler, kütlelenin korunumu ve iz bölgesi bozukluğunun ampirik ifadelerine

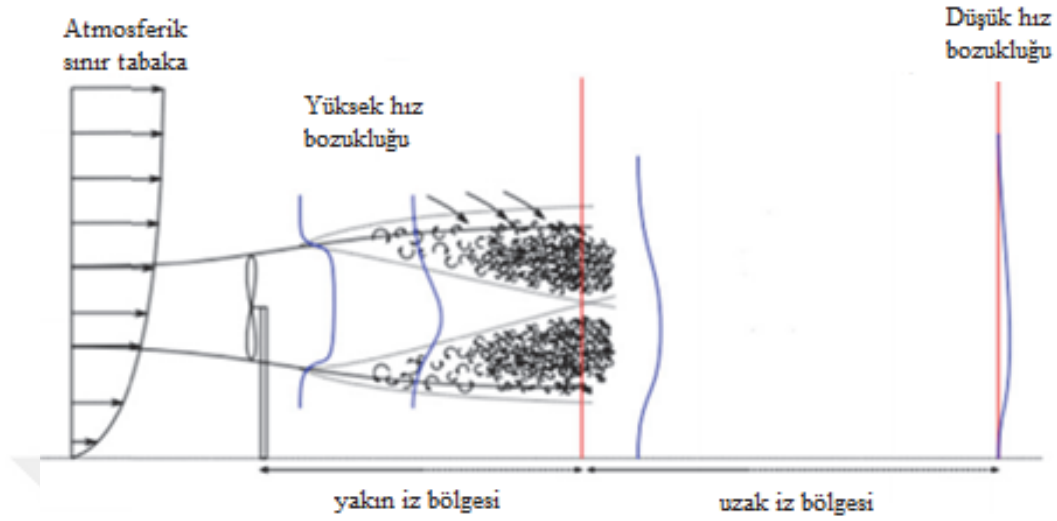
dayanmaktadır ve bu yaklaşımlar genellikle mikro konumlandırma ve rüzgâr türbini çiftliği kapasite hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bu modeller akış alanı içindeki enerji içeriğini karakterize etme girişiminde iken akış alanının kesin doğasının detaylarını göz ardı eder (Jensen, 1983; Frandsen, 2006; Katic vd, 1986; Ishihara vd, 2004). Tam bu sırada, hesaplamalı iz bölgesi modellerinde, basitleştirilmiş veya basitleştirilmemiş akışkan akış denklemleri, iz bölgesi hız alanının elde edilmesi amacı ile çözümlenmesi gerekir (Ainslie, 1988; Crespo ve Hernveez, 1989).

Rüzgâr türbini iz bölgeleri, güç kayıpları ve yükleme etkilerine göre iki ayrı türe ayrılır: yakın iz bölgesi ve uzak iz bölgesi. Yakın iz bölgesi, aşağı akım yönünde türbinden iki veya üç rotor çapı uzaklıkta, türbin geometrisinin rüzgâra doğrudan etki edebildiği bölgedir. Şekil 4.8, bir rüzgar türbini arkasında oluşan akış yapısını göstermektedir.



Şekil 4.7. (a) Horns Rev 1 deniz üstü rüzgâr çiftliği (12 Şubat 2008 tarihinde güneydoğudan yaklaşık 10:10 UTC'de fotoğraflandı.) (b) (a) ile aynıdır, ancak kısa bir süre sonra güneyden görülmektedir. Fotoğrafçı: Christian Steiness. (Hasager vd, 2013).

Uzak iz bölgesi içinde türbülans, yakın iz bölgesine kıyasla daha baskın bir faktördür. Uzak iz bölgesinde, akış koşullarını tanımlayan başlıca iki mekanizma konveksiyon ve türbülans yayılımıdır. Yeterli derecede uzak aşağıakım yönünde, momentum bozulmasının hasar verici etkilerinin ve artan türbülans seviyesinin türbülans yayılımı sayesinde ortadan kalkması beklenmektedir. Rüzgâr türbini çiftliği optimizasyon problemlerinde, uzak iz bölgesi etkileri yakın iz bölgesi etkilerine göre daha önemlidir. Bu problemlerin analitik çözümlemesindeki en basit yol uzak iz bölgesinin benzer doğal yapısından faydalanarak türbülans yoğunluğu ve hız hasarları için formüller elde etmektir.



Şekil 4.8. Rüzgâr türbini arkasındaki hız profili (Sanderse, 2009).

Jensen iz bölgesi modeli rüzgâr türbinin iz bölgesi içinde bir kontrol hacime momentumun korunumu yasası uygulanması neticesinde türetilmiştir. Momentumun korunumu yasası türbin arkasında oluşan iz bölgesi yarıçapının aşağıakım mesafesi ile doğrusal olarak genişlediğini belirtir. Jensen analitik modeli (Jensen, 1983), iz bölgesi modelleri arasında en eski ve en basit modeldir ve kabul edilebilir hata oranları ile rüzgâr hızı bozukluklarını öngörebilir. Jensen tarafından önerilen bu model daha sonra (Katic vd, 1986; Frandsen, 2006) tarafından geliştirilmiştir. Jensen iz bölgesi modelinin şematik görünümü Şekil 4.9'da verilmektedir. Jensen iz bölgesi modelinde, iz bölgesinin doğrusal olarak genişlediği varsayılmıştır:

$$R_{W,ij} = R_i + \alpha y_{ij} \quad (4.34)$$

Burada α iz bölgesi genişleme katsayısını ifade eder ve bu çalışmada WAsP yazılımının standart değeri olan 0,075 olarak alınmıştır. İ türbinin varlığından ötürü oluşan iz bölgesinin j türbininde meydana getirdiği hız bozukluğu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$HB_{U,ij} = \left(\frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + \frac{\alpha y_{ij}}{R_i} \right)} \right) \left(\frac{A_{ij}}{A_j} \right) \quad (4.35)$$

C_T rüzgâr hızına bağlı olarak değişen itme katsayısıdır. Dört adet Vestas türbininin itki katsayısı eğrileri kullanılarak rüzgâr hızına bağlı değişen bir itme katsayısı eğrisi uydurulmuştur

(Şekil 4.9.b). Bir rüzgâr türbini üzerinde birden fazla türbinin iz bölgesi etkisi bulunabilir. Bunların bir bileşke değerini elde etmek için aşağıdaki formül kullanılır:

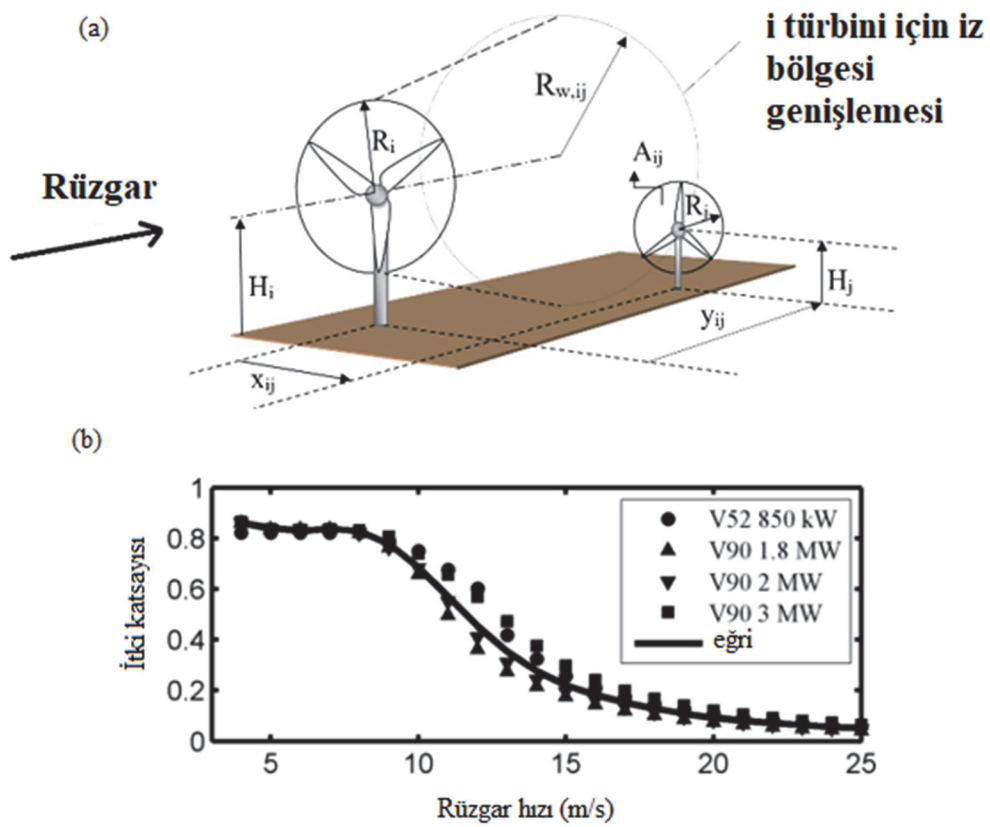
$$HB_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_T-1} HB_{U,ij}} \quad (4.36)$$

Son olarak j-türbin rotorunun önündeki hızı denklem 4.37 ile hesaplanır:

$$U_j = U_{\infty,j} (1 - HB_j) \quad (4.37)$$

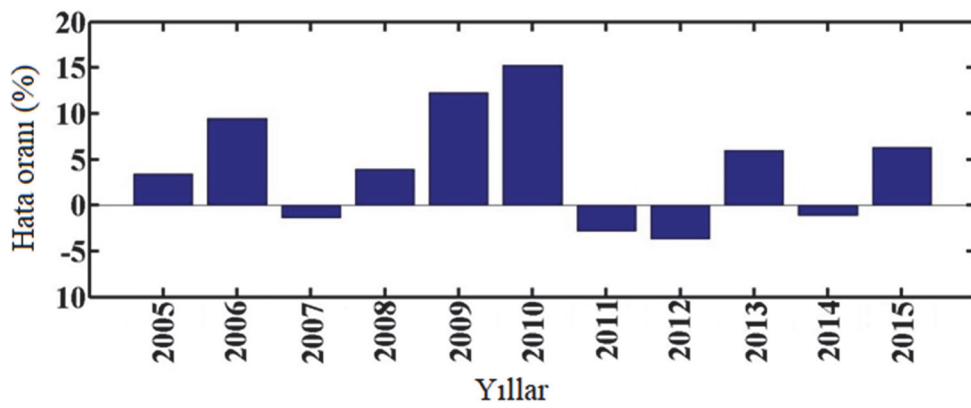
$U_{\infty,j}$ j türbinin göbek yüksekliği seviyesindeki serbest akış rüzgâr hızıdır ve aşağıdaki gibi referans ölçüm yüksekliği ve referans hız değeri temel alınarak hesaplanır:

$$U_{\infty,j} = U_{ref} \left(\frac{H_j}{H_{ref}} \right)^{0.143} \quad (4.38)$$



Şekil 4.9. (a) Jensen iz bölgesi modelinin genel şeması (b) uydurulmuş itki katsayısı eğrisi.

Abdulrahman ve Wood (Abdulrahman ve Wood, 2017), Horns Rev 1 rüzgâr çiftliğinin uzun dönemli yıllık enerji üretimi verilerini kullanarak Jensen uyanık modelini doğrulamışlardır. Yıllık enerji üretimi hesaplamalarında bölgenin üç yıllık rüzgâr ölçüm verilerini kullanmışlardır. Bu yıllık enerji üretimi sonuçlarının kullanılması ile farklı yıllar için Jensen iz bölgesi modelinin hata oranlarını hesaplamışlar ve uzun dönem hata oranını %4 olarak vermişlerdir. Şekil 4.10, 2005-2015 yılları arasında, Jensen iz bölgesi modeli kabulü altında hesaplanan yıllık üretim değerlerinin gerçek üretim verilerinden sapmasını göstermektedir.



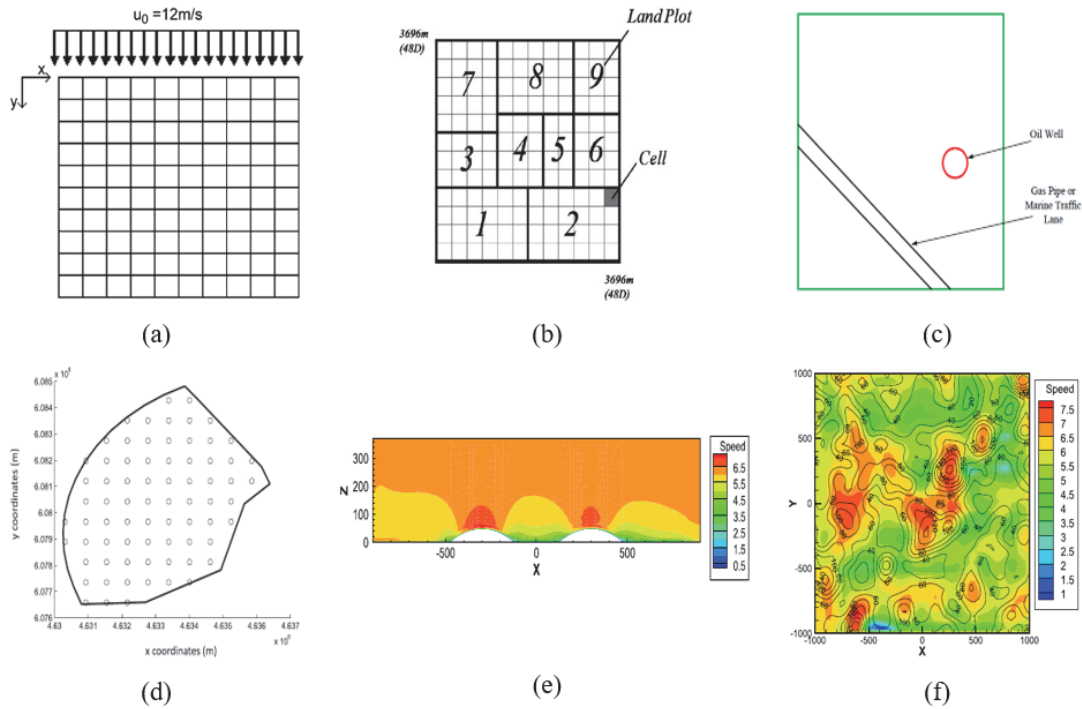
Şekil 4.10. Jensen iz bölgesi modelinin gerçek veriler ile kıyaslanması.

4.6.2. Arazi modellemesi

Bu çalışmanın başlangıç aşamasındaki literatür taraması neticesinde benzer yayınlarda kullanılan farklı arazi modellemelerini inceleme imkanı doğmuştur. Şekil 4.11’de önemli görülen örneklerin bir derlemesi verilmiştir.

Benzer konumlandırma problemleri hakkında çalışma yapan araştırmacıların kullandığı en yaygın ve basit yaklaşım, kare kesitli, arazinin orografik yapısının hesaba katılmadığı düz arazi yaklaşımıdır (Şekil 4.11.a). Bu çeşit bir arazi modellemesi daha çok deniz üstü rüzgâr santralleri için uygulanabilir. Basit yapısı sayesinde öncü çalışmalarda araştırmacılar bu modele yönelmişlerdir. 2010’lu yılların başına kadar bu modelleme hâkim model olarak çalışmalarda yerini almıştır. Bu modelde genellikle, alan, ızgara yöntemi kullanılarak belirli parçalara bölünür veya oluşturulan hücrelerin merkezleri ya da kesişim noktaları olası rüzgâr türbini noktaları olarak atanır. 2010’lu yıllardan sonraki çalışmalarda sınırlandırılmamış yaklaşımlar üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca farklı arsa sahiplerinin katılımcı olduğu parçalı modeller üzerine de çalışmalar yapılmıştır (Şekil 4.11.b). Kare kesitli alan modellerinden sonra dikdörtgen, kesitli modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu arazi modelleri üzerinde çeşitli kısıtlama

uygulamaları da gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11.c). Araştırmacılar özellikle ana karada kurulan rüzgâr santralleri alanlarının düz kesitten ziyade düzensiz şekle sahip olduğunu söylemişler ve düzensiz şekilli arazi modellemelerini araştırmışlardır (Şekil 4.11.d). Buna ek olarak araştırmacılar arazinin yeryüzü yapısının rüzgâr akışını büyük oranda etkilediğini söylemişlerdir. Bu sebeple arazi orografya yapısının hesaba katıldığı karmaşık arazi modellemeleri kullanmışlardır (Şekil 4.11.e ve Şekil 4.11.f).



Şekil 4.11. Literatürde kullanılan bölge modeli örnekleri (a) (Mosetti vd., 1994) (b) (Chen ve MacDonald, 2013) (c) (Hou vd., 2016) (d) (Salcedo-Sanz vd., 2014) (e) (Song vd., 2015) (f) (Song vd., 2015).

Bu çalışmada, optimizasyon aracı içindeki arazi modellemesinin oluşturulma sürecinde üç aşamalı bir hedef belirlenmiştir. Öncelikle, literatürde sıklıkla kullanılan düz arazi modellemesini kullanarak problem en temel seviyeden irdelenmeye başlanmıştır. Oluşturulan matematiksel modelden elde edilen veriler, önceki benzer çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmıştır. İkinci aşamada, düzensiz şekilli bir alan modeli oluşturmaya yönelik çalışma yürütülmüştür. Üçüncü aşamada, arazi orografya yapısını hesaba katabilen bir model oluşturulmuştur.

İlk aşamada, literatürde en çok karşılaşılan (Mosetti vd., 1994) 2000 m x 2000 m düz kare alan modeli 50x50 hücreye bölünmüştür. Bütün kesişim noktaları, olası rüzgâr türbin konumu olarak atanmıştır. Böylece, olası 2601 türbin noktası üzerinde en iyi santral düzenine ulaşılması amaçlanmıştır. Rüzgâr türbini konumlandırma çalışmalarında, türbinler arası mesafelerin kontrol edilmesi önemlidir. Yakın iz bölgesinin negatif etkilerinden kaçınmak için türbinler arasındaki mesafenin en az 3 rotor çapı mesafesinde konumlandırılması gerekmektedir. Günümüz rüzgâr türbini santrallerinden örnek verilirse, Horns Rev 1 rüzgâr türbin santralini oluşturan türbinler arasında 7 rotor çapı mesafe bulunurken, Lilgrund rüzgâr türbin santralinde en düşük mesafe 3,3 rotor çapı kadardır (Tuhfe ve Giebel, 2016). Bu çalışmanın ilk aşamasında, türbinler arası en düşük mesafe 200 m (5 rotor çapı) olacak şekilde hesaplamalar yürütülmüştür. Kaotik yerleştirme yapan algoritma modelinin, 5 rotor çapı mesafesinden daha yakın mesafeler içerisinde türbin konumlandırması yapabileceği açıktır. Bu sebeple, türbinler arası mesafe kontrolü yapılması gerekmiştir. Başlangıçta, kaotik olarak yerleştirilen rüzgâr türbinleri arasındaki mesafeler kontrol edilmiş ve beş rotor çapı mesafesinden daha düşük değerler tespit edildiğinde işlem iptal edilmiş ve tekrarlanmıştır. Artan karmaşıklık ile hesaplama sürelerinin çok yüksek değerlere çıkması başka bir tasarım ihtiyacı doğurmuştur.

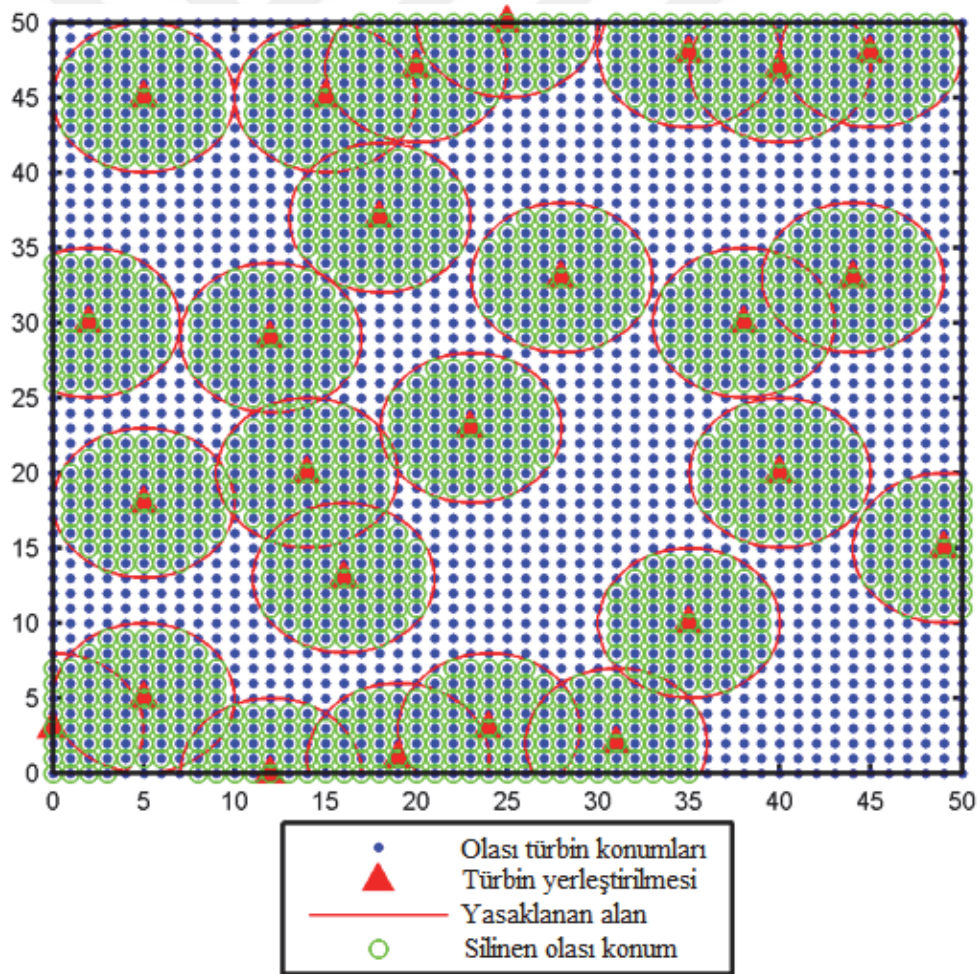
Şekil 4.12’de alan modeli ve türbin konumlandırma işleminin yapısı verilmiştir. 50 x 50 parçaya bölünen alan modeli üzerinde 2601 nokta, olası rüzgâr türbin konumu olarak atanmıştır (mavi halkalar). İlk rüzgâr türbini kaotik olarak atanmıştır (kırmızı üçgen). Türbin konumu merkez olarak kabul edilmiş ve beş rotor çapına eşit değerde bir yarıçap değerine sahip, sınırlandırılmış dairesel kesit alanı çizilmiştir (kırmızı daire). Bu alan içerisinde yer alan olası konum noktaları olası konum havuzundan silinmiştir (yeşil daireler). Sonraki türbinler için aynı işlem tekrar edilmiştir. Böylece tek bir seferde, kriterlere uygun rüzgâr türbin konumlandırması yapılmıştır. Bu türbin konumlandırma yaklaşımının, bir önceki “tüm türbinleri dağıt-kontrol et” yaklaşımına göre hesaplama sürelerini azalttığı gözlenmiştir.

Gerçek uygulamalarda çoğunlukla alan kısıtları sebebi ile santral alanları düzenli bir kesit ile karakterize edilemez. Dolayısı ile harita üzerinde belirlenen bir sınır hattı optimizasyon aracına geçerli harita ölçeğinde tanıtılması gereklidir. Ayrıca bütün olası türbin konumlarının bu düzensiz sınır içerisinde olması gerekmektedir. Bu sebeple Gu ve Wang (Gu ve Wang, 2013) tarafından önerilen metodoloji uygulanmıştır.

Seçilen düzensiz şekil sınırı, haritadaki diğer renklerden farklı bir renkle tanımlanmalıdır (Şekil 4.13.a). Burada Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü karşısında seçilen hayali sınır, seçilen bölgedeki yerleşim yerleri ve tarım alanları dikkate alınarak

oluşturulmuştur. Belirtilen renk ölçeği aralığında renkler içeren pikseller tespit edilir (Şekil 4.13.b). Bu piksellerin kenar noktalarını tanımlamak için Canny algoritması (Canny, 1987) olarak adlandırılan bir kenar algılama algoritması uygulanır (Şekil 4.13.c). Bu piksel köşelerinin birleştirilmesi neticesinde bir çokgen elde edilir. Kontur izleme ve kenar yumuşatma filtreleri, çokgen sınırdaki düzensizlikleri gidermek için uygulanır. Çokgen, piksel birim cinsinden Kartezyen koordinatlarına aktarılır (Şekil 4.13.d). Piksel biriminin uzunlukları harita ölçeği kullanılarak metreye dönüştürülür (Şekil 4.13.e). Poligon yaklaşımı algoritması (Kolesnikov, 2012), tespit edilen çokgenin ana karakteristiğini bozmadan uygulanabilir. Böylece, hayali düzensiz sınır, M-köşeli bir Q-çokgeni ile ifade edilir:

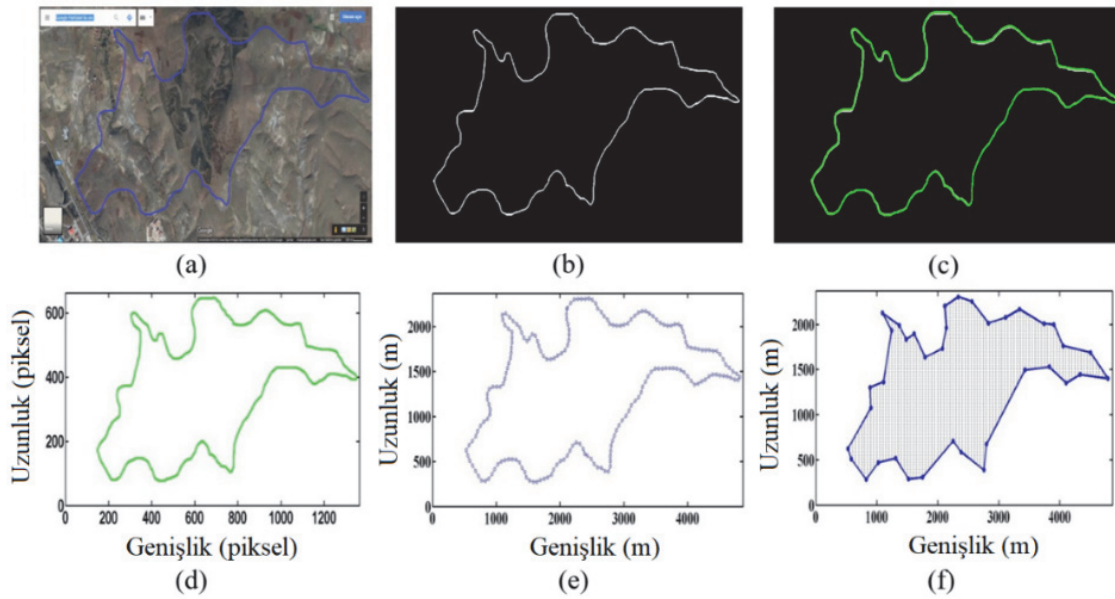
$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_M, q_1] \quad (4.39)$$



Şekil 4.12. Düz arazi yaklaşımı.

Işın kesişim yöntemi kullanılarak, belirlenen poligonun dışındaki olası konumlar silinir (Şekil 4.13.f). Işın kesişim yöntemi (Huang ve Shih, 1997), belirlenen sınır poligonu ile olası konumlar arasındaki uzaysal ilişkiyi hesaplayabilmektedir. Tüm olası konumlar, bir konum vektörü Z ile tanımlanır:

$$Z = [z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{N_T}] = [(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_i, b_i), \dots, (a_{N_T}, b_{N_T})] \quad (4.40)$$



Şekil 4.13. Düzensiz arazi modeli işlem basamakları (a) seçili bölgenin haritası (b) harita üzerinde belirtilen rengin tespit edilmesi (c) işaretli sınırın tespit edilen kenarları (d) kontur izleme (e) pikselden metreye geçiş (f) optimum poligon yaklaşımı ve olası türbin yerlerinin tespiti.

Olası bir z_i noktasından çizilen bir yarım çizgi ve j kenarı arasında bir kesişmenin varlığı denetlenir. Bu yarım çizgi l_i ile gösterilir ve dikey, yatay veya eğik olarak çizilebilir. Yarım çizgi dikey olarak tanımlanmışsa, yarım çizgi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x = a_i, \quad y \in [b_i, +\infty) \quad (4.41)$$

$$\varphi_j(x) = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j}(x - x_j) + y_j, \quad \begin{array}{ll} \text{if } x_j < x_{j+1} & x \in (x_j, x_{j+1}) \\ \text{if } x_j > x_{j+1} & x \in (x_{j+1}, x_j) \end{array} \quad (4.42)$$

$x_j < x_{j+1}$ varsayımı altında, l_i ve j kenarı arasındaki kesişme sayısı şu denklem ile belirlenir:

$$\xi_j = \begin{cases} 1, & b_i < \varphi_j(a_i) \quad \text{ve} \quad a_i \in (x_j, x_{j+1}) \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4.43)$$

Eğer bir kesişme tespit edilirse, ξ_j 1 olarak, edilmez ise 0 olarak atanır. Böylece, olası türbin konumu z_i 'den çizilen yarım çizgi ve sınır poligonu Q arasındaki tüm kesişme noktalarının sayısı tanımlanır:

$$C(z_i, Q) = \sum_{j=1}^M \xi_j \quad (4.44)$$

Düzensiz sınır poligonu Q içindeki olası türbin konumu z_i 'nin fizibilitesi θ_i ile gösterilir ve denklem 4.45 ile tanımlanır:

$$\theta_i = \text{mod}(C(z_i, Q), 2) \quad (4.45)$$

θ_i 'nin 1 olarak hesaplanması, olası türbin konumunun (z_i) seçilen düzensiz santral alanının içinde olduğu anlamına gelir. Hesaplamalar her olası türbin konumu için gerçekleştirilir ve istenmeyen konumlar olası konum alanından silinir.

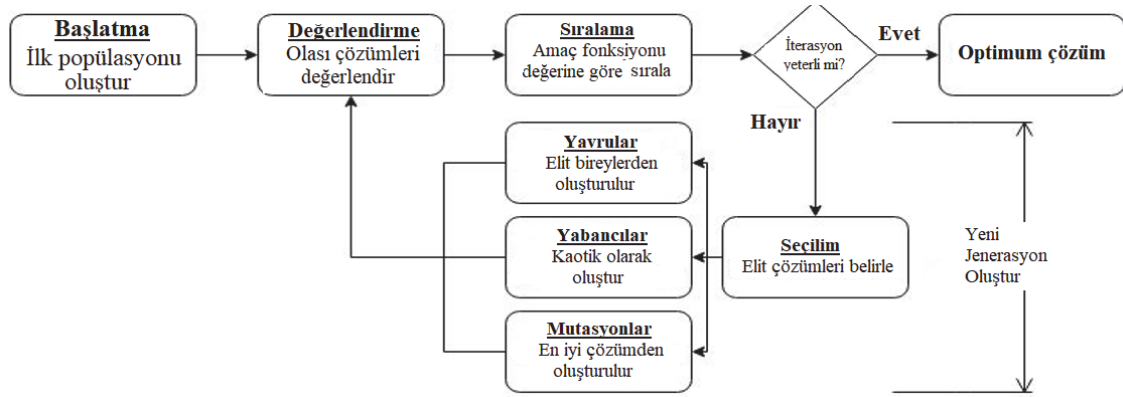
Orografik yüksekliğin hesaba katıldığı üçüncü aşama alan modelleme, WAsP için tanımlanan dijital yükseklik haritasının her bir olası türbin konumu için optimizasyon aracında tanımlanması ile gerçekleşmektedir.

4.6.3. Algoritma modelleri

Elitist genetik algoritma

Bu çalışmada kullanılan elitist genetik algoritma Liu ve Wang'ın (Liu ve Wang, 2014) ilgili çalışmalarında santral konumlandırma problemlerinin çözümü için önerdikleri algoritma temel alınarak hazırlanmıştır. Algoritmanın akış şeması Şekil 4.14'te görülmektedir.

Çalışmanın başlangıç aşamasında nispeten basit modeller ile birlikte oluşturulan algoritma yapısı, gelişen model yapıları ile birlikte gelişim göstermiştir. Öncelikle, düz arazi modellemesi ve tek bir türbin tipi için yapılan hesaplamalar için oluşturulan algoritma yapısı aktarılmış ve yapılan iyileştirmeler belirtilmiştir.



Şekil. 4.14. Elitist genetik algoritma akış şeması.

Başlangıç popülasyonu oluşturulurken, yeterli düzeyde çeşitliliğin sağlanması adına kaotik harita metodu kullanılarak 0 ile 1 aralığında değişen rastgele sayılar üretilir. Üretilen sayılar, olası rüzgâr türbini konum sayısı ile çarpılır ve sonuç en yakın tam sayıya yuvarlanır. İstenilen rüzgâr türbini sayısı kadar olası pozisyona rüzgâr türbini atanır. Buradan anlaşılacağı üzere, algoritmanın ilk yapısı tek bir türbin tipi için türbin sayısını tasarım parametresi olarak kabul etmektedir. Algoritmanın ilerleyen aşamalarında, farklı türbin tiplerinin kullanılması ile bu yaklaşım kaçınılmaz olarak terk edilmiştir. Algoritmanın son aşamasında, algoritma tasarımcıdan tasarlamak istediği santralin minimum güç kapasitesini ister. Algoritma, istenen minimum güç değerine ulaşana kadar türbin eklemesine devam eder.

Her jenerasyondaki bir birey olası bir çözümü temsil etmektedir. Bütün bireylerin toplamı bir jenerasyona eşittir. İlk jenerasyon oluşturulduktan sonra, her bir olası çözüm, iz bölgesi etkileri açısından değerlendirmeye alınır ve verilen konumlandırma için güç kapasitesi ve/veya yıllık enerji üretimi belirlenir. Son aşamada, algoritma yapısı birim enerji maliyetini optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Tek tek değerlendirilen ve güç kapasiteleri belirlenen olası çözümler yine güç kapasitelerinin kalitesine göre sıralanır. Yapılan sıralama işleminin ardından, tasarımcı tarafından belirlenen sayıda en iyi güç kapasitesine sahip olası çözümler elitler olarak adlandırılır ve doğrudan bir sonraki jenerasyona aktarılır.

Tasarımcı tarafından belirlenen sayıda yavru bireyler, elit olarak seçilen bireylerden tekrardan türetilir. Bu türetme işlemindeki ilk basamakta, elit olarak seçilen bireylerin en kötü performanslı rüzgâr türbini bulunur ve silinir. Bundan sonra, her bir yavru çözüm için eksilen türbin yerine yeni bir rüzgâr türbini atanır. İlk jenerasyonun oluşturulmasında kullanılan kaotik harita metodundan yararlanılarak yeni türbinin konumu belirlenir. Bu aşamada, yine olası türbin çakışmalarının önüne geçilmesi amacı ile oluşan her birey kontrol edilir. Bu işlem özdeş

türbinlerin kullanıldığı algoritma yapılarında oldukça basittir. Fakat algoritmanın ilerleyen aşamalarında farklı rotor çapına sahip türbinlerin kullanılması, türbinler arası mesafe kısıtlamasını değişken kılmaktadır. Bu durum, silinen daha küçük rotor çaplı bir türbin yerine büyük bir türbinin atanamamasına ve dolayısı ile algoritma modelinin düzgün çalışmamasına sebep olur. Bu sebeple, algoritmanın son halinde yavru bireyler oluşturulurken, elit bireylerden %25 oranına kadar rastgele bir sayıda kötü performans gösteren türbinler silinir.

Olası çözüm havuzunda, tekilliği gidermek ve çözüm çeşitliliğinin sağlanması adına yabancıların eklenmesi işlemi uygulanır. Tasarımcı tarafından belirlenen sayı kadar olası çözüm, o anki jenerasyondan silinir. Kaotik harita metodu yolu kullanılarak, silinen sayı kadar yabancı birey eklemesi gerçekleştirilir.

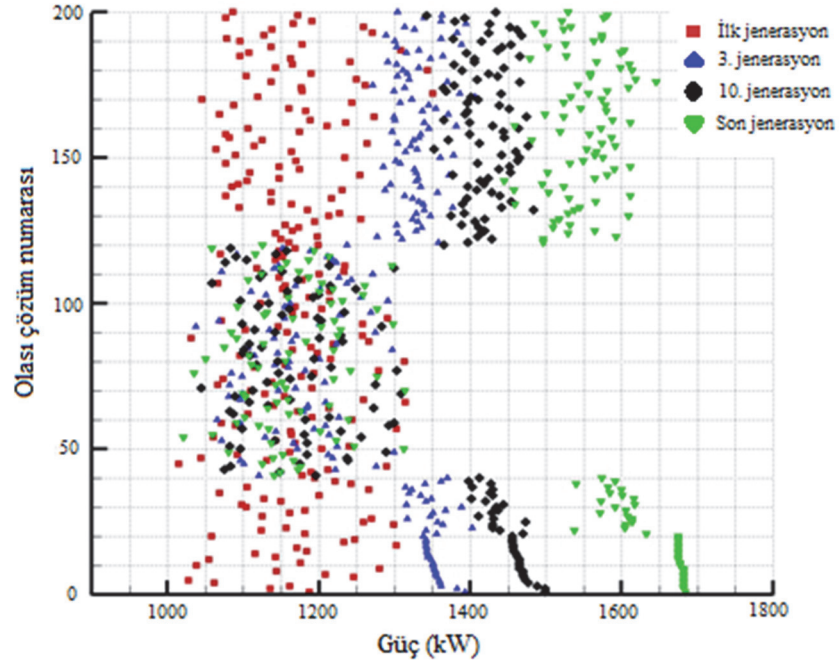
Yeni jenerasyonun türetilmesindeki son basamak mutasyon basamağıdır. Mutasyon basamağında yeni bir birey oluştururken, o anki jenerasyonun en iyi bireyinden rastgele seçilen bir rüzgâr türbini silinir ve yerine rastgele yeni türbin atanır.

Bu çalışmanın başlangıç aşamasında, 12 ayrı yönden frekans dağılımı verilen bir rüzgâr verisi için algoritma test edilmiştir. Buradaki amaç 4 farklı jenerasyon kategorisinin, iterasyon boyunca değişim eğilimini incelemektir. Şekil 4.15, bir optimizasyon işlemi boyunca her bir çözümün gelişimini göstermektedir. İşlem boyunca ilk, üçüncü, onuncu ve sonuncu jenerasyonun bütün olası çözümleri grafikte verilmiştir. 200 çözümden oluşan her jenerasyonda elitler, yavrular, yabancılar ve mutasyonlar için yüzdesel oranlar sırası ile %10, %10, %40 ve %40'dır.

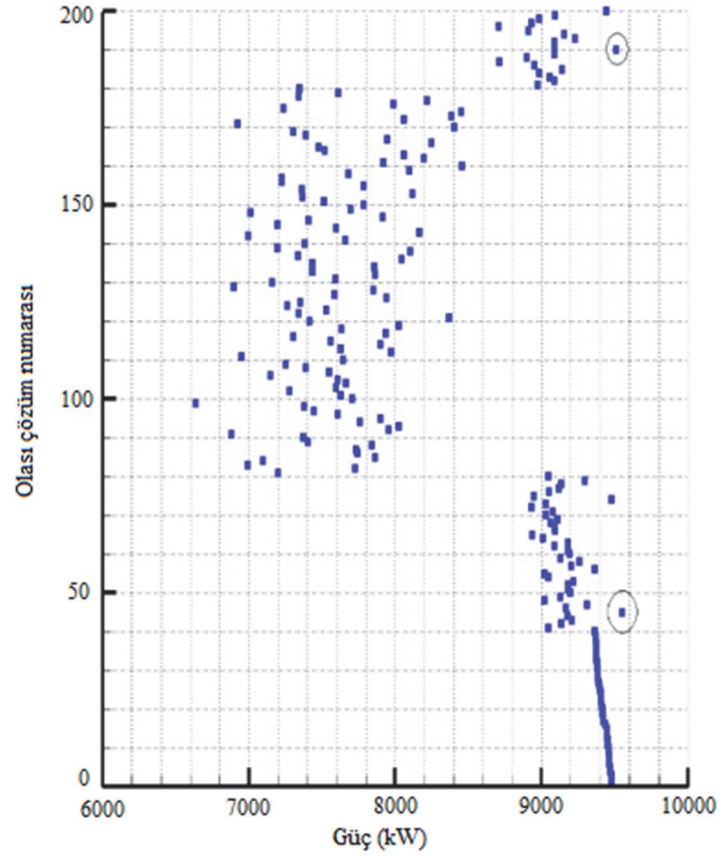
Kırmızı renk ile temsil edilen ilk çözümde, rastgele olarak dağılan çözümler içerisinde elit bireylerin seçilmesi ile en iyi çözümlerin korunması sağlanmıştır. Şekilden görüleceği üzere, bu bireylerden türetilen yeni çözümler daha iyi sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.16, iterasyonun ortalarında tek bir jenerasyonun bütün sonuçlarının kıyaslamasını vermektedir. Burada görüleceği üzere, elit bireylerden daha yüksek güç değerine ulaşan iki adet çözüm, yavru ve mutasyon basamakları ile türetilmiştir. Bu çözümler daire içerisinde gösterilmiştir.

Klasik yapay arı kolonisi algoritması

Bu çalışmada, klasik yapay arı kolonisi (KABC) algoritması (Karaboğa, 2005; Karaboğa ve Baştürk, 2007, 2008) ikinci algoritma modeli olarak seçilmiştir. Bu algoritmanın seçilme sebebi, bu algoritmanın daha önceki rüzgâr türbini konumlandırma çalışmalarında detaylı olarak ele alınmamış olmasıdır. Böylece, KABC algoritmasının seçilen konumlandırma problemi için çözüm performansı kıyaslamalı olarak irdelenmiştir.



Şekil 4.15. Bir optimizasyon işlemi esnasında iterasyon gelişimi.



Şekil 4.16. İterasyon esnasında bir jenerasyonun bütün çözümlerinin değerlendirilmesi.

Arı sürülerinin, ortak zekâ kullanımı neticesinde besin kaynağı seçme işleminin en basit modeli 3 temel bileşenden (Yemek kaynakları, işçi arılar ve boşta olan arılar) meydana gelir. Bu basit model, önemli iki adet davranışı (bir nektar kaynağına görevlendirme yapılması, bir nektar kaynağının terk edilmesi) tanımlar. Yemek kaynaklarının değeri birçok faktöre (yuvaya olan yakınlık, nektarın kalitesi, yemeğin çıkarılma kolaylığı) bağlı olarak belirlenmektedir. İşçi arılar, belirli bir zamanda bir besin kaynağı ile ilişkilendirilen arılar olarak tanımlanır. Bu arılar, bu kaynaklar hakkında önemli bilgileri paylaşır. Boşta olan arılar, sürekli olarak kaliteli bir besin kaynağı arayışında olan arılardır. Bu arılar, iki gruba (kâşif arılar, gözcü arılar) ayrılır. Kâşif arılar, yuva çevresinde yeni yemek kaynağı arayışında olan arılardır. Gözcü arılar ise, yuva içerisinde beklerler ve işçi arıların paylaştıkları bilgiler neticesinde bir yemek kaynağı seçerler. Bütün zengin kaynaklar hakkında bilgi toplayan arı, kendi tahminine göre en faydalı kaynağa işçi arı olarak gider. Daha kaliteli kaynaklar hakkında daha fazla bilgi paylaşımı gerçekleşmesi sebebiyle bu kaynakların seçilme olasılığı artar.

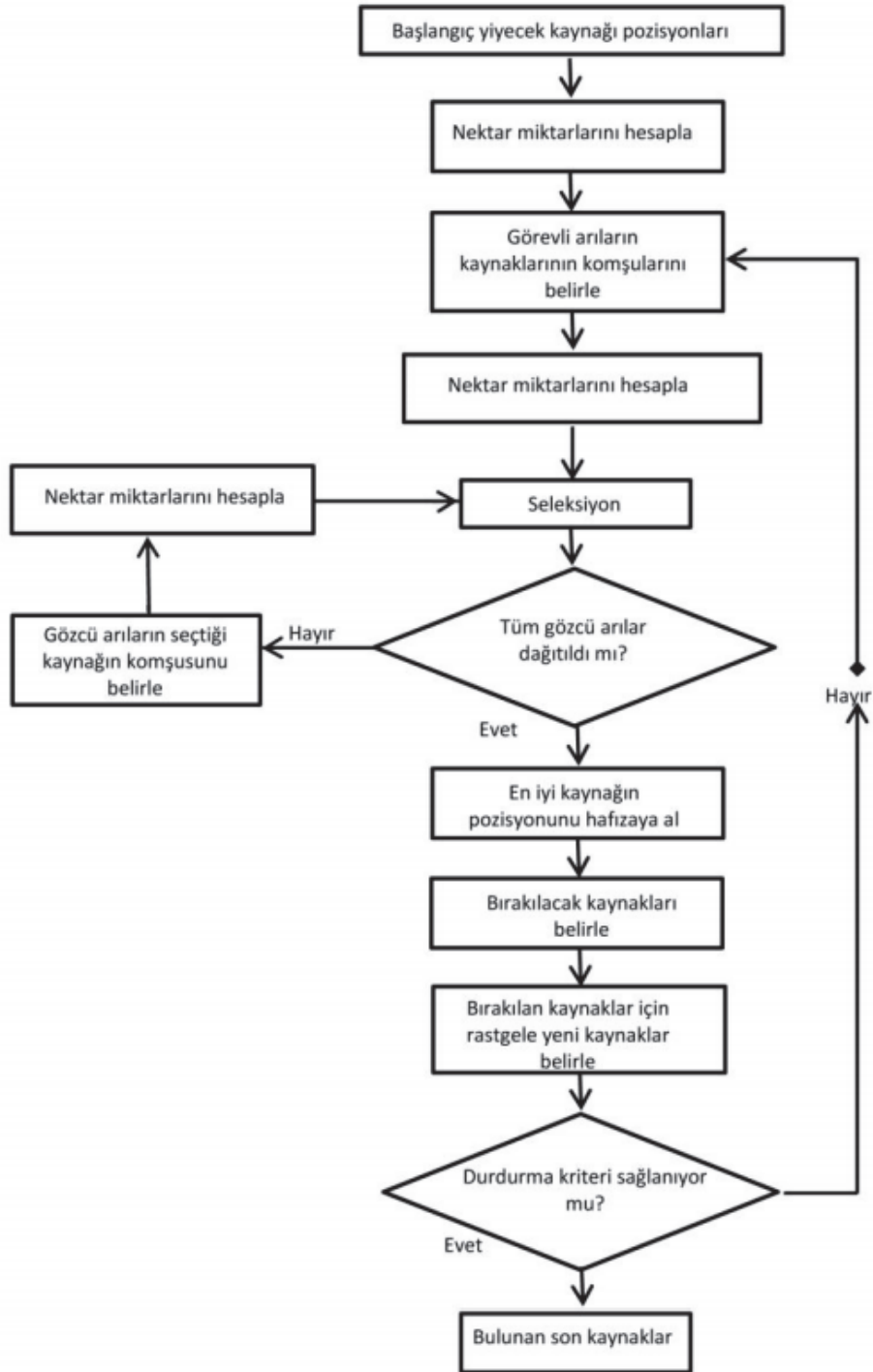
İşlemin başında, potansiyel bir yiyecek arayan arı, boşta olan arı olarak başlar. Bu arının yuva etrafındaki besin kaynakları hakkında bir bilgisi yoktur. Böyle bir arı için iki olasılık (kâşif arı, gözcü arı) bulunmaktadır. Yemek kaynağını belirledikten sonra yemek kaynağına giden gözcü arı, işçi arı olur. Bir miktar yemeği alan işçi arı, bu yemeği kovana taşır. Yükünü boşaltan arı, kaynağı bırakarak tekrardan gözcü arı olabilir. Başka bir seçenek, kaynağa tekrardan yönelmeden önce, kaynak hakkında gözcü arılara bilgilendirme yapabilir veya gözcü arıları bilgilendirmeden kaynağa yönelebilir.

Arı kolonisi göz önüne alındığında, koloninin kendi kendine organize olma süreci aşağıdaki kriterlere dayanarak gerçekleşir:

- i. Pozitif Geri Bildirim: Yemek kaynağındaki nektar miktarı arttıkça, bu kaynağı ziyaret eden gözcü arı sayısı artmaktadır.
- ii. Negatif Geri Bildirim: Zayıf yemek kaynaklarına giden arı sayısı azalır.
- iii. Dalgalanmalar: Kâşif arılar rastgele arayış neticesinde yeni kaynaklar keşfedebilirler.
- iv. Çoklu Etkileşim: Arılar yemek kaynakları hakkındaki bilgileri yuva içerisinde paylaşırlar.

Şekil 4.17’de KABC algoritmasının akış şeması görülmektedir. Arama uzayındaki çözümlere karşılık gelen rastgele yiyecek kaynaklarının üretilmesi ile başlanır. Rastgele yer

üretim süreci her parametrenin alt ve üst sınırları arasında rastgele değer üretilmesi ile gerçekleşir. İşçi arı, çalıştığı yiyecek kaynağı komşuluğunda yeni bir yiyecek kaynağı belirler ve bunun kalitesini değerlendirir.



Şekil 4.17. Klasik yapay arı kolonisi algoritmasının akış şeması (Baydoğan ve Şener, 2016).

Yeni kaynak daha iyi ise bu yeni kaynak hafızaya alınır. Sınırlar dâhilinde üretilen parametre vektörü, yeni bir kaynağı temsil eder ve kalitesi hesaplanarak bir uygunluk değeri atanır. Bulunan çözüm daha iyi ise görevli, arı hafızasından eski kaynağı siler ve bu kaynağın yerini hafızasına alır. Aksi takdirde görevli arı, eski kaynağına gitmeye devam eder.

Tüm görevli arılar, bir çevrimde araştırmalarını tamamladıktan sonra kovana dönüp buldukları kaynakların nektar miktarları ile ilgili gözcü arılara bilgi aktarır. Bir gözcü arı, paylaşılan bilgidен faydalanarak kaynakların nektar miktarları ile orantılı bir olasılıkla bir kaynak seçer. Bu seçim, algoritmada nektar miktarlarına karşılık gelen uygunluk değerlerine göre yapılmaktadır. Olasılık değerleri hesaplandıktan sonraki seçim işleminde, her bir kaynak için 0 ile 1 aralığında rastgele sayı üretilir. Olasılık değeri, bu rastgele üretilen sayıdan büyükse, görevli arılar gibi gözcü arılar da bu kaynak bölgesinde yeni bir çözüm üretir. Yeni çözüm değerlendirilir ve kalitesi hesaplanır. Sonra, yeni çözüm ile eski çözümün uygunluklarının karşılaştırıldığı ve en iyi olanın seçildiği açgözlü seleksiyon işlemine tabi tutulur. Yeni çözüm daha iyi ise eski çözüm yerine bu çözüm alınır ve sayaç sıfırlanır. Bir çevrim sonunda tüm görevli ve gözcü arılar arama süreçlerini tamamladıktan sonra çözüm geliştirememeye sayaçları kontrol edilir. Bir arının bir kaynaktan faydalanıp faydalanmadığı bu sayaçlar aracılığı ile bilinir. Bir kaynağın sayacı belirli bir eşik değerinin üzerindeyse, bu kaynağın görevli arısının bu çözümü bırakıp kendisi için başka bir çözüm araması gerekir (kâşif arı oluşumu). Bu arı için rastgele çözüm arama süreci başlar (Karaboğa, 2005; Karaboğa ve Baştürk, 2007, 2008).

4.6.4. Kullanılan rüzgâr modelleri

Bu çalışma kapsamında oluşturulan optimizasyon modeli, üç farklı rüzgâr santrali konumlandırma probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bunlardan birincisi, klasik rüzgâr santrali konumlandırma problemi olarak adlandırılan nispeten basit bir problemdir. İkinci problem ise, farklı sınır şekillerinin sonuca etkisi araştırılan ve farklı türbin modelleri kullanılan nispeten daha zor bir problemdir. Üçüncü problem ise, bu çalışmanın başlıca amacı olan Kütahya bölgesi için bir santral planı elde etmek amacı ile oluşturulan karmaşık problemdir. Dolayısı ile bu üç problem farklı rüzgâr modellerini içermektedir.

Bilimsel araştırmalarda kullanılan matematiksel model sonuçlarının, gerek deneysel veriler gerekse de benzer modellerin sonuçları ile kıyaslanması modellerinin doğruluğunun ispatı açısından önemlidir. Optimizasyon kodu içerisinde yer alan Jensen iz bölgesi modelinin doğruluğunun test edilmesi ve algoritma modellerinin gerek kendi arasında gerekse literatürdeki farklı algoritmalar ile kıyaslanması gerekli görülmüştür. Bu sebeple, ilk olarak literatürde sıklıkla

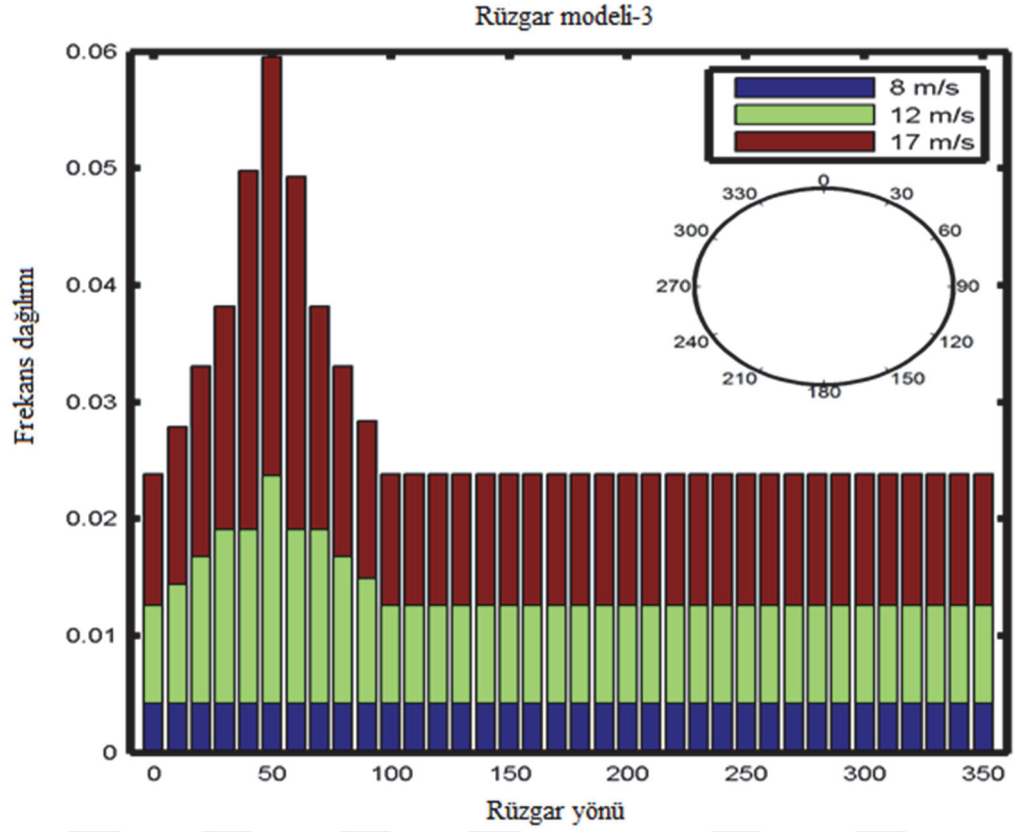
kullanılan ve Mosetti ve diğerlerinin (Mosetti vd., 1994) öncül çalışması içerisinde tarif edilen klasik rüzgâr santrali optimizasyon problemi çözümlenmiştir. Bu problem, üç farklı karmaşıklık düzeyinde rüzgâr senaryosu içermektedir. Mosetti ve diğerleri (Mosetti vd., 1994), düz kare bir alanı 10x10 kare hücrelere bölmüş ve her bir hücrenin merkez noktasını olası bir türbin konumu olarak atamışlardır. 40 metrelik rotor çapına sahip özdeş türbinler kullanmışlar ve basit bir kübik denklem kullanarak güç eğrisini modellemişlerdir. Muhtemel türbin pozisyonları arasındaki mesafe, hali hazırda yakın iz bölgesinin dışında olduğu için hiçbir ek kısıtlama koymamışlardır. Bu problemin farklı versiyonları, birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Çizelge 4.1, klasik konumlandırma probleminin ana yapısını sunar.

Çizelge 4.1. Klasik rüzgâr santrali konumlandırma probleminin ana yapısı.

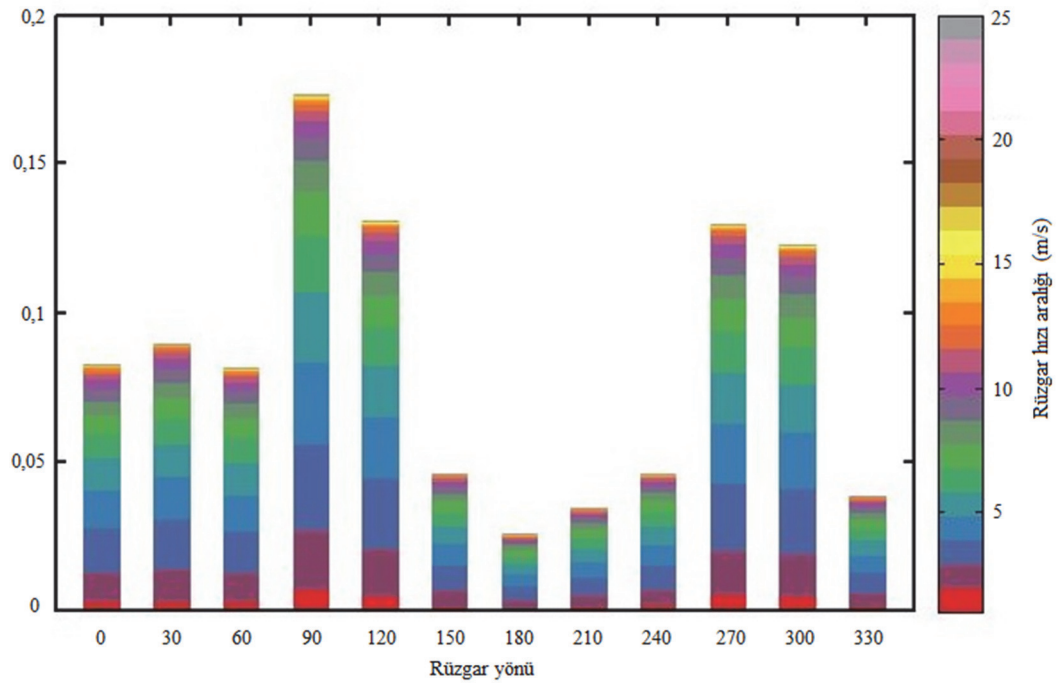
Arazi modeli	Arazi şekli:	Düz kare arazi
	Arazi büyüklüğü:	2x2 km ²
	Olası türbin konum sayısı:	2601 (50x50 ızgara (her kesişim noktası))
Rüzgâr modeli	Rüzgâr modeli 1:	Sabit rüzgâr hızı (12 m/s) ve tek rüzgâr yönü (0°)
	Rüzgâr modeli 2:	Değişen rüzgâr yönü (0° dan 350°'ye - 36 sektör), sabit rüzgâr hızı (12 m/s) ve her sektör eşit frekans dağılımı
	Rüzgâr modeli 3:	Değişen rüzgâr yönü (0° dan 350°'ye - 36 sektör), değişken rüzgâr yönü (8-12-17 m/s) ve frekans dağılımı (Şekil 3.18)
	İz bölgesi modeli:	Jensen İz bölgesi modeli
Rüzgâr türbin modeli	Türbin tipi:	Tek tip 600 kW nominal güç
	Göbek yüksekliği (z):	60 m
	Rotor yarıçapı (R _r):	20 m
	İtke katsayısı (C _T):	Sabit 0,88
	Basit kübik güç eğrisi:	$P = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho A u^3}{2} = \frac{0.4 \times 1.2 \times \pi \times 20^2 \times u^3}{2} = 0.3u^3$
Eniyileme	Amaç fonksiyonu:	Maks. (Güç Çıkışı)
	Eniyileme tekniği:	Elitist genetik algoritma ve klasik arı kolonisi algoritması
	Kısıt:	Minimum türbin mesafesi (5 rotor çapı)
	Tasarım girdisi:	Türbin sayısı (önceki çalışmalar ile uyumlu)
	Tasarım değişkeni:	Türbin konumları

İkinci problemin yapısı, düzensiz şekilli santral sınırının modellemesi üzerine araştırma yapılırken tarafımızdan oluşturulmuştur. Burada amaç hem düzensiz sınırlı alan modelini test etmek hem de santral sınır şeklinin çözümlere olan etkisi üzerine bir belirsizlik analizi gerçekleştirmektir. Bu sebeple, 12 ayrı yönden farklı frekans dağılımına sahip bir rüzgâr verisi kullanılmıştır. Şekil 4.19, bu rüzgâr modeli verisini sunmaktadır.

Üçüncü problemde bu bölümün başında verilen uzun süreli Kütahya verisi kullanılmıştır.



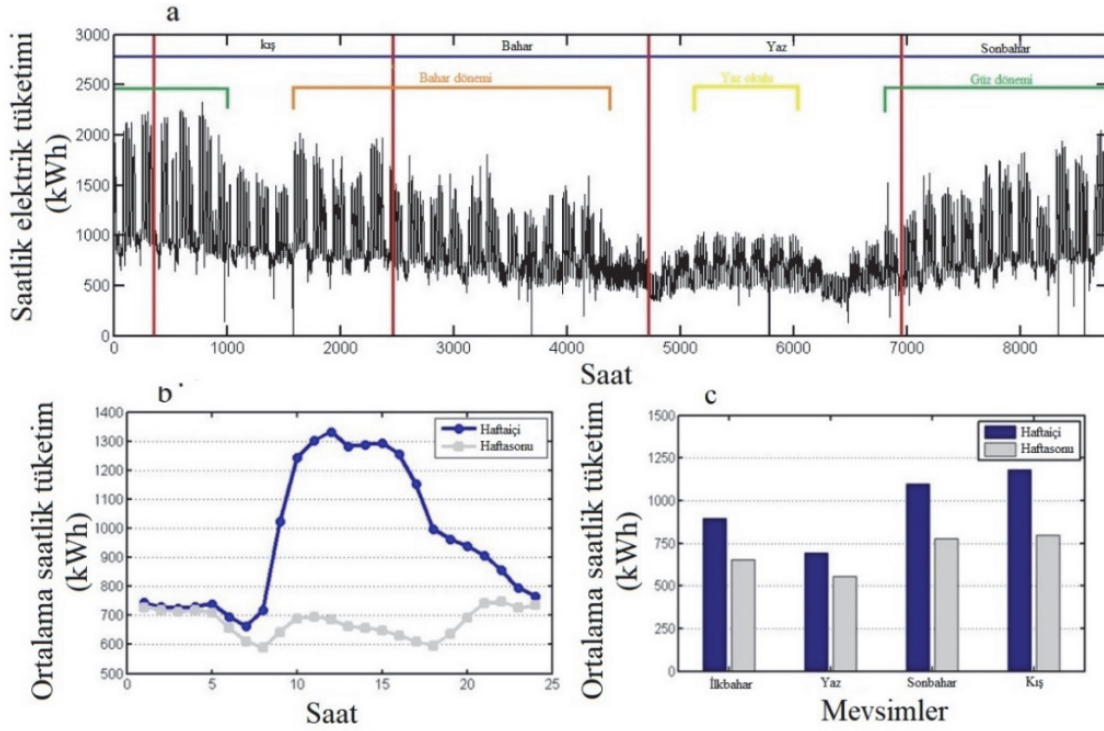
Şekil 4.18. Klasik problemde kullanılan rüzgâr modeli-3.



Şekil 4.19. İkinci problemde kullanılan rüzgâr modeli.

4.7. Evliya Çelebi Kampüsü'nün Rüzgâr Enerjisi Fizibilitesi

Evliya Çelebi Kampüsü, 7,54 km² alan üzerinde kurulmuştur. Kampüs içinde; bir rektörlük binası, dört enstitü, dokuz fakülte, üç kolej, bir kütüphane, iki misafirhane, bir olimpik havuz, bir fizik tedavi ve rehabilitasyon merkezi, öğrenci yurtları ve bazı sosyal binalar bulunmaktadır.



Şekil 4.20. Evliya Çelebi Kampüsü'nün elektrik tüketim detayları (a) 9 Aralık 2016 ile 9 Aralık 2017 tarihleri arasında kampüsün saatlik elektrik tüketimi (b) hafta içi ve hafta sonları için saatlik elektrik talebinin günlük ortalama periyodu (c) her bir mevsim için saatlik elektrik talebinin ortalama değerleri.

Şekil 4.20, 9 Aralık 2016 ile 9 Aralık 2017 tarihleri arasında kampüsün saatlik elektrik tüketiminin ayrıntılarını vermektedir. Görüldüğü gibi, elektrik tüketimi eğitim-araştırma faaliyetleri ve mevsimlere göre değişmektedir. En yüksek tüketim değerleri kış sezonunda gözlenmekte olup, bu da sonbahar döneminin sınavlarının hemen öncesine denk gelmektedir. Ayrıca en düşük tüketim değerleri yaz sezonunda resmi tatil günlerinde gözlemlenmektedir. Kış mevsiminde düşen hava sıcaklıkları ve güneşlenme süreleri nedeniyle artan ısıtma ve aydınlatma ihtiyacı bu tüketim eğilimine neden olmaktadır. Saatlik elektrik tüketiminin ortalama değerlerine bakıldığında, hafta içi en yüksek ortalama talep saat 12.00'de 1332 kWh, en düşük ortalama talep

ise hafta sonu saat 08.00'de 589 kWh'dır. Mevsimsel değişikliklerin daha doğru analizine ulaşmak için, hafta içi ve hafta sonları için saatlik elektrik tüketiminin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hafta içi en düşük ortalama tüketim, yaz mevsiminde 696 kWh iken, en yüksek değer 1180 kWh ile kış mevsiminde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, hafta sonları için en düşük ortalama değer, yaz mevsimi için 554 kWh iken, en yüksek ortalama değer kış aylarında 799 kWh olmuştur.

4.7.1. Saatlik tüketimin karşılanabilirliği

Bu çalışmada, yıllık enerji üretiminin yanı sıra saatlik elektrik talebinin karşılanabilirlik oranlarını araştırmak için saatlik enerji üretiminin zaman serileri hesaplanmıştır. Bir yıl içindeki saatlik enerji üretiminin (SEÜ) zaman serileri aşağıdaki denklemle elde edilir:

$$SEÜ_l = \sum_{j=1}^6 P(U_j), \quad l=\{1,2,\dots,8760\} \quad (4.46)$$

Burada U_j , on dakikalık bir aralığın ölçülen ortalama rüzgâr hızıdır, P rüzgâr türbininin güç çıkışıdır. Ölçüm sistemi her 10 dakikada bir ortalama değer kaydettiğinden, her saat altı rüzgâr verisinden oluşur. Daha sonra, SEÜ zaman serileri, saatlik elektrik talebi (SET) zaman serileri ile karşılaştırılarak her bir saatin karşılanabilirlik oranları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$AR_{\text{saat}} = \begin{cases} SEÜ=0, & AR_{\text{saat}}=0 \\ 0<SEÜ<SET, & AR_{\text{saat}}=\frac{SEÜ}{SET} \times 100 \\ SEÜ>SET, & AR_{\text{saat}}=100 \end{cases} \quad (4.47)$$

AR_{hourly} 'ye benzer şekilde, tüketim ve üretim arasındaki yıllık dengeyi değerlendirmek üzere yıllık karşılama oranı (CR_{yillik}) hesaplanır:

$$CR_{\text{yillik}} = \begin{cases} YEÜ<YET, & CR_{\text{yillik}}=\frac{YEÜ}{YET} \times 100 \\ YEÜ\geq YET, & CR_{\text{yillik}}=100 \end{cases} \quad (4.48)$$

4.7.2. Gürültü yayılım analizi

Genellikle, rüzgâr türbinlerinin gürültülerini ölçmek için ağırlıklı akustik güç seviyesi, 500 Hz'de ortalama bir seviye olarak hesaplanır. Rüzgâr türbinlerinin gürültü etkilerinin hesaplamalarında uluslararası standart ISO 9613-2 “Acoustics — Attenuation of sound during

propagation outdoors — Part 2: General method of calculation” temel olarak alınmıştır (ISO, 1996):

$$L_{AT}(DW) = L_{WA} + D_C - A - C_{met} \quad (4.49)$$

Burada L_{AW} gürültü kaynağının ağırlıklı akustik güç seviyesi, $D_C = D_\Omega$ gürültü kaynağının yönünü hesaba katmak için yapılan düzeltme katsayısıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$D_\Omega = 10 \log \left(1 + \frac{d_p^2 - (h_s - h_r)^2}{d_p^2 - (h_s + h_r)^2} \right) \quad (4.50)$$

Burada h_s gürültü kaynağının yerden yüksekliği (göbek yüksekliği), h_r gürültü kaynağının etki ettiği noktanın yerden yüksekliğidir ve hesaplamalar yapılırken değişik değerler alabilir. Ayrıca d_p gürültü kaynağı ve etki noktası arasındaki mesafenin yeryüzüne yansıtılmış değerini ifade eder:

$$d_p = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2} \quad (4.51)$$

A , kaynak (rüzgâr türbini) ve darbe noktası arasındaki gürültü yayılımı sırasında zayıflamayı ifade eder. Toplam zayıflama aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} \quad (4.52)$$

A_{div} , uzaysal yayılımdan kaynaklanan zayıflamayı ifade eder:

$$A_{div} = 10 \log(d) + 11 \quad (4.53)$$

Burada d kaynak ve etki noktası arasındaki direkt uzaklığı ifade eder. A_{atm} ise atmosferik emilimden kaynaklanan zayıflamayı ifade eder:

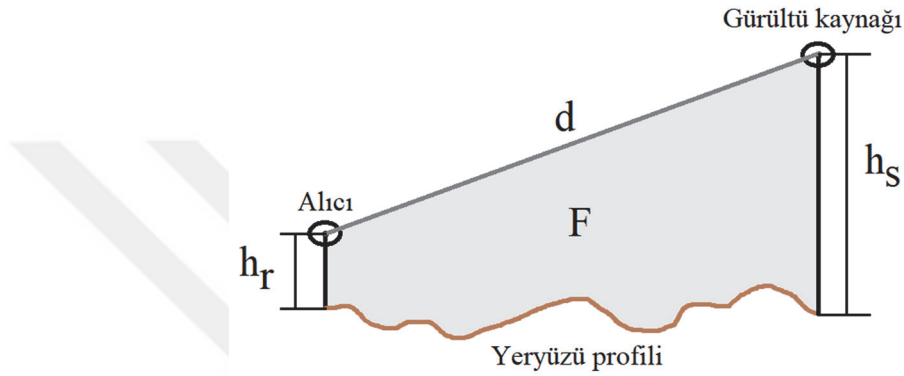
$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (4.54)$$

Burada α havanın emilim katsayısıdır. A_{gr} ise zeminden kaynaklanan zayıflamayı ifade eder:

$$A_{gr} = 4,8 - \left[\left(\frac{2h_m}{d_p} \right) \left(17 + \frac{300}{d_p} \right) \right] \geq 0 \quad (4.55)$$

Burada h_m , zeminin üzerindeki gürültü yolunun ortalama yüksekliğidir (m). Şekil 4.21, ortalama yüksekliğin bulunmasını şematik olarak tarif eder. Zeminin dijital yükseklik modeli biliniyor ise aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (4.56)$$



Şekil 4.21. Ortalama yüksekliğin bulunması.

C_{met} ise hava durumu düzeltmesidir ve denklem 4.57 ile hesaplanır:

$$\begin{cases} C_{met} = 0 & \text{if } d_p < 10(h_s + h_r) \\ C_{met} = c_0 \left[1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right] & \text{if } d_p > 10(h_s + h_r) \end{cases} \quad (4.57)$$

Burada C_0 desibel cinsinden bir faktör sayısıdır ve yerel meteorolojik istatistiklerine bağlı olarak belirlenir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, ilk olarak iz bölgesi ve algoritma testleri gerçekleştirilen klasik rüzgâr santrali konumlandırma probleminin sonuçları verilmiştir. İkinci olarak ise, santral arazi şeklinin optimizasyon sonuçlarına olan etkisinin araştırıldığı optimizasyon araştırmasının sonuçları verilmiştir. Daha sonra, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü'nün rüzgâr enerjisi fizibilite araştırmasının sonuçları sunulmuştur. Son olarak, çalışmanın temel amacı olan Kütahya'nın rüzgâr santral fizibilitesi incelemesi verilmiştir.

5.1. Klasik Rüzgâr Santrali Konumlandırma Probleminin Çözümlemesi

5.1.1. Jensen iz bölgesi modelinin doğrulanması

Geçmişte yapılan ilgili çalışmalarda klasik problem için türetilmiş santral düzenlerinden bazıları, iz bölgesi modelinin matematiksel doğruluğunu test etmek amacı ile yeniden analiz edilmiştir. Çizelge 5.1, geçmişte yapılan ilgili çalışmaların sonuçlarını ve aynı düzenler için bu çalışmadaki iz bölgesi modeli ile ulaşılan sonuçları karşılaştırır. Bir adet istisna dışında aradaki farkın yaklaşık olarak % 1 veya daha az olduğu görülmektedir. Dolayısı ile Jensen iz bölgesi modelinin matematiksel olarak doğruluğu kanıtlanmıştır.

Çizelge 5.1. Literatürdeki çalışmaların sonuçları ile iz bölgesi modelinin doğrulanması.

Çalışma	İz bölgesi modeli	Rüzgâr modeli (RM)	Türbin sayısı	Toplam güç (kW) (raporlanan)	Toplam güç (kW) (hesaplanan)	Sapma (%)
(Mosetti vd., 1994)	Jensen	RM-1	26	12352	12481	1,04
		RM-2	19	9244,7	9237,5	0,07
		RM-3	15	13460	13334	0,93
(Grady vd., 2005)	Jensen	RM-1	30	14310	14456	1,02
		RM-2	39	17220	17210	0,05
		RM-3	39	32038	31227	2,5
(González vd., 2010)	Jensen	RM-1	30	14310	-	-
		RM-2	39	18065	18036	0,1
		RM-3	39	32793	32795	0,00609

5.1.2. Klasik problem için elde edilen sonuçlar

Bu bölümde, klasik problem için, elitist genetik algoritma (EGA) ve klasik arı kolonisi algoritması (KABC) kullanılması ile farklı rüzgâr senaryoları için ulaşılan en iyi santral düzenleri verilmiştir. Algoritmaların temel parametreleri, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir.

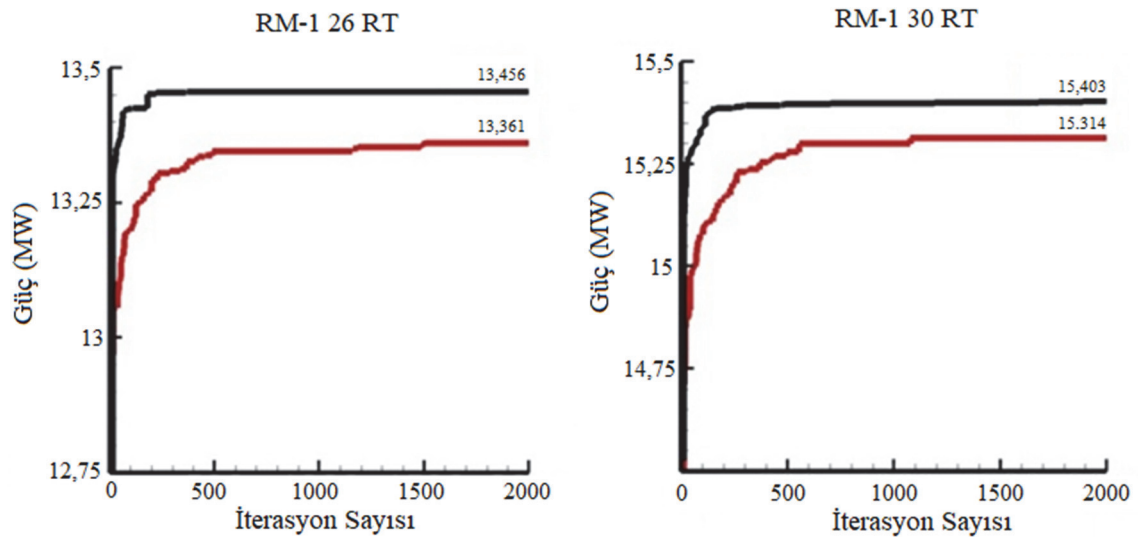
Çizelge 5.2. Elitist genetik algoritmasının popülasyon parametreleri.

Birey yapısı	Popülasyondaki oranı (%)
Elit bireyler	25
Yavru bireyler	25
Yabancılar	25
Mutasyonlar	25

Çizelge 5.3. Klasik arı kolonisi algoritmasının temel parametreleri.

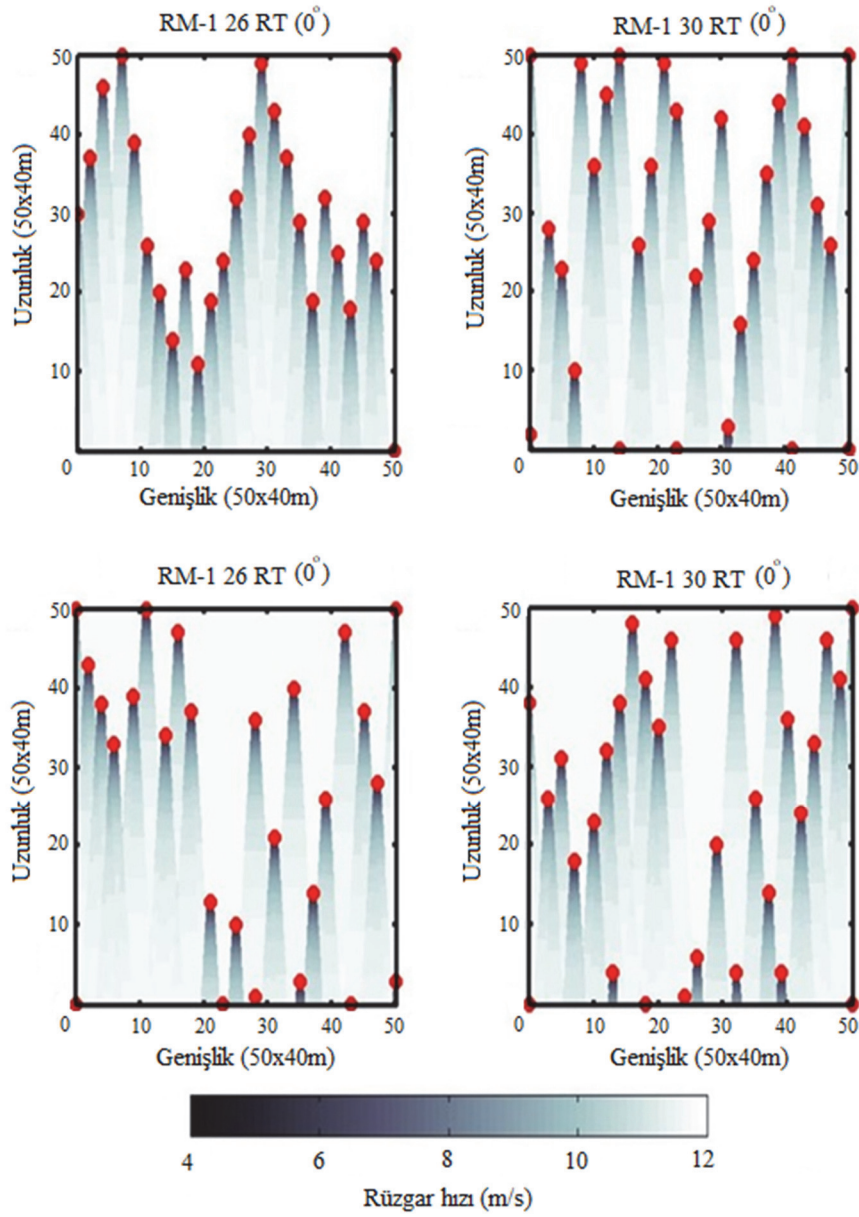
Koloni büyüklüğü	600
Yemek kaynağı sayısı	300
Yemek kaynağını terk etmek için gerek limit sayısı	100

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2, sabit rüzgâr hızı ve yönü ile karakterize edilen rüzgâr modeli 1 için iterasyon gelişimlerini ve ulaşılan en iyi santral düzenlerini iz bölgesi nedenli hız bozuklukları ile birlikte vermektedir. Bu rüzgâr modeli için 26 ve 30 adet olmak üzere iki farklı türbin sayısında hesaplama gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’den görüleceği üzere iki farklı türbin sayısı için yapılan hesaplamalarda elitist genetik algoritma daha kısa iterasyon sayılarında daha yüksek güç değerlerine ulaşmıştır.



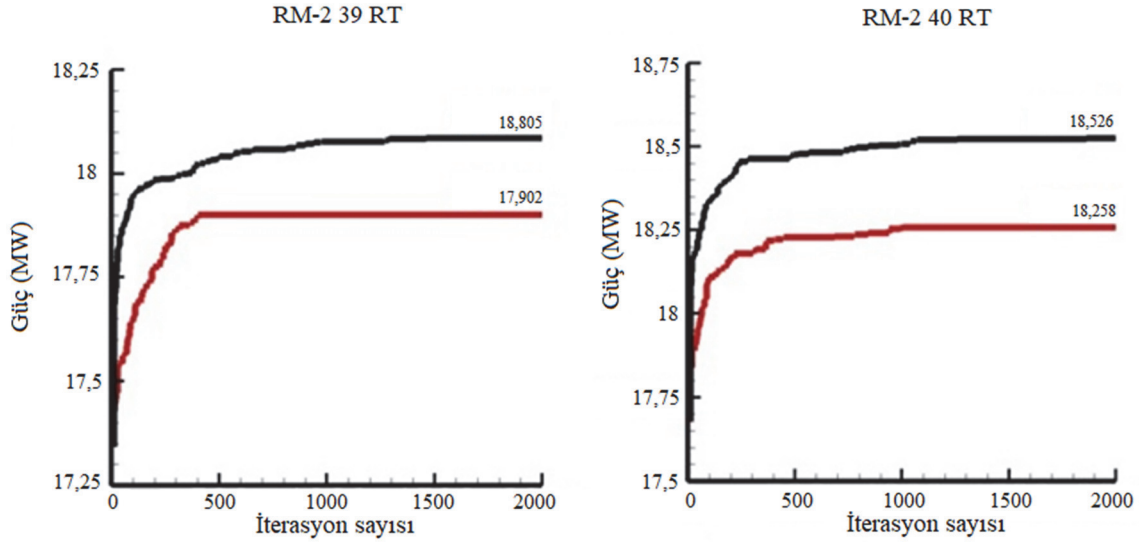
Şekil 5.1. Rüzgâr Modeli-1 için iterasyon gelişimleri (Siyah: EGA, Kırmızı: KABC).

Elitist genetik algoritma ile ulaşılan iz bölgesi verim değerleri sırası ile %99,83 ve %99,04 olurken, klasik arı kolonisi algoritması %99,12 ve %98,46 değerlerine ulaşmıştır. İz bölgesi görselleştirmesine göre tek yönden esen rüzgâr şartı altında her iki algoritmanın da başarılı sonuçlar verdiği söylenebilir.



Şekil 5.2. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-1 için ulaşılan en iyi santral düzenleri (yukarıda) elitist genetik algoritma (aşağıda) klasik arı kolonisi algoritması.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4, sabit rüzgâr hızı ve değişken rüzgâr yönü ile karakterize edilen rüzgâr modeli-2 için iterasyon gelişimlerini ve ulaşılan en iyi santral düzenlerini iz bölgesi nedenli hız bozuklukları ile birlikte sunmaktadır. Bu rüzgâr modeli için 39 ve 40 adet olmak üzere iki farklı türbin sayısı için hesaplama gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'ten görüleceği üzere, Rüzgâr Modeli-1'de olduğu gibi, elitist genetik algoritma daha kısa iterasyon sayılarında daha yüksek güç değerlerine ulaşmıştır.



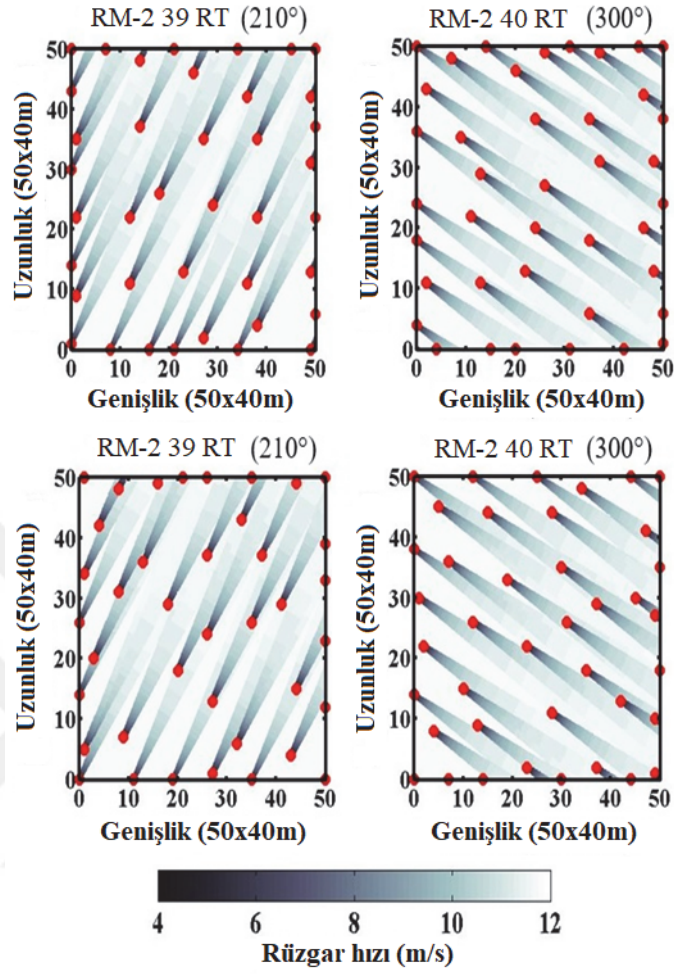
Şekil 5.3. Rüzgâr Modeli-2 için iterasyon gelişimleri (Siyah: EGA, Kırmızı: KABC).

Elitist genetik algoritma ile ulaşılan iz bölgesi verim değerleri sırası ile %89,45 ve %89,34 olurken klasik arı kolonisi algoritması %88,54 ve %88,04 değerlerine ulaşmıştır. Rüzgâr modelinin her yönde eşit frekans değerleri ile temsil edildiği göz önüne alındığında, algoritmaların, türbinleri alana homojen bir şekilde dağıtması mantıklı bir yaklaşımdır. Ayrıca iz bölgesi görselleştirmesine göre her iki algoritmanın da başarılı sonuçlar verdiği açıktır.

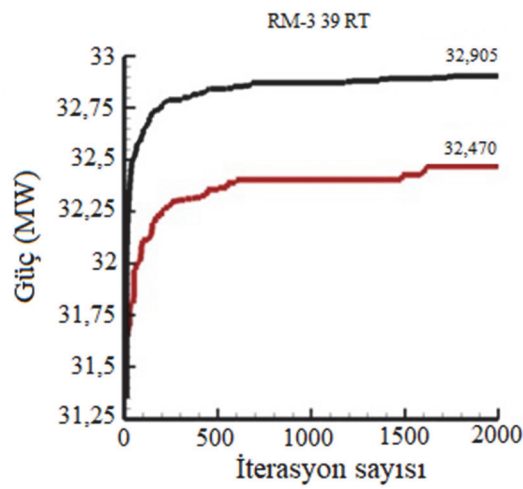
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6, değişken rüzgâr hızı ve yönü ile karakterize edilen Rüzgâr Modeli-3 için iterasyon gelişimini ve ulaşılan en iyi santral düzenlerini, iz bölgesi nedenli hız bozuklukları ile birlikte sunmaktadır. Diğer iki rüzgâr modeli çözümünde olduğu gibi bu rüzgâr modeli için yapılan çözümlemelerde EGA daha yüksek sonuçlara daha kısa sürelerde ulaşmıştır. Bu sebeple EGA'nın yapısı rüzgâr santrali konumlandırma problemi için daha uygundur.

Rüzgâr Modeli-3 için yapılan hesaplamalar neticesinde, EGA ile ulaşılan iz bölgesi verim değerleri % 89,94 iken, KABC % 88,75'te kalmıştır. Hâkim rüzgâr yönlerinin 40°, 50° ve 60° olduğu göz önüne alınırsa, türbin dağılımlarının, bu yönler için daha verimli olacak şekilde konumlandığı açıktır.

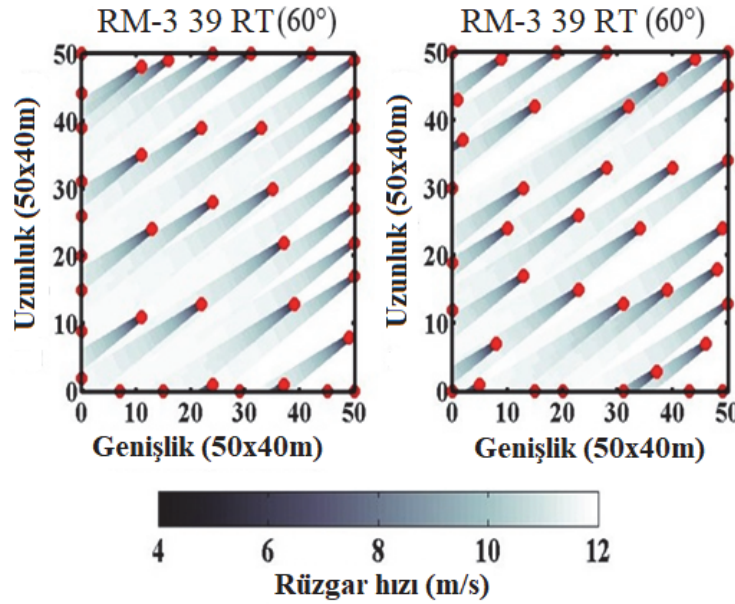
Sonuç olarak, her iki algoritmanın da rüzgâr santrali planlama probleminin çözümünde mantıklı sonuçlar türetebileceği gözlenmiştir. Bununla beraber EGA'nın daha iyi sonuçlara daha kısa iterasyon sayılarında ulaştığı görülmüştür. Dolayısı ile daha karmaşık problemlerin çözümünde sadece EGA algoritması kullanılması uygun olacaktır. Bu varsayım sebebi ile daha sonra sunulacak iki adet konumlandırma probleminin çözümünde EGA optimizasyon algoritması olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-2 için ulaşılan en iyi santral düzenleri (yukarıda) elitist genetik algoritma (aşağıda) klasik arı kolonisi algoritması.



Şekil 5.5. Rüzgâr Modeli-3 için iterasyon gelişimi (Siyah: EGA, Kırmızı: KABC).



Şekil 5.6. Klasik problemin Rüzgâr Modeli-3 için ulaşılan en iyi santral düzenleri (solda) elitist genetik algoritma (sağda) klasik arı kolonisi algoritması.

5.2. Santral Sınırı Şeklinin Rüzgâr Santrali Konumlandırma Problemine Olan Etkisi

Bir önceki bölümde sunulan klasik problem sonuçları ile iz bölgesi modelinin doğrulaması gerçekleştirilmiş olup, iki farklı algoritmanın çözüm kabiliyetleri test edilmiştir. Fakat bu problemin çözümünde kullanılan yaklaşımlar, hem güncel literatürün hem de Kütahya bölgesinde gerçekleştirilecek bir çözümün yeterliliğini temin etmemektedir. Buradaki en önemli eksik, olası bir düzensiz şekilli karmaşık arazi modelinin oluşturulmasıdır. Diğer ise, Kütahya rüzgâr verilerinin rüzgâr modeli olarak kullanılmasıdır. Son olarak, literatürde başarısı kanıtlanmış, farklı türbin modelleri ve göbek yüksekliği seçeneklerinin koda eklenmesidir. Bu sebeple, çalışmanın bu aşamasında, klasik problem ile Kütahya bölgesi için yapılacak analizler arasında bir geçiş problemi tanımlanmıştır. Bu aşamada, optimizasyon kodu, farklı santral sınır şekillerinde çalışabilecek şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca, gerçek ölçüm verilerine dayanan bir basitleştirilmiş Kütahya rüzgâr modeli koda dâhil edilmiştir. Bunlara ek olarak, bir üretici firmanın ticari türbinlerinin farklı göbek yüksekliği seçenekleri kullanılır duruma getirilmiştir. Dolayısı ile ikinci aşamadaki problem yapısı, gerçek fizibilite değerlerine ulaşmaktan ziyade, nihai optimizasyon kodunun yapısal gerekliliğine ulaşılması için yapılan iyileştirmeler ile tanımlanmıştır.

Üretilen çözümlerin, santral alan şeklinden bağımsızlığını gözleyebilmek için, dört farklı şekle (kare, dikdörtgen, daire, düzensiz) ve aynı yüz ölçümüne (4 km^2) sahip rüzgâr santral

alanları için optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Burada, bir önceki probleme ek olarak, düzensiz santral alanı için oluşturulan matematiksel model test edilmiştir. Sonuçlara göre, ilgili modelin bu tarz uygulamalarda başarılı olduğu görülmüştür. Yine diğer bir iyileştirme, farklı türbin tiplerine değişik göbek yüksekliği seçeneğinin eklenmesidir. Bu ekleme, algoritma yapısını ve dolayısı ile problem karmaşıklığını önemli ölçüde yükseltmektedir. Dolayısı ile ilk probleme kıyasla daha yüksek iterasyon sayıları kullanılmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu olarak, üretilen güç değerinin maksimize edilmesi terk edilmiştir. Bunun yerine, yıllık enerji maliyetini maksimize ederken toplam türbin fiyatını minimize etmeyi amaçlayan birleştirilmiş formül, amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır (Denklem 5.1). Ayrıca türbinler arasındaki elektriksel bağlantının sağlanması için gerekli olacak minimum kablo düzenini belirleyebilmek amacı ile Kruskal algoritması eklenmiştir. Son olarak, ilk problemdeki sabit itki katsayısı yaklaşımı terk edilmiş ve rüzgâr hızına bağlı olarak değişen itki katsayısı yaklaşımı modele eklenmiştir. Çözümlerde sadece elitist genetik algoritma kullanılmıştır.

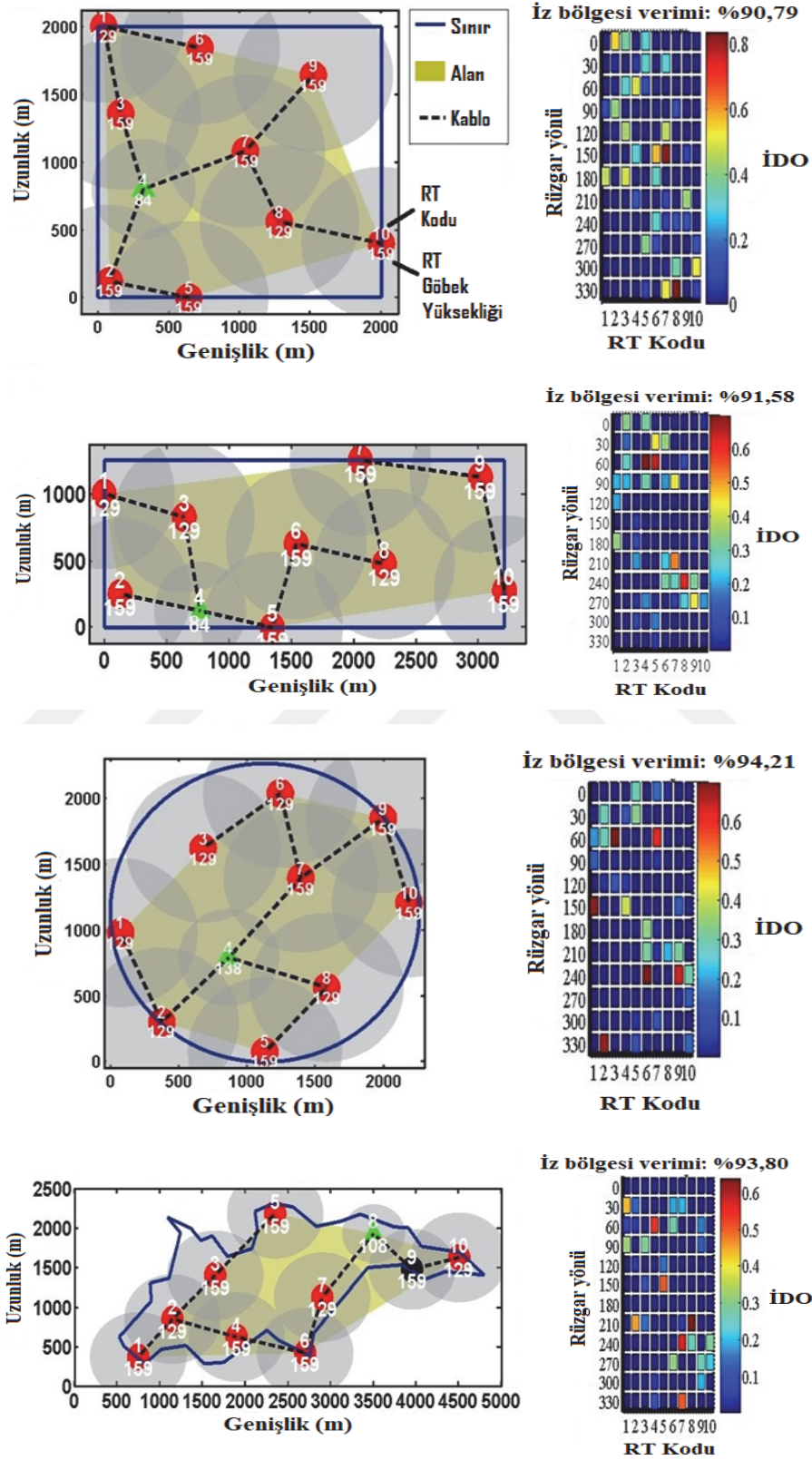
$$(Amaç)_1 = \text{Min} \left(\frac{TMM}{YEÜ} \right) \quad (5.1)$$

Şekil 5.7, Amaç fonksiyonu-1 için EGA kullanılması ile elde edilen en iyi santral düzenlerini vermektedir. Buradan görüleceği üzere, optimizasyon yapısı 4 farklı santral şekli için çalışabilecek şekilde hazırlanmıştır. Optimizasyon modülü, ilk üç düzenli sınırdaki çalışırken, tasarımcıdan temel geometrik özelliklere ek olarak alan üzerinde kaç adet olası konum tanımlanması gerektiğini ister. Düzensiz şekilli bir santral alanı söz konusu olduğunda ise bölüm 4.6.2’de verilen metodolojiyi uygular.

Hesaplama modülüne getirilen ek özellik, türbinlerin iz bölgesi kaynaklı hız deformasyonu haritasını her yön için çıkarmasıdır. Bu parametre ne kadar yüksek ise bir türbin o kadar iz bölgesi kaynaklı hız deformasyonu altındadır. İz bölgesi kaynaklı deformasyon oranı denklem 5.2 ile ifade edilir:

$$\dot{I}DO = 1 - \eta_{iz \text{ bölgesi}} \quad (5.2)$$

Verilen problem şartları altında türetilen santral düzenlerinin hepsinde iz bölgesi verimi %90’ın üzerindedir. Bununla beraber, hâkim rüzgâr yönlerinde daha başarılı iz bölgesi verimleri elde edilen daire ve düzensiz şekilli tasarımlar, iz bölgesi açısından daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. Sarı renk ile boyanmış alan, türbin varlıkları sebebi ile işgal edilmiş nihai santral alanını görmek adına eklenmiştir. Ayrıca yarı saydam siyah daireler, türbinler arası minimum mesafe şartı sebebi ile yasaklanan alanları temsil eder.

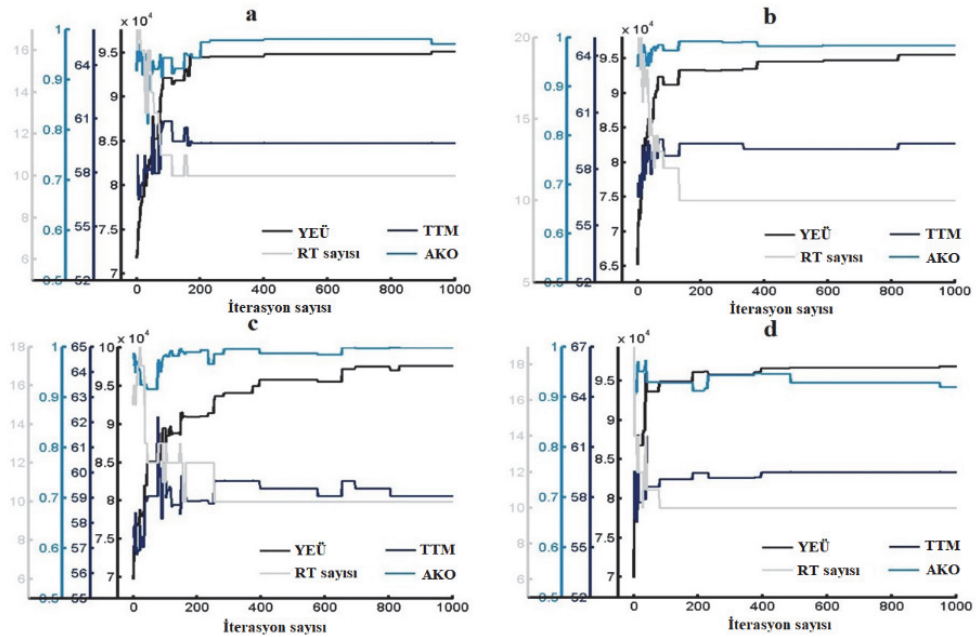


Şekil 5.7. Amaç fonksiyonu-1 için elde edilen en iyi santral düzenleri.

Çalışmanın bu aşamasında, türbin ilk yatırım maliyetine benzer şekilde, harcanan arazi miktarının da bir tasarım parametresi olarak kullanılıp kullanılmayacağına dair bir soru gündeme gelmiştir. Bu sebeple, olası konum havuzundan silinen konum sayısının toplam olası konum sayısına bölümü ile ifade edilen bir arazi kullanım oranı parametresi tanımlanmıştır:

$$AKO = \frac{\text{Olası konum havuzundan silinen konum sayısı}}{\text{Toplam olası konum sayısı}} \quad (5.3)$$

Klasik problemdeki algoritma yapısı özdeş türbinler kullanır ve tasarımcıdan istediği türbin sayısını girdi parametresi olarak tanımlamasını bekler. Fakat, farklı boyutlu türbin modellerinin kullanılması bu seçeneği kullanışsız bir hale getirmektedir. Dolayısı ile yeni bir girdi parametresinin tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamada, bu parametre için tasarımcı tarafından ulaşılması istenen güç kapasitesi olası bir seçenek olarak düşünülmüştür. Aynı yaklaşım Kütahya'nın rüzgâr santral fizibilitesi için yapılan hesaplamalarda da kullanılmıştır. Bu problem için belirlenen sınır güç değeri 40 MW'tır. Algoritma bu değere ulaşana kadar veya olası konum tükenene kadar türbin eklemesi yapmaya devam eder. Amaç fonksiyonlarının, önemli tasarım değişkenlerini ne ölçüde etkilediğini bilmek, sonraki varsayımların doğruluğu açısından önemlidir. Şekil 5.8, amaç fonksiyonu-1 için gerçekleştirilen iterasyonlar boyunca önemli parametrelerin değişimini göstermektedir.

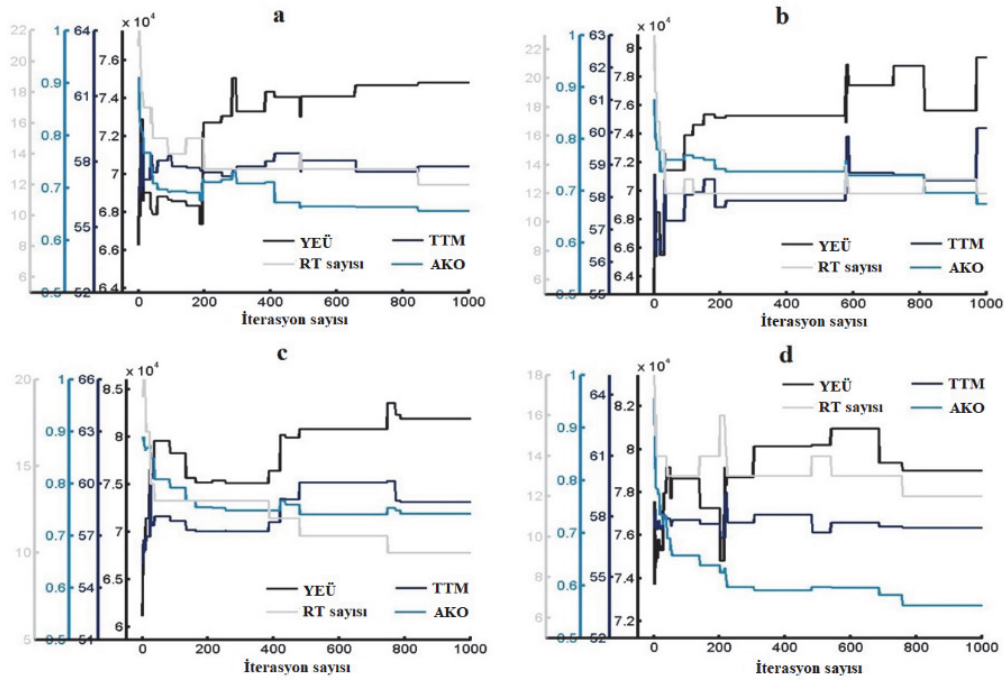


Şekil 5.8. Amaç fonksiyonu-1 için iterasyon gelişimi boyunca önemli tasarım parametrelerinin değişimi (a) kare (b) dikdörtgen (c) daire (d) düzensiz.

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, amaç fonksiyonu-1 için yapılan hesaplamalardaki iterasyon sürecindeki eğilim santral şeklinden bağımsızdır. Tipik olarak, türbin sayısı düşmekte, yıllık enerji üretimi ve toplam türbin maliyeti yükselmektedir. Belirli bir iterasyon sayısında, görece durağanlık yakalanmaktadır. Arazi kullanım oranı, genelde durağan bir davranış sergilemiştir. Algoritmanın, büyük boyutlu türbinlerin kullanıldığı senaryolara doğru geliştiği açıktır. Arazi kullanım oranının bir tasarım parametresi olarak hesaba katıldığındaki değişimi görmek için yeni bir amaç fonksiyonu tanımlaması yapılmıştır:

$$(\text{Amaç})_2 = \text{Min} \left(\frac{\text{TTM} \times \text{AKO}}{\text{YEÜ}} \right) \quad (5.4)$$

Şekil 5.9, amaç fonksiyonu-2 için gerçekleştirilen iterasyonlar boyunca önemli parametrelerin değişimini göstermektedir. Arazi kullanım oranının, iterasyon boyunca düştüğü gözlenmiştir. Bir önceki amaç fonksiyonuna benzer olarak türbin sayısı düşmüştür. Sonuç olarak, kullanılan amaç fonksiyonu ile arazi kullanım oranı düşerken iz bölgesi verimi de düşmektedir. Ayrıca, daire kesitli çözümde olduğu gibi her ne kadar arazi kullanım oranı nicel olarak düşmüş olsa da nitelik bakımından yeterli düzeyde olmayan çözümler üretilebilmektedir. Bu sebeple, bu seçeneğin kullanılacağı koşullar için ek kısıtlar düşünülmelidir.

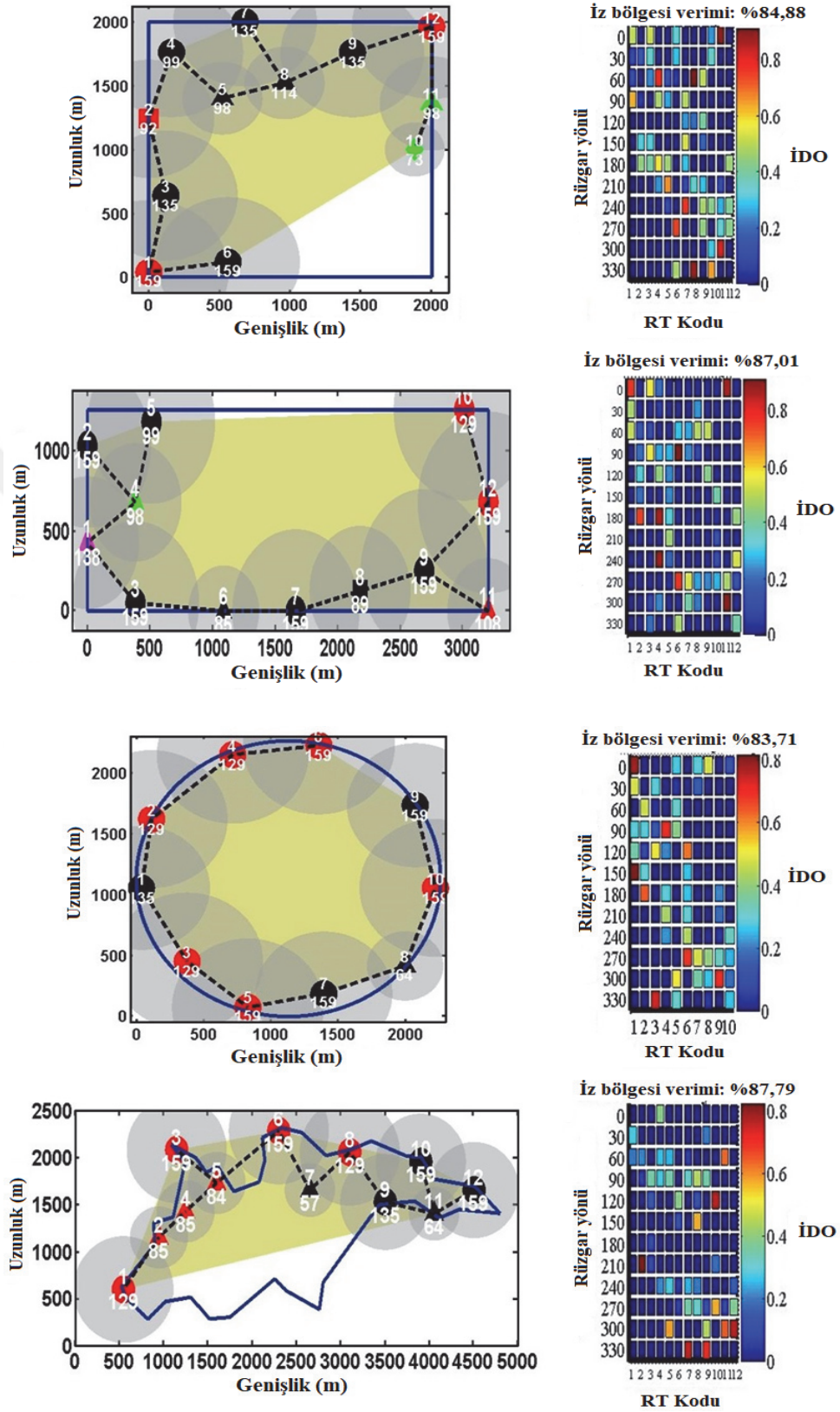


Şekil 4.9. Amaç fonksiyonu-2 için iterasyon gelişimi boyunca önemli tasarım parametrelerinin değişimi (a) kare (b) dikdörtgen (c) daire (d) düzensiz.

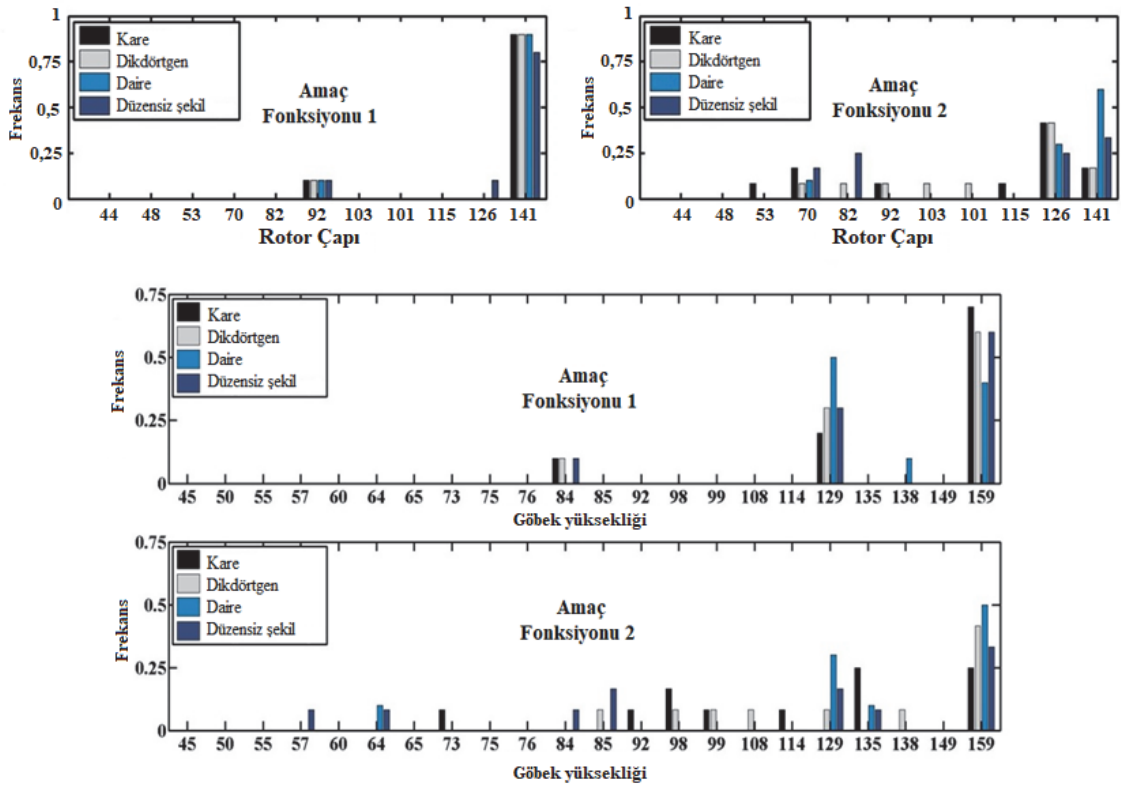
Şekil 5.10, amaç fonksiyonu-2 ve 40 MW minimum kurulu güç değeri için elde edilen santral tasarımlarını vermektedir. Buradan görüleceği üzere arazi kullanım oranının amaç fonksiyonu içerisine eklenmesi neticesinde arazi kullanım oranı düşmüştür. Fakat türbinler arasındaki mesafenin düşmesi sebebi ile iz bölgesi etkilerinin yükseldiği görülmektedir. İz bölgesi verimi, santral sınır şekline bağlı olarak %83,71 ile %87,79 arasında değişmektedir.

Şekil 5.11, üretilen en iyi santral düzenlerinin rüzgâr türbin tipi ve göbek yüksekliği seçim frekanslarını vermektedir. Buradan görüleceği üzere Model-141 rüzgâr türbininin dominant türbin olduğu görülmektedir. Alan kısıtlamasının olmadığı koşulda Model-141 dışında sadece iki adet türbin modeli seçilmiştir. Amaç fonksiyonu-2 için türetilen sonuçlarda türbin modeli çeşitliliğin daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı durum göbek yüksekliği çeşitliliği açısından da benzerdir. Model-141 modelinin 159 metre yüksekliği seçeneğinin en dominant göbek yüksekliği seçeneği olduğu açıktır. Kullanılan hayali rüzgâr verisinin düşük rüzgâr hızı ile karakterize edildiği düşünülürse sonucun mantıklı olduğu söylenebilir.

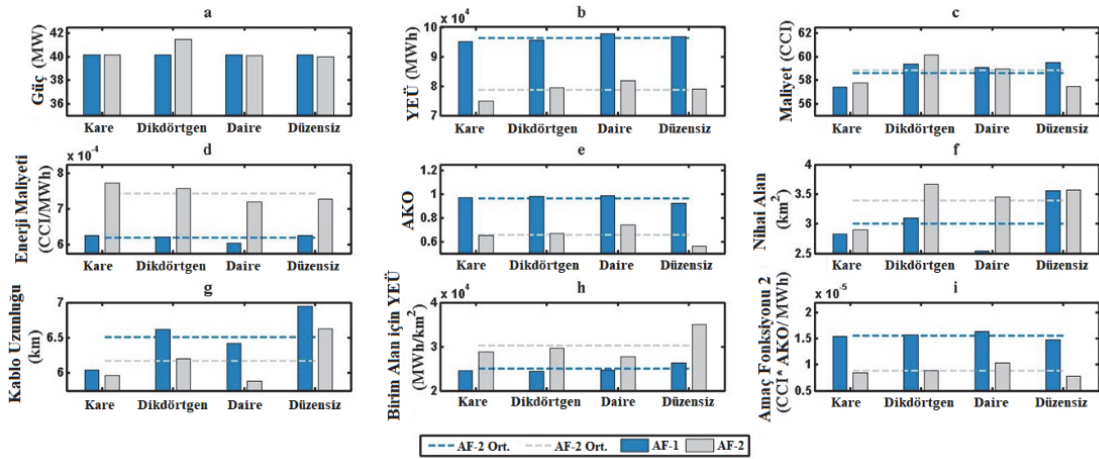
Her koşulda, seçilen problem koşulları altında istenen güç kapasitesi olan 40 MW'a ulaşılmış ve/veya aşılmıştır (Şekil 5.12.a). Amaç fonksiyonu-1 için türetilen santral düzenleri daha yüksek yıllık enerji üretimi değerlerine ulaşmıştır (YEÜ ortalaması, AF-1 = 96.308 MWh, AF-2 = 78.759 MWh) (Şekil 5.12.b). Rüzgâr santrali tasarımlarının ortalama maliyeti hemen hemen eşittir (Maliyet ortalaması, AF-1 = 58,83 CCI, AF-2 = 58,57 CCI) (Şekil 5.12.c). Buradaki CCI referans bir türbine göre alınan boyutsuz birim türbin maliyetidir. Dolayısı ile santral tasarımlarının birim enerji maliyetleri amaç fonksiyonu-1 için daha düşüktür (BEM ortalaması, AF-1 = $6,19 \times 10^{-4}$, AF-2 = $7,43 \times 10^{-4}$) (Şekil 5.12.d). Amaç fonksiyonu-1 için üretilen santral düzenlerinin ortalama arazi kullanım oranı %92'dir. Amaç fonksiyonu-2 kullanılması ile bu değer %65'e düşmüştür (Şekil 5.12.e). Nihai santral alanı, türbinlerin konumlarına göre oluşturulan hayali bir dışbükey poligonu temsil etmektedir. Minimum kablo uzunlukları, Kruskal algoritması (Kruskal, 1956) olarak adlandırılan yaygın olarak kullanılan en kısa yol algoritması ile hesaplanmıştır. Minimum kablo uzunlukları, santral saha şekline bakılmaksızın amaç fonksiyonu-1 için türetilen düzenlerde daha büyüktür (Şekil 5.12.g). Amaç fonksiyonu-2 için türetilen santral düzenleri diğerlerine kıyasla daha yüksek birim alan başına yıllık enerji üretim değerine sahiptir (Şekil 5.12.h).



Şekil 5.10. Amaç fonksiyonu-2 için elde edilen en iyi santral düzenleri.

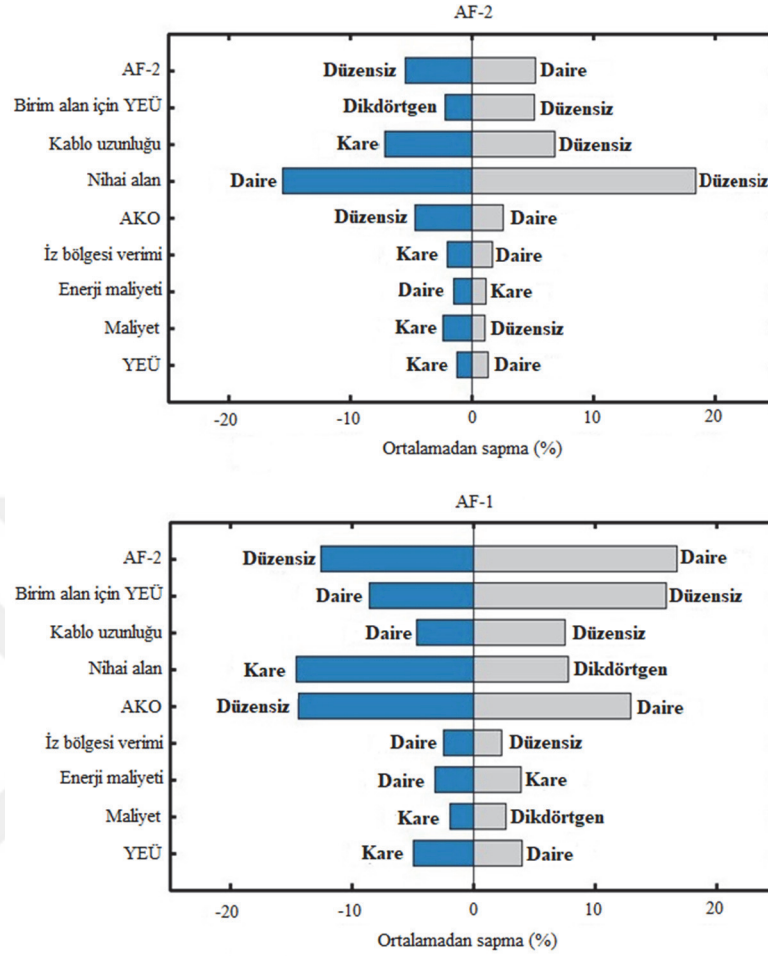


Şekil 5.11. Rüzgâr türbini tipi ve göbek yüksekliğinin seçim frekansları.



Şekil 5.12. Sonuçların belirleyici parametreler açısından karşılaştırılması.

Şekil 5.13, alan şeklinin değişmesine bağlı olarak değişen tasarım parametrelerinin, ortalama değerlerden maksimum sapmalarını göstermektedir. Mavi ve gri renkleri sırasıyla negatif ve pozitif maksimum sapmaları temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, en önemli tasarım parametreleri olan iz bölgesi verimi, enerji maliyeti, toplam maliyet ve yıllık enerji üretiminin, alan şeklinin değişimine olan hassasiyetleri %10'un altındadır.



Şekil 5.13. Alan şekline bağlı olarak değişen parametrelerin hassasiyet analizi.

5.3. Evliya Çelebi Kampüsü'nün Rüzgâr Enerjisi Fizibilitesinin Sonuçları

Bir önceki bölümde, optimizasyon kodu nihai problemde kullanılabilecek bir yapıya yaklaştırılmıştır. Gerçek fizibilite çalışmasının yürütülmesi için WAsP yazılımının etkin bir şekilde kullanılması elzemdir. Bu sebeple, WAsP yazılımı kullanılması ile bölgenin rüzgâr atlasını oluşturmak üzere çalışmalar yapılmıştır. Nihai problemin çözümüne geçmeden, WAsP yazılımının kullanımı hakkında deneyim kazanmak amacı ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsünün rüzgâr enerjisi fizibilite araştırması yapılmıştır. Her ne kadar rüzgâr enerjisi sistemlerinin fizibilite araştırmaları birçok araştırmacı tarafından araştırılmış olsa da, bir kampüsün anlık enerji tüketiminin karşılanması için yapılan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu bölümün temel amacı, üniversite kampüslerinde rüzgâr türbini kurulum fizibilitesini araştırmak için bir metodoloji oluşturmaktır. Şekil 5.14, Evliya Çelebi Kampüsü'nü ve araştırılan alanı vermektedir. Çizelge 5.4 ise Kütahya'nın uzun süreli ortam sıcaklığı verilerini vermektedir.



Şekil 5.14. Evliya Çelebi Kampüsü ve incelenen alan.

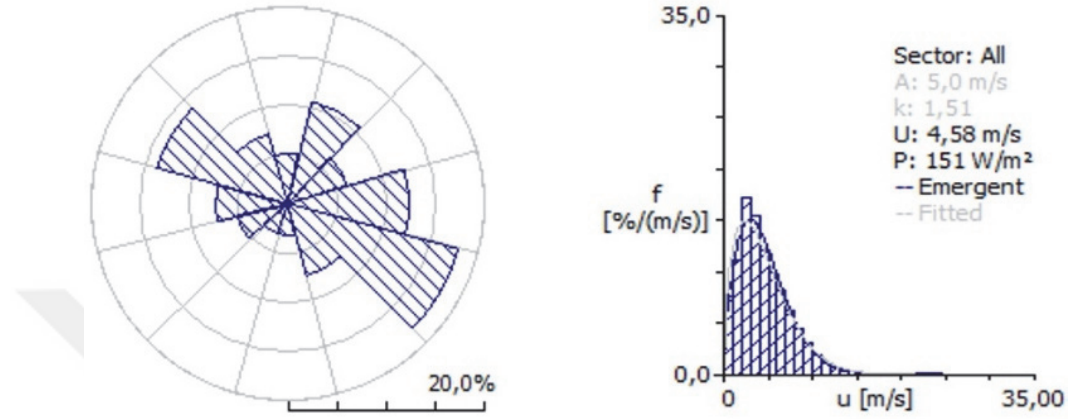
Çizelge 5.4. Kütahya için uzun dönemli maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklar (TCMGM, 2018).

KÜTAHYA	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ortalama sıcaklık (°C)	0,7	1,6	5,2	10,1	14,7	18,6	21,1	21,1	16,8	11,9	6,4	2,5
Maksimum sıcaklık (°C)	17,2	23	27,0	30,2	33,8	36,2	39,5	38,8	36,1	31,6	25,4	20,5
Minimum sıcaklık (°C)	-26	-27	-16	-7,8	-2,8	0,5	2,6	-0,2	-3,9	-6,9	-18,3	-28,1

5.3.1. Rüzgâr verisi analizi

Bölüm 4.1.'de detayı verilen iki yıllık rüzgâr ölçüm verisi ve WASP yazılımı kullanılması ile kampüs etrafındaki en rüzgârlı alanlar bulunmuştur. Şekil 5.15 ve Çizelge 5.5, rüzgâr verisinin WASP ile analiz edilmesiyle elde edilen rüzgâr ikliminin istatistiksel parametrelerini sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama rüzgâr hızı 30 metrede 4,58 m/s'dir. Ek olarak, Weibull şekil parametresi k ve Weibull ölçek parametresi A sırasıyla 1,51 ve 5 m/s'dir. Hâkim rüzgâr yönü %17,8 frekans ile güneydoğu (120°) yönüdür fakat bu yöndeki ortalama rüzgâr hızı

3,47 m/s'dir ve dolayısı ile enerji üretim potansiyeli çok düşüktür. Kütahya'da rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi için en etkili rüzgâr yönü, 6,7 m/s ortalama rüzgâr hızı ve % 10,7 esme frekansı ile kuzeydoğu (30°) yönüdür.



Şekil 5.15. Rüzgâr yönü ve hızlarının frekans dağılımları.

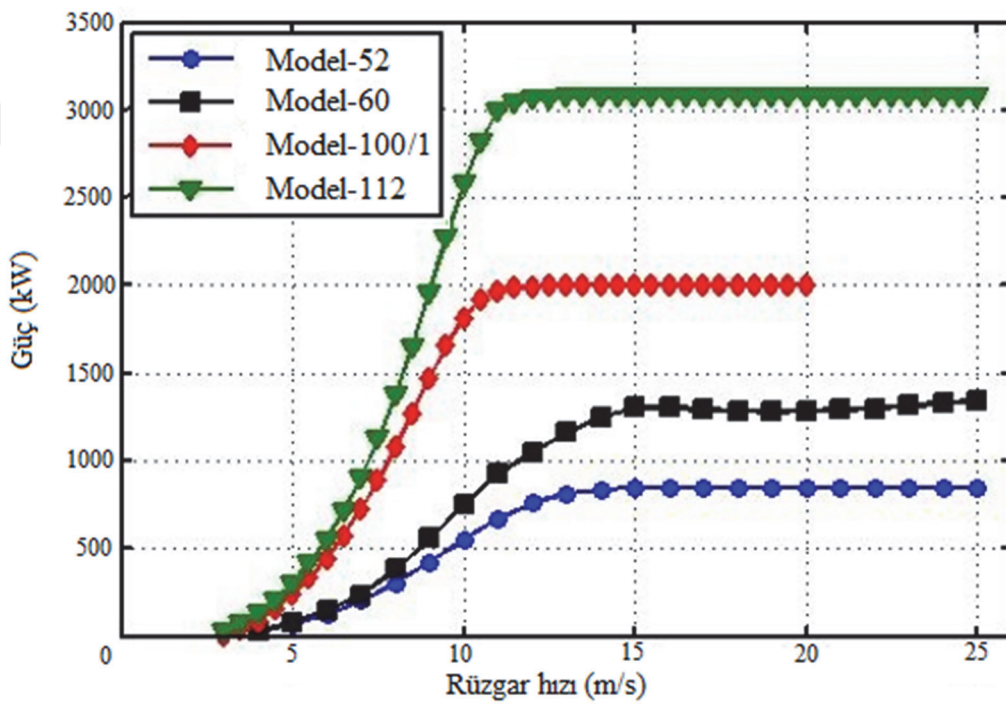
Çizelge 5.5. Her bir yön için Weibull parametreleri, ortalama hızlar ve frekans dağılımları.

Sektör		Rüzgâr iklimi			
Sayı	Yön [°]	Frekans [%]	Weibull-A [m/s]	Weibull-k	Hız [m/s]
1	0	5	5,4	1,63	4,83
2	30	10,7	7,5	2,63	6,7
3	60	6,3	5,3	1,81	4,72
4	90	12,3	4,8	1,94	4,27
5	120	17,8	3,9	1,81	3,47
6	150	7,6	3	1,56	2,72
7	180	3,2	2,2	0,79	2,57
8	210	3,2	5	0,98	5,09
9	240	5,2	7,5	1,79	6,69
10	270	7,4	6,5	1,99	5,74
11	300	13,8	5,5	2,16	4,87
12	330	7,4	4,3	1,85	3,83
Tümü			5	1,51	4,58

5.3.2. Enerji, maliyet ve karşılayabilirlik analizleri

Rüzgâr kesikliliği, rüzgârdan elektrik üretimindeki en büyük sınırlamalardan biri olarak kabul edilir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin anlık tüketim taleplerini karşılama yeteneği, özellikle elektrik depolamadaki teknik zorluklar dikkate alındığında önem kazanmaktadır. Bu çalışmanın temel önceliklerinden biri, kampüsün anlık elektrik talebinin rüzgâr enerjisi ile karşılanabilirliğini araştırmaktır. Bu sebeple farklı rüzgâr türbini modellerinin bir yıl boyunca kampüsün saatlik

elektrik tüketimini karşılayabilme potansiyeli analiz edilmiştir. İlk olarak, saatlik elektrik enerjisi üretim veri setleri iki ölçüm yılı için ayrı ayrı hesaplanmış ve saatlik tüketim verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.16, bu analiz için WAsP veri tabanından seçilmiş farklı üreticilerin ticari rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerini göstermektedir. Türbinler rotor çaplarına bağlı olarak adlandırılmıştır. Rüzgâr türbinleri, 850 kW ile 3075 kW arasında değişen farklı güç kapasitelerine sahiptir. Çizelge 5.6, rüzgâr türbinlerinin başlıca özelliklerini vermektedir. Türbinlerin üreticileri tarafından verilen veri föyleri ekler bölümünde sunulmuştur.



Şekil 5.16. Seçilen türbinlerin güç eğrileri (WAsP version 11).

Çizelge 5.6. Seçilen türbinlerin başlıca özellikleri.

	Model-52	Model-60	Model-100/1	Model-112
Nominal güç (kW)	850	1300	2000	3075
Rotor çapı(m)	52	60	100	112
Göbek yüksekliği (m)	55	50	80	84
Devreye girme hızı (m/s)	4	4	3	3
Nominal hız (m/s)	16	15	12	12,5
Devreden çıkma hızı (m/s)	25	25	20	25
Rotor süpürme alanı (m ²)	2123,71	2827,43	7853,98	9852,03
Gürültü seviyesi (dB)	102	102,5	105,5	106,5
Fiyat (\$)	1.030.000	1.560.000	2.400.000	3.690.000

Logaritmik yasa, türbinlerin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu yöntem, arazinin yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak dikey rüzgâr profilini hesaplamak için kullanılır. Bu yöntem sadece durağan ve nispeten düz bir yüzey için geçerlidir ve aşağıdaki gibi verilir (Irwin, 1979; Boudia ve Guerri, 2015):

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (5.5)$$

Burada V_2 , Z_2 göbek yüksekliğindeki ortalama rüzgâr hızıdır. V_1 , Z_1 yüksekliğinde ölçülen ortalama rüzgâr hızıdır. Z_0 ise bölgenin yüzey pürüzlülüğünü tanımlamaktadır. Buradaki karşılanabilirlik analizi, türbin tarafından üretilen enerjinin sadece kampüs tarafından kullanıldığı bir senaryo varsayılarak yapılmıştır. Türbin kullanım oranı (TUR_{UNI}) ve üniversite (BEM_{UNI}) tarafından tüketilen birim enerji maliyeti aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$TUR_{UNI} = \frac{\text{Türbin tarafından üniversiteye verilen yıllık enerji}}{\text{Rüzgar türbini yıllık enerji üretimi}} \times 100 \quad (5.6)$$

$$BEM_{UNI} = \frac{\text{Net bugünkü değer (PVC)}}{\text{Türbin tarafından üniversiteye sağlanan yıllık enerji miktarı}} \quad (5.7)$$

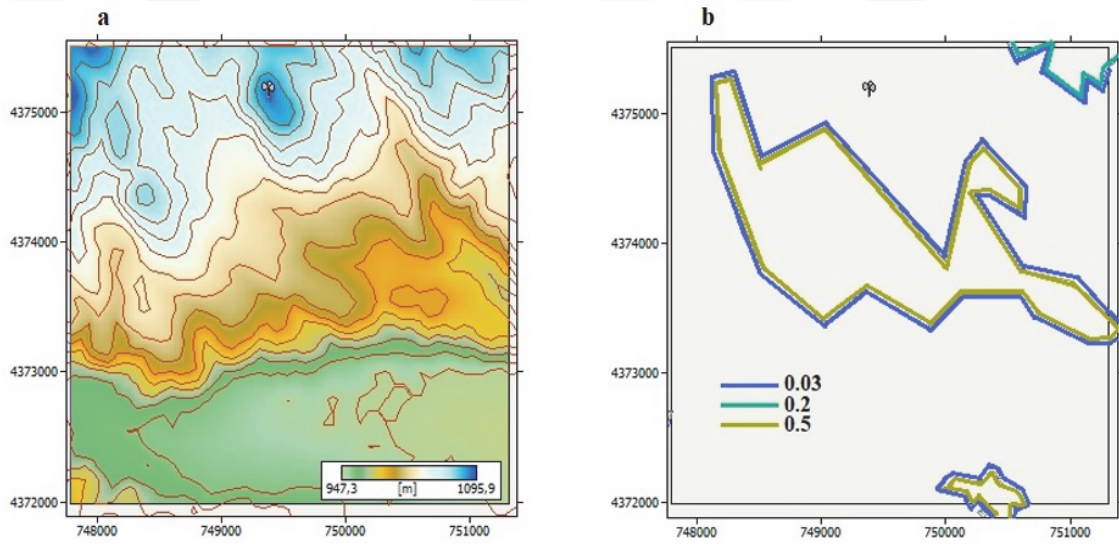
Çizelge 5.7. Saatlik tüketimin karşılanabilirlik analizi.

	İlk yıl		İkinci yıl		Ortalama		
Türbin modeli	TUR_{UNI} (%)	$AR_{saatlik}$ (%)	TUR_{UNI} (%)	$AR_{saatlik}$ (%)	TUR_{UNI} (%)	$AR_{saatlik}$ (%)	BEM_{UNI} (\$/kWh)
Model-52	98	15,5	98	15,8	98	15,65	0,0576
Model-60	92	17,6	92	18,7	92	18,15	0,0709
Model-100/1	70	38,5	70	39,3	70	38,9	0,0531
Model-112	56	43,5	56	44,4	56	43,95	0,0724

Çizelge 5.7, saatlik elektrik tüketiminin karşılanabilirlik analizinin sonuçlarını listelemektedir. Sonuçlara göre, türbin anma gücü 850 kW'tan 3075 kW'a çıktıkça, türbin tarafından üretilen enerjinin kampüs tarafından kullanımı %98'den %56'ya düşerken, saatlik tüketimin karşılanabilirlik oranı %15,65'ten %43,95'e çıkmaktadır. Bu değerlerin yıldan yıla güçlü farklılıklar göstermediği görülmektedir. Model-52 tarafından üretilen enerjinin hemen

hemen tamamı, kampüs tarafından tüketileceği öngörülmektedir ve düşük BEM_{UNI} değeri ile bu senaryo için uygun bir seçenek olabilir.

Mutlak bir yargıya varmadan önce, rüzgâr türbinlerini kampüs taleplerinden bağımsız olarak değerlendirmek faydalı olacaktır. İlk olarak, kampüs yakınlarındaki en rüzgârlı alanları belirlemek gereklidir. WAsP, genelleştirilmiş rüzgâr iklimini oluşturabilen ve istenen yerden yükseklik için bölge üzerinde kaynak haritalarını tanımlayabilen bir yazılımdır. Bunun için ölçülmüş bir rüzgâr verisine ek olarak araştırılan bölgenin dijital yükseklik ve pürüzlülük değerlerinin tanıtılması gereklidir. Şekil 5.17, araştırılan alanın WAsP harita editör aracı kullanılması ile oluşturulan dijital yükseklik haritasını ve pürüzlülük haritasını vermektedir.

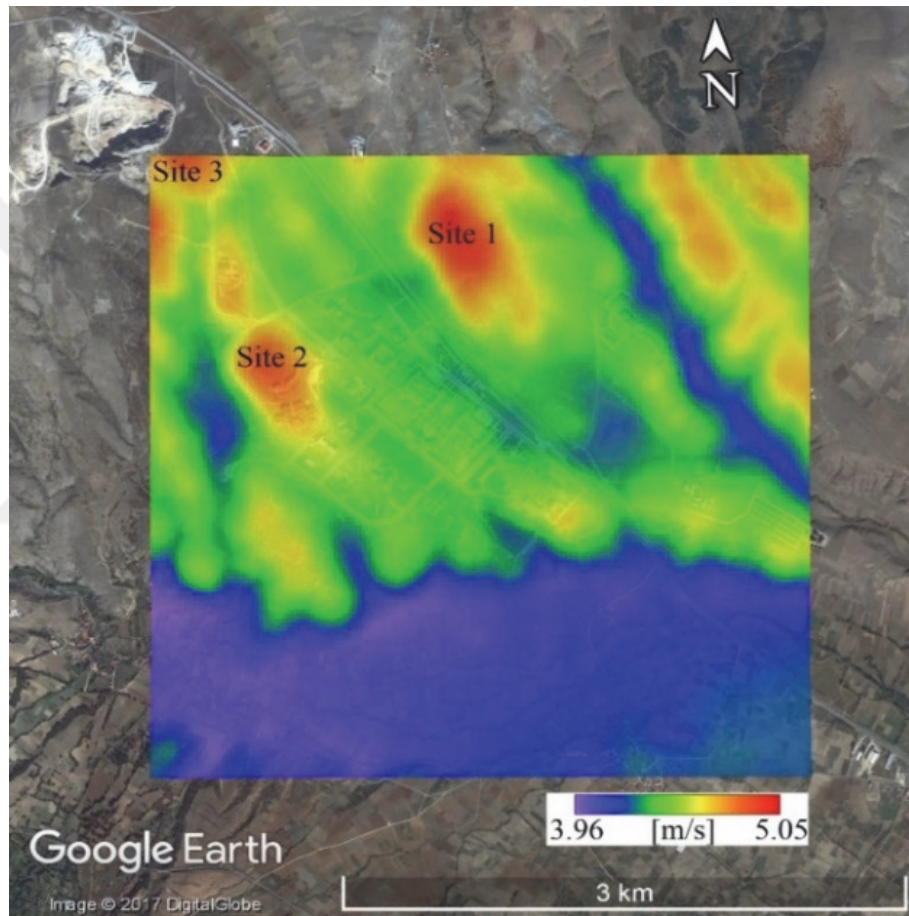


Şekil 5.17. Kampüs çevresinin dijital harita modeli (a) çalışma bölgesinin dijital yükseklik modeli. (b) çalışma bölgesinin pürüzlülük uzunlukları.

Rüzgâr hızının, rüzgârdan elektrik üretmek için ana tahrik parametresi olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, 55 m yerden yükseklik için ortalama rüzgâr hızı haritası Şekil 5.18’te verilmiştir. Arazi üzerindeki ortalama rüzgâr hızı değerleri, konuma bağlı olarak 3,96-5,05 m/s arasında değişmektedir. Kaynak haritasına göre, üç farklı alan, arazinin rüzgâr potansiyelinin üst sınırını temsil etmektedir.

Çizelge 5.8, en rüzgârlı bölgeler ve seçilen rüzgâr türbinleri için enerji ve ekonomik analizlerinin sonuçlarını göstermektedir. Her rüzgâr türbini modelinin yıllık enerji üretim değerleri WAsP yazılımı ile elde edilmiştir. Sonuçlara göre, rüzgâr türbini modeline bakılmaksızın, en yüksek yıllık enerji üretim değerleri Saha-1 için elde edilmiştir. Ek olarak, Saha-2 ve Saha-3 arasındaki karşılaştırmanın sonuçları rüzgâr türbini modeline göre

değişmektedir, ancak bu fark doğrudan rüzgâr türbininin göbek yüksekliği ile ilgilidir. En düşük birim enerji maliyeti olan 0,0357 \$/kWh'e, Saha-1'de bulunan %25,5'lik bir kapasite faktörü ile Model-100/1 için ulaşılmıştır. Her bir alan için en yüksek kapasite faktörleri Model-100/1 ile sağlanmıştır. Bu rüzgâr türbini yıllık toplam tüketimin yaklaşık %56,6'sını üretirken anlık saatlik talebin yaklaşık %38,9'unu karşılayacağı tahmin edilmektedir. Model-100/1, saatlik ve yıllık analizlerin yorumlanması sonucunda kampüs için diğer bir uygun seçenek olarak görülmektedir.



Şekil 5.18. Yerden 55 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası.

Daha önce de belirtildiği gibi, kampüsün saatlik tüketim talebi, gün içinde saatlere ve bir yıl içindeki mevsimlere bağlı olarak güçlü farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, bir türbin modelinin saatlik tüketimi karşılayabilme yeteneğinin istatistiksel bir analizi, doğru tanımlama için faydalıdır. Şekil 5.19, Model-100/1 için saatlik talebin karşılama oranı zaman serilerinin istatistiksel dağılımını vermektedir. Üstte, AR_{saatlik} 'in genlik dağılımları iki farklı yıl için verilirken, altta ise tüketimin tam karşılandığı saatlerin gün içindeki saat dilimlerine karşılık gelen dağılımları verilmiştir. Sonuçlara göre Model-100/1'in kampüsün güncel tüketim şartlarında her

yıl en az 2000 saat elektrik talebini karşılayabileceği öngörülmektedir. Tüketime tam olarak karşılandığı saatlerin yoğunluğu, günün diğer saatlerine göre 16.00-19.00 arasında nispeten daha güçlüdür. İki yıl arasında küçük farklılıklar olmasına rağmen, karşılama sayılarının mevsimsel özellikleri ayırt edici bir eğilim ile karakterize edilmektedir. Bu dönemsel karakteristiğinin bilinmesi enerji planlamasında faydalı olabilir.

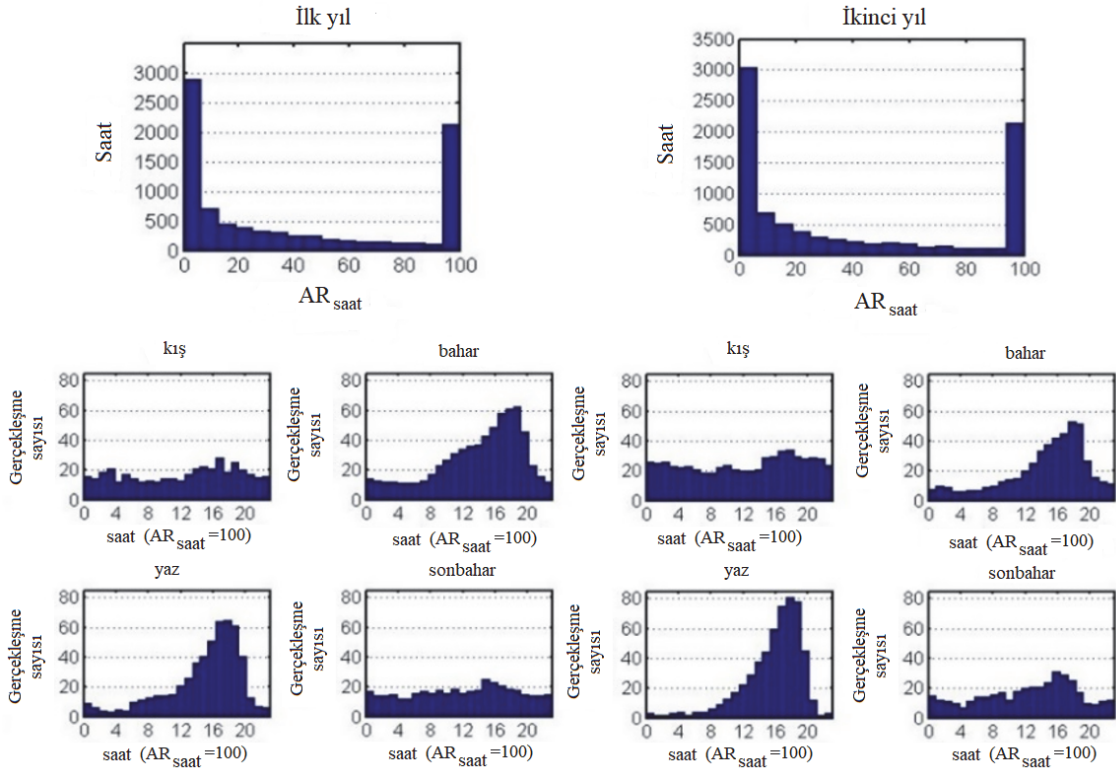
Çizelge 5.8. Seçilen sahalara için yıllık enerji üretimi, kapasite faktörü ve yıllık enerji üretiminin yıllık tüketime oranı değerleri.

	Parametre	Saha 1	Saha 2	Saha 3
Model-52	YEÜ (MWh)	1183	1103	1082
	KF (%)	0,158	0,148	0,145
	BEM (\$/kWh)	0,0580	0,0622	0,0634
	CR _{Yıllık} (%)	15,3	14,2	14
Model-60	YEÜ (MWh)	1465	1352	1321
	KF (%)	0,128	0,118	0,116
	BEM (\$/kWh)	0,0709	0,0768	0,0786
	CR _{Yıllık} (%)	19	17,4	17
Model-100/1	YEÜ (MWh)	4470	4194	4228
	KF (%)	0,255	0,24	0,241
	BEM (\$/kWh)	0,0357	0,0381	0,0378
	CR _{Yıllık} (%)	57,8	54,2	54,7
Model-112	YEÜ (MWh)	6238	5854	5892
	KF (%)	0,237	0,217	0,218
	BEM (\$/kWh)	0,0394	0,042	0,0417
	CR _{Yıllık} (%)	80,7	75,7	76,2

5.3.3. Belirlenen sahalara rüzgâr türbini kurulumu açısından uygunluğu

Kampüs çevresinde belirlenen sahalara rüzgâr türbin kurulum uygunluğu araştırılmıştır. Şekil 5.20, Model-100/1'lerin sahalara üzerindeki sanal düzenlerini verir. Her bir türbin için yıllık enerji üretiminin yönler göre dağılımları verilmiştir. Ek olarak, altı rotor çapı değerinde bir çap değerine sahip kırmızı bir daire, türbülans etkilerinin kuvvetli olduğu yakın iz bölgesini temsil eder. Model-100/1'lerin en rüzgârlı sahalara üzerinde kurulumuna engel olacak bir fiziki engel bulunmamaktadır. Saha-1 ve Saha-3'teki türbinlerin yakın iz bölgesi içinde herhangi bir yapı bulunmamaktadır. Bununla birlikte, Saha-2'deki türbinin yakın iz bölgesi içinde sırasıyla 176 ve 204 metre uzaklıkta bir konuk evi ve yurt binaları bulunmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, teknolojik açıdan olgun, ekonomik açıdan rekabet edebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olmasına rağmen, rüzgâr santrallerine yakın bölgelerde gürültü yayılımı ile ilgili kaygılara neden olmaktadır (Pedersen vd., 2007; Swofford ve Slattery, 2010).



Şekil 5.19. Model-100/1 için saatlik talebin karşılama oranı zaman serilerinin istatistiksel dağılımı.

Rüzgâr türbinleri mekanik ve aerodinamik olmak üzere iki tür gürültü üretirler. Genel olarak, türbinlerin mekanik ve elektriksel parçaları tarafından üretilen mekanik gürültü aerodinamik gürültü kadar önemli sayılmamaktadır (Nakano vd., 2007; Wagner vd., 2012).

Gürültü etkilerinin önemi anlaşıldıktan sonra yapılan uygulamalardan edinilen genel kabule göre, rüzgâr türbinleri yaşam alanlarından en az 300-400 metre uzağa kurulmalıdır. Böylece gündüz vakitlerinde yaşam alanında hissedilen gürültü seviyesinin 45-50 dB(A)'yı aşmaması sağlanır. Bu ses basınç seviyesi neredeyse sessiz klimalı bir ofis içindeki gürültüye eşdeğerdir. Çizelge 5.9, farklı aktivitelerin gürültü seviyesi değerlerini vermektedir.

Bu sebeple, rüzgâr türbini santral konumlandırması yapılırken yaşam alanlarına olan gürültü etkileri analiz edilmelidir. Bu amaçla, bu çalışmada uluslararası standart ISO 9613-2 “Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: A general method of calculation” temel alınarak Google Earth ile etkileşimli bir hesaplama modülü oluşturulmuştur. Metodoloji Bölüm 4.7.2.’de verilmiştir.



Şekil 5.20. Belirlenen sahalar üzerinde Model-100/1 modelinin yakın iz bölgesi ve yönleri göre yıllık enerji üretiminin dağılımı.

Çizelge 5.9. Farklı aktivitelerin gürültü seviyesi değerleri.

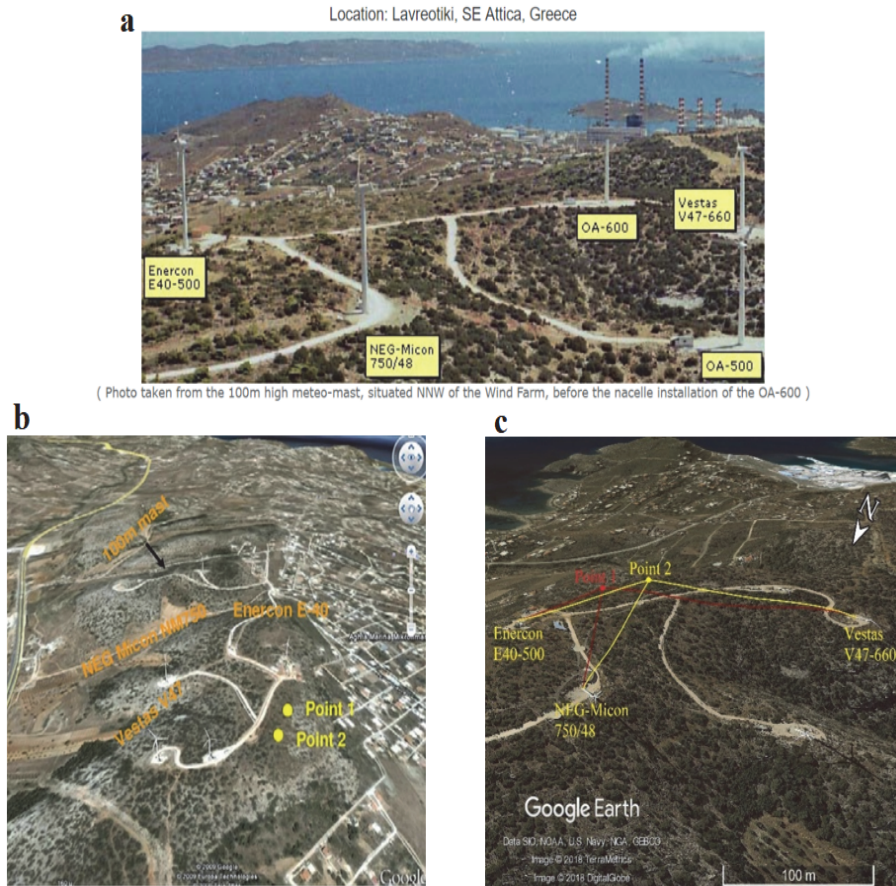
Kaynak/Aktivite	Gürültü seviyesi db(A)
Duyma eşiği	0
Fısıltı	30
Kırsal bölge gece vakti arka plan	20-40
Sessiz yatak odası	35
Havalandırma sistemli boş ofis	45-50
Yoğun genel ofis	60
Şehir trafiği	90
250 metreden uçan jet uçağı	105
Acı eşiği	140

Kaldellis ve arkadaşları (Kaldellis vd., 2012), Yunanistan'ın Lavreotiki şehrindeki Yenilenebilir Enerji Kaynakları Merkezinin (CRES) rüzgâr çiftliğinde ses ölçüm deneyleri yapmışlardır. Bu santral karmaşık bir arazi topografyasına sahip bir arazide deniz seviyesinden 120 m yükseklikte konumlanmıştır (Şekil 5.21.). Ses kaydı için kullanılan mikrofonlar zemin seviyesinden 1,5 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Rüzgâr türbinleri ve diğer kaynaklar tarafından üretilen birleşik ses alıcı bölgesinden ölçülmüştür. Gürültü etkisinin daha güvenilir bir şekilde hesaplanması ve elde edilen değerlerin karşılaştırılması için iki adet ölçüm noktası seçilmiştir

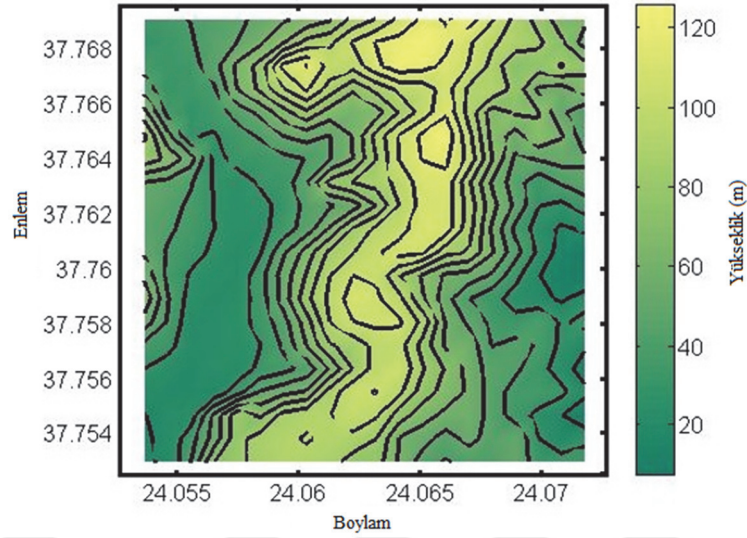
(Şekil 5.21.b). Çizelge 5.10, araştırılan rüzgâr türbinlerinin ölçümlerde kullanılan ekipmanlara olan kesin konumlarını ve bu çalışmada verilen gürültü değerlerinin noktalarını göstermektedir. Ölçümlerin toplam belirsizliğinin 1,6 dB(A) düzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Bunlara ek olarak Şekil 5.22, CRES rüzgâr santralinin konumunu ve dijital yükseklik haritasını vermektedir.

Çizelge 5.10. Ses ölçüm noktalarının türbinlere göre konumları.

	Vestas V47		NM 750		Enercon E40	
	(Kaldellis vd., 2012)	Bu çalışma	(Kaldellis vd., 2012)	Bu çalışma	(Kaldellis vd., 2012)	Bu çalışma
Nokta 1	291 m-245°	291 m- 245°	231 m-330°	232 m -329°	132 m -5°	132 m -5°
Nokta 2	244 m-255°	243 m-254°	270 m-341°	270 m-340°	193 m-13°	192 m-13°

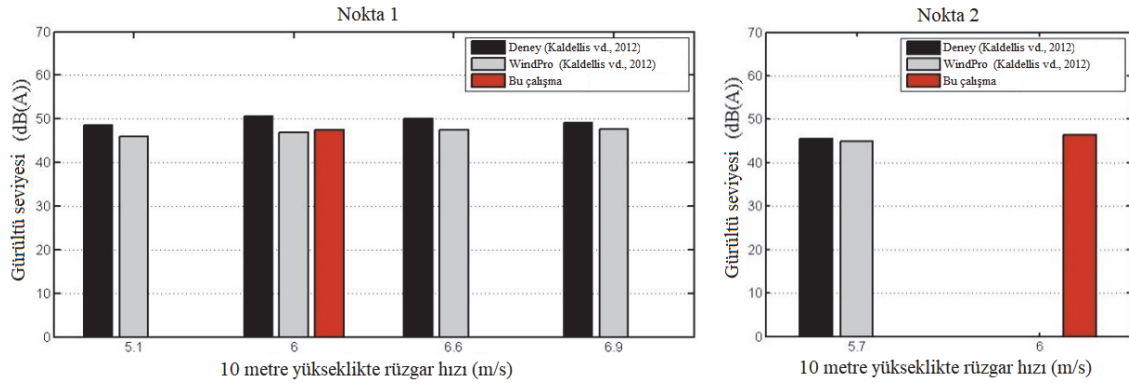


Şekil 5.21. CRES rüzgâr çiftliği (a) CRES rüzgâr çiftliği genel görünüm (CRES, 2018) (b) Kaldellis ve diğerlerinin ölçüm yaptığı noktalar (Kaldellis vd., 2012) (c) ses tahmini için deneysel ölçüm noktalarının belirlenmesi.



Şekil 5.22. CRES rüzgâr çiftliğinin dijital yükseklik haritası.

Şekil 5.23'te elde edilen sonuçların Kaldellis ve diğerleri (Kaldellis vd., 2012) tarafından verilen deneysel ve WindPro sonuçları ile kıyaslaması verilmiştir. İki farklı nokta için verilen sonuçların birbirleri ile iyi uyum sergiledikleri görülmektedir.



Şekil 5.23. Gürültü dağılımı hesaplama modelinin doğrulama sonuçları.

Gürültü dağılımı modeli için yapılan doğrulamadan sonra, kampüs çevresinde belirlenen sahalarda kullanılacak türbinlerin gürültü dağılımı analiz edilmiştir. 27601 sayılı “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği” göre, sanayi alanlarındaki çeşitli faaliyetlerin kabul edilebilir maksimum gürültü seviyesi 70 dB (A) iken ve eğitim, kültür ve sağlık alanları gibi hassas alanlarda gündüz vakti 60 dB (A)’dır. Ayrıca bir kültürel tesis alanı, bir sağlık tesisi alanı, bir eğitim tesisi alanı ve devlet kurumlarının kapı pencere açık iken izin verilen

maksimum iç mekân ses basınç seviyeleri sırasıyla 35 dB(A), 35 dB(A), 40 dB(A), 45 dB(A)'dır (Resmi Gazete, 2010).

Şekil 5.24, her bir bölge için harita üzerinde herhangi bir noktadan 3 m yerden yükseklikte gürültü yayılmasını göstermektedir. Ayrıca, her binanın amaçlanan kullanımına göre, kapılar ve pencereler açık iken izin verilen maksimum iç mekân ses basıncı değerleri kırmızı renkle verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Saha-1 ve Saha-3'te yer alan Model-100/1'lerin gürültü yayılımı, kampüsün mevcut durumu için binalarda sorun teşkil etmeyecektir. Ancak, Saha-2'de yer alan Model-100/1'in gürültü etkisi, misafirhane ve yurtlar için pencereler açıkken müsaade edilen ses basıncı seviyesinin biraz üzerinde görülmektedir.

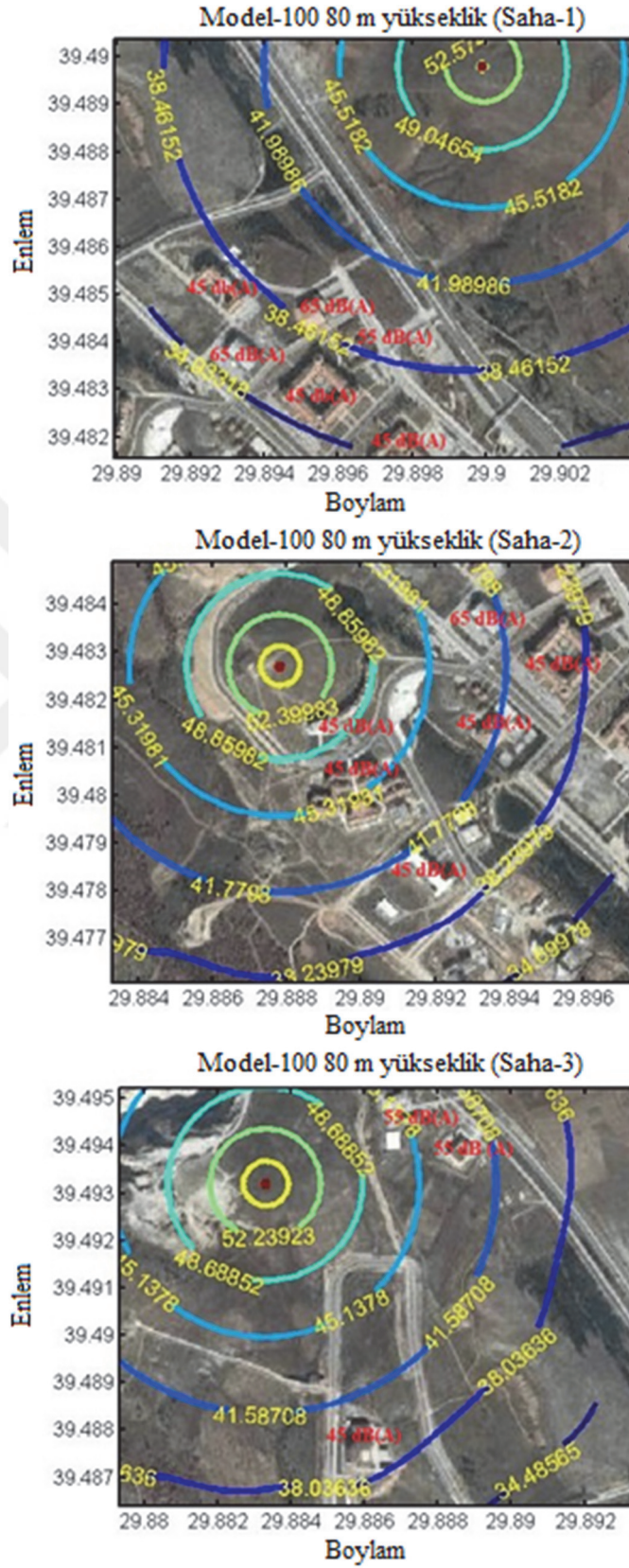
5.4. Kütahya'nın Rüzgâr Santral Fizibilitesinin Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasına kadar, nihai problemde kullanılabilecek bir optimizasyon kodu oluşturulmuştur. Son olarak bu kodun WAsP yazılımı ile ortak bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Evliya Çelebi Kampüsünün WAsP yazılımı kullanılarak rüzgâr enerjisi fizibilitesi gerçekleştirilmesi sırasında program hakkında yeterli deneyim kazanılmıştır. Bu bölümde Kütahya merkez ilçesinin rüzgâr santrali fizibilite araştırması önceki bölümlerde elde edilen kazanım ve sonuçlar eşliğinde sunulmuştur.

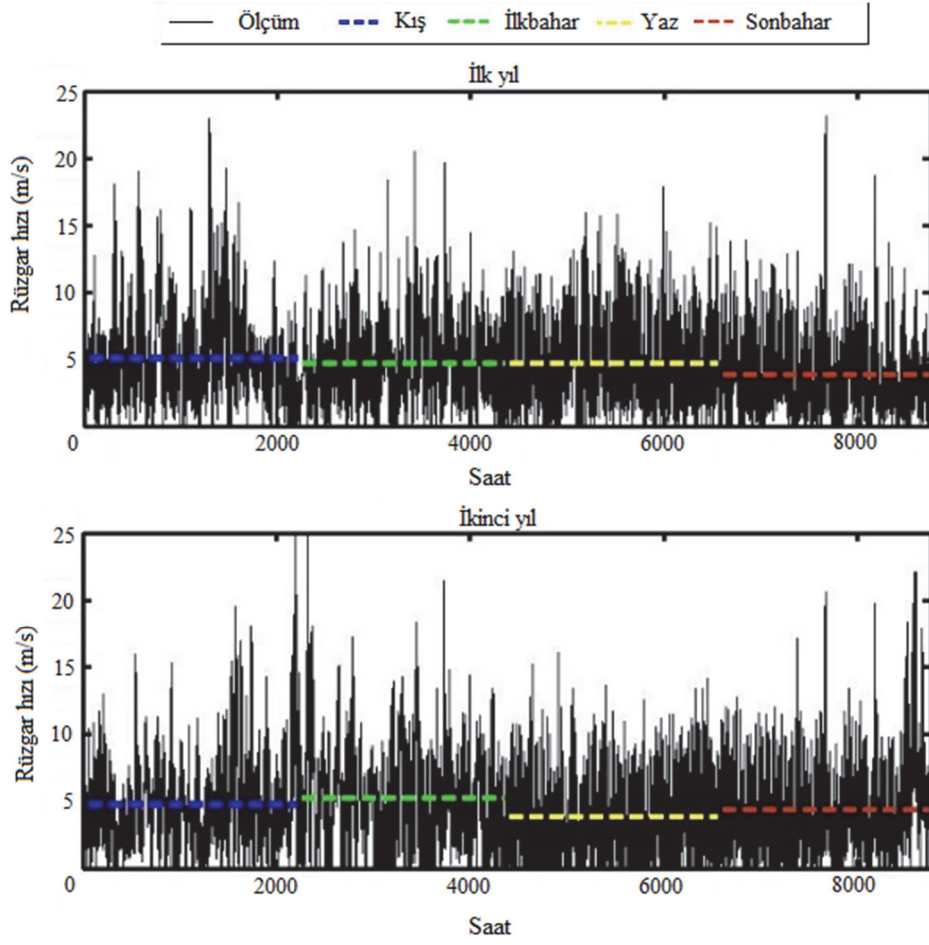
5.4.1. Rüzgâr verisinin doğrulaması

Bir bölgenin rüzgâr potansiyelinin belirlenebilmesi için minimum bir yıl, daha güvenilir verilere ulaşmak için ise iki yıl veya daha uzun bir süre boyunca bir rüzgâr ölçüm istasyonundan veri toplanması gerekmektedir. Bu çalışmada 24 ay boyunca 10 metre ve 30 metreden 10 dakikalık ortalama aralıklar ile kaydedilen rüzgâr verileri kullanılmıştır. Şekil 5.25, 30 metreden toplanan iki yıllık rüzgâr ölçümü verilerini ve mevsimsel ortalamalarını vermektedir.

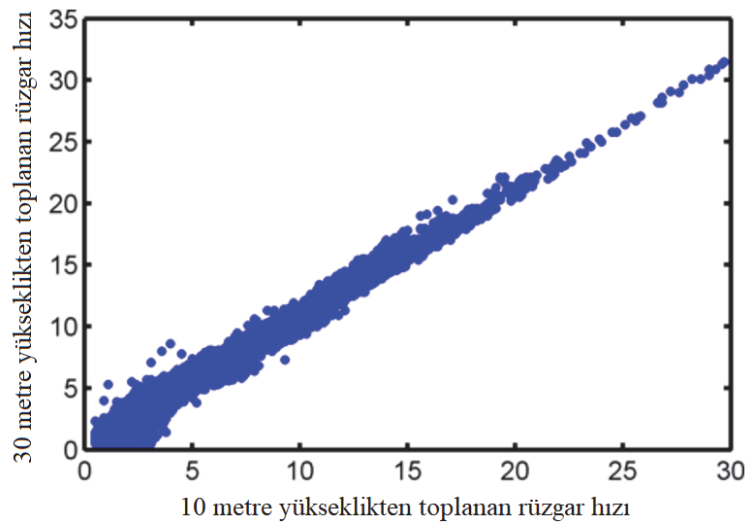
Standartlara göre kayıp veri oranının %10'u aşmaması gerekmektedir (Bailey vd., 1997). Veri seti içindeki kayıp veri oranı %2'yi aşmamaktadır. Bütün veri seti içinde hız ve yön sensörlerinin ölçüm aralığı dışında bir değere rastlanmamıştır. 30 metre yükseklikteki günlük ortalama rüzgâr hızı ile 10 metre yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı arasındaki fark, nadiren ve çoğunlukla kayıp veriler sebebi ile 1 m/s'nin üzerindedir ve ortalaması 0,261 m/s'dir. Şekil 5.26, iki farklı yükseklikten toplanan 10 dakikalık rüzgâr hızı ortalamalarının kıyaslamasını vermektedir. Bu iki veri setinin Pearson korelasyon katsayısı 0,9837'dir ve bu sebeple iki farklı yükseklikte toplanan rüzgar hızı ortalamaları arasında güçlü bir korelasyon olduğu görülmüştür.



Şekil 5.24. Model-100/1 için gürültü yayılımı tahminleri.



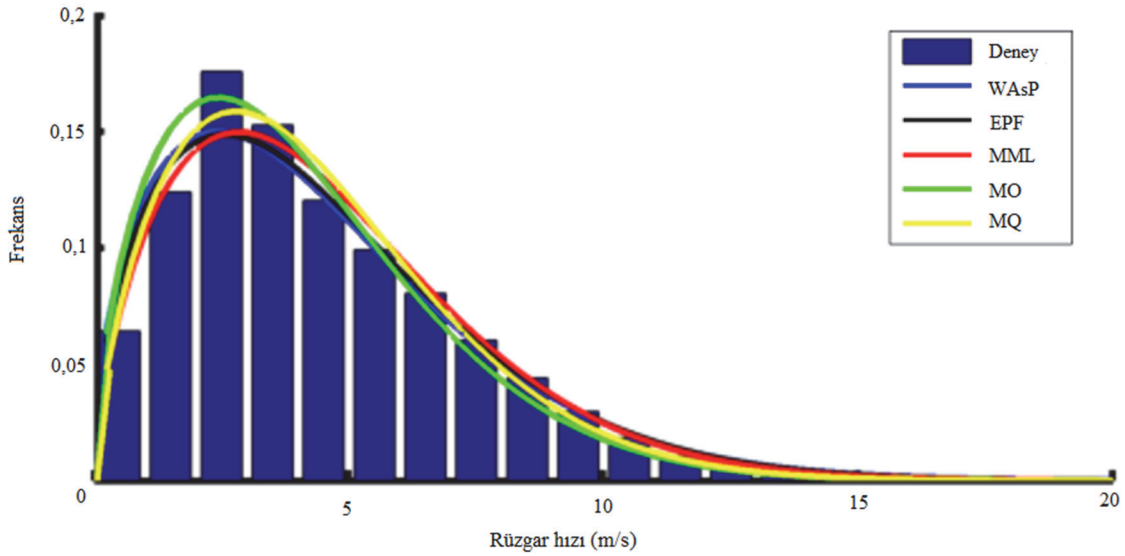
Şekil 5.25. İki yıllık rüzgâr verisi.



Şekil 5.26. Anemometrelerden alınan veriler arasındaki ilişki.

5.4.2. Frekans dağılımı

Şekil 5.27, Kütahya için rüzgâr hızı frekans dağılımını vermektedir. 3 ile 10 m/s arasındaki ortalama rüzgâr hızı frekansı %58,6'dır. Ayrıca farklı parametre tahmin yöntemleri ile elde edilen Weibull parametrelerinin kullanılması ile elde edilen dağılım eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.27. Kütahya için rüzgâr frekans dağılımı ve Weibull dağılım eğrisi.

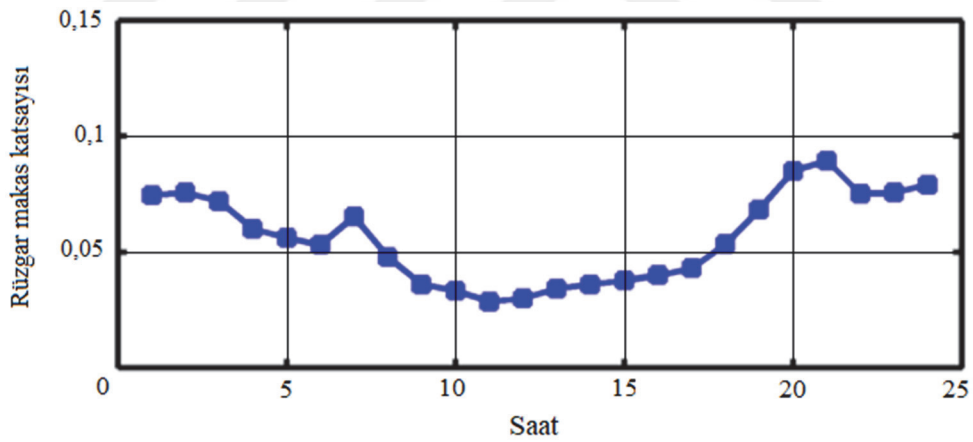
Çizelge 5.11, parametre tahmin metotları ile elde edilen Weibull parametrelerini ve bu parametrelerin veri seti ile olan uygunluk analizini göstermektedir. En yüksek R^2 ve COEF değerine ek olarak en düşük RMSE ve ikinci en düşük MAE değerine medyan ve çeyrekler yöntemi (MQ) ile ulaşılmıştır.

Çizelge 5.11. Weibull parametreleri tahmin yöntemlerinin uygunluğunun araştırılması.

Metot	k	A	$\bar{U}$	RGY	R^2	COEF	RMSE	MAE
WAsP	1,5078	4,9825	4,50	147,02	0,9781	0,9473	0,0071	0,0028
Enerji paterni faktörü (EPF)	1,5402	5,0477	4,54	147,15	0,9826	0,9422	0,0064	0,0025
Değiştirilmiş en çok olabilirlik metodu (MML)	1,6239	5,1125	4,57	139,94	0,9873	0,9575	0,0054	0,0022
Moment metodu (MO)	1,5792	4,5995	4,13	106,65	0,9762	1,0833	0,0074	0,0034
Medyan ve çeyrekler yöntemi (MQ)	1,6574	4,8652	4,35	116,82	0,9890	1,0376	0,0051	0,0025
Gerçek veri	-	-	4,55	147,02	-	-	-	-

5.4.3. Rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı kesikliliği analizi

Şekil 5.28, günlük ortalama rüzgâr makası katsayısı değişimini göstermektedir. Gece olmasıyla birlikte yer kabuğuna yakın bölgedeki hava soğur ve yoğunluğu artar. Soğuyan bu hava, üzerindeki sıcak hava akımının hareketi neticesinde yere yakın bölgede tutulur. Sıcaklık inversiyonu (alt üst olma) olarak isimlendirilen ve yükseklik ile birlikte artan sıcaklığa sebep olan bu doğa olayı gece saatlerinde rüzgâr hızı farkının daha yüksek olmasına sebep olur. Güneşin doğuşu ile birlikte yere yakın olan hava ısınır ve bu alt üst olma durumu ortadan kalkar. Yukarı yönlü hava hareketi neticesinde yatay rüzgâr akım çizgileri yukarı doğru toplanır ve tutulan hava akımının hemen yukarısındaki rüzgâr hızında bir artış meydana gelir. Benzer gözlemler Baseer ve diğerleri (Baseer vd., 2015) ve Akitino ve diğerleri (Akitino vd., 2017) tarafından da yapılmıştır. Gün içindeki en düşük rüzgâr makas katsayıları saat 09.00 ile 17.00 arasında çoğunlukla artan sıcaklıklar sebebi ile gözlenmektedir. 17.00'den sonra rüzgâr makas katsayısı artmaya başlar ve 21.00'de bir pik noktası gözlenmiştir. Saat 03.00'e kadar neredeyse sabit kalan katsayı tekrardan düşme eğilimi göstermektedir.

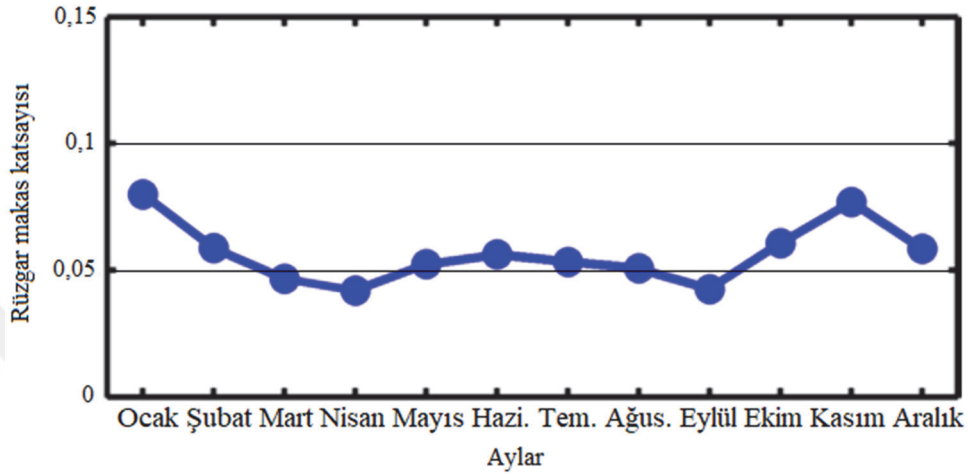


Şekil 5.28. Ortalama günlük rüzgâr makas katsayısı.

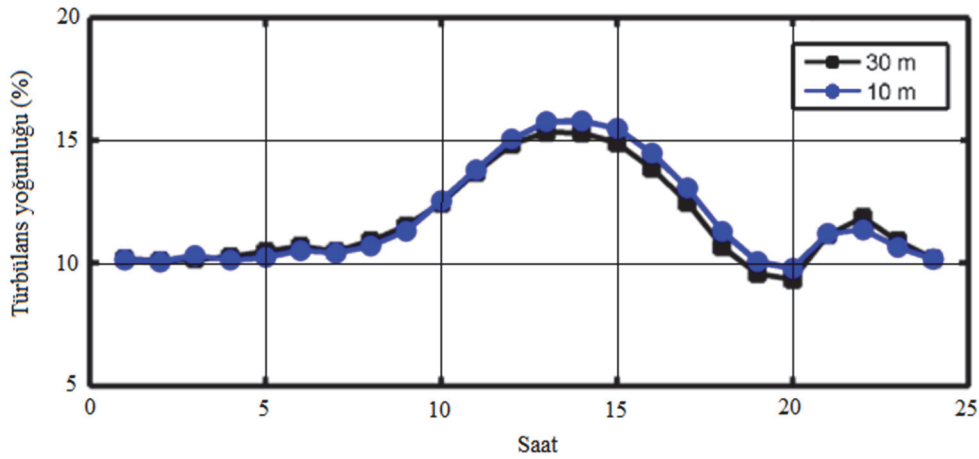
Şekil 5.29, aylık ortalama rüzgâr makas katsayısı değişimini vermektedir. Ocak'tan Nisan'a kadar bir düşüş trendi gözlemlenmektedir. Eylül'e kadar sürüp giden değerler bu aydan sonra bir yükseliş eğilimi göstermektedir. Maksimum değer 0,0799 Ocak ayı için gözlemlenirken, minimum değer 0,0419 Nisan ayı için gözlenmiştir.

Şekil 5.30, 10 ve 30 metre yükseklikteki türbülans yoğunluğunun iki yıllık gözlem süresi boyunca saatlik ortalamalarını vermektedir. Her ne kadar 30 m yükseklikteki türbülans yoğunluğu seviyesi gün içinde bir miktar daha az olsa da genel trendin neredeyse aynı olduğu görülmektedir.

10 ve 30 metre yükseklikteki ortalama türbülans seviyesi sırası ile %11,84 ve %11,71 olarak hesaplanmıştır. Bu türbülans yoğunluğu seviyeleri, IEC61400-1 türbin tasarım standartlarına göre 15 m/s için izin verilen türbülans seviyesi olan %16 değeri ile uyumludur (IEC 61400-1, 2005).

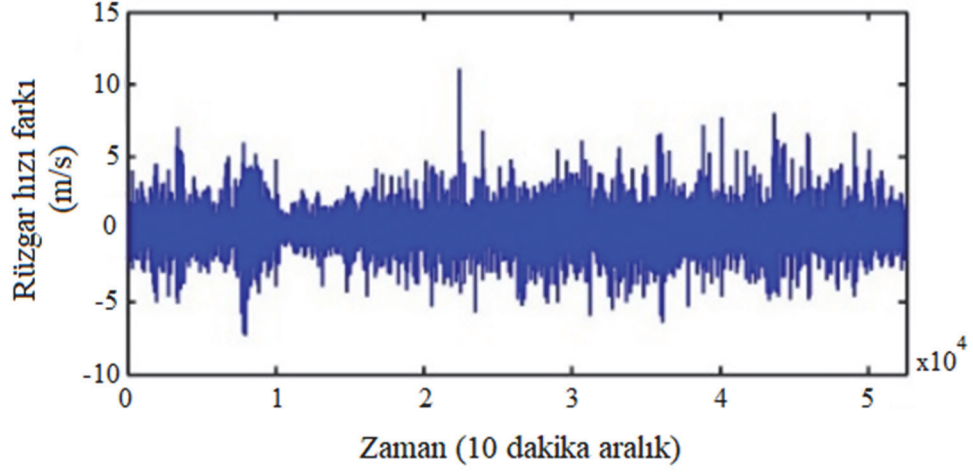


Şekil 5.29. Aylık ortalama rüzgâr makas katsayısı.

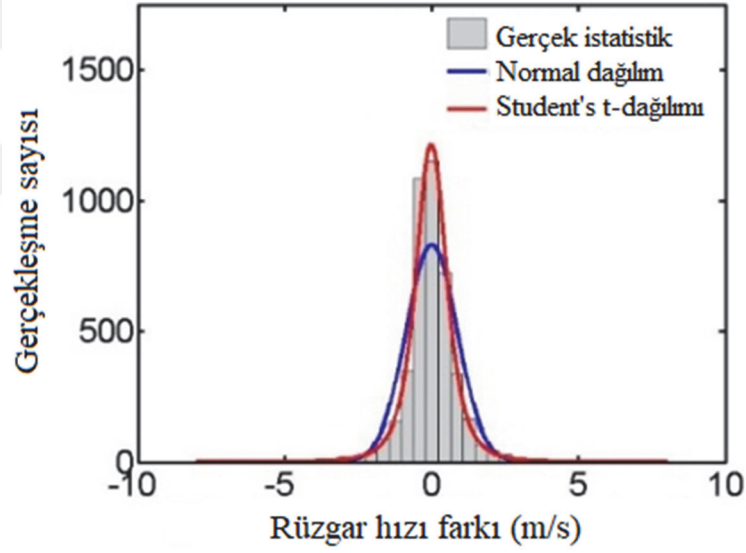


Şekil 5.30. Ortalama günlük türbülans yoğunluğu değişimi.

Rüzgâr hızı rampa analizi, rüzgâr verilerinin ilk yılını içerir (Kasım 2001'den Kasım 2002'ye kadar). Şekil 5.31'de zamana bağlı rüzgâr hızı değişimi verilmiştir. Rüzgâr hızındaki rampaları takip etmek için rüzgâr hızının zamana bağlı değişimi analiz edilmelidir. Rüzgâr hızının zamana bağlı değişiminin olasılık dağılımının Normal ve Student-t dağılım fonksiyonları ile olan uyumlulukları araştırılmıştır. Şekil 5.32, ölçüm yılının ilk ayındaki verilerin dağılımını ve dağılım fonksiyonları ile olan ilişkisini sunar.



Şekil 5.31. Rüzgâr hızının zamana bağlı değişimi.



Şekil 5.32. Rüzgâr hızı farklarının dağılımı.

Çizelge 5.12, dağılım fonksiyonları için yapılan değerlendirmeyi vermektedir. Uygunluk performansını karşılaştırmak için değerlendirme endeksi denklem 5.8 ile tanımlanır:

$$F = \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{N}_i|, \quad y_i = f(\bar{C}_i) \quad (5.8)$$

Burada i çubuk grafikteki çubuk sayısını, $\bar{C}_i$, i çubuğunun merkez değerini, $\bar{N}_i$ ise $\bar{C}_i$ 'ye karşılık gelen gerçek olasılık değerini, $f()$ dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade eder. Ren ve diğerlerinin (Ren vd., 2017) sonuçları ile benzer olarak, student-t dağılımı fonksiyonu Gauss dağılımından daha uygun bulunmuştur. Bu bağlamda, rüzgâr hızındaki rampa değerinin

sınırını tanımlayan eşik değerler, student-t dağılımı fonksiyonunun %95 güven aralığına göre belirlenmiştir.

Çizelge 5.12. Rüzgâr hızı değişiminin dağılım fonksiyonları ile olan değerlendirmesi.

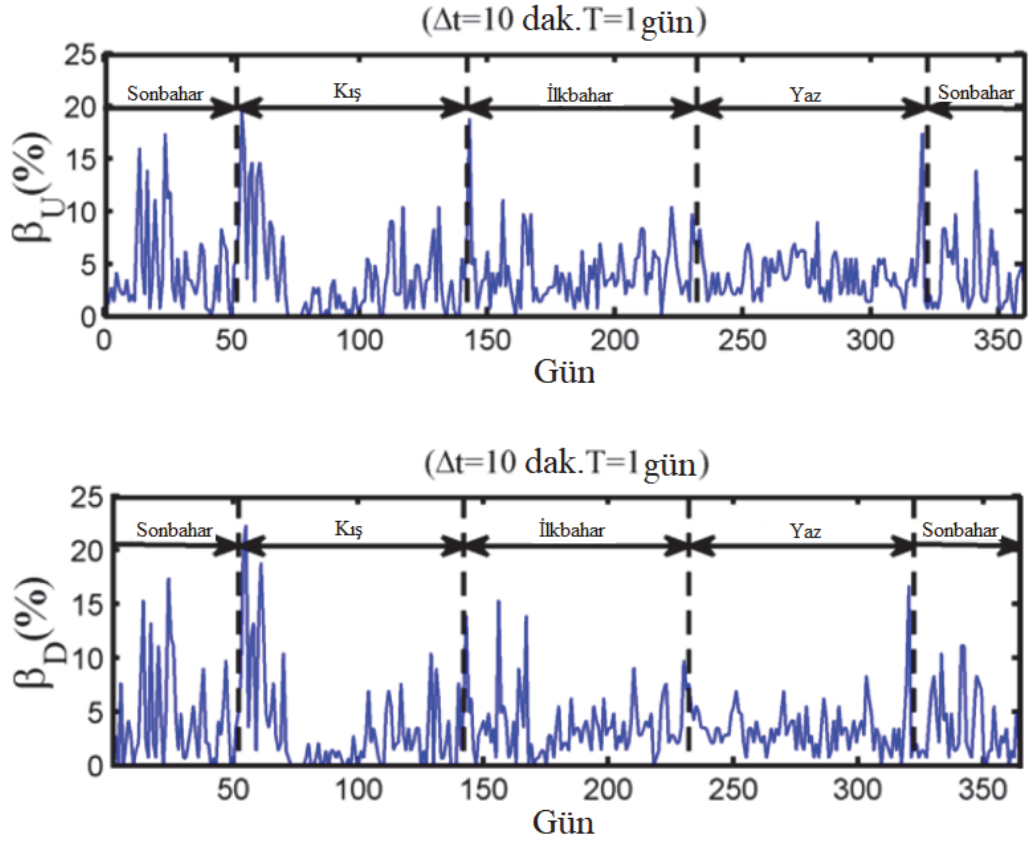
Ay	$\Delta t=10 \text{ dakika } T=1 \text{ gün}$			
	10 m		30 m	
	F_g	F_t	F_g	F_t
1	0,7391	0,1167	0,7216	0,1554
2	0,6994	0,3139	0,7318	0,3937
3	0,6948	0,2050	1,2302	0,4037
4	0,8663	0,4288	0,6674	0,3626
5	1,1605	0,3735	0,7975	0,3097
6	0,5850	0,1567	0,4862	0,2071
7	1,0168	0,5408	0,9505	0,4266
8	0,9143	0,3455	0,7220	0,2537
9	0,6850	0,1618	0,6577	0,1873
10	0,6553	0,1958	0,6003	0,1927
11	1,0780	0,3194	1,0119	0,2510
12	0,6655	0,3289	0,5680	0,2553

Şekil 5.33, bir yıl boyunca günlük periyotlarda ($T = 1$ gün) rüzgâr hızı rampası görev oranı (β) dağılımını göstermektedir. Bir yıl boyunca, yukarı yönlü rüzgâr hızı rampası görev oranı β_U ve aşağı yönlü rüzgâr hızı rampası görev oranı β_D nadiren %15'i geçerken, yıllık ortalamalar sırasıyla %3,9441 ve %3,5351'dir. Ayrıca, mevsim etkisi açıkça görülmektedir. Soğuk sonbahar ve kış günlerinde, görev oranının genliği, sıcak bahar ve yaz günlerinden daha güçlü salınım göstermektedir.

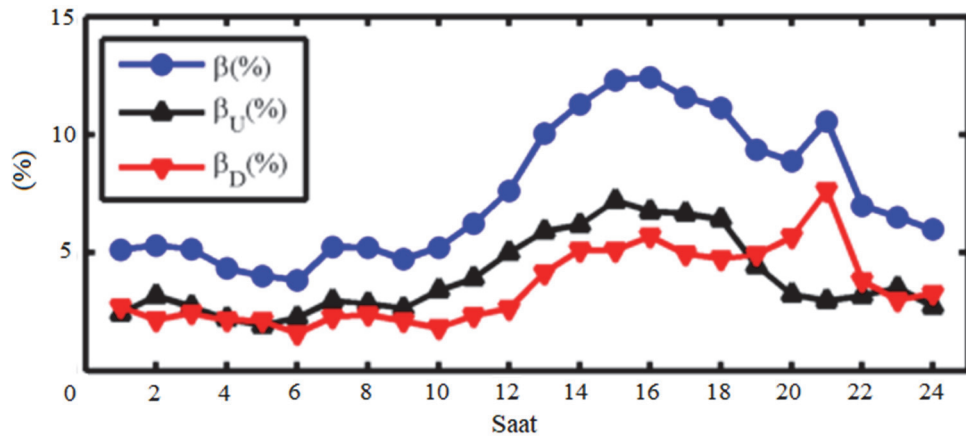
Şekil 5.34, bir saatlik periyotlar için elde edilen β 'ların yıllık ortalama değerlerinin günlük değişimini vermektedir ($T = 1$ saat). β_U ve β_D , gündüz saatlerine göre 22.00 ile 09.00 arasında nispeten düşüktür. β_U saat 09.00'dan sonra artmaya başlarken, β_D saat 12.00'ye kadar durağan bir davranış göstermektedir. β_U ve β_D 'nin saat 12.00'den itibaren birlikte artmasıyla, gün içinde en yüksek β saat 16.00'da gözlenmiştir.

Ölçüm istasyonun kurulduğu arazinin nispeten düz ve pürüzlülük etkilerinden uzak bir bölge olması sebebi ile rüzgâr türbülansı üzerinde sürtünme etkilerinden daha çok termal etkilerin daha baskın olacağı sonucuna varılabilir. 06.00'dan sonra gün doğumunun etkisi ile hem rüzgâr makas katsayısında hem de aşağı ve yukarı yönlü rüzgâr hızı rampası olaylarında küçük bir artış gözlenmektedir. Gün içinde yükselen sıcaklık ile artan türbülans yoğunluğu rüzgar rampası olaylarının artmasına sebep olmaktadır. Güneşin batışı ile birlikte hem türbülans yoğunluğu hem de rüzgar rampası olayları düşüş eğilimi gösterir iken rüzgar makas katsayısı yükselmeye başlar.

Saat 21.00'de en yüksek değerine ulaşan rüzgar makas katsayısı ve bir miktar yükselen türbülans yoğunluğu ile tetiklenen aşağı yönlü rüzgar rampası olayları gün içindeki en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.33. Bir yıl için β_U ve β_D değişimi.



Şekil 5.34. Rüzgâr hızı rampa olaylarının günlük periyodikliği.

5.4.4. Bölgenin kaynak haritaları

Kütahya için yıllık ortalama rüzgâr hızı kaynak haritası WAsP yazılımının kullanılması ile elde edilmiştir. Kaynak haritaları, tahmini rüzgâr iklim verilerinin bir özetinin hesaplandığı bir dizi noktanın yönetilmesine izin verir. Noktalar düzenli olarak aralıklandırılır ve satır ve sütunlar halinde düzenlenir. Bir kaynak haritası oluşturmak için, kaynak ızgarası genelleştirilmiş bir rüzgâr iklimi ile ilişkilendirilmelidir. Kaynak haritasındaki her nokta için, WAsP, yükseklikleri, ortalama rüzgâr hızını ve ortalama güç yoğunluğunu diğer parametrelerle birlikte hesaplar. Pürüzlülük uzunluklarına sahip alanın sayısallaştırılmış haritalarına dayanarak, konumlar için rüzgâr kaynağı haritası oluşturulmuştur.

Şekil 5.35.a, Çizelge 5.13 ile verilen Kütahya'nın genelleştirilmiş rüzgâr iklimini kullanarak oluşturulan yıllık ortalama rüzgâr hızı kaynak haritasını sunmaktadır. 30 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızı 1,59 ile 6,02 m/s arasında değişmektedir. En rüzgârlı bölgelerin haritanın alt kısmındaki dağlık bölgelerde olduğu görülmektedir. Bu bölgede seçilen en rüzgârlı üç alan üzerinde WAsP kullanılması ile bir tekno-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. En uygun bulunan alan üzerinde ise bir santral konumlandırma eniyilemesi yürütülmüştür. Şekil 5.35.b ve Şekil 5.35.c ile verilen Weibull parametrelerinin kaynak haritaları optimizasyon hesaplamalarında yıllık enerji üretimini belirlerken kullanılmıştır.

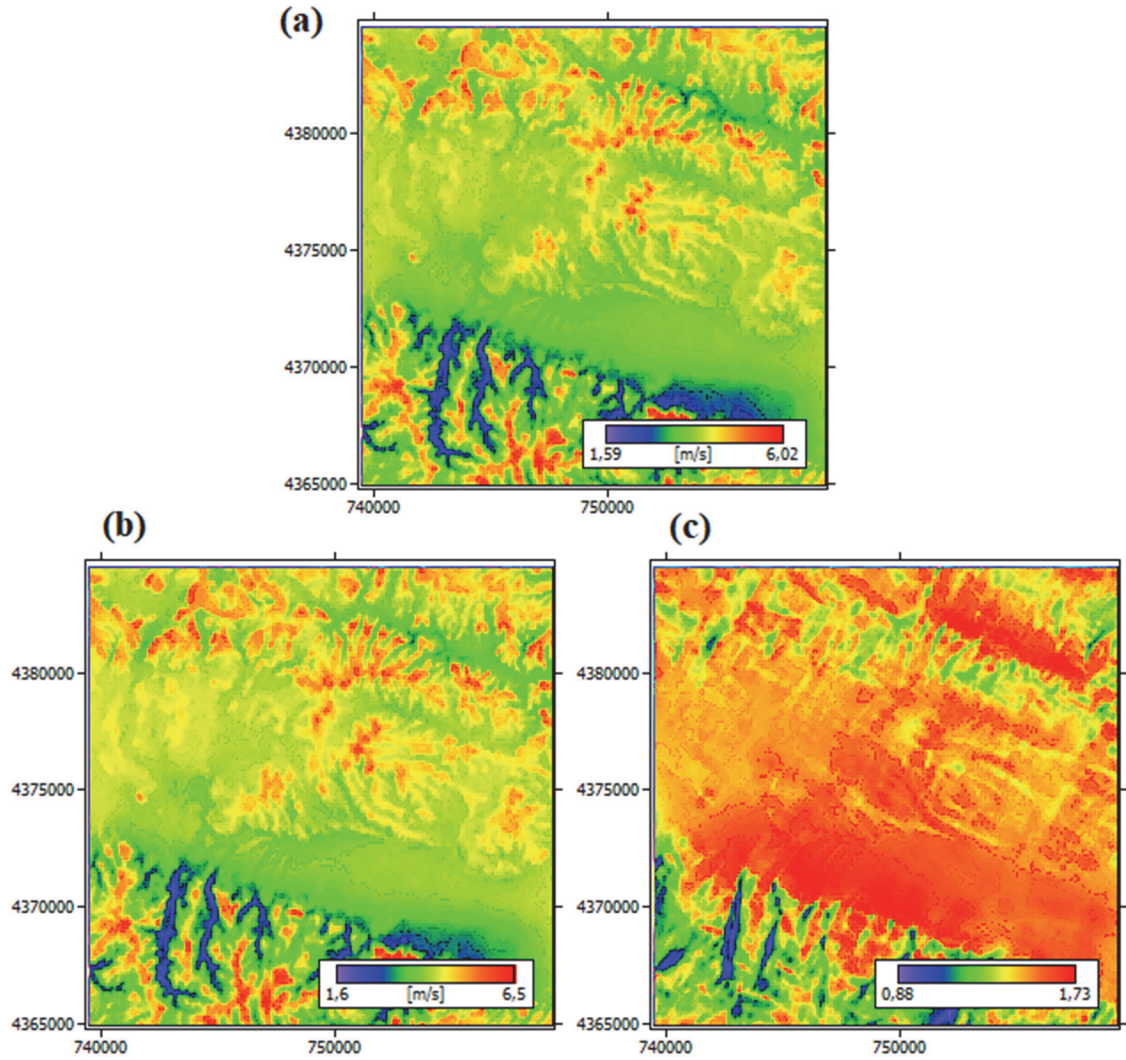
Çizelge 5.13. Bölgenin genelleştirilmiş rüzgâr iklimi.

		R-sınıf 0 (0,000 m)	R-sınıf 1 (0,030 m)	R-sınıf 2 (0,100 m)	R-sınıf 3 (0,400 m)	R-sınıf 4 (1,500 m)
Yükseklik 1 (z = 10 m)	U (m/s)	4,64	3,36	2,92	2,29	1,52
	P (W/m ²)	172	74	49	23	7
Yükseklik 2 (z = 25 m)	U (m/s)	5,08	4,01	3,60	3,02	2,31
	P (W/m ²)	218	116	84	50	22
Yükseklik 3 (z = 50 m)	U (m/s)	5,45	4,62	4,21	3,64	2,95
	P (W/m ²)	261	158	121	79	43
Yükseklik 4 (z = 100 m)	U (m/s)	5,89	5,44	4,99	4,39	3,69
	P (W/m ²)	334	233	180	123	74
Yükseklik 5 (z = 200 m)	U (m/s)	6,44	6,60	6,05	5,35	4,60
	P (W/m ²)	447	417	321	222	140

5.4.5. Kütahya rüzgâr santrali fizibilitesi için WAsP sonuçları

Seçilen üç alan üzerinde yıllık enerji üretimi ve maliyet analizleri beş adet rüzgâr türbini için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.14, WAsP veri tabanından seçilen farklı üreticilerin türbinlerin genel özelliklerini gösterirken, Şekil 5.36, bu rüzgâr türbinlerinin güç eğrilerini vermektedir.

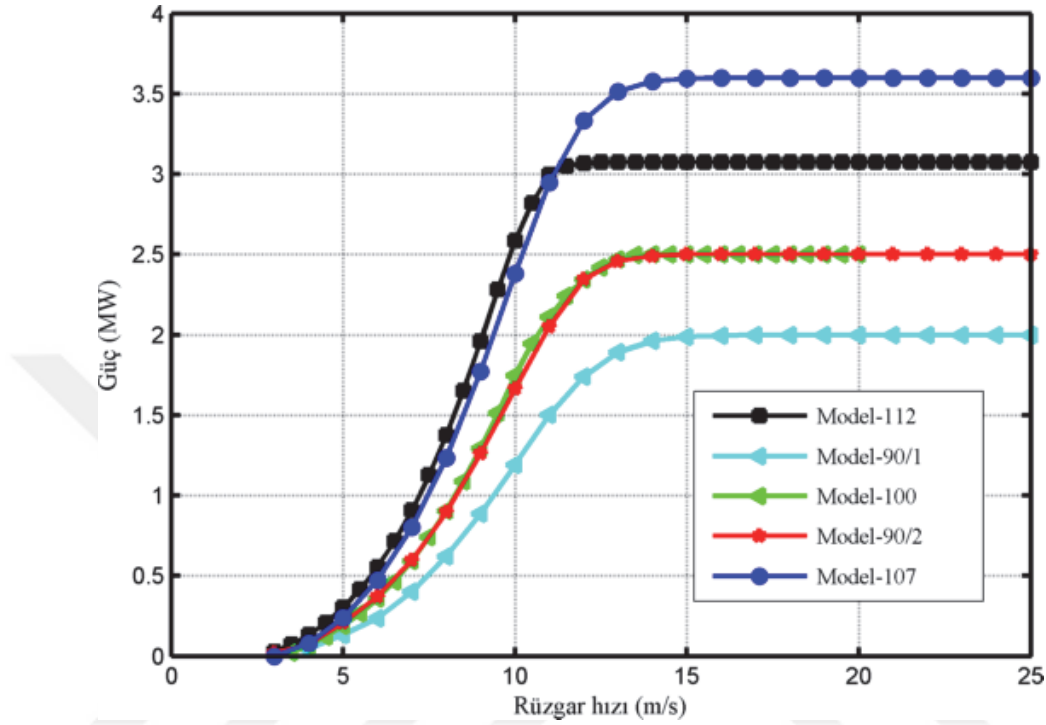
Türbinlerin anma güç değerleri 2 ile 3,6 MW arasında değişmektedir. Türbinler rotor çaplarına göre isimlendirilmiştir.



Şekil 5.35. Yerden 30 metre yükseklikte (a) yıllık ortalama rüzgâr hızı (b) Weibull A parametresi kaynak haritası (c) Weibull k parametresi kaynak haritası.

Seçilen üç alanda, yıllık elektrik üretimi için WAsP sonuçları ve rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörü, birim başına maliyetler ile birlikte Çizelge 5.15'te verilmiştir. Bu tabloda verildiği gibi, en düşük yıllık enerji üretimi 3,763 GWh'e Saha-2'de Model-76 modeli ile ulaşılırken, en yüksek değer 8,662 GWh'e Saha-1'de Model-112 ile ulaşılmıştır. Seçilen beş rüzgâr türbininin kullanılması ile hesaplanan yıllık enerji üretimi değerleri, Saha-1'de 4,154 GWh ile 8,662 GWh, Saha-2'de 3,763 GWh ile 8,010 GWh saat arasında ve Saha-3'te 4,038 GWh ile 8,511 GWh aralığında değişmektedir. Sahalar ile ilgili olarak, bütün rüzgâr türbinleri en yüksek

değerlerine Saha-1’de ulaşılırken, en düşük değerlerine Saha-2 için ulaşılmıştır. Her ne kadar Saha-1 yıllık enerji üretimi açısından Saha-3’ten daha iyi gözükse de aradaki fark oldukça azdır.



Şekil 5.36. Seçilen türbinlerin güç eğrileri.

Çizelge 5.14. Seçilen türbinlerin başlıca özellikleri.

Türbin modeli	Model-112	Model-76	Model-100/2	Model-90	Model-107
Anma gücü (kW)	3075	2000	2500	2500	3600
Rotor çapı (m)	112	76	100	90	107
Göbek yüksekliği (m)	84	60	140	98	80
Devreye girme hızı (m/s)	3	4	3.5	3	3
Anma hızı (m/s)	12.5	18	14	15	17
Devreden çıkma hızı (m/s)	25	25	20	25	25
Fiyat (\$)	3.228.750	2.100.000	2.625.000	2.625.000	3.780.000

Bu çalışmada, göz önüne alınan beş rüzgâr türbini için hesaplanan yıllık kapasite faktörü, hem sahaya hem de makine modeline bağlı olarak değişim göstermektedir. Sahaya bağlı değişimler maksimum %2,5 iken, aynı alan içinde türbine bağlı değişimin en yüksek değeri %9,3’tür.

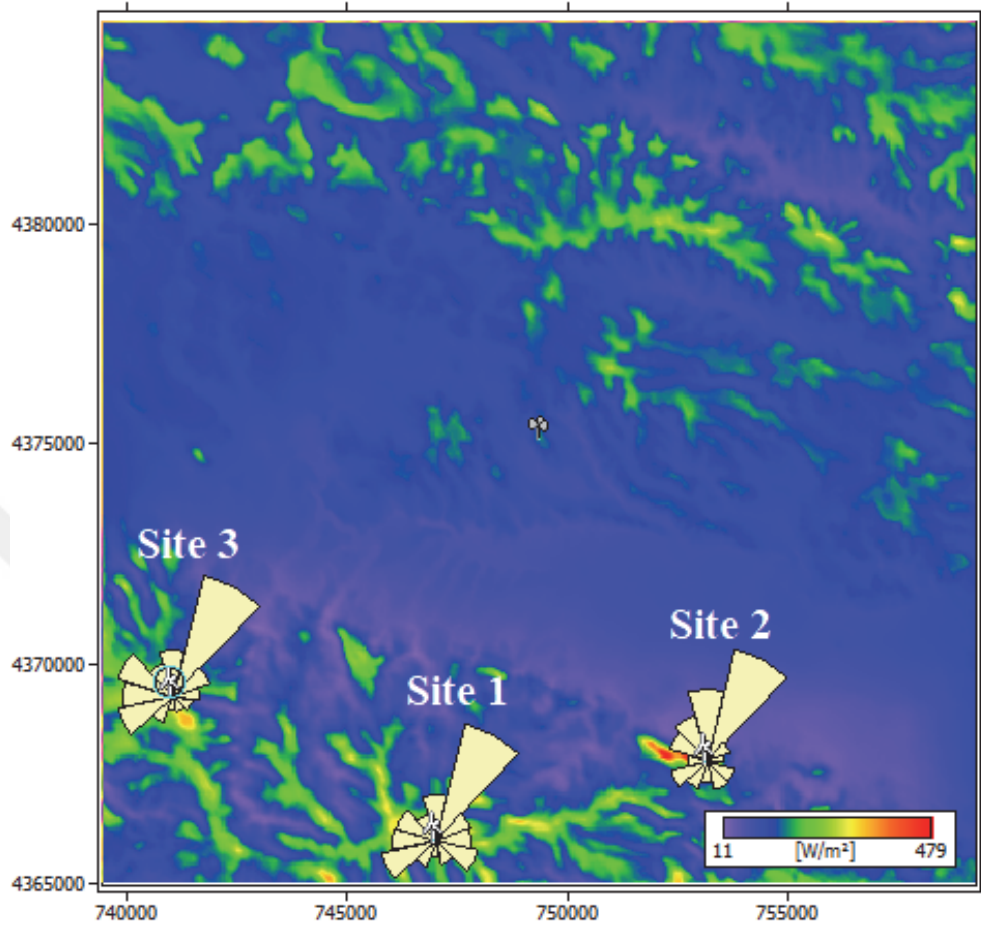
Çizelge 5.15. Seçilen üç sahanın rüzgâr enerjisi tekno-ekonomik analiz sonuçları.

	<i>Parametre</i>	<i>Saha 1</i>	<i>Saha 2</i>	<i>Saha 3</i>
Model-112 (3 MW)	YEÜ (GWh)	8,662	8,010	8,511
	KF (%)	32,9	30,4	32,3
	BEM (\$/kWh)	0,0248	0,0268	0,0253
Model-76 (2 MW)	YEÜ (GWh)	4,154	3,763	4,038
	KF (%)	23,7	21,4	23
	BEM (\$/kWh)	0,0337	0,0372	0,0346
Model-100/2 (2.5 MW)	YEÜ (GWh)	6,819	6,287	6,729
	KF (%)	31,1	28,7	30,7
	BEM (\$/kWh)	0,0256	0,0278	0,0260
Model-90 (2.5 MW)	YEÜ (GWh)	6,271	5,847	6,222
	KF (%)	28,6	26,6	28,4
	BEM (\$/kWh)	0,0279	0,0299	0,0281
Model-107 (3.6 MW)	YEÜ (GWh)	8,429	7,770	8,312
	KF (%)	26,7	24,6	26,3
	BEM (\$/kWh)	0,0299	0,0324	0,0303

Maliyet analizine göre, Model-112 ile kW saat enerji başına minimum birim enerji elde edilirken, Model-76 ile maksimum maliyet elde edilmiştir. Saha-1'de kWh başına elektrik maliyeti 0,0337 ile 0,0226 \$/kWh arasında değişmektedir. Saha-2'de 0,0268 ile 0,0372 \$/kWh arasında değişen birim rüzgâr enerjisi maliyeti, Saha-3'te 0,0253 ile 0,0372 \$/kWh aralığında değişmektedir. Böylelikle, Kütahya şehrinin eteklerinde konumlandığı tepelerde bulunan rüzgâr türbinlerinin simülasyonu, minimum kWh enerji başına maliyetlerine Saha-1'de ulaşıldığını göstermektedir. Şekil 5.37, 30 metre yerden yükseklik için oluşturulmuş ortalama güç yoğunluğu haritası ile birlikte seçilen üç alan üzerinde konumlandırılmış Model-112 türbinlerinin konumunu, yıllık enerji üretiminin yönlere göre dağılımı ile birlikte göstermektedir.

5.4.6. Kütahya rüzgâr santrali fizibilitesi için optimizasyon sonuçları

Son yıllarda yayınlanan rüzgâr santrali konumlandırma çalışmalarının bir kısmı, arazinin orografik yapısını göz önünde bulunduran, farklı türbin ve göbek yüksekliği seçeneklerini içeren araştırmalar yürütmüşler ve klasik yaklaşımlara kıyasla daha iyi performans elde ettiklerini söylemişlerdir. WAsP, her ne kadar verilen bir rüzgâr santrali tasarımı için yıllık enerji hesaplamaları yapabiliyor olsa da birim enerji maliyeti, yıllık enerji üretimi gibi belirleyici parametrelerin optimizasyonuna yönelik santral tasarlayan bir araca sahip değildir.

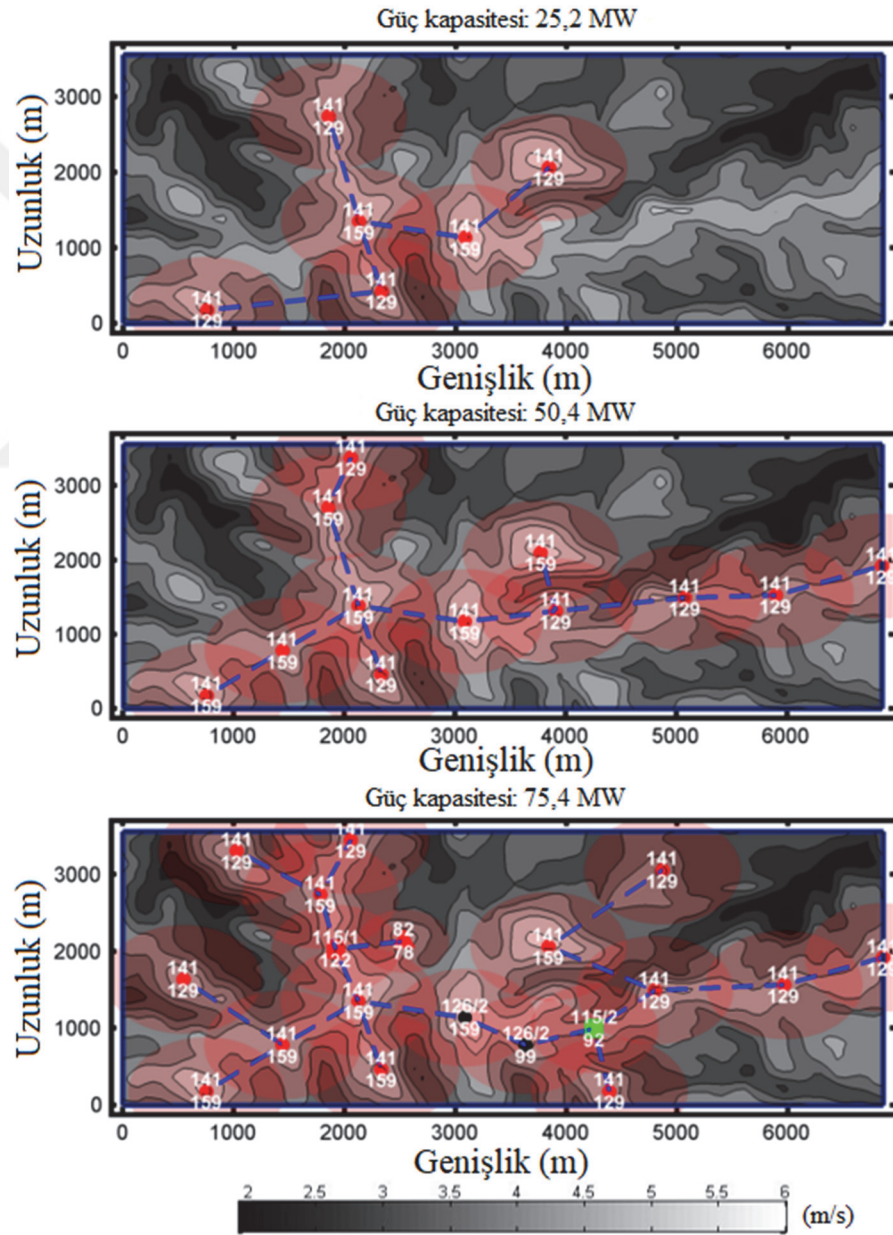


Şekil 5.37. Güç yoğunluğu haritası üzerinde seçilen sahaların gösterilmesi.

Bu sebeple bir üretici firmanın 14 adet ticari türbininin farklı göbek yüksekliği seçeneklerini içeren ve verilen orografya yapısı için birim enerji maliyetini minimize eden bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu türbinlerin özellikleri Şekil 4.6 ile verilmiştir. Saha-1'in yakınında 24,32 km²'lik dikdörtgen bir alan, muhtemel bir rüzgâr çiftliği alanı olarak seçilmiştir. Hesaplamalar üç adet minimum istenen güç kapasitesi için yapılmıştır (25, 50 ve 75 MW). Şekil 5.38, 30 m yerden yükseklik için yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası üzerinde optimize edilmiş santral düzenlerini vermektedir.

Seçilen türbin tipleri ve göbek yükseklikleri, sırasıyla türbin sembollerinin üstünde ve altında verilmiştir. Kırmızı şeffaf daireler, rüzgâr türbinlerinin varlığından dolayı yasaklanan bölgeleri (beş rotor çapı kısıtlaması) temsil ederken, mavi noktalı çizgi ise Kruskal algoritmasıyla elde edilen minimum kablo uzunluğu düzenini temsil etmektedir (Kruskal, 1956). Birinci ve ikinci durumda, Model-141 4,2 MW modeli baskın türbin modelidir ve iki göbek yüksekliği seçeneği tercih edilmiştir. Bu modelin IEC/EN IIIA rüzgâr sınıfı için tasarlandığı ve Kütahya'nın

rüzgâr ikliminin düşük rüzgâr hızları ile karakterize edildiği göz önüne alındığında elde edilen sonuçların mantıklı olduğu söylenebilir. Üçüncü durumda, Model-141 baskın olmasına rağmen, farklı türbin tipleri de seçilmiştir. Model-141, her ne kadar verilen şartlar için en uygun türbin modeli olsa da büyük rotor çapı sebebi ile arazi tüketimi fazladır. Kurulu güç değerinin artması ile bu model fizibil olarak verilen alana dağıtılamamaktadır ve bu sebeple algoritma modeli daha küçük rotor çapına sahip yine düşük veya orta hızlar için tasarlanan diğer türbinlere yönelmektedir.



Şekil 5.38. Üç farklı güç kapasitesi için optimize edilmiş santral düzenleri.

Çizelge 5.16, optimizasyonun ana sonuçlarını vermektedir. En yüksek kapasite faktörü (% 35) ve minimum birim enerji maliyeti (0,0254 \$ / kWh) 25 MW'lık ilk durumda gözlenmiştir. Kurulu güç değerinin artması ile birlikte türbin sayısı da artmaktadır. Artan türbin sayısı ile birlikte daha verimli türbin noktaları eksilirken, iz bölgesi nedenli kayıpların oranı da yükselmektedir. Bu sebeple kaçınılmaz olarak kurulu güç değeri yükseldikçe kapasite faktörü düşerken birim enerji maliyeti artmaktadır. Elde edilen sonuçların WAsP ile elde edilen sonuçlar ile paralel olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.16. Kütahya için rüzgâr santrali tekno-ekonomik analiz sonuçları.

<i>Güç kapasitesi (MW)</i>	<i>YEÜ (GWh)</i>	<i>KF (%)</i>	<i>BEM (\$/kWh)</i>	<i>Kablo uzunluğu (m)</i>
25,2 MW	77,677	35	0,0254	6125
50,4 MW	142,127	32	0,0280	10.464
75,4 MW	194,232	29	0,0304	16.229

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

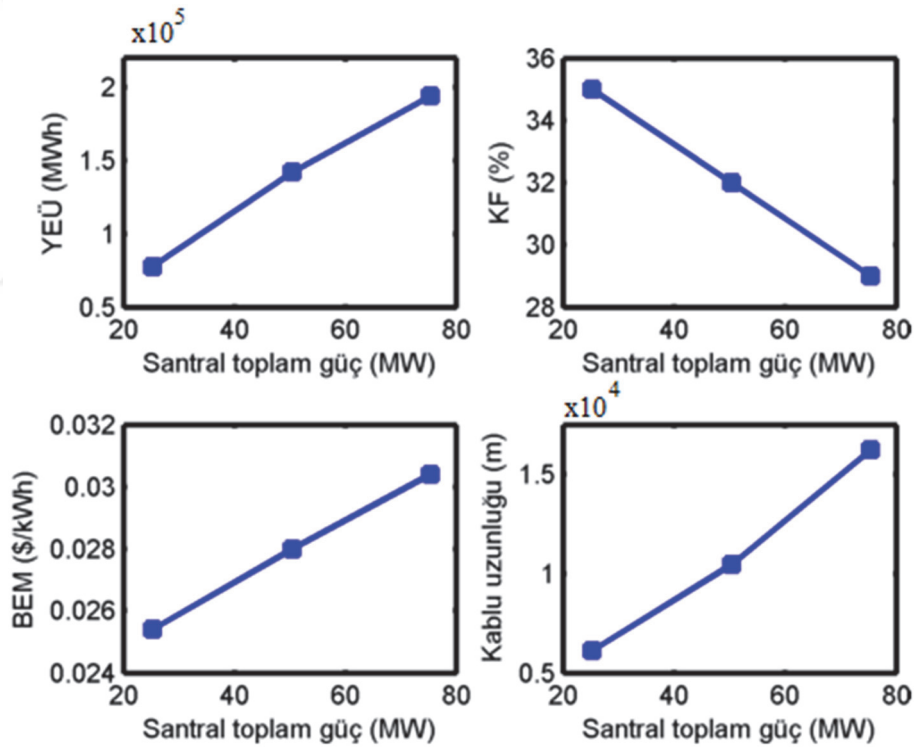
6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'nin Kütahya ilinin merkez ilçesi yakınındaki rüzgâr santral fizibilite araştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü yakınındaki Bünelek Tepesi'nden toplanan uzun süreli rüzgâr verisi WAsP yazılımı kullanılması ile incelenen bölge için genelleştirilmiştir. Araştırmalar sonucunda, Kütahya merkez ilçesinin hemen yakınındaki tepelerin en rüzgârlı alanları temsil ettiği görülmüştür. WAsP yazılımından alınan sonuçlara göre 30 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı 6,02 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Seçilen üç adet sahanın tekno-ekonomik analizi öncelikle WAsP yazılımı kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra en uygun görülen saha üzerinde bir rüzgâr santrali konumlandırma optimizasyonu yürütülmüştür.

Oluşturulan optimizasyon kodu içerisinde kullanılan Jensen iz bölgesi modelinin matematiksel doğruluğu literatürde verilen santral planları ve sonuçların kullanılması ile doğrulanmıştır. İki farklı algoritma modelinin rüzgâr santrali konumlandırma problemini çözme kabiliyeti klasik rüzgâr santrali konumlandırma problemi ile test edilmiştir. Elitist genetik algoritma modeli, klasik arı kolonisi algoritmasına göre daha kısa sürede daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. Daha sonra güncel literatürü yakalamak amacı ile optimizasyon kodunun yapısı, düzensiz santral sınırı da dâhil olmak üzere farklı şekiller için uyumlu hale getirilmiştir. Ayrıca farklı ticari türbin modellerinin çeşitli göbek yüksekliği seçenekleri optimizasyon koduna eklenmiştir. Bu eklemeler tamamlandıktan sonra aynı yüz ölçümü değerinde dört farklı santral şekli için hesaplamalar yürütülmüştür. Santral alan şeklinin değişimi ile değişen bazı tasarım parametrelerinin değişim oranları gözlenmiştir.

Kütahya için belirlenen en rüzgârlı saha içerisinde yükseklik değerlerinin konumdan konuma oldukça farklılık göstermesi, optimizasyon içindeki düz arazi yaklaşımını ve her olası türbin konumu için ortak Weibull parametreleri kullanılmasını imkânsız kılmıştır. Bu sebeple WAsP yazılımından alınan kaynak haritaları optimizasyon kodundaki karşılık gelen noktaya atanmıştır. Üç farklı kurulu güç kapasitesi için ulaşılan en iyi santral düzenlerinin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. 25 MW'lık bir santralin %35 kapasite faktörü ile yıllık 77,677 GWh elektrik üretimine 0,0254 \$/kWh'lık birim enerji maliyeti neticesinde ulaşacağı öngörülmektedir. Şekil 5.1 Kütahya santral fizibilitesi için elde edilen sonuçları gösterir. Bu değerler WAsP ile yapılan hesaplamalar ile uyum göstermektedir.

Santral fizibilitesine ek olarak Kütahya rüzgâr ikliminin dinamik karakteristiği üzerine analizler yapılmıştır. İki yıllık 10 dakikalık ortalamalar içeren rüzgâr verisinin Weibull parametrelerinin tahmini için beş farklı parametre tahmin yöntemi kullanılmıştır. Parametre tahmin yöntemlerinin performans analizleri neticesinde medyan ve çeyrekler yönteminin en başarılı tahmin yöntemi olduğu görülmüştür. Daha sonra rüzgâr verileri bölgenin rüzgâr makası, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hızı kesikliliği için önemli bir gösterge olan rüzgâr hızı rampası karakteristiğini belirlemek üzere analiz edilmiştir. Bu parametrelerin rüzgâr santrali performansını doğrudan etkileyen parametreler olduğu bilinmektedir. Ayrıca literatürdeki rüzgâr hızı verilerinin yüksek maliyetler sebebi ile nadir olması bu analizlerin önemini daha yükseltmektedir. Yapılan analizler neticesinde bu parametrelerin bölgeye özgü karakteristiği ve birbirleri ile olan ilişkileri ortaya konmuştur.



Şekil 6.1. Kütahya santral fizibilitesi optimizasyon sonuçları.

Bunlara ek olarak, son yıllarda enerji tüketimini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayan, kendi kendine yetebilecek kampüsler hakkında birçok araştırma yapıldığı görülmüştür. Bu sebeple Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Kampüsü'nün anlık elektrik tüketiminin rüzgâr enerjisi ile karşılanabilirliği araştırılmıştır. Bu bağlamda, öncelikle kampüsün bir yıllık saatlik tüketim verileri analiz edilmiştir. Daha sonra Bünelek Tepesi'nden alınan rüzgâr

verileri kullanılması ile farklı türbin modellerinin saatlik üretim zaman serileri hesaplanmıştır. Bu veriler saatlik tüketim verileri ile karşılaştırılmış ve anlık tüketimin karşılanma oranları verilmiştir. Ayrıca kampüs çevresindeki olası rüzgâr santrali konumlarının belirlenmesi için WAsP analizi yapılmıştır. Araştırılan alan içerisinde üç adet en rüzgârlı saha rüzgâr türbini kurulumu açısından uygun aday olarak görülmüştür. Aday bölgeler rüzgâr türbini kurulumunun uygunluğu açısından değerlendirilmiştir. Üç aday sahanın en rüzgârlı konumlarında kurulum için herhangi bir fiziksel engel bulunmasa da Saha-2’de kurulacak türbinin yakın iz bölgesinde binaların bulunduğu görülmüştür. Kampüs binalarının eğitim, araştırma, kültürel ve barınma gibi alanlarda faaliyet göstermeleri türbin tarafından yayılacak gürültü etkilerinin de analize eklenme gerekliliğini getirmiştir. Bu sebeple dünya standartı ISO’ya dayanan ve WindPRO gibi kabul gören yazılımlarda da kullanılan bir metodolojiyi kullanan yazılım oluşturulmuştur. Hazırlanan kod bölgenin yükseklik değerlerini hesaba katmaktadır. Kampüs için hesaplama yapmadan önce, oluşturulan bu gürültü yayılım tahmini aracı literatürde verilen deneysel bir çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların iyi uyum gösterdiği analiz edilmiştir. Kampüs için yapılan hesaplamalarda sadece Saha-2’de kurulacak türbinin çevresindeki binaların Türkiye mevzuatlarına göre izin verilen değerleri aştığı görülmüştür.

6.2. Öneriler

Ülkemizde WAsP, WindPRO (WindPro, 2010) gibi dünyaca kabul gören rüzgâr enerjisi analiz programlarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple bu yazılımları oluşturan birçok ana modelin daha detaylı olarak araştırılması ve uygulanması elzemdir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçların katkısına ek olarak oluşturulan hesaplama kodları ve edinilen tecrübeler de oldukça önemlidir. Rüzgâr santrali konumlandırma probleminin yapısına uygun algoritma modellerinin araştırılması önemlidir. Rüzgâr verilerinin çeşitlendirilmesi daha kesin sonuçlara ulaşılmasına ek olarak rüzgâr karakteristiğinin tanımlanmasını da sağlayacaktır. Bundan sonraki araştırmalarda çalışılması öngörülen konular şu şekilde sıralanabilir:

- Rüzgâr verisinin, bir arazi üzerinde yatay yönde genişletilmesi üzerine araştırmalar yapılmalıdır.
- Karmaşık arazi modellemesinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile etkileşimli hale gelmesi özellikle karmaşık arazi koşullarında doğru analizler yapılması adına önemlidir.
- Dijital yükseklik haritalarını içeren veri tabanları oluşturulmalıdır.
- Rüzgâr verisi veri tabanı daha da iyileştirilmelidir.
- Gürültü yayılımı hesaplamaları deneysel ölçümler ile desteklenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdulrahman, M., & Wood, D. (2017). Investigating the Power-COE trade-off for wind farm layout optimization considering commercial turbine selection and hub height variation. *Renewable Energy*, 102, 267-278.
- Abraham B, & Ledolter J. (2005). *Statistical methods for forecasting*. 2nd ed. USA: Wiley-Interscience.
- Adaramola, M. S., Agelin-Chaab, M., Paul, S. S. (2014). Assessment of wind power generation along the coast of Ghana. *Energy Conversion and Management*, 77, 61-69.
- Ahmed S. (2016). *Wind energy: theory and practice*. 3rd ed. India: Prentice Hall.
- Ainslie, J. F. (1988). Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 27(1-3), 213-224.
- Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766.
- Akdağ, S. A., & Güler, Ö. (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), 2574-2580.
- Akpınar, A. (2013). Evaluation of wind energy potentiality at coastal locations along the north eastern coasts of Turkey. *Energy*, 50, 395-405.
- Al-Shammari, E. T., Shamshirband, S., Petković, D., Zalnezhad, E., Yee, L., Taher, R. S., Čojbašić, Ž. (2016). Comparative study of clustering methods for wake effect analysis in wind farm. *Energy*, 95, 573-579.
- American Wind Energy Association (AWEA). (2016). First US offshore wind farm unlocks vast new ocean energy resource. ([http:// www.awea.org /MediaCenter /pressrelease.aspx? ItemNumber=9627](http://www.awea.org/MediaCenter/pressrelease.aspx?ItemNumber=9627)).
- American Wind Energy Association (AWEA). (2018). *AWEA U.S. Wind Industry Annual Market Report Year Ending (2017)*. Washington, DC. USA.
- Amirinia, G., Kamranzad, B., Mafi, S. (2017). Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis. *Energy*, 120, 332-345.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Amirinia, G., Mafi, S., Mazaheri, S. (2017). Offshore wind resource assessment of Persian Gulf using uncertainty analysis and GIS. *Renewable Energy*, 113, 915-929.
- Ansolabehere, S., & Konisky, D. M. (2009). Public attitudes toward construction of new power plants. *Public Opinion Quarterly* 73(3):566-577.
- Aras, H. (2003). Wind energy status and its assessment in Turkey. *Renewable Energy*, 28(14), 2213-2220.
- Aukitino, T., Khan, M. G. M., Ahmed, M. R. (2017). Wind energy resource assessment for Kiribati with a comparison of different methods of determining Weibull parameters. *Energy Conversion and Management*, 151, 641-660.
- Azad, A. K., Rasul, M. G., Yusaf, T. (2014). Statistical diagnosis of the Best Weibull methods for wind power assessment for agricultural applications. *Energies*, 7(5), 3056-3085.
- Bailey, B. H., McDonald, S. L., Bernadett, D. W., Markus, M. J., Elsholz, K. V. (1997). Wind resource assessment handbook. AWS Scientific, Inc. Report.
- Baseer, M. A., Meyer, J. P., Alam, M. M., Rehman, S. (2015). Wind speed and power characteristics for Jubail industrial city, Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1193-1204.
- Batchelor, G. K., & Townsend, A. A. (1949). The nature of turbulent motion at large wave-numbers. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 199(1057), 238-255.
- Baydoğan, M. Ç., Şener, S. M. (2016). Tip imar yönetmeliğine uygun vaziyet planlarının yapay arı kolonisi yöntemiyle eniyilenmesi/Optimizing the implementation of standardized building and zoning regulation by artificial bee colony algorithm. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(2). soft computing, 8(1), 687-697.
- Bilgili, M., Şahin, B., Kahraman, A. (2004). Wind energy potential in Antakya and Iskenderun regions, Turkey. *Renewable Energy*, 29(10), 1733-1745.
- Bilir, L., Imir, M., Devrim, Y., Albostan, A. (2015). An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region–Ankara, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 103, 910-923.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bloomberg New Energy Finance (BNEF). (2015). Wind and solar boost cost-competitiveness versus fossil fuels. press release (London and New York), (<http://about.bnef.com/press-releases/wind-solar-boost-cost-competitiveness-versus-fossil-fuels/>)

Boudia, S. M., Benmansour, A., Ghellai, N., Benmedjahed, M., Hellal, M. A. T. (2013). Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara. *Energy Conversion and Management*, 76, 654-664.

Boudia, S. M., & Guerri, O. (2015). Investigation of wind power potential at Oran, northwest of Algeria. *Energy Conversion and Management*, 105, 81-92.

British Petroleum Company (BP). (2018). BP statistical review of world energy. British Petroleum Company.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.

Canadian Wind Energy Association (CanWEA). (2018). Installed capacity. <https://canwea.ca/wind-energy/installed-capacity/>.

Canny, J. (1987). A computational approach to edge detection. In *Readings in Computer Vision* (pp. 184-203).

Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). (2018). Latest Published Global Estimates (1751-2014). Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, United States. (http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html)

Carrasco-Díaz, M., Rivas, D., Orozco-Contreras, M., Sánchez-Montante, O. (2015). An assessment of wind power potential along the coast of Tamaulipas, northeastern Mexico. *Renewable Energy*, 78, 295-305.

Changshui, Z., Guangdong, H., Jun, W. (2011). A fast algorithm based on the submodular property for optimization of wind turbine positioning. *Renewable Energy*, 36(11), 2951-2958.

Chen, K., Song, M. X., Zhang, X., Wang, S. F. (2016). Wind turbine layout optimization with multiple hub height wind turbines using greedy algorithm. *Renewable Energy*, 96, 676-686.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chen, L., & MacDonald, E. (2014). A system-level cost-of-energy wind farm layout optimization with landowner modeling. *Energy Conversion and Management*, 77, 484-494.
- Chen, Y., Li, H., Jin, K., Song, Q. (2013). Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 70, 56-65.
- Chen, Y., Li, H., He, B., Wang, P., Jin, K. (2015). Multi-objective genetic algorithm based innovative wind farm layout optimization method. *Energy Conversion and Management*, 105, 1318-1327.
- Chowdhury, S., Zhang, J., Messac, A., Castillo, L. (2012). Unrestricted wind farm layout optimization (UWFLO): Investigating key factors influencing the maximum power generation. *Renewable Energy*, 38(1), 16-30.
- Christie, D., & Bradley, M. (2012). Optimising land use for wind farms. *Energy for Sustainable Development*, 16(4), 471-475.
- Chung, M. H., & Rhee, E. K. (2014). Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea. *Energy and Buildings* 78:176-182.
- CRES wind farm official web-site. 2018. [Online] Available: http://www.creswindfarm.gr/site1/index_en.htm
- Crespo, A., & Hernández, J. (1989). Numerical modelling of the flow field in a wind turbine wake. In *Proceedings of the 3rd Joint ASCE/ASME Mechanics Conference* (pp. 121-127).
- Cui, M., Zhang, J., Wu, H., Hodge, B. M., Ke, D., Sun, Y. (2016). Wind power ramping product for increasing power system flexibility. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016 IEEE/PES (pp. 1-5). IEEE.
- Çanka Kılıç, F., Kaya, D. (2007). Energy production, consumption, policies, and recent developments in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1312-1320.
- Deshko, V. I., & Shevchenko, O. M. (2013). University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach. *Energy and Buildings* 66:582-590.
- DuPont, B., Cagan, J., Moriarty, P. (2016). An advanced modeling system for optimization of wind farm layout and wind turbine sizing using a multi-level extended pattern search algorithm. *Energy*, 106, 802-814.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

DTU Wind Energy. Global Wind Atlas. Available at: <https://globalwindatlas.info/>

Durak, M., Şen, Z. (2002). Wind power potential in Turkey and Akhisar case study. Renewable Energy, 25(3), 463-472.

Emami, A., & Noghreh, P. (2010). New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. Renewable Energy, 35(7), 1559-1564.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2018). Doğal Gaz Piyasası 2017 Yılı Sektör Raporu. Ankara, Türkiye.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2018). Petrol Piyasası 2017 Yılı Sektör Raporu. Ankara, Türkiye.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETBK). (2017). Dünya Ve Türkiye Enerji Ve Tabii Kaynaklar Görünümü. Sayı 15. Türkiye.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETBK). (2018). Rüzgâr Bilgi Bankası. (<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>)

Eroğlu, Y., & Seçkiner, S. U. (2012). Design of wind farm layout using ant colony algorithm. Renewable Energy, 44, 53-62.

Eroğlu, Y., & Seçkiner, S. U. (2013). Wind farm layout optimization using particle filtering approach. Renewable Energy, 58, 95-107.

Escobedo, A., Briceno, S., Juarez, H., Castillo, D., Imaz, M., Sheinbaum, C. (2014). Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico. Energy for Sustainable Development 18: 49-57.

Eskin, N., Artar, H., Tolun, S. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(3), 839-851.

EurObserv'ER. (2018). Wind Energy Barometer. Systèmes Solaires le journal de l'éolien 6. Paris. <https://www.eurobserv-er.org/wind-energy-barometer-2018/>.

European Wind Energy Association (EWEA). (2017). The European Offshore Wind Industry—Key Trends and Statistics 2016. Brussels. Belgium.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fabbri, A., Roman, T. G. S., Abbad, J. R., Quezada, V. M. (2005). Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1440-1446.
- Fadare, D. A. (2008). A statistical analysis of wind energy potential in Ibadan, Nigeria, based on Weibull distribution function. *The pacific journal of science and technology*, 9(1), 110-119.
- Feng, J., & Shen, W. Z. (2015). Solving the wind farm layout optimization problem using random search algorithm. *Renewable Energy*, 78, 182-192.
- Ferreira, C., Gama, J., Matias, L., Botterud, A., Wang, J. (2011). A survey on wind power ramp forecasting (No. ANL/DIS-10-13). Argonne National Laboratory (ANL).
- Finance, B. N. E. (2018). Global trends in renewable energy investment 2018. <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/gtr2018v2.pdf>
- Fingersh, L., Hand, M., Laxson, A. (2006). Wind turbine design cost and scaling model (No. NREL/TP-500-40566). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, United States.
- Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Højstrup, J., Thøgersen, M. (2006). Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy*, 9(1-2), 39-53.
- Frisch, U. (1995). *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*. Cambridge university press.
- FTI Intelligence. (2017). *Global Wind Market Update – Demand & Supply 2017 Part One – Supply Side Analysis*. UK.
- Gao, X., Yang, H., Lin, L., Koo, P. (2015). Wind turbine layout optimization using multi-population genetic algorithm and a case study in Hong Kong offshore. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 89-99.
- Gao, X., Yang, H., Lu, L. (2014). Study on offshore wind power potential and wind farm optimization in Hong Kong. *Applied Energy*, 130, 519-531.
- Gao, X., Yang, H., Lu, L. (2016). Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. *Applied Energy*, 174, 192-200.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ghil, M. (1985). Turbulence and predictability in geophysical fluid dynamics and climate dynamics. Amsterdam et al.: North-Holland.
- González, J. S., García, Á. L. T., Payán, M. B., Santos, J. R., Rodríguez, Á. G. G. (2017). Optimal wind-turbine micro-siting of offshore wind farms: A grid-like layout approach. *Applied Energy*, 200, 28-38.
- González, J. S., Rodríguez, A. G. G., Mora, J. C., Santos, J. R., Payan, M. B. (2010). Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm. *Renewable Energy*, 35(8), 1671-1681.
- González, J. S., Rodríguez, A. G., Mora, J. C., Payán, M. B., Santos, J. R. (2011). Overall design optimization of wind farms. *Renewable Energy*, 36(7), 1973-1982.
- Göçmen, T., & Giebel, G. (2016). Estimation of turbulence intensity using rotor effective wind speed in Lillgrund and Horns Rev-I offshore wind farms. *Renewable Energy*, 99, 524-532.
- Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş. (2007). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. *Renewable Energy*, 32(10), 1739-1752.
- Gökçek, M., & Genç, M. S. (2009). Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECSs) in Central Turkey. *Applied Energy*, 86(12), 2731-2739.
- Grady, S. A., Hussaini, M. Y., Abdullah, M. M. (2005). Placement of wind turbines using genetic algorithms. *Renewable Energy*, 30(2), 259-270.
- Gu, H., & Wang, J. (2013). Irregular-shape wind farm micro-siting optimization. *Energy*, 57, 535-544.
- Guan, J., Nord, N., Chen, S. (2016). Energy planning of university campus building complex: Energy usage and coincidental analysis of individual buildings with a case study. *Energy and Buildings* 124:99-111.
- Guirguis, D., Romero, D. A., Amon, C. H. (2016). Toward efficient optimization of wind farm layouts: Utilizing exact gradient information. *Applied Energy*, 179, 110-123.
- GWEC (Global Wind Energy Council). (2005). Wind force 12, A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020. Brussels. Belgium.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

GWEC (Global Wind Energy Council). (2017). Global Wind Report – Annual Market Update 2016. Brussels. Belgium.

GWEC (Global Wind Energy Council). (2018). Global Wind Statistics 2017. Brussels, Belgium.

Hajj, M. R. (1999). Intermittency of energy-containing scales in atmospheric surface layer. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(7), 797-803.

Hasager, C. B., Rasmussen, L., Peña, A., Jensen, L. E., Réthoré, P. E. (2013). Wind farm wake: The Horns Rev photo case. *Energies*, 6(2), 696-716.

Hasapis, D., Savvakis, N., Tsoutsos, T., Kalaitzakis, K., Psychis, S., Nikolaidis, N.P. (2017). Design of large scale prosuming in Universities: The solar energy vision of the TUC campus. *Energy and Buildings* 141:39-55.

Hepbasli, A., & Ozgener, O. (2004). A review on the development of wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 257-276.

Hou, P., Hu, W., Chen, C., Soltani, M., Chen, Z. (2016). Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones. *Energy*, 113, 487-496.

Huang, C. W., & Shih, T. Y. (1997). On the complexity of point-in-polygon algorithms. *Computers & Geosciences*, 23(1), 109-118.

International Electrotechnical Commission. (2005). IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission.

International Energy Agency (IEA). (2015). World energy outlook 2015. France

International Energy Agency (IEA). (2016). Energy Policies of IEA Countries: Turkey 2016 review. France.

International Organization for Standardization (ISO). (1996). Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. ISO 9613-2.

IRENA. (2018). Renewable Power Generation Costs in 2017. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Irwin, J. S. (1979). A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability. *Atmospheric Environment* 13(1), 191-194.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ishihara, T., Yamaguchi, A., Fujino, Y. (2004). Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment. *Global wind power*, 6.
- İlkılıç, C., & Aydın, H. (2015). Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 78-86.
- İncecik, S., & Erdoğan, F. (1995). An investigation of the wind power potential on the western coast of Anatolia. *Renewable Energy*, 6(7), 863-865.
- Jain P. Wind energy engineering. (2016). 2nd ed. New York (USA): McGraw Hill.
- Jensen, N. O. (1983). A note on wind generator interaction. Risø-M-2411 Risø Natl Lab Roskilde.
- Jones, C. R., & Eiser, J. R. (2010). Understanding 'local' opposition to wind development in the UK: How big is a backyard?. *Energy Policy* 38(6):3106-3117.
- Jung, S., Vanli, O. A., Kwon, S. D. (2013). Wind energy potential assessment considering the uncertainties due to limited data. *Applied Energy*, 102, 1492-1503.
- Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., Graber, D. (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of Applied Meteorology*, 17(3), 350-353.
- Kaldellis, J. K., Garakis, K., Kapsali, M. (2012). Noise impact assessment on the basis of onsite acoustic noise immission measurements for a representative wind farm. *Renewable Energy* 41:306-314.
- Kaldellis, J. K., Vlachou, D., Kavadias, K. (2001). The incorporation of wind parks in Greek landscape. In *The public opinion towards wind turbines. European Wind Energy Conference and Exhibition 2001, Conference Proceedings, Copenhagen* (pp. 147-150).
- Kallioras, N. A., Lagaros, N. D., Karlaftis, M. G., Pachy, P. (2015). Optimum layout design of onshore wind farms considering stochastic loading. *Advances in Engineering Software*, 88, 8-20.
- Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Vol. 200). Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of global optimization*, 39(3), 459-471.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied*
- Karakasidis, T. E., Charakopoulos, A. (2009). Detection of low-dimensional chaos in wind time series. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41(4), 1723-1732.
- Karsli, V. M., & Geçit, C. (2003). An investigation on wind power potential of Nurdağı-Gaziantep, Turkey. *Renewable Energy*, 28(5), 823-830.
- Katic, I., Højstrup, J., Jensen, N. O. (1986). A simple model for cluster efficiency. In *European wind energy association conference and exhibition* (pp. 407-410).
- Khahro, S. F., Tabbassum, K., Soomro, A. M., Dong, L., Liao, X. (2014). Evaluation of wind power production prospective and Weibull parameter estimation methods for Babaurband, Sindh Pakistan. *Energy Conversion and Management*, 78, 956-967.
- Kolesnikov, A. (2012). ISE-bounded polygonal approximation of digital curves. *Pattern Recognition Letters*, 33(10), 1329-1337.
- Köse, R. (2004). An evaluation of wind energy potential as a power generation source in Kütahya, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1631-1641.
- Köse, R., Özgür, M. A., Erbas, O., Tugcu, A. (2004). The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 277-288.
- Kruskal, J. B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1), 48-50.
- Kuo, J. Y., Romero, D. A., Beck, J. C., Amon, C. H. (2016). Wind farm layout optimization on complex terrains—Integrating a CFD wake model with mixed-integer programming. *Applied Energy*, 178, 404-414.
- Kusiak, A., Song, Z. (2010). Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. *Renewable Energy*, 35(3), 685-694.
- Küçükali, S., & Dinçkal, Ç. (2014). Wind energy resource assessment of Izmit in the West Black Sea coastal region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 790-795.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kwon, S. D. (2010). Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. *Applied Energy*, 87(3), 856-865.
- Lee, J., Chang, B., Aktas, C., Gorthala, R. (2016). Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England. *Renewable Energy* 99:452-464.
- Li, W., Özcan, E., John, R. (2017). Multi-objective evolutionary algorithms and hyper-heuristics for wind farm layout optimisation. *Renewable Energy*, 105, 473-482.
- Liang, Z., Liang, J., Zhang, L., Wang, C., Yun, Z., Zhang, X. (2015). Analysis of multi-scale chaotic characteristics of wind power based on Hilbert–Huang transform and Hurst analysis. *Applied Energy*, 159, 51-61.
- Liu, F., & Wang, Z. (2014). Offshore wind farm layout optimization using adapted genetic algorithm: A different perspective. *arXiv preprint arXiv:1403.7178*.
- Liu, J., Ren, G., Wan, J., Guo, Y., Yu, D. (2016). Variogram time-series analysis of wind speed. *Renewable Energy*, 99, 483-491.
- Lukman, R., Tiwary, A., Azapagic, A. (2009). Towards greening a university campus: The case of the University of Maribor, Slovenia. *Resources, Conservation and Recycling* 53(11): 639-644.
- Mayo, M., & Daoud, M. (2016). Informed mutation of wind farm layouts to maximise energy harvest. *Renewable Energy*, 89, 437-448.
- McComb, W. D. (1990). The physics of fluid turbulence. *Chemical physics*.
- Melikoglu, M. (2013). Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey's renewable energy projection. *Renewable Energy*, 50, 570-575.
- Meneveau, C., & Sreenivasan, K. R. (1991). The multifractal nature of turbulent energy dissipation. *Journal of Fluid Mechanics*, 224, 429-484.
- MirHassani, S. A., & Yarahmadi, A. (2017). Wind farm layout optimization under uncertainty. *Renewable Energy*, 107, 288-297.
- Mohammadi, K., Alavi, O., Mostafaeipour, A., Goudarzi, N., Jalilvand, M. (2016). Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322-335.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mohammadi, K., & Mostafaeipour, A. (2013). Economic feasibility of developing wind turbines in Aligoodarz, Iran. *Energy Conversion and Management*, 76, 645-653.
- Montoya, F. G., Manzano-Agugliaro, F., López-Márquez, S., Hernández-Escobedo, Q., Gil, C. (2014). Wind turbine selection for wind farm layout using multi-objective evolutionary algorithms. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6585-6595.
- Mortensen, N. G., Heathfield, D. N., Rathmann, O., Nielsen, M. (2014). Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 11 Help Facility Roskilde: Department of Wind Energy, Technical University of Denmark.
- Mosetti, G. P. C. D. B., Poloni, C., Diviacco, B. (1994). Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1), 105-116.
- Mostafaeipour, A. (2010). Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 93-111.
- Mytafides, C. K., Dimoudi, A., Zoras, S. (2017). Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 155:98-114.
- Nakano, T., Fujisawa, N., Oguma, Y., Takagi, Y., Lee, S. (2007). Experimental study on flow and noise characteristics of NACA0018 airfoil. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(7), 511-531.
- Nouri, A., Babram, M. A., Elwarraki, E., Enzili, M. (2016). Moroccan wind farm potential feasibility. Case study. *Energy Conversion and Management*, 122, 39-51.
- Onat, N., & Ersoz, S. (2011). Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey. *Energy*, 36(1), 148-156.
- Orrell, A. C., Foster, N. A., Homer, J. S., Morris, S. L. (2016). 2015 Distributed Wind Market Report (No. PNNL-25636). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Ouammi, A., Dagdougui, H., Sacile, R., Mimet, A. (2010). Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1959-1968.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Özay, C., & Celiktaş, M. S. (2016). Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. *Energy Conversion and Management*, 121, 49-54.
- Özerdem, B., & Turkeli, M. (2003). An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey. *Renewable Energy*, 28(7), 1013-1027.
- Özerdem, B., & Turkeli, H. M. (2005). Wind energy potential estimation and micrositting on Izmir Institute of Technology Campus, Turkey. *Renewable Energy*, 30(10), 1623-1633.
- Özerdem, B., Ozer, S., Tosun, M. (2006). Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(10), 725-743.
- Özgener, L. (2010). Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3232-3236.
- Özgür, M. A., & Kose, R. (2006). Assessment of the wind energy potential of Kutahya, Turkey. *Energy Exploration & ;Exploitation*, 24(4), 331-347.
- Özgür, M. A., Arslan, O., Kose, R., Peker, K. O. (2009). Statistical evaluation of wind characteristics in Kutahya, Turkey. *Energy Sources, Part A*, 31(16), 1450-1463.
- Özgür, M. A. (2006). Kütahya rüzgâr karakteristiğinin istatistiksel analizi ve elektrik üretimine uygulanabilirliği. Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztopal, A., Şahin, A. D., Akgün, N., Şen, Z. (2000). On the regional wind energy potential of Turkey. *Energy*, 25(2), 189-200.
- Parada, L., Herrera, C., Flores, P., Parada, V. (2017). Wind farm layout optimization using a Gaussian-based wake model. *Renewable Energy*, 107, 531-541.
- Park, J., & Law, K. H. (2015). Layout optimization for maximizing wind farm power production using sequential convex programming. *Applied Energy*, 151, 320-334.
- Patel, J., Savsani, V., Patel, V., Patel, R. (2017). Layout optimization of a wind farm to maximize the power output using enhanced teaching learning based optimization technique. *Journal of Cleaner Production*, 158, 81-94.
- Pedersen, E., Hallberg, L. M., Wayne, K. P. (2007). Living in the vicinity of wind turbines—a grounded theory study. *Qualitative Research in Psychology*, 4(1-2), 49-63.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pelosi R., (2016). The next generation in wind power technology. *Renewable Energy World*. pp. 26-30

Peña, A., Réthoré, P. E., Laan, M. P. (2016). On the application of the Jensen wake model using a turbulence-dependent wake decay coefficient: the Sexbierum case. *Wind Energy*, 19(4), 763-776.

Pérez, B., Mínguez, R., Guanche, R. (2013). Offshore wind farm layout optimization using mathematical programming techniques. *Renewable Energy*, 53, 389-399.

Petković, D., Pavlović, N. T., Čojbašić, Ž. (2016). Wind farm efficiency by adaptive neuro-fuzzy strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 215-221.

Pillai, A. C., Chick, J., Khorasanchi, M., Barbouchi, S., Johanning, L. (2017). Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm. *Ocean Engineering*, 139, 287-297.

Pookpunt, S., & Ongsakul, W. (2013). Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients. *Renewable Energy*, 55, 266-276.

Pookpunt, S., & Ongsakul, W. (2016). Design of optimal wind farm configuration using a binary particle swarm optimization at Huasai district, Southern Thailand. *Energy Conversion and Management*, 108, 160-180.

Prema, V., Rao, K. U., Jnaneswar, B. S., Badarish, C. A., Ashok, P. S., Agarwal, S. (2016). Application of Hybrid Neuro-Wavelet Models for Effective Prediction of Wind Speed. In *Intelligent Systems Technologies and Applications* (s. 345-354). Springer, Cham.

Rahbari, O., Vafaeipour, M., Fazelpour, F., Feidt, M., Rosen, M. A. (2014). Towards realistic designs of wind farm layouts: Application of a novel placement selector approach. *Energy Conversion and Management*, 81, 242-254.

Ren, G., Liu, J., Wan, J., Guo, Y., Yu, D., Liu, J. (2017). Measurement and statistical analysis of wind speed intermittency. *Energy*, 118, 632-643.

REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).

REN21. (2018). *Renewables 2018 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Resmi Gazete. (1984). Türkiye Elektrik Kurumu Dışındaki Kuruluşların Elektrik Üretimi, İletimi, Dağıtımı Ve Ticareti İle Görevlendirilmesi Hakkında Kanun. Kanun Numarası: 3096. Türkiye

Resmi Gazete. (1997). Yap-İşlet Modeli İle Elektrik Enerjisi Üretim Tesislerinin Kurulması Ve İşletilmesi İle Enerji Satışının Düzenlenmesi Hakkında Kanun. Kanun Numarası: 4283. Türkiye

Resmi Gazete. (2001). Elektrik Piyasası Kanunu. Kanun Numarası: 4628. Türkiye

Resmi Gazete. (2005). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun. Kanun Numarası: 5346. Türkiye

Resmi Gazete. (2007). Enerji Verimliliği Kanunu. Kanun Numarası: 5627. Türkiye

Resmi Gazete. (2010). Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği. Yönetmelik Numarası: 27601. Türkiye

Resmi Gazete. (2011). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun. Kanun Numarası: 6094. Türkiye

Rodrigues, S., Bauer, P., Bosman, P. A. (2016). Multi-objective optimization of wind farm layouts—Complexity, constraint handling and scalability. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 587-609.

Salcedo-Sanz, S., Gallo-Marazuela, D., Pastor-Sánchez, A., Carro-Calvo, L., Portilla-Figueras, A., Prieto, L. (2013). Evolutionary computation approaches for real offshore wind farm layout: A case study in northern Europe. Expert Systems with Applications, 40(16), 6292-6297.

Salcedo-Sanz, S., Gallo-Marazuela, D., Pastor-Sánchez, A., Carro-Calvo, L., Portilla-Figueras, A., Prieto, L. (2014). Offshore wind farm design with the Coral Reefs Optimization algorithm. Renewable Energy, 63, 109-115.

Saleh, H., Aly, A. A. E. A., Abdel-Hady, S. (2012). Assessment of different methods used to estimate Weibull distribution parameters for wind speed in Zafarana wind farm, Suez Gulf, Egypt. Energy, 44(1), 710-719.

Sanderse, B. (2009). Aerodynamics of wind turbine wakes. Energy Research Center of the Netherlands (ECN), ECN-E-09-016, Petten, The Netherlands, Tech. Rep, 5(15), 153.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shakoor, R., Hassan, M. Y., Raheem, A., Rasheed, N. (2016). Wind farm layout optimization using area dimensions and definite point selection techniques. *Renewable Energy*, 88, 154-163.
- Shensi, S., Yue, Z., Zheng, L., Xu, C. (2015). Grid code for wind power fluctuation in China and particle swarm optimization-based power dispatch solution. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(1), 013118.
- Shu, Z. R., Li, Q. S., Chan, P. W. (2015). Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 101, 644-657.
- Sırdaş, S. (2005). Daily wind speed harmonic analysis for Marmara region in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 46(7-8), 1267-1277.
- Sideratos, G., Hatziaargyriou, N. D. (2007). An advanced statistical method for wind power forecasting. *IEEE Transactions on power systems*, 22(1), 258-265.
- Solyali, D., Altunç, M., Tolun, S., Aslan, Z. (2016). Wind resource assessment of Northern Cyprus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 180-187.
- Solyali, D., Altunç, M., Tolun, S., Aslan, Z. (2016). Wind resource assessment of Northern Cyprus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 180-187.
- Soman, S. S., Zareipour, H., Malik, O., Mandal, P. (2010). A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. In *North American power symposium (NAPS)*, 2010 (pp. 1-8). IEEE.
- Song, M. X., Chen, K., He, Z. Y., Zhang, X. (2014). Optimization of wind farm micro-siting for complex terrain using greedy algorithm. *Energy*, 67, 454-459.
- Song, M. X., Chen, K., Zhang, X., Wang, J. (2015). The lazy greedy algorithm for power optimization of wind turbine positioning on complex terrain. *Energy*, 80, 567-574.
- Song, Z., Zhang, Z., Chen, X. (2016). The decision model of 3-dimensional wind farm layout design. *Renewable Energy*, 85, 248-258.
- Stehly, T. J., Heimiller, D. M., Scott, G. N. (2017). 2016 Cost of Wind Energy Review (No. NREL/TP-6A20-70363). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Swofford, J., & Slattery, M. (2010). Public attitudes of wind energy in Texas: Local communities in close proximity to wind farms and their effect on decision-making. *Energy Policy*, 38(5), 2508-2519.
- Şahin, A. D. (2003). Hourly wind velocity exceedence maps of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 44(4), 549-557.
- Şen, Z., & Şahin, A. D. (1997). Regional assessment of wind power in western Turkey by the cumulative semivariogram method. *Renewable Energy*, 12(2), 169-177.
- Şen, Z., & Şahin, A. D. (1998). Regional wind energy evaluation in some parts of Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74, 345-353.
- Şen, Z. (2001). Areal assessment of wind speed and topography with applications in Turkey. *Renewable Energy*, 24(1), 113-129.
- Şimşek, H. A., & Simsek, N. (2013). Recent incentives for renewable energy in Turkey. *Energy Policy*, 63, 521-530.
- Talavera, D. L., Muñoz-Cerón, E., De La Casa, J., Ortega, M. J., Almonacid, G. (2011). Energy and economic analysis for large-scale integration of small photovoltaic systems in buildings: The case of a public location in Southern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(9):4310-4319.
- T.C. Dış İşleri Bakanlığı (TCDİB). (2016). http://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa
- T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (TMGM). (2018). (<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=KUTAHYA>)
- Teleke, S., Baran, M. E., Bhattacharya, S., Huang, A. Q. (2010). Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 787-794.
- Tritton, D. J. (1988). *Physical fluid dynamics*. Clarendon.
- Tizpar, A., Satkin, M., Roshan, M. B., Armoudli, Y. (2014). Wind resource assessment and wind power potential of Mil-E Nader region in Sistan and Baluchestan Province, Iran–Part 1: Annual energy estimation. *Energy Conversion and Management*, 79, 273-280.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2018). Türkiye Elektrik Sistemi Kuruluş Ve Kaynaklara Göre Kurulu Güç. (<https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-01/Kguc2017.pdf>)

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2018). 2017 Yılı Faaliyet Raporu. Türkiye.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2018). Yıllara Göre İl Nüfusları. Türkiye. (http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1059).

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB). (2017). Türkiye Rüzgâr Santralleri Atlası Ocak 2017. Türkiye.

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB). (2018). Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu Ocak 2018. Türkiye.

Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü (TTKGM). (2018). 2017 Yılı Taşkömürü Sektör Raporu. Türkiye.

Ucar, A., & Balo, F. (2009). Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey. *Applied energy*, 86(3), 333-339.

UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy (UKDBEIS). (2018). Energy Trends: Renewables, Section 6. <https://www.gov.uk/government/statistics/energy-trends-section-6-renewables>.

Ullah, I., & Chipperfield, A. J. (2010). An evaluation of wind energy potential at Kati Bandar, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 856-861.

United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248.

VDMA, BWE. (2017). The Cost of Onshore Wind Power in Germany–Update. (<https://wind.vdma.org/documents/106078/2159140/Cost%20Study%20Wind%20Energy%20Summary/fa78ee31-3e04-40c0-a7e4-9889af7a4a98>)

Velo, R., López, P., Maseda, F. (2014). Wind speed estimation using multilayer perceptron. *Energy Conversion and Management*, 81, 1-9.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wagner, S., Bareiss, R., Guidati, G. (2012). Wind turbine noise. Springer Science & Business Media.

Wang, J., Hu, J., Ma, K. (2016). Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 881-899.

Wang, L., Tan, A. C., Cholette, M. E., Gu, Y. (2017). Optimization of wind farm layout with complex land divisions. Renewable Energy, 105, 30-40.

Wang, L., Tan, A. C., Gu, Y. (2015). Comparative study on optimizing the wind farm layout using different design methods and cost models. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 146, 1-10.

WindPro 2.7. User guide (2010). Accessed January 02, 2018. <http://www.emd.dk>

World Bank. (2018). World development indicators database. (ulaşılabilir: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?end=2015&start=1960&view=chart>)

World Wind Energy Association (WWEA). (2017). 2017 Small Wind World Report Summary. Bonn. Almanya.

Wyngaard, J. C., & Tennekes, H. (1970). Measurements of the small-scale structure of turbulence at moderate Reynolds numbers. The Physics of Fluids, 13(8), 1962-1969.

Yaniktepe, B., Koroglu, T., Savrun, M. M. (2013). Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Osmaniye, Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21, 703-711.

Yong-nian, H., & Ya-dong, H. (1989). On the transition to turbulence in pipe flow. Physica D: Nonlinear Phenomena, 37(1-3), 153-159.

Yoshida, Y., Shimoda, Y., Ohashi, T. (2017). Strategies for a sustainable campus in Osaka University. Energy and Buildings 147:1-8.

Zhang, J., Chowdhury, S., Messac, A. (2014). A comprehensive measure of the energy resource: Wind power potential (WPP). Energy Conversion and Management, 86, 388-398.

Zhang, M. H. (2015). Wind resource assessment and micro-siting: science and engineering. John Wiley and Sons Singapore Pte Ltd.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhou, X., Yan, J., Zhu, J., Cai, P. (2013). Survey of energy consumption and energy conservation measures for colleges and universities in Guangdong province. Energy and Buildings 66:112-118.

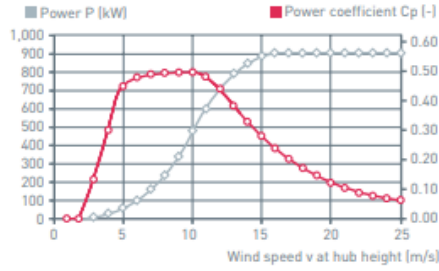


EKLER

EK.1. Kullanılan Türbin Modellerinin Üreticileri Tarafından Verilen Veri Föyleri

EK.1.1. Model 44: Enercon E-44

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power- coefficient Cp [-]
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	4.0	0.16
4	20.0	0.34
5	50.0	0.43
6	96.0	0.48
7	156.0	0.49
8	238.0	0.50
9	340.0	0.50
10	466.0	0.50
11	600.0	0.48
12	710.0	0.44
13	790.0	0.39
14	850.0	0.33
15	880.0	0.28
16	905.0	0.24
17	910.0	0.20
18	910.0	0.17
19	910.0	0.14
20	910.0	0.12
21	910.0	0.11
22	910.0	0.09
23	910.0	0.08
24	910.0	0.07
25	910.0	0.06

p = 1.225 kg/m³

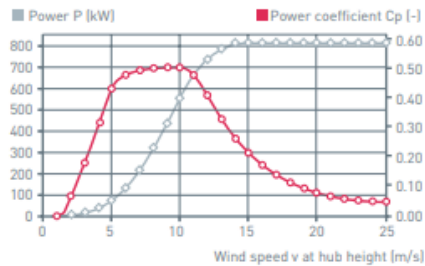
Technical specifications E-44

Rated power:	900 kW
Rotor diameter:	44 m
Hub height in meter:	45 / 55
Wind zone (DIBt):	-
Wind class (IEC):	IEC/EN IA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment
Rotor	
Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	1,521 m²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 16 - 34.5 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one inde- pendent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply
Drive train with generator	
Main bearing:	Twin tapered roller bearing
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch con- trol systems with emer- gency power supply - Rotor brake - Rotor lock
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s [with ENERCON storm control*]
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature,
please see the last page.

EK.1.2. Model 48: Enercon E-48

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	5.0	0.17
4	25.0	0.35
5	60.0	0.43
6	110.0	0.46
7	180.0	0.47
8	275.0	0.48
9	400.0	0.50
10	555.0	0.50
11	671.0	0.45
12	750.0	0.39
13	790.0	0.32
14	810.0	0.27
15	810.0	0.22
16	810.0	0.18
17	810.0	0.15
18	810.0	0.13
19	810.0	0.11
20	810.0	0.09
21	810.0	0.08
22	810.0	0.07
23	810.0	0.06
24	810.0	0.05
25	810.0	0.05

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-48

Rated power:	800 kW
Rotor diameter:	48 m
Hub height in meter:	50 / 60 / 65 / 76
Wind zone (DIBt):	WZ III
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	1,810 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 16 - 31.5 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

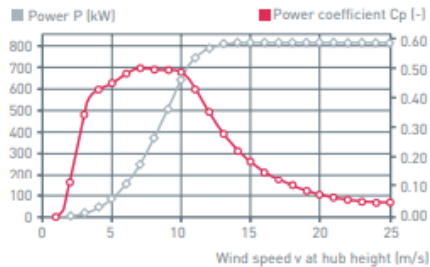
Drive train with generator

Main bearing:	Twin tapered roller bearing
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake - Rotor lock
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.3. Model 53: Enercon E-53

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power- coefficient Cp [-]
1	0.0	0.00
2	2.0	0.19
3	14.0	0.39
4	38.0	0.44
5	77.0	0.46
6	141.0	0.48
7	228.0	0.49
8	336.0	0.49
9	480.0	0.49
10	645.0	0.48
11	744.0	0.42
12	780.0	0.34
13	810.0	0.27
14	810.0	0.22
15	810.0	0.18
16	810.0	0.15
17	810.0	0.12
18	810.0	0.10
19	810.0	0.09
20	810.0	0.08
21	810.0	0.06
22	810.0	0.06
23	810.0	0.05
24	810.0	0.04
25	810.0	0.04

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-53

Rated power:	800 kW
Rotor diameter:	52.9 m
Hub height in meter:	50 / 60 / 73
Wind zone (DIBt):	WZ II exp
Wind class (IEC):	IEC/NVN Class S [$V_{ref} = 7.5 \text{ m/s}$, $V_{ext} = 57 \text{ m/s}$]
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	2,198 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 11 - 29.5 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one inde- pendent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

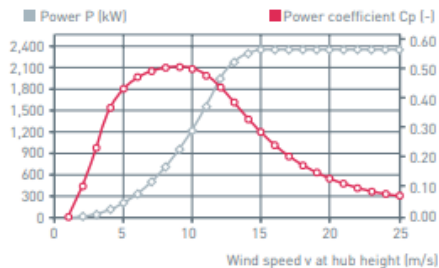
Drive train with generator

Main bearing:	Twin tapered roller bearing
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emer- gency power supply - Rotor brake - Rotor lock
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s [with ENERCON storm control*]
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature,
please see the last page.

EK.1.4. Model 53: Enercon E-53

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	2.0	0.10
3	18.0	0.27
4	56.0	0.36
5	127.0	0.42
6	240.0	0.46
7	400.0	0.48
8	626.0	0.50
9	892.0	0.50
10	1,223.0	0.50
11	1,590.0	0.49
12	1,900.0	0.45
13	2,080.0	0.39
14	2,230.0	0.34
15	2,300.0	0.28
16	2,310.0	0.23
17	2,310.0	0.19
18	2,310.0	0.16
19	2,310.0	0.14
20	2,310.0	0.12
21	2,310.0	0.10
22	2,310.0	0.09
23	2,310.0	0.08
24	2,310.0	0.07
25	2,310.0	0.06

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-70 E4

Rated power:	2,300 kW
Rotor diameter:	71 m
Hub height in meter:	57 / 64 / 75 / 85 / 98 / 114
Wind zone (DIBt):	WZ III
Wind class (IEC):	IEC/EN IA and IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	3,959 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 6 - 21 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

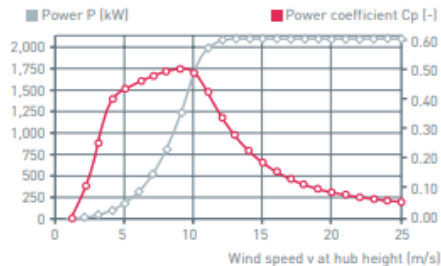
Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake - Rotor lock
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.5. Model 82: Enercon E-82

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power- coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	3.0	0.12
3	25.0	0.29
4	82.0	0.40
5	174.0	0.43
6	321.0	0.46
7	532.0	0.48
8	815.0	0.49
9	1,180.0	0.50
10	1,580.0	0.49
11	1,810.0	0.42
12	1,980.0	0.35
13	2,050.0	0.29
14	2,050.0	0.23
15	2,050.0	0.19
16	2,050.0	0.15
17	2,050.0	0.13
18	2,050.0	0.11
19	2,050.0	0.09
20	2,050.0	0.08
21	2,050.0	0.07
22	2,050.0	0.06
23	2,050.0	0.05
24	2,050.0	0.05
25	2,050.0	0.04

p = 1.225 kg/m³

Technical specifications E-82 E2

Rated power:	2,000 kW
Rotor diameter:	82 m
Hub height in meter:	78 / 84 / 85 / 98 / 108 / 138
Wind zone (DIBt):	WZ III
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	5,281 m²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 6 - 18 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one inde- pendent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

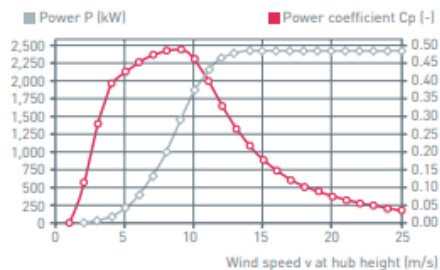
Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylin- drical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch con- trol systems with emer- gency power supply - Rotor brake - Rotor lock
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature,
please see the last page.

EK.1.6. Model 92: Enercon E-92

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power- coefficient Cp [-]
1	0.0	0.00
2	3.6	0.11
3	29.9	0.27
4	98.2	0.38
5	208.3	0.41
6	384.3	0.44
7	637.0	0.46
8	975.8	0.47
9	1,403.6	0.47
10	1,817.8	0.45
11	2,088.7	0.39
12	2,237.0	0.32
13	2,300.0	0.26
14	2,350.0	0.21
15	2,350.0	0.17
16	2,350.0	0.14
17	2,350.0	0.12
18	2,350.0	0.10
19	2,350.0	0.08
20	2,350.0	0.07
21	2,350.0	0.06
22	2,350.0	0.05
23	2,350.0	0.05
24	2,350.0	0.04
25	2,350.0	0.04

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-92

Rated power: 2,350 kW
Rotor diameter: 92 m
Hub height in meter: 78 / 84 / 85 / 98 / 104 / 108 / 138
Wind zone (DIBt): WZ III
Wind class (IEC): IEC/EN IIA

WEC concept: Gearless, variable speed,
single blade adjustment

Rotor

Type: Upwind rotor with active
pitch control
Rotational direction: Clockwise
No. of blades: 3
Swept area: 6,648 m²
Blade material: GRP (epoxy resin);
Built-in lightning protection
Rotational speed: Variable, 5 - 16 rpm
Pitch control: ENERCON single blade pitch
system; one independent
pitch system per rotor blade
with allocated emergency
supply

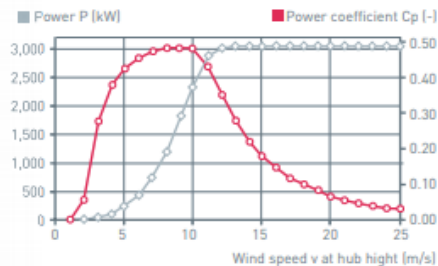
Drive train with generator

Main bearing: Double row tapered/cylin-
drical roller bearings
Generator: ENERCON direct-drive
annular generator
Grid feed: ENERCON inverter
Brake systems: - 3 independent pitch control
systems with emergency
power supply
- Rotor brake
- Rotor lock
Yaw system: Active via yaw gear,
load-dependent damping
Cut-out wind speed: 28 - 34 m/s
(with ENERCON storm con-
trol*)
Remote monitoring: ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature,
please see the last page.

EK.1.7. Model 101: Enercon E-101

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	3.0	0.076
3	37.0	0.279
4	118.0	0.376
5	258.0	0.421
6	479.0	0.452
7	790.0	0.469
8	1,200.0	0.478
9	1,710.0	0.478
10	2,340.0	0.477
11	2,867.0	0.439
12	3,034.0	0.358
13	3,050.0	0.283
14	3,050.0	0.227
15	3,050.0	0.184
16	3,050.0	0.152
17	3,050.0	0.127
18	3,050.0	0.107
19	3,050.0	0.091
20	3,050.0	0.078
21	3,050.0	0.067
22	3,050.0	0.058
23	3,050.0	0.051
24	3,050.0	0.045
25	3,050.0	0.040

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-101

Rated power:	3,050 kW
Rotor diameter:	101 m
Hub height in meter:	99 / 124 / 135 / 149
Wind zone (DIBt):	WZ III
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	8,012 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 4 - 14.5 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake - Rotor lock, latching (10°)
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.8. Model 103: Enercon E-103 EP 2

E-103 EP2_2.35 MW

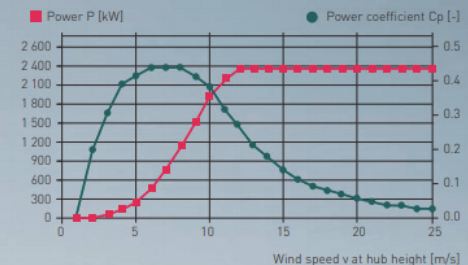
The ENERCON expert for low wind sites in the 2 MW platform

In terms of efficiency and performance, ENERCON is now providing the ideal turbine in the 2 MW segment for low wind inland sites with the new E-103 EP2 / 2 350 kW turbine. Thanks to its larger rotor diameter and higher hub height, wind resources at low wind sites are utilized to the fullest generating an additional annual yield gain of up to 10% in comparison with the E-92.

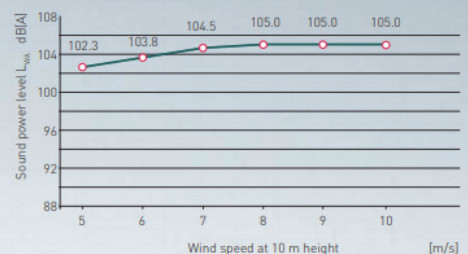
Technical Details

- ~ Rated power: 2 350 kW
- ~ Rotor diameter: 103 m
- ~ Hub height: 98 / 138 m
- ~ Wind class (IEC): IEC/EN IIIA
- ~ Rotational speed: variable, 5 - 15 rpm
- ~ Cut-out wind speed: 28 - 34 m/s

Calculated power curve E-103 EP2 / 2.35 MW



Sound power level E-103 EP2 / 2.35 MW - 138 m hub height



Rotor blade

- ~ Innovative aerodynamic design for maximum yield in the low wind range
- ~ Significant reduction of sound emissions by using Trailing Edge Serrations (TES)
- ~ Yield optimized flat-back profile
- ~ Excellent lightning protection system
- ~ Minimal structural loads

Generator

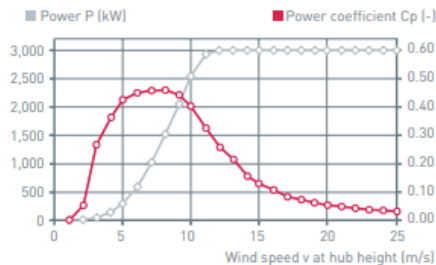
- ~ Advanced cooling concept
- ~ No use of rare earth elements
- ~ Time-tested drive technology

Nacelle

- ~ Use of premium quality cast components

EK.1.9. Model 115/1: Enercon E-115

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	3.0	0.058
3	48.5	0.279
4	155.0	0.376
5	339.0	0.421
6	627.5	0.451
7	1,035.5	0.469
8	1,549.0	0.470
9	2,090.0	0.445
10	2,580.0	0.401
11	2,900.0	0.338
12	3,000.0	0.270
13	3,000.0	0.212
14	3,000.0	0.170
15	3,000.0	0.138
16	3,000.0	0.114
17	3,000.0	0.095
18	3,000.0	0.080
19	3,000.0	0.068
20	3,000.0	0.058
21	3,000.0	0.050
22	3,000.0	0.044
23	3,000.0	0.038
24	3,000.0	0.034
25	3,000.0	0.030

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-115

Rated power:	3,000 kW
Rotor diameter:	115.7 m
Hub height in meter:	92 / 122 / 135 / 149
Wind zone (DIBt):	WZ III / WZ 4 GK I / WZ4 GK II
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	10,515.5 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 4 - 12.8 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

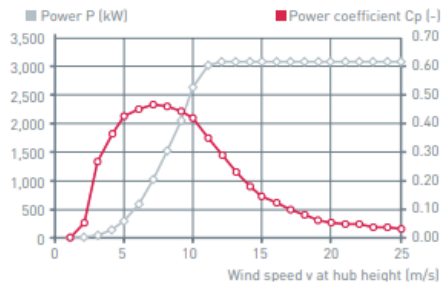
Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake - Rotor lock, latching [10°]
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s [with ENERCON storm control*]
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.10. Model 115/2: Enercon E-115 E2

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	3.0	0.06
3	49.0	0.28
4	155.0	0.38
5	339.0	0.42
6	628.0	0.45
7	1,036.0	0.47
8	1,522.0	0.46
9	2,215.0	0.45
10	2,677.0	0.42
11	3,030.0	0.35
12	3,177.0	0.29
13	3,200.0	0.23
14	3,200.0	0.18
15	3,200.0	0.15
16	3,200.0	0.12
17	3,200.0	0.10
18	3,200.0	0.09
19	3,200.0	0.07
20	3,200.0	0.06
21	3,200.0	0.05
22	3,200.0	0.05
23	3,200.0	0.04
24	3,200.0	0.04
25	3,200.0	0.03

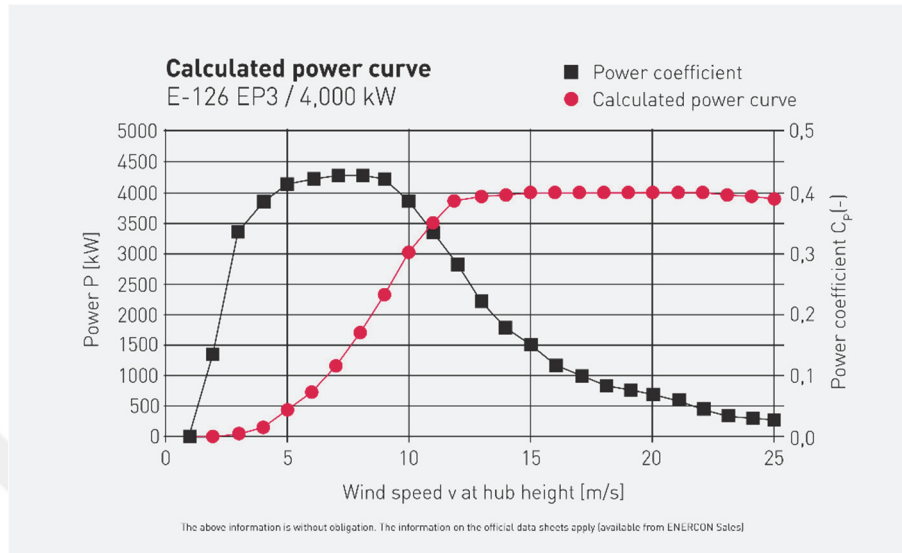
$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-115 E2

Rated power:	3,200 kW
Rotor diameter:	115.7 m
Hub height in meter:	92 / 122 / 135 / 149
Wind zone (DIBt):	WZ 4 GK I / WZ 4 GK II
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment
Rotor	
Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	10,515.5 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 4 - 12.8 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply
Drive train with generator	
Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	– 3 independent pitch control systems with emergency power supply – Rotor brake – Rotor lock, latching (10°)
Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.11. Model 126/1: Enercon E-126 EP3



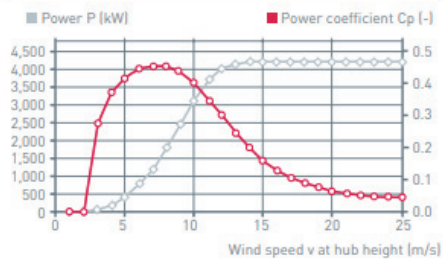
ENERCON E-126 EP3 / 4,0 MW

Overview of technical details

Rated power	4,000 kW
Rotor diameter	127 m
Hub height in meter	86 / 116 / 135
Wind class (IEC)	IEC/EN IIA
WEC concept	Gearless, variable speed, single blade adjustment

EK.1.12. Model 126/2: Enercon E-126 EP4

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	58.0	0.28
4	185.0	0.37
5	400.0	0.41
6	745.0	0.44
7	1,200.0	0.45
8	1,790.0	0.45
9	2,450.0	0.43
10	3,120.0	0.40
11	3,660.0	0.35
12	4,000.0	0.30
13	4,150.0	0.24
14	4,200.0	0.20
15	4,200.0	0.16
16	4,200.0	0.13
17	4,200.0	0.11
18	4,200.0	0.09
19	4,200.0	0.08
20	4,200.0	0.07
21	4,200.0	0.06
22	4,200.0	0.05
23	4,200.0	0.04
24	4,200.0	0.04
25	4,200.0	0.03

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-126 EP4

Rated power:	4,200 kW
Rotor diameter:	127 m
Hub height in meter:	99 / 135 / 159
Wind zone (DIBt):	WZ4 GK I / WZ4 GK II
	WZ3 GK I / WZ3 GK II
Wind class (IEC):	IEC/EN IA and IEC/EN IIA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	12,668 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 3 - 11.6 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake

Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed:	28 - 34 m/s [with ENERCON storm control*]
Remote monitoring:	ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.13. Model 138: Enercon E-138 EP 3

E-138 EP3

Rated power: 3.500 kW

Rotor diameter: 138.6 m

Hub height (m): 81 / 111 / 131 / 160

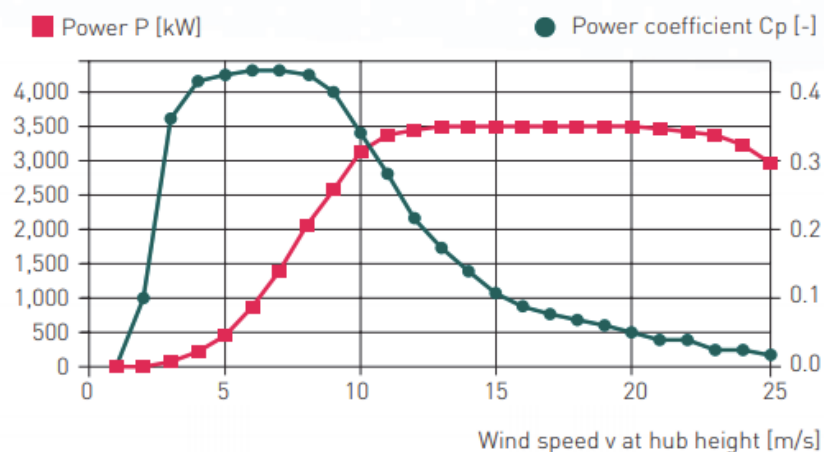
Wind class (IEC): IEC/EN IIIA

Rotational speed: variable, 4.4 - 10.8 rpm

Cut-out wind speed: 22 - 28 m/s

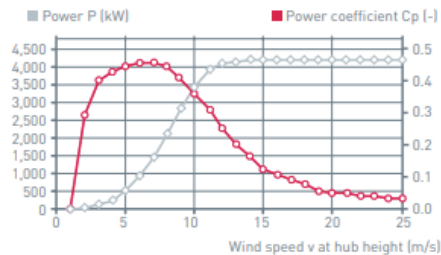
CALCULATED POWER CURVE

E-138 EP3*



EK.1.14. Model 141: Enercon E-141 EP 4

Calculated power curve



Wind (m/s)	Power P (kW)	Power- coefficient Cp (-)
1	0.0	0.00
2	22.0	0.29
3	104.0	0.40
4	260.0	0.42
5	523.0	0.44
6	920.0	0.45
7	1,471.0	0.45
8	2,151.0	0.44
9	2,867.0	0.41
10	3,481.0	0.36
11	3,903.0	0.31
12	4,119.0	0.25
13	4,196.0	0.20
14	4,200.0	0.16
15	4,200.0	0.13
16	4,200.0	0.11
17	4,200.0	0.09
18	4,200.0	0.08
19	4,200.0	0.06
20	4,200.0	0.05
21	4,200.0	0.05
22	4,200.0	0.04
23	4,200.0	0.04
24	4,200.0	0.03
25	4,200.0	0.03

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Technical specifications E-141 EP4

Rated power:	4,200 kW
Rotor diameter:	141 m
Hub height in meter:	99 / 129 / 135 / 159
Wind zone (DIBt):	WZ3 GK I / WZ3 GK II
Wind class (IEC):	IEC/EN IIA

WEC concept: Gearless, variable speed, single blade adjustment

Rotor

Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	15,615 m ²
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 4 - 11 rpm
Pitch control:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

Drive train with generator

Main bearing:	Double row tapered/cylindrical roller bearings
Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed:	ENERCON inverter
Brake systems:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply - Rotor brake

Yaw system: Active via yaw gear, load-dependent damping

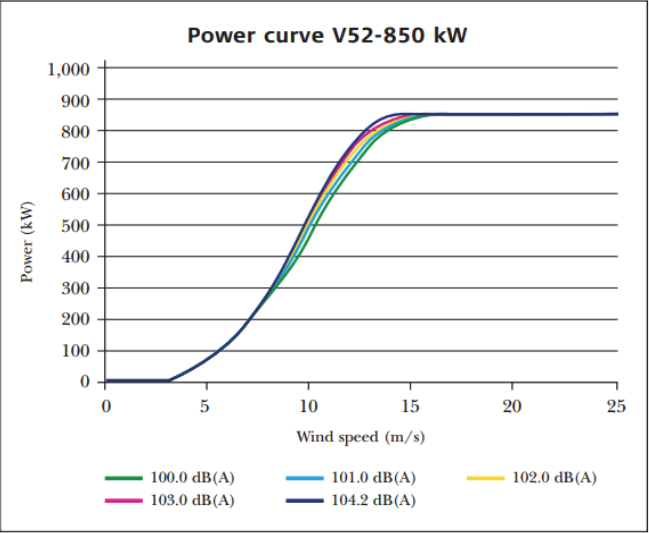
Cut-out wind speed: 28 - 34 m/s
[with ENERCON storm control(*)]

Remote monitoring: ENERCON SCADA

* For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.

EK.1.15. Model 52: Vestas V52

Rotor	
Diameter:	52 m
Area swept:	2,124 m²
Nominal revolutions:	26 rpm
Operational interval:	14.0-31.4 rpm
Number of blades:	3
Power regulation:	Pitch/OptiSpeed®
Air brake:	Full blade pitch
Tower	
Hub height:	40 m, 44 m, 49 m, 55 m, 60 m, 65 m, 74 m, 86 m
Operational data	
Cut-in wind speed:	4 m/s
Nominal wind speed:	16 m/s
Cut-out wind speed:	25 m/s
Generator	
Type:	Asynchronous with OptiSpeed®
Nominal output:	850 kW
Operational data:	50 Hz/60 Hz 690 V
Gearbox	
Type:	1 planet step/2-step parallel axle gears
Control	
Type:	Microprocessor-based monitoring of all turbine functions as well as OptiSpeed® output regulation and OptiTip® pitch regulation of the blades.



The figure above illustrates the power curves at different sound levels for the V52-850 kW turbine, which is equipped with OptiSpeed®.

EK.1.16. Model 60: Nordex N60

N60/1300 kW		N60/1300 kW	
Rotor		Yaw system	
Number of blades	3	Yaw bearing	Ball bearing
Rotor speed	12.8/19.2 rpm	Brake	Disc brake
Rotor diameter	60 m	Yaw drive	Three asynchronous motors with built-in brakes
Swept area	2,828 m ²	Speed	< 0.6 °/s
Power regulation	Stall	Control system	
Cut-in wind speed	Approx. 3–4 m/s	Type	PLC, Remote Field Controller (RFC)
Cut-out wind speed	25 m/s	Grid connection	Thyristor controlled
Rated power at	Approx. 15 m/s	Scope of monitoring	Remote monitoring of more than 300 different parameters, e. g. temperature sensors, hydraulic sensors, wind sensor set
Survival wind speed	70 m/s – IEC	Recording	Production data, event lists with filter function, long and short-term trends
Brake	Pivotable blade trips	Visualisation	Panel PC in control cabinet, web-based
Weight	Approx. 21,500 kg	Brakes	
Blades		Design	Two independent systems, fail-safe, various brake sequences, soft-braking function
Blade length	29 m	Aerodynamic	Pivotable blade tips
Material	GRP	Mechanical	Hydraulic disc brake
Weight	Approx. 5,000 kg	Tower	
Gearbox		Type	Modular steel tower, cylindrical, upper segment conical
Type	Combined 3-stage gearbox	Hub heights	Tubular tower 46 m, certificate IEC 1a, Tubular tower 60 m, certificate DIBt 3, IEC 1a Tubular tower 69 m, certificate DIBt 3
Gear ratio	50 Hz: 1 : 78.3 / 60 Hz: 1 : 94.4		
Weight	Approx. 10,900 kg		
Oil quantity	280 l		
Oil change	Semi-annual check, change as required		
Main shaft bearing	Cylindrical roller bearing		
Generator			
Power	250/1,300 kW		
Voltage	690 V		
Type	Asynchronous, 6/4 pole, liquid-cooled		
Speed	50 Hz: 1,000/1,500 rpm, 60 Hz: 1,200/1,800 rpm		
Insulation class	IP 54		
Weight	Approx. 5,500 kg		

POWERCURVE N60/1300 KW

Windspeed [m/s]	Power [kW]	Cp
4	29	0.262
5	73	0.337
6	131	0.350
7	241	0.404
8	376	0.424
9	536	0.424
10	704	0.406
11	871	0.378
12	1016	0.339
13	1124	0.295
14	1247	0.262
15	1301	0.223
16	1344	0.189
17	1364	0.160
18	1322	0.131
19	1319	0.111
20	1314	0.095
21	1312	0.082
22	1307	0.071
23	1299	0.062
24	1292	0.054
25	1292	0.048

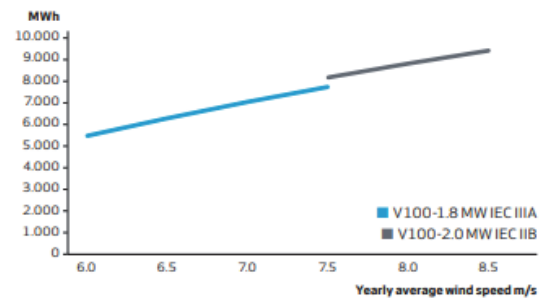
Rounded values based on measurements of DEWI (April 1999) and aerodynamical calculations

EK.1.17. Model 100/1: Vestas V100

POWER REGULATION	Pitch regulated with variable speed
OPERATING DATA	
Rated power	1,800/2,000 kW (50/60 Hz*)
Cut-in wind speed	3 m/s
Rated wind speed	12 m/s
Cut-out wind speed	20 m/s
Wind class	IEC S (IEC IIIA average wind/ IEC IIA extreme wind) IEC IIB (50/60 Hz)
Operating temperature range:	standard turbine: -20 °C to 40 °C low temperature turbine: -30 °C to 40 °C
* The rated power for V100 IEC IIIA 60 Hz is limited to 1950 kW in North America	
SOUND POWER	Max 105 dB*
(Mode 0, 10 m above ground, hub height 80 m, air density 1.225 kg/m³)	
* for further information on noise limits please contact Vestas	
ROTOR	
Rotor diameter	100 m
Swept area	7,854 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders
ELECTRICAL	
Frequency	50/60 Hz
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings
GEARBOX	
Type	two helical stages and one planetary stage
BLADE DIMENSIONS	
Length	49 m
Max. chord	3.9 m

TOWER	tubular steel tower
Type	
Hub heights	80 m, 95 m and 120 m (IEC IIIA)
NACELLE DIMENSIONS	
Height for transport	4 m
Height installed (incl. CoolerTop*)	5.4 m
Length	10.4 m
Width	3.5 m
HUB DIMENSIONS	
Max. transport height	3.4 m
Max. transport width	4 m
Max. transport length	4.2 m
Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes

TURBINE OPTIONS



Assumptions

One wind turbine, 100% availability, 0% losses, k factor =2,
Standard air density = 1.225, wind speed at hub height

EK.1.18. Model 112: Vestas V112

WIND CLASS	IEC IIA/IIIA	IEC S
POWER REGULATION	pitch regulated with variable speed	
OPERATING DATA		
Rated power	3,075 kW	3,000 kW
Cut-in wind speed	3 m/s	3 m/s
Rated wind speed	13 m/s	13 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s	25 m/s
Re cut-in wind speed	23 m/s	23 m/s
Operating temperature range:	-30° up to +40°*	
*subject to different temperature options		
SOUND POWER*		
(Mode 0, 10 m above ground, hub height 84 m, air density 1,225 kg/m³)		
3 m/s	94.5 dB	96.0 dB
4 m/s	97.3 dB	97.5 dB
5 m/s	100.9 dB	100.9 dB
6 m/s	104.3 dB	104.4 dB
7 m/s	106.5 dB	107.5 dB
8 m/s	106.5 dB	107.5 dB
*other sound reduced modes available		
ROTOR		
Rotor diameter	112 m	112 m
Swept area	9,852 m²	9,852 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders	
ELECTRICAL		
Frequency	50/60 Hz	50/60 Hz
Generator type	permanent magnet	permanent magnet
Converter	full scale	full scale

WIND CLASS	IEC IIA/IIIA	IEC S
GEARBOX		
Type	Multi stage (planetary + helical)	
TOWER		
Type	tubular steel tower	
Hub heights		
50hz:	84 m/94 m IEC IIA & 119 m/140 m IEC IIIA 94 m/119/140 m DIBt II & 94 m/119 m DIBt III	84 m
60 hz:	84 m/96 m IEC IIA & IIIA	84 m
BLADE DIMENSIONS		
Length	54.65 m	54.65 m
Max. chord	4 m	4 m
NACELLE DIMENSIONS		
Height for transport	3.4 m	3.4 m
Height installed (incl. CoolerTop*)	6.8 m	6.8 m
Length	12.8 m	12.8 m
Width	4.0 m	4.0 m
TOWER DIMENSIONS		
Max. section length	30 m	30 m
Max. diameter	4.5 m	4.2 m
HUB DIMENSIONS		
Max. transport height	3.74 m	3.74 m
Max. transport width	3.75 m	3.75 m
Max. transport length	5.42 m	5.42 m
Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes	70 metric tonnes
TURBINE OPTIONS		
OCAS*, smoke & heat detection, shadow detection, increased cut-in wind speed & aviation light.		

EK.1.19. Model 76: Bonus 2 MW

B76/2000 (Bonus)

Main data

Rated power: 2000 kW
Rotor diameter: 76 m
Old model
Offshore model: yes
Commissioning: 2002

Rotor

Number of blades: 3
Type: Stall
Swept area: 4536.5 m²
Power density: 2.27 m²/kW
Maximum speed: 17 rd/min
Manufacturer: LM Glasfiber, Bonus

Gearbox

Gearbox: yes
Stages: 3
Gear ratio: 89
Manufacturer: Flender

Generator

Type: ASYNC
Number: 1
Maximum speed: 1500 rd/min
Voltage: 690 V
Manufacturer: ABB

Tower

Minimum hub height: 60 m
Maximum hub height: 98 m

Weights

Nacelle: 65 t
Rotor + hub: 38 t
Tower: 162 t
Total: 265 t

Wind speeds

Cut-in wind speed: 3,5 m/s
Rated wind speed: 17,5 m/s
Cut-off wind speed: 25 m/s

EK.1.20. Model 100/2: Nordex N100-2500

Technical specifications	
Rotor	
Number of rotor blades	3
Rotor speed	9.6-14.9 rpm
Rotor diameter	100 m
Swept area	7,854 m ²
Power regulation	Pitch
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	20 m/s
Rated power from	13 m/s
Survival wind speed	52.5 m/s
Pitch regulation	Individual rotor blade pitch
Weight	C. 56,500 kg
Rotor blades	
Length	48.7 m
Material	GRP
Weight	C. 9,800 kg
Gearbox	
Type	Planetary/spur gear or differential gear box
Gear ratio	1:77.4 (50 Hz) / 1:92.9 (60 Hz)
Generator	
Power	2,500 kW
Voltage	660 V
Type	Double-fed asynchronous generator with partial frequency converter
Frequency	50 or 60 Hz
Yaw system	
Bearing	Ball bearing
Brake	Hydraulic disc brake
Drive	Asynchronous motors with integrated brakes
Speed	C. 0.4 °/s
Control system	
Type	PLC, Remote Field Controller (RFC)
Grid connection	Via IGBT converter
Scope of monitoring	Remote monitoring of over 300 different parameters, e.g. temperature, hydraulic pressure, pitch parameters, wind speed and direction
Recording	Production data, event lists with filter function, long and short-term trends
Visualisation	Panel PC in control cabinet and Web-based access possible from any PC, adapter for laptop at the bottom of tower or in nacelle
Brakes	
Primary	Rotor blade pitch
Secondary	Hydraulic disc brake
Tower	
Type	Modular tubular steel tower
Hub height	100 m, certificate DIBt 2, IEC 3s
	As of 02/2009, subject to change

EK.1.21. Model 90: Power Wind 90

Performance			
Rated power output	2,500 kW	Generator	Synchronous permanent magnet (air-cooled)
Cut-in wind speed	3 m/s	Nominal rotation	1,600 rpm
Rated wind speed	14 m/s	Enclosure class	IP 54
Cut-out wind speed	25 m/s	Converter	Full scale converter (water-cooled)
Rotor diameter	90 m	Tower	Steel tower
Rotor swept area	6,362 m ²	Hub height	80 m or 98 m
Rotor speed	4-15,5 rpm	Nacelle	Glass fibre reinforced plastic
Speed control	Individual electrical pitch	Blades	Glass fibre reinforced plastic
Aerodynamic breaking	Individual full span pitch	Control system	PowerWind
Operating temperature range	-20°C to +40°C (optional up to +45°C)	SCADA	PowerWind SCADA System
Power factor	0.9 ind. to 0.9 cap.	Grid connection	50 Hz or 60 Hz/690 V
Wind class	IEC 61400 IIA and DIBt WZ III		
Gearbox	Two planetary and one spur gear		
Gear ratio	1:103		
Mechanical brake	Disc brake on high speed shaft (hydraulic)		
Yaw drive	4 AC motor drives with planetary gear		
Yaw brake	Disc brake (hydraulic)		

Available from:
PowerWind Limited
Plot no.352-353
HSIIDC Industrial Area Bawal
Rewari,Haryana-123501
info@powerwind.co.in

EK.1.22. Model 107: *SWT-3.6-107*

Wind Turbine SWT-3.6-107

Technical specifications

Rotor

Type	3-bladed, horizontal axis
Position	Upwind
Diameter	107 m
Swept area	9,000 m ²
Speed range	5-13 rpm
Power regulation	Pitch regulation with variable speed
Rotor tilt	6 degrees

Blade

Type	B52
Blade Length	52 m
Tip chord	1.0 m
Root chord	4.20 m
Aerodynamic profile	NACA 63.xxx, FFAxxx
Material	GRE
Surface gloss	Semi-matt, <30 / ISO2813
Surface color	Light grey, RAL 7035
Blade manufacturer	Siemens Wind Power A/S

Aerodynamic Brake

Type	Full span pitching
Activation	Active, hydraulic

Tower

Type	Tapered tubular steel tower
Hub heights	80 m or site-specific
Corrosion protection	Painted
Surface gloss	Semi gloss, 30-50 / ISO 2813
Surface Color	Light grey, RAL 7035

Operational data

Cut-in wind speed	3-5 m/s
Nominal power at	13-14 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Maximum 2 s gust	55 m/s (standard version) 70 m/s (special version)

Generator

Type	Asynchronous
Nominal Power	3,600 kW
Synchronous speed	1,500 rpm
Voltage	690 V
Frequency	Variable
Protection	IP54
Cooling	Integrated heat exchanger
Insulation class	F
Generator designation	AMB 506L4A

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Koşar Onur
Doğum tarihi ve yeri : 12.12.1987
e-mail : onur.kosar@dpu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans:	Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Enerji Sistemleri Mühendisliği	2014
Lisans:	Süleyman Demirel Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2011
Lise:	Eskişehir Yunus Emre Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-...	Dumlupınar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2013-2014	Erciyes Üniversitesi (geçici görevlendirme)	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil İngilizce