

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**POPÜLASYON TEMELLİ SEZGİSEL ALGORİTMAYA
DAYANAN GENETİK ALGORİTMA İLE RÜZGAR
SANTRALİ TÜRBİN YERLEŞİMİ OPTİMİZASYONU VE BİR
UYGULAMA**

DOKTORA TEZİ

MELİKE SULTAN KARASU AŞNAZ

BALIKESİR, HAZİRAN - 2017

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



POPÜLASYON TEMELLİ SEZGİSEL ALGORİTMAYA
DAYANAN GENETİK ALGORİTMA İLE RÜZGAR
SANTRALİ TÜRBİN YERLEŞİMİ OPTİMİZASYONU VE BİR
UYGULAMA

DOKTORA TEZİ

MELİKE SULTAN KARASU AŞNAZ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Bedri YÜKSEL (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ

Doç. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

Yrd. Doç. Dr. İlker EREN

BALIKESİR, HAZİRAN - 2017


KABUL VE ONAY SAYFASI

Melike Sultan KARASU AŞNAZ tarafından hazırlanan “POPÜLASYON TEMELLİ SEZGİSEL ALGORİTMAYA DAYANAN GENETİK ALGORİTMA İLE RÜZGAR SANTRALİ TÜRBİN YERLEŞİMİ OPTİMİZASYONU VE BİR UYGULAMA” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12.06.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

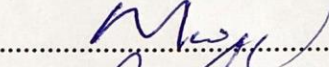
Jüri Üyeleri

İmza

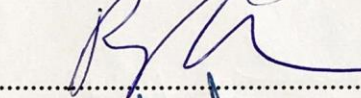
Danışman
Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

.....


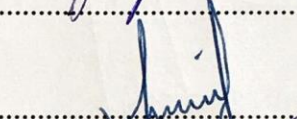
Üye
Prof. Dr. Ramazan KÖSE

.....


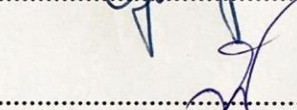
Üye
Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ

.....


Üye
Doç Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR

.....


Üye
Yrd. Doç. Dr. İlker EREN

.....


Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**POPÜLASYON TEMELLİ SEZGİSEL ALGORİTMAYA DAYANAN
GENETİK ALGORİTMA İLE RÜZGAR SANTRALİ TÜRBİN
YERLEŞİMİ OPTİMİZASYONU VE BİR UYGULAMA
DOKTORA TEZİ
MELİKE SULTAN KARASU AŞNAZ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL)
BALIKESİR, HAZİRAN - 2017**

Aralık 2015'te sonuçlanan Paris Antlaşmasına göre, 186 ülke evrensel bir iklim anlaşması imzalayarak, küresel ölçekte emisyon azaltımı konusunda yükümlülük almayı kabul etmişlerdir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı iklim hedeflerine ulaşmada öncü rol oynamaktadır. Çeşitli raporlara göre, yenilenebilir enerji arzının en önemli kaynaklarından birinin rüzgar enerjisi olacağı ve karbonizasyonu önlemede önemli bir rol oynayacağı belirtilmektedir. Yatırım maliyeti yüksek olan rüzgar enerjisi sektöründe, risk faktörlerini azaltmak ve beklenen güç üretimini sağlamak için birçok araştırma teşvik edilmektedir. Bunlardan biri de; konumlarından dolayı türbinler arasındaki aerodinamik etkileşim sonucu oluşan rüzgar hız kayıplarını en aza indirerek, toplam güç üretimini en üst düzeye çıkarma çalışmalarıdır. Çünkü; güç üretimi sadece rüzgar hızı ve kullanılacak türbinin özelliklerine değil, aynı zamanda türbinlerin santral içerisindeki yerleşimlerine de bağlı olduğu bilinmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı; Bandırma'da bulunan 89,7 MW kurulu güce sahip Bandırma Rüzgar Enerji Santrali'nde, mevcut 29 türbinin birbirleriyle olan etkileşimlerini en aza indirecek ve güç üretimini artırmayı sağlayacak optimal bir yerleşim planı sunmaktır. Problemin çözümü için hem sezgisel hem de meta-sezgisel yöntemler birleştirilerek hibrit bir yaklaşım önerilmiştir. Jeodezik ölçümlerin kullanılarak veri setinin oluşturulması ve güç hesaplamaları yapılırken 16 rüzgar sektörüne ait ortalama rüzgar hızları ile her yöne ait kapasite faktörlerinin kullanılması, rüzgar santrali yerleşim optimizasyonu probleminde ilk defa önerilmiştir. Santral düz bir arazi yapısına sahip olmadığından, yükseklik faktörü dikkate alınarak bir sezgisellik kurgulanmıştır. Buna göre, iki türbin arasındaki minimum mesafe korunurken; türbinler, rüzgar hızının en fazla olduğu sahanın yüksek noktalarına yerleştirilerek, güç üretimindeki artışları sağlanacaktır. Bu sezgisellikle oluşturulan çözüm kümeleri ile beslenen genetik algoritma, optimizasyon için kullanılmış, çeşitli parametreler değiştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sahanın optimal yerleşimi bulunmuştur. Sonuç olarak, önerilen optimal yerleşim ile alınan gerçek veriler karşılaştırılmış ve santralin yıllık enerji üretimi %0,43 artarken, wake sebepli güç kayıplarının %86,43 oranında azaldığı bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Mikro-konumlandırma, rüzgar santrali türbin yerleşimi optimizasyonu, sezgisel algoritmalar, meta-sezgisel algoritmalar, hibrid algoritma, açgözlü algoritmalar, genetik algoritmalar.

ABSTRACT

WIND FARM LAYOUT OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHMS SEEDED WITH POPULATION BASED HEURISTIC ALGORITHM

AND A CASE STUDY

PH.D THESIS

MELİKE SULTAN KARASU AŞNAZ

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. BEDRİ YÜKSEL)

BALIKESİR, JUNE 2017

According to the Paris Agreement, which concluded in December 2015, 186 countries signed a universal climate agreement and agreed to take the obligation to reduce emissions on a global scale. In this regard, the use of renewable energy sources plays a leading role in reaching climate targets. As stated in various reports, it is projected that one of the most important sources of renewable energy supply will be wind energy, and it will play an important role in preventing carbonization. Many researches are encouraged in order to reduce the risk factors of high cost wind energy investments, and to achieve the expected power production. One of them is to minimize the wake loss which is the resultant of aerodynamic interactions between the wind turbines, and so that to maximize the total power production. Because power production depend not only on the wind speed and the characteristics of the wind turbine but also on the location of the turbines in the wind farm.

The objective of this thesis is to present an optimal layout of Bandırma Windfarm that has an installed capacity of 89.7 MW in Bandırma, Turkey, by means of minimizing the interactions between the existing 29 turbines and increasing the power production. A hybrid approach has been proposed by combining both heuristic and meta-heuristic methods to solve the problem. Using geodesic measurements to generate the dataset of the windfarm, and considering the average wind speeds of 16 wind sector and corresponding capacity factors for power calculations are carried out for the first time in windfarm layout optimization problem. Since the windfarm is not a flat terrain, a heuristic approach has been set considering the height factor. Accordingly, turbines will be placed at the high points of the field where the wind speed is maximum, while keeping the minimum distance between two turbines, thus the power production of the wind farm will increase. The genetic algorithm seeded by the populations that are generated by heuristic method is used for optimization, many simulations are performed by changing various parameters, and optimal layout of the wind farm is found. As a result, the calculations of optimal layout is compared with the actual data of the wind farm, and it is found that with the optimal layout the annual power production of the plant is increased by 0.43%, while wake-induced power losses are decreased by 86.43%.

KEYWORDS: Micrositing, wind farm layout optimization, heuristic algorithms, meta-heuristic algorithms, hybrid algorithms, greedy algorithms, genetic algorithms.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | v |
| TABLO LİSTESİ | viii |
| SEMBOL LİSTESİ..... | ix |
| KISALTMALAR LİSTESİ..... | x |
| ÖNSÖZ..... | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 12 |
| 1.1 Tezin Araştırma Konusu | 15 |
| 1.2 Literatür Araştırması ve Önceki Çalışmalar | 18 |
| 1.3 Tezin Amacı | 26 |
| 2. RÜZGAR GÜCÜ ÜRETİMİNE GENEL BAKIŞ..... | 29 |
| 2.1 Rüzgar Enerjisi Temelleri | 29 |
| 2.1.1 Rüzgardan Sağlanan Enerji..... | 29 |
| 2.1.2 Rüzgar Türbininden Elde Edilen Enerji..... | 30 |
| 2.1.3 Aktüatör (Dönen) Disk Teorisi | 32 |
| 2.2 Rüzgar Dağılımı | 34 |
| 2.2.1 Weibull Dağılımı | 34 |
| 2.2.2 Rüzgar Sınıflandırması | 36 |
| 2.2.3 Rüzgar Kırılması..... | 37 |
| 2.3 Wake Etkisi Analizi..... | 39 |
| 2.3.1 Rüzgar Türbinleri ve Optimum Mesafe..... | 41 |
| 2.3.2 Jensen Analitik Yöntemi..... | 42 |
| 3. RÜZGAR TÜRBİNİ KONUMLANDIRMASINA GENEL BAKIŞ | 47 |
| 3.1 Rüzgar Sistemlerinin Konumlandırılması | 47 |
| 3.1.1 Coğrafi Alanın Saptanması | 47 |
| 3.1.2 Olası Bölgelerin Seçimi | 48 |
| 3.1.3 Olası Bölgelerin Ön Değerlendirilmesi | 49 |
| 3.1.4 Son Değerlendirme | 49 |
| 3.1.5 Mikro-konumlandırma (Micrositing) | 51 |
| 3.2 Kullanılan Ticari Yazılımlar..... | 52 |
| 4. PROBLEM TANIMI, VARSAYIMLAR VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI | 57 |
| 4.1 Problem Tanımı ve Varsayımlar | 57 |
| 4.2 Bandırma Rüzgar Santral Sahasının Analizi | 65 |
| 4.2.1 Sahanın Sayısal Modellemesi | 66 |
| 4.2.1.1 Koordinatlar Arası Mesafe Hesaplamaları..... | 68 |
| 4.3 Rüzgar Verilerinin Analizi | 71 |
| 4.4 Optimizasyon Algoritmaları | 81 |
| 4.4.1 Açgözlü Sezgisel Algoritma | 81 |
| 4.4.2 Genetik Algoritma | 82 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER | 93 |
| 5.1 Mevcut Yerleşim Düzeni..... | 93 |
| 5.2 Optimal Yerleşim Düzeni..... | 101 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2.1 | Algoritma Parametrelerinin Seçimi | 101 |
| 5.2.2 | Optimizasyon Sonucu | 105 |
| 5.3 | Gelecek Çalışma ve Öneriler | 114 |
| 6. | KAYNAKLAR..... | 116 |
| 7. | EKLER..... | 126 |
| EK A. | Yönlere Göre Mesafe Ölçümünün İspatı | 126 |
| EK B. | Aylara Göre Rüzgar Yön Değişimi | 127 |



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1: 2015 yıl sonu küresel elektrik üretiminde enerji kaynaklarının dağılımı..... | 12 |
| Şekil 1.2: 2015 yıl sonu küresel yenilenebilir enerji kaynakları güç kapasiteleri | 13 |
| Şekil 1.3: 2013-2015 yılları arası yenilenebilir enerji kaynaklarındaki kapasite artışları (GW) | 13 |
| Şekil 1.4: Yıllara göre küresel rüzgar enerjisi gücü kurulumu | 14 |
| Şekil 1.5: Yıllara göre Türkiye'deki toplam kurulu rüzgar gücü | 15 |
| Şekil 1.6: Yayın sayısı ve dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü | 16 |
| Şekil 1.7: 1995- 2016 yılları arası ülkelere göre rüzgar santrali ile ilgili en fazla araştırma yapan ülkeler ve Türkiye ile kıyaslama | 17 |
| Şekil 2.1: Rüzgar türbininde kontrol hacmi..... | 30 |
| Şekil 2.2: $V2/V1$ hız oranının fonksiyonu olarak rüzgar türbini verimliliği.... | 31 |
| Şekil 2.3: Rüzgar hızına karşılık gelen türbindeki teorik güç ile üretilen güç karşılaştırması..... | 32 |
| Şekil 2.4: Aktüatör Disk Modeli..... | 33 |
| Şekil 2.5: Şekil parametresi k değerinin değişiminin weibull dağılımı üzerine etkisi | 35 |
| Şekil 2.6: Ortalama rüzgar hızı değişiminin weibull dağılımı üzerine etkisi ... | 36 |
| Şekil 2.7: a) Güç kanunu ve b) log kanunu modelleri ile rüzgar profilleri..... | 38 |
| Şekil 2.8: Türbinlerin santral içindeki etkileşimi | 39 |
| Şekil 2.9: Hız profili ile yakın wake ve uzak wake bölgeleri arasında geçiş ... | 40 |
| Şekil 2.10: Türbin arkasında oluşan wake - Jensen model. $U_{\infty} = 10$ m/s, $z_0 = 0,075$ | 42 |
| Şekil 2.11: Wake modelin şematik gösterimi | 43 |
| Şekil 2.12: Eksenel indüksiyon (a)'ya göre maksimum thrust katsayısı (C_T) ile güç katsayısı (C_p) değerlerinin gösterimi | 44 |
| Şekil 2.13: Wake etkisi altında olmayan türbinin belirlenmesi..... | 45 |
| Şekil 2.14: Çoklu wake gösterimi..... | 46 |
| Şekil 3.1: Rüzgar atlası örneği..... | 48 |
| Şekil 3.2: Rüzgar türbinlerinin birbirini gölgelemesi ve wake türbülansının oluşumu | 50 |
| Şekil 3.3: WindFarmer programı ekran görüntüsü | 51 |
| Şekil 3.4: WindFarmer programı ekran görüntüsü – gürültü çizelgesi ve rapor..... | 52 |
| Şekil 4.1: a) Önceki çalışmalarda yapılan kesikli saha ile b) bu çalışmada yapılan sürekli saha gösterimi | 60 |
| Şekil 4.2: Bandırma RES saha sınırları içinde taranan 6323 noktanın gösterimi..... | 60 |
| Şekil 4.3: Santral sahasının kartezyen koordinat düzeninde gösterimi | 61 |
| Şekil 4.4: Ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda yatay rüzgar hız profili..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.5: a) Dikey düzlemde türbinler arası mesafe b) Yatayda türbinler arası mesafe | 62 |
| Şekil 4.6: Vestas V90-3.0 model türbinin güç ve kapasite faktörü eğrisi | 63 |
| Şekil 4.7: Bandırma Rüzgar Enerjisi Santrali ve çevresinin görünümü | 65 |
| Şekil 4.8: Bandırma RES saha sınırları ve mevcut türbin yerleşimi | 66 |
| Şekil 4.9: Sahanın üç boyutlu ızgara görünümü ve izohips çizgileri ile coğrafik yapısı | 67 |
| Şekil 4.10: Sahanın eşyükselti haritası | 67 |
| Şekil 4.11: Sahanın üç boyutlu yüzey görünümü | 68 |
| Şekil 4.12: P ve Q noktaları arasındaki merkez açısı $\Delta\sigma$ 'nın bir gösterimi..... | 69 |
| Şekil 4.13: Mesafe cinsinden ifade edilen sahanın eşyükselti haritası | 70 |
| Şekil 4.14: Mesafe cinsinden ifade edilen sahanın üç boyutlu yüzey haritası.. | 70 |
| Şekil 4.15: Mevcut santral düzeni ve saha sınırları | 71 |
| Şekil 4.16: Santral saha sınırları içindeki türbinler ve ölçüm istasyonu..... | 72 |
| Şekil 4.17: 80 metrede yön ve hız verileri zaman serisi | 74 |
| Şekil 4.18: Ölçüm İstasyonu ile RT28'den alınan veri setlerindeki eksikliklerinin karşılaştırması | 75 |
| Şekil 4.19: Ölçüm direği ile RT28 verileri sonucu oluşturulan rüzgar gülü karşılaştırması..... | 75 |
| Şekil 4.20: Ölçüm direği ile RT28 verilerinin karşılaştırması..... | 76 |
| Şekil 4.21: Sırasıyla ölçüm direği ile RT28'in rüzgar hızı dağılım grafikleri.. | 76 |
| Şekil 4.22: Yatay rüzgar hız değişimi grafiği | 77 |
| Şekil 4.23: Zaman serisi üzerinde eksik verilerin tamamlandığı anların gösterimi..... | 77 |
| Şekil 4.24: Rüzgar gülü ve saha sınırları içindeki mevcut yerleşim düzeni..... | 78 |
| Şekil 4.25: Aylık rüzgar hızı istatistiği | 78 |
| Şekil 4.26: Aylara göre rüzgar esme sıklığı ve yön değişimi | 79 |
| Şekil 4.27: Rüzgar Gülü | 79 |
| Şekil 4.28: Yönlere göre V90-3.0 model türbininin kapasite faktör (C_p) değerleri | 80 |
| Şekil 4.29: GA akış şeması..... | 84 |
| Şekil 4.30: Genetik algoritmalarda kullanılan terimler | 85 |
| Şekil 4.31: 6 kromozomdan oluşan bir popülasyon örneği ve uygunluk değerleri..... | 86 |
| Şekil 4.32: Verilen on kromozoma karşılık gelen uygunluk değerleri ve rulet tekeri gösterimi | 87 |
| Şekil 4.33: Rulet tekeri yöntemine göre popülasyon arasından seçilen anne ve baba bireyler..... | 88 |
| Şekil 4.34: Rulet tekeri yöntemine göre popülasyon arasından seçilen anne ve baba bireylerin saha içindeki yerleşim düzeni | 88 |
| Şekil 4.35: Anne ve baba bireylerin tek noktadan çaprazlama örneği a) başlangıç koordinatları ve rastgele seçilen çaprazlama noktası b) çaprazlama sonucu oluşan yavru | 89 |
| Şekil 4.36: Çaprazlama sonucu oluşan yeni yerleşim düzeni..... | 89 |
| Şekil 4.37: Çaprazlama sonucu türbinlerin nihai yerleşimi..... | 90 |
| Şekil 4.38: Mutasyon örneği; ilk olarak mutasyona uğratılacak rastgele nokta(lar) seçimi..... | 91 |
| Şekil 4.39: Mutasyona uğramış türbin noktalarının gösterimi | 91 |
| Şekil 5.1: Bandırma RES saha sınırları ve türbin yerleşim düzeni..... | 93 |
| Şekil 5.2: Mevcut rüzgar santral yerleşimi | 94 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 5.3: Türbinlerin aktif çalıştığı süreler ve rüzgar hızı aralığı..... | 95 |
| Şekil 5.4: Mevcut yerleşim düzeni | 97 |
| Şekil 5.5: Mevcut yerleşim düzeninde türbinlerin kayıpları ve ürettikleri güç | 98 |
| Şekil 5.6: Popülasyon sayısı ile uygunluk değeri arasındaki değişim | 102 |
| Şekil 5.7: Çaprazlama oranına karşı uygunluk değeri değişimi | 102 |
| Şekil 5.8: Değişen mutasyon oranları ve popülasyon sayısına göre uygunluk değerleri..... | 103 |
| Şekil 5.9: İterasyon sayısına karşı uygunluk değeri değişimi..... | 104 |
| Şekil 5.10: Her iterasyon sonucu uygunluk değerlerindeki değişim | 105 |
| Şekil 5.11: Optimize edilmiş santral yerleşimi..... | 106 |
| Şekil 5.12: Önerilen durumda türbinlerin güç üretimleri ile güç kayıpları | 106 |
| Şekil 5.13: Optimal saha yerleşim düzeni | 109 |
| Şekil 5.14: Mevcut yerleşim ve optimal yerleşimde türbinlerin konumlandırıldıkları yükseklikler | 112 |
| Şekil 5.15: Mevcut yerleşim ve optimal yerleşimde türbinlerin yükseklik ve güç karşılaştırması | 113 |
| Şekil A.1: Türbinler arası mesafe gösterimi | 126 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|-----|
| Tablo 2.1: 10. metre ve 50. metredeki rüzgar gücü yoğunluğu sınıfları | 36 |
| Tablo 2.2: Çeşitli arazi tipleri için pürüzlülük katsayıları (α) | 38 |
| Tablo 2.3: Çeşitli arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları (z_0) | 38 |
| Tablo 3.1: Rüzgar santrali tasarımı yapan ticari yazılımların karşılaştırılması | 56 |
| Tablo 4.1: Ölçüm istasyonu rüzgar verileri özet tablo | 73 |
| Tablo 4.2: Aylara göre rüzgar hızı ve yön verisi kayıpları | 73 |
| Tablo 4.3: Ölçüm direği ile RT28'in rüzgar hızı dağılım parametreleri karşılaştırması..... | 76 |
| Tablo 4.4: Sahanın yönlere göre rüzgar hızı ortalamaları ve kapasite faktörleri..... | 80 |
| Tablo 5.1: Mevcut santral düzeni içinde türbinlerin konumları ve ürettikleri güç..... | 96 |
| Tablo 5.2: Mevcut yerleşim düzeninde gerçek veriler ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması | 97 |
| Tablo 5.3: Mevcut yerleşim düzenine göre en fazla ve en az güç üreten türbinler | 98 |
| Tablo 5.4: Mevcut yerleşim düzenine göre yapılan hesaplamalar özeti | 99 |
| Tablo 5.5: Mevcut yerleşim düzeninde rüzgar sektörlerine göre 29 türbin üzerindeki wake kayıpları toplamları | 100 |
| Tablo 5.6: Optimum çözümü veren GA parametrelerinin özet tablosu | 105 |
| Tablo 5.7: Optimize edilmiş sahada türbinlerin konumları ve ürettikleri güç | 107 |
| Tablo 5.8: Optimal yerleşim düzeninde rüzgar sektörlerine göre 29 türbin üzerindeki wake kayıpları toplamı | 108 |
| Tablo 5.9: Optimal yerleşim düzenine göre en fazla ve en az güç üreten türbinler | 110 |
| Tablo 5.10: Optimal yerleşim düzenine göre yapılan hesaplamalar özeti | 110 |
| Tablo 5.11: Mevcut ve optimal yerleşim hesaplamaları | 111 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---------------------------|--|
| \dot{m} | : Eksen boyunca rüzgarın kütleli debisi (akı) (kg/s) |
| ρ | : Havanın yoğunluğu (kg/m ³) |
| A | : Eksenin kesit alanı (m ²) |
| \dot{W} | : Yatay eksenden gelen rüzgarın mevcut gücü (W) |
| P_0 | : Ortam basıncı (atm) |
| P_R | : Rotordaki statik basınç (atm) |
| ΔP | : Basınç farkı (atm) |
| $h(V_0)$ | : V_0 hızının Weibull olasılığı |
| k | : Weibull şekil parametresi |
| c | : Weibull ölçek parametresi (m/s) |
| V_0 | : Yıllık ortalama rüzgar hızı (m/s) |
| Γ | : Gama fonksiyonu |
| α | : Hellman sabiti, pürüzlülük katsayısı |
| v_1 | : h_1 yüksekliğindeki hız (m/s) |
| v_2 | : h_2 yüksekliğindeki hız (m/s) |
| C_p | : Rüzgar türbinin performans katsayısı |
| z_0 | : Yüzey pürüzlülük uzunluğu (m) |
| u_0 | : Ortalama rüzgar hızı (m/s) |
| a | : Eksenel indüksiyon faktörü |
| r_r | : Türbin rotor yarıçapı (m) |
| D | : Türbinin rotor çapı (m) |
| α | : Wake yayılım katsayısı, sürüklenme (entrainment) katsayısı |
| C_T | : Türbinin thrust katsayısı |
| u_{hub} | : Hub yüksekliğindeki hız (m/s) |
| vel_def_{ij} | : Türbin j'nin wake etkisi altında kalan türbin i'nin rüzgar hızındaki düşüş miktarı |
| $x_{i,j}$ | : Türbin i ile j arasındaki uzaklık (m) |
| θ | : Rüzgarın esme yönü (°) |
| z | : Türbinin hub yüksekliği (m) |
| u_i | : i. türbinin rüzgar hızı (m/s) |
| f_i | : i yönünden esen rüzgarın frekansı |
| $\overline{u_{o,i}}$ | : i yönünden esen hub yüksekliğindeki saatlik ortalama rüzgar hızı (m/s) |
| $P_j(\overline{u_{o,i}})$ | : j. türbinin $\overline{u_t}$ hızında ürettiği güç (W) |
| (ϕ_1, λ_1) | : Bir noktanın enlem ve boylamı (°,°) |
| $\Delta\sigma$ | : Merkezi açı |
| r | : Dünyanın ortalama yarıçapı (m) |
| d | : Enlem ve boylam değerleri bilinen iki nokta arasındaki yay uzunluğu |

KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-------------|---|
| AWEA | : Amerikan Rüzgar Enerji Birliği (The American Wind Energy Association) |
| EIA | : Enerji Bilgi İdaresi (Energy Information Administration) |
| GWEC | : Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (The Global Wind Energy Council) |
| SEM | : Seviyenlendirilmiş Enerji Maliyeti |
| CFD | : Hesaplama Akışkanlar Modelleri (Computational Fluid Dynamics) |
| LES | : Büyük Eddy Simülasyonları (Large-eddy Simulations) |
| WAsP | : The Wind Atlas Analysis and Application Program |
| RANS | : Reynolds-averaged Navier–Stokes |
| GSA | : Gradyen Arama Algoritması (Gradient Search Algorithm) |
| GHA | : Açgözlü Sezgisel Algoritma (Greedy Heuristic Algorithm) |
| GA | : Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) |
| SAA | : Tavlama Benzetimi Algoritması (Simulated Annealing Algorithm) |
| PSA | : Desen Arama Algoritma (Pattern Search Algorithm) |
| RT | : Rüzgar Türbini |
| RES | : Rüzgar Enerji Santrali |

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana inanan ve danışmanlığımı yürüten sayın tez hocam Prof. Dr. Bedri Yüksel'e sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Ayrıca;

Her daim sorularıyla kendisini rahatsız etmeme müsaade eden ve tezim boyunca beni bir an olsun yalnız bırakmayan sevgili hocam Yrd. Doç. Dr. Kadriye Ergün'e,

Fikirleriyle tezin ilerlemesine katkı sağlayan sayın jüri üyelerim Prof. Dr. Ramazan Köse ve Yrd. Doç. Dr. İlker Eren'e,

Kodların tamamlanmasında çok önemli bir paya sahip Dr. İbrahim Küçükkoç'a,

Hiç bekletmeden tüm sorularımı hemen cevaplayan University of Alcalá öğretim üyesi Prof. Dr. Sancho Salcedo Sanz'a,

Ne zaman yardıma ihtiyacım olsa beni hiç yüzüstü bırakmayan sayın Prof. Dr. Ali Oral'a,

Verilerin sağlanmasında yardımcı olan Borusan EnBW yetkililerine ve özellikle Dr. Emre Ö. Orhan'a,

Tez aşamasında ruhsal ve fiziksel dengemi kurmamda elinden geleni yapan sevgili doktorum Dr. M. Hülya Atbaş'a

...

Hepinize sonsuz teşekkür ve minnet borçluyum.

Ve tabi ki hayatımın yapı taşları annem, babam ve eşim.. Her zaman beni destekleyen ve inanan. İyi ki varsınız.

Bu tez, TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs programı tarafından desteklenmiştir.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun üstel büyümesi düzeltilemeyen çevresel hasarla birlikte doğal kaynakların tükenmesine yol açmaktadır. Daha sürdürülebilir bir gelecek için çözüm önerilerinden bir tanesi yenilenebilir enerji teknolojisi ile elektriğin sağlanmasıdır.

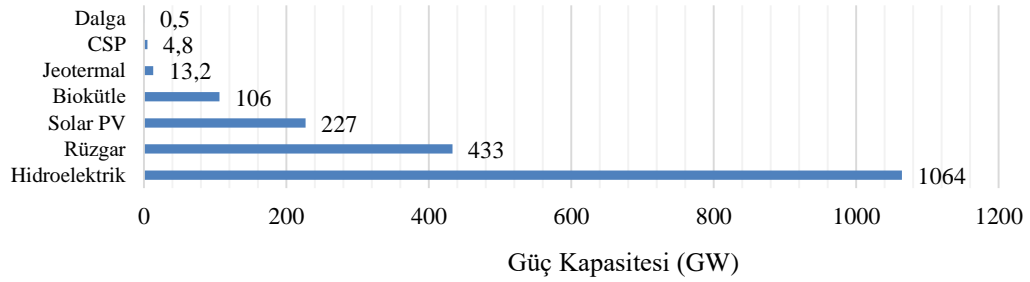
Bazı ülkeler, enerji arzının %100'ünü yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamayı hedeflemektedir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi İdaresi (EIA), 2015 yılında küresel elektrik üretiminin %23,7'sinin yenilenebilir enerji kaynaklardan sağlandığını ve bunun dörtte üçünün hidroelektrik kaynaklı olduğunu tahmin etmektedir. Şekil 1.1, 2015 yılsonu küresel elektrik üretiminde enerji kaynaklarının dağılımını göstermektedir. EIA'nın yakın dönem projeksiyonlarına göre, önümüzdeki yıllarda rüzgar ve güneş enerjisi kullanımı hızla büyüyeceğinden ve yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar dünya elektriğinin %29'unu karşılayacağından bahsetmekte ve bunların sadece yarısının hidroelektrik kaynaklı olacağını öngörmektedir [1].



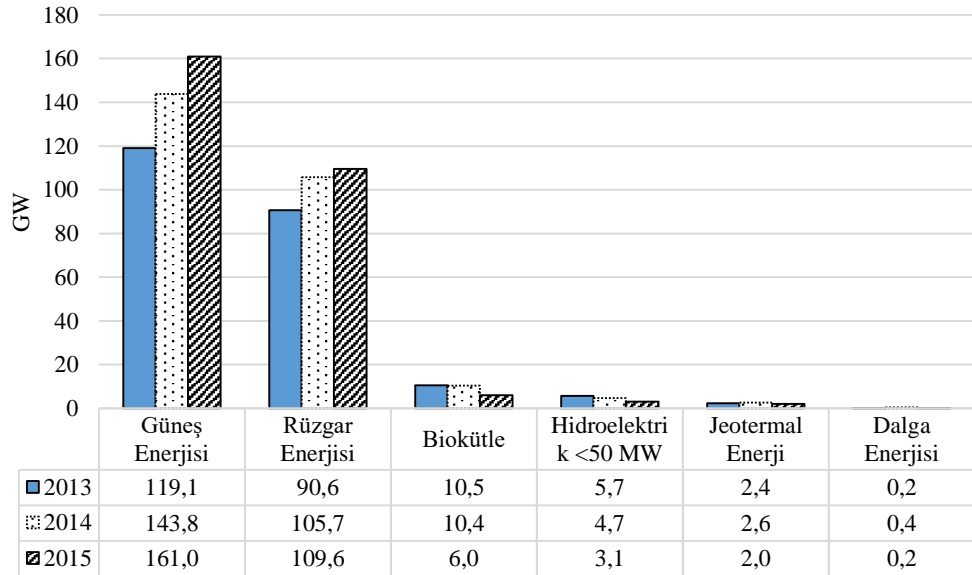
Şekil 1.1: 2015 yıl sonu küresel elektrik üretiminde enerji kaynaklarının dağılımı

Günümüzde, fosil yakıt tabanlı enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükeneceğinin anlaşılması nedeniyle rüzgar enerjisi, sürdürülebilir elektrik tedarikini sağlaması açısından büyük ilgi görmektedir. Rüzgar santralleri projeleri hem inşaat hem de bakım açısından yüksek miktarda yatırım gerektiren projelerdir. 2015 Aralık ayında 186 ülke, Paris Anlaşması ile evrensel bir iklim anlaşması imzalamışlardır. 1997

Kyoto Protokolü'nden bu zamana kadar küresel ölçekte bir anlaşma sağlayamayan dünya devletleri, bu anlaşma ile emisyon azaltımı konusunda yükümlülük almayı kabul etmiştir. Sanayi devriminden bugüne kadar 1° C'ye ulaşan yerkürenin sıcaklık artışının 2° C'nin altında ve hatta uygulanabilirse 1,5° C seviyelerinde tutulmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı iklim hedeflerine ulaşmada öncü rol oynayacaktır. Şekil 1.2, 2015 yıl sonu itibariyle yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen güç kapasitelerini göstermektedir ve Renewables 2016 [2] raporundan alınan verilerle oluşturulmuştur. Şekil 1.3 ise yine aynı rapordaki verilerden oluşturulmuş olup, yıllara göre dünyadaki yenilenebilir enerji kaynakları ile yapılan yatırımları güç açısından ifade etmektedir.



Şekil 1.2: 2015 yıl sonu küresel yenilenebilir enerji kaynakları güç kapasiteleri

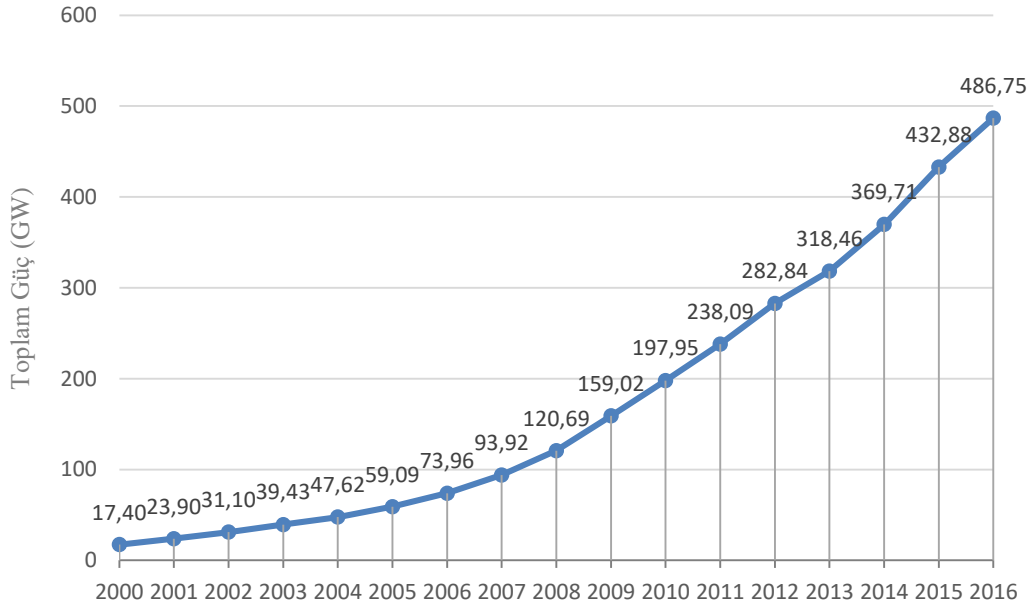


Şekil 1.3: 2013-2015 yılları arası yenilenebilir enerji kaynaklarındaki kapasite artışları (GW)

80 ülkede 1500'ü aşkın kurum ve kuruluşun üye olduğu Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (GWEC) tarafından hazırlanan ve Nisan 2016'da yayınlanan Küresel

Rüzgar Raporu 2015 [3]'e göre, yenilenebilir enerji arzının ana kaynağının rüzgar enerjisi olacağı ve karbonizasyonu önlemede önemli bir rol oynayacağı belirtilmektedir. GWEC, rüzgar santrallerinin önümüzdeki beş yıl içinde neredeyse iki katına çıkabileceğini düşünmektedir.

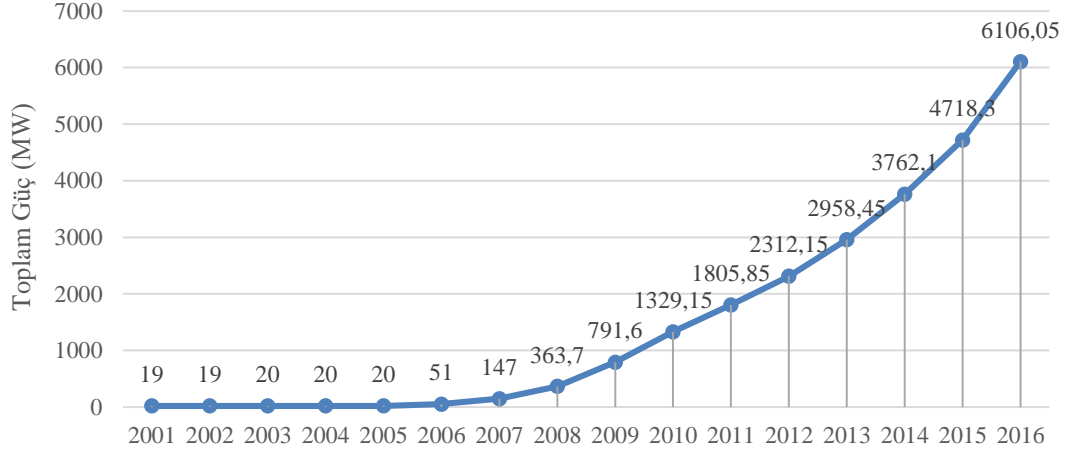
Aynı kuruluş tarafından Şubat 2017'de yayımlanan küresel rüzgar istatistiği raporu [4] verileri doğrultusunda Şekil 1.4 oluşturulmuştur ve yıllara göre dünya üzerindeki kurulan rüzgar enerjisi kapasitesini göstermektedir. 2016 yılı sonunda yeni küresel rüzgar gücü toplamı 486,75 GW'a ulaşmıştır. Bu oranın yüksek olmasındaki en büyük etken ise 2015 yılı içinde 30 GW yeni rüzgar santrali kuran Çin'in, 2016 yılında 23,3 GW'lık yeni kapasite eklemesi ve toplamda 168,69 GW'lık rüzgar enerjisi kurulumuna sahip olmasıdır.



Şekil 1.4: Yıllara göre küresel rüzgar enerjisi gücü kurulumu

Türkiye, ilk rüzgar enerjisi santralini 1998'de Alaçatı Germiyan Köyü'nde 1,5 MW (3x500kW) kurulu güç ile yaklaşık 1700 konutun elektriğini sağlayarak rüzgar sektörüne giriş yapmıştır. O günden 2016 yıl sonuna kadar Türkiye, 152 rüzgar santrali ile toplam kapasitesini 6106,05 MW'a kadar artırmıştır. Türkiye'nin kurulu gücü 2000 yılından bu yana hep yükselen bir trend içinde olup, ilk defa 2016 yılında 1 GW'ın üzerinde bir büyüme göstermiştir. Türkiye'nin, Avrupa rüzgar pazarında ve küresel anlamda önde gelen liderlerden biri olduğu [3]'te bildirilmiştir. 2015 yılında yeni kurulan toplam kapasitelerin ülkeler bazında karşılaştırılmasında, Türkiye

%1.5'lik bir pay ile onuncu sırada yer alırken; 2016 yılı içinde Türkiye'nin dünya payındaki yeni sıralaması %2.5 ile yedinci sıraya yükselmiştir [4]. Şekil 1.5, Türkiye Rüzgar Enerji Birliği'nin yayınladığı İstatistik Raporu 2017 [5] verilerinden oluşturulmuştur.



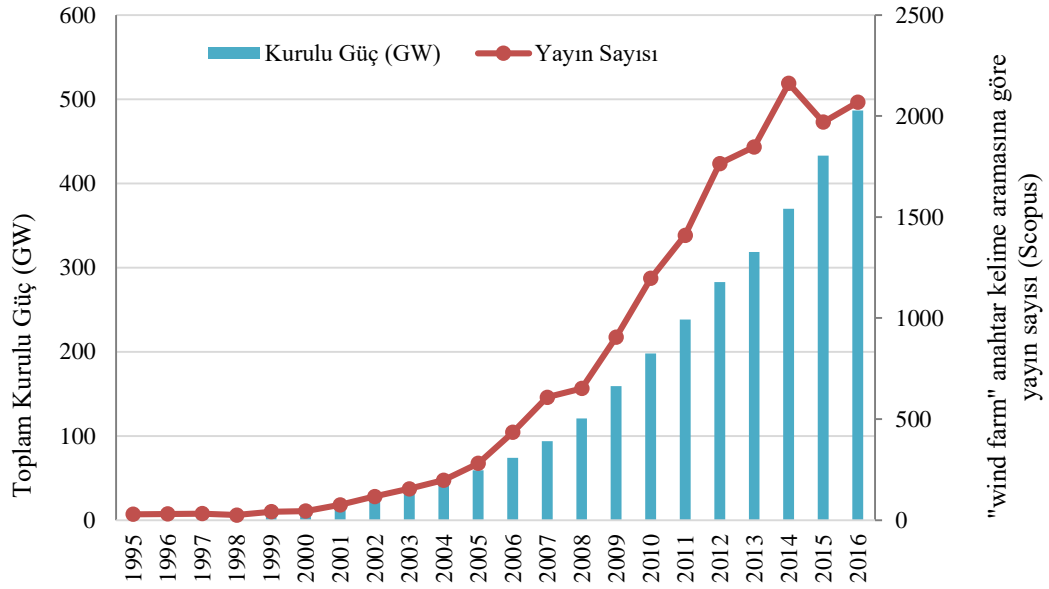
Şekil 1.5: Yıllara göre Türkiye'deki toplam kurulu rüzgar gücü

Küresel ısınma nedeniyle devletler, yenilenebilir enerji kullanımına yönelik yatırımların artırılmasını teşvik etmektedirler. Yatırımcıların, yüksek maliyetler karşısında risklerini düşürmek ve rüzgar gücü kullanımını artırmaya yönelmeleri adına, rüzgarla ilgili mekanik, aerodinamik, elektronik, yöneylem ve çevresel etmenler gibi konularda araştırma yapmaları teşvik edilmektedir. Bazı pragmatik ve trend araştırma konuları; türbin verimliliklerinin artırılması, kanat profilleri ve yeni tasarım çalışmaları, yeni malzeme arayışları, rüzgar hızlarının doğru tahminlenmesi, otomasyon, çevresel etmenler, elektriksel bileşenler ve kayıplar olarak sayılabilir. Yapılan birçok araştırmanın ortak amacı, bu tür eşgüdümlü kontrolörlerin etkin tasarımı ve analizini yaparak ekonomik performans ve güç çıktılarını iyileştirmektir.

1.1 Tezin Araştırma Konusu

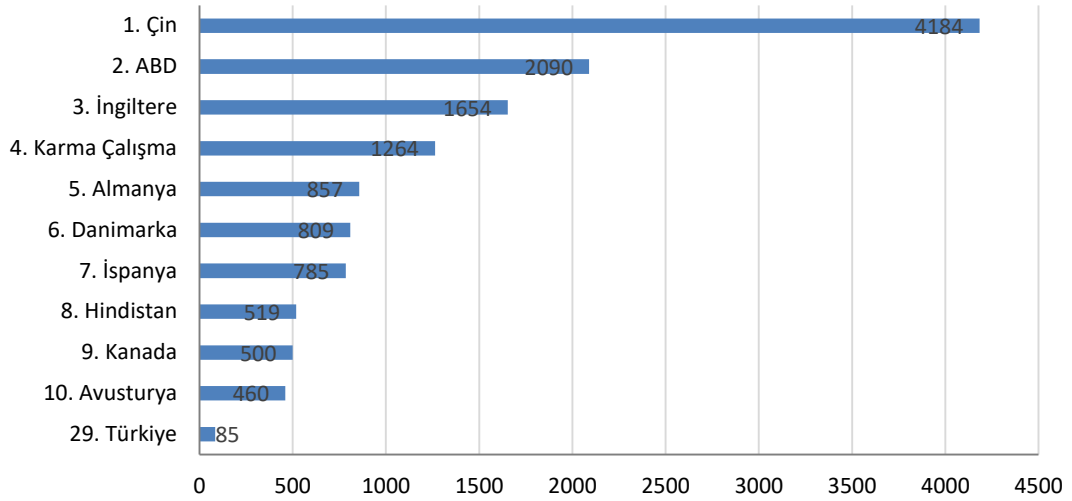
Rüzgar enerjisinin, sürdürülebilir enerji arzını karşılamakta önemli bir rol oynayacağı yolundaki söylemlere rağmen hala bu alanda teknolojik problemlerinin çözülmesine ihtiyaç vardır.

1995-2016 yılları arasında “rüzgar santralleri” anahtar sözcüğü ile Scopus’tan alınan arama verilerine dayanarak ulaşılan yayın sayısı grafiği ile aynı yıllar arasındaki dünyadaki toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü grafiğinde benzer bir büyüme eğilimi Şekil 1.6’da görülmektedir.



Şekil 1.6: Yayın sayısı ve dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü

1995-2016 yılları içerisinde rüzgar santrali konusunda ülkelere göre en fazla araştırma yapan ülke 4184 yayınla Çin iken, Türkiye ise 85 yayınla 29. sıradadır. Şekil 1.7 ülkelere göre 1995-2016 yılları arası yayın dağılımı göstermektedir.



Şekil 1.7: 1995- 2016 yılları arası ülkelere göre rüzgar santrali ile ilgili en fazla araştırma yapan ülkeler ve Türkiye ile kıyaslama

Son yıllarda, rüzgar enerjisi ve kontrol topluluğunda, rüzgar santralleri için doğru ve güvenilir modeller bulma konusunda artan bir ilgi söz konusudur. Bunun iki nedeni vardır; birincisi türbinin mekanik dayanımını korumak için kanatlardaki yükleri azaltmak ve ikincisi ise üretilen elektrik enerjisinin kalitesini artırmak için toplam enerji üretimini optimize etmek. Özellikle, akademik camiadan ilgi gören konu, türbinler arasındaki aerodinamik etkileşim sonucu rüzgar hız kayıplarını en aza indirerek toplam güç üretimini en üst düzeye çıkarma çalışmalarıdır [6]. Kurulum ve bakım nedeniyle yüksek giderlere sebep olan rüzgar santrallerinde türbin yerleşim optimizasyonu bu sebeple önem taşımaktadır [7]. Santraldeki türbinlerin birbiri ile etkileşimini yani; wake etkisini en aza indirerek, türbinlerin maksimum gücü üretmelerini sağlayan yerleşim düzeni oluşturmak üzerinde çalışma yapılması gereken önemli konulardan birisidir. Çünkü, bir rüzgar santralindeki yerleşim düzeninin toplam gücü artırma ve türbinler üzerinde yapısal yükleri azaltma potansiyeli vardır.

Yerleşim problemi optimizasyonu çalışmalarında klasik metodoloji iki aşamadan oluşur: ilki; amaç hedef fonksiyonun tanımlamak daha sonra da optimizasyon stratejisinin seçimidir. Kısaca, bir rüzgar santralinin yerleşim optimizasyonu, "*belirlenen amaç fonksiyon değerini en iyileyen rüzgar türbinlerinin yerlerini bulmak*" işlemi olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile amaç, belirli bir sayıda türbinin önceden belirlenmiş karada veya açık denizde belirlenen bir sahaya

yerleştirilmesine dayalı, kârı en üst düzeye çıkarmayı sağlayan bir yerleşim düzeni belirlemektir [8].

1.2 Literatür Araştırması ve Önceki Çalışmalar

Rüzgar santrali yerleşim problemindeki değişkenlerin hem sürekli hem de kesikli olması sebebiyle bu problem karışık tamsayılı problem türüne girmektedir ve analitik modellerle tam olarak ifade edilememektedir. Bu yüzden bu problem, klasik optimizasyon yöntemleri ile çözülememektedir. Çoğu yazar bu problemi sezgisel, meta-sezgisel, hiper sezgisel ya da hibrit meta-sezgisel optimizasyon teknikleri ile çözme yoluna başvurmuştur.

Yapılan araştırmalarda genel olarak iki yaklaşım izlenmiştir. İlk yaklaşım, basit emsal sahalara uygulanan yer belirleme algoritmalarının geliştirilmesine odaklanmaktadır [9–24]. TopFarm [17] veya OWFLO [18] gibi çalışmalarda yapılan ikinci yaklaşım ise, aerodinamik modellemenin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmalar, mevcut rüzgar santrallerinde yapılan ölçümlerle modellerini doğrulamaktadır. Dolayısıyla, yaklaşımlar arasındaki fark, amaç fonksiyonunun karmaşıklığı, minimize edilecek kısıtların formülasyonu ile aerodinamik ve ekonomik modellerin daha kapsamlı olmalarıdır.

Rüzgar santrali yerleşim optimizasyonu problemi ilk olarak 1994 yılında Mosetti vd. [9] tarafından ortaya atılmıştır. Çalışmanın temel amacını, maliyetlerin doğrusal bir kombinasyonu olarak tanımlamıştır. Enerji üretimi ile kurulum maliyetleri arasında öncelik katsayıları kurgulayarak her ikisinin toplamını bir amaç fonksiyonda birleştirmiştir. Wake etkisini Jensen'ın analitik modeli ile hesaplamış, türbinlerin birbirinden uzaklığını minimum 5 rotor çapı (5D) olacak şekilde kabul etmiş ve optimizasyon tekniği olarak genetik algoritma kullanılmıştır. 50Dx50D boyutlu kare şeklindeki engebesiz bir santral sahasını, 5D boyutlu yüz adet karelere bölmüştür. Böylece her bir türbin sadece küçük karelerin ortalarına yerleştirilebilecek şekilde en fazla yüz türbin yerleşim noktası oluşturmuştur. Rüzgar hızına ve yönüne bağlı olarak problemi üç farklı senaryo için kurgulamıştır. Bunlar; (a) sabit rüzgar hızı ve yönü, (b) değişken rüzgar yönü fakat sürekli rüzgar hızı ile (c) değişken rüzgar hızı ve yönü şeklindedir.

Birçok araştırmacı daha sonra farklı çözümlerle aynı problemi incelemiştir.

Grady vd. [10] Mosetti vd.'nin kurgulamış olduğu problemi aynı yöntemlerle yeniden çalışmışlardır. Çözüm algoritmasının, popölasyonun yeterli gelişmesine izin vermemesi yüzünden Mosetti'nin öne sürdüğu sonuçların uygun olmadığını göstermişlerdir. Marmidis vd. [13] da aynı problem üzerine çalışmışlardır. Fakat Marmidis bu çalışmasında, sadece sabit rüzgar hızı ve yönündeki en basit rüzgar senaryosunu incelemişlerdir. Monte Carlo Simölasyonu yöntemi kullanarak rüzgar türbini yerleştirme problemine farklı bir bakış açısı getirmişlerdir. Wan vd. [19] daha önceki çalışmalardan farklı olarak genetik algoritmada 0-1 tabanlı gen kodları kullanılırken, bu çalışmada gerçek koordinatlar kullanılarak çözülmüş ve daha gerçekçi çözüm ile sonuçlandırıldığını tartışmışlardır. Daha sonra aynı problemi Wang vd. [20] genetik algoritma yaklaşımı ile doğrusal olmayan wake etkisi fonksiyonu ile çalışmışlardır. Bu yaklaşımının geleneksel tek boyutlu yaklaşımdan daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Mittal [12] master tez çalışmasında, birim güç başına maliyeti en aza indirmeyi amaçlayarak aynı probleme çözüm sunmuştur. Beyer vd. [21] ise üç farklı rüzgar santrali tasarımı için uzman tahmin konfigürasyonları kullanarak en uygun çözümlerini bildirmişlerdir. Bu uzman tahminler, bir rüzgar türbininin ortalama mekansal yoğunluğu (3D veya 4D boyutlu kare başına bir rüzgar türbini) değerlerine dayanıyordu. Analizlerinde tek bir rüzgar hızı kullanılmış olup, ortaya sundukları hipotezlerini doğrulamışlardır. Li ve Wang [22], genetik algoritma yaklaşımı içinde eşkenar üçgen ađ örme yöntemi ile probleme yeni bir yaklaşım sundular. Böylece türbinlerin, karelerin ortasına yerleştirmek yerine eşkenar üçgenlerin ağrılık merkezlerine yerleştirilmesi sağlanmıştır. Çözüm kümesi genişletilmiş olduğundan santral sahasına daha fazla türbin yerleştirmiş ve güç üretimini artırmayı sağlamışlardır.

Bilbao ve Alba [16] çalışmalarında benzetilmiş tavlama algoritması kullanırken, aynı yazarların ikinci çalışmalarında [23], yıllık kârı maksimize etmek için geometrik parçacık sürüsü optimizasyonunu ve genetik algoritmanın bir varyasyonu olan CHC'yi kullanmışlardır. Çok ebeveynli çaprazlama, bu algoritmadaki en yenilikçi yaklaşım olarak sunulmuştur. Her iki algoritma Mosetti vd.'nin sunduğu üç test durumu için değerlendirilmiştir. Güç hesaplamaları her iki algoritma için benzer yerleşim düzenlerini verirken; maliyet hesaplamalarında farklı yerleşim düzenlerinin

oluşmasına dikkat çekmişlerdir. Rasuo ve Bengin [24], diferansiyel evrim adı verilen farklı bir genetik algoritma türü denemişlerdir. Santral sahasını karelere bölerek türbinleri her bir karenin merkezine yerleştirmek yerine, santral sahasını sürekli olacak şekilde modelleyerek türbinlerin serbetçe yerleştirilmelerini önermiştir. Bu sayede, daha fazla enerji üretmeyi ve wake kayıplarını azaltmayı başarmışlardır. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın uygunluğunu göstermiştir. DuPont ve Cagan [25], Mosetti probleminde lokal optimumdan kaçınmak için stokastik özellikler ekleyerek genişletilmiş desen arama algoritması yaklaşımı önermişlerdir. Santral sahasının tümünü çözüm kümesi olarak değerlendirmiş ve sahayı karelere bölmemişlerdir. Bu yaklaşım ile daha yüksek verim ve daha yüksek güç kapasitesine sahip yerleşim planlarının oluşturulmasının mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Öztürk ve Norman [26], Mosetti vd. tarafından önerilen maliyet modelini kullanmışlardır, ancak bu çalışmada amaç fonksiyonu kârın maksimizasyonu olmuştur. Yazarlar, başlangıçta bir dizi basit durumu optimize etmek için doğrusal olmayan programlama yöntemleri önermişlerdir. Fakat, bu metodolojilerin daha gerçekçi enerji projeleri söz konusu olduğunda bu yöntemin kullanılmasının uygun olmadığını belirtmiş ve dolayısıyla ikinci bir örnekte sezgisel optimizasyon tekniği ile çözüm önermişlerdir. Açgözlü algoritma yaklaşımı ile farklı senaryoları test etmişler ve yaklaşımlarının başarılı olduğunu rapor etmişlerdir. Changshui vd. [27] de aynı algoritmayı kullanarak her iterasyonda en iyi konuma yeni bir türbini yerleştirerek optimal türbin sayısına ve yerleşimine ulaşmıştır. Bu şekilde problemin yerel optimum çözümünü hızlıca elde etmek mümkün olmuştur. Mosetti problemine çözüm öneren önceki araştırmalar ile karşılaştırıldığında bu yöntem, karşılaştırılan her üç durum için de hem maliyet hem de toplam güç bakımından daha iyi bir çözüm sunmuştur.

Gonzales vd. [28], yolların ve kulelerin maliyetlerini, elektrik fiyatlarının gelecekteki artışı gibi riskleri de dahil ederek problemi genetik algoritma ve evrimsel algoritmalarla değerlendirmişlerdir. Ardından 2011 yılındaki makalesi ile Gonzales vd. [29] farklı türbin tiplerinin kullanılması ve gelecekte oluşacak riskleri de kapsayan yatırım projelerinin kârını maksimize etme amacıyla, rüzgar santrallerinin geniş kapsamlı tasarım optimizasyonunu evrimsel algoritmalarla incelenmiştir.

Gerçek bir saha çalışmasını Şişbot vd. [30], Gökçeada rüzgar santrali örneğinde çok amaçlı genetik algoritma kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sabit rüzgar

hızı ve tek rüzgar yönü dikkate alınmıştır; yıllık enerji üretimini maksimize ederek maliyetleri minimize etmek temel kriterlerdir. Santral sahasının şekli ve büyüklüğü dikkate alınarak, rüzgar türbin tipi seçimi, türbin sayısı ve türbinlerin yerleştirilmeleri işlemlerini bir arada dikkate alan kombinatoriyel optimizasyon uygulaması Mustakerov ve Borissova [31] tarafından 24 türbin modeli üzerinde geliştirilmiştir. Rahmani vd. [32], rüzgar santrali türbin yerleşim optimizasyon problemi için ilk kez parçacık sürü algoritmasını öneren çalışmayı yapmışlardır. Üretilen enerjinin birim maliyetinin en aza indirildiği tek bir amaç fonksiyonu optimize edilmiştir. Bulunan sonuçlar, Mosetti vd. [9]'nin, Grady vd. [10]'nin ve Marmidis vd. [13]'nin eserleriyle karşılaştırılmıştır.

Kusiak ve Song [33], rüzgar santrali yerleşim optimizasyonu için santral sahasını 250D çaplı dairesel bir alan olarak tasarlamış ve sürekli bir değişken olarak kabul etmiştir. Model, rüzgar türbini konumlarını ve rüzgar yönlerini temel alarak wake kayıplarını en aza indirmek üzerine kurgulanmıştır. Türbin yerleşimi tasarımı, kısıtlı bir optimizasyon problemi olduğu için problemin var olan kısıtlarını ikinci bir amaç fonksiyonuna dönüştürmüştür. Beklenen enerji çıktısını maksimize eden dönüştürülmüş iki kriterli optimizasyon problemini çözmek içinse pareto evrim algoritması geliştirmişlerdir. Bu makalede, değişen rüzgar yönleri, rüzgar hızları ve weibull parametreleri ile iki rüzgar senaryosu modeli kurgulanmış ve algoritmayı test etmek için bu senaryoları kullanılmışlardır. Eroğlu master tezinde [34], Kusiak ve Song [33]'ün makalelerinde ele alınan problemi yeniden kurgulamış, metod olarak ise karınca kolonisi optimizasyonu ve parçacık süzgeci yöntemini kullanmıştır. Kusiak ve Song'un algoritması, kabul edilen 250D çaplı rüzgar santralinde yalnızca altı türbini bulabilirken, önerilen karınca algoritması aynı lokasyonda sekiz türbin yerleştirebilmiştir. Sonuç olarak yazar, rüzgar santrali yerleşim problemi için karınca kolonisi algoritmasının makul bir çözüm süresi içinde yerel maksimuma takılmadan daha iyi sonuçlar verdiğini rapor etmiştir. Aynı problemi modelleyen Bansal vd. [35] ise, sadece adalar arasında türlerin göçünden esinlenilerek biyocoğrafya tabanlı optimizasyon adı verilen yeni bir evrimsel ve nüfus tabanlı optimizasyon tekniğini sunmuşlardır. Göç ve mutasyon bu yaklaşımdaki kilit parametrelerdir. Türbinler arası etkileşimi en aza indirerek hız kayıplarını en aza indirmek ve böylece enerji üretimini maksimize etmek bu çalışmanın amaç fonksiyonudur.

Saavedra vd. [36] yaptığı çalışmada rüzgar güllerinden Monte Carlo simülasyonları ile bir rüzgar rejimi oluşturmuş ve hibrit yaklaşımla türbinlerin saha içindeki optimal yerleşimini sunmuşlardır. Önce açgözlü algoritma ile ilk çözümü bulmuş ve ardından evrimsel algoritma ile yerleşimi optimize etmiştir. Çalışmada en dikkat çeken husus, santral sahasının gerçek olarak modellenmesi ve diğer çalışmalarda olduğu gibi kare, dikdörtgen ya da daire olarak kabul etmemesidir. Kwong vd. [37] türbin yerleşim optimizasyonu için arazinin kesikli yerine sürekli olarak modellemişler ve enerji maksimizasyonu olan amaç fonksiyonuna gürültü minimizasyonunu da dahil etmişlerdir. Mosetti vd.'nin sunmuş olduğu test durumlarını formülize ederek Jensen wake modeli ile genetik algoritma optimizasyonu çalışmışlardır. GA'nın çeşitli varyasyonları arasında Hakim Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II (*NSGA II - Non-Domination Sorting Genetic Algorithm II*) kullanılmıştır. Pareto sınırları tanımlayarak, enerji üretiminin ve gürültü faktörünün yatırımcı için göreceli önemini sayısallaştırmışlardır. Gürültü minimizasyonu ve enerji maksimizasyon hedefleri ayrı ayrı düşünüldüğünde, rüzgar santral yerleşiminin ve türbinlerin birbirleriyle olan yakınlıklarının farklı olduğunu bularak çalışmalarını tamamlamışlardır. Ayrıca Mittal vd. [38] de, enerji-gürültü dengesi üzerine çalışmışlar ve çok kriterli evrimsel algoritma ile tek kriterli gradyan arama algoritmasını birlikte kullanarak hibrit bir yaklaşım sunmuşlardır.

Birçok araştırmacı rüzgar santrallerinin tasarlanmasında aynı hub yüksekliğinde ve aynı kapasite özelliklerine sahip tek tip türbin ele alırken, Mora vd. [39] kârı optimize etmek için rüzgar santralinde sisteme alınacak türbin sayısı, türbin tipi ve yüksekliği, konumu, santrallerdeki trafo merkezleri sayısı ve konumları, trafo merkezleri ve mevcut iletim hatları arasındaki alçak gerilim ve yüksek gerilim hatlarının en iyi düzeni gibi parametreleri kullanmışlardır. Genetik algoritma ve evrimsel algoritmalar, çalışmanın çözüm prosedürü olarak belirlemişlerdir. Algoritmaların asıl amacı, yatırım maliyetini minimize etmek ve rüzgar kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması için türbin tipini ve konumlarını belirlemektir. Aynı şekilde Chen vd. [40], farklı hub yüksekliğinde türbinlerin genetik algoritma ile yerleştirmesini yapmışlardır. Sonuç olarak, rüzgar türbinlerinin toplam sayısı aynı olsa dahi, farklı hub yüksekliğinde rüzgar türbinleri kullanan santralde güç çıktısının arttığını göstermişlerdir. Analizlerinde farklı maliyet modelleri de hesaba katılmıştır ve sonuçlar farklı hub yüksekliğinde türbin kullanımının birim güç başına maliyeti

düşürebileceğini göstermiştir. Chowdhury vd. [41], rüzgar santralının en uygun tasarımı için optimum parçacık sürü optimizasyonu ve net güç üretimini en üst düzeye çıkarmak için optimum türbin seçimi üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada hem tek tip türbin hem de farklı rotor çaplarına sahip türbinlerin kullanımı ile iki senaryo kurgulayıp, rüzgar santral yerleşimini değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda; farklı rotor çaplarına sahip rüzgar türbinleri kurmanın, santral verimliliğini arttırdığını öne sürmüşlerdir. Türbin etkileşimi hesaplamaları için Fradsen wake modelini kullanılmışlardır.

Kallioras vd. [42], rüzgar santrallerindeki türbin yerleşim problemine müzik tabanlı bir meta-sezgisel algoritma olan armoni (uyum) arama algoritması ile çözüm aramıştır. Armoni arama algoritmasının esin kaynağı, Jazz gruplarındaki müzisyenlerin doğaçlama yapma prosedürleridir. Müzisyenler karar değişkenlerine karşılık gelirken, her enstrümanın ses yükseklik aralığı ise karar değişkenlerinin değer aralığına karşılık gelir. Müzik grubu tarafından üretilen müzikal uyum, belirli bir çözüm vektörüne karşılık gelirken, dinleyici tarafından kabul edilmek ve beğenilmek ise amaç fonksiyonunun değerine karşılık gelmektedir. Bu algorithmada kullanılan adımlar; armoni (uyum) hafızasının başlatılması, yeni armoninin doğaçlanması ve armoni hafızasını güncelleme şeklindedir. Bu çalışmada santral sahası, farklı yönlerdeki belirsiz rüzgar hızını tanımlayan ve iki boyutlu tek değişkenli homojen Gauss stokastik alanı olarak modellenmiştir. Rüzgar karakteristiği ise, civar havaalanının 10m ölçüm verileri kullanılarak her rüzgar esme yönü için toplam oniki stokastik alan belirlenerek çıkarılmıştır. İki farklı amaç fonksiyonu belirlenmiştir; ilki, belirli sayıdaki türbin sayısı ile santralden maksimum kâr elde etme iken, ikincisi ise önceden belirli enerji üretim miktarı için maksimum kâr elde etmedir. Kârın, en üst düzeye çıkarılması için rüzgar santralının verimliliğinin de en üst düzeye çıkarılması gerektiğini belirtmişler ve wake etkisinin en aza indiği optimal çözümleri sunmuşlardır.

Offshore (deniz üstü) ve onshore (karasal) rüzgar santrali yerleşim problemleri temelde aynı değişkenler ile ifade edilse de kısıtlar açısından farklılık, yöntemler açısından benzerlik göstermektedirler. Okyanus yüzeyi, karasal arazi yüzeyine göre pürüzsüz olup, bu da daha düşük bir sınır katmanının oluşmasına sebep olmaktadır. Böylece okyanuslarda, karaya göre daha düşük türbülans seviyeleri ile rüzgar kırılması (wind shear) gözlemlenir. Düşük rüzgar kırılması, rüzgar hızının yükseklik ile fazla

değişmediği anlamına gelir. Bunun faydası, alçak rakımlarda da yeterli rüzgar hızının bulunması ve enerjiyi artırarak için yüksek kulelere ihtiyaç duyulmamasıdır. Fakat, düşük türbülans ortamının dezavantajı vardır. Türbülans seviyelerinin düşük olması, türbinlerin wake alanlarını genişletir ve iki türbin arasındaki minimum mesafenin karasal santrallere göre çok daha büyük olmasına sebep olur [43]. Offshore rüzgar santralleri yerleşimi üzerine yapılan çalışmaların bazıları aşağıda sunulmuştur.

Lackner ve Elkinton [44] yaptıkları çalışmada, amaç fonksiyonu olarak seviyenendirilmiş enerji maliyetini (SEM) belirlemişlerdir. SEM, belirli bir teknoloji için hayat boyu maliyetinin hayat boyu elektrik üretimine oranı olup %10'luk sermaye maliyeti ile belirli bir yıldaki değere getirilmiş halidir. Kullandıkları yöntemde enerji maliyetini, sadece türbin pozisyonuna bağlı bir fonksiyona dönüştürmüşlerdir. Bunu yapmak için; rüzgar hızı verilerini rüzgar yön sektörleri ile karakterize etmişler ve rüzgar yönü olasılık yoğunluk fonksiyonu ile türbin güç eğrisini sürekli fonksiyonlara dönüştürmüşlerdir. Weibull ölçek parametresini tanımlayan bu sürekli fonksiyon, diğer türbinlerden kaynaklı wake kayıplarını yansıtabilecek şekilde her türbin için ölçeklendirmiştir. Geliştirdikleri maliyet modelinin, çeşitli optimizasyon algoritmaları ile kullanımında, türbin yerleştirme problemlerinde SEM'in amaç fonksiyonu olarak belirlenebileceği sonucuna varmışlardır.

Elkinton [43] doktora çalışmasında offshore rüzgar çiftlikleri enerji maliyetini tahmin edebilen bir analiz aracı geliştirmiştir. Çalışmasında, açgözlü sezgisel arama ve genetik algoritma kullanılmıştır. Türbinlerin, rüzgarın daha güçlü olduğu sahilden uzağa mı yerleştirilmeli yoksa temel maliyetlerini azaltan suyun daha sık olduğu kıyıya yakın yerlere mi konumlandırılması üzerine çalışma yapmıştır. Aynı şekilde Rivas [45] da master tezinde, offshore rüzgar santrali yerleşimi optimizasyonu ilgilenmiş ve tavlama benzetimi algoritmasına 'kaldır (remove)', 'hareket ettir (move)' ve 'ekle (add)' işlemlerini ekleyerek yönteme bir yenilik getirmiştir.

Elkinton vd. [18], offshore rüzgar santralinde türbin yerleşimleri için beş optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Maliyet-fayda dengesini kurarak amaç fonksiyonunu; birim enerji maliyetinin minimizasyonu ile enerji üretiminin maksimizasyonu olarak seçmişlerdir. Basit ve tek boyutlu rüzgar senaryoları analiz edilmiş ve tüm algoritmaların sonuçları karşılaştırılmış, Massachusetts yakınlarındaki gerçek bir saha için uygulamıştır. Optimizasyon algoritmalarından gradyan arama

(GSA – gradient search), açgözlü sezgisel (GHA- greedy heuristic), genetik (GA- genetic), tavlama benzetimi (SAA – simulated annealing), ve desen arama (PSA – pattern search) algoritmalarını araştırmıştır. Bu algoritmalar arasından GSA, GHA ve PSA hızlı ama düşük kalitede sonuçlar verirken, SAA ve GA, yavaş olsa da yüksek kalitede sonuç ürettiğini bildirmiştir. Araştırmacılar, oluşturdukları dört senaryoyu GHA ve GA ile test ederek optimize etmiş ve GHA-GA kombinasyonunun sadece GA ile yapılan çözüme eş veya daha iyi sonuçlar gerçekleştirdiğini rapor etmişlerdir. Aynı zamanda, tek başına GHA kullanmanın en yüksek SEM değerini verdiğini ve bu problemin optimizasyonu için iyi olmadığını söylemişlerdir. İki optimizasyon algoritmasının kombinasyonunun daha kısa sürede çözüm sunduğu, türbinler arası ideal mesafenin 6D ila 10D arasında olması, optimizasyon sürecinde taşıyıcı yapıların maliyet kaleminde önemli bir yere sahip olmasından dolayı türbinlerin yerleşiminin derin deniz yerine sığ alanların tercih edilmesi gibi bulgular paylaşmışlardır.

Saavedra vd. [46], off-shore rüzgar santrali tasarımı için biyoloji tabanlı algoritma olan Mercan Resif Optimizasyonu (Coral Reef Optimization - CRO) algoritması sunmuşlardır. Önerilen algoritmanın performansı; evrimsel algoritma, diferansiyel evrim yaklaşımı ve armoni arama algoritması ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, CRO yaklaşımının en yüksek güç üretimini sağlayan santral düzenini oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Rodrigues [47] doktora çalışmasında offshore rüzgar santrallerinde türbin yerleşimi için çok amaçlı bir optimizasyon tekniği geliştirerek, Hollanda Borssele sahasında uygulama yapmıştır. Amaç fonksiyonundaki ekonomik göstergelerin (net bugünkü değer, seviyelendirilmiş enerji maliyeti gibi) farklı olması durumunda, en optimal yerleşim olarak farklı konumlar bulmuş ve yatırımcının bunları dikkate alması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, aynı ekonomik göstergeler içinde kullanılan faiz oranı, enerjinin birim maliyeti gibi parametrelerin değişmesi de optimal yerleşimi tamamen değiştirmiş ve bu değerlerin çok dikkatli seçilmesi konusunu vurgulamıştır.

2012'de Khan ve Rehman [48], karasal rüzgar santrallerindeki türbin yerleşim problemleri üzerine literatürdeki, tekrarlayıcı olmayan deterministik algoritmaları özetlemektedir. Optimizasyon algoritmalarında kullanılan tek kriterli ve çok kriterli amaç fonksiyonları, problemde göz önüne alınan çeşitli kısıtlar ve tasarım konuları bu çalışmada derlenmiştir. 2014'te Gonzales vd. [7] ise, rüzgar santralleri yerleşim

optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaları derleyerek kullanılan amaç fonksiyonları, önerilen algoritmaların uygulanması ve wake modelleri ile ilgili temel özellikler üzerine bir inceleme sunmuşlardır.

Literatürdeki birçok çalışma ya türbinlerinin sayısını saptamak ya da türbin tipini belirlemek üzerine ilişkilendirilmiş ve rüzgar santrali sahasını karelere bölerek, saha kesikli olarak ele alınmıştır. Bu yöntem problem çözmeyi kolaylaştırmasına rağmen, türbin yerleşimini sadece karelerin orta noktasına konumlandırması sebebiyle çözüm kümesini daraltmaktadır. Sonuç olarak bu varsayım, türbinlerin santrallerde herhangi bir yere yerleştirilmesi için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca yukarıda bahsi geçen bir çok araştırma, türbin yerleşim problemini iki boyutlu olarak ele almıştır ve sınırları belirli saha içine yerleştirilen türbin koordinatlarını (x,y) şeklinde yani ikili kartezyen koordinat gösterimi ile ifade etmiştir. Halbuki, çoğu karasal rüzgar santralleri, saha içinde yükseklik farkı olan arazilere kurulmaktadır. Bu yüzden, rüzgarın kırılma modelleri ve türbülans modelleri ile rüzgar hızlarının her noktada düzeltilmesi gerekmektedir.

1.3 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının genel amacı, sınırları belirli olan bir rüzgar santralinde türbinlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini en aza indirecek optimal bir yerleşim planı sunmaktır. İncelenen durum ise Borusan EnBW bağlı ortağı olan Bandırma Enerji ve Elektrik Üretim A.Ş. (Lisans No: EÜ/1447-8/1049) tarafından işletilen ve 89,7 MW kurulu güce sahip santral sahasının en az kayıpla en fazla güç üretimini sağlayan türbinlerin yerleşim düzeninin yapılmasıdır.

Rüzgar hız kayıplarını azaltarak santralin toplam gücünü artırmak bu tez çalışmasında amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Santral sahası, birçok çalışmada olduğu gibi iki boyutlu ve kesikli değil, yükseklik faktörü de eklenerek üç boyutlu ve sürekli olarak ele alınmıştır. Meteorolojik ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda saha içindeki her yükseklik noktası için rüzgar hızları yeniden hesaplanmış ve sahanın enerji yoğunluğu çıkarılmıştır. Sahanın coğrafi özellikleri, topografik modellenmesi, varolan türbinlerin konumları ve saha sınırları analiz edilmiştir. Topografik haritadan, santral saha sınırları içerisinde kalan alanın

taranmasıyla elde edilen enlem ve boylam bilgileri, Vincenty yaklaşımı ile metrik sisteme dönüştürülmüştür. Böylece veri seti, küresel koordinat sisteminden, öklid geometrisi ile ifade edilen kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Ele alınan problemde böyle bir yöntem ile veri setinin oluşturulması, ilk defa bu çalışma ile sunulmuştur. Problem; sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla oluşan hibrit bir yöntem ile çözülmüştür. Türbinler arası etkileşimin hesaplanmasında Jensen'ın analitik wake modeli kullanılırken, rüzgar profili için Hellman'ın güç kanunu kullanılmıştır. Türbinler, rüzgar kırılması olgusuna göre sahanın mümkün olan en yüksek noktalarına yerleştirilirken, iki türbin arasındaki minimum mesafe kısıtını sağlayacak şekilde çözüm kümeleri oluşturulmuştur. Türbinler arası etkileşimden kaynaklanan rüzgar hız kayıplarının hesaplanmasında rüzgarın yönü dikkate alınmıştır. Sadece hakim rüzgar yönlerinin değil, on altı farklı rüzgar sektörünün dikkate alınarak her sektöre ait ortalama rüzgar hızına karşılık, her rüzgar sektöründeki kapasite faktörlerinin de güç hesaplamalarına dahil edilmesi bu çalışmada sunulan başka bir farklılıktır. Hızın, yükseklikle artması olgusu bu problemdeki sezgiselliktir. Bu sezgisellik kullanılarak birden fazla çözüm kümeleri (popülasyon) oluşturulmuş ve daha sonra genetik algoritma ile çeşitli parametreler denenerek birçok simülasyon yapılmış ve optimal sonuca ulaşılmıştır. MATLAB R2015a programında yazılan kodlar ile yerleştirilecek 29 adet türbinin birbirlerini en az etkileyecek ve en fazla güç üretecek şekilde optimal konumlandırılmaları sağlandığında, santralin toplam gücü ve kayıpları hesaplanmış, mevcut durumla karşılaştırılmıştır.

Bu tez, beş bölümden oluşmaktadır, her bölümün kısa bir açıklanması aşağıdaki gibidir;

Birinci bölüm olan Giriş bölümünde küresel enerji dengelerinin yön değiştirdiği, yenilenebilir enerji kaynakları ile sürdürülebilir elektrik tedariki sağlayıcısı olarak rüzgar enerjisinin önemli bir aktör olması, dünyadaki ve Türkiye'deki rüzgar sektöründeki gelişmelerden bahsedilmiş ve yatırım maliyeti yüksek olan rüzgar enerjisi sektöründe risk faktörlerini azaltmak için yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca, bu tez ile yapılan araştırmanın çatısı sunulmuş olup, literatürde konu üzerinde yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Giriş bölümünden sonra sunulan ikinci bölümde, rüzgar enerjisinin teorisinden bahsedilmiş, bazı önemli konseptler açıklanmış ve türbinlerin birbirini etkilemesi sonucu yaşanan hız kayıpları ile kullanılacak wake modelinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, rüzgar santrallerinde konumlandırma konusuna değinilmiştir. Hem makro anlamda santral sahasının seçimi hem de mikro anlamda santral içindeki türbinlerin yerleşimi hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, bu bölümde santral ve türbin konumlandırma işlemlerini yapmak için piyasaya sunulan ticari yazılım programlarından da bahsedilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise, tez çalışmasında kurgulanmış amaç fonksiyonu ve güç modeli tanımlarına yer verilmiştir. Uygulama sahası olan Bandırma Rüzgar Enerji Santralinin tanıtımı yapılarak rüzgar verileri ile sahanın topografik özelliklerinin analizi paylaşılmıştır. Önceki çalışmalardan farklı olarak sunulan çözüm önerileri ve kabuller karşılaştırmalı olarak bu bölümde yer almaktadır. Daha sonra optimizasyon algoritmaları ve stratejileri üzerine odaklanılmıştır. Sahada bulunan 29 türbinin ilk yerleşimi rüzgar kırılması olgusuna dayalı olarak sezgisel yöntemle oluşturulmuş, ardından meta-sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma ile yerleşim düzeninin optimizasyonu yapılmıştır.

Beşinci kısım olan Sonuç bölümünde, türbinlerin mevcut konumlarındayken santraldeki güç kayıpları ile güç üretimi, MATLAB R2015a programı aracılığı ile hesaplanmıştır. GA parametrelerinin değiştirilerek, birçok simülasyon sonunda optimum yerleşim düzenine ulaşılmıştır. Önerilen optimal durumda, her bir türbinin wake etkisinden dolayı güç kayıpları ve santralin toplam güç üretimleri sunulmuştur. Optimal yerleşim düzeni ile sağlanan performans, mevcut durumla karşılaştırılmıştır. Son olarak, öneriler kısmında, rüzgar santrali yerleşim problemi için planlama sürecine entegre edilmek üzere gelecekte araştırılması gereken faydalı araçların neler olabileceğine dair öneriler sunulmuştur.

2. RÜZGAR GÜCÜ ÜRETİMİNE GENEL BAKIŞ

Yenilenebilir enerjilerin çoğunda olduğu gibi, rüzgar enerjisinin kaynağı da güneştir. Küresel rüzgarlar, güneş radyasyonu ile yeryüzünün düzensiz ısınmasından kaynaklanan basınç farklarından kaynaklanmaktadır. Bu basınç farkları da havanın hareketine sebep olur. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hava hareketi rüzgarı oluşturmaktadır. Basınç farkı ne kadar büyükse rüzgarın şiddeti de o kadar fazla olmaktadır. Basınç gradyenine ve yer çekimi kuvvetine ek olarak, havanın ataleti, dünyanın kendi etrafında dönmesi ve sürtünme kuvvetleri atmosferik rüzgarları etkiler. Bu kuvvetlerin her birinin atmosferik rüzgar sistemleri üzerindeki etkisi dikkate alınan hareketin ölçeğine göre değişir. Ayrıca rüzgarın özellikleri, coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün heterojen ısınmasına bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler göstermektedir.

Hesaplamalara göre güneşten gelen enerjinin %1 ila %2'si rüzgara dönüşmektedir [49]. Bu değer pratikte yüksek bir enerji miktarı olsa da mevcut teknolojiler, belirli hızlardaki (genellikle 3 m/s'den fazla ve 25 m/s'den daha az) rüzgarı elektrik üretmek için kullanabilmektedirler.

2.1 Rüzgar Enerjisi Temelleri

2.1.1 Rüzgardan Sağlanan Enerji

Rüzgarın enerjisinden yararlanabilmek için başka bir enerji formuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Yel değirmenleri rüzgarın gücünü mekanik güce çevirirken, bir rüzgar türbininin amacı rüzgardaki kinetik enerjiyi elektriğe dönüştürmektir. Yatay eksenden gelen rüzgarın mevcut gücü;

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 \quad (2.1)$$

V_0 : rüzgarın hızı (m/s)

\dot{m} : eksen boyunca rüzgarın kütleli debisi (akı) (kg/s)

Burada;

$$\dot{m} = \rho AV_0 \quad (2.2)$$

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3)

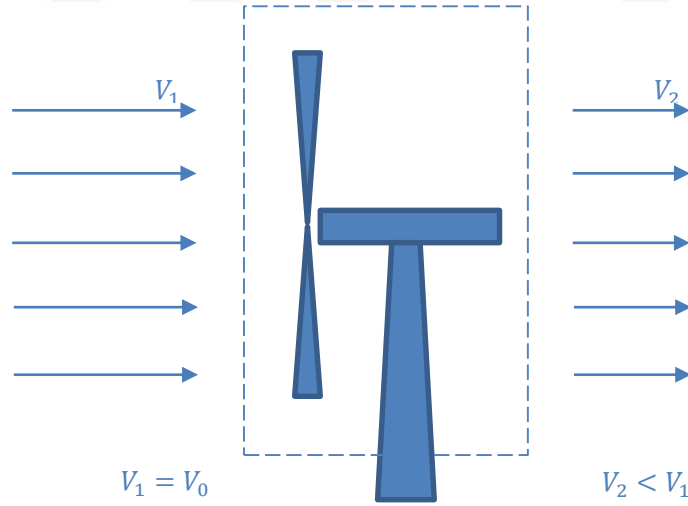
A : eksenin kesit alanı (m^2)

Böylece güç denklemi,

$$\dot{W} = \frac{1}{2}(\rho AV_0)V_0^2 = \frac{1}{2}\rho AV_0^3 \quad (2.3)$$

elde edilir. Üretilen güç, rüzgar hızının küpünün bir fonksiyonu olup, rüzgar hızının iki katına çıkması mevcut gücün sekiz katına artmasına neden olmaktadır.

2.1.2 Rüzgar Türbininden Elde Edilen Enerji



Şekil 2.1: Rüzgar türbininde kontrol hacmi

Şekil 2.1'de türbin rotoruna ait kontrol hacmi görülmektedir. Rüzgardan elde edilen enerji;

$$\dot{W} = \frac{1}{2}\dot{m}(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.4)$$

kanatların hemen önündeki rüzgar hızı; V_1

ve kanatlardan yeterince uzaklıktaki rüzgar hızı ; V_2

Burada \dot{m} , rotor düzlemindeki hızlar değerlendirilerek hesaplanır. \dot{m} 'nin (2.2)'de verilen eşitliğinde yer alan V_0 değeri; V_1 ile V_2 hızlarının ortalaması olarak ele alınır. Eşitlikteki A ise, rotorun süpürdüğü alanı ifade etmektedir.

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \left[\rho A \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \right] (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.5)$$

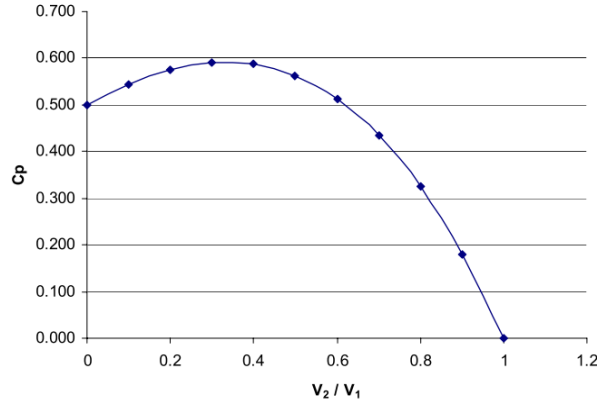
Bu eşitlik düzeltildiğinde;

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \frac{(1 + \frac{V_2}{V_1}) [1 - (\frac{V_2}{V_1})^2]}{2} \quad (2.6)$$

ya da

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 C_p \quad (2.7)$$

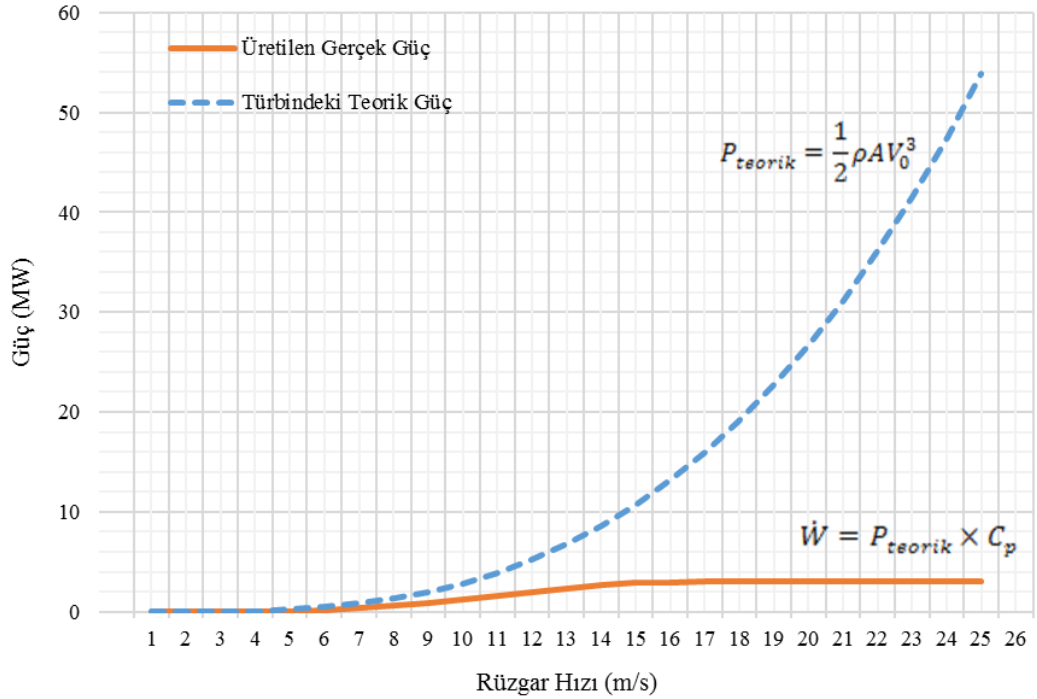
C_p , V_1 ve V_2 'nin bir fonksiyonu olup, rüzgar türbinin performans katsayısı olarak ifade edilir ve sistemin verimlilik ölçütü olarak kullanılır. Rüzgardan elde edilen gücün, rüzgar gücüne oranı olarak hesaplanır.



Şekil 2.2: V_2/V_1 hız oranının fonksiyonu olarak rüzgar türbini verimliliği

1919'da Alman fizikçi Albert Betz, lineer momentum teorisine göre bu güç katsayısının üst sınır limitini 16/27 (%59,3) olarak bulmuştur. Bu da ancak V_2 hızı, V_1 hızının 1/3'üne eşit olduğu zaman gerçekleşir, V_2/V_1 değeri aynı zamanda aksenal indüksiyon olarak da ifade edilmektedir. Şekil 2.2, $C_p - V_2/V_1$ grafiğini göstermektedir.

C_p 'yi belirli bir rüzgar hızında bilmek, rüzgar türbini tarafından üretilen gerçek gücün ne olacağına basit bir yaklaşım sağlar. Şekil 2.3, 3.0 MW'lık bir türbinden üretilebilecek gerçek güç ile teorik güç arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 2.3: Rüzgar hızına karşılık gelen türbindeki teorik güç ile üretilen güç karşılaştırması

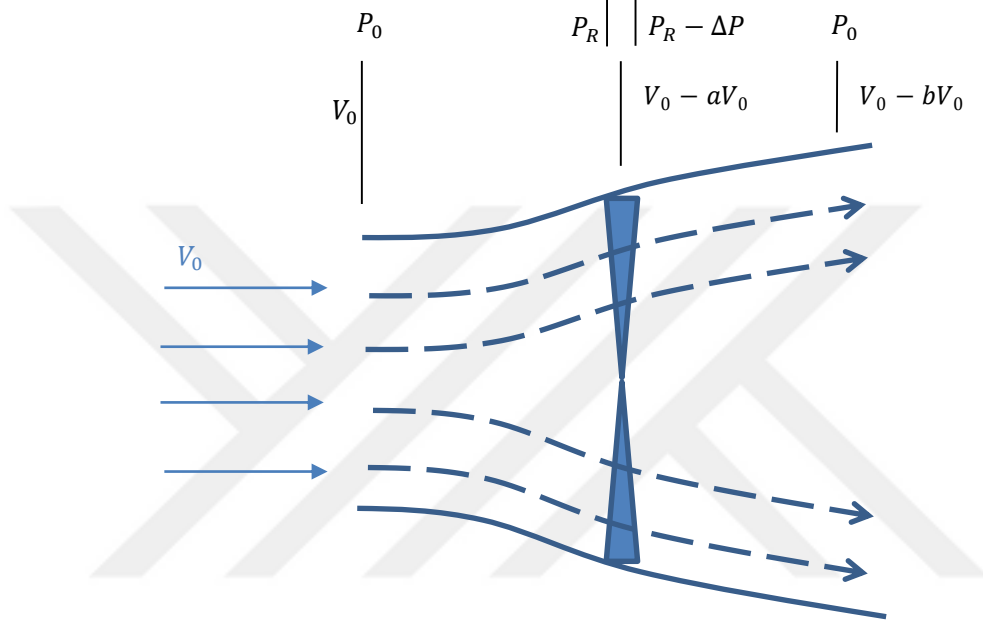
2.1.3 Aktüatör (Dönen) Disk Teorisi

Aktüatör disk teorisi modeli, hem rüzgar tüneli testleri hem de teorik hesaplamalar temelinde kurulmuştur. Şekil 2.4, hava moleküllerinin bir rüzgar türbini rotorunun düzleminden geçerken izledikleri yolu göstermektedir. Bir düzlemin içinden geçen hava sıkıştırılamaz bir madde olarak ele alınırsa (ses hızına yakın olmadığı sürece geçerli bir varsayımdır), kinetik enerjinin kaybolması nedeniyle hava molekülleri Şekil 2.4'teki gibi hareket eder. Rotor'u terk eden hava, giren havadan daha yavaş bir hıza sahip olacak ve bu nedenle giren havanın kesit alanı, çıkan havanın kesit alanından daha az olacaktır.

Betz limiti bu olgunun sonucu olarak çıkmıştır. Türbinin verimliliği arttıkça rotor ile kesişen, gelen rüzgar yönündeki kesit alanı azalır. Bu, kütle akış hızı yani debinin azaldığı anlamına gelir. Yani, rotor ile daha az hava kütlesi temas ederken her

bir elementel hava kütlesinden daha fazla enerji çıkarılmaktadır. Betz sınırı, geçiş noktasını temsil eder, böylece verimlilikteki fazla artış, kütle akış hızındaki azalma ile dengelenir.

Diskten geçen havanın akış hızı, disk alanının her noktasında eşit olmasına rağmen basınç ani olarak düşer. Şekil 2.4'te P_0 ortam basıncını, P_R rotordaki statik basıncı ve ΔP ise rotoru geçtikten sonra havadaki basınç farkını göstermektedir. Bu basınç farklarından dolayı diskin hareket enerjisi artmış olacaktır [50].



Şekil 2.4: Aktüatör Disk Modeli

Betz teoremine göre hesaplama yapılırken, akışın sürekli, homojen ve sıkıştırılmaz olduğu, disk üzerindeki basınç değişiminin disk üzerindeki her noktada aynı olduğu, sonsuz sayıda kanat olduğu ve diskin önünde ve arkasında türbülans olmadığı kabul edilmektedir.

Bu teori; rotoru, rotorun düzleminde basınç düşüşüne neden olan bir disk olarak ele alır. Bernoulli prensibi ile birlikte bu varsayım, hız düşüşünün yarısının rotor düzleminde önce meydana gelmesi ve yarısının da rotor düzleminin arkasında oluşması gerektiğini belirtmektedir.

Şekil 2.4'te tersinirlik ve sıkıştırılmazlık varsayımı ile Bernoulli Denkleminin uygulanması sonucu;

$$P_{ilk} = P_0 + \frac{\rho}{2} V_0^2 = P_R + \frac{\rho}{2} (V_0 - aV_0) \quad (2.8)$$

⏟
⏟
 Serbest akış bölgesi Rotorun hemen önündeki bölge

$$P_{son} = (P_R - \Delta P) + \frac{\rho}{2} (V_0 - aV_0)^2 = P_0 + \frac{\rho}{2} (V_0 - bV_0)^2 \quad (2.9)$$

⏟
⏟
 Rotorun hemen arkasındaki bölge Rotordan uzak bölge

P_{ilk} serbest akış ve P_{son} uzak alanın tanımı için kullanılırsa;

$$\Delta P = P_{ilk} - P_{son}$$

$$\Delta P = \left(P_0 + \frac{\rho}{2} V_0^2 \right) - \left[P_0 + \frac{\rho}{2} (V_0 - bV_0)^2 \right] = \rho V_0^2 b \left(1 - \frac{b}{2} \right) \quad (2.10)$$

Rotor itme kuvveti, rotorun önünden arkasına kadar olan momentumundaki değişimdir.

$$\begin{aligned} T &= \dot{m} [V_0 - (V_0 - bV_0)] = \dot{m} (bV_0) \\ &= [\rho A (V_0 - aV_0)] (bV_0) = [\rho V_0^2 b (1 - a)] A \end{aligned} \quad (2.11)$$

İtme kuvveti aynı zamanda $\Delta P \cdot A$ dır, bu yüzden;

$$\Delta P = \rho V_0^2 b (1 - a) = \rho V_0^2 b \left(1 - \frac{b}{2} \right) \rightarrow a = \frac{b}{2} \quad (2.12)$$

2.2 Rüzgar Dağılımı

2.2.1 Weibull Dağılımı

Belirli bir bölgedeki rüzgar modeli, yıllık bazda tutarlı olma eğilimindedir ve Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak tanımlanabilir [51].

$$h(V_o) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{V_o}{c} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{V_o}{c} \right)^k}, \quad 0 < V_o < \infty \quad (2.13)$$

V_o : rüzgar hızı

k şekil parametresi, c ölçek parametresi ve

$$h = \lim_{\Delta V_o \rightarrow 0} \left\{ \frac{\text{rüzgar hızının } V_o \text{ ile } (V_o + \Delta V_o) \text{ arasındaki zaman fraksiyonu}}{\Delta V_o} \right\}$$

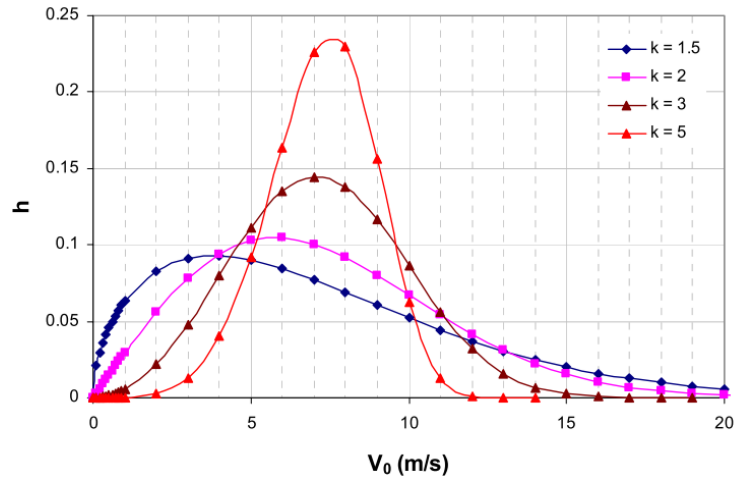
Γ , gama fonksiyonu iken; k şekil ve c ölçek parametreleri ortalama rüzgar hızı ile alakalı olup;

$$V_{ort} = c \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir.

h 'ın iki farklı hız arasında integralinin alınması belirli bir yıldaki rüzgarın beklenen değerlerinin bu iki hız değeri aralığında zamansal yüzdesini verir. Tanım gereği h 'in 0 ile ∞ arasındaki integrali bire eşittir yani belirli bir yılda rüzgar hızının 0 ile ∞ arasında olma olasılığı % 100'dur.

Weibull dağılımında ölçek parametresinin 1'e eşit olması durumunda dağılım Gaussian dağılıma benzemektedir ve (2.14)'te eşitlik görülmektedir. Ölçek parametresinin 2'ye eşit olması durumunda ise Rayleigh dağılımı olarak bilinen tek parametrelili bir dağılıma dönüşmektedir.

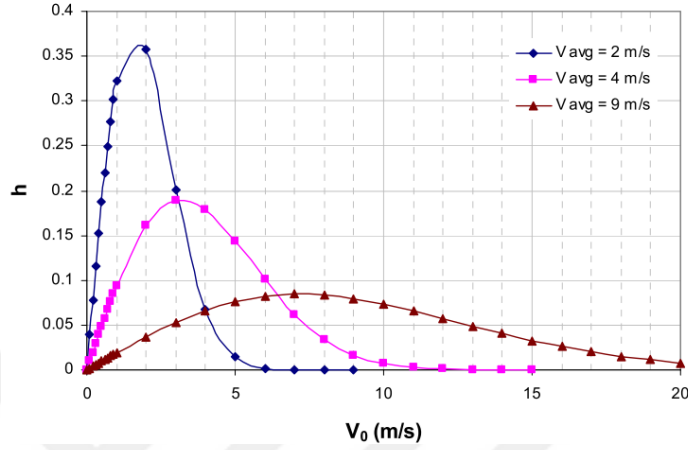


Şekil 2.5: Şekil parametresi k değerinin değişiminin weibull dağılımı üzerine etkisi

Şekil 2.5, ölçek parametresi c sabitken değişen şekil parametresi k 'nın etkisini göstermektedir. k arttıkça, dağılım daha dar ve daha düzgün hale gelir. Grafikte görülebileceği gibi, $k = 3$ iken şekil nispeten normal dağılıma yakın bir dağılıma işaret etmektedir. Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığı zaman, şekil

parametresinin ekvator yakınlarda 1 civarında, ılıman enlemler için ise 2 ve sürekli rüzgar alanları için ise 3 civarında olduğu bilinmektedir.

Şekil 2.6, şekil parametresi $k=2$ iken ortalama rüzgar hızının değişen etkisini göstermektedir.



Şekil 2.6: Ortalama rüzgar hızı değişiminin weibull dağılımı üzerine etkisi

2.2.2 Rüzgar Sınıflandırması

Rüzgar sınıfları, yüzeyin onuncu ve/veya ellinci metre yüksekliğinde, rüzgar akış yönüne dik düşey bir düzlemdeki ortalama güç yoğunluğu (W/m^2) ile tanımlanır. Sınıfları tanımlayan güç yoğunlukları, Weibull şekil parametresi $k=2$ olan bir rüzgar alanını varsayarak hesaplanır. Tablo 2.1’de Amerikan Rüzgar Enerji Birliği (AWEA) tarafından yayınlanan onuncu ve ellinci metre rüzgar sınıfı ölçeğini görülmektedir.

Tablo 2.1: 10. metre ve 50. metredeki rüzgar gücü yoğunluğu sınıfları

| Rüzgar Sınıfı | 10. metre | | 50. metre | |
|---------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
| | Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m^2) | Rüzgar Hızı (m/s) | Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m^2) | Rüzgar Hızı (m/s) |
| 1 | <100 | <4,4 | <200 | <5,6 |
| 2 | 100 – 150 | 4,4 – 5,1 | 200 – 300 | 5,6 – 6,4 |
| 3 | 150 – 200 | 5,1 – 5,6 | 300 – 400 | 6,4 – 7,0 |
| 4 | 200 – 250 | 5,6 – 6,0 | 400 – 500 | 7,0 – 7,5 |
| 5 | 250 – 300 | 6,0 – 6,4 | 500 – 600 | 7,5 – 8,0 |
| 6 | 300 – 400 | 6,4 – 7,0 | 600 – 800 | 8,0 – 8,8 |
| 7 | >400 | >7,0 | >800 | >8,8 |

Bu tabloya göre Sınıf 1 ve Sınıf 7 rüzgar bölgeleri dışındaki değerler, sınıfı tanımlayan güç yoğunluğu değerinin ilk basamağına karşılık gelir. Örneğin; ellinci metrede ortalama 200 W/m²'lik bir alan, Sınıf 2 iken, 300 W/m²'lik alan ise Sınıf 3'ü göstermektedir.

2.2.3 Rüzgar Kırılması

Atmosferik sınır tabakası, dünya yüzeyindeki sınır tabakasıdır. Hız, sıcaklık ve nem gibi havanın fiziksel özellikleri bu tabakada önemli derecede değişiklik göstermektedir. Atmosferik sınır tabakasının yüksekliği, dünya yüzeyinin 100 m ile 2 km arasındadır ve rüzgar türbinleri bu aralıkta çalışırlar. Dünya yüzeyi üzerindeki aerodinamik sürüklenme ve havanın viskozitesi nedeniyle atmosferik sınır tabakasında rüzgar hızı profili oluşmaktadır. Yüzeyde rüzgar hızı sıfırdır ve yükseklik arttıkça rüzgar hızı artar [52]. Rüzgarın yönünde veya hızında yükseklik artışıyla olan değişimin miktarına rüzgar kırılması (wind shear) adı verilir. Hız profili sırasıyla (2.15) ve (2.16)'da olduğu gibi Hellman güç kanunu ve log kanunu olarak da bilinen logaritmik bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bu eşitlikler sayesinde belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgar verileri istenilen yükseklikteki değerinin bulunması için kullanılabilir.

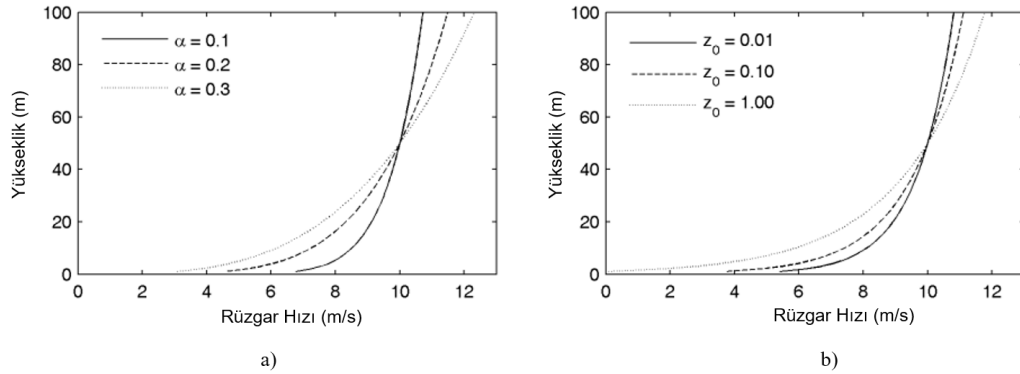
$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (2.15)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\log(h_2/z_0)}{\log(h_1/z_0)} \quad (2.16)$$

burada v_1 ölçülmüş rüzgar hızını, v_2 belirlenmek istenen rüzgar hızını, v_1 hızının ölçüldüğü yükseklik h_1 , v_2 hızının belirlenmek istediği yükseklik ise h_2 , (2.15)'teki üstel ifade olan α pürüzlülük katsayısı, (2.16)'daki z_0 ise pürüzlük uzunluğu olup, her iki değer de çevredeki arazinin farklı türlerini yansıtmak için kullanılır.

Şekil 2.7'de her iki modele göre rüzgar profili gösterimi vardır. Rüzgar hızı ölçümleri, özellikle büyük türbinler için kullanılacak türbininin hub yüksekliğinden yapılamayabilir. Ölçüm istasyonlarından alınan düşük yükseklikteki rüzgar hız verileri ekstrapolasyon işlemi ile daha yükseklerdeki rüzgar hızları yukarıda verilen eşitlikler

sayesinde hesaplanabilmektedir. Enerji hesaplamaları için, hub yüksekliğindeki rüzgar hızı kullanıldığından bu işlem önem arz etmektedir [52].



Şekil 2.7: a) Güç kanunu ve b) log kanunu modelleri ile rüzgar profilleri

Log kanunu, güç yasasına göre 10-20 m seviyesinde ortalama rüzgar hızını tahminlemede daha güvenilir bir yöntem olarak kabul edilir. Dengeli atmosferik koşullarında 20 m ile 100 m arasında her iki yöntem de ortalama rüzgar hızının makul tahminlerini üretirken, 100 m'den atmosferik sınır tabakasına kadar ise güç yasası, ortalama rüzgar hızının daha doğru tahminlerini üretir [53]. Güç kanunu modelindeki (α) pürüzlülük katsayısının ve log kanun modelindeki (z_0) pürüzlülük uzunluğunun tipik değerleri Tablo 2.2 ve 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Çeşitli arazi tipleri için pürüzlülük katsayıları (α) [52]

| Arazi tanımı | Pürüzlülük Katsayısı α |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Pürüzsüz, sert zemin veya deniz | 0,10 |
| Kısa otlar | 0,14 |
| Birçok ağaç ve birkaç bina | 0,22-0,24 |
| Kentsel alanlar, uzun binalar | 0,4 |

Tablo 2.3: Çeşitli arazi tipleri için pürüzlülük uzunlukları (z_0) [52]

| Arazi tanımı | Pürüzlülük Uzunluğu z_0 |
|---------------------|---------------------------|
| Açık deniz | 0,0002 |
| Ekili olmayan tarla | 0,03 |
| Ormanlık alan | 0,5 |
| Kentsel alan | 1,5 |

2.3 Wake Etkisi Analizi

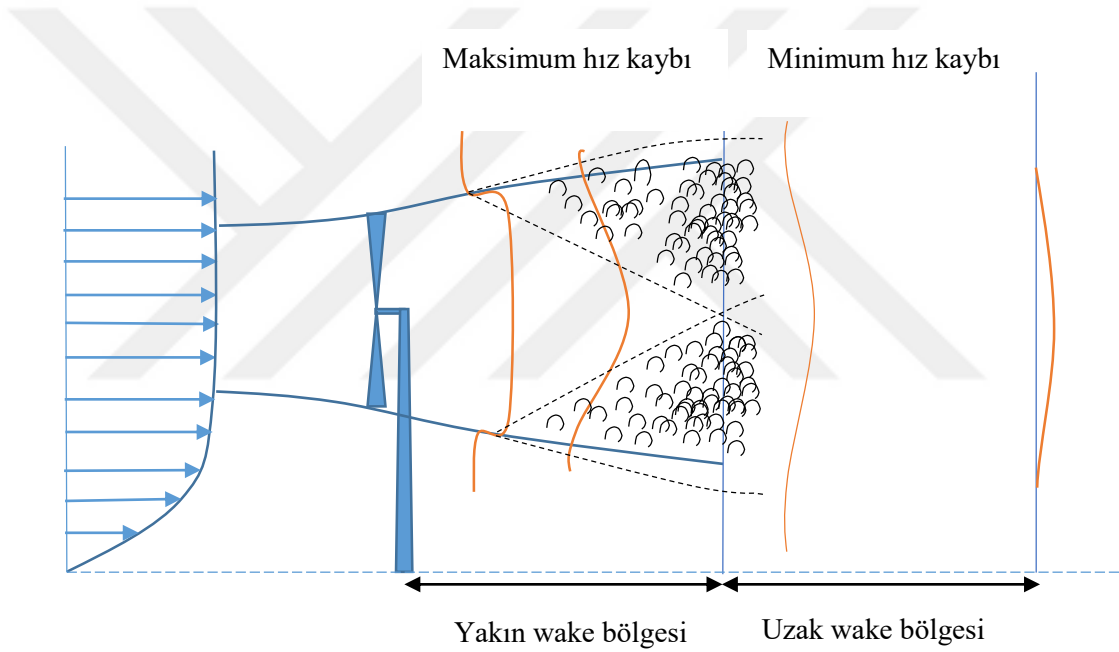
Wake etkisi, rüzgar santrallerindeki türbinlerin konumlarından dolayı birbirini etkilemesi sonucu rüzgar hızının azalmasını ve enerji üretimindeki azalmayı ifade eder [54]. Rüzgar santrallerinde enerji kayıplarının en büyük nedeni wake etkisidir. Gerçek bir vaka çalışmasında rüzgar santralindeki güç kayıplarının rüzgarın yönüne, hızına ve santraldeki türbinlerin pozisyonuna bağlı olmak üzere %50 ila %100 olduğu saptanmıştır [55]. Şekil 2.8’de, Danimarka’da yer alan Horns Rev offshore santralinde wake etkisini ve türbinlerin birbirini nasıl etkilediklerine dair yapılan deney sonucu havadan fotoğflanmış görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.8: Türbinlerin santral içindeki etkileşimi [55]

Rüzgar santralleri yerleşim problemlerinin çözülmesinde türbinler arası aerodinamik etkileşimden kaynaklanan wake etkisi en önemli kısıttır. Santral içindeki her türbin hakim rüzgar yönüne göre konumlandırılmalarına ve birbirlerine göre belirli bir mesafe ile yerleştirilmelerine rağmen, türbinler birbirlerini etkilerler. Öndeki türbine giren rüzgar hızına göre arkada kalan türbine giren rüzgar hızı daha azdır. Bu yüzden enerji hesaplamalarında tek bir ortalama rüzgar hızı değeri yerine, her bir türbin için wake sebebiyle enerji kayıplarının ve yeni rüzgar hızları ile güç hesaplanmaları gereklidir.

Wake sonrası meydana gelen güç kayıpları ve kanatta oluşan yükler, wake alanı içindeki iki bölgede incelenir, bunlar yakın wake ve uzak wake olarak adlandırılmaktadır. Yakın wake bölgesi türbinden hemen sonra başlayıp türbinden sonraki 2D ila 5D uzaklığını kapsayan alandır. Rotor geometrisinden etkilenen rüzgar akışı, bu bölgede kanat ucu vortekslerinin oluşmasına sebep olur. Buna ek olarak, dikey basınç ve eksenel hız gradyanları ve wake bölgesinin genişlemesi söz konusudur. Uzak wake bölgesinde ise rotor geometrisinin etkileri azalan rüzgar hızı ve artan türbülans yoğunlukları ile sınırlıdır. Türbülans, uzak wake bölgesinde öne çıkan fiziksel bir durumdur. Rotorun indüklediği türbülanslamaya ek olarak, daha uzaktaki bölge, atmosferik türbülansdan da etkilenmektedir. Şekil 2.9’da uzak ve yakın wake bölgeleri arasındaki geçiş grafik olarak gösterilmektedir [52].



Şekil 2.9: Hız profili ile yakın wake ve uzak wake bölgeleri arasında geçiş

Günümüzde, rüzgar santrallerindeki wake kayıpları nedeniyle oluşan rüzgar hızlarını hesaplamak için çok çeşitli modeller mevcuttur [56–58]. Wake kayıplarını modellemek için kullanılan basit dereceli mühendislik yöntemlerine örnek olarak Jensen modeli [59,60], Eddy viskozite modeli [61], Frandsen modeli [62], derin dizi (deep array) wake modeli [63] ve Larsen modeli [64] sıralanabilir. Bu modellerin wake sebepli rüzgar hız kaybı yaklaşımı sayesinde hesaplama süreleri makul bir seviyede olup, uzak wake bölgesi için iyi bir temel oluştururlar[61]. Dinamik kıvrımlı wake akış modeli [65] ve aktüatör (dönen) disk modeli [66] üzerine kurulan diğer birkaç yaklaşım ise orta derece kaliteli sonuçlar sağlayan modellerdir. Yüksek kalitede

sonuçlar sunan modeller ise Hesaplamalı Akışkanlar Modelleri (CFD)'dir [67]. En yüksek kaliteye sahip mühendislik modelleri ise Büyük Eddy Simülasyonlarına (LES) dayanan modeller kullanılarak elde edilmiştir. Fakat, böyle bir modelin değerlendirmesini tamamlaması bir kaç hafta sürebilmekte ve süper bilgisayarlar ihtiyacı duyulmaktadır [68].

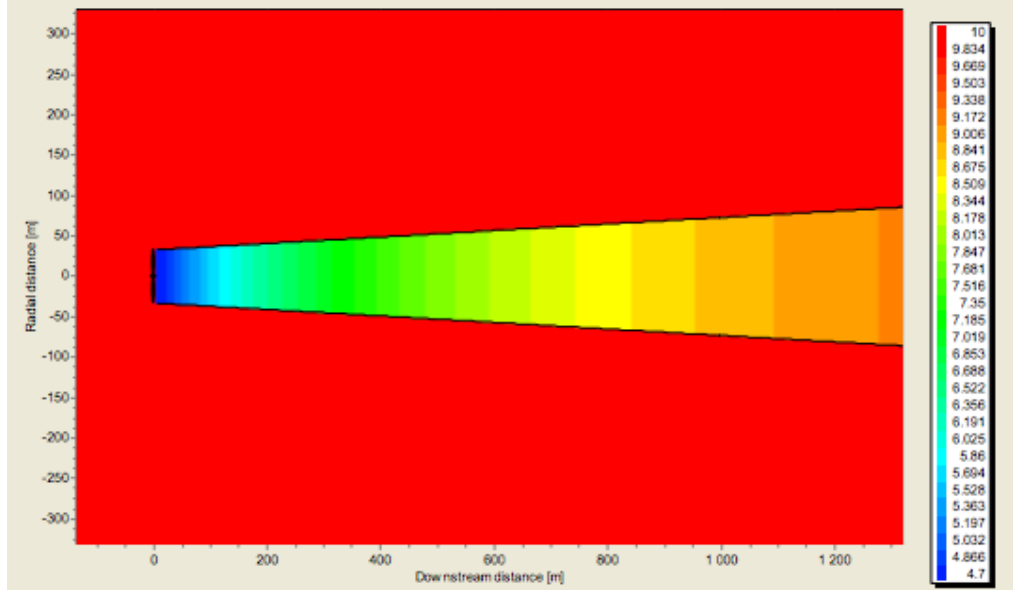
CFD ve LES modelleri, türbülanslı bir akış ve kanat arasındaki etkileşim ya da çoklu wake arasındaki etkileşimler gibi detaylı çalışmalar için kullanılabilir [68]. Fakat, rüzgar santrali yerleşim optimizasyonu gibi çok kriterli değerlendirme yapılması gereken bir problem için devasa hesaplama gereksinimleri bu modellerin kullanımını pek mümkün kılmamaktadır [69].

Bu nedenle rüzgar santral yerleşim problemini karmaşık olmayan tasarım metodolojisi ile çözmek literatürde yaygın olarak kabul görmektedir [70]. Rüzgar santrallerindeki türbinlerin optimal yerleştirilmesi probleminde birçok araştırmacı wake etkisini analitik modelleme yolunu seçmiştir. Bu çalışmada, optimizasyon deneyleri sırasında Jensen wake modeli kullanılmıştır.

2.3.1 Rüzgar Türbinleri ve Optimum Mesafe

Santrale kurulacak rüzgar türbinlerinin boyutunu tanımladıktan sonra, saha sınırları içine yerleştirilecek ve en yüksek enerji üretimini sağlayacak türbinlerin arasındaki mesafeyi belirlemek çok önemlidir. Tipik olarak, karasal rüzgar türbinleri arasındaki mesafe 3D ila 8D arasında değişir. Bununla birlikte, bu sabit bir mesafe değildir ve her rüzgar santralinde türbinlerin konumu, kurulum sahasının özelliklerine göre uyarlanması gerekmektedir.

Bir rüzgar türbini rüzgardan güç çektiğinde, arkasında kalan türbinleri rüzgar hızı azalmış bir wake bölgesinde bırakır ve bu bölge içinde kalan türbinler serbest bir akış halinde bireysel olarak ürettiklerinden daha az enerji üretirler. Rüzgar türbinlerinin arkasında oluşan wake bölgesinin konik şeklinde yayılımı Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10: Türbin arkasında oluşan wake - Jensen model. $U_{\infty} = 10$ m/s, $z_0 = 0,075$

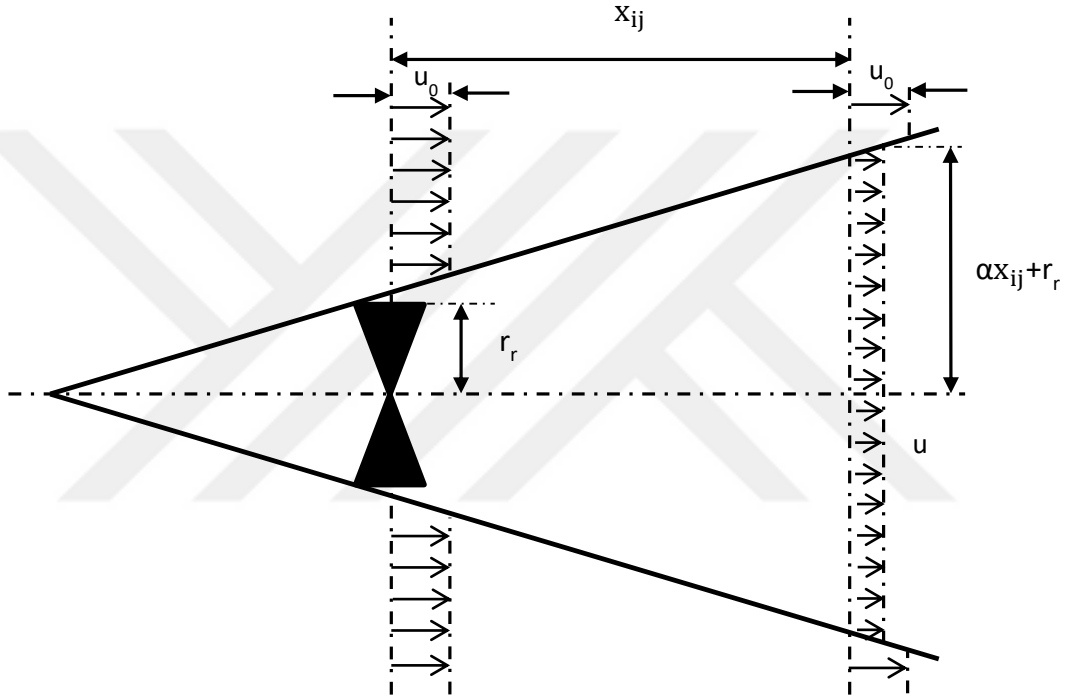
Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, serbest akış rüzgar hızı 10 m/s iken, wake etkisinden dolayı rüzgar türbininin arkasındaki rüzgar hızı 4.7 m/s'ye kadar düşmekte ve rüzgar türbininden 1,5 km daha uzakta aynı rüzgar hızına ulaşabilmektedir. Bu da rotor çapı 90m olan rüzgar türbinleri arasında yaklaşık 17D mesafesine tekabül eder. Fakat, rüzgar türbinleri arasındaki böyle bir mesafe, özellikle de sınırlı bir alanda çalışırken, yerleştirilecek rüzgar türbinlerinin sayısını sınırladığı için etkili çözüm olmayabilir.

Rüzgar yönünü bilmek iki türbin arasındaki minimum mesafenin hesaplanması konusunda karar vermeyi kolaylaştırabilir. Normalde, daha yüksek wake etkisine maruz kalacakları için, rüzgar yönüne yatay olarak yerleştirilmiş türbinler arasında daha yüksek bir mesafe uygulanırken rüzgar yönüne dikey olarak yerleştirilen türbinler arasında daha az bir mesafe olmalıdır.

2.3.2 Jensen Analitik Yöntemi

Momentum korunumu tabanlı Jensen'in 1983'te önerdiği bu model, bir veya birden fazla wake etkisinde kalan türbinin enerji üretiminin hesaplanmasında kullanılır [59]. Katic ve arkadaşları tarafından 1986'da [60] daha da geliştirilen model, uygulama kolaylığı ve düşük hesaplama gereklilikleri nedeniyle rüzgar santrali modellemesinde yaygın bir şekilde benimsenmiştir [7].

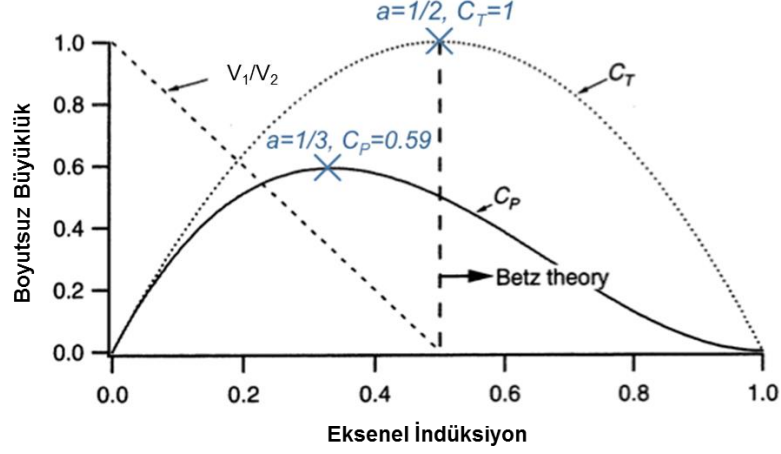
Şekil 2.11’de kullanılan wake modelinin gösterimi verilmiştir [10]. u_0 hızı kesintiye uğramadan türbine çarpan hız olup, u hızı $x_{i,j}$ metre uzaklığındaki hızdır. Jensen’in wake modeline göre türbine çarpan rüzgarın konik olarak yayılım yaptığı varsayılır ve momentumun korunumu yasası ilkesine göre basınç arttıkça rüzgar hızında düşüş görülür [34]. Oluşan bu konikliğin içine wake bölgesi denmektedir. Wake bölgesi rotorun hemen arkasından rotor çapı büyüklüğünde başlar ve genişleyerek büyür. Türbine u_0 hızı ile çarpan rüzgarın, türbinden $x_{i,j}$ metre sonra ulaştığı u hızının hesaplaması eşitlik (2.17)’de görülmektedir.



Şekil 2.11: Wake modelin şematik gösterimi

$$u = u_0 \left[1 - \frac{2a}{1 + \alpha \left(\frac{x_{i,j}}{r_r} \right)} \right] \quad (2.17)$$

Burada; u_0 ortalama rüzgar hızı, a aksenal indüksiyon faktörü, $x_{i,j}$ türbinin arkasında kalan mesafe, r_r türbin arkasında kalan bölgenin yarıçapı, α wake yayılımını ifade eder ve sürüklenme (entrainment) katsayısıdır. (2.17) eşitliğindeki aksenal indüksiyon faktörü, serbest akış ile rüzgar türbini arasındaki rüzgar hızının oransal azalmasını ifade eder.



Şekil 2.12: Eksenel indüksiyon (a)'ya göre maksimum thrust katsayısı (C_T) ile güç katsayısı (C_P) değerlerinin gösterimi [50]

Şekil 2.12’de, thrust katsayısı C_T ile güç katsayısı olan C_P ’nin eksenel indüksiyonla olan ilişkisini göstermektedir. Aralarındaki bağıntı ise eşitlik (2.18) ile (2.19)’da görülebilir. Betz teorisine göre maksimum C_P değeri 0,59 iken eksenel indüksiyon değeri 1/3 olmaktadır. C_T katsayısı, $a = 0,5$ iken parabolik simetrik bir yapıya sahiptir. Rotor thrust kuvvetinin aktüatör disk üzerindeki dinamik basınç kuvvetine eşit olduğu zaman C_T maksimum değeri olan 1'e eşit olur [50].

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (2.18)$$

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (2.19)$$

Türbinin arkasında kalan wake alanının yarıçap hesaplaması rotor yarıçapına bağlı olup, (2.20)’deki gibi ifade edilir.

$$r_1 = r_r \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (2.20)$$

Türbinin thrust katsayısı C_T ’nin hub yüksekliğindeki hıza (u_{hub}) bağlı denklemi (2.21)’de ifade edilmiştir [71] .

$$C_T = 3,5 \times \left(\frac{2u_{hub}^{-3,5}}{u_{hub}^2} \right) \quad (2.21)$$

Sürüklenme (entrainment) katsayısı olarak belirtilen α sayısı ampirik olarak şöyle hesaplanır;

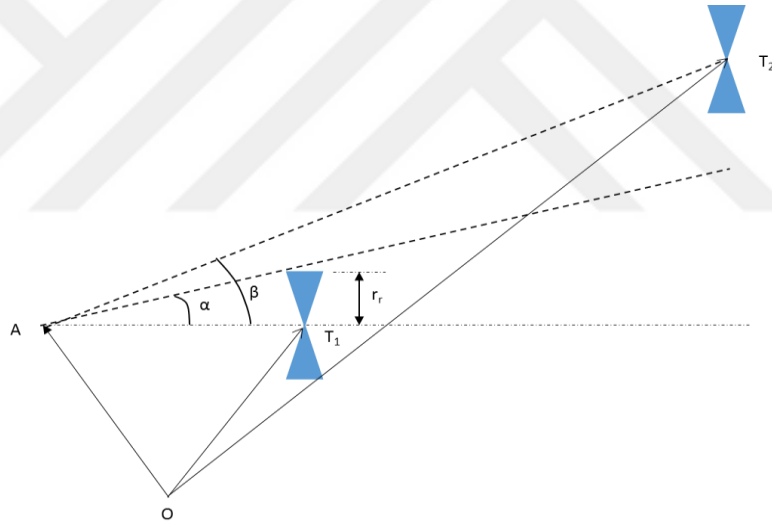
$$\alpha = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.22)$$

Burada, z türbinin hub yüksekliği iken z_0 yüzey pürüzlülüğünü ifade etmektedir. Wake etkisinden dolayı azalan hız, türbin sonrasında serbest akış rüzgar hızınının kesirli azalması olarak ifade edilir;

$$vel_def_{ij} = 1 - \frac{u}{u_0} = \frac{2a}{\left(1 + \alpha \frac{x_{ij}}{r_r}\right)^2} \quad (2.23)$$

Burada, vel_def_{ij} , türbin j'nin wake etkisi altında kalan türbin i'nin hızındaki düşüşü tanımlar. $x_{i,j}$ türbin i ile j arasındaki uzaklıktır ve verilen rüzgar yönü θ (derece) esas alınarak hesaplanır. Bu uzaklık denkleminin ispatı EK A'da verilmiştir

$$x_{i,j} = |(x_i - x_j) \cos \theta + (y_i - y_j) \sin \theta| \quad (2.24)$$



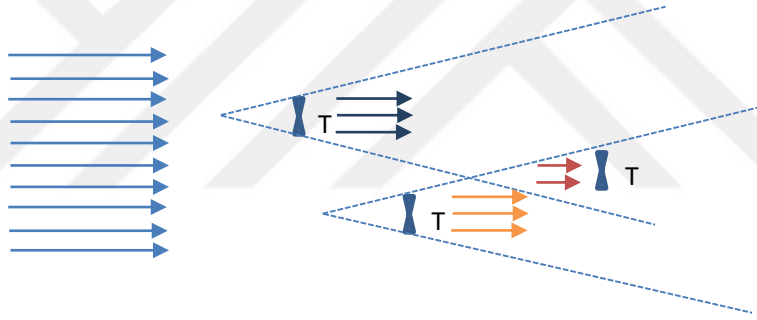
Şekil 2.13: Wake etkisi altında olmayan türbinin belirlenmesi

Saha içindeki rüzgar türbinlerinin birbirlerini etkilemesi rüzgarın hangi yönden estiğine göre değişir [33]. Jensen wake modeline göre, wake alanı konik şekilde gelişir. Şekil 2.13, sanal tepe noktası A olan ve T_1 ile T_2 rüzgar türbinleriyle birlikte oluşturduğu yarım koniyi ifade etmektedir. Koninin tepe noktası A ile T_1 türbininin merkez noktası arasındaki mesafe, yani koninin yüksekliği r_r/α olarak hesaplanır. A noktası ile T_1 'in kanat ucu arasındaki açı olan α açısı ise $\arctan(\alpha)$ olarak hesaplanır ve bu açı 0 ile $\pi/2$ arasında değerler almaktadır. (2.22)'de eşitliği verilen α değeri wake yayılımını ifade etmektedir ve hub yüksekliği ile yeryüzü pürüzlülüğüne

bağlı olarak değişmektedir. T_1 ve T_2 rüzgar türbinlerinin birbirini etkileyip etkilemediği ise β açısı hesaplanarak anlaşılabilir ve bu açının değerleri 0 ile π arasında değişmektedir. Rüzgarın batı yönünden estiği Şekil 2.13'e göre; β açısı α 'dan büyük olduğu için T_2 türbini T_1 türbinini etkilememektedir. β açısının α 'dan küçük olması durumunda ise T_2 türbini, T_1 türbininin wake etkisi altında kalmaktadır. Aşağıda verilen (2.25) denkleminde β açısının hesaplaması verilmiştir.

$$\beta_{ij} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(x_i - x_j) \cos \theta + (y_i - y_j) \sin \theta + \frac{r_r}{\alpha}}{\sqrt{\left((x_i - x_j + \frac{r_r}{\alpha} \cos \theta) \right)^2 + \left((y_i - y_j + \frac{r_r}{\alpha} \sin \theta) \right)^2}} \right\} \quad (2.25)$$

Büyük çaplı rüzgar santrallerinde bir türbin birden fazla türbinin wake etkisinde kalır. Bu durumda j. türbin etkisinde kalan i. türbin için kümülatif wake etkisi hesaplanır. Birden fazla türbinin gölgelenmesine maruz kalan arkadaki türbinin wake etkisinin gösterimi Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14: Çoklu wake gösterimi

Bu durumda i. türbinin hızı

$$u_i = u_0 (1 - \text{vel_def}_{ij}) \quad (2.26)$$

şeklinde hesaplanırken, birden fazla wake etkisindeki türbinin toplam hız kaybı formülü;

$$\text{vel_def}_i = \sqrt{\sum_{j=1, j \neq i, \beta_{ij} < \alpha}^N \text{vel_def}_{ij}^2} \quad (2.27)$$

şeklindedir.

3. RÜZGAR TÜRBİNİ KONUMLANDIRMASINA GENEL BAKIŞ

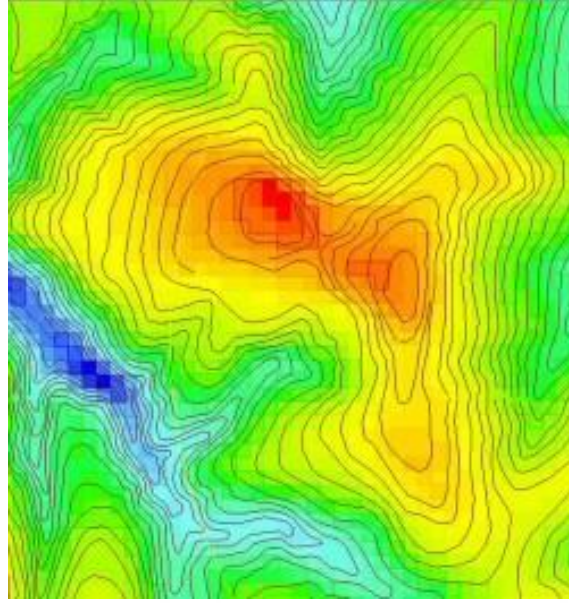
Rüzgar santralleri henüz proje aşamasında iken, türbinlerin hem mekanik dayanımlarına en uygun hem de yatırımcının hedeflerine cevap verebilecek en ideal konumlarının hesaplanması gerekmektedir. Konumlandırma işlemindeki en temel amaç bir türbinden (veya türbinlerden) maksimum net kazanç sağlamanın yanı sıra birim enerji maliyetini, gürültü, çevre ve görüntü etmenlerini de minimize etmektir. Bu işlemin kapsamı geniş bir coğrafi alanın planlanmasından her bir türbinin dikileceği koordinatların saptanmasına kadar detaylı ve geniş bir çalışma alanına sahiptir. Elbette ki rüzgar kaynağı, bir rüzgar türbini konumu seçerken üzerinde yoğunlaşılması gereken en belirgin faktördür. Fakat toprak hakkının elde edilmesi, gerekli izinlerin alınması, finans ve kamuoyu desteği, kullanılacak türbinleri satın alma, türbinlerin sisteme alınması gibi işlemler projenin gelişim aşamaları olup, santralinin hangi bölgede konumlandırılacağı kararının bir başka yönüdür.

3.1 Rüzgar Sistemlerinin Konumlandırılması

Amerika Rüzgar Enerji Birliği (AWEA)'nin 2008'de yayınladığı raporunda [72] tek bir türbinin konumlandırılması ya da büyük ölçekli rüzgar sistemlerinin konumlandırılmasını beş temel aşamada incelemiştir. Bunlar aşağıda sırasıyla incelenmiştir.

3.1.1 Coğrafi Alanın Saptanması

Rüzgar atlası ya da toplanan rüzgar verilerinin analizi sonucunda ortalama rüzgar hızı yüksek olan bölgelerin belirlenmesi konumlandırmanın ilk adımıdır. Şekil 3.1'de görülen rüzgar haritası en çok rüzgar alan bölgelerin belirlenebilmesi için kullanılır. Renkler bölgedeki rüzgar hızına işaret eder: kırmızı renk en yüksek ortalama rüzgar hızını mavi renk ise en düşük ortalama rüzgar hızını gösterir.



Şekil 3.1: Rüzgar atlası örneği

Bir alanın rüzgar potansiyelinin belirlenebilmesi için geniş bir yelpaze seçeneği vardır. Sağduyu iyi bir başlangıç noktasıdır, doğanın kendisi uygun alanları göstermede rehberlik edebilir; örneğin ağaçların belirli bir yöne doğru eğilmiş olmaları rüzgarın sıklıkla o yönden kuvvetli estiğini gösterir. Fakat bu tek başına yeterli değildir. Belirli bir alan için gerekli ölçüm direklerinin sayısı arazinin karmaşıklığına ve projenin büyüklüğüne bağlıdır. Ölçüm yapılacak yükseklik gelecekte dikilmesi beklenen türbinin hub yüksekliğinin en az 2/3'ü yüksekliğinde olmalıdır. Daha yüksekten yapılacak ölçüm belirsizliği azaltacak ve arazinin enerji tahminini iyileştirecektir. Ölçüm süresi mevsimsel önyargıları önlemek için en az bir yıl veya daha fazla olması gerekir [12].

3.1.2 Olası Bölgelerin Seçimi

İlk aşamada belirlenen alanlardaki rüzgarlı bölgelerin türbinlerin kurulum ve yerleştirilmesinin uygunluğu bu aşamada belirlenir. Hem mühendislik açısından ve hem de kamuoyu tarafından kabullenilmesi bakımından bu aşama coğrafik, sosyal ve kültürel öğeleri de kapsar. Topografik kısıtlar, ekolojik gözlemler ve rüzgar kaynağının bilgisayarla modellenmesi bu aşamada yapılır.

3.1.3 Olası Bölgelerin Ön Değerlendirilmesi

Bu aşamada, her bir potansiyel aday bölge ekonomik imkanlara göre sıralanır. Daha sonra aralarındaki en uygun bölgeler çevresel etmen, kamuoyu desteği, güvenlik ve rüzgar türbini bölgesinin uygunluğunu olumsuz etkileyebilecek her türlü operasyonel problemler göz önüne alınarak incelenir.

Bölgenin uygunluğunu olumsuz yönde etkileyecek problemler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

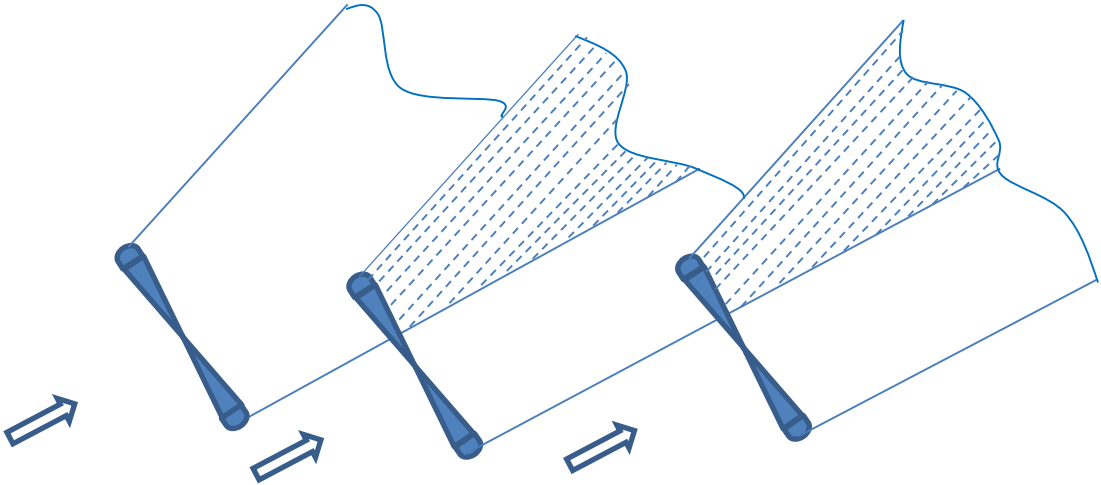
- Ekonomik Sorunlar: Ulaşım hakkı maliyeti, enerji üretim maliyeti, yerel vergiler ve trafo merkezi maliyeti gibi
- Topografik Sorunlar: Bölgenin aşırı eğimli olması ve coğrafyanın yol yapımını zorlaması
- İzinler Sorunu: Her ülkenin kendi mevzuatına göre değişen ama genellikle devletten alınması gereken birçok izin vardır.
- Coğrafik Sorunlar: Türbin temelinin tasarımını zora sokacak toprak/kaya yapısı, erozyon olasılığı, fay hattına yakınlık gibi
- Çevresel Sorunlar: Çevre açısından korunması gereken bölgeler, kuş göç yollarının üzerinde olması ve nesli tükenmekte olan canlıların yaşadığı bölgeler gibi
- Kamuoyu Desteği Sorunu: Görsel ve gürültü etkisi, konutlara yakınlık, kamunun güvenliği, kültürel, tarihsel veya arkeolojik açıdan önem arz eden bölgeler gibi
- Güvenlik Sorunu: Popülasyonu yüksek bölgelere yakınlık, türbinlerin elektromanyetik telekomünikasyon sinyalleri ile karışması gibi
- Şebeke Bağlantı Sorunları: Güç hatlarına yakınlık, civardaki güç hatlarının voltaj ve akım kapasitesi gibi

3.1.4 Son Değerlendirme

Ön değerlendirmeyi geçen her bir bölge için detaylı rüzgar ölçümleri yapılır. Bu adımda hakim rüzgar yönü ve rüzgar hızı ölçümlerinin yanında türbülans ve rüzgar kırılması ölçümleri de yapılır.

Belirli bir türbin için konumlandırılma yapılırken sadece rüzgar hızı değil, başka parametreler de göz önüne alınmalıdır. Bunların arasında en önemli parametrelerden biri türbülans şiddetidir. Türbülans şiddeti, rüzgarın genellikle 10 dakika içinde ne kadar değiştiğini ölçer. Türbin üzerindeki birçok önemli parçanın yorgunluk yüklerine sebep olan türbülans olduğu için, bölgenin ne kadar türbülanslı olduğu bilgisi bu aşamada çok büyük önem taşımaktadır.

Türbülansı oluşturan iki farklı kaynağın birbirinden ayırt edilmesi gerekir. Birincisi coğrafik özelliklerden oluşan türbülans, ki buna ortam türbülans yoğunluğu denir. İkincisi ise Bölüm 2’de anlatılan ve Şekil 3.2’den de görüleceği gibi komşu türbinlerin oluşturduğu gölgeleme sonucu oluşan wake türbülansıdır. Ortam türbülansına sebep olarak ormanlar, tepeler, uçurumlar veya termal etkiler olabilir. Böylece, ortam türbülansı kritik yeryüzü şekillerinden kaçınarak azaltılabilir. Fakat wake kaynaklı türbülansın ortam kaynaklı türbülans yoğunluğundan çok daha fazla etkisi vardır. Türbinler arası mesafenin azaltılması wake türbülansını artıracaktır, bu yüzden iki türbin arasındaki uzaklığın belirli bir sınırdan olması gereklidir. Türbinlerin sık yerleştirilmesi durumunda aşırı yüklerin yaratacağı malzeme yorgunluğu türbinlerin çalışma ömürlerini etkileyecektir. Rüzgar türbinlerinin ömrünü kısaltmamak adına rüzgar sektörü yönetimi uygulanarak wake türbülansına düşen bazı türbinler sistemsel olarak kapatılabilir [73].

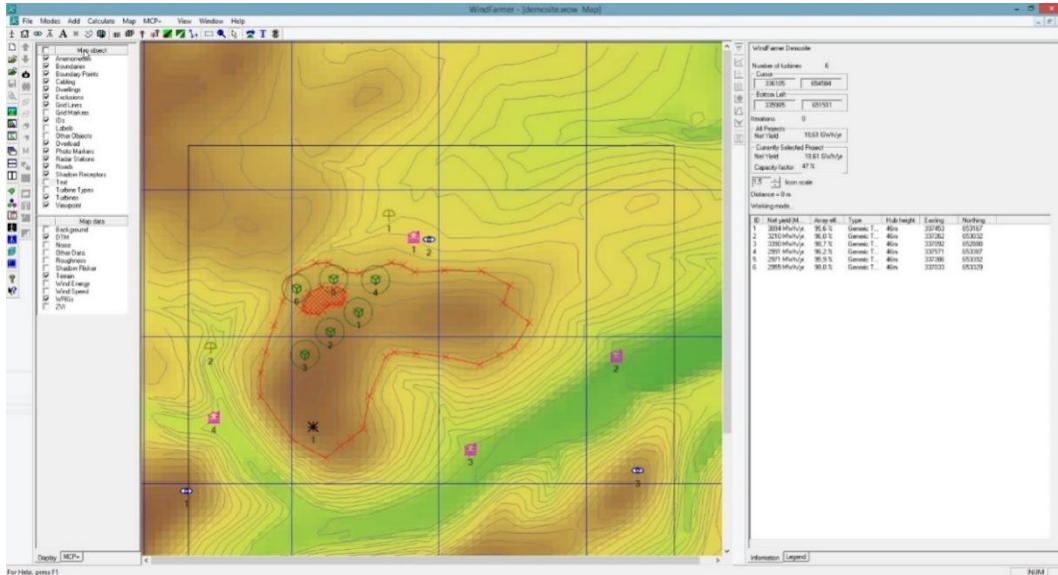


Şekil 3.2: Rüzgar türbinlerinin birbirini gölgelemesi ve wake türbülansının oluşumu

3.1.5 Mikro-konumlandırma (Micrositing)

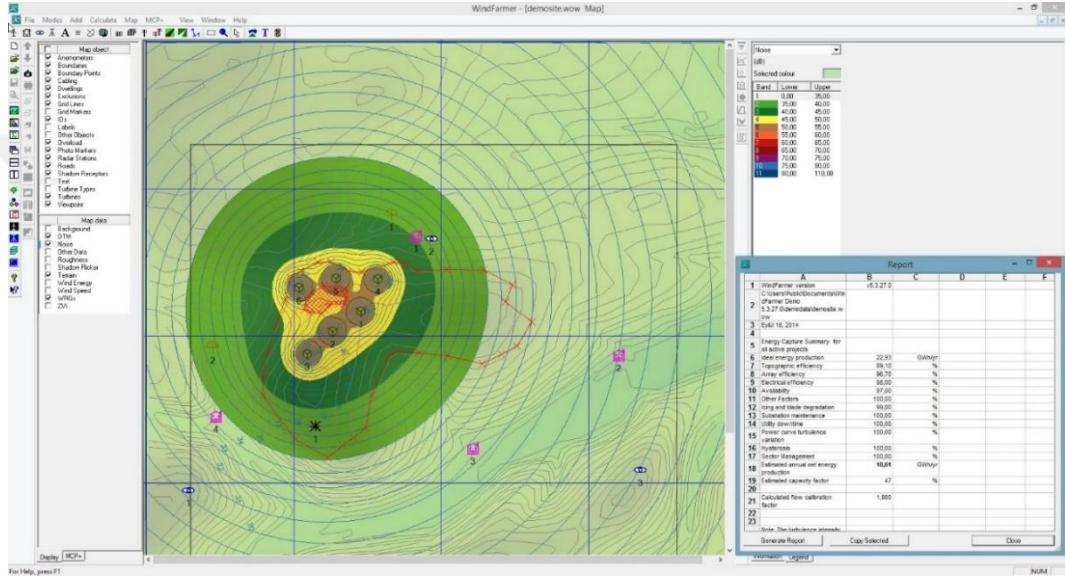
Rüzgar santrallerinde sisteme alınması planlanan her bir türbinin konumlandırılması ve bölgenin yerleşim planının yapılması işlemine mikro-konumlandırma (micrositing) denir. Bu işlemde, tanımlanacak kısıtlar çerçevesinde rüzgar santralının yerleşimi optimize edilir. Böyle bir sürecin amacı rüzgar santralının enerji üretimini maksimize ederken, altyapı ve işletme maliyetlerini minimize etmektir. Birçok projenin ekonomik duyarlılığı altyapı maliyetlerinden çok enerji üretimine odaklıdır. Dolayısıyla rüzgar santrallerinin yerleştirilmesi problemlerinde baskın tasarım parametresi olarak enerji üretimini kullanmak daha uygundur.

Aday bölgeler arasından en uygun bölge seçildikten sonra her bir türbinin yerleştirileceği kesin konum ve enerji üretimlerine karar verilmelidir. Rüzgar bölgesini ve türbinler arasındaki çeşitli aerodinamik bağlantıları modelleyen birçok bilgisayar programı vardır ve bunlar sayesinde mikro-konumlandırma işlemi yapılabilmektedir. Coğrafi olarak bölgenin pürüzlülüğü arttıkça bu modellerin doğruluğu da azalmaktadır. Bu tür karmaşık yapıdaki bölgelerden elde edilecek detaylı ölçüm verileri yerel rüzgar bölgesindeki mikro-konumlandırma işleminin doğruluğu için önemlidir.



Şekil 3.3: WindFarmer programı ekran görüntüsü

Mikro-konumlandırma için rüzgar santrali tasarımı ve analizi kodları optimum bir yerleşim planı sunabilmek için bölgenin rüzgar verisini, kullanılacak türbinin özelliklerini ve bölgenin çeşitli kısıtlarını (gürültü, yerleşim birimlerine uzaklık gibi) göz önünde bulundurur. Genellikle bölgenin eş yükselti eğrisiyle gösterilen dijital haritası kullanılır. Bu programların çıktısında her türbinin lokasyonu, gürültü çizgileri, her bir türbinin ve tüm türbinlerin tahmini enerji üretimleri ve bazı finansal hesaplamalar vardır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4, WindFarmer programından alınan ekran görüntülerini göstermektedir.



Şekil 3.4: WindFarmer programı ekran görüntüsü – gürültü çizelgesi ve rapor

3.2 Kullanılan Ticari Yazılımlar

Rüzgar kaynağı değerlendirmesi ve mikro-konumlandırma üzerine yatırımcılar tarafından en çok kullanılan ticari yazılım paketleri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

OpenWind [74], AWS Truepower tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu bir yazılım olup rüzgar santrallerindeki türbinlerin konumlandırılmasını optimize etme amaçlı geliştirilmiş bir programdır. Amaç fonksiyonu enerji üretim maliyetini minimize etmek olup, kullanılan optimizasyon metoduna dair daha fazla bilgi verilmemiştir. Katic model ile wake etkisi hesaplaması, belirsizliklerin değerlendirilmesi ve gölgeleme modülleri bu programda yer almaktadır.

WAsP (the Wind Atlas Analysis and Application Program) [75] programı, DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physics bölümü tarafından geliştirilmiş olup, en çok kullanılan yazılımdır. Yazılımın asıl amacı bölgenin rüzgar kaynağının değerlendirilmesidir. WAsP yazılımı, veri analizlerini, rüzgar hız verilerinin iki parametrelili Weibull dağılımına uygun bir dağılım gösterdiğini varsayarak yapmaktadır. Bu yazılım, rüzgar verisi, bölge pürüzlülük verileri, yakın çevre engel verileri ve bölgenin topografyası olmak üzere dört değişik girdi bilgisini kendi alt modellerinde değerlendirerek, bölgesel rüzgar atlası istatistiklerini hesaplamaktadır [76]. Bu programda, meteoroloji istasyonlarının yapmış olduğu ölçüm verileri kullanılır. WAsP, rüzgar potansiyelinin değerlendirmesini küçük ölçekli akış alan analizi ile tahminler. Fakat bu yöntemin doğruluğu, bölge pürüzlülüğü fazla olan engebeli bölgeler söz konusu olduğunda kanıtlanmamıştır. Bu yüzden son sürüm olarak çıkarılan WAsP 11, bu tür karmaşık yapıdaki bölgelerde rüzgar karakteristiğini tespit etmek için CFD kullanan bir modüle sahiptir. Ayrıca bu program, rüzgar santralının yerleşim planını yaparken enerji salınımının değerlendirmesinde Katic modeline göre hesaplanmış wake etkisini hesaba katar. Bunların dışında aşırı iklim şartları, türbülans ve rüzgar kırılması analizi yapabilen modülleri de vardır.

WindFarmer [77] GL Garrad Hassan enerji danışmanlık firması tarafından geliştirilmiş ve piyasaya sunulmuştur. Rüzgar santral yerleşiminin optimizasyonunu yatırımın geri dönüşünü maksimize ederek sağlamaktadır. Wake etkisini, Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) tabanlı CFD ile hesaplamaktadır. WindFarmer programı bir takım modüllerden meydana gelmektedir. Bu modüllerden bazıları rüzgar santrali temel yerleşim tasarımı ve optimizasyonu modülü olan temel modül; animasyonları hazırlamak için görselleştirme modülü; net enerji çıktısı, türbin sayısı, türbin tipi, kablo veya yol gibi bilgilerin maliyet hesabı için finans modülü; Eddy Viskozite ile hesaplanan türbülans yoğunluk modülü; rüzgar santralının elektrik ağını tasarlamaya yönelik elektrik modülü; gölgeleme modülü ve MCP modülü (measure – correlate - predict / ölç – ilişkilendir - tahmin et) olarak sıralanabilir.

WindPro [78] programı, Danimarkalı rüzgar enerjisi danışmanlık firması olan EMD tarafından geliştirilmiştir. Optimize modülü ile rüzgar santralının yıllık enerji üretimini optimize ederek optimal rüzgar türbini yerleşimlerini yapmaktadır. Wake etkisini Katic modele göre analiz etmektedir. Bu yazılım, santralin rastgele mi

(optimizasyon metodu bölgeden maksimum elde edilebilecek enerjiye ulaşana kadar türbin eklenerek işler) yoksa simetrik mi *(türbinler belirli mesafe ile aralıklandırılır, bu işlemdeki optimizasyon türbinlerin konumlandırılmasındaki açılardır)* tasarlanması gerektiğini de optimize eder. Santralin finansal açıdan değerlendirilmesini yaparken Loss & Uncertainty modülü ile enerji kayıpları faktörlerini de dahil ederek hesaplama yapmaktadır. Programın sahip olduğu eGrid modülü ile şebeke planlaması ve WindBank modülü ile finansal analizler yapılabilir. Decibel ve Shadow gibi modüller gürültü silme modülü olup, gürültü etkisi değerlendirilir ve gürültü kısıtlarını sağlayan bir yerleşim planı optimize eder.

Benzer bir uygulama olan WindSim [79], Arne Gravdahl tarafından Norveç Rüzgar Atlası projesi çerçevesinde geliştirilmiş bir rüzgar santrali tasarımı yazılımıdır. Rüzgar kaynağı değerlendirmesinde 3D-RANS çözücülü CFD modeli kullanılmaktadır. Bu programdaki asıl amaç, rüzgar santralinin tasarımı sırasında özellikle düz olmayan, engebeli sahalardaki iyi rüzgar hızı koşullarına sahip ve aynı zamanda düşük türbülanslı yerleri kesin olarak saptamaktır. Bu yazılım ile türbülans, değişken hava yoğunluğu, topoğrafya ve yüzey şekillerinin rüzgar hızına olan etkileri daha tutarlı bir şekilde modellenmektedir [76].

Yukarıda bahsi geçen WAsP ve WindSim programlarının asıl amacı, rüzgar projelerinde rüzgar kaynağının değerlendirilmesidir. Fakat her ikisi de yatırımcıya veya tasarımcıya rüzgar santrallerinin tasarlanması konusunda yerleşim planı girilen santralin yıllık enerji üretimi hesaplamasında yardım eder, santralin yerleşim planını optimize etmek bu programların asıl amacı değildir [7]. Santrallerdeki yerleşim düzenini optimize etme amaçlı geliştirilen programlar arasında OpenWind, WindFarmer, WindPro sayılabilir.

Belirli modeller ve hesaplamaları temel alan bu programlar farklı amaç fonksiyonu ile problem tanımlandığında istenilen cevabı verememektedir. Amaç fonksiyonunun aynı olması durumunda dahi bölgeye has karşılaşılabilecek yeni kısıtlar çıktıkça ve/veya bölgenin yapısı karmaşıklıklaştıkça belirsizlikler oluşmakta ve söz konusu yazılımlar optimal çözüm sunamamaktadır. Bu tür projelerde kullanılacak çeşitli optimizasyon araçları ile öngörülen enerji üretiminde önemli kazanımlar sağlayacak bir konumlandırma yapılabilir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, hâlihazırdaki santrallerin yeniden konumlandırılması sayesinde kazanılacak %1'lik

enerji üretimi, 50 MW'lık rüzgar santrali için yıllık 50000 \$ ila 100000 \$ gelir artışı sağlayacaktır [80].

Aşağıdaki özet tablo, yukarıda bahsi geçen ticari yazılımların temel özelliklerini ve sınırlarını özetlemektedir.



Tablo 3.1: Rüzgar santrali tasarımı yapan ticari yazılımların karşılaştırılması

| Yazılım | Optimizasyon Amacı | Tasarım Parametresi | Tasarım Kısıtları | Tasarım Konuları | Limitleri |
|--|--|---|--|---|---|
| OpenWind [74] (AWS Trueower) | Enerji Maliyeti minimizasyonu | Rüzgar türbini koordinatları | Türbin yerleşimi için saha kısıtları, gürültü seviyeleri | Wake ve türbülans kayıpları, gölge titremesi, görsel etki, belirsizlik analizi | Elektriksel kayıplar dikkate alınmaz |
| WAsP [75] (DTU) | - | Önceden tanımlı rüzgar türbin koordinatları | - | Wake kayıpları, eşzamanlı olarak farklı türbin modelleri kullanılabilir, karmaşık arazilerdeki yüklerin tahmini | Optimizasyon algoritması yoktur, elektrik kayıpları dikkate alınmaz |
| WindFarmer [77] (GL Garrad Hassans's) | Enerji Üretimi maksimizasyonu | Rüzgar türbini koordinatları | Çevresel kısıtlar, santral saha sınırları, yasaklı bölgeler, topografya | Türbülans yoğunluğu, çevresel ve görsel etkiler, gürültü seviyeleri, gölge titremesi, belirsizlik analizi, wake kaybı, türbin yükleri, elektriksel kayıp hesapları, reaktif güç üretimi | Toplama sistemi düzeninin optimizasyonu yok |
| WindPRO [78] | Enerji Üretimi maksimizasyonu ya da üretim kaybı minimizasyonu | Rüzgar türbini koordinatları | Türbinler arası minimum mesafe, türbin yerleşimi için saha kısıtları | Gürültü seviyeleri, görsel etki, gölge etkisi, wake ve türbülans kayıpları, farklı türbin modelleri eşzamanlı olarak kullanılabilir, elektriksel kayıp hesapları, belirsizlik analizi | Yerleşim planının geometrik şekillerle sınırlı olması, türbinlerin aşamalı olarak eklenmesi |
| WindSim [79] | Kâr maksimizasyonu | Rüzgar türbini koordinatları | Çevresel kısıtlar, santral saha sınırları, yasaklı bölgeler, IEC kısıtları | Optimum türbin sayısı, arazinin rüzgar üzerindeki etkileri, wake ve türbülans kayıpları | Toplama sistemi tasarımı yok, elektrik kayıpları dikkate alınmaz |

4. PROBLEM TANIMI, VARSAYIMLAR VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

4.1 Problem Tanımı ve Varsayımlar

Tez çalışmasının uygulama kısmında, Bandırma Enerji ve Elektrik Üretim A.Ş. tarafından işletilen ve 89,7 MW kurulu güce sahip rüzgar santralinde, mevcut 29 türbinin birbirleriyle olan aerodinamik etkileşimini en aza indirecek ve maksimum güç üretimini sağlayacak yerleşim düzeninin optimizasyonu çalışılmıştır. Santrale ait tüm veriler bilgi değişimi ve gizlilik anlaşması çerçevesinde alınmış olup, tez içerisinde sunulan bilgiler belirli kısıtlar altında paylaşılmıştır. Bu veriler; 80 metre yüksekliğinde ölçüm istasyonundan bir yıl süreyle kaydedilen onar dakikalık rüzgar hız ve rüzgar yön verileri, lisanslı saha sınırları, türbinlerin konumları ve her türbinin yıllık enerji üretim bilgilerinden oluşmaktadır.

Bu problemin çözülmesinde çeşitli önermeler ve kabuller yapılmıştır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır;

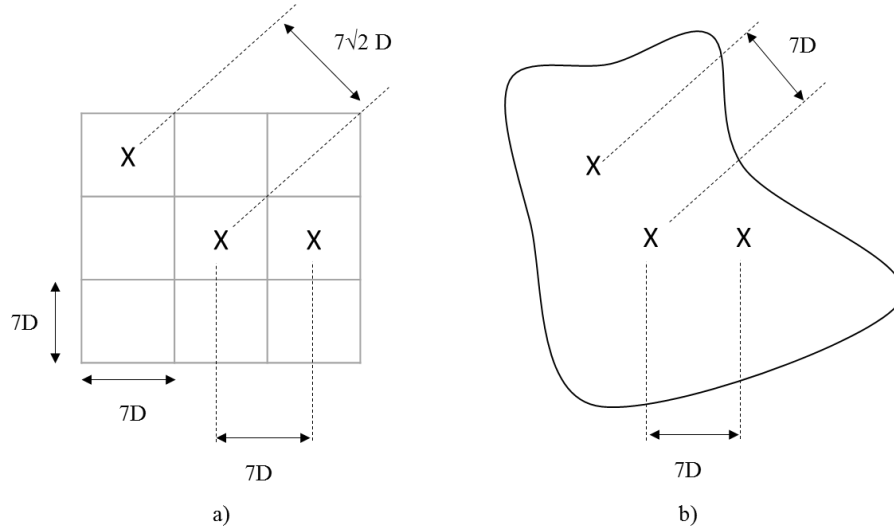
- Optimizasyon işlemi, amaç fonksiyonun tanımı ile başlar. Literatürde bu problem için kullanılan en sık fonksiyonlar enerji üretimini ve karlılığı maksimize etmek, enerjinin maliyetini minimize etmek ya da bunların kombinasyonları şeklindedir [7]. Bu çalışmada, türbinlerin birbirleriyle olan etkileşiminden kaynaklanan rüzgar hız kayıplarını azaltarak, santralin yıllık toplam gücünü maksimize etmek amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

$$\max. \sum_{i=1}^{\theta} \sum_{j=1}^{29} P_j(\overline{u_{o,i}}) f_i$$

f_i , i yönünden esen rüzgarın frekansı, $\overline{u_{o,i}}$, i yönünden esen hub yüksekliğindeki saatlik ortalama rüzgar hızı, θ rüzgar sektör sayısı, $P_j(\overline{u_{o,i}})$ ise j . türbinin $\overline{u_{o,i}}$ hızında ürettiği gücü ifade etmektedir. $\overline{u_{o,i}}$, hub yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı olup, türbinin konumlandırıldığı yüksekliğe ve wake alanından doğacak kayıplara göre düzeltilmiş hızdır.

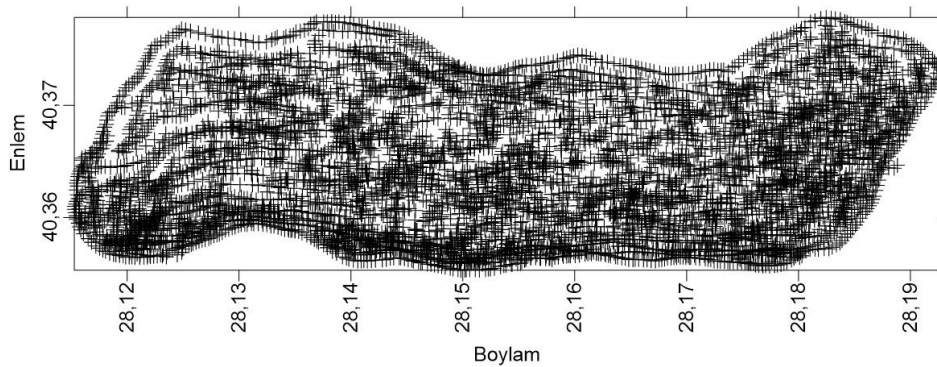
- Bu çalışmada amaç fonksiyonu, sadece güç üretimi üzerine kurulmuş olup, ekonomik parametreler dahil edilmemiştir. Rüzgar santrallerinde ekonomik performansın ölçümü için; türbin maliyetleri, inşaat ve elektrik altyapı maliyetleri, yıllık bakım ve işletme maliyetleri, enerji satış fiyatı, belirli bir süre boyunca santralin ürettiği net gelir, yıllık faiz, elden çıkarma maliyeti gibi birçok veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu verilerin bir kısmının her yıl değişkenlik göstermesi ve gizlilik açısından temininin zor olmasından dolayı, maliyet etkeni bu çalışmada amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir.
- Rüzgar santrali yerleşim optimizasyonu yapılırken aşağıdaki sıra izlenmiştir;
 - Ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda rüzgar yönleri 22,5°'lik eşit aralıklarla toplam 16 sektöre bölünmüştür,
 - 16 yönden esen rüzgarın ortalama hızları hesaplanmıştır,
 - Sahada kullanılacak olan V90.3MW model türbin için 16 yöne göre net kapasite faktörleri hesaplanmıştır,
 - 29 adet türbin yerleşimi için önce sezgisel bir algoritma ile çeşitli yerleşim düzenleri yani çözüm kümeleri türetilmiştir. Bu çözüm kümelerinin hiç biri, sahanın optimum çözümü değildir, sadece iyi başlangıç çözümlerinin olduğu bir kümedir. Problemin optimizasyonu için meta-sezgisel bir yöntem kullanılmıştır. Türetilen çözüm kümeleri meta-sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma ile çeşitli parametreler ve operatörler kullanılarak en optimal yerleşim düzenine ulaşılmıştır. Sahanın en optimal çözümü, maksimum güç üreten yerleşim düzenidir. Bunun için algoritma içinde hız, güç, wake kayıpları hesaplanmış ve en uygun değeri veren yerleşim seçilmiştir.
- Algoritma içinde yapılan güç hesaplamalarda izlenen yol özetle aşağıdaki gibidir;
 - Konumları belli olan türbinlerin rüzgar hızı, hub yüksekliğine göre yeniden hesaplanmıştır.
 - Her bir türbinin, 16 farklı sektörden esen rüzgara göre wake etkisinde olup olmadığı (2.25) eşitliği ile bulunmuştur. Eşitliğin sonucunda üç olası durum söz konusudur;
 - i. *Türbin wake etkisi altında değildir:* Bu durumda türbinin konumlandırıldığı yükseltiye ve 16 farklı rüzgar yönüne göre ortalama rüzgar hızları yeniden hesaplanır ve üretim gücü bulunur.

- ii. *Türbin, başka bir türbinin wake etkisi içindedir:* Bu durumda (2.17) eşitliği ile wake etkisinde kalan türbinin rüzgar hızı ve (2.23) eşitliği ile de rüzgar hızındaki azalma miktarı hesaplanır.
- iii. *Türbin, birden fazla türbinin wake etkisi altındadır:* Bu durumda (2.26) eşitliği ile türbine giren rüzgar hızı hesaplanır. (2.27) eşitliği ile türbinin toplam rüzgar hız kaybı hesaplanır.
- o Sahadaki toplam 29 türbinin 16 yönden esen rüzgara göre rüzgar hızları hesaplamaları tamamlanmış ve hepsinin kümülatif toplamı sahadan elde edilen güç olarak bulunmuştur.
- Sahanın coğrafi özellikleri, topografik modellenmesi, varolan türbinlerin konumları ve saha sınırları analiz edilmiştir. Problem, birçok çalışmada olduğu gibi iki boyutlu kartezyen koordinat sistemi yani (x,y) şeklinde değil, yükseklik faktörü de eklenerek üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi yani (x,y,z) olarak ele alınmıştır. Bunun sebebi, “yükseklikle artan rüzgar hızı” olgusuna dayanarak türbinlerin yerleşimini planlamaktır. Türbinler, veri seti içindeki minimum mesafe kısıtını sağlayacak en yüksek noktalara yerleştirildiğinde, maksimum gücü üretecekleri kabul edilmiştir.
- Önceki çalışmalarda [9,10,12,13,15], türbinlerin yerleştirileceği araziler kare, dikdörtgen ya da daire gibi formları belirli bir şekilde ve iki boyutlu olarak tanımlanmıştır. Belirlenen bu saha, iki türbin arasında olması gereken minimum mesafe boyutunda karelere bölünerek türbinler her bir karenin ortasına yerleştirilmektedir. Örneğin; Şekil 4.1’de görüldüğü gibi saha 21Dx21D boyutlarında bir kare olarak tanımlanmış, belirlenen minimum mesafe olan 7D boyutunda karelere bölünmüş ve 3x3’lük kesikli bir saha elde edilmiştir. Bu alana en fazla dokuz türbin yerleştirilebilmektedir. Fakat, gerçek bir RES’in bu formda ifade edilmesi gerçekçi olmadığı gibi, kesikli ifade edilmesi çözüm kümesini kısıtlamaktadır. Bu çalışmada önerilen durum ise sahanın kesikli bir çözüm alanı değil sürekli bir çözüm alanı olmasıdır. Böylece, sahadaki her nokta, türbin yerleştirebilmek için aday nokta durumunda olup, 7D minimum mesafe kısıtını sağlayarak daha fazla türbin yerleşimine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.1: a) Önceki çalışmalarda yapılan kesikli saha ile b) bu çalışmada yapılan sürekli saha gösterimi

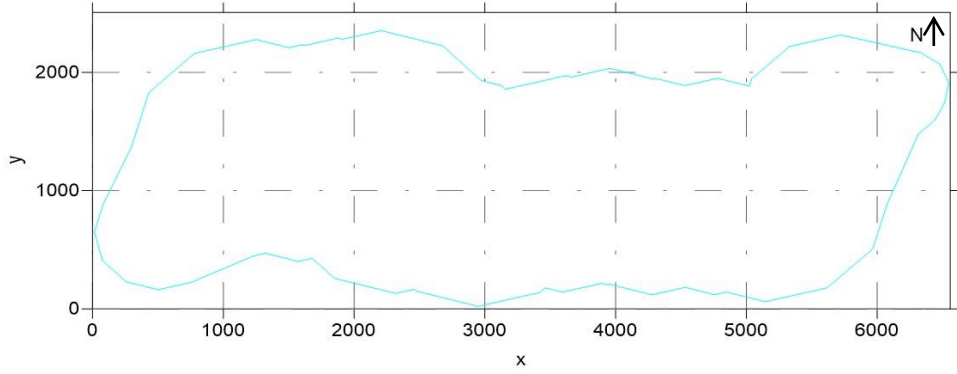
- Santral sahasının yeryüzü modellemesinin yapılabilmesi için saha sınırlarını kapsayan topografik bir haritadan faydalanılmıştır. Bu haritanın, ArcGIS programı sayesinde taranması ile saha içerisindeki noktaların enlem ve boylam gibi coğrafi koordinat bilgileri ve o noktalara ait yükseklik değerleri ile sahaya ait veri seti oluşturulmuştur. ArcGIS programı, 1/50.000 ölçekli haritadan sahanın modellemesinde kullanılacak toplamda 6323 noktanın enlem, boylam ve yükseklik bilgilerini oluşturmuştur. Bu veriler kullanılarak Surfer v14 programı ile Bandırma RES sahasının hem üç boyutlu modeli hem de iki boyutlu eşyüksekti haritası oluşturulmuştur. Şekil 4.2’de, santral sahasının sınırlarını kapsayan tarama noktaları görülmektedir.



Şekil 4.2: Bandırma RES saha sınırları içinde taranan 6323 noktanın gösterimi

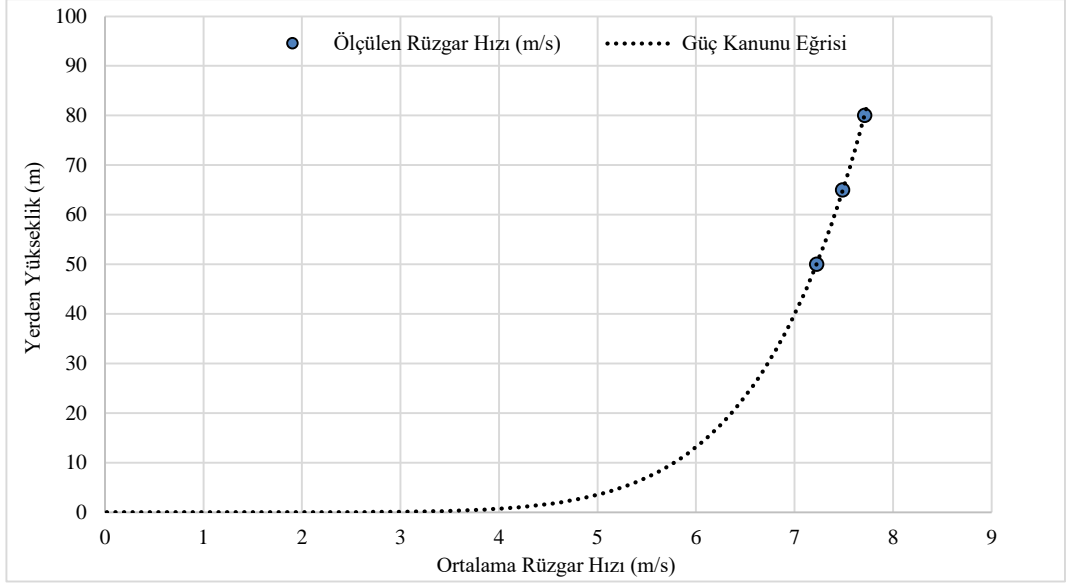
Saha sınırları içerisinde kalan her noktaya, hiç bir kısıt olmaksızın türbin yerleştirilebileceği kabul edilmiştir.

- Hem güç hesaplamalarında kullanılacak mesafe değerlerinin, hem de rüzgar hızlarının her yüksekliğe göre yeniden hesaplanmasında kullanılacak yükseklik değerlerinin metre cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden, veri setinde yer alan ve açısız değerleri gösteren enlem ile boylam verileri, yükseklik değeri gibi metre cinsinden bir ifadeye dönüştürülmüştür. Böylece, tarama sonunda harita projeksiyonuna göre elde edilen enlem, boylam ve yükseklik verileri, düzlem üzerine aktarılarak öklit geometrisine uygun üç boyutlu kartezyen geometrisine dönüştürülmüştür. Saha sınırının en batı noktası, x ekseninde sıfırıncı metreye ve en güney noktası ise y ekseninde sıfırıncı metreye gelecek şekilde hesaplamalar yapılmış ve öklit geometri modeline uygun kartezyen koordinat sisteminde saha sınırları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



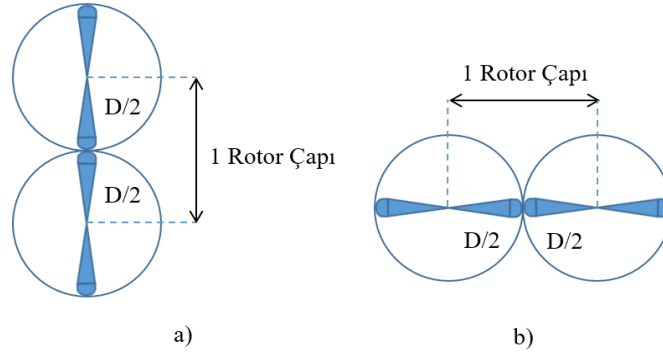
Şekil 4.3: Santral sahasının kartezyen koordinat düzeninde gösterimi

- Meteorolojik ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda, saha içerisindeki her yükseklik noktası için rüzgar hızları yeniden hesaplanmıştır. Türbinlerin yerleştirildiği yükselti değerlerine göre, rüzgarın hub yüksekliğindeki hızları Hellman güç yasasına göre düzeltilmiştir. 80m, 65m ve 50m'den alınan ölçümler doğrultusunda sahanın pürüzlülük katsayısı α ; 0,143 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4'te ölçüm verilerinden çıkarılan yatay rüzgar hız profili görülmektedir.



Şekil 4.4: Ölçüm istasyonundan alınan veriler doğrultusunda yatay rüzgar hız profili

- İki türbin arası minimum mesafe yatayda ve dikeyde yedi rotor çapı yani $7D$ kabul edilmiştir. Rüzgarın hakim yönüne göre ve sahanın yüksek noktalarına göre yerleştirilen türbinler arasında en az 630m mesafe kısıtı konulmuştur. Mesafe ölçümleri iki türbinin merkezden merkeze olan uzaklıkları ile yapılmakta olup, Şekil 4.5'te hem yatayda hem de dikeyde mesafe ölçümlerine dair gösterim verilmektedir.

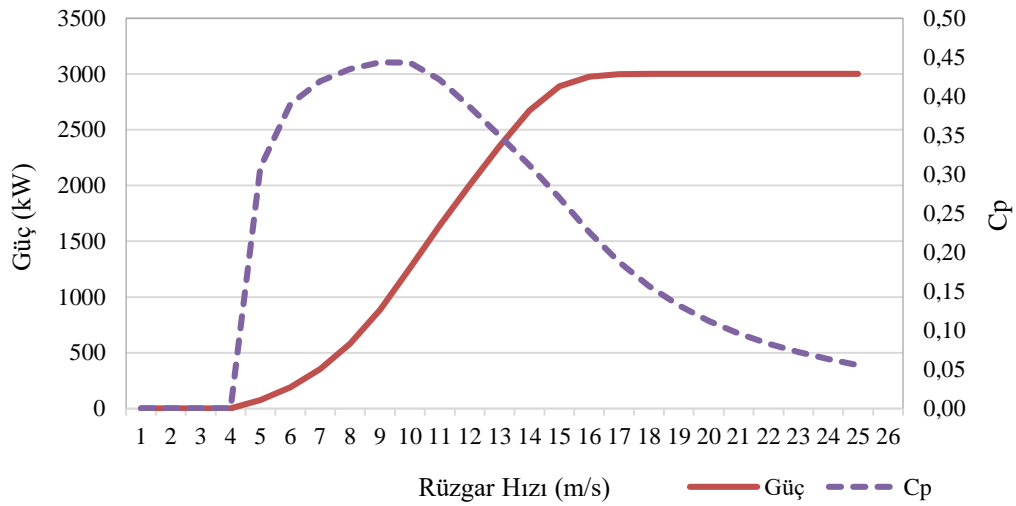


Şekil 4.5: a) Dikey düzlemde türbinler arası mesafe b) Yatayda türbinler arası mesafe

- Bu çalışmada, Jensen'in analitik wake modeli kullanılmıştır. Wake bölgesi içindeki rüzgar hızı simetrik eksensli olarak kabul edilmiştir. Wake, türbinin rotorundan hemen sonra genişlemeye başlamaktadır ve wake bölgesi içindeki rüzgar hızı doğrusal olarak azalmaktadır. Bu çalışmada türbinlerin üzerinde bazı nedenlerden dolayı oluşan mekanik ve aerodinamik yükler dikkate

alınmamıştır. Saha içerisindeki rüzgar türbülansı dikkate alınmamış olup, serbest akış içinde rüzgar hızının homojen olduğu varsayılmıştır.

- Bandırma RES'te kullanılan iki tip rüzgar türbini vardır; 20 adet Vestas marka 3 MW'lık V90-3.0 ve 9 adet 3.3 MW'lık V112-3.3. Bu çalışmada aynı fiziki ve performans özelliklere sahip, tek bir tip rüzgar türbini kullanımı kabul edilmiş ve 29 adet V90-3.0 model rüzgar türbinin yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak türbinin rotor çapı 90m, süpürme alanı $6362m^2$ ve hub yüksekliği 80m'dir. Devreye girme hızı 4m/s iken türbin nominal çalışmaya 15m/s ile başlamaktadır, 25m/s'de ise türbin devreden çıkmaktadır. Rüzgar hızlarına karşılık gelen türbine ait güç üretim eğrisi ve kapasite faktörleri grafiği Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Vestas V90-3.0 model türbinin güç ve kapasite faktörü eğrisi

- Problemin çözümü için, önce sezgisel ve daha sonra meta-sezgisel yöntem kullanılarak hibrit bir yaklaşım öngörülmüştür. Sezgisel yöntem olarak, ağgözlü algoritma kullanılmıştır. Buradaki amaç, sadece türbinler arasındaki minimum mesafeye bakarak türbinlerin saha içindeki en yüksek yerlere konumlandırılmasını sağlamayarak çeşitli çözüm kümeleri oluşturmaktır. Bu çözüm kümeleri, rüzgar kırılması olgusuna göre temellendirilmiştir. Yani, yükseklik arttıkça rüzgar hızı da artacak ve böylece türbinden elde edilecek güç de artacaktır varsayımı yapılmıştır.

Daha sonra, meta-sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma kullanılarak yerleşim düzeninin optimizasyonu yapılmıştır. Genetik algoritma, türbin konumlandırma problemlerinde en fazla kullanılan meta-sezgisel yöntemdir. Fakat; önceki çalışmalarda, genetik algortmada popülasyon rastgele noktalardan seçilirken bu çalışmada popülasyonu oluşturmak için ilk türbin rastgele bir noktaya yerleştirilmiş ve geri kalan 28 türbin ise yüksekliğe göre minimum mesafe kısıtını sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Türetilen çözüm kümeleri optimal çözümler olmayıp, anlamlı çözüm kümeleridir. Rastgele oluşan noktalardan ziyade, anlamlı çözüm kümeleri ile başlamak, algoritmanın optimal sonuca daha hızlı ulaşmasını sağlamaktadır. Geliştirilen tüm algoritmalar MATLAB R2015a programında kodlanmış ve bulunan optimum konumlandırma üzerinden türbinlerin güç üretimleri ve güç kayıpları hesaplanıp, mevcut durumla karşılaştırılmıştır. Algoritmalara dair detaylar, Bölüm 4.4'te verilmiştir.

- Güç hesaplamaları eşitlik (4.1) ve (4.2)'de verilmiştir. 4m/s'den az ve 25 m/s'den fazla olan rüzgar hızlarında türbinler güç üretmezken, 15 m/s ile 25 m/s arasında türbinler nominal güç üretmektedirler. 4m/s ile 15 m/s arasında kalan rüzgar hızlarında ise her bir türbinin 16 farklı yöne göre ortalama hızları ve kapasite faktörleri dikkate alınmaktadır. $u_{o,i}$; türbinin konumlandırıldığı yüksekliğe göre düzeltilmiş ve θ açısından esen wake kayıpları hesaplanmış, türbine çarpan rüzgarın yıllık ortalama hızını ifade etmektedir. $C_{p,i}$ ise, θ açısından esen rüzgarın ortalama hızına göre hesaplanmış kapasite faktörüdür. ρ , havanın yoğunluğu; A ise türbinin süpürme alanını, f_i , θ açısından esen rüzgarın esme sıklığını ifade etmektedir.

$$P(u_{o,i}) = \begin{cases} 0 \text{ kW}, & u_{o,i} < 4 \\ \frac{1}{2} \rho A u_{o,i}^3 C_{p,i} \text{ kW}, & 4 \leq u_{o,i} < 15 \\ 3000 \text{ kW}, & 15 \leq u_{o,i} < 25 \\ 0 \text{ kW}, & u_{o,i} \geq 25 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{\theta} \sum_{j=1}^{29} P_j(u_{o,i}) f_i \quad (4.2)$$

4.2 Bandırma Rüzgar Santral Sahasının Analizi

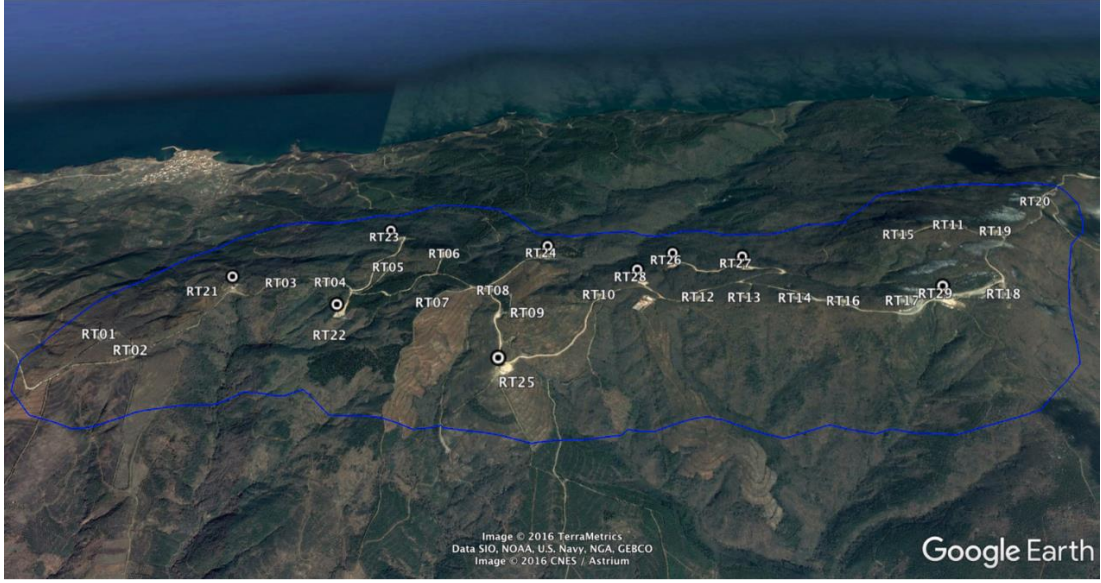
Tez çalışmasında, uygulama sahası olarak Bandırma Rüzgar Enerji Santrali (Bandırma RES) incelenmiştir. Saha, Balıkesir'in Bandırma ilçesi Kurşunlu bölgesinde olup, merkezinin koordinatları $40,368677^{\circ}$; $28,153927^{\circ}$ 'dir.



Şekil 4.7: Bandırma Rüzgar Enerjisi Santrali ve çevresinin görünümü

Borusan EnBW Enerji'nin ilk operasyonel santrali olan Bandırma RES, Eylül 2009 yılında devreye alınmış olup, daha sonra kapasite artışlarını Temmuz 2010, Aralık 2014 ve Şubat 2015 tarihlerinde gerçekleştirmiştir. Bandırma Rüzgar Enerjisi Santrali'nin kurulu gücü 89,7 MW'tır ve 46,5 km'lik enerji nakil hattı vasıtasıyla Akçalar Trafo Merkezi üzerinden ulusal elektrik şebekesine bağlanmaktadır. Şekil 4.7, rüzgar santrali sahası etrafındaki yerleşim yerleri ile birlikte genel bir görünüş sunmaktadır.

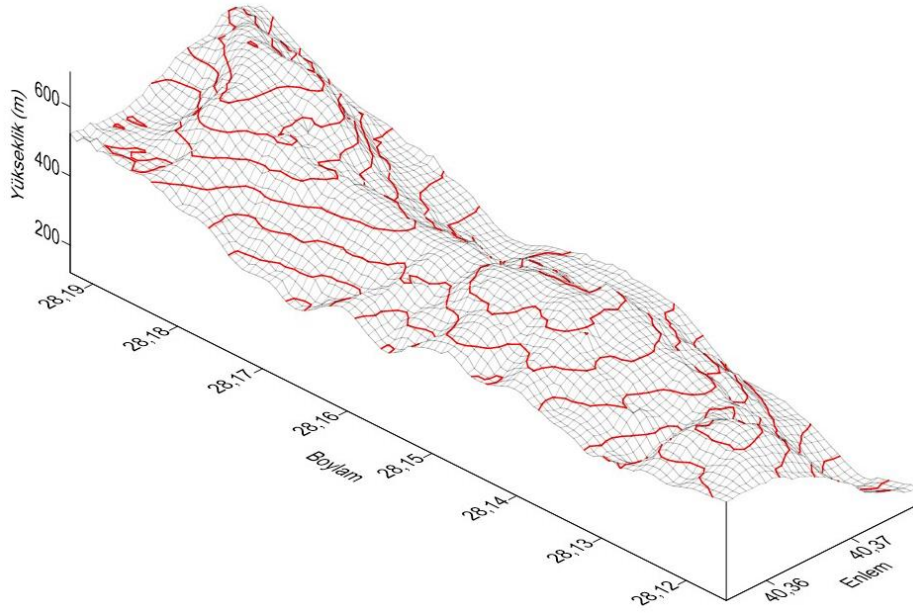
Bandırma RES, 2016 yıl sonu itibariyle Türkiye'deki 152 rüzgar santrali arasından on ikinci ve Balıkesir'in ise dördüncü büyük enerji santralidir. Bandırma RES'te 20 adet 3 MW'lık Danimarka menşeli 3MW'lık Vestas V90-3.0 ile 9 adet 3.3 MW'lık V112-3.3 model rüzgar türbini kullanılmıştır. Şekil 4.8'de santralin saha sınırları ile birlikte türbinlerin yerleşimi de görülmektedir.



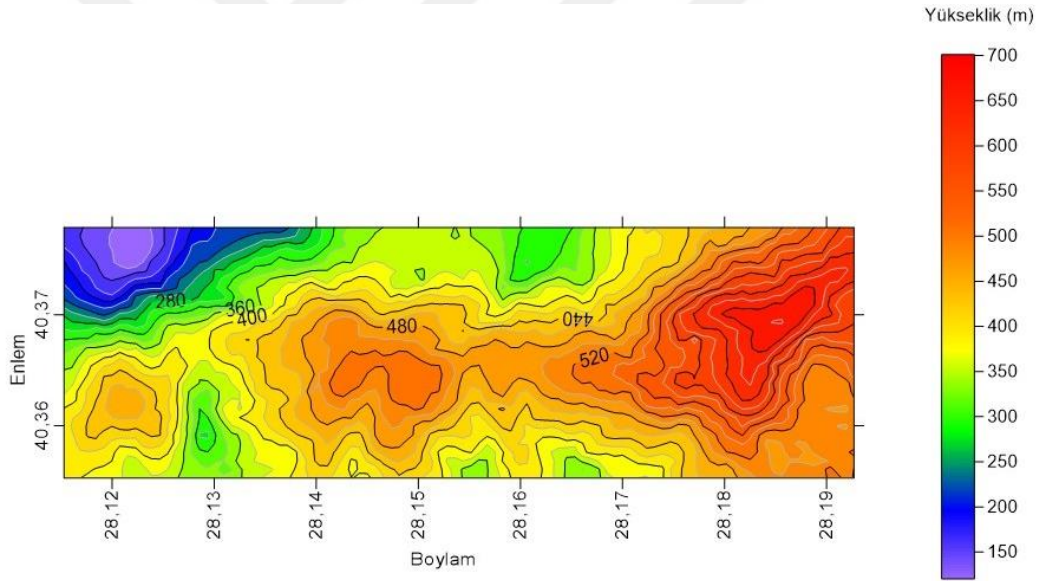
Şekil 4.8: Bandırma RES saha sınırları ve mevcut türbin yerleşimi

4.2.1 Sahanın Sayısal Modellemesi

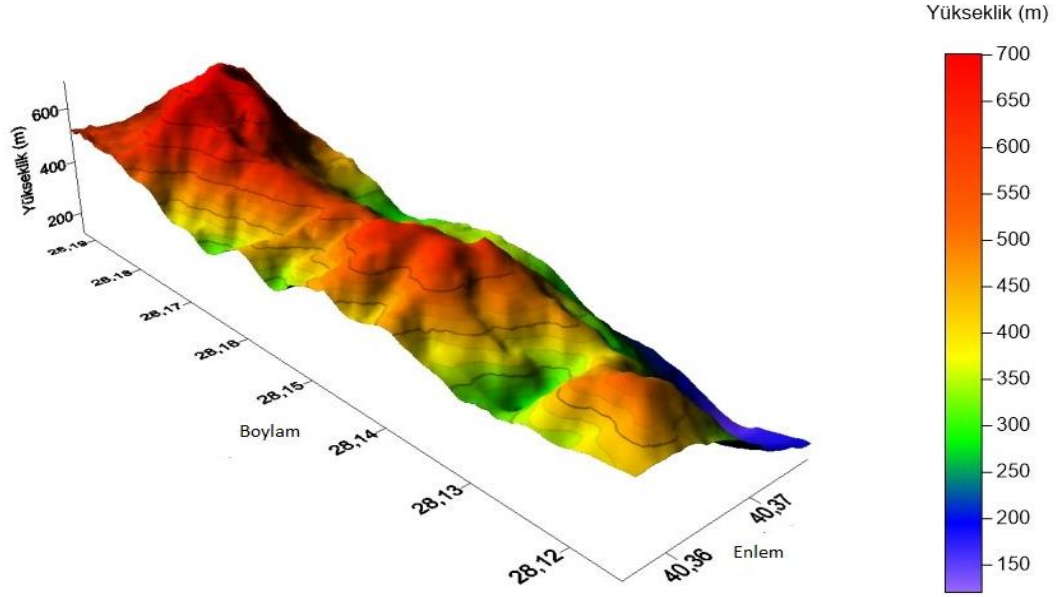
Borusan EnBW'den temin edilen veriler çerçevesinde, bölgenin topografik özellikleri sayısal olarak modellenmiştir. Bu model, hem yeryüzü şekillerinin hem de yükselti farklarının rüzgar akışına etkisini inceleme fırsatı sunmaktadır. Öncelikle sahanın enlem, boylam ve yükseklik bilgileri için saha sınırlarını kapsayan bir topografik harita kullanılmıştır. Sahanın yüzey modelini çıkarabilmek için ArcGIS programı ile haritanın taranması sonucu enlem, boylam ve yükseklik bilgilerini içeren veri seti oluşturulmuştur. Saha sınırları içindeki tüm alanın taranması sonucu, ArcGIS programı 6323 noktanın enlem, boylam, yükseklik verisi setini oluşturmuştur. Ardından bu veri seti ile saha, Surfer v14 programı ile hem üç boyutlu hem de iki boyutlu olarak modellenmiştir ve Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de sırasıyla bölgenin üç boyutlu ızgara modeli, iki boyutlu eşyüksekti haritası ve üç boyutlu yüzey modeli verilmiştir.



Şekil 4.9: Sahanın üç boyutlu ızgara görünümü ve izohips çizgileri ile coğrafik yapısı



Şekil 4.10: Sahanın eşyüksekti haritası

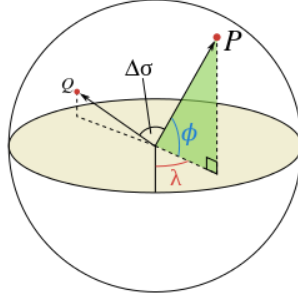


Şekil 4.11: Sahanın üç boyutlu yüzey görünümü

Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilen haritalar; enlem, boylam ve yükseklik verileri kullanılarak modellenmiştir. Fakat, türbin yerleştirme probleminde enlem ve boylam değerleri açısal ifadeler olup, hesaplamalar için kullanılacak tüm verilerin metre cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, enlem ve boylam değerleri bilinen noktalar arasındaki mesafeler metre cinsinden hesaplanarak sahanın sayısal modeli yeniden oluşturulmuştur.

4.2.1.1 Koordinatlar Arası Mesafe Hesaplamaları

Dünyanın kompleks bir geometrik şekle sahip olmasından dolayı, koordinatları bilinen iki nokta arasındaki mesafenin hesaplamasında, dünyanın eğriselliği önem kazanmaktadır. Öklitçi olmayan geometri kapsamına giren jeodezik ölçümlerde hesap işlemleri, genel matematik kurallarına uygun formüller ve çizelgeler kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 4.12: P ve Q noktaları arasındaki merkez açısı $\Delta\sigma$ 'nın bir gösterimi; λ ve ϕ , P noktasının sırasıyla boylamsal ve enlemsel açılarıdır [81]

Enlem, bir yerin ekvatora olan uzaklığının açı cinsinden değeridir. Boylam ise herhangi bir noktanın başlangıç meridyenine olan uzaklığının açı cinsinden değeridir. Bu iki açısal değer kullanılarak iki nokta arasındaki mesafenin hesaplanması için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Dünyayı tam bir küre olarak kabul eden Haversine denklemi (4.1) en sık kullanılan yaklaşımdır. Fakat, dünyanın tam bir küre olmamasından dolayı yapılan hesaplamalarda, özellikle ekvator bölgesinde, hata paylarının artması söz konusudur. Bu yüzden, bu çalışmada dünyayı elipsoid olarak modelleyen ve daha gerçekçi sonuçlar veren Vincenty yaklaşımı (4.2) kullanılmıştır.

Enlem ve boylamları (φ_1, λ_1) ve (φ_2, λ_2) olarak verilen iki nokta arasındaki mesafenin belirlenmesi için önce merkezi açı olan $\Delta\sigma$ hesaplaması gereklidir. Merkez açı değerinin dünyanın ortalama yarıçapı ile çarpılmasıyla mesafe bulunur. Merkez açı hesabı Haversine yaklaşımında;

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \times \cos\varphi_2 \times \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)} \quad (4.1)$$

Vincenty yaklaşımında ise;

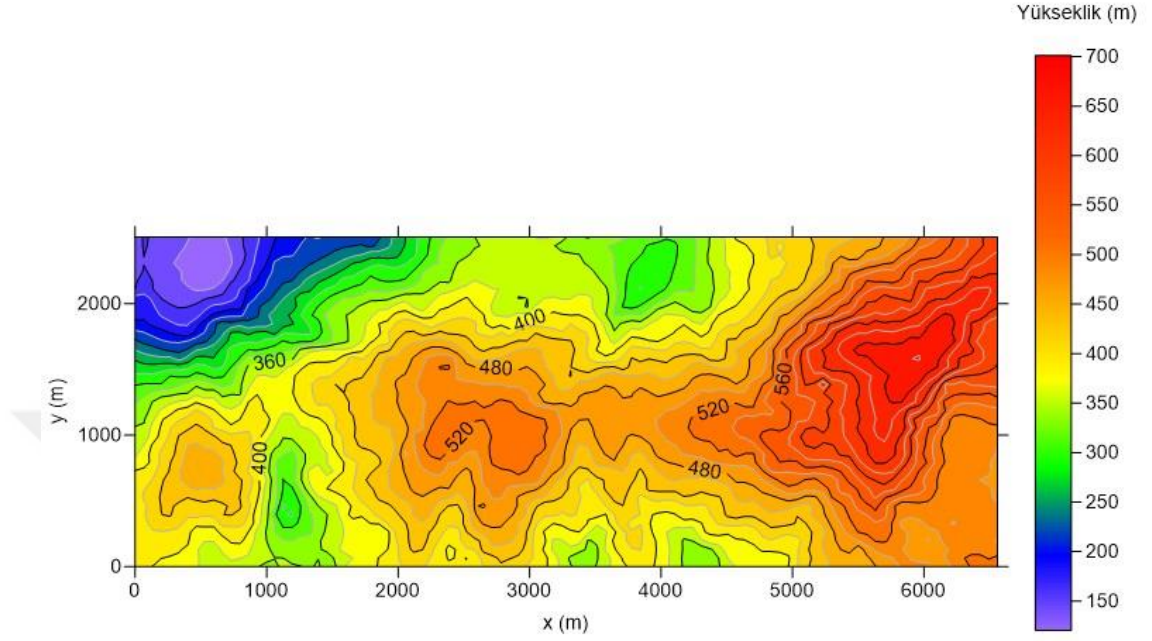
$$\Delta\sigma = \arctan \frac{\sqrt{(\cos\varphi_2 \times \sin(\Delta\lambda))^2 + (\cos\varphi_1 \times \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \times \cos\varphi_2 \times \cos(\Delta\lambda))^2}}{\sin\varphi_1 \times \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \times \cos\varphi_2 \times \cos(\Delta\lambda)} \quad (4.2)$$

olup, tüm açısal değerler radyan cinsinden elde edilmektedir.

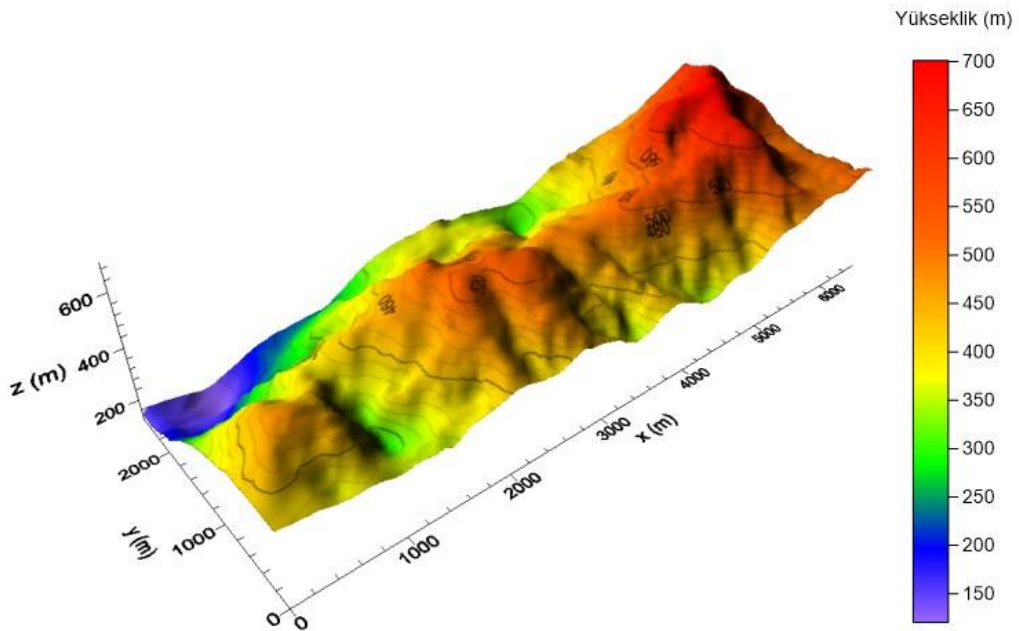
$$d = r \times \Delta\sigma \quad (4.3)$$

d, iki nokta arasındaki mesafe (yay uzunluğu), r ise dünyanın ortalama yarıçapıdır. Bu çalışmada dünyanın yarıçapı 6371km olarak kabul edilmiştir.

Vincenty yaklaşımı ile hesaplanan mesafeler ile veri seti güncellenmiş ve sahanın eşyüksekti haritası ile üç boyutlu yüzey modeli sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.

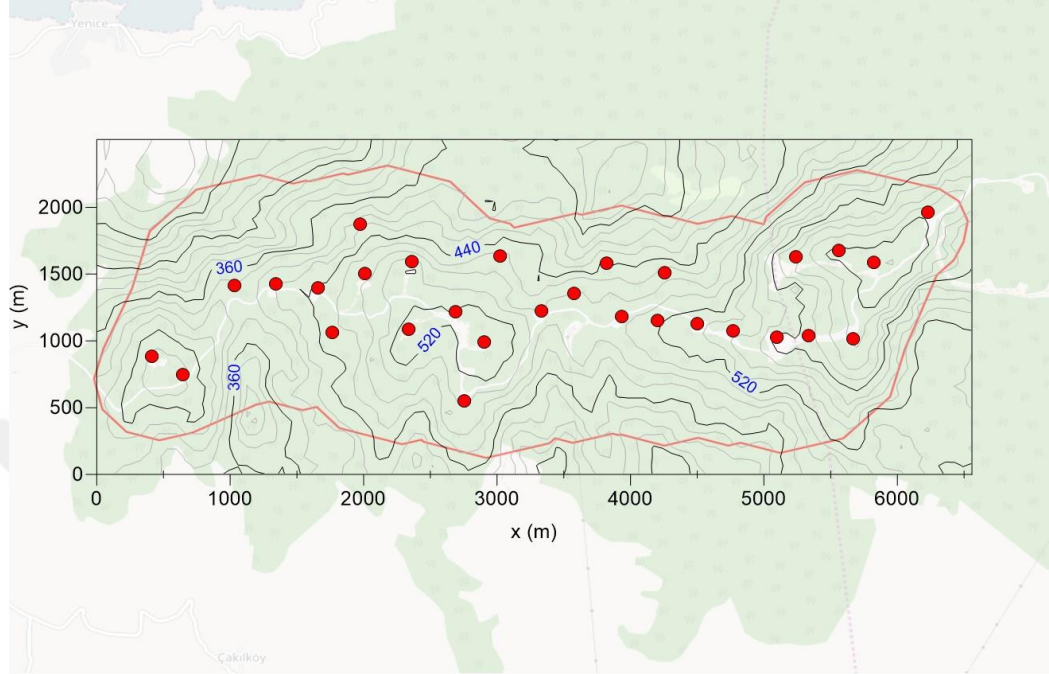


Şekil 4.13: Mesafe cinsinden ifade edilen sahanın eşyüksekti haritası



Şekil 4.14: Mesafe cinsinden ifade edilen sahanın üç boyutlu yüzey haritası

Mevcut durumda saha sınırları ve santraldeki 29 türbinin yerleri de aynı hesaplama yöntemleri ile bulunmuştur. Şekil 4.15'te saha sınırları, türbin yerleşim düzeni, ve eşyüksekti haritası bir arada sunulmuştur.



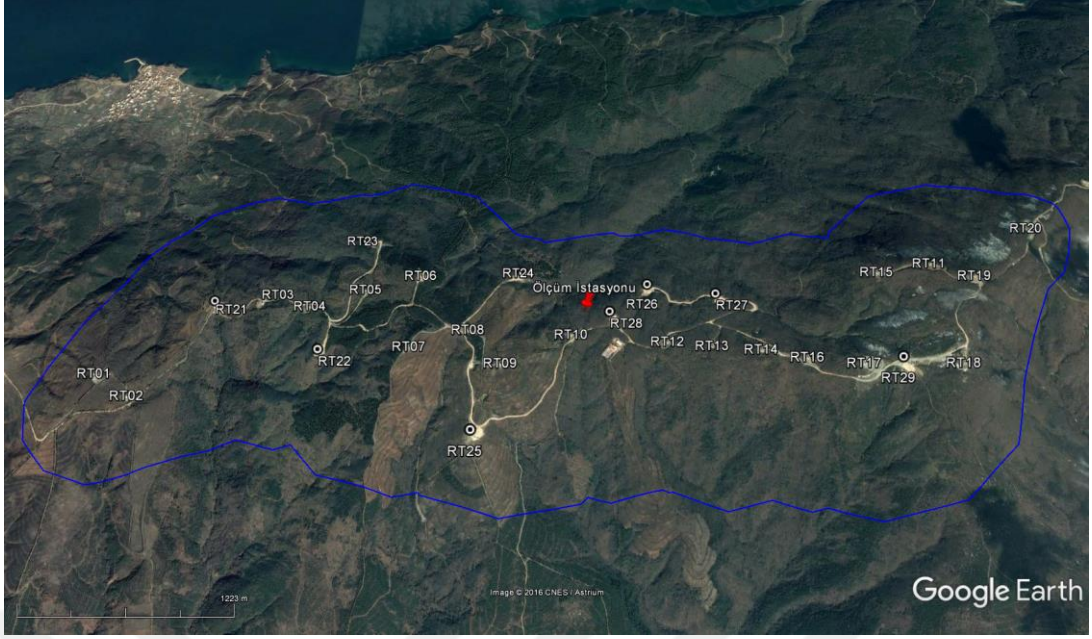
Şekil 4.15: Mevcut santral düzeni ve saha sınırları

4.3 Rüzgar Verilerinin Analizi

Sahanın rüzgar analizi için $40,367279^\circ$; $28,155533^\circ$ koordinatlarında yer alan 80m yüksekliğindeki ölçüm istasyonundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Ölçüm istasyonunun santral içerisindeki konumu Şekil 4.16'da görülmektedir.

Saha içerisinde yer alan ölçüm direğinden 80m, 79,5m, 65m, 64,5m, 50m ve 49,5m olmak üzere toplam altı yükseklik seviyesinden rüzgar hız ve yön ölçümleri alınmıştır. 29.04.2012 ve 17.04.2013 tarihleri arasında, onar dakikalık aralıklarla kayıt yapılan rüzgar hızları ve yönlerine ait verilerden oluşturulan özet bilgiler Tablo 4.1'de görülmektedir.

80m yükseklik ölçümlerine göre sahanın ortalama rüzgar hızı 7,54 m/s'dir. Ölçüm yapılan zaman diliminde en yüksek hız 28,25 m/s olarak ölçülmüştür. 2,5 m/s ve altındaki rüzgar hızları sakin rüzgar olarak tanımlanmış ve zamanın %6,45'inde bu değerlerde esmiştir.



Şekil 4.16: Santral saha sınırları içindeki türbinler ve ölçüm istasyonu

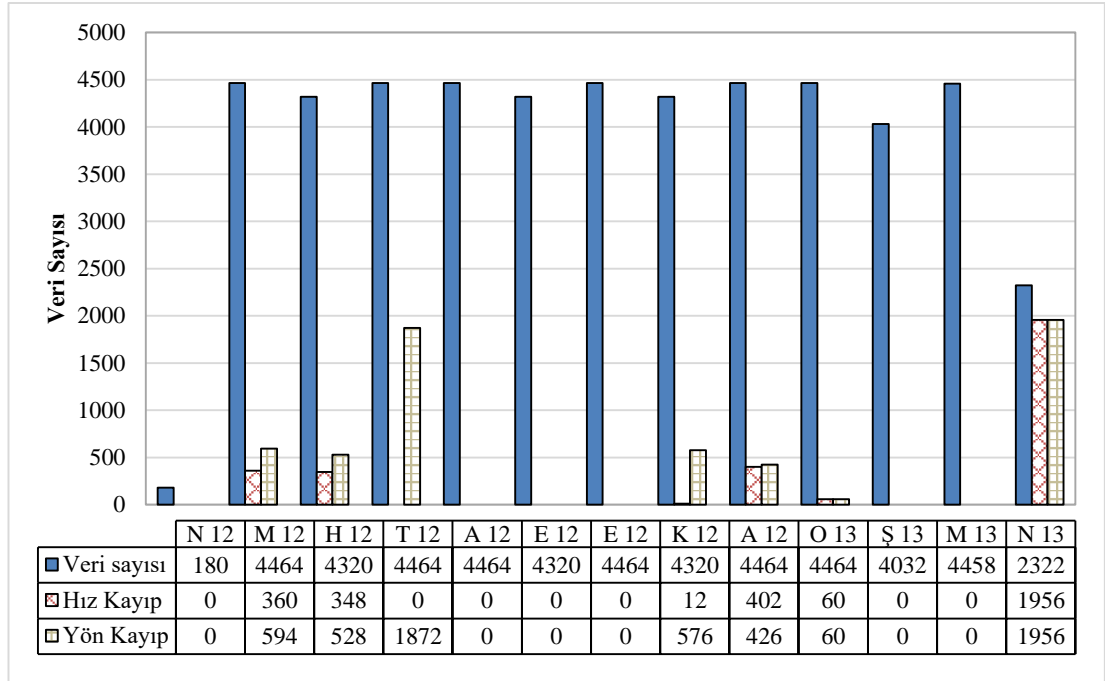
Santralin hakim rüzgar yönü %36,7 esme sıklığı ile 22,5°'den gelen kuzey-kuzeydoğu ve %19,15 esme sıklığı ile 157,5°'den gelen güney-güneydoğu rüzgarlarıdır. Tabloda görülen, 0°'den gelen kuzey rüzgarları, eksik yön verilerinin de analiz yapılabilmesi için 0° olarak tanımlanmasından dolayı gerçek bir yüzdeyi ifade etmemektedir. Sahanın rüzgar yön analizi, eksik verilerin tamamlanmasıyla 4. Bölüm içinde yeniden düzenlenerek değerlendirilmiştir.

Ölçümlerden rüzgar hızının dağılımı da incelenmiş ve weibull parametreleri bulunmuştur. 80m yükseklik verilerine göre weibull şekil parametresi 1,17 iken; ölçek parametresi ise 8,68 m/s olarak hesaplanmıştır. Sahanın ortalama enerji yoğunluğu ise birim metrekare başına 612W olarak bulunmuştur.

Rüzgar hızlarının analizinde, dört saat üst üste rüzgar hızının 0 m/s olması durumu eksik ölçüm olarak kabul edilmiştir. Buna göre Tablo 4.1'de de görüldüğü gibi, %6,2 kadar rüzgar hız verisi ile %11,8 oranında rüzgar yön verisi eksiktir. Okunabilen rüzgar verilerinin sayısı 50723 adet iken, bunlar arasında geçerli olan verilerin sayısı ise %99,93'üne karşılık gelen 50686 adet veridir.

Tablo 4.1: Ölçüm istasyonu rüzgar verileri özet tablo

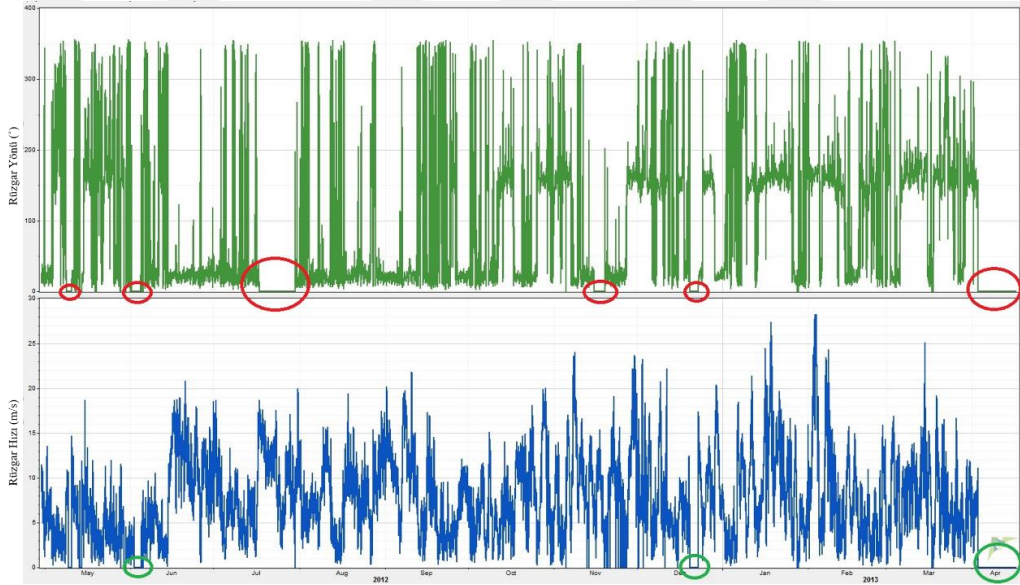
| | 80m. sensörü | 79,5m. sensörü | 65m. sensörü | 64,5m. sensörü | 50m. sensörü | 49,5m. sensörü |
|--|---|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|
| Ölçüm Alınan Yükseklik | 80 | 79,5 | 65 | 64,5 | 50 | 49,5 |
| Ortalama Rüzgar Hızı (m/s) | 7,54 | 7,52 | 7,33 | 7,34 | 7,07 | 7,07 |
| Medyan Rüzgar Hızı (m/s) | 7,02 | 7,01 | 6,81 | 6,82 | 6,58 | 6,57 |
| Maksimum Rüzgar Hızı (m/s) | 28,25 | 28,160 | 27,50 | 27,50 | 25,91 | 25,97 |
| Rüzgar Esme Yönü (derece) | %13,09 - 0° %36,7 - 22,5° %19,15 - 157,5° | | %14,69 - 0° %37,04 - 22,5° %17,89 - 157,5° | | %13,30 - 0° %39,54 - 22,5° %18,60 - 157,5° | |
| Weibull k | 1,17 | 1,26 | 1,17 | 1,29 | 1,18 | 1,18 |
| Weibull c (m/s) | 8,68 | 8,72 | 8,59 | 8,78 | 8,34 | 8,34 |
| Ortalama Enerji Yoğunluğu (W/m²) | 612 | 608 | 563 | 566 | 503 | 504 |
| Sakin Rüzgar Sıklığı (%) | 6,45 | 6,37 | 6,45 | 6,37 | 6,39 | 6,39 |
| Okunabilir Veri Sayısı | 50723 | 50723 | 50723 | 50723 | 50723 | 50723 |
| Geçerli Veri Sayısı ve Oranı | 50686 %99,93 | 50686 %99,93 | 50686 %99,93 | 50686 %99,93 | 50686 %99,93 | 50686 %99,93 |
| Eksik Hız Veri Sayısı ve Yüzdesi | 3138 %6,2 | 3138 %6,2 | 3138 %6,2 | 3138 %6,2 | 3138 %6,2 | 3138 %6,2 |
| Eksik Yön Veri Sayısı ve Yüzdesi | 5980 %11,8 | 5980 %11,8 | 5980 %11,8 | 5980 %11,8 | 5980 %11,8 | 5980 %11,8 |

Tablo 4.2: Aylara göre rüzgar hızı ve yön verisi kayıpları

Aylık bazda kayıp verilerin görülebilmesi için sadece 80. metre verilerine dayanan okunabilen veri sayısı, rüzgar hız verileri ile rüzgar yön verilerinin kayıpları

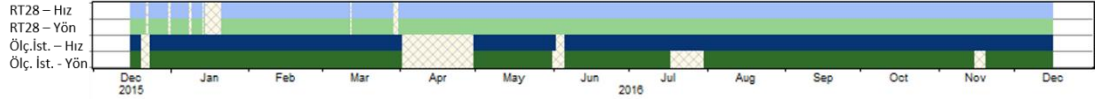
grafığı Tablo 4.2’de sunulmuştur. Buna göre N13 olarak gösterilen Nisan 2013 dönemine ait okunabilen veri sayısı 2322 iken, rüzgar hız ve yön verilerinin kaybı 1956’dır. Temmuz 2012 (T12) döneminde ise okunabilen veri sayısı 4464, yön verisi kaybı 1872 ve hız verisi kaybı 0’dır. Ağustos 2012, Eylül 2012, Ekim 2012, Şubat 2013 ve Mart 2013 dönemlerinde hiç bir veri kaybı yaşanmazken, Mayıs 2012, Haziran 2012, Kasım 2012, Aralık 2012, Ocak 2013 dönemlerine ait hem hız hem de yön veri kayıpları bulunmaktadır.

Rüzgar hız ve yön verilerine ait zaman serisi analizi Şekil 4.17’de sunulmuştur. Bu şekilde üstteki grafik rüzgar yönüne ait olup, daire içine alınan kısımlar eksik yön verilerine ait zaman dilimlerini göstermektedir. Aynı şekilde alttaki grafikte rüzgar hızına dair eksik verilerin zaman dilimleri görülmektedir.



Şekil 4.17: 80 metrede yön ve hız verileri zaman serisi

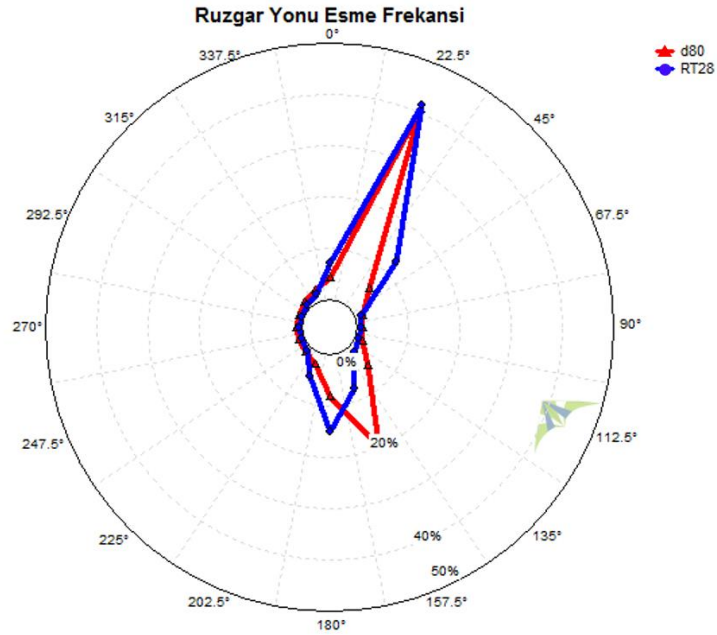
Her bir türbinden ve santralin genelinden elde edilen rüzgar enerjisi değerlerinin hesaplamalarında, saatlik ortalama rüzgar hızlarına ait veriler kullanılacağından, 523 saatlik kayıp hız verisi ile 981 saatlik yön verilerinin tamamlanması gerekmektedir. Özellikle; Nisan ayına ait hız ve yön verileri ile Temmuz ayına ait yön verilerinin kaybı her iki grafikten de açıkça görülmektedir. Eksik verilerin tamamlanması için, ölçüm istasyonuna en yakın türbin olan RT28’in 84. metre olan hub yüksekliğinden alınan rüzgar verileri test edilmiştir. Her iki veri setinin de rüzgar yönü ve hızı açısından uyumlu eğilimler göstermesi halinde türbinden alınan veriler ölçüm istasyonundaki eksik verilerin tamamlanmasına kaynak olacaktır.



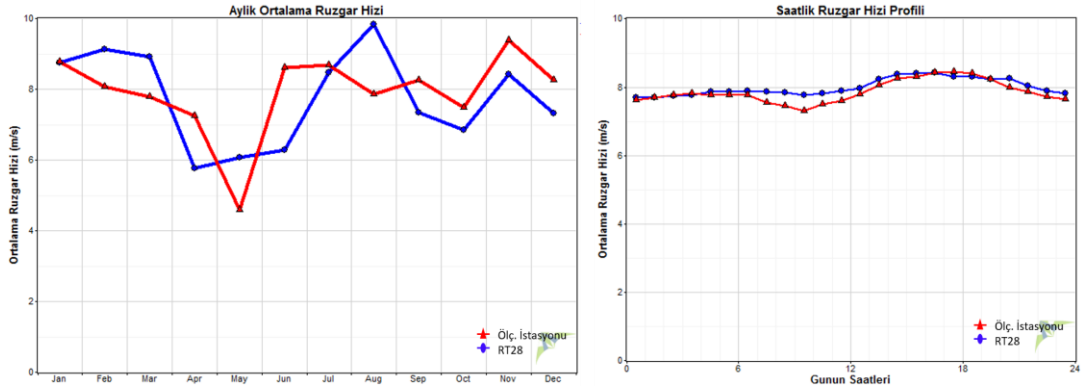
Şekil 4.18: Ölçüm İstasyonu ile RT28'den alınan veri setlerindeki eksikliklerinin karşılaştırması

Şekil 4.18'de hem ölçüm istasyonundan hem de 28RT'den alınan veri setlerinin eksik olduğu zaman dilimleri görülmektedir.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilen grafiklerde ise her iki ölçüm verisinin karşılaştırmalı olarak sırasıyla rüzgar yönü frekans dağılımı, aylık ortalama rüzgar hızları ve saatlik rüzgar hız profilleri grafiği verilmiştir. Her üç grafikte de iki ölçüm verilerinin birbiriyle büyük benzerlikler gösterdiği görülmektedir. Bu yüzden RT28'den alınan 84m rüzgar verileri, ölçüm istasyonunun 80m'den alınan eksik verilerin tamamlanması için referans olarak kabul edilmiştir.

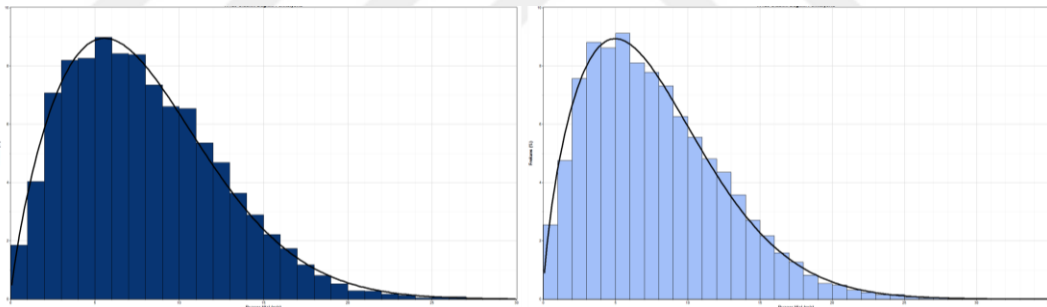


Şekil 4.19: Ölçüm direği ile RT28 verileri sonucu oluşturulan rüzgar gülü karşılaştırması



Şekil 4.20: Ölçüm direği ile RT28 verilerinin karşılaştırması (aylık ortalama ve saatlik ortalama rüzgar hızları)

Her iki ölçüm kaynağından alınan veriler doğrultusunda, rüzgar hız dağılımları Şekil 4.21’de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Tablo 4.3’teki karşılaştırma tablosu ise hem maksimum olasılık hem de en küçük kareler algoritması ile hesaplanan weibull şekil ve ölçek parameterleri, ortalama hız ve enerji yoğunluğunu göstermektedir. Her iki yüksekliğe ait hız dağılımlarındaki benzerlik, her iki yükseklikte de rüzgarın benzer karakteristiğe sahip olduğu sonucunu göstermektedir.

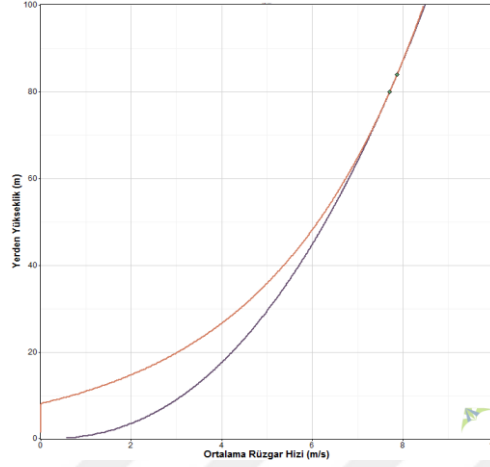


Şekil 4.21: Sırasıyla ölçüm direği ile RT28’in rüzgar hızı dağılım grafikleri

Tablo 4.3: Ölçüm direği ile RT28’in rüzgar hızı dağılım parametreleri karşılaştırması

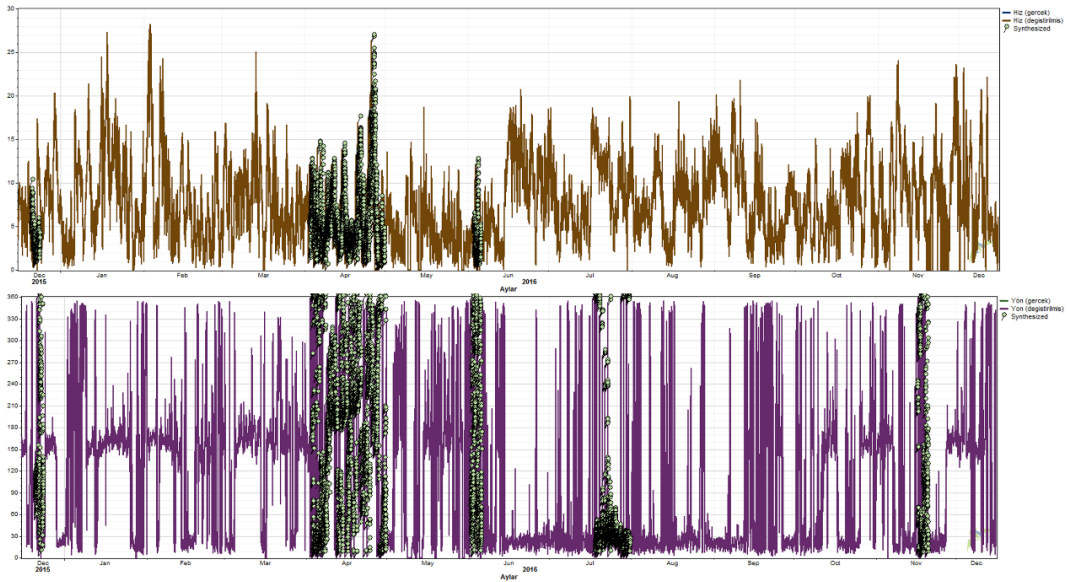
| | 80 metre Ölçüm İstasyonu | | | | 84 metre RT28 | | | |
|--------------------------|--------------------------|------------|-----------------------|--|---------------|------------|--------------------------|--|
| | k | c (m/s) | Ortalama Hız (m/s) | Enerji Yoğunluğu (W/m ²) | k | c (m/s) | Ortalama Hız (m/s) | Enerji Yoğunluğu (W/m ²) |
| Maksimum olasılık | 1,67 | 8,57 | 7,65 | 639,8 | 1,66 | 8,78 | 7,85 | 699 |
| En küçük kareler | 1,71 | 8,68 | 7,74 | 646,5 | 1,66 | 8,84 | 7,88 | 710 |
| Gerçek Veri | | | 7,54 | 612 | | | 7,87 | 689,9 |

Bu sonuçlar doğrultusunda, Hellman güç kanunu ile 84m verileri kullanılarak 80m'deki eksik rüzgar hız ve yön verileri tamamlanmıştır. Yatay düzlemdeki rüzgar hız değişimi Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22: Yatay rüzgar hız değişimi grafiği

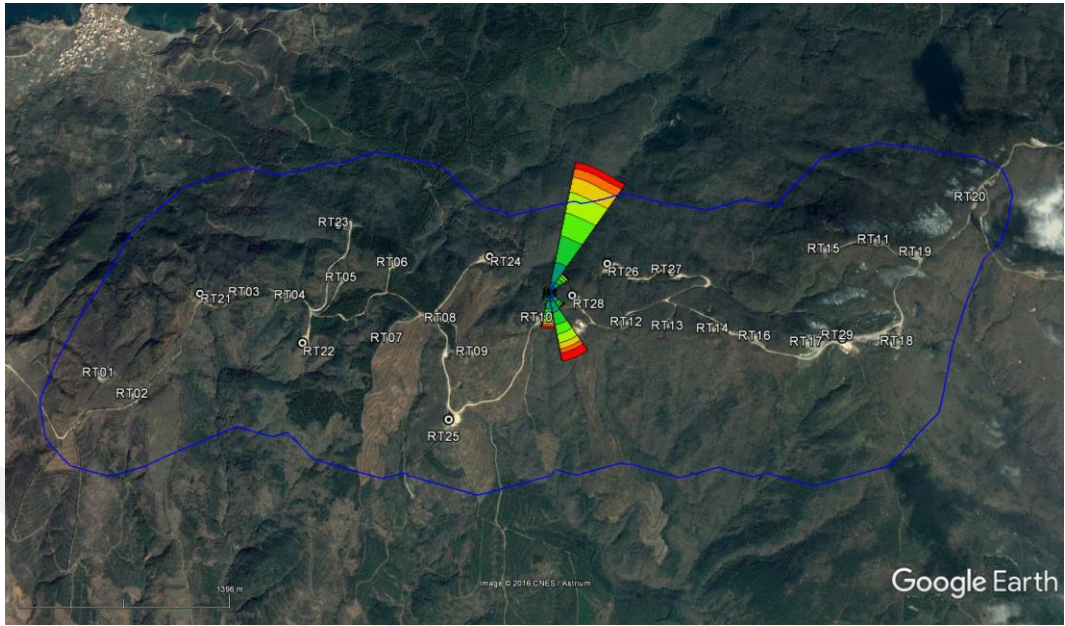
Şekil 4.23'te verilen zaman serisi üzerindeki noktalar, ölçüm istasyonundan alınan veri setindeki eksik verilerin tamamlandığı zamanları göstermektedir. Şekilde üstte yer alan grafik, rüzgar hız verilerine aittir, alttaki grafik ise yön verilerini göstermektedir.



Şekil 4.23: Zaman serisi üzerinde eksik verilerin tamamlandığı anların gösterimi

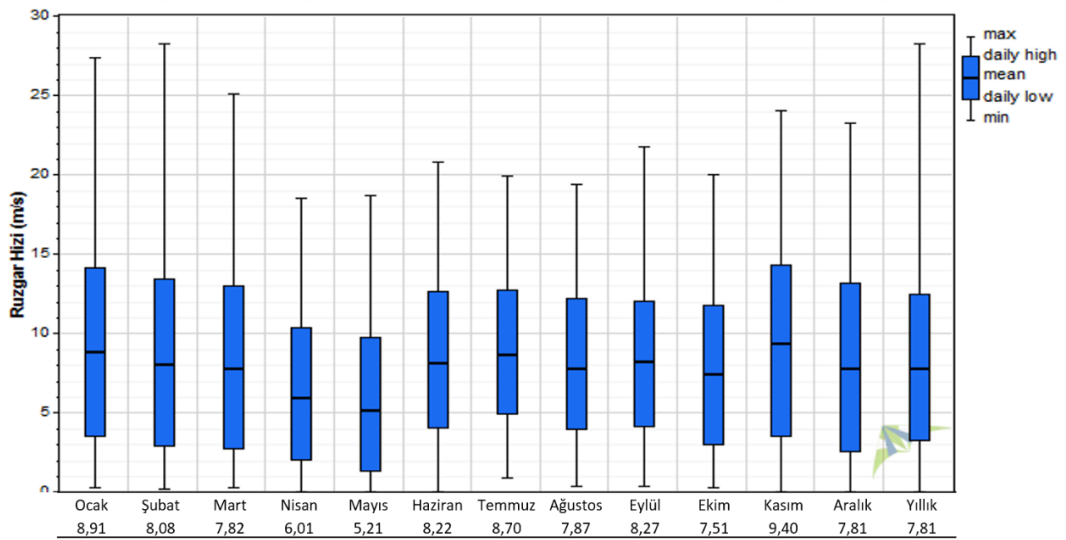
Eksik verilerin tamamlanmasıyla, $22,5^\circ$ aralıklarla oluşturulan 16 sektöre göre rüzgar esme frekansları hesaplanmıştır. Şekil 4.24'te saha sınırları içerisindeki mevcut

türbin yerleşim düzeni ile birlikte ölçüm istasyonu noktasındaki rüzgar gülü de görülmektedir.



Şekil 4.24: Rüzgar gülü ve saha sınırları içindeki mevcut yerleşim düzeni

Düzeltilen rüzgar hızlarından sonra, Şekil 4.25'te aylara göre rüzgar hızlarının dağılımını gösteren kutu diyagramı verilmiştir.

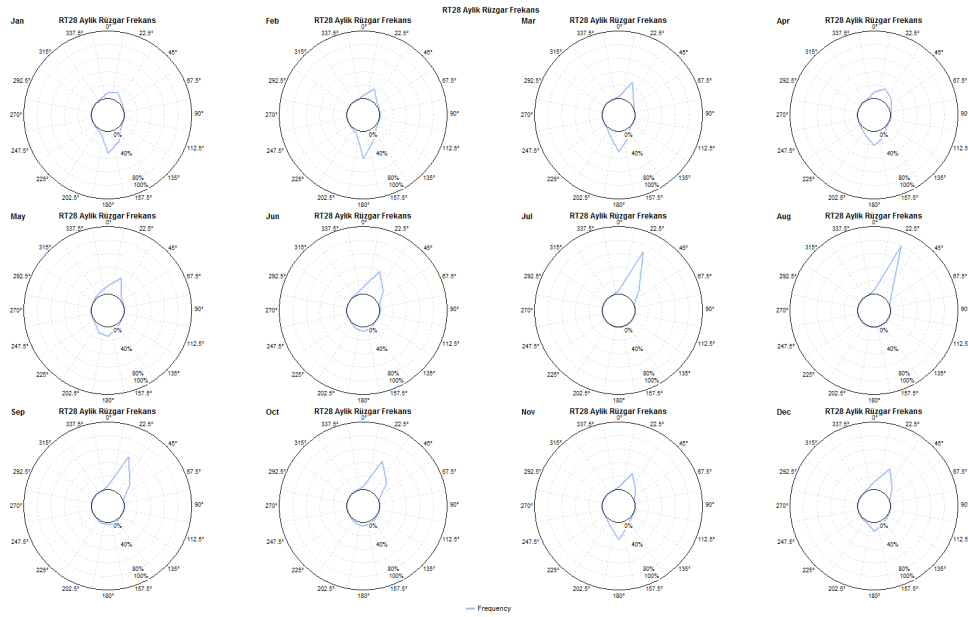


Şekil 4.25: Aylık rüzgar hızı istatistiği

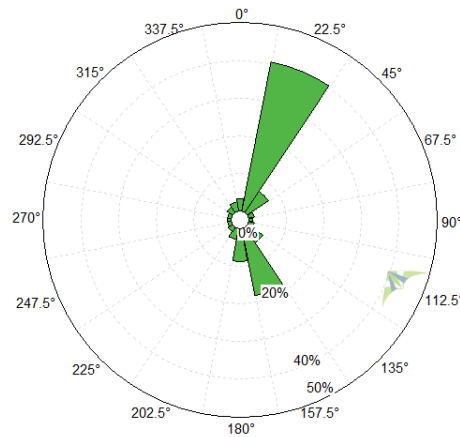
Kutunun kendisi rüzgar hız verisinin %50'sini içerir. Kutunun üst kenarı veri grubunun üst çeyrekliğini, alt kenarı ise veri grubunun alt çeyrekliğini belirtmektedir. Kutunun içindeki çizgi, rüzgar hız verilerinin ortalama değerlerini göstermektedir.

Aylara göre rüzgar hızının en düşük ve en yüksek olduğu uç değerler ile aylık ortalama rüzgar hız değerleri de bu grafikte görülmektedir.

Her bir sektörü 22,5°'lik 16 eş bölgeye ayrılan ve rüzgarın esme yönlerini gösteren rüzgar gülleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu şekil, Bandırma RES sahasında aylara göre rüzgarın esme yönünün değişimini göstermektedir. Ocak, Şubat ve Mart aylarında güneyden esen rüzgarlar ve Mayıs ayından itibaren kuzey yönünden esme sıklığı artan rüzgarlar dikkat çekmektedir. EK B'de, bu grafiğin büyük hali sunulmuştur.



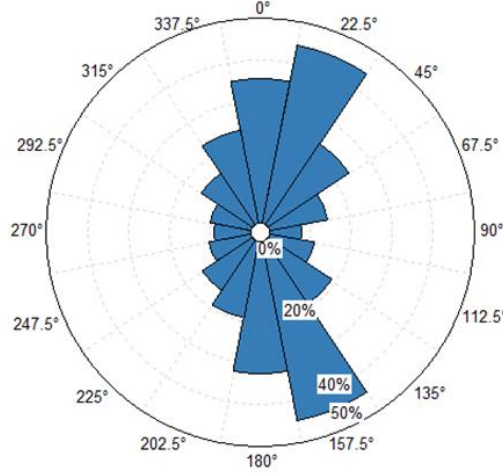
Şekil 4.26: Aylara göre rüzgar esme sıklığı ve yön değişimi



Şekil 4.27: Rüzgar Güllü

Şekil 4.27'de ise, sahaya ait rüzgarın esme yönlerini gösteren ve tüm yılı kapsayan rüzgar güllü görülmektedir.

Kullanılmakta olan V90-3.0 türbinlerinin bu saha koşullarındaki kapasite faktörleri, yönlere göre hesaplanmış ve 16 farklı C_p değeri bulunmuştur, grafiği Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28: Yönlere göre V90-3.0 model türbininin kapasite faktör (C_p) değerleri

Tablo 4.4: Sahanın yönlere göre rüzgar hızı ortalamaları ve kapasite faktörleri

| Yön | Yön Aralığı | Sektör (°) | Frekans (%) | V_{ort} (m/s) | C_p (%) |
|----------------|-------------------|------------|-------------|-----------------|-----------|
| N | 348,75° - 11,25° | 0° | 3,42 | 7,58 | 35,38 |
| NNE | 11,25° - 33,75° | 22,5° | 40,4 | 8,87 | 44,48 |
| NE | 33,75° - 56,25° | 45° | 6,78 | 6,35 | 24,01 |
| ENE | 56,25° - 78,75° | 67,5° | 1,69 | 4,71 | 15,52 |
| E | 78,75° - 101,25° | 90° | 1,03 | 3,6 | 8,12 |
| ESE | 101,25° - 123,75° | 112,5° | 1,6 | 4,22 | 11,32 |
| SE | 123,75° - 146,25° | 135° | 5,06 | 5,86 | 18,73 |
| SSE | 146,25° - 168,75° | 157,5° | 18,37 | 9,3 | 44,76 |
| S | 168,75° - 191,25° | 180° | 8,85 | 7,79 | 32,49 |
| SSW | 191,25° - 213,75° | 202,5° | 3,07 | 5,63 | 19,22 |
| SW | 213,75° - 236,25° | 225° | 1,68 | 4,99 | 14,95 |
| WSW | 236,25° - 258,75° | 247,5° | 1,2 | 4,25 | 10,7 |
| W | 258,75° - 281,25° | 270° | 1,12 | 4,05 | 9,13 |
| WNW | 281,25° - 303,75° | 292,5° | 1,23 | 4,36 | 10,54 |
| NW | 303,75° - 326,25° | 315° | 1,83 | 4,85 | 15,11 |
| NNW | 326,25° - 348,75° | 337,5° | 2,66 | 6,16 | 23,49 |
| Genel Ortalama | | | | 7,8 | 35,48 |

Rüzgar türbinin performans katsayısı olarak da ifade edilen kapasite faktörü oranları; rüzgardan elde edilen gücün, rüzgar gücüne oranı ile bulunmuştur. Sistemin verimlilik ölçütü olan bu hesaplama yapılırken sahada hiç bir kayıp olmadığı

varsayılmıştır. Tablo 4.4'te sahanın yönler göre ortalama rüzgar hızları ve net kapasite faktörleri gösterilmiştir.

4.4 Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyonun anlamı, girdi değerleriyle "en iyi" çıktı değerini elde edecek şekilde iyileştirme yapmak demektir. "En iyi" tanımı problemden probleme farklılık göstermesine rağmen, matematiksel anlamda "en iyi", girdi parametrelerini değiştirerek bir veya daha fazla amaç fonksiyonunun en üst düzeye çıkarılmasını veya en aza indirgenmesini ifade eder.

Girdilerin alabileceği tüm olası çözümler veya değerler kümesi, çözüm alanını oluşturur. Bu arama alanında, en uygun çözümü veren bir nokta veya noktalar vardır. Optimizasyonun amacı, çözüm alanındaki bu noktayı veya noktaları bulmaktır. Yani bir optimizasyon problemi, matematiksel olarak amaç fonksiyonunun global maksimumunu ya da minimumunu bulmak olarak ifade edilebilir.

Santraldeki türbinlerin optimal yerleşimi problem için tanımlanan $\Pi = \Pi(\bar{x})$ amaç fonksiyonunda, \bar{x} ; santraldeki tüm rüzgar türbinlerinin yerini gösteren koordinatlar olarak gösterilebilir. Bu tez çalışmasında belirlenen amaç fonksiyonu; en az wake kaybı ile en fazla güç üretimini sağlayacak türbin yerlerinin koordinatlarını saptamaktır. Bu problem çok kısıtlı bir NP-hard (*deterministik olmayan ve polinomsal zamanda çözülemeyen*) problemi olduğundan bu çalışmada önce sezgisel bir algoritma ile olası yerleşim çözüm kümeleri oluşturulacak ve daha sonra meta-sezgisel yöntemle yerleşimin optimizasyonu yapılacaktır.

4.4.1 Açgözlü Sezgisel Algoritma

Sezgisel algoritmalar, büyük boyutlu optimizasyon problemleri için kabul edilebilir sürede optimuma yakın çözümler verebilen algoritmalarlardır. Açgözlü sezgisel algoritmanın temel işleyiş mantığı, o anki adımda kendisi için en uygun duruma yönelmesidir. Rüzgar türbini yerleşiminde önerilen bu algoritmadaki temel düşünce,

yatay rüzgar profiline yani rüzgar hızının yükseklikle birlikte artması ilkesine dayandırılmaktadır.

Bu algoritmada izlenen işlem sırası şöyledir;

- i. Sınırları belirli olan santral sahasına, 29 adet V90-3.0 model türbin yerleştirilecektir.
- ii. Türbinlerin yerleşimi için belirlenen kısıtlar; iki türbin arasındaki mesafe olan 7D'nin sağlanarak, saha içinde rakımı en yüksek noktalara konumlandırılmalarıdır.
- iii. Saha sınırları içindeki en yüksek nokta 701 metre iken en düşük seviye ise 118 metredir. İlk türbin, saha içinde rakımı 450m üzerinde olan rastgele bir noktaya yerleştirilecek, 7D sınırları içinde olan tüm noktalar elenecek, geri kalan noktalar arasından en yüksek rüzgar hızına sahip olan en yüksek noktaya ikinci türbin yerleştirilecek ve bu algoritma toplam 29 türbin yerleştikten sonra sonlandırılacaktır. İlk türbinin en yüksek noktaya değil de rastgele seçilmesinin nedeni, çözüm kümelerinde farklılık yaratmaktır. Denemeler sonucu, ilk türbinin en yüksek nokta olan 701 metreye konması çözüm kümesi sayısını azaltmıştır.
- iv. İlk yerleşim sonunda, türbinlerin yerleştiği her nokta için rüzgar hızları yeniden hesaplanmaktadır. 16 yönden esen rüzgara göre wake etkisinde kalan türbinler belirlenip, hub yüksekliğindeki rüzgar hızları yeniden hesaplanmıştır.
- v. Santral sahasındaki toplam wake sebepli güç kayıpları ve türbinlerin toplam üretim gücü; sahaya yerleştirilen her bir türbin için 16 yönden hesaplanan güç kayıpları ile güç üretimlerinin toplamıdır.

4.4.2 Genetik Algoritma

Meta-sezgisel algoritmalar, sezgisel yöntemlerin üzerinde yer alan ve problemlerin çözümünde hangi yöntemin kullanılacağına karar veren kapsamlı algoritmalar olarak karşımıza çıkmaktadır [82].

Doğa, her zaman tüm insanlara büyük bir ilham kaynağı olmuştur. Genetik Algoritmalar (GA), doğal seleksiyon ve genetik kavramlarına dayalı arama tabanlı algoritmalarıdır. GA, Evrimsel Hesaplama olarak bilinen çok daha büyük bir hesaplama dalının bir alt kümesidir.

Bu çalışmada optimizasyon tekniği olarak GA kullanılmış olup, bu algoritma John Holland'ın ve Michigan Üniversitesi'ndeki öğrencileri ve meslektaşları tarafından, özellikle de David E. Goldberg tarafından geliştirilmiştir. Biyolojik tabanlı bir yaklaşımdır. Genetik ve doğal seleksiyon/evrim prensiplerine dayanmaktadır. GA daha çok; matematiksel modeli kurulamayan, çözüm alanı çok geniş ve kısıtların çok olduğu problemlerin çözümünde kullanılır. Çok büyük olan çözüm kümesini arayıp global maksimumu bulması hedeflenmektedir.

GA'larda, bir problemin "en olası çözümler kümesine" popülasyon adı verilir. Bu çözümler, doğal genetikte de olduğu gibi çaprazlamaya ve mutasyona girerek yeni bireyler üretir ve süreç çeşitli nesiller üzerinde tekrarlanır. Her bir bireye (veya aday çözüme) bir uygunluk değeri atanır (amaç fonksiyonu değeri) ve uygun olan bireylere çiftleşme şansı verilirken, daha fazla "uyum sağlayan" bireylerin seçilimine daha yüksek bir şans verilir. Bu şekilde nesiller boyunca "gelişen" daha iyi bireyler veya çözümlerin oluşturulmasına durma kriteri sağlanana kadar devam eder.

GA'ların araştırmacılar arasında popüler olmasını sağlayan bazı avantajları vardır. Bunların bazıları; geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve daha etkili olması, paralel arama yeteneklerinin çok iyi olması, sürekli ve ayrık fonksiyonlarla işlem yaparak birden çok amaç fonksiyonunu optimize edebilmesi ve tek bir çözüm değil, 'iyi' çözümlerin bir listesini sağlaması sayılabilir. Bunlara rağmen her yöntem gibi GA'larda da bazı işlemsel sınırlar vardır. Rassal olmasından ötürü, çözümün üstünlüğü veya kalitesi üzerinde hiçbir garanti bulunmamaktadır. Doğru şekilde uygulanmazsa, GA en uygun çözüme yaklaşmayacaktır.

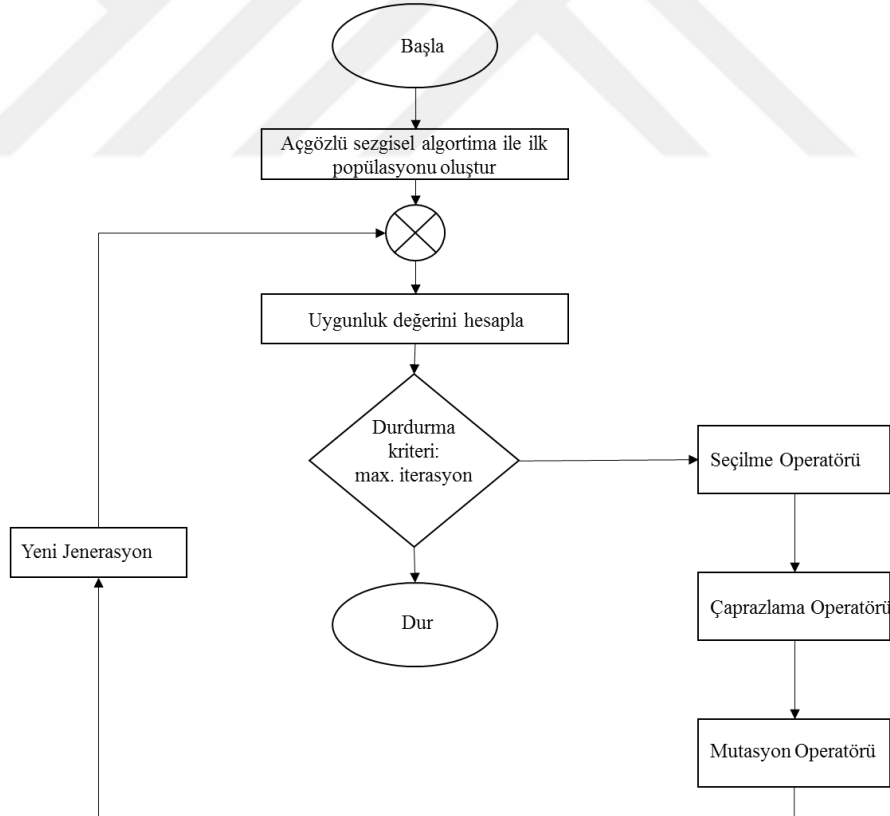
Bu problemde kullanılan GA'nın pseudo kodu aşağıdaki gibi olup, akış şeması Şekil 4.29'da verilmiştir.

```

GA
{Başlangıç popülasyonunu açgözlü sezgisel yöntemle oluştur
  Do
  {
    Kromozomları uygunluk fonksiyonuna göre değerlendir
    Kromozomların rulet tekerleği yöntemi ile seçilimi
    Kromozomlara çaprazlama operatörünü uygula
    Kromozomlara mutasyon operatörünü uygula
    Yeni popülasyonun oluşturulması
  } while (iterasyon sonu)
En iyi kromozomu sonuç olarak al
}

```

Genel anlamda bu problemde kullanılan GA'nın işlem akışı, ilk çözümü açgözlü sezgisel algoritma ile oluşturulan türbin koordinatlarının üzerinde çeşitli operatörlerle yapılan işlemlerden sonra maksimum güç üretimini sağlayacak optimum türbin konumlarından oluşan bireyin oluşturulmasını sağlamaktır.



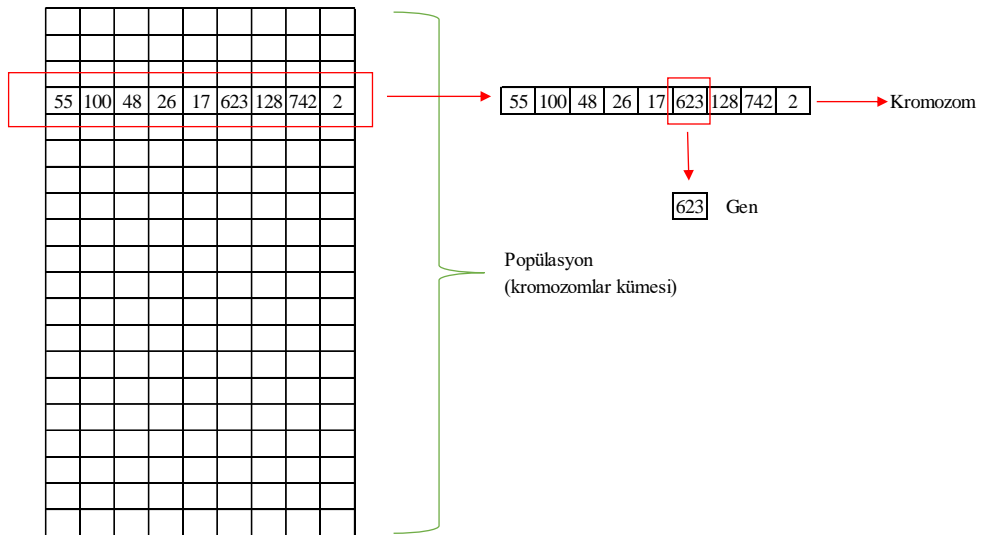
Şekil 4.29: GA akış şeması

Şekil 4.30'da GA'larda kullanılan terimlerin grafiksel gösterimi vardır. Bunların açıklaması aşağıda verilmiştir;

Kromozom: GA, parametre olarak kromozomları kullanır. Bir ya da birden fazla genin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Türbin yerleşimi problemi için gen; bir tane türbinin konumunu ifade ederken; kromozom ise türbinlerin yerleşimini gösteren çözümü yani koordinat noktalarını temsil etmektedir. Örneğin, i türbinin koordinatı olan (x_i, y_i, z_i) bir geni ve n adet genin bir araya gelmesi ile de $[(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_i, y_i, z_i), \dots, (x_n, y_n, z_n)]$ kromozom oluşur. Kromozomun aldığı uygunluk değeri ise problemdeki amaç fonksiyonu olan güç üretimi ile belirlenmektedir.

Bu çalışmada gene karşılık gelen bilgi koordinat olup, geni tanımlamada (x_i, y_i, z_i) kartezyen gösterimi yerine, o noktanın veri setine denk gelen sırası, yani indisi kullanılmıştır.

Popülasyon: Kromozomların bir araya gelmesi popülasyonu oluşturur. Alternatif çözümler kümesidir. Bir problemdeki popülasyonda tanımlanan kromozom sayısı sabittir ve bu çalışmada kromozom sayısı, 29 türbinin koordinatlarını ifade etmektedir. Oluşturulacak popülasyon büyüklüğünün küçük değerde olması, çözüm uzayının küçük olmasına ve bu da aranan en iyi çözüm değerlerine ulaşılamamasına neden olmaktadır. Çözüm uzayının çok büyük değerde olması ise hem GA'nın etkinliğini azaltmakta hem de çözümün farklı noktalarda aranmasına neden olmaktadır [83].

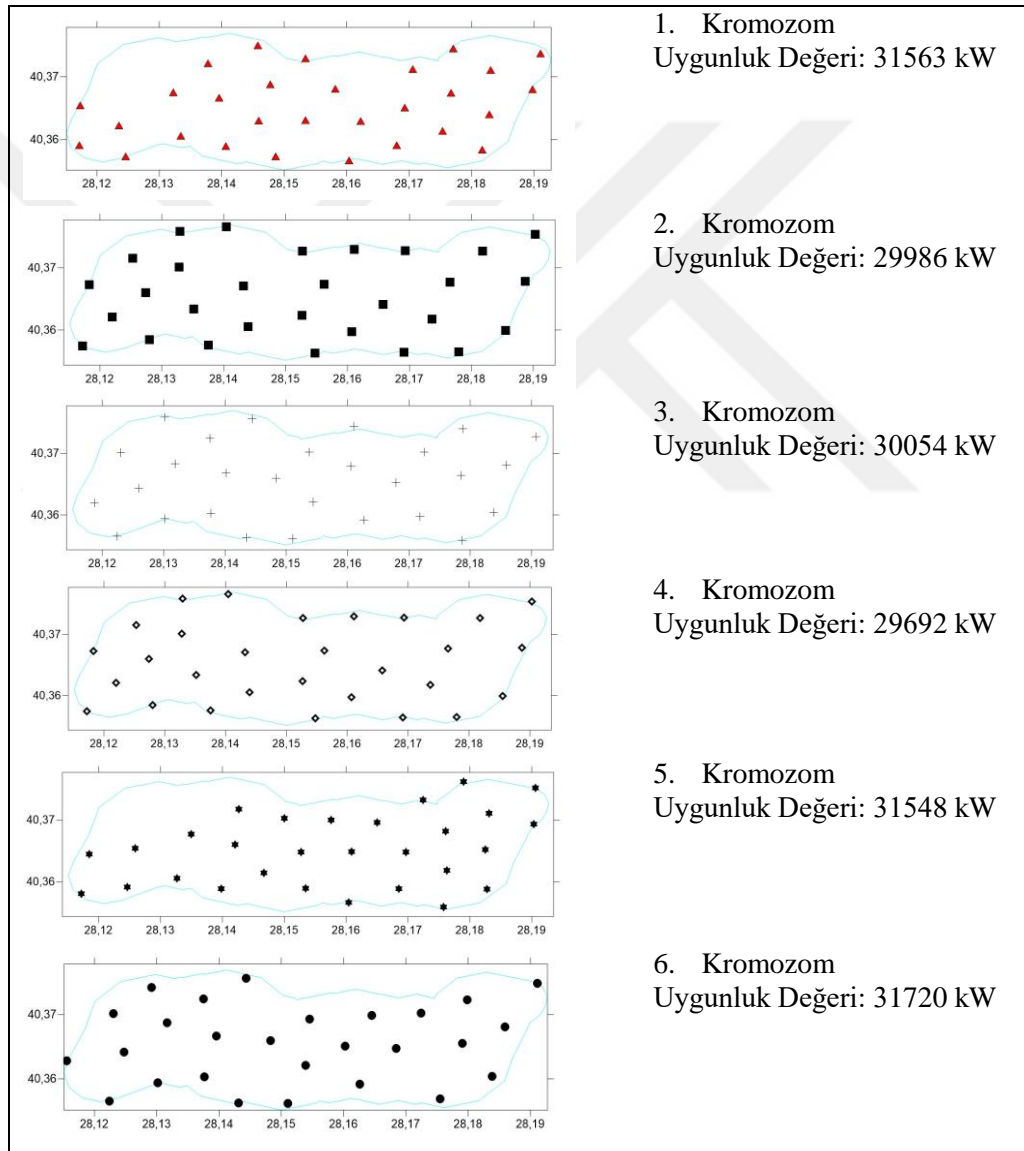


Şekil 4.30: Genetik algoritmalarda kullanılan terimler

GA'nın temel işleyişini oluşturan ve yürütücülüğünü belirleyen kısım ise genetik operatörlerin uygulanmasıdır. Bu optimizasyon problemindeki amaç, mümkün

olabildiğince çok alternatifi deneyerek maksimum güç üretimini sağlayacak türbin yerleşimini bulmaktır. Türbinlerin yerleşim düzenlerinden oluşan popülasyonlar oluşturulmuş ve bu popülasyonun artırılması için üç tip genetik operatör kullanılmıştır. Bunlar; seçilim, çaprazlama ve mutasyon operatörleridir.

Örnek olarak Şekil 4.31’de, 29 türbinin yerleştiği 6 farklı çözüm verilmiştir. Her bir türbinin, Bandırma RES saha sınırları içerisindeki yerleşimi ve ürettiği güç olan uygunluk değerleri de bu şekilde görülmektedir. Operatörlere atanan işlemler bu örnek üzerinden gösterilecektir.

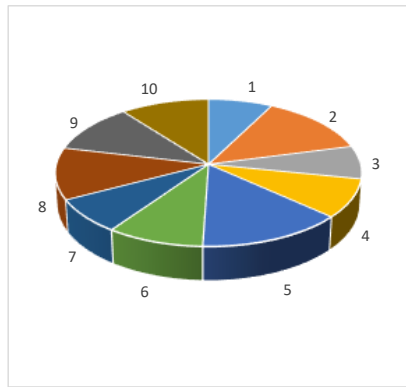


Şekil 4.31: 6 kromozomdan oluşan bir popülasyon örneği ve uygunluk değerleri

Seçilim operatörü: Yeni topluluğu oluşturmak için mevcut topluluktan çaprazlama ve mutasyon işlemine tabi tutulacak kromozomların yani anne ve baba

bireylerin seçilmesi gerekmektedir. Bu operatörün amacı, kromozomun aldığı uygunluk değerine göre yüksek değerli kromozomların seçilmesini sağlamaktır. Çünkü, teoriye göre iyi olan bireyler yaşamını sürdürmeli ve bu bireylerden yeni bireyler oluşturulmalıdır. Bu nedenle tüm seçim yöntemlerinde uygunluk değeri fazla olan bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. Hangi bireylerin anne/baba kromozomları olacağı çeşitli yöntemlerle belirlenmektedir. En bilinen seçim yöntemleri rulet tekerleği seçilimi, turnuva seçilimi ve sıralı seçilimidir.

Sıralı seçim, en kötü uygunlukta olan kromozoma 1 değeri verilir, ondan daha iyi olana 2, daha iyisine 3 değeri verilerek devam edilir. Turnuva seçim ise topluluk içerisinde rastgele k adet birey alınır. Bu bireylerin içerisinde uygunluk değeri en iyi olan birey seçilir. Bu problemde ise rulet tekerleği yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, hayali bir rulet tekerleği üzerinde her bireyin uygunluk değerine oranla yer kaplayacağı bir düzenek tasavvur edilir, rulet tekerleği her dönüşünde ibrenin denk geldiği birey seçilir. Bireyin rulet tekerleği üzerinde kapladığı alan (uygunluk değeri=UD) ne kadar büyükse seçilme şansı o kadar çoktur. Örneğin Şekil 4.32’de altı adet kromozoma karşılık gelen uygunluk değerleri, rulet tekeri üzerinde gösterilmiştir. Her teker dönüşünde en yüksek uygunluk değerini sağlayan 5. kromozomunun seçilme olasılığı diğer kromozomlara göre daha yüksektir.



| Kromozom (Yerleşim) | Uygunluk Değeri (Güç Üretimi - kW) | Kümülatif Toplam (kW) | S |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------|
| 1 | 1300 | 1300 | 0,076 |
| 2 | 2300 | 3600 | 0,209 |
| 3 | 1250 | 4850 | 0,282 |
| 4 | 1460 | 6310 | 0,367 |
| 5 | 2845 | 9155 | 0,532 |
| 6 | 1588 | 10743 | 0,624 |
| 7 | 1298 | 12041 | 0,700 |
| 8 | 1956 | 13997 | 0,813 |
| 9 | 1872 | 15869 | 0,922 |
| 10 | 1800 | 17669 | 1,027 |
| 17669 | | | |

Şekil 4.32: Verilen on kromozoma karşılık gelen uygunluk değerleri ve rulet tekeri gösterimi

Bu problemde rulet tekerinin uygulama aşamaları şöyledir;

- $S = \frac{\text{kromozomun kümülatif toplam uygunluk değeri}}{\text{tüm kromozomların uygunluk değerleri toplamı}}$
- $R = 0$ ile 1 arasında rastgele bir sayı türet,

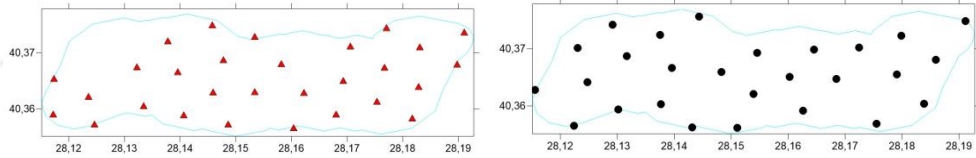
- $R > S$ 'yi sağladığında o bireyi seç.

Kromozomların oluşturulmasında türbinin mümkün olan en yüksek noktaya yerleştirilmesi ile türbinler arası minimum mesafe kriterlerine uygun koordinatlar seçilmiştir. Örneğin Şekil 4.33'te, türbin koordinatlarını ifade eden (x_i, y_i, z_i) 'ye karşılık gelen indisler şeklinde tanımlı anne ve baba bireyler görülmektedir. Bu iki bireyin çaprazlama sonucunda oluşturacağı yavru birey ile popülasyonun artması ve çeşitlenmesi sağlanacaktır.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|-----|-----|------|------|
| 488 | 103 | 548 | 6102 | 254 | 4986 | 10 | 699 | 784 | 32 | 803 | 9 | 578 | 338 | 125 | 463 | 75 | 5872 | 264 | 3008 | 87 | 2004 | 15 | 4832 | 2267 | 129 | 697 | 4888 | 1963 |
| 616 | 231 | 676 | 6230 | 382 | 5114 | 138 | 827 | 912 | 160 | 931 | 137 | 706 | 466 | 253 | 591 | 203 | 6000 | 392 | 3136 | 215 | 2132 | 143 | 4960 | 2395 | 257 | 825 | 5016 | 2091 |

Şekil 4.33: Rulet tekeri yöntemine göre popülasyon arasından seçilen anne ve baba bireyler

Rulet tekeri yöntemine göre Şekil 4.31'de sunulan alternatifler kümesi içinden uygunluk değeri 31563 kW olan 1. birey ile ve uygunluk değeri 31720 kW olan 6. kromozom, çaprazlama işlemi için seçilmişlerdir. Yerleşim düzenleri Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34: Rulet tekeri yöntemine göre popülasyon arasından seçilen anne ve baba bireylerin saha içindeki yerleşim düzeni

Çaprazlama operatörü: Seçilen yerleşimlerin çaprazlanması ile alternatif yeni yerleşim yerleri türetebilmek için çaprazlama işlemi yapılmaktadır. Şekil 4.35 a)'da seçilen anne ve baba bireyler görülmektedir. Ve rastgele seçilmiş bir çaprazlama noktası işaretlenmiştir. Tek noktalı çaprazlama sonunda Şekil 4.35 b)'de anne ve babanın türbin konum bilgilerini kullanarak oluşan yeni bir yerleşim düzeni oluşturulmuştur. Çeşitli denemeler sonucu iki yavru oluşumu sürekli aynı koordinat noktalarını verdiği için bu çalışmada sadece tek bir birey oluşturma yolu tercih edilmiştir.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|-----|-----|------|------|
| 488 | 103 | 548 | 6102 | 254 | 4986 | 10 | 699 | 784 | 32 | 803 | 9 | 578 | 338 | 125 | 463 | 75 | 5872 | 264 | 3008 | 87 | 2004 | 15 | 4832 | 2267 | 129 | 697 | 4888 | 1963 |
| 616 | 231 | 676 | 6230 | 382 | 5114 | 138 | 827 | 912 | 160 | 931 | 137 | 706 | 466 | 253 | 591 | 203 | 6000 | 392 | 3136 | 215 | 2132 | 143 | 4960 | 2395 | 257 | 825 | 5016 | 2091 |

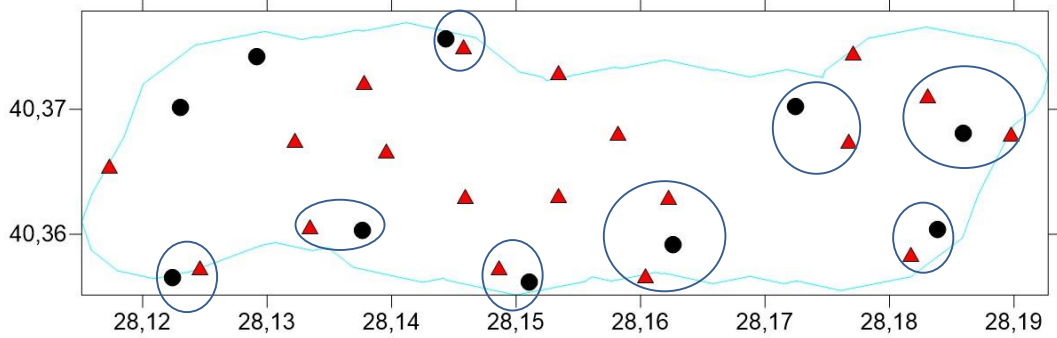
a)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|------|----|-----|-----|----|-----|---|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|-----|-----|------|------|
| 488 | 103 | 548 | 6102 | 254 | 4986 | 10 | 699 | 784 | 32 | 803 | 9 | 578 | 338 | 125 | 463 | 75 | 5872 | 264 | 3136 | 215 | 2132 | 143 | 4960 | 2395 | 257 | 825 | 5016 | 2091 |
|-----|-----|-----|------|-----|------|----|-----|-----|----|-----|---|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|-----|-----|------|------|

b)

Şekil 4.35: Anne ve baba bireylerin tek noktadan çaprazlama örneği a) başlangıç koordinatları ve rastgele seçilen çaprazlama noktası b) çaprazlama sonucu oluşan yavru

Yapılan çaprazlama sonucu ortaya çıkan yeni yerleşim düzeni Şekil 4.36'da görülmektedir. 29 türbinin ilk 20 türbin yerleşimi anneden, diğer 9 türbin yerleşimi ise babadan alınarak yeni bir yerleşim elde edilmiştir. Fakat, şekilden de görüldüğü gibi mesafe kısıtına uymayan türbinler vardır. Bunlar aynı şekil üzerinde daire içinde gösterilmiştir.



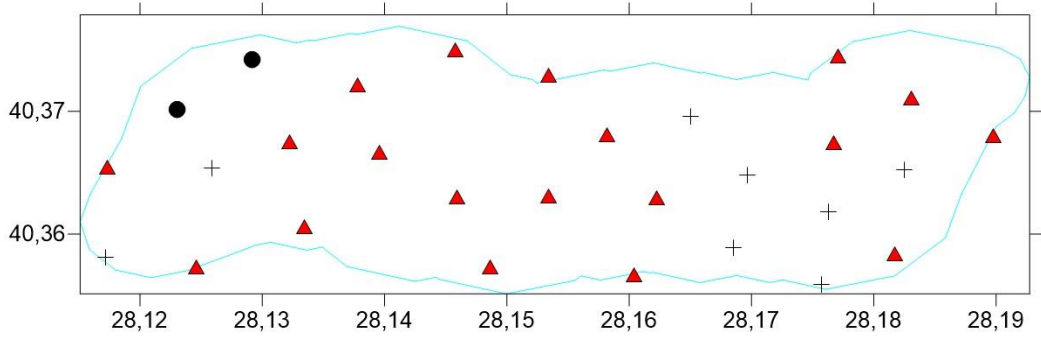
Şekil 4.36: Çaprazlama sonucu oluşan yeni yerleşim düzeni

Çaprazlama sonucu mesafe kısıtına uymayan genlerle karşılaşılması durumunda, algoritmaya koordinat matrisinden mesafe kısıtına uyacak bir nokta seçilmesi tanımlanmıştır. Çaprazlama operatöründe uygulama aşamaları şöyledir;

- Çaprazlama noktası seçmek için 2 ile (kromozom uzunluğu-1) arası rastgele bir sayı türet,
- Bireyleri çiftleştir; çaprazlama noktasına kadar anneden, çaprazlama noktasından sonra ise babadan gelen genleri al,
- Oluşan yavru bireyde babadan gelen ilk gen (3136) ile sırasıyla anneden gelen genlerin (488, 103,..., 2009) arasındaki mesafelerin kontrolünü yap,
- Eğer 7D'den büyükse geni kabul et ve babadan gelen bir sonraki gene (215) geç, tekrar mesafelerin kontrolünü yap,

- Eğer 7D mesafesi kısıtına uymuyorsa bu noktaya 0 değerini ata ve bir sonraki genin kontrolüne geç,
- Tüm kromozomların birbiri ile olan mesafe kontrolleri bitene kadar bu işlemi tekrarla,
- Son gen kontrol edildikten sonra eğer genlerin arasında 0 değeri varsa;
 - H = koordinat matrisindeki tüm yüksekliklerin toplamını hesapla,
 - $S=0$ ile H arasında rastgele sayı türet,
 - Koordinat matrisini azalan yüksekliğe göre sırala, türetilen rastgele sayı S , kısmi toplam olan P , $P \geq S$ 'yi sağladığında o koordinatı seç,
 - Seçilen koordinat minimum mesafe kısıtını sağlayıp sağlamadığını tüm genlerle sırasıyla kontrol et, eğer uyarıya seğıilen geni yerine koy,
 - Eğer uymazsa işlemi tekrarla ve uyanaya kadar devam et.

Tüm bu işlemler sonunda düzeltilmiş yeni yerleşim düzeni Şekil 4.37'de verilmiştir. Burada "+" işareti ile gösterilen türbinler mesafe kısıtına uyan ve türbin yerleşimi mümkün olan en yüksek noktalardır. Bu işlem sonunda hesaplanan uygunluk değeri 31835 kW'tır.



Şekil 4.37: Çaprazlama sonucu türbinlerin nihai yerleşimi

Mutasyon operatörü: Belirli bir aşamadan sonra neslin tekrarlanmaması amacıyla kromozomların bazılarını mutasyona uğratmak için kullanılmaktadır. Şekil 4.37'de, bu çalışmadaki mutasyon operatörünün çalışma sistemi gösterilmiştir. Mutasyona uğrayacak türbinler rastgele seçilmiş ve sonrasında mesafe kısıtını sağlayan yeni noktalar yeni yerleşime dahil edilmiştir. Böylece, daha önce popülasyonda hiç yer almayan türbin noktaları dahil edilerek çeşitlilik sağlanmıştır.

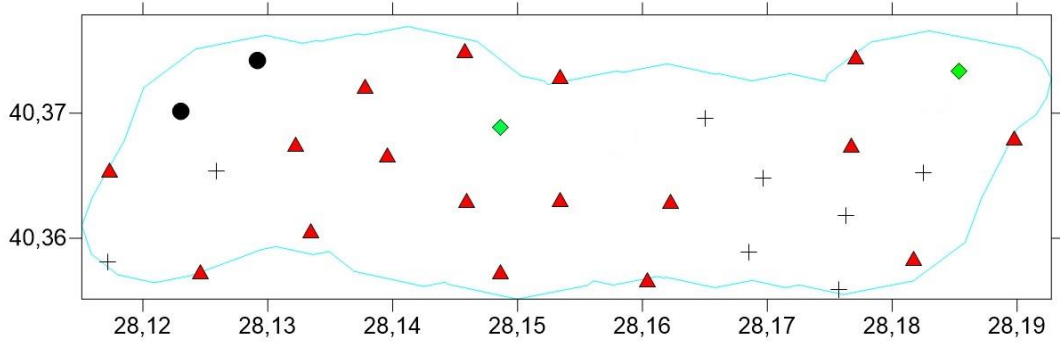
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|------|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|------|----|------|----|------|------|-----|-----|------|------|
| 488 | 103 | 548 | 6102 | 254 | 4986 | 10 | 699 | 784 | 32 | 803 | 9 | 578 | 338 | 125 | 463 | 75 | 5872 | 264 | 3008 | 87 | 2004 | 15 | 4960 | 2267 | 129 | 697 | 5016 | 1963 |
| 488 | 103 | 548 | 6102 | 254 | 4986 | 10 | 699 | 784 | 32 | 803 | 567 | 578 | 338 | 125 | 463 | 75 | 5872 | 264 | 3008 | 87 | 358 | 15 | 4832 | 2267 | 129 | 697 | 4888 | 1963 |

Şekil 4.38: Mutasyon örneği; ilk olarak mutasyona uğrıtılacak rastgele nokta(lar) seçimi

Bu çalışmada yapılan mutasyon operatöründe uygulama aşamaları şöyledir;

- Rulet tekeri yöntemi ile seçilen bireylere uygula,
- 1'den kromozom uzunluğuna kadar rastgele bir sayı türet,
- 1'den koordinat dizisinin toplam indisine kadar rastgele bir sayı türet,
- Tüm genler arasındaki mesafeler minimum 7D sınırını aşarsa kabul et, aksi takdirde kısıt sağlanana kadar başka bir aday seç,
- Tüm adaylar mesafe kısıtına uyduğu takdirde işlemi sonlandır.

Bu işlemlerden sonra, yerleşim düzeni içinde mutasyona uğrayan bireyler eşkenar dörtgen şeklinde Şekil 4.39'de görülmektedir. Mutasyon sonunda ulaşılan nihai yerleşim düzenine göre, santralin toplam güç üretimi 31843,8 kW olmuştur.



Şekil 4.39: Mutasyona uğramış türbin noktalarının gösterimi

Yukarıda bahsedilen tüm işlemler, bir iterasyonun sonucudur. Kullanılan operatörler sayesinde, 31563 kW'lık 1. yerleşim düzeni ile 31720 kW'lık 6. yerleşim düzenin, çaprazlanmasıyla 31835 kW güç üretimini sağlayacak daha iyi bir yerleşim elde edilmiş, daha sonra da mutasyon operatörü ile rasgele seçilen iki türbinin yeri değiştirilip toplamda santralin gücünü 31843,8 kW'a kadar çıkarmıştır. Elde edilen yeni yerleşim düzeni, iterasyonun sonucu olarak sisteme kaydedilmiştir. İterasyon sayısı kadar, operatörler aynı işlemleri sürekli tekrarlamış ve en fazla güç üretimini sağlayan optimal yerleşim düzeni bulunmuştur.

En fazla güç üretimini sağlayan santral yerleşim düzeni, optimal yerleşim düzeni olarak adlandırılmıştır. Optimal yerleşimi bulabilmek için, operatörlere ait çeşitli parametre değerleri denenmiş ve birçok simülasyon yapılmıştır. Bulunan en iyi çözümler arasından, türbinler arası etkileşimin en az olduğu yani güç kayıplarının minimum ve güç üretiminin maksimum olduğu yerleşim düzeni optimal yerleşim olarak 5. Bölüm’de sunulmuştur.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Mevcut Yerleşim Düzeni

Borusan EnBW'den alınan türbin konumları, saha sınırları, rüzgar hız ve yön verilerine göre mevcut şartlar altında türbinlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve güç üretimleri hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplamalar yapılırken 2. Bölüm'de sunulan modeller ile 4. Bölüm'de sunulan varsayımlar kullanılmış olup, hesaplamalarla birlikte optimizasyon algoritmaları MathWorks tarafından sunulan MATLAB R2015a programında kodlanmıştır.

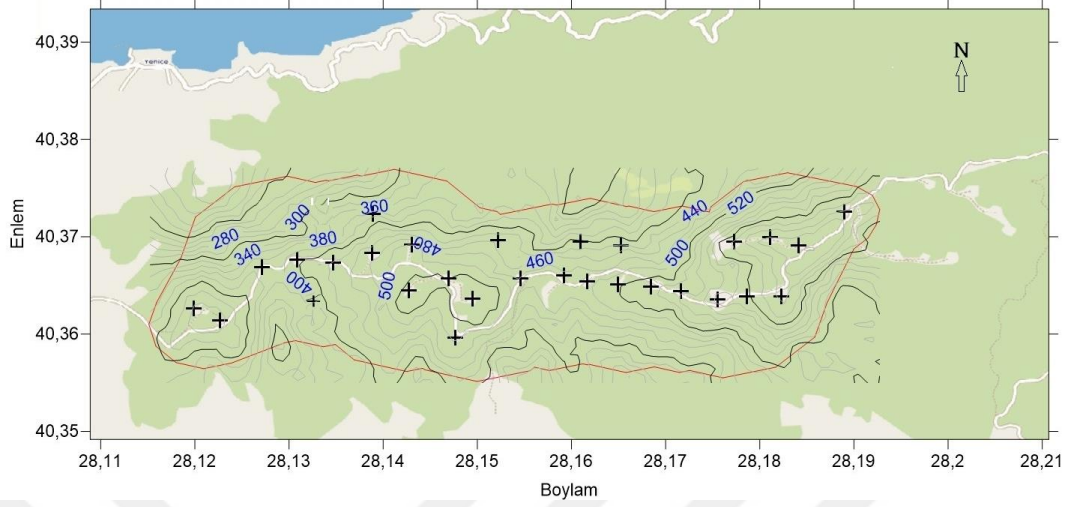
Bandırma RES'e ait lisanslı saha sınırı ve 29 türbinin yerleşim düzeni Google Earth ekran görüntüsü olarak Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Bandırma RES saha sınırları ve türbin yerleşim düzeni

Enlem, boylam ve yükseklik veri seti ile santralin modellenmesi Golden Software tarafından piyasaya sunulan Surfer v14 programı ile yapılmıştır. Bu programın çıktısı ise Şekil 5.2'de sunulmuş olup, saha sınırları kırmızı çizgiyle ve

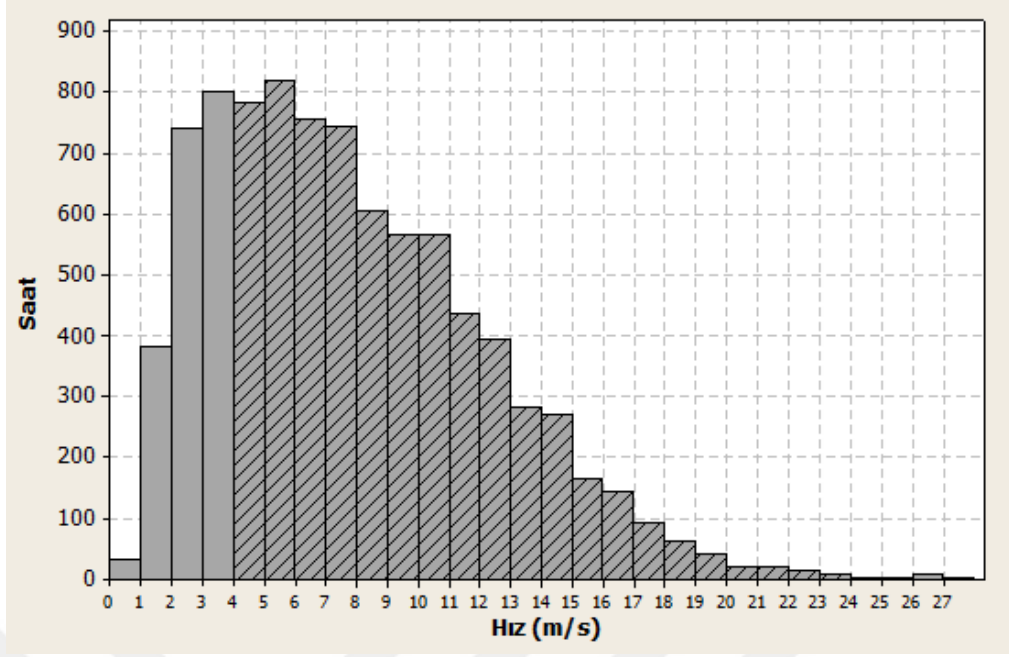
29 türbinin santral içindeki konumları “+” işaretiyle eşyüksehti haritası içinde gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Mevcut rüzgar santral yerleşimi

4. Bölümde yer alan varsayımlar çerçevesinde mevcut yerleşim düzeni ile türbinlerden elde edilecek güç hesaplanmış ve Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Bu çalışmada, varsayımlar doğrultusunda güç ve enerji hesaplamaları yapılırken, birbiriyle aynı karakteristik özelliğe sahip, tek bir tip rüzgar türbini kullanılmıştır. Bu durumda, 29 adet V90-3.0 model 3 MW’lık türbinlerin toplamda, birim zaman içinde ortalama 31973,9 kW güç ürettiği hesaplanmıştır. Bu değer aynı zamanda bir saat içindeki santralin ürettiği ortalama enerjiye eşit olup, santralin saatlik 31973,9 kWh enerji üretimi vardır. Borusan EnBW yetkililerinden, bir türbinin yıllık bakımının 2-3 gün sürdüğü bilgisi alınmıştır. Elektrik satış fiyatının düşük olduğu zamanlar türbinlerin durdurulması, yıllık rutin bakı ve arızalardan kaynaklı durmalar gibi durumlar dışında türbinlerin aktif olmadığı zamanlar; rüzgar hızının 4 m/s’den az ve 25 m/s’den fazla olduğu zamanlardır. Şekil 5.3, sahaya ait rüzgar verilerine dayanarak hazırlanmış rüzgar hızları ile toplam esme süresi arasında oluşturulan histogramı göstermektedir. Taralı olan kısımlar, türbinlerin aktif olarak çalıştığı rüzgar hız aralığını ve bu hızlara karşılık toplam esme saatlerini yani frekansı göstermektedir. Alınan rüzgar verilerine göre yıllık 6786 saat türbinlerin çalışabildiği süre olarak bulunmuştur.



Şekil 5.3: Türbinlerin aktif çalıştığı süreler ve rüzgar hızı aralığı

Fakat, bu çalışmada santralin yıllık enerji üretimi hesaplamalarında, 8760 saatlik ortalama rüzgar hız değerleri ile işlem yapmak yerine, 16 yöne göre yıllık ortalama rüzgar hız değerleri dikkate alınmıştır. Yani, yıl boyunca rüzgarın yıllık ortalama hız değeri ile estiği kabul edilmiştir. Literatürde yer alan [7, 29, 31, 43, 44, 45, 47] çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da enerji hesaplamalarında 8760 saat esas alınmıştır. Fakat, yetkililerden alınan bilgiler doğrultusunda, sahadaki bir türbinin yılda 2-3 gün (48-72 saat) süren bakım süreleri toplam süreden çıkarılmış, bu yüzden yıllık enerji hesaplamaları 8700 saat boyunca estiği kabul edilen yıllık ortalama hız değerleri üzerinden yapılmıştır. Sahadaki türbinlerin ortalama hızları; türbinlerin yükseklikleri, diğer türbinlerle olan etkileşimlerden kaynaklı wake kayıpları ve 16 rüzgar sektörü dikkate alınarak oluşturulmuş değerlerdir.

Borusan EnBW'den bilgi değişimi ve gizlilik anlaşması çerçevesinde alınan farklı zaman dilimlerine ait güç üretim değerleri, 20 adet 3 MW'lık V90-3.0 ile 9 adet 3.3 MW'lık V112-3.3 model türbinlerine aittir. Alınan değerler doğrultusunda, santraldeki 29 türbinden elde edilen birim zaman içinde ortalama güç 32887 kW olup, yılda 286116900 kWh enerji üretildiği bilgisi alınmıştır.

Tablo 5.1: Mevcut santral düzeni içinde türbinlerin konumları ve ürettikleri güç

| Türbin No | X (°) (boylam) | Y (°) (enlem) | Z (m) (yükseklik) | Güç (kW) | Toplam Güç (kW) |
|------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|
| RT01 | 28,11986 | 40,36265 | 465 | 1086,449 | 1086,449 |
| RT02 | 28,12264 | 40,36136 | 465 | 953,688 | 2040,137 |
| RT03 | 28,13089 | 40,36762 | 416 | 1049,478 | 3089,615 |
| RT04 | 28,13469 | 40,36735 | 444 | 1073,092 | 4162,707 |
| RT05 | 28,13886 | 40,36836 | 479 | 1091,699 | 5254,406 |
| RT06 | 28,14302 | 40,36919 | 519 | 1136,908 | 6391,314 |
| RT07 | 28,14274 | 40,36451 | 534 | 1129,076 | 7520,390 |
| RT08 | 28,14694 | 40,36571 | 522 | 1129,237 | 8649,627 |
| RT09 | 28,14948 | 40,36363 | 535 | 1141,671 | 9791,298 |
| RT10 | 28,15458 | 40,36575 | 485 | 1106,937 | 10898,235 |
| RT11 | 28,18107 | 40,36994 | 689 | 1266,316 | 12164,551 |
| RT12 | 28,16168 | 40,36540 | 498 | 1104,254 | 13268,805 |
| RT13 | 28,16492 | 40,36510 | 521 | 1124,975 | 14393,780 |
| RT14 | 28,16844 | 40,36489 | 537 | 1147,786 | 15541,565 |
| RT15 | 28,17724 | 40,36950 | 645 | 1234,533 | 16776,099 |
| RT16 | 28,17167 | 40,36439 | 560 | 1161,247 | 17937,346 |
| RT17 | 28,17553 | 40,36393 | 602 | 1195,848 | 19133,195 |
| RT18 | 28,18233 | 40,36385 | 659 | 1058,513 | 20191,708 |
| RT19 | 28,18416 | 40,36913 | 699 | 1261,971 | 21453,679 |
| RT20 | 28,18900 | 40,37256 | 676 | 1257,833 | 22711,512 |
| RT21 | 28,12725 | 40,36751 | 390 | 1024,604 | 23736,117 |
| RT22 | 28,13594 | 40,36427 | 453 | 877,712 | 24613,829 |
| RT23 | 28,13841 | 40,37175 | 419 | 1052,489 | 25666,318 |
| RT24 | 28,15087 | 40,36953 | 468 | 1095,628 | 26761,946 |
| RT25 | 28,14770 | 40,35953 | 498 | 894,517 | 27656,462 |
| RT26 | 28,16040 | 40,36905 | 448 | 1078,042 | 28734,504 |
| RT27 | 28,16554 | 40,36842 | 473 | 1099,364 | 29833,868 |
| RT28 | 28,15750 | 40,36699 | 488 | 1098,413 | 30932,281 |
| RT29 | 28,17837 | 40,36404 | 612 | 1041,622 | 31973,903 |

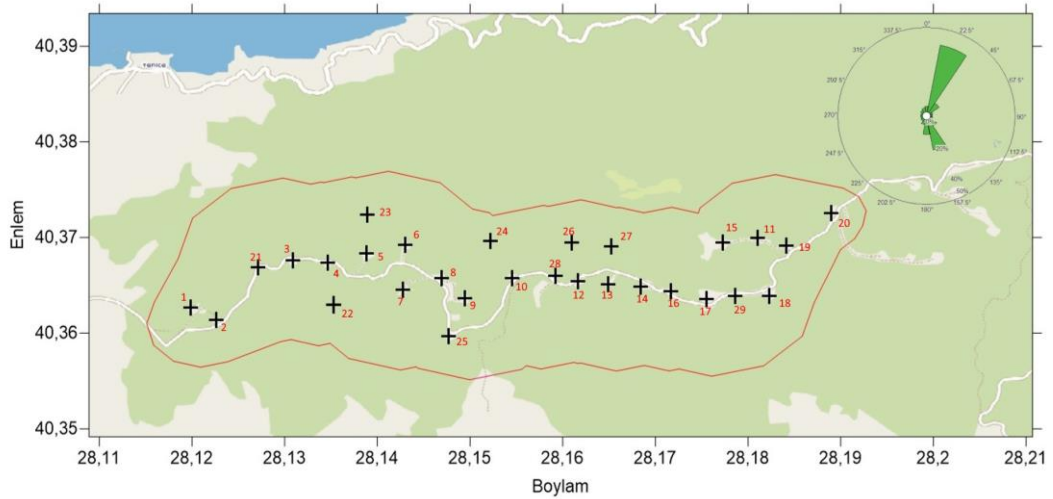
Varsayımlar doğrultusunda mevcut yerleşim düzeni ile bu çalışmada hesaplanan yıllık enerji üretim değerinin, gerçek üretim değerinden %2,77 kadar daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, gerçek üretim değerleri toplamda 89,7 MW kurulu güce sahip santrali yansıtırken, yapılan hesaplamalarda santralin kurulu gücünün 87 MW olarak tasarlanmasıdır. 2,7 MW'lık kurulu güç farkı da gerçek güç değeri ile çalışmadaki hesaplanan güç değeri arasındaki farkın en büyük sebebidir.

Tablo 5.2: Mevcut yerleşim düzeninde gerçek veriler ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

| | Santrale ait Gerçek Veriler | Varsayımlar Doğrultusunda Hesaplanan Teorik Değerler |
|--------------------------------------|--|---|
| Türbin modelleri | 20 adet V90-3.0 MW 9 adet V112-3.3 MW | 29 adet V90-3.0 MW |
| Toplam Türbin sayısı | 29 türbin | 29 türbin |
| Kurulu güç | 89,7 MW | 87 MW |
| ∑ Güç Üretimi (kW) | 32887,28 | 31973,90 |
| ∑ Yıllık Enerji Üretimi (kWh) | 286119311,00 | 278172959,94 |

Tablo 5.2, santralden alınan gerçek veriler ile bu çalışmada tasarlanan sahanın karşılaştırmasını göstermektedir.

Türbinlerin güç üretim durumları Tablo 5.1’de; mevcut yerleşim düzenine göre saha sınırları içindeki türbinlerin konumları ile numaraları ise Şekil 5.4’te verilmiştir. Buna göre; en fazla güç üreten türbin 1266,316 kW ile RT11’dir. RT11, 689. metreye yerleştirilmiş olup, hız kayıplarını %1,69 olasılıkla 67.5°’den esen rüzgar sonucunda RT20’dan ve %1,12 ihtimalle 270°’den esen rüzgar sonucunda RT15, RT27 ve RT26’dan dolayı yaşamaktadır. Fakat, rüzgarın belirtilen yönlerden esme sıklığı düşük olduğu için RT11; 751,35W’lık kayıpla en fazla güç üreten türbin durumundadır.



Şekil 5.4: Mevcut yerleşim düzeni

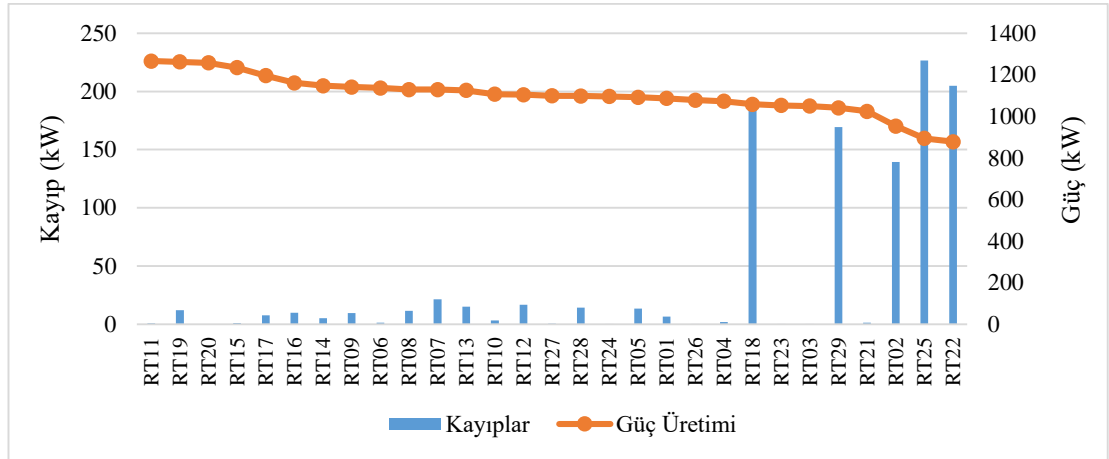
En az güç üreten türbin ise 894,517 kW ile RT25’tir. Altı farklı yönden toplamda on altı rüzgar türbininden etkilenmektedir. En fazla hız kaybını %40,4

olasılıkla 22,5°'den esen rüzgar sonucunda RT09'dan kaybetmektedir. Mevcut durumda en fazla güç üreten türbin ile en az güç üreten türbinlere ait rüzgar hız kayıpları aşağıdaki Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

Tablo 5.3: Mevcut yerleşim düzenine göre en fazla ve en az güç üreten türbinler

| | | RT11 | RT25 |
|-----------------------------|---------------|------------------|------------------------------------|
| Ortalama Güç Değeri | | 1266,316 kW | 894,517 kW |
| Konum Yüksekliği | | 689 m | 498 m |
| Rüzgar Hız Kayıpları | 0° | %3,42 | -- |
| | 22,5° | %40,40 | -- |
| | 45° | %6,78 | -- |
| | 67,5° | %1,69 | RT20 |
| | 270° | %1,12 | RT15, RT27, RT26 |
| | 292,5° | %1,23 | -- |
| | 337,5° | %2,66 | -- |
| | | RT8, RT9 | RT9 |
| | | RT10, RT26, RT28 | RT12, RT13, RT14, RT15, RT19, RT20 |
| | | -- | RT21, RT22 |
| | | RT6, RT8 | |

Şekil 5.5'te ise yapılan hesaplamalardan sonra elde edilen her türbinin, güç kaybı ve ürettikleri güç gösterilmiştir. En fazla güç üreten türbinden en az güç üreten türbine göre sıralanan bu grafikte, en fazla güç kaybı yaşayan RT25 ve RT22, santralde en az güç üreten iki türbindir. En fazla güç üretimi RT11'de görülürken, wake sebebiyle hız kaybı yaşamayan RT20 ise en fazla güç üreten üçüncü türbin durumundadır.



Şekil 5.5: Mevcut yerleşim düzeninde türbinlerin kayıpları ve ürettikleri güç

Her bir türbinin, 16 farklı sektörden esen rüzgara göre oluşacak wake kayıpları Tablo 5.3'te sunulmuştur. Bu tabloda 16 yön ile bu yönlerden esecek rüzgar olasılıkları yüzdesel olarak üst satırda verilmiştir. RT satırlarında yer alan her wake kaybı değeri, rüzgarın o yönde %100 estiği durumda yaşanacak değeri ifade etmektedir. Bu yüzden,

tabloda verilen en alttaki toplam satır ile en sağdaki toplam sütün; esme sıklıkları ile hız kayıpların çarpımının toplanması ile elde edilmiştir.

Bu tabloya göre en fazla wake kaybının yaşandığı rüzgar sektörü 22,5° olup; RT02, RT18, RT22, RT25 ve RT29 türbinlerden toplam 881525,5 W'lık kayıp yaşanmaktadır. Hiç wake kaybının yaşanmadığı rüzgar sektörleri 157,5°, 180° ve 202,5°'dir. Tüm rüzgar sektörleri dikkate alındığında ise RT20'de hiç bir wake kaybının olmadığı görülmektedir.

Sonuç olarak, mevcut düzendeki türbin yerleşimine göre santralde toplam güç üretimi 31973903 W ve toplam wake kaybı 1080583,54 W bulunmuştur. Tablo 5.4, santralin mevcut yerleşim düzenine göre yapılan hesaplamaların bir özeti olarak aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.4: Mevcut yerleşim düzenine göre yapılan hesaplamalar özeti

| | |
|---|-------------------------------|
| Toplam güç üretimi | 31973,9 kW |
| Toplam wake kaybı | 1080,584 kW |
| Max. güç üreten türbin | RT11 - 1266,316 kW |
| Min. güç üreten türbin | RT25 -894,517 kW |
| En fazla wake kaybı yaşanan yön | 22,5° - 881,525 kW |
| En az wake kaybı yaşanan yön | 157,5°, 180° ve 202,5° - 0 kW |
| Wake etkisinde kalmayan türbin | RT20 |
| En fazla wake kaybı yaşayan türbin | RT25 – 226,479 kW |
| En az wake kaybı yaşayan türbin | RT20 – 0 kW |

Tablo 5.5: Mevcut yerleşim düzeninde rüzgar sektörlerine göre 29 türbin üzerindeki wake kayıpları toplamları¹

| Esme sıklığı | 3,42% | 40,40% | 6,78% | 1,69% | 1,03% | 1,60% | 5,06% | 18,37% | 8,85% | 3,07% | 1,68% | 1,20% | 1,12% | 1,23% | 1,83% | 2,66% | TOPLAM |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Sektör | 0° | 22,5° | 45° | 67,5° | 90° | 112,5° | 135° | 157,5° | 180° | 202,5° | 225° | 247,5° | 270° | 292,5° | 315° | 337,5° | (W) |
| RT01 | 0 | 0 | 90844,78 | 25552,56 | 3736,055 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6629,60 |
| RT02 | 0 | 328736,8 | 81774,03 | 14298,74 | 2035,849 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 62898,2 | 0 | 0 | 139390,21 |
| RT03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29415,77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 302,98 |
| RT04 | 0 | 0 | 0 | 68892,28 | 4701,879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44805,07 | 0 | 0 | 0 | 1714,53 |
| RT05 | 356062,8 | 0 | 0 | 65059,69 | 5981,325 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13338,47 |
| RT06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31895,89 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57605,69 | 0 | 1382,71 |
| RT07 | 292024,9 | 0 | 87721,8 | 66234,14 | 7563,435 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63150,25 | 0 | 27156,19 | 53488,97 | 80987,29 | 21356,99 |
| RT08 | 0 | 0 | 138327,2 | 23578,8 | 31964,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23264,15 | 60302,63 | 0 | 11495,99 |
| RT09 | 0 | 0 | 0 | 64934,37 | 8272,585 | 0 | 131321 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11367,17 | 12559,85 | 79591,25 | 0 | 9565,76 |
| RT10 | 0 | 0 | 0 | 113715,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4270,135 | 18476,9 | 53324,44 | 3172,71 |
| RT11 | 0 | 0 | 0 | 42943,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2286,648 | 0 | 0 | 751,35 |
| RT12 | 0 | 0 | 151044,8 | 24947,39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60169,79 | 0 | 22603,72 | 64504,67 | 0 | 151218,5 | 16742,28 |
| RT13 | 369126,3 | 0 | 0 | 31185,85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47519,43 | 28305,77 | 49931,76 | 0 | 14945,29 |
| RT14 | 0 | 0 | 0 | 31678,98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48058,08 | 9966,641 | 0 | 145083,1 | 5055,43 |
| RT15 | 0 | 0 | 0 | 29015,11 | 34618,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5470,204 | 0 | 0 | 0 | 908,19 |
| RT16 | 0 | 0 | 106759,8 | 24398,41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48818,59 | 67386,88 | 44323,92 | 0 | 9837,40 |
| RT17 | 0 | 0 | 96648,73 | 0 | 33721,91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50168,09 | 11946,17 | 0 | 0 | 7608,94 |
| RT18 | 0 | 461289,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 51925,72 | 13360,17 | 0 | 0 | 187107,03 |
| RT19 | 0 | 0 | 144626,2 | 0 | 0 | 72730,51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23835,92 | 73315,14 | 0 | 0 | 12138,08 |
| RT20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| RT21 | 0 | 0 | 0 | 25391,05 | 28744,09 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42762,59 | 0 | 0 | 1204,11 |
| RT22 | 0 | 476901 | 91812,91 | 18795,86 | 30337,84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20494,74 | 49034,56 | 161761,4 | 204975,34 |
| RT23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1113,311 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,47 |
| RT24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2671,458 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27,52 |
| RT25 | 225555,1 | 517767,7 | 109376,3 | 23083,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16357,5 | 0 | 59422,52 | 226479,81 |
| RT26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8196 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17189,72 | 0 | 0 | 0 | 276,94 |
| RT27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5402,479 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45852,51 | 0 | 0 | 0 | 569,19 |
| RT28 | 0 | 0 | 184976,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72821,87 | 0 | 10528,65 | 27523,85 | 0 | 0 | 14221,26 |
| RT29 | 0 | 397298,3 | 119277,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50482,35 | 17319,7 | 0 | 0 | 169373,99 |
| TOPLAM | 42502,71 | 881525,5 | 95136,32 | 11723,61 | 2784,835 | 1163,688 | 6644,841 | 0 | 0 | 0 | 2234,26 | 757,803 | 5912,979 | 6086,489 | 8191,139 | 15919,38 | 1080583,54 |

¹ Toplam satırı ve sütunu, her hücrede belirtilen RT hız kayıplarının karşılık gelen esme sıklığı ile çarpımı sonucu oluşturulmuştur.

5.2 Optimal Yerleşim Düzeni

Sahanın optimizasyonunda meta-sezgisel bir yöntem olan genetik algoritmalar kullanılmıştır. Öncelikle MATLAB programına koordinat matrisi yüklenmiş ve ardından yükseklik verileri ve iki türbin arası minimum mesafe kısıtına göre saha sınırları içine yerleştirilecek 29 türbin ile ilk yerleşimi yapması ve popülasyon sayısı kadar çözüm kümeleri üretmesi sağlanmıştır. Ardından GA parametreleri olarak popülasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları ile maksimum iterasyon sayıları değiştirilerek çeşitli simülasyonlar yapılmıştır. Mevcut durumdan daha iyi çözüm sunan yani daha az wake kaybı ile daha fazla güç üretimi sağlayan çözüm, optimum yerleşim düzeni olarak sunulmuştur. Yapılan tüm işlemlere dair detaylar, izleyen bölümlerde verilmiştir.

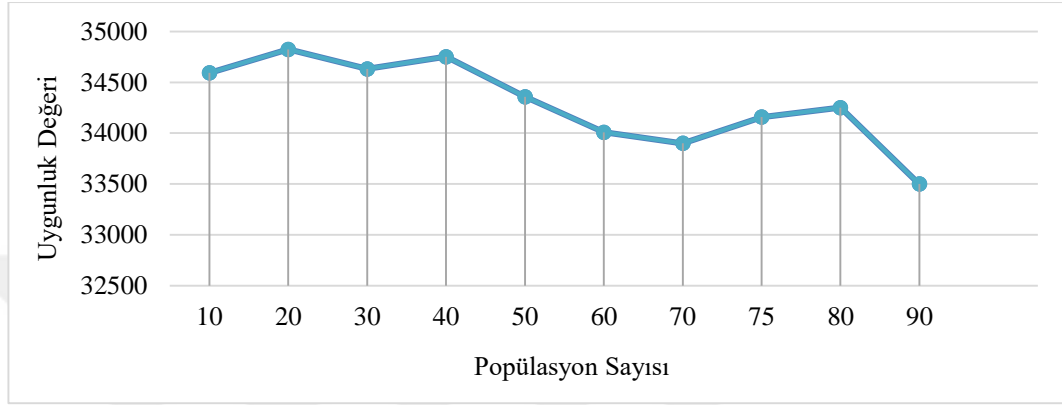
5.2.1 Algoritma Parametrelerinin Seçimi

Tüm algoritmalar, bir çözümün kalitesini önemli derecede etkileyen belirli parametrelere sahiptir. Bu nedenle, optimum veya optimuma yakın çözümler sağlamak için algoritma parametrelerinin en uygun değerlerini bulmak çok önemlidir. Bu da ancak, her parametre için farklı değerlerin denenmesiyle mümkündür.

Bu tez çalışmasında maksimum iterasyon sayısı, popülasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranlarından oluşan dört parametre değişik değerler atanarak simüle edilmiş ve birçok denemeden sonra optimum yerleşim bulunmuştur.

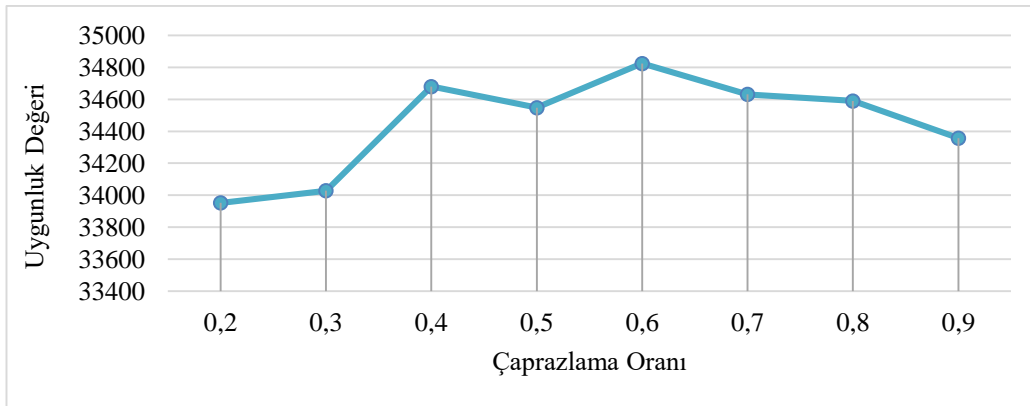
Eğer algoritmada popülasyon sayısı yeterli değilse bu durumda algoritma çözüm alanının çok sınırlı bir kısmını araştırarak ve çaprazlama imkanı çok düşük kalacaktır. Öte yandan, popülasyon sayısının büyüklüğü GA'yı yavaşlatmaktadır. Sınırları belirli rüzgar santralinde, mümkün olabilen türbin yerleşim düzeni kombinasyonları sınırlı olduğundan, büyük popülasyon boyutlarında, kromozomların sürekli kendini tekrarladığı gözlemlenmiştir. Bu da iyi bir çözüm bulmak yerine uzun hesaplama sürelerine neden olmuştur.

Şekil 5.6, iterasyon sayısı 1000, çaprazlama oranı 0,6 iken popülasyon sayısı ile uygunluk değeri diye ifade edilen güç üretim değeri arasındaki değişimi göstermektedir. En iyi uygunluk değerinin 20 popülasyonla elde edildiği, özellikle 40 popülasyondan sonraki tüm simülasyonlarda uygunluk değerinin düştüğü görülmektedir. En iyi performansı sağladığı için bu çalışmada popülasyon sayısı parametresi 20 olarak belirlenmiştir..



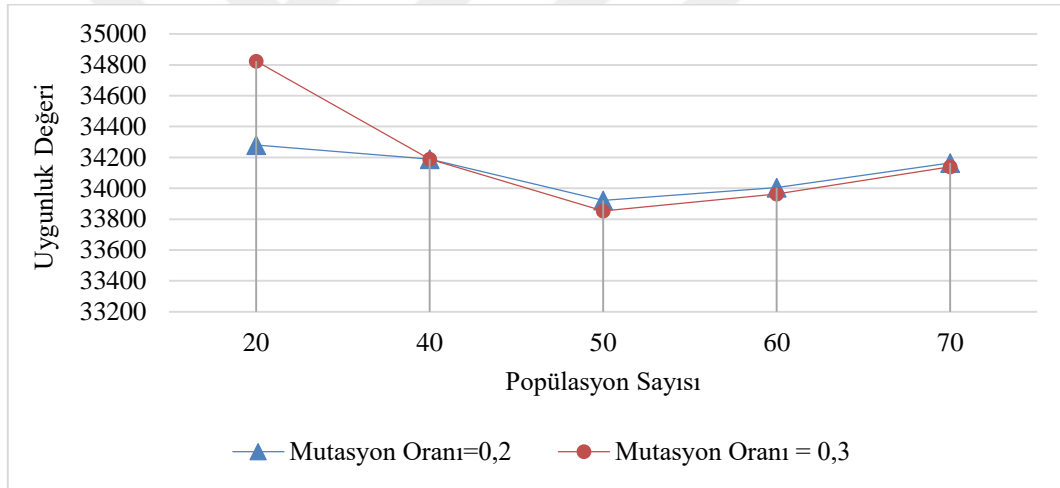
Şekil 5.6: Popülasyon sayısı ile uygunluk değeri arasındaki değişim

Şekil 5.7'de ise uygunluk değerine karşı çaprazlama oranları değişimi görülmektedir. Çaprazlama oranı, 0 ile 1 arasında olmaktadır. Bu yüzden, tüm parametreler aynıken yalnızca çaprazlama oranı 0,1'den 0,9'a kadar değiştirilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. En yüksek uygunluk değeri, çaprazlama oranı 0,6 olduğunda elde edilmiştir. Bununla birlikte, hesaplamalar sırasında çaprazlama oranlarının 0,5; 0,7 ve 0,8 olması durumunda elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7: Çaprazlama oranına karşı uygunluk değeri değişimi

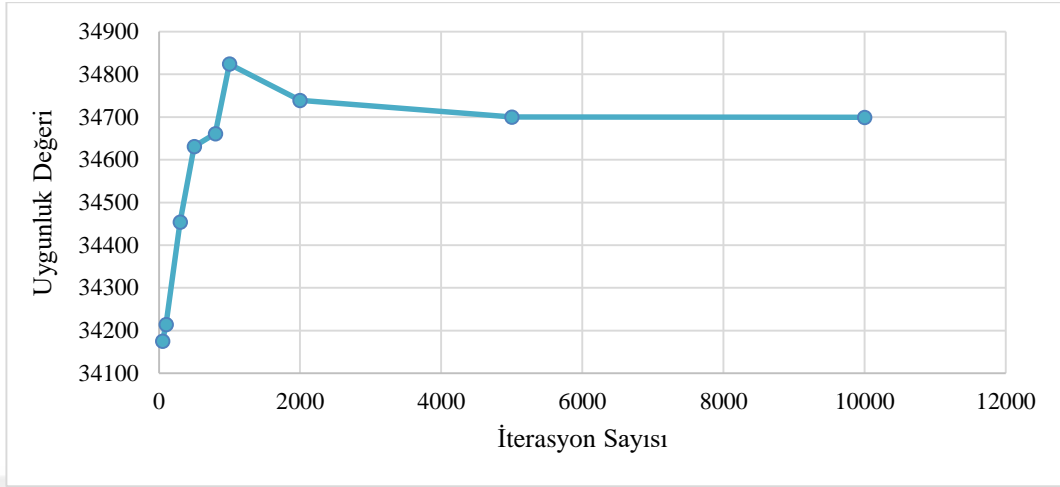
Farklı mutasyon oranları, popülasyon sayısı değiştirilip diğer tüm parametreler aynı tutularak karşılaştırılmıştır. Mutasyon operatörü, algoritmayı yerel maksimuma düşürmeyi önlemeye yöneliktir. Aynı çaprazlama operatörü gibi, mutasyon oranı da 0 ile 1 arasında bir değer olmalıdır. Popülasyonda çok sık mutasyon olması durumunda, GA kendisini rastgele aramaya dönüştürmektedir. Mosetti vd. [9] ve Wan vd. [11] mutasyon oranının genellikle 0,01 ile 0,1 arasında olduğunu kabul etmişlerdir. Bu tez çalışmasında popülasyon büyüklüğü diğer çalışmalara göre daha düşük olduğundan en fazla güç üreten santral düzeninin, mutasyon oranları 0,2 ve 0,3 iken elde edildiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.8'de farklı popülasyon sayıları ile mutasyon oranlarının karşılaştırma grafiği görülmektedir. Tüm denemeler, mutasyon oranı 0.3 olduğunda en iyi uygunluk değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, değişen mutasyon oranlarına karşılık uygunluk değerlerinin aynı eğilimde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.8: Değişen mutasyon oranları ve popülasyon sayısına göre uygunluk değerleri

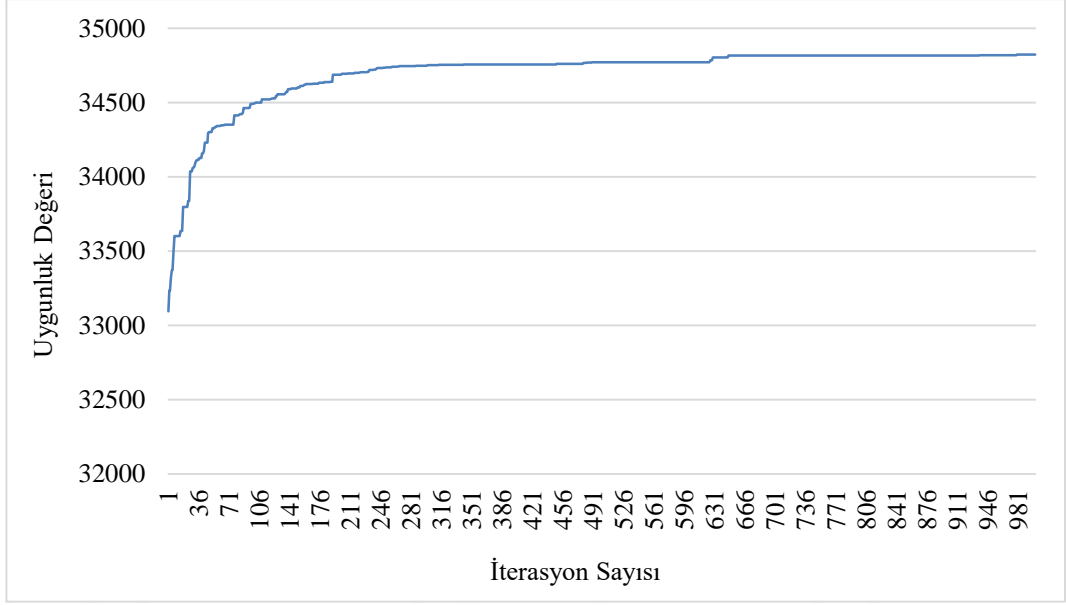
Maksimum iterasyon sayısı, bu algortmada durdurma kriteri olarak belirlenmiştir. Diğer üç parametre sabit tutulup, sadece iterasyon sayısı değiştirilerek ulaşılan uygunluk değerleri grafiği Şekil 5.9'da sunulmuştur. Algoritmanın, iterasyon sayısı arttıkça çözüm alanını daha fazla taradığından daha iyi çözümler bulma ihtimali fazladır. Fakat, belirli bir adımdan sonra daha fazla iyi nokta kalmadığından ya da global maksimuma ulaştığı için sürekli aynı sonuçları verir. Bu yüzden iterasyon sayısını doğru tayin edebilmek, birçok deneme sonucu anlaşılabilir. Çalışma sırasında birçok iterasyon sayısı denemiş ve iterasyon sayısı arttıkça hesaplama sürelerinin

uzadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, en iyi çözümler 1000 iterasyon ve üzeri ile sağlanmış, 5000 iterasyondan sonra çözümler iyileşmemiştir.



Şekil 5.9: İterasyon sayısına karşı uygunluk değeri değışimi

En iyi çözümleri veren simülasyonda iterasyon sayısı 1000 olup, her iterasyon sonucu uygunluk değeri değışimini gösteren grafik Şekil 5.9'da verilmiştir. Buna göre, ilk 300 iterasyonda sürekli iyileştirmeler gözlemlenirken, 300 iterasyondan sonraki uygunluk değeri değışimlerinin az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, algoritmanın 7D kısıtına uygun mümkün olabilecek en yüksek noktaları bulabilmek için koordinat matrisini sırayla taramasıdır. Bütün optimizasyon süreçlerinde ilk iterasyonlarda hızlı iyileştirmeler yaşanırken, belirli bir noktadan sonra yavaşlar ve sonra da durur. Şekil 5.10, optimizasyon sürecindeki iyileştirmelerin adımlarını göstermekte olup, en son iyileştirmenin 978. iterasyonda olduğunu ve optimum yerleşim düzenine ulaşıldığını göstermektedir.



Şekil 5.10: Her iterasyon sonucu uygunluk değerlerindeki değişim

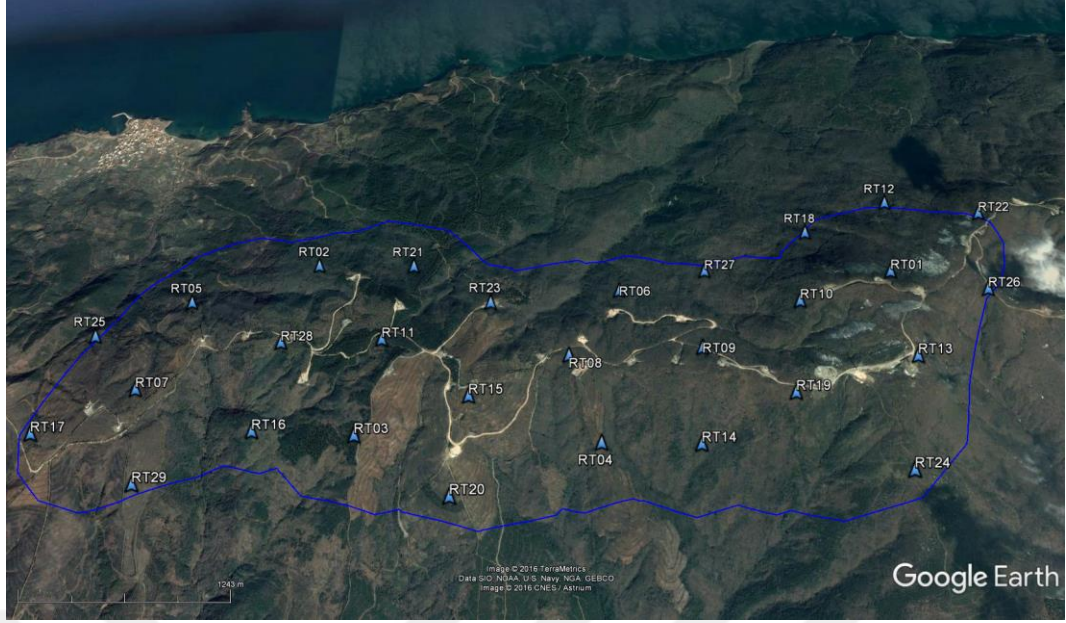
En az wake kaybı ile en fazla güç üreten en iyi yerleşim düzenini bulmak için birçok simülasyon yapılmış ve en iyi çözümü veren parametrelerin özeti Tablo 5.6’da sunulmuştur.

Tablo 5.6: Optimum çözümü veren GA parametrelerinin özet tablosu

| Parametreler | Değeri |
|---------------------------|--------|
| Kromozom Sayısı | 29 |
| Popülasyon Büyüklüğü | 20 |
| Çaprazlama Oranı | 0,6 |
| Mutasyon Oranı | 0,3 |
| Maksimum İterasyon Sayısı | 1000 |

5.2.2 Optimizasyon Sonucu

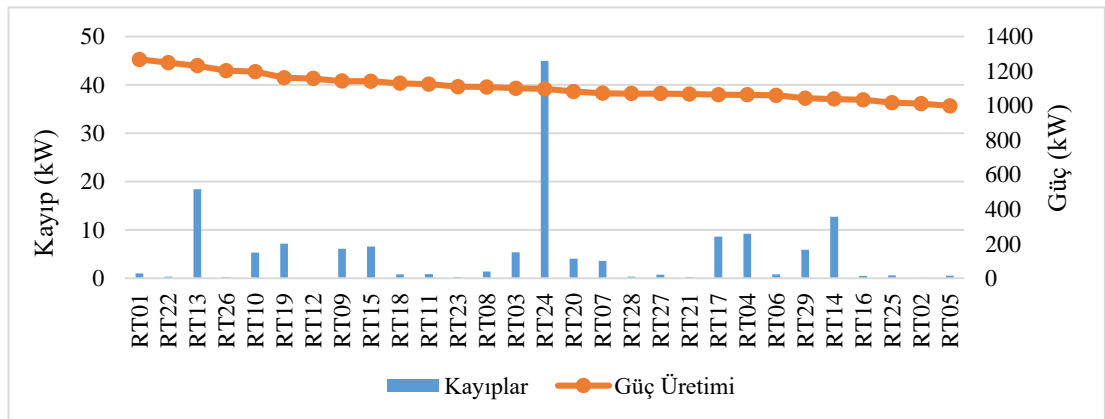
MATLAB programında yapılan çeşitli parametrelerin denenmesiyle, birçok simülasyon yapılmış ve en az güç kaybı ile en fazla güç üreten optimize edilmiş saha yerleşim düzenini elde edilmiştir. Önerilen türbin yerleşimleri saha sınırları ile birlikte Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11: Optimize edilmiş santral yerleşimi

Önerilen duruma dair türbinlerin koordinatları, her türbinin ürettiği güç ve toplam güç değerleri Tablo 5.7’de sunulmuştur.

Şekil 5.12’de yapılan hesaplamalardan sonra elde edilen her türbinin, güç kaybı ve ürettikleri güç gösterilmiştir. Bu grafikte, en fazla güç üreten türbinden en az güç üreten türbine göre sıralanmış ve her türbinin güç kaybı, bu grafiğe yansıtılmıştır. En fazla güç kaybı yaşayan RT24 olmasına rağmen, bu türbin ortalama bir güç üretimi sağlayabilmiştir. En fazla güç üretimi ise güç kaybı 0,99 kW olan RT01’dir. Wake sebebiyle hız kaybı yaşamayan RT12 ise en fazla güç üreten yedinci türbindir.



Şekil 5.12: Önerilen durumda türbinlerin güç üretimleri ile güç kayıpları

Tablo 5.7: Optimize edilmiş sahada türbinlerin konumları ve ürettikleri güç

| Türbin No | X (°) (boylam) | Y (°) (enlem) | Z (m) (yükseklik) | Güç (kW) | Toplam Güç (kW) |
|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|
| RT01 | 28,182231 | 40,369581 | 691 | 1267,494 | 1267,494 |
| RT02 | 28,135929 | 40,372127 | 375 | 1011,617 | 2279,111 |
| RT03 | 28,140598 | 40,35991 | 480 | 1100,506 | 3379,618 |
| RT04 | 28,158941 | 40,359509 | 441 | 1062,947 | 4442,564 |
| RT05 | 28,125706 | 40,369597 | 362 | 998,612 | 5441,176 |
| RT06 | 28,160986 | 40,369789 | 428 | 1059,814 | 6500,990 |
| RT07 | 28,123401 | 40,363027 | 445 | 1072,083 | 7573,074 |
| RT08 | 28,156685 | 40,364945 | 484 | 1107,830 | 8680,904 |
| RT09 | 28,167031 | 40,365186 | 532 | 1142,718 | 9823,622 |
| RT10 | 28,175017 | 40,368052 | 601 | 1197,369 | 11020,991 |
| RT11 | 28,14206 | 40,365984 | 504 | 1125,095 | 12146,086 |
| RT12 | 28,184000 | 40,375854 | 543 | 1157,637 | 13303,723 |
| RT13 | 28,182882 | 40,363934 | 665 | 1231,523 | 14535,246 |
| RT14 | 28,166408 | 40,359459 | 418 | 1038,889 | 15574,135 |
| RT15 | 28,14903 | 40,362129 | 531 | 1141,473 | 16715,607 |
| RT16 | 28,132642 | 40,360533 | 399 | 1033,742 | 17749,350 |
| RT17 | 28,116224 | 40,360346 | 441 | 1063,567 | 18812,917 |
| RT18 | 28,176863 | 40,37374 | 509 | 1129,299 | 19942,216 |
| RT19 | 28,173622 | 40,362116 | 558 | 1162,337 | 21104,553 |
| RT20 | 28,147837 | 40,356348 | 457 | 1082,125 | 22186,678 |
| RT21 | 28,143991 | 40,371719 | 436 | 1067,504 | 23254,183 |
| RT22 | 28,190873 | 40,374142 | 664 | 1248,879 | 24503,062 |
| RT23 | 28,150494 | 40,368694 | 485 | 1109,868 | 25612,930 |
| RT24 | 28,181288 | 40,357472 | 523 | 1096,563 | 26709,493 |
| RT25 | 28,118616 | 40,367076 | 382 | 1017,666 | 27727,159 |
| RT26 | 28,19003 | 40,368703 | 601 | 1202,482 | 28929,641 |
| RT27 | 28,168189 | 40,371268 | 439 | 1069,673 | 29999,314 |
| RT28 | 28,133924 | 40,366186 | 439 | 1070,022 | 31069,336 |
| RT29 | 28,124611 | 40,357327 | 415 | 1042,982 | 32112,318 |

Tablo 5.8: Optimal yerleşim düzeninde rüzgar sektörlerine göre 29 türbin üzerindeki wake kayıpları toplamı ²

| Esme sıklığı | 3,42% | 40,40% | 6,78% | 1,69% | 1,03% | 1,60% | 5,06% | 18,37% | 8,85% | 3,07% | 1,68% | 1,20% | 1,12% | 1,23% | 1,83% | 2,66% | TOPLAM |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------------|
| Sektör | 0° | 22,5° | 45° | 67,5° | 90° | 112,5° | 135° | 157,5° | 180° | 202,5° | 225° | 247,5° | 270° | 292,5° | 315° | 337,5° | (W) |
| RT01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7603,318 | 0 | 49186,16 | 0 | 985,26 |
| RT02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1797,325 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18,51 |
| RT03 | 0 | 0 | 55061,11 | 41239,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19390,54 | 6451,487 | 35613,28 | 0 | 5378,34 |
| RT04 | 0 | 0 | 83551,91 | 6667,221 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8672,272 | 21218,61 | 12915,62 | 106907 | 9215,70 |
| RT05 | 0 | 0 | 0 | 29361,61 | 2417,53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 521,11 |
| RT06 | 0 | 0 | 0 | 46655,22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 788,47 |
| RT07 | 0 | 0 | 45435,03 | 29196,64 | 2792,977 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3602,69 |
| RT08 | 0 | 0 | 0 | 5802,318 | 31082,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11516,87 | 7287,295 | 43686,44 | 0 | 1436,29 |
| RT09 | 0 | 0 | 65763,09 | 43610,63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6102,812 | 6683,243 | 41528,94 | 0 | 6106,29 |
| RT10 | 0 | 0 | 64226,24 | 49469,29 | 7573,794 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5554,468 | 0 | 0 | 0 | 5330,79 |
| RT11 | 0 | 0 | 0 | 37608,79 | 2676,494 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19269,75 | 0 | 0 | 0 | 878,98 |
| RT12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| RT13 | 282246,6 | 0 | 102497,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11297,35 | 7712,537 | 0 | 60239,9 | 18425,94 |
| RT14 | 231271,8 | 0 | 35232,39 | 43432,83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19758,19 | 6381,18 | 0 | 51663,04 | 12706,28 |
| RT15 | 0 | 0 | 54576,76 | 40890,84 | 2302,208 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4812,972 | 13463,27 | 17070,38 | 60106,86 | 6545,81 |
| RT16 | 0 | 0 | 0 | 9975,305 | 1571,429 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21530,77 | 0 | 0 | 449,60 |
| RT17 | 227988,1 | 0 | 0 | 43142,75 | 6678,498 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8595,09 |
| RT18 | 0 | 0 | 0 | 42736,28 | 7571,018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 800,22 |
| RT19 | 0 | 0 | 74450,04 | 16989 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5414,521 | 8534,004 | 0 | 62998,02 | 7176,19 |
| RT20 | 0 | 0 | 22516,3 | 28550,04 | 2260,307 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5358,596 | 13268,84 | 15936,75 | 56154,1 | 4040,95 |
| RT21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2602,629 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18281,39 | 0 | 0 | 0 | 231,56 |
| RT22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28445,93 | 0 | 0 | 349,88 |
| RT23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3018,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4943,866 | 12604,93 | 0 | 0 | 241,50 |
| RT24 | 107013,7 | 96909,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2516,773 | 7899,387 | 36483,22 | 51828,57 | 44983,03 |
| RT25 | 0 | 0 | 0 | 35740,62 | 1246,943 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 616,86 |
| RT26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4237,703 | 13869,41 | 0 | 0 | 218,06 |
| RT27 | 0 | 0 | 0 | 38812,58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5877,529 | 0 | 0 | 0 | 721,76 |
| RT28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1848,099 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8379,757 | 21092 | 0 | 0 | 372,32 |
| RT29 | 99292,38 | 0 | 23483,54 | 36555,47 | 2739,454 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20876,5 | 0 | 0 | 5890,77 |
| TOPLAM | 32415,19 | 39151,53 | 42496,63 | 10586,78 | 825,8544 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1892,673 | 2673,029 | 4619,3 | 11967,27 | 146628,257 |

² Toplam satırı ve sütunu, her hücrede belirtilen RT hız kayıplarının karşılık gelen esme sıklığı ile çarpımı sonucu oluşturulmuştur.

Tablo 5.9: Optimal yerleşim düzenine göre en fazla ve en az güç üreten türbinler

| | | | RT01 | RT05 |
|----------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Ortalama güç değeri | | | 1267,494 kW | 998,612 kW |
| Konum Yüksekliği | | | 691 m | 362 m |
| Wake kayıpları | 67,5° | %6,78 | -- | RT2 |
| | 90° | %1,03 | -- | RT23 |
| | 270° | %1,12 | RT10 | -- |
| | 315° | %1,83 | RT18 | -- |

Tablo 5.9, mevcut durumun özeti olan Tablo 5.3 ile kıyaslandığında, önerilen yerleşim düzeninde santraldeki en az güç üreten türbin, mevcut yerleşime göre 136m daha düşük bir seviyede olmasına rağmen, 104,1 kW kadar daha fazla güç üretmektedir.

Optimal yerleşim düzeni için her bir türbinin, 16 farklı sektörden esen rüzgara göre oluşacak wake kayıpları Tablo 5.8’de sunulmuştur.

Bu tabloya göre en fazla wake kaybının yaşandığı rüzgar sektörü 45° olup; RT03, RT04, RT07, RT09, RT10, RT13, RT14, RT15, RT19, RT20 ve RT29 türbinlerden toplam 42496,5 W’lık kayıp yaşanmaktadır. Hiç wake kaybının yaşanmadığı rüzgar sektörleri ise 112,5°, 135°, 157,5°, 180°, 202,5°, 225,5° ve 247,5°’dir.

Sonuç olarak, optimal düzendeki türbin yerleşimine göre santralde toplam güç üretimi 32112318 W ve toplam wake kaybı 146628,257 W bulunmuştur.

Tablo 5.10: Optimal yerleşim düzenine göre yapılan hesaplamalar özeti

| | |
|---|---|
| Toplam güç üretimi | 32112,318 kW |
| Toplam wake kaybı | 146,6283 kW |
| Max. güç üreten türbin | RT01 |
| Min. Güç üreten türbin | RT05 |
| En fazla wake kaybı yaşanan yön | 45° - 42,497 kW |
| En az wake kaybı yaşanan yön | 112,5°, 135°, 157,5°, 180°, 202,5°, 225,5°, ve 247,5°- 0 kW |
| Wake etkisinde kalmayan türbin | RT12 |
| En fazla wake kaybı yaşayan türbin | RT24 - 44,983 kW |
| En az wake kaybı yaşayan türbin | RT12 - 0 kW |

Wake kaybı türbin bazında incelendiğinde ise en fazla kayıp RT24’te görülmekte ve altı farklı rüzgar sektöründen toplamda 44983,03 W’lık kaybı olduğu

görülmektedir. Tablo 5.7’de RT04’ün 1082,601 W ile en az güç üreten türbin olduğu görülmektedir. Tüm rüzgar sektörleri dikkate alındığında ise RT12’de hiç bir wake kaybının olmadığı görülmektedir.

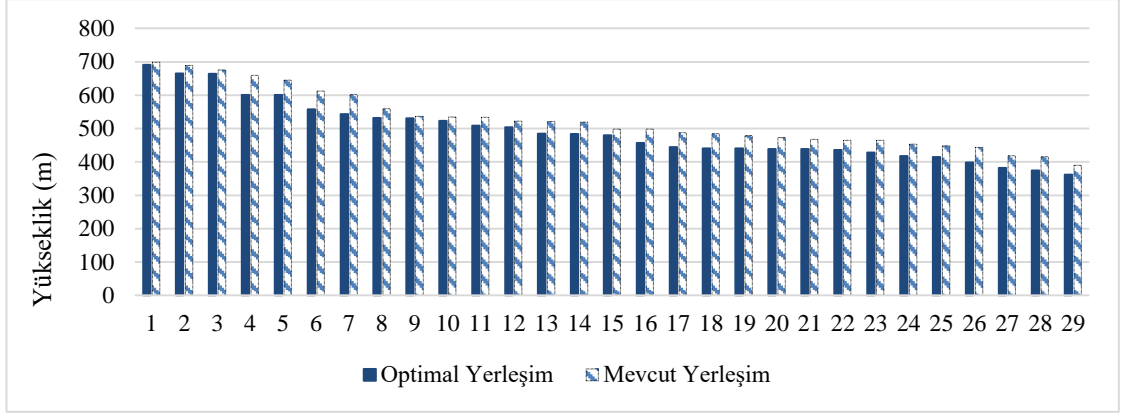
Sonuç olarak, optimize edilmiş yerleşim düzenindeki türbin yerleşimine göre santralde toplam güç üretimi 32112318 W ve toplam wake kaybı 146628,3 W bulunmuştur.

Önerilen yerleşim düzeni ile toplam yıllık enerji üretimi yaklaşık 278,2 GWh’ten 279,4 GWh’a çıkararak %0,43 iyileştirme gerçekleşmiştir. Santralin yıllık toplam wake kaybı ise mevcut durumda yaklaşık 9,5 GWh iken, önerilen durumda bu değer 1,28 GWh’a düşürülerek %86,43 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Özet durum Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11: Mevcut ve optimal yerleşim hesaplamaları

| | Mevcut Yerleşim | Optimal Yerleşim | İyileştirme | İyileştirme (%) |
|---|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| Santralin Güç Üretimi (kW) | 31973,903 | 32112,318 | 138,415 | 0,43% |
| Santralin Yıllık Enerji Üretimi (kWh) | 278172959,945 | 279377168,694 | 1204208,749 | 0,43% |
| Santralin Toplam Wake Kaybı (kW) | 1080,584 | 146,628 | 933,955 | 86,43% |
| Santralin Yıllık Toplam Wake Sebepi Enerji Kaybı (kWh) | 9401076,815 | 1275665,837 | 933,955 | 86,43% |

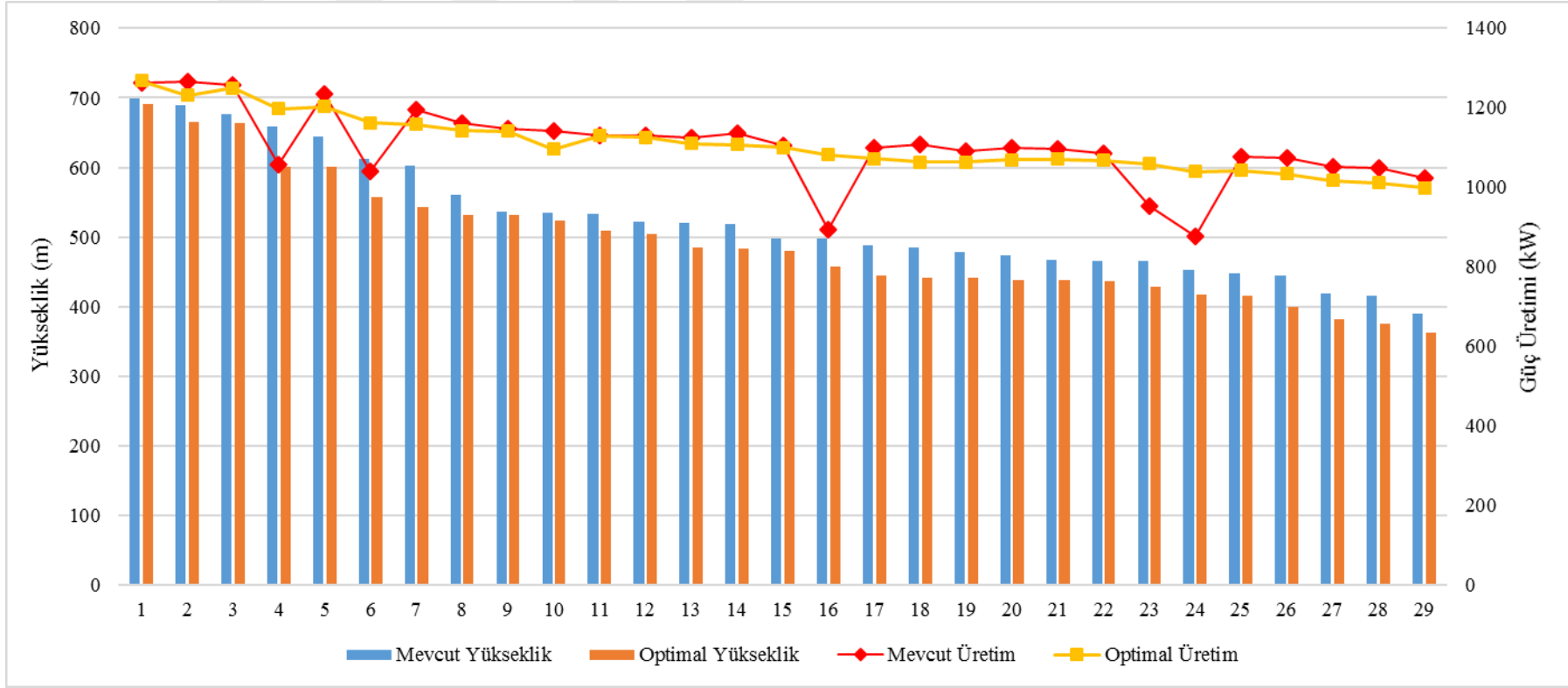
Bu sonuç tablosundan görüldüğü gibi, kullanılan algoritmalar ve yapılan varsayımlar doğrultusunda incelenen wake kaybı ile güç üretimi parametrelerinin her ikisinde de iyileştirme sağlanmıştır. Yıllık enerji üretimi %0,43 gibi az bir oranda artırılmıştır. Bunun sebebi, türbinlerin wake etkisi altında kalmamaları için yerleştirilmelerinde minimum 7D mesafe kısıtı konması, santraldeki yüksek noktaların algoritma içinde elenmesine sebep olmuş ve algoritma, mümkün olan en yüksek noktalar olan düşük rakımlı yerlere türbinleri yerleştirmiştir. Aşağıda verilen Şekil 5.14, mevcut yerleşim ile önerilen yerleşim düzeninde türbinlerin azalan sıraya göre yüksekliklerinin karşılaştırmasını yapmaktadır.



Şekil 5.14: Mevcut yerleşim ve optimal yerleşimde türbinlerin konumlandırıldıkları yükseklikler

Şekil 5.14’te görüldüğü gibi mevcut yerleşimdeki türbin yükseklikleri, önerilen optimal yerleşim noktalarının yüksekliklerine göre her zaman daha yüksektedir. Optimal yerleşim düzeninde türbinler, mevcut duruma göre daha aşağıdaki seviyelerde kalmış olmalarına rağmen daha fazla güç üretebilmişlerdir. Bunun yanında, önerilen durumda, türbinlerin wake etkisi altında olmayışı malzeme yorgunluğunu azaltacak ve beklenen ömürleri içinde çalışmalarını sağlayacaktır. Bu çalışmanın daha düz bir arazi koşulunda yapılması durumunda, hem güç üretiminde hem de wake kayıplarının azaltılmasında yüksek bir iyileştirme sağlanacağı söylenebilir.

Şekil 5.15’te her türbinin hem mevcut düzende hem de optimize edilmiş yerleşim düzeninde yüksekliklere karşılık ürettikleri güç miktarları ile verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü gibi optimal yerleşimde konumlandırılan türbinlerin yükseklikleri daha az olmasına rağmen; daha yüksekte yer alan mevcut yerleşimdeki türbinlere benzer miktarda güç üretmiştir. Hatta önerilen optimal yerleşim düzeninde; 4., 6., 16., 23. ve 24. sıradaki türbinler, daha düşük rakımlarda konumlandırılmalarına rağmen daha fazla güç üretimi sağlamışlardır. Bunun en büyük sebebi, söz konusu bu türbinlerin güç kayıplarının en aza indirilmiş olmasıdır. Bunun yanı sıra, söz konusu türbinler üzerindeki mekanik yorgunluğa sebep olan yükler büyük bir oranda azaltılmıştır.



Şekil 5.15: Mevcut yerleşim ve optimal yerleşimde türbinlerin yükseklik ve güç karşılaştırması

Ayrıca, mevcut durumda 29 türbinin ortalama gücü 1102,548 kW'a denk gelirken, 1080,584 kW olan wake sebepli güç kayıplarının neredeyse ortalama bir türbin gücüne denk geldiği görülmektedir. Önerilen durumda ise, wake sebepli kayıplar 146,628 kW olup, mevcut yerleşim düzeninden %86,43 kadar düşüktür.

Sonuç olarak; kullanılan algoritmalar ve yapılan varsayımlar çerçevesinde bu çalışmanın hedeflenen değerlere ulaştığı görülmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre; önerilen yerleşim düzeninin, hem santralin toplam enerji üretimini artırma hem de wake kayıplarını azaltma açısından başarıyla sonuçlandığı söylenebilir.

5.3 Gelecek Çalışma ve Öneriler

Tez çalışmasından çıkan sonuçlar doğrultusunda, türbin yerleşimi problemine getirilecek çözümlerin geliştirilmesine yönelik araştırılacak gelecek çalışma konuları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- **Farklı wake modelleri ile performans hesaplaması:** Rüzgar türbini yerleşim problemiyle ilgili literatürdeki çoğu çalışmalar, santral tasarımı ve güç analizleri için aktüatör (dönen) disk modelini kullanmışlardır. Fakat, santraldeki aerodinamik etkileşimleri anlamak ve ölçmek için orta ve yüksek kalitedeki wake modellerin (*CFD, dinamik kıvrımlı wake akış modeli vb. gibi*) kullanılması hesaplama açısından pahalı ve uzun sürmesine rağmen daha doğru sonuçlar verecektir.
- **Farklı hub yüksekliğine sahip türbinler:** Bu tez çalışmasında tek tip bir rüzgar türbini kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Fakat, özellikle engebeli sahalarda santrale kurulacak farklı yüksekliklere sahip türbinler ile wake kayıpları büyük bir miktarda önlenebilir ve santralin güç üretimi artabilir. Bunun yanında maliyetlerin artması da söz konusu olacağından güç-kâr dengesi üzerine bir problem modellenebilir.
- **Rüzgar enerjisi yoğunluğundaki zaman içinde değişim:** Rüzgar hızı, bir rüzgar enerji santrali projesinin başlıca faktörüdür, çünkü üretilen güç, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılıdır. Uydu altimetre ölçümleri, son 20 yılda rüzgar hızının en az %0,25 ila %0,5 oranında arttığını ve fırtına gibi aşırı koşulların ortalama koşullardan daha hızlı arttığını ortaya koymuştur [57]. Pek çok

çalışma küresel iklim değışikliğinin dünyanın ortalama sıcaklığını önemli derecede artırdığını iddia etmektedir. Bu yüzden uluslararası iklim değışikligi projeksiyonu çerçevesinde değışebilecek rüzgar hız ve yön hareketleri konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

- **Çevresel sorunların amaç fonksiyonuna dahil edilmesi:** Bir rüzgar enerji santralinin potansiyel çevresel etkilerinin en aza indirgenmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Enerji üretimi ile gürültü etkisini dikkate alarak yapılan çalışma olmasına rağmen, genel olarak ekolojik ve sosyal kısıtların amaç fonksiyonlarına dahil edilmediği ve araştırma boşluğunun olduğu söylenebilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] U.S. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2016", *U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis DOE/EIA-0484*, Washington DC, (2016).
- [2] Sawin, J.L., Seyboth, K. and Sverrisson, F., "Renewables 2016: Global Status Report", *REN21*, Paris, (2016).
- [3] Global Wind Energy Council, "Global Wind Report 2015", *Global Wind Energy Council*, Brussels, (2016).
- [4] Global Wind Energy Council, "Global Wind Statistics 2016", *Global Wind Energy Council*, Brussels, (2017).
- [5] Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, "Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2017", *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*, İstanbul, (2017).
- [6] Torres, P., Van Wingerden, J.W. and Verhaegen, M., "Modeling of the flow in wind farms for total power optimization", *IEEE International Conference on Control and Automation*, Santiago, 963–968, doi:10.1109/ICCA.2011.6137984, (2011).
- [7] Serrano González, J., Burgos Payán, M., Santos, J. M. R. and González-Longatt, F., "A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 133–144, doi:10.1016/j.rser.2013.09.027, (2014).
- [8] Tesauro, A. and Réthoré, P., "State of the Art of Wind Farm Optimization", *Proceedings of EWEA 2012 - European Wind Energy Conference & Exhibition*, Copenhagen, 1–11, (2012).
- [9] Mosetti, G., Poloni, C. and Diviacco, B., "Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51, 105–116, (1994).
- [10] Grady, S., Hussaini, M.Y. and Abdullah, M.M., "Placement of wind turbines

- using genetic algorithms", *Renewable Energy*, 30, 259–270. doi:10.1016/j.renene.2004.05.007, (2005).
- [11] Wan, C. and Wang, J., "Optimal Siting of Wind Turbines Using Real-Coded Genetic Algorithms", *Proceedings of European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, (2009).
- [12] Mittal, A., "Optimization of the Layout of Large Wind Farms Using a Genetic Algorithm", MSc. Thesis, *Case Western Reserve University*, Cleveland, (2010).
- [13] Marmidis, G., Lazarou, S. and Pyrgioti, E., "Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation", *Renewable Energy*, 33, 1455–1460. doi:10.1016/j.renene.2007.09.004, (2008).
- [14] Huang, H., "Efficient Hybrid Distributed Genetic Algorithms for Wind Turbine Positioning in Large Wind Farms", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2009*, Seoul, 2196–2201, (2009).
- [15] Emami, A. and Noghreh, P., "New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms", *Renewable Energy*, 35, 1559–1564, doi:10.1016/j.renene.2009.11.026, (2010).
- [16] Bilbao, M. and Alba, E., "Simulated annealing for optimization of wind farm annual profit", *2nd International Symposium on Logistics and Industrial Informatics 2009*, Lindi, 1–5, doi:10.1109/LINDI.2009.5258656, (2009).
- [17] Troldborg, N. and Sørensen, J., "TOPFARM: Multi-fidelity optimization of wind farms", *Wind Energy*, 17, 657–669, doi:10.1002/we, (2014).
- [18] Elkinton, C.N., Manwell, J.F. and McGowan, J.G., "Algorithms for Offshore Wind Farm Layout Optimization", *Wind Engineering*, 32, 67–84, doi:10.1260/030952408784305877, (2008).
- [19] Wan, C., Wang, J., Yang, G., Li, X. and Zhang, X., "Optimal micro-siting of wind turbines by genetic algorithms based on improved wind and turbine models", *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) 2009*, Shanghai, 5092–5096, doi:10.1109/CDC.2009.5399571, (2009).
- [20] Wang, F., Liu, D. and Zeng, L., "Study on computational grids in placement of

- wind turbines using genetic algorithm", *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, Nanjing, ,1–4, doi:10.1109/WNWEC.2009.5335776, (2009).
- [21] Beyer, H.G., Rüger, T., Schäfer, G. and Waldl, H.P., "Optimization of Wind Farm Configurations with Variable Number of Turbines", *European Union Wind Energy Conference*, Göteborg, 1073–1076, (1996).
- [22] Li, X. and Wang, J., "Equilateral-Triangle Mesh for Optimal Micrositing of Wind Farms", *ICCOMP'10 Proceedings of the 14th WSEAS international conference on Computers: part of the 14th WSEAS CSCC multiconference*, Corfu Island, 187–195, (2010)
- [23] Bilbao, M. and Alba, E., "GA and PSO Applied to Wind Energy Optimization", *XV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, Caleta Olivia, 50-59, (2009)
- [24] Rašuo, B. and Bengin, A., "Optimization of Wind Farm Layout", *FME Transactions*, 38, 107–114, doi:10.1002/pamm.201010262, (2010).
- [25] DuPont, B. and Cagan, J., "An Extended Pattern Search Approach to Wind Farm Optimization", *Journal of Mechanical Design*, 134, 1-18, doi:10.1115/1/4006997, (2012).
- [26] Aytun Ozturk, U. and Norman, B., "Heuristic methods for wind energy conversion system positioning", *Electric Power Systems Research*, 70, 179–185, doi:10.1016/j.epsr.2003.12.006, (2004).
- [27] Changshui, Z., Guangdong, H. and Jun, W., "A fast algorithm based on the submodular property for optimization of wind turbine positioning", *Renewable Energy*, 36, 2951–2958, doi:10.1016/j.renene.2011.03.045, (2011).
- [28] González, J.S., Payán, M.B. and Santos, J.M.R., "Wind Farm Optimal Design Including Risk", *Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium*, Wroclaw, 1–6, (2010).
- [29] González, J.S., Rodríguez, G.G., Mora, J.C., Burgos Payán, M. and Santos, J.R., "Overall design optimization of wind farms", *Renewable Energy*, 36, 1973–

- 1982, doi:10.1016/j.renene.2010.10.034, (2011).
- [30] Şişbot, S.; Turgut, Ö., Tunç, M. and Çamdalı Ü., "Optimal positioning of wind turbines on Gökçeada using multi-objective genetic algorithm", *Wind Energy*, 13, 297–306, (2010).
- [31] Mustakerov, I. and Borissova, D., "Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization", *Renewable Energy*, 35, 1887–1894, doi:10.1016/j.renene.2009.12.012, (2010).
- [32] Rahmani, R., Khairuddin, A., Cherati, S.M. and Pesaran, H.A., "A novel method for optimal placing wind turbines in a wind farm using particle swarm optimization (PSO)", *2010 Conference Proceedings IPEC*, Sapporo, 134–139. doi:10.1109/IPECON.2010.5697144, (2010).
- [33] Kusiak, A. and Song, Z., "Design of wind farm layout for maximum wind energy capture", *Renewable Energy*, 35, 685–694, doi:10.1016/j.renene.2009.08.019, (2010).
- [34] Eroğlu, Y., "Wind Farm Layout Optimization using Ant Colony and Particle Filtering Approaches", Msc. Thesis, *University of Gaziantep*, Gaziantep, (2011).
- [35] Bansal, J.C. and Farswan, P., "Wind farm layout using biogeography based optimization", *Renewable Energy*, 107, 386–402, doi:10.1016/j.renene.2017.01.064, (2017).
- [36] Saavedra-Moreno, B., Salcedo-Sanz, S., Paniagua-Tineo, A., Prieto, L. and Portilla-Figueras, A., "Seeding evolutionary algorithms with heuristics for optimal wind turbines positioning in wind farms", *Renewable Energy*, 36, 2838–2844, doi:10.1016/j.renene.2011.04.018, (2011).
- [37] Kwong, W.Y., Zhang, P.Y., Morgenroth, M., Romero, D., Amon, C. and Moran, J., "Wind Farm Layout Optimization Considering Energy Generation and Noise Propagation", *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, 1–10, (2012).

- [38] Mittal, P., Kulkarni, K. and Mitra, K., "Multi-objective Optimization of Energy Generation and Noise Propagation : A Hybrid Approach", *2016 Indian Control Conference*, Hyderabad, 499–506, doi:10.1109/INDIANCC.2016.7441181, (2016).
- [39] Mora, J.C., Rodríguez, G.G., Santos, J.M.R. and Payán, M.B., "A Mixed Hybrid Algorithm for Integral Wind Farm Optimum Design", *Renewable Energies and Power Quality Journal*, 1, 645-652, (2007).
- [40] Chen, Y., Li, H., Jin, K. and Song, Q., "Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines", *Energy Conversion and Management*, 70, 56–65, doi:10.1016/j.enconman.2013.02.007, (2013).
- [41] Chowdhury, S., Zhang, J., Messac, A. and Castillo, L., "Optimizing the arrangement and the selection of turbines for wind farms subject to varying wind conditions", *Renewable Energy*, 52, 273–282, doi:10.1016/j.renene.2012.10.017, (2013).
- [42] Kallioras, N.A., Lagaros, N.D., Karlaftis, M.G. and Pachy, P., "Optimum layout design of onshore wind farms considering stochastic loading", *Advances in Engineering Software*, 88, 8–20, doi:10.1016/j.advengsoft.2015.05.002, (2015).
- [43] Elkinton, C.N., "Offshore Wind Farm Layout Optimization", Msc. Thesis, *University of Massachusetts*, Amherst, (2007).
- [44] Lackner, M. and Elkinton, C.N., "An Analytical Framework for Offshore Wind Farm Layout Optimization", *Wind Engineering*, 31, 17–31, doi:10.1260/030952407780811401, (2007).
- [45] Rivas, R.A., "Optimization of Offshore Wind Farm Layouts", Msc. Thesis, *Technical University of Denmark*, (2008).
- [46] Salcedo-Sanz, S., Gallo-Marazuela, D., Pastor-Sánchez, A., Carro-Calvo, L., Portilla-Figueras, A. and Prieto, L., "Offshore wind farm design with the Coral Reefs Optimization algorithm", *Renewable Energy*, 63, 109–115, doi:10.1016/j.renene.2013.09.004, (2014).

- [47] Rodrigues, S., "A Multi-Objective Optimization Framework for the Design of Offshore Wind Farms", *Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa*, Lisbon, (2016).
- [48] Khan, S.A. and Rehman, S., "Iterative non-deterministic algorithms in on-shore wind farm design: A brief survey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 370–384, doi:10.1016/j.rser.2012.11.040, (2013).
- [49] Houghton, J., *Global Warming: The Complete Briefing*, vol 4, Cambridge University Press, 290, (2009).
- [50] Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., *Wind Energy Explained – Theory, Design, and Application*, West Sussex: Wiley, (2002).
- [51] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*. West Sussex: Wiley, (2011).
- [52] Lam, V., "Development of wind resource assessment methods and application to the Waterloo region", Msc. Thesis, *University of Waterloo*, Waterloo, (2013).
- [53] Cook, N.J., *The designer's guide to wind loading of building structures*, London: Building Research Establishment, (1985).
- [54] Diamond, K. and Crivella, E., "Wind Turbine Wakes , Wake Effect Impacts , And Wind Leases : Using Solar Access Laws As The Model For Capitalizing On Wind Rights During The Evolution Of Wind Policy Standards" *Duke Environmental Law & Policy Forum*, 22, 195–244, (2011).
- [55] Méchali, M., Barthelmie, R., Frandsen, S., Jensen, L. and Réthoré, P., "Wake effects at Horns Rev and their influence on energy production" *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Athens, (2006).
- [56] Andersen, S.J., Sørensen, J.N., Ivanell, S. and Mikkelsen, R.F., "Comparison of Engineering Wake Models with CFD Simulations", *Journal of Physics: Conference Series*, 524, 1-11, doi:10.1088/1742-6596/524/1/012161, (2014).
- [57] Barthelmie, R. J., Pryor, S. C., Frandsen, S. T., Hansen, K. S., Schepers, J. G., Rados, K., et al. " Quantifying the Impact of Wind Turbine Wakes on Power Output at Offshore Wind Farms" *Journal of Atmospheric and Oceanic*

- Technology*, 27, 1302-1317, (2010).
- [58] Vermeer, L.J., Sørensen, J.N. and Crespo, A., "Wind turbine wake aerodynamics", *Progress in Aerospace Sciences*, 39, 467–510, doi:10.1016/S0376-0421(03)00078-2, (2003).
- [59] Jensen, N.O., "A note on wind generator interaction", *Risø National Laboratory Roskilde, Riso-M-2411*, (1983).
- [60] Katic, I., Hojstrup, J. and Jensen N.O., "A simple model for cluster efficiency", *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Rome, 407–410, (1986).
- [61] Barthelmie, R.J., Larsen, G.C., Frandsen, S.T., Folkerts, L., Rados, K., Pryor, S.C. et al., "Comparison of Wake Model Simulations with Offshore Wind Turbine Wake Profiles Measured by Sodar", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 888–901, doi:10.1175/JTECH1886.1, (2006).
- [62] Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S. and Hojstrup, J., "Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms", *Wind Energy*, 9, 39–53, doi:10.1002/we, (2006).
- [63] Brower, M.C. and Robinson, N.M., "The openWind deep-array wake model: Development and Validation", *AWS Truepower*, (2012).
- [64] Larsen, G.C., "A simple stationary semi-analytical wake model", *Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Risoe-R; No. 1713*, (2009).
- [65] Larsen, G.C., Madsen Aagaard, H., Bingöl, F., Mann, J., Ott, S., Sørensen, J. N., et al. "Dynamic wake meandering modeling", *Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Risoe-R; No.1607*, (2007).
- [66] Mikkelsen R., "Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines", Ph.D Thesis, *Technical University of Denmark*, Lyngby, (2003).
- [67] Sande, B., "Aerodynamics of wind turbine wakes: Literature review", *Energy research Centre of the Netherlands*, 1–46, doi:10.1002/we, (2009).

- [68] Ott, S., Berg, J. and Nielsen, M., "Linearised CFD Models for Wakes", *Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Risoe-R; No.1772*, (2011).
- [69] Wagner, M., Neumann, F. and Reilly, U.O., "Optimizing the Layout of 1000 Wind Turbines", *European wind energy association annual event*, 205–209 , (2011).
- [70] Zhou, Y., Kumar, P., Bauer, P. and Ferreira, J.A., "Optimization of a hybrid wind park through a design approach - Progressive design methodology", *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09*, Wuhan, 3, 1092–1098, doi:10.1109/IPEMC.2009.5157547, (2009).
- [71] Frohboese, P., Schmuck, C. and Hassan, G.L.G., "Thrust Coefficients Used for Estimation of Wake Effects for Fatigue Load Calculation", *European Wind Energy Conference 2010*, Warsaw, 1–10, (2010).
- [72] Jodziewicz, L., *Wind Energy Siting Handbook*, American Wind Energy Association, (2008).
- [73] Frandsen, S. and Thøgersen, M.L., "Integrated fatigue loading for wind turbines in wind farms by combining ambient turbulence and wakes", *Wind Engineering*, 23, 327–339, (1999).
- [74] AWS Truepower, "OpenWind [online]", (erişim 17 Mart 2017), <http://software.awstruepower.com/openwind/>, (2017).
- [75] DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physic, "WAsP - the wind atlas analysis and application program [online]", (erişim 17 Mart 2017), <http://risoe.dtu.dk/WAsP.aspx>, (2017).
- [76] Güzel, S., "Rüzgar Enerjisi Potansiyel Hesaplamasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırılması", Master Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul, (2014).
- [77] GL Garrad Hassan's, "WindFarmer [online]", (17 Mart 2017), <http://www.gl-garradhassan.com/en/software/GHWindFarmer.php>, (2017).

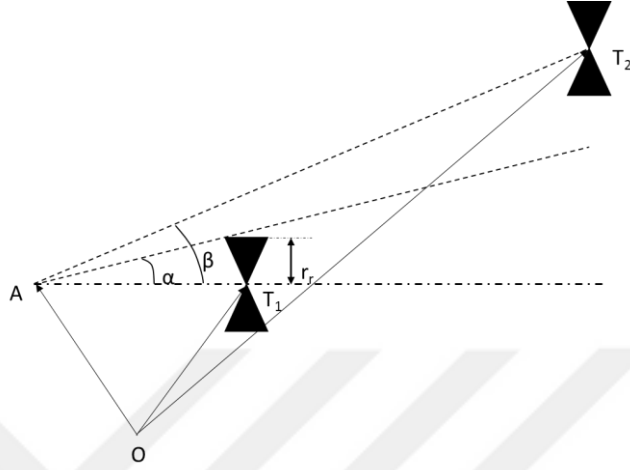
- [78] EMD International A/S, "WindPRO [online]", (17 Mart 2017), <http://www.emd.dk/WindPRO/>, (2017).
- [79] "WindSim [online]", (17 Mart 2017), <http://www.windsim.com/> (2017).
- [80] Schlez, W., "Wind Farm Siting and Layout Design [online]", (12 Ocak 2017), http://www.wwindea.org/technology/ch02/en/2_4_2.html, (2017).
- [81] Wikipedia. "Great-circle distance [online]", (05 Nisan 2017), https://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_distance.
- [82] Canayaz, M., "Cırcır Böceği Algoritması: Yeni Bir Meta-Sezgisel Yaklaşım Ve Uygulamaları", Doktora Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı*, Malatya, (2015).
- [83] Biroğul, S., "Genetik Algoritma İle Çözümü Gerçekleştirilen Atölye Çizelgeleme Probleminde Ürün Sayısının Etkisi", *9 Akademik Bilişim Konferansı*, Kütahya, (2007).



EKLER

7. EKLER

EK A. Yönlere Göre Mesafe Ölçümünün İspatı



Şekil A.1: Türbinler arası mesafe gösterimi

Eğer θ açısından gelen rüzgar; i türbini j türbininin wake etkisi altında kalmasına neden oluyorsa, i ile j türbini arasındaki $x_{i,j}$ uzaklığının hesaplanması;

$$x_{i,j} = |(x_i - x_j) \cos \theta + (y_i - y_j) \sin \theta|$$

şeklinde yapılır.

T_1 'den T_2 'ye olan $\overrightarrow{T_1 T_2}$ vektörü $(x_2 - x_1)$ şeklindeyse; $\overrightarrow{AT_1}$ üzerindeki $\overrightarrow{T_1 T_2}$ 'nin öngörülen uzunluğu;

$$\begin{aligned} \frac{|\overrightarrow{T_1 T_2} \cdot \overrightarrow{AT_1}|}{L_{\overrightarrow{AT_1}}} &= \alpha \frac{|(x_2 - x_1) \left(\frac{r_r}{\alpha} \cos \theta\right) + (y_2 - y_1) \left(\frac{r_r}{\alpha} \sin \theta\right)|}{r_r} \\ &= |(x_i - x_j) \cos \theta + (y_i - y_j) \sin \theta| \end{aligned}$$

şeklindedir.

T_1 ve T_2 türbinler, α ; wake yayılımı, (x_1, y_1) ; Türbin 1'in konumunu; r_r ise türbin rotor yarıçapını ifade etmektedir.

EK B. Aylara Göre Rüzgar Yön Değişimi

