

T.C
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN MİKRO KONUMLANDIRMA

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan:
Buket KÜYÜK

İstanbul, 2018

T.C
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN MİKRO KONUMLANDIRMA

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan:

Buket KÜYÜK

Öğrenci No:

150892004

Danışman:

Yrd. Doç. Dr. Ümit TERZİ

Yrd. Doç. Dr. Kenan ŞENTÜRK

İstanbul, 2018

YEMİN METNİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “**Genetik Algoritma Kullanılarak Rüzgar Türbinleri İçin Mikro Konumlandırma**” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. 16/02/2018

Buket KÜYÜK

T.C.
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ SAVUNMA SINAVI SONUÇ TUTANAĞI

Beykent Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Aşağıda tez adı belirtilen yüksek lisans öğrencisi 150892004 no'lu BUKET KÜYÜK'ün 16/02/2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavı¹ sonucunda...⁶⁰ dakika süreyle sunduğu ve savunduğu tezi hakkında² oybirliği / oyçokluğu ile, ...^{kabul} kararı verilmiştir.

Bilgilerinize saygılarımızla arz ederiz.

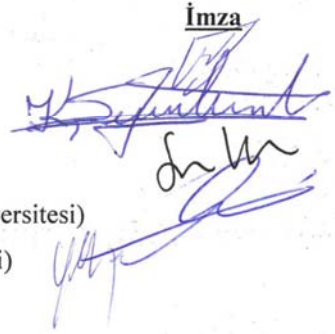
Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
Programı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
Tez Başlığı³ : Genetik Algoritma Kullanılarak Rüzgar Türbinleri İçin Mikro Konumlandırma

Tez Sınav Jürisi

Öğretim Üyesi

İmza

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ümit TERZİ
Eş Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kenan ŞENTÜRK
Üye : Prof. Dr. Kazım SARI
Üye : Yrd. Doç. Dr. Didem YILMAZ (İstanbul Gelişim Üniversitesi)
Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Yekta KAYMAN (Doğuş Üniversitesi)



¹ Jüri üyeleri, söz konusu tezin kendilerine teslim edildiği tarihten itibaren en geç bir ay içinde toplanarak öğrenciyi tez sınavına alır. Tez savunma sınav süresi en az 45, en çok 90 dakikadır. Jüri üyeleri, sınav öncesi yapılacak toplantıda, kendi aralarından danışman dışında bir üyeyi başkan seçer. Tez sınavı, tez çalışmasının sunulması ve bunu izleyen soru-cevap bölümünden oluşur. Tez sınavı, öğretim elemanları, lisansüstü öğrenciler ve alanın uzmanlarından oluşan dinleyicilerin katılımına açık ortamlarda gerçekleştirilir. Belirlenen günde yapılamayan jüri toplantısı, katılanların hazırladığı bir tutanakla enstitü yönetimine bildirilir. Bu durumda, jüri en geç on beş gün içinde toplanarak aday tez savunma sınavına alır. (05 Ağustos 2017 tarihli 30145 sayılı Resmi Gazetede Yayınlanan Değişiklik) (Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği-Madde 29-3)

² Tez sınavının tamamlanmasından sonra jüri, tez hakkında salt çoğunlukla “kabul”, “düzeltme” veya “ret” kararı verir. Jüri başkanı, jüri üyelerince imzalanmış karar tutanağını, tez sınavını izleyen üç gün içinde ilgili enstitü yönetimine teslim eder. Tezi hakkında düzeltme kararı verilen öğrenci en geç üç ay içinde gerekli düzeltmeleri yaparak ve birinci fıkradaki usule göre tezini aynı jüri önünde yeniden savunur. Süresi içerisinde “düzeltme” savunmasına girmeyen öğrencinin enstitü ile ilişkisi kesilir. (Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği-Madde 29-4)

³ İleride doğabilecek aksaklıkların engellenmesi için tezin başlığının yazılması gerekmektedir.

TEŐEKKÖRLER

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, beni yönlendiren ve değerli bilgilerini benimle paylaőan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam; Yrd. Doç. Dr. Ümit TERZİ'ye, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan saygıdeğer eş danışman hocam; Yrd. Doç. Dr. Kenan şENTüRK'e,  niversite eğitimim süresince her őeyin üstesinden birlikte geldiğimiz ve bu çalışma için birbirimize desteklerimiz için Nurhan HEDEF'e, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan Ozan G L'e, çalıőmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Buket KÜYÜK

Adı ve Soyadı : Buket KÜYÜK
Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ümit TERZİ
Yrd. Doç. Dr. Kenan ŞENTÜRK
Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans, 2018
Alanı : Endüstri Mühendisliği
Anahtar Kelimeler : Rüzgar türbini, optimizasyon, rüzgar tarlası, mikro konumlandırmadır.

ÖZ

GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN MİKRO KONUMLANDIRMA

Enerji ihtiyaçlarını gidermek amacıyla birçok ülke rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi duymaktadır. Ülkemizde de enerji talebinin karşılanabilmesi için mevcut yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar artış göstermektedir. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından, rüzgar enerjisi ile ilgili yapılan yatırımlar oldukça çoğalmıştır. Dünya’da rüzgar enerjisi alanında büyük santral kurulumları ile enerji ihtiyacımızın önemli bir kısmı karşılanır hale gelmiştir.

Rüzgar enerjisi santrallerinde rüzgar türbinlerinin yerleşim tasarımı oldukça önemli bir unsurdur. Türbinlerin alan üzerindeki yerleşimi üretilen enerji miktarını ve maliyetini oldukça etkilemektedir. Optimal bir tasarımda daha yüksek enerji üretimi yapılabilmektedir. Rüzgar türbinlerinin araziye yerleşimi yapılırken arka arkaya gelen türbinler birbirlerinin rüzgarından etkilenirler. Bu etkileşim wake etkisi adını almaktadır. Türbinlerin birbirinden etkilenmemeleri, verimli şekilde enerji üretmeleri ve wake etkisine maruz kalmamaları için arazi boyutu dikkate alınarak, en uygun sayıda türbin yerleşimi yapılmalıdır.

Bu çalışmada rüzgar tarlasının türbinlerinin yerleşiminde genetik algoritma ile tesis yerleşimi yapılmıştır. Araziye verim kaybı olmaksızın 7 adet rüzgar türbini sığması beklenirken 14 adet yerleştirildiğinde bile wake etkisine maruz kalmadan, en verimli şekilde enerji üretileceği çözümüne ulaşılmıştır. 21 adet rüzgar türbini yerleşimi yapıldığında bile az bir verim kaybı ile enerji üretilbildiği sonucuna varılmıştır.

Name and Surname : Buket KÜYÜK
Advisor : Asst. Prof. Dr. Ümit TERZİ
Asst. Prof. Dr. Kenan ŞENTÜRK
Type and Date : Graduate, 2018
Field : Industrial Engineering
Key Words : Wind turbine, optimization, Layout desing wind farm

ABSTRACT

MICRO-POSITIONING FOR WIND TURBINES USING GENETIC ALGORITHM

To meet energy needs, many countries are interested in renewable energy sources such as wind energy, solar energy, biomass energy and wave energy. In our country, studies about the usage of existing renewable energy potential have been increasing in order to meet energy demand. In recent years, investments in renewable energy sources and wind energy have increased considerably. In the World, with the installation of large power plants in the field of wind energy, a considerable part of our energy needs has been met.

The layout design of wind turbines in wind energy plants is a very important factor. The settlement of the turbines on the field greatly affects the amount of energy produced and the cost. Higher energy production can be achieved in an optimal design. When the wind turbines are settled on the ground, successive turbines are influenced by each other's wind. This interaction is called wake effect. The most appropriate number of turbine settlements should be made considering the size of the terrain for the turbines not to be influenced by each other, to produce energy efficiently and to avoid wake effects.

In this study, the plant layout was established with the genetic algorithm at the location of the turbines of the wind field. Seven pieces of wind turbines are expected to be lost without loss of land efficiency, and even when 14 pieces are placed, the solution is reached to produce the most efficient energy without being exposed to wake effect. Even when 21 wind turbines were settled, it was possible to produce energy with a little loss of efficiency.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR ENERJİSİ	2
2.1 Rüzgar Enerjisinin Günümüzdeki Durumu	3
2.2 Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu	4
2.3 Rüzgar Enerjisinin Türkiye’deki Durumu	5
2.3.1 Türkiye’deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin İllere Göre Dağılımı	8
2.3.2 Türkiye’deki Rüzgar Enerjisinin Türbin Markalarına Göre Dağılımı	9
2.4 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası	10
2.5 Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Parçalar	11
2.5.1 Makine Dairesi	11
2.5.2 Kule	11
2.5.3 Pervane Kanatları	12
2.5.4 Rotor Göbeği	12
2.5.5 Şaft	12
2.5.6 Yüksek Hız Şaftı	12
2.5.7 Düşük Hız Şaftı	13
2.5.8 Dişli Kutusu	13
2.5.9 Jeneratör	13
2.5.10 Rüzgar Ölçer	13
2.5.11 Yön Ölçüm Sensörü	14
2.5.12 Fren	14
2.6 Rüzgar Türbinleri Çalışma Prensipleri	15
2.7 Rüzgar Türbinlerinin Güçlerine Göre Sınıflandırılması	16
2.8 Rüzgar Türbin Çeşitleri	16

2.8.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	17
2.8.1.1 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri	18
2.8.1.2 İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri	19
2.8.1.3 Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	19
2.8.1.4 Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	20
2.8.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	21
2.8.2.1 Savonious Modeli Rüzgar Türbinleri	21
2.8.2.2 Darrieus Modeli Rüzgar Türbinleri.....	22
2.8.2.3 H-Darrieus Modeli Rüzgar Türbinleri.....	23
2.8.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	24
2.9 Rüzgar Türbininin Kurulacağı Arazi Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Özellikler	24
2.9.1 Sahaya Ulaşılabilirlik	24
2.9.2 Trafo Merkezi ve Enerji Nakil Hatları	24
2.9.3 Askeri veya Stratejik Bölgeler	25
2.9.4 Milli Park, Muhafaza Ormanı	25
2.9.5 Bölgenin Elektrik Enerjisi Talebi ve Enerjinin Pazarlanması.....	25
2.9.6 Arazinin Jeolojik ve Topografik Yapısı, Eğimi ve Büyüklüğü.....	25
2.9.7 Arazi Sahipliğinin Belirlenmesi	25
2.10 Lisanssız Rüzgar Enerji Santral Kurulumu	26
2.11 Lisans Başvurusu.....	26
2.12 Rüzgar Verimi ve Mikro Konumlandırma	27
2.13 Rüzgar Türbinlerinde Wake Etkisi.....	28
2.14 Rüzgar Türbinlerinin Yerleşim Etkisi (Park Effect)	29
2.15 Rüzgar Türbinlerinde Tünel Etkisi (Tunnel Effect).....	29
2.16 Rüzgar Türbinlerinde Tepe Etkisi	30
2.17 Rüzgar Türbini Arkasında Oluşan Türbülans	31
2.18 Rüzgar Enerji Santrali Proje Aşamasındaki Maliyetler	32
2.19 Rüzgar Enerji Çiftliğini Etkileyen Çevresel Faktörler	33
3. METASEZGİSEL ALGORİTMALAR	35
3.1 Tavlama Benzetimi Algoritması	35
3.2 Karınca Kolonisi Algoritması	36
3.3 Tabu Arama Algoritması.....	37
3.4 Genetik Algoritma.....	37

3.4.1 Genetik Algoritmelerde Tek Noktalı Çaprazlama	39
3.4.2 Genetik Algoritmelerde Çift Noktalı Çaprazlama	40
3.4.3 Genetik Algoritmelerde Tek Biçimli Çaprazlama	40
3.4.4 Genetik Algoritmelerde Sıralı Kromozom Çaprazlama.....	41
4. RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİNLERİNİN MİKRO KONUMLANDIRMA	
OPTİMİZASYONU UYGULAMASI	42
4.1 Rüzgar Enerjisinin Gücü	43
4.2 Rüzgar Türbinlerinde Betz Limiti	44
4.3 Rüzgar Türbinlerinde Güç Eğrisi	45
4.4 Rüzgar Türbini Çiftliği Kurulacak Bölgenin Seçimi	46
4.5 Rüzgar Türbin Çiftliği için Kullanılacak Türbin Marka Özellikleri	49
4.6 Rüzgar Çiftlik Yerleşiminde Kullanılacak Rüzgar Türbin Güçleri	50
4.7 Rüzgar Enerjisi Çiftliğinde Optimizasyon Uygulaması.....	51
4.7.1 Türbin Tipinin Seçimi ve Adedinin Belirlenmesi	51
4.7.2 Rüzgar Türbinlerinde Güç Eğri Grafikleri	51
4.7.3 İzmir Adnan Menderes Bölgesi Rüzgar Hız Verileri.....	52
4.7.4 Rüzgar Türbinlerinin Yerleşiminde Alan İşgali Hesabı.....	53
4.7.5 Rüzgar Türbin Model ve Miktar Seçiminde Bütçe ve Arazi Kısıtları	54
4.7.6 Doğrusal Model.....	55
4.7.7 Excel Solver ile Doğrusal Model Çözümü.....	56
4.8 İkinci Aşama: Mikro Konumlandırma Problemi	57
4.8.1 Adnan Menderes Bölgesine Ait Rüzgar Yön Verileri	59
4.8.2 Rüzgar Türbin Yerleşiminde Oluşan Wake Etkisi Hesabı.....	59
4.8.3 İkinci Uygulama, Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Genetik Algoritma ile Mikro konumlandırılması.....	61
4.8.4 İkinci Uygulama, Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Normal Mikro Konumlandırılması	63
5. SONUÇ	66
KAYNAKLAR.....	68
EKLER.....	72

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No.

Tablo 1. Rüzgar Türbin Model ve Fiyat Listesi.....	50
Tablo 2. Rüzgar Hızları ve Yıllık Toplam Hız Frekansları	52
Tablo 3. M-4 Model Rüzgar Türbininin Özellikleri	57
Tablo 4. Rüzgar Türbin Yerleşimi Yapılacak Arazi	58
Tablo 5. M-4 Rüzgar Türbinine ait 120m’de Bulunan Hesaplar	61



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1. Rüzgar Türbin Görselleri	2
Şekil 2. Rüzgar Türbin Modeli	3
Şekil 3. Rüzgar Türbinleri.....	4
Şekil 4. 2001–2016 Yılları Arası Dünya’daki Rüzgar Enerji Santralleri Yıllık Kurulumu.....	5
Şekil 5. 2001–2016 Yılları Arası Dünya’daki Rüzgar Enerji Santralleri Kümülatif Kurulumu	5
Şekil 6. Türkiye’deki Rüzgar Enerjisi Santralleri Kurulumunda Yıllık Artış	6
Şekil 7. Türkiye’deki Rüzgar Enerjisi Santralleri İçin Yıllık Kurulum	7
Şekil 8. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası.....	8
Şekil 9. Türkiye’deki Rüzgar Enerji Tesislerinin İllere Göre Dağılımları	9
Şekil 10. Türkiye’deki Rüzgar Enerji Tesislerinin Türbin Markalarına Göre Dağılımları	10
Şekil 11. Rüzgar Ölçer	14
Şekil 12. Rüzgar Türbin Parçaları.....	14
Şekil 13. Rüzgar Türbin Elemanları	16
Şekil 14. Rüzgar Türbin Sınıflandırılması	17
Şekil 15. Tek Kanatlı Rüzgar Türbini	18
Şekil 16. İki Kanatlı Rüzgar Türbini.....	19
Şekil 17. Üç Kanatlı Rüzgar Türbini	20
Şekil 18. Çok Kanatlı Rüzgar Türbini	20
Şekil 19. Savonious Tipi Rüzgar Türbini.....	22
Şekil 20. Darrieus Tipi Rüzgar Türbini	23
Şekil 21. H-Darrieus Tipi Rüzgar Türbini	23
Şekil 22. İnşaat Öncesi Dönemde Lisans Başvurusu için Gerekli Belgeler	26
İnşaat dönemi sonrasında da üretim için başvuru yapılmaktadır.	26
Şekil 23. Rüzgar Türbin Kurulumu.....	27
Şekil 24. Wake Etkisi.....	28
Şekil 25. Rüzgar Türbin Yerleşim Planı	29
Şekil 26. Tünel Etkisi.....	30
Şekil 27. Tepe Etkisi	31
Şekil 28. Türbülans Etkisi	32
Şekil 29. Rüzgar Almayan Bölgelerdeki Türbülans Etkisi	32
Şekil 30. Karıncaların En Kısa Yolu Bulması	36
Şekil 31. Genetik Algoritma Yapısı	38

Şekil 32. Tek Noktalı Çaprazlama	40
Şekil 33. Çift Noktalı Çaprazlama	40
Şekil 34. Tek Biçimli Çaprazlama	40
Şekil 35. Sıralı Kromozom Çaprazlama	41
Şekil 36. Betz Limiti	45
Şekil 37. Rüzgar Türbini Güç Eğrisi.....	45
Şekil 38. Rüzgar Hız Dağılımı	47
Şekil 39. İzmir İlinde Kapasite Faktör Dağılımı	48
Şekil 40. İzmir İlinde Rüzgar Enerjisi Santrali Kurulabilir Alanlar	48
Şekil 41. İzmir İli Trafo Merkezleri ve Enerji Nakil Hatları	49
Şekil 42. İzmir Adnan Menderes Bölgesi Yıllık Toplam Esen Rüzgar Hız Frekansları	53
Şekil 43. Adnan Menderes Havalimanına Yakın Arazi Uydu Görünüşü	54
Şekil 44. Adnan Menderes Bölgesi Bir Yıllık Rüzgar Hız Verileri Grafiği	59

KISALTMALAR

Cut-in: Devreye Giriş Hızı

Cut-out: Devreden Çıkış Hızı

EPDK: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

REPA: Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası

TÜREB: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği



1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji doğadaki kaynaklardan üretilen ve doğal yaşamda enerji akışından elde edilen enerji çeşididir. Bu enerji kaynağı tükenme hızından daha çabuk şekilde kendini yenilemesi ile tanımlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji ve hidrojen enerjisi olarak sınıflandırılır. Enerji kaynakları ülkelerin gereksinim duyduğu enerji miktarlarını karşılarken, fosil yakıtlar ile yarışabilecek hale gelmesi için devlet tarafından desteklenmektedir. Devlet tarafından Yapılan bu destekler, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yerli üreticileri harekete geçirmekte, hem de bu uygulamaların ülke içinde yaygınlaşmasına neden olmaktadır.

Dünyada nüfusun artış göstermesi, teknolojiye yaşanan yeni gelişmelere göre artan enerji talebinin karşılanması, enerji kaynaklarına olan isteği ve ihtiyacı arttırmaktadır. Günümüzde dünyadaki tüm ülkeler enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın giderilmesi konusunda sorunla karşılaşmaktadır. Bu problemin giderilmesi için temiz yenilenebilir enerjinin üretilmesi, depolanması ve dağıtılması uluslararası seviyede büyük öneme sahiptir. Önemi gittikçe artan rüzgar enerjisinden tüm ülkeler en üst düzeyde yararlanabilmek için bu alanda gerçekleşen tüm çalışmaları desteklemektedir. İleriki yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları daha fazla ilgi görecektir.

Bu tez kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi ele alınarak rüzgar türbin tarlası yerleşim problemi üzerinde çalışılacak ve genetik algoritma yöntemi kullanılarak en verimli halde, kısıtlara uygun yerleşim nasıl yapılır anlatılacaktır. Öncelikle yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi ve santralleri, daha sonra optimizasyon teknikleri ve kullanılacak olan genetik algoritma tekniği açıklanıp en son uygulama bölümüne geçilecektir.

Rüzgar enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki durumu ile ilgili gözlemsel ve istatistiksel bilgiler bu tezin içeriğinde yer almaktadır. Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) ve Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB) verilerini kullanarak ülkemizdeki rüzgar potansiyeli incelenmiştir. Rüzgar enerjisi için kullanılan rüzgar türbinlerinin genel özelliklerine yer verilmiş olup optimizasyon teknikleri değerlendirilerek çözüm yolu için seçilen genetik algoritma yöntemi üzerinde durulmuştur. Son kısımda ise, İzmir ilinin rüzgar enerjisi potansiyelinin varlığı göz önüne alınarak seçilen araziye genetik algoritma tekniği kullanılarak türbin yerleşim optimizasyonu yapılmaktadır.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar enerji santralleri, rüzgârda meydana gelen kinetik enerjiyi öncelikle mekanik enerjiye daha sonra ise elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgâr enerjisi, çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkisi yok denecek kadar az miktarda olan yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Ayrıca rüzgâr enerjisi, tüketimi giderek artış gösteren ve potansiyeli yavaş yavaş farkedilmiş sonu gelmeyen bir enerji kaynağıdır.



Şekil 1. Rüzgar Türbin Görselleri [1]

Rüzgar; birbirine yakın iki basınç noktası arasındaki basınç farkları nedeniyle meydana gelen ve yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımıdır. Rüzgarlar yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine doğru akarken; dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmeleri, bölgesel ısı dağılımı, rüzgar önünde oluşan farklı atmosferik olaylar ve arazinin topografik yapısı gibi bazı nedenlerden dolayı şekillenir. Rüzgarlar coğrafi konum farklılıkları ve atmosferin aynı miktarda olmayan ısınma farkına dayanarak, bölgesel ve zamansal alanda değişiklikler gösterirler. Rüzgarlar hız ve yön olarak iki önemli özelliklerle ifade edilirler [2].



Şekil 2. Rüzgar Türbin Modeli [3]

2.1 Rüzgar Enerjisinin Günümüzdeki Durumu

Rüzgarın gücü, enerjisi ve teknolojisi günümüz dünyasında bütün ülkeler tarafından kabul görmüş, faydası kesin olarak tartışılmaz, temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Teknolojilerin, sanayinin gelişme göstermesi ve meydana gelen nüfus artışları sebebiyle dünyamız büyük miktarda enerji ihtiyacıyla yüz yüze kalmaktadır. Bu oluşan talebin karşılanması yüksek oranda fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır. Fakat fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar ve giderek azalma durumları göz önüne alınırsa yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç ve talep giderek artacaktır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlilerinden biri ise rüzgardan elde edilecek olan enerji kaynağıdır. 20.yüzyılın başlarında ilk rüzgar türbinleri inşa edilmeye başlanmış olup, aynı zamanda rüzgar gücünden elde edilen elektrik üretimi de giderek artış göstermektedir. Bugün dünyada bulunan her ülke rüzgar enerjisinden çeşitli şekillerde ve durumlarda fayda sağlamaktadır.

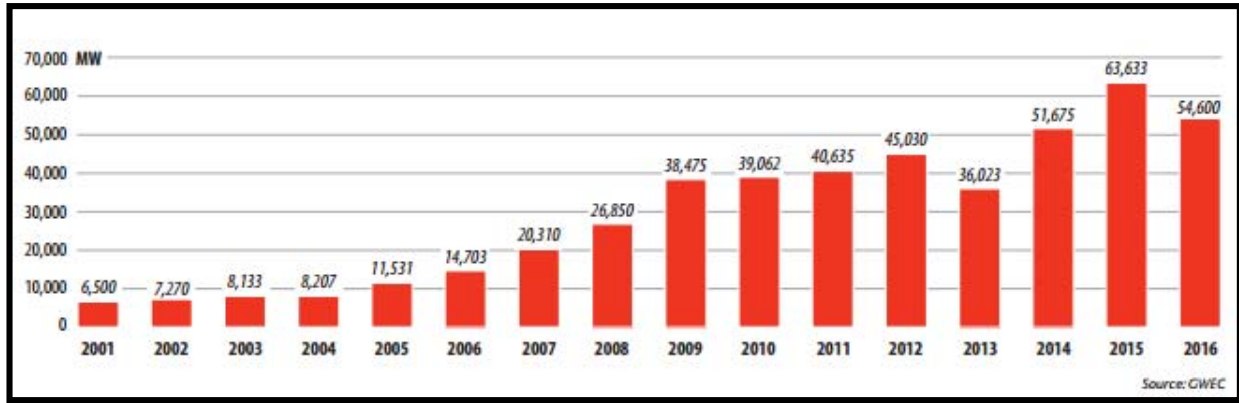
Özellikle günümüzde ekonomi ve teknoloji alanında ileri düzeydeki ülkelerde rüzgar türbinlerinden megawattlar düzeyinde fazla miktarda elektrik enerjisi üretilmektedir [4].



Şekil 3. Rüzgar Türbinleri [5]

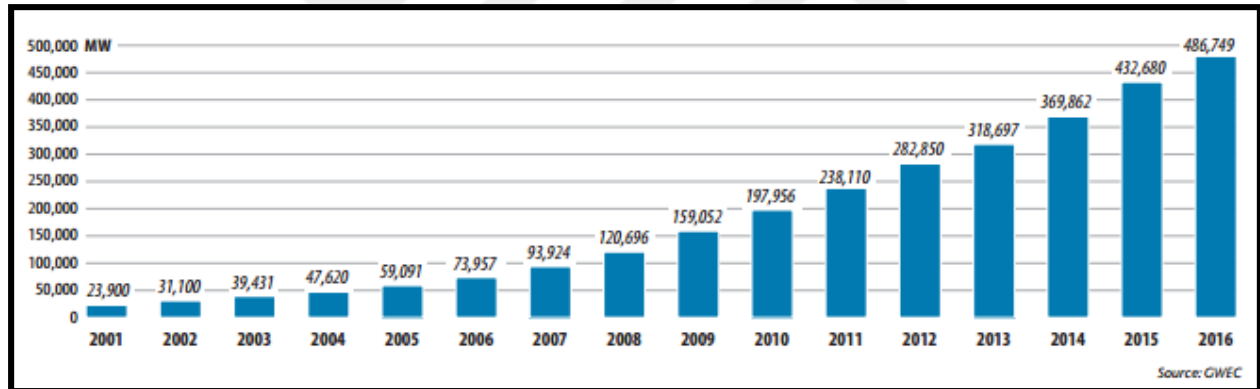
2.2 Dünyada Rüzgar Enerjisinin Durumu

Rüzgar enerjisi dünyada en hızlı şekilde artış göstererek yayılan bir enerji kaynağı olduğunu göstermiştir. Dünyada oluşan rüzgâr enerjisi miktarını belirleyebilmek adına Uluslar arası Enerji Ajansı tarafından çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [6]. Araştırmalarda, dünyada meydana gelen rüzgar enerjisi potansiyeli 53000 TWh/yıl (Terawatt/saat) olarak hesaplanmaktadır. Rüzgâr enerji potansiyeli fazla miktarda olan kıtalar veya bölgeler sırasıyla Kuzey Amerika (14000 TWh/yıl), Doğu Avrupa ve Rusya (10600 TWh/yıl), Afrika (10600 TWh/yıl), Güney Amerika (5400 TWh/yıl), Batı Avrupa (4800 TWh/yıl), Asya (4600 TWh/yıl) ve Okyanusya (3000 TWh/yıl) şeklindedir. Bu veriler, Doğru Avrupa, Kuzey Amerika, Afrika ve Rusya'nın dünyada oluşan rüzgâr enerji potansiyelinin %66'sına sahip olduğunu göstermektedir [7].



Şekil 4. 2001–2016 Yılları Arası Dünya’daki Rüzgar Enerji Santralleri Yıllık Kurulumu [5]

Dünyada üretilmiş olan rüzgar türbinlerinin çoğunluğu; ABD, Çin, Almanya, İspanya, Danimarka ve Hindistan gibi rüzgâr türbini güç kapasitesi fazlaca olan ülkelerde gerçekleştirilmektedir [7].

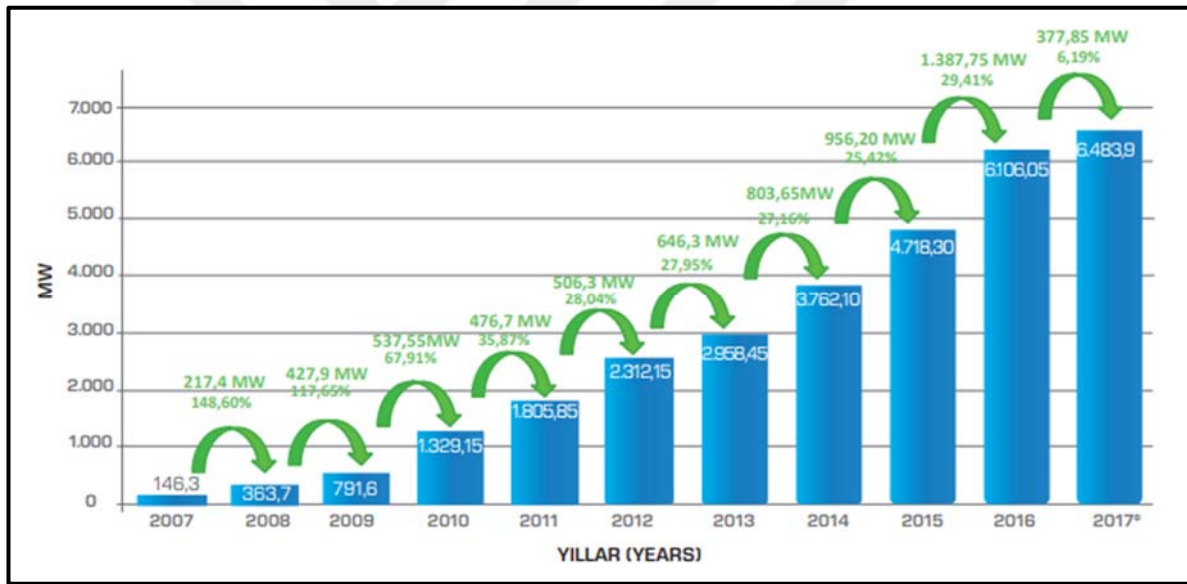


Şekil 5. 2001–2016 Yılları Arası Dünya’daki Rüzgar Enerji Santralleri Kümülatif Kurulumu [5]

2.3 Rüzgar Enerjisinin Türkiye’deki Durumu

Yenilenebilir kaynak olan Rüzgar enerjisinden elektrik üretme ilk olarak Danimarkalı meteorolojist olan Poul La Cour tarafından düşünülmüştür. 1897 yılından elektrik üretim amaçlı 89W rüzgar türbini yapmıştır. Dünyanın bir çok bölgesinde olduğu gibi rüzgar enerjisinden yararlanma Türkiye’de de ilk olarak su çekme ile tahılları öğütmek için yapılmıştır. Ülkemizde 1990’lı yıllarda rüzgar enerji kaynaklarından elektrik üretme amacı

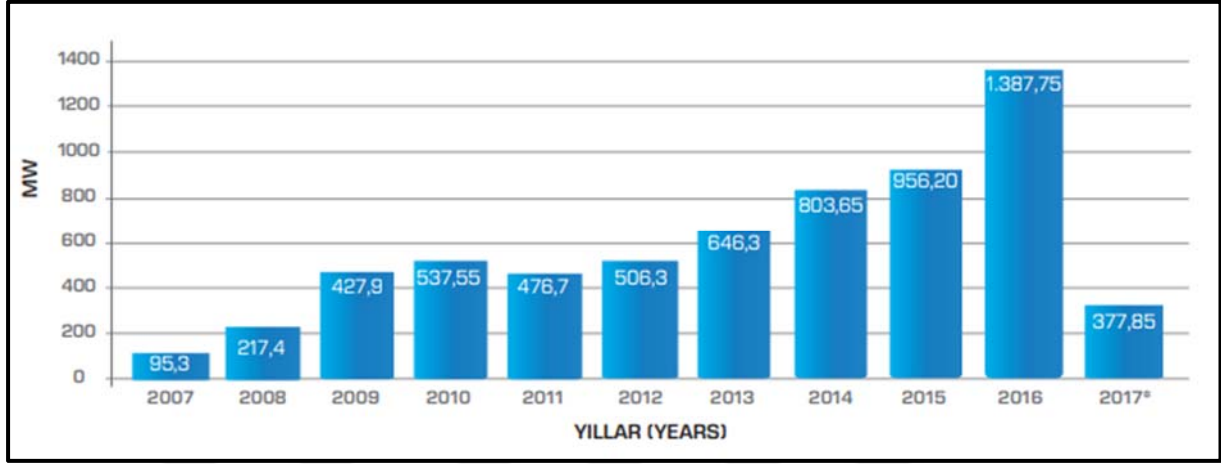
için çalışmalar başlamış olsa da uygulama kısmına geçilememiştir. Bu alanda asıl gelişme 1996 yıllarından itibaren başlamıştır. Birçok özel sektöre ait firma rüzgar enerjisinden elektrik üretimi alanında yatırımlara başlamıştır. EPDK'dan alınan verilere göre 1998 yılında İzmir-Çeşme'de Enercon türbin firmasının kurulum yaptığı 1,5 MW'lık santral ülkemizde ilk kurulan rüzgar türbin santrallerindendir [8]. Rüzgar enerji kaynağının fazla önem elde etmesinin sebeplerinden bazıları, üretim maliyetlerinin değişken olmaması ve düşük fiyatlara sahip olması, ayrıca fosil yakıtlarda oluşan fiyat farklılıklarına karşı tedbir almaya uğraşan enerji üreticileri için alternatif çözüm olanağı sağlamış olmasıdır. Yenilenebilir enerji santralleri değişmeyen fiyat olanaklarıyla beraber, radyoaktif özelliği olmayan, insan sağlığını ve doğayı tehlikeye atmayan, zararlı CO₂ gazı salınımı yapmayan, gelecekteki üretim gücü miktarını tahmin edebilme olanağına sahip yatırımlardır.



Şekil 6. Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Santralleri Kurulumunda Yıllık Artış [5]

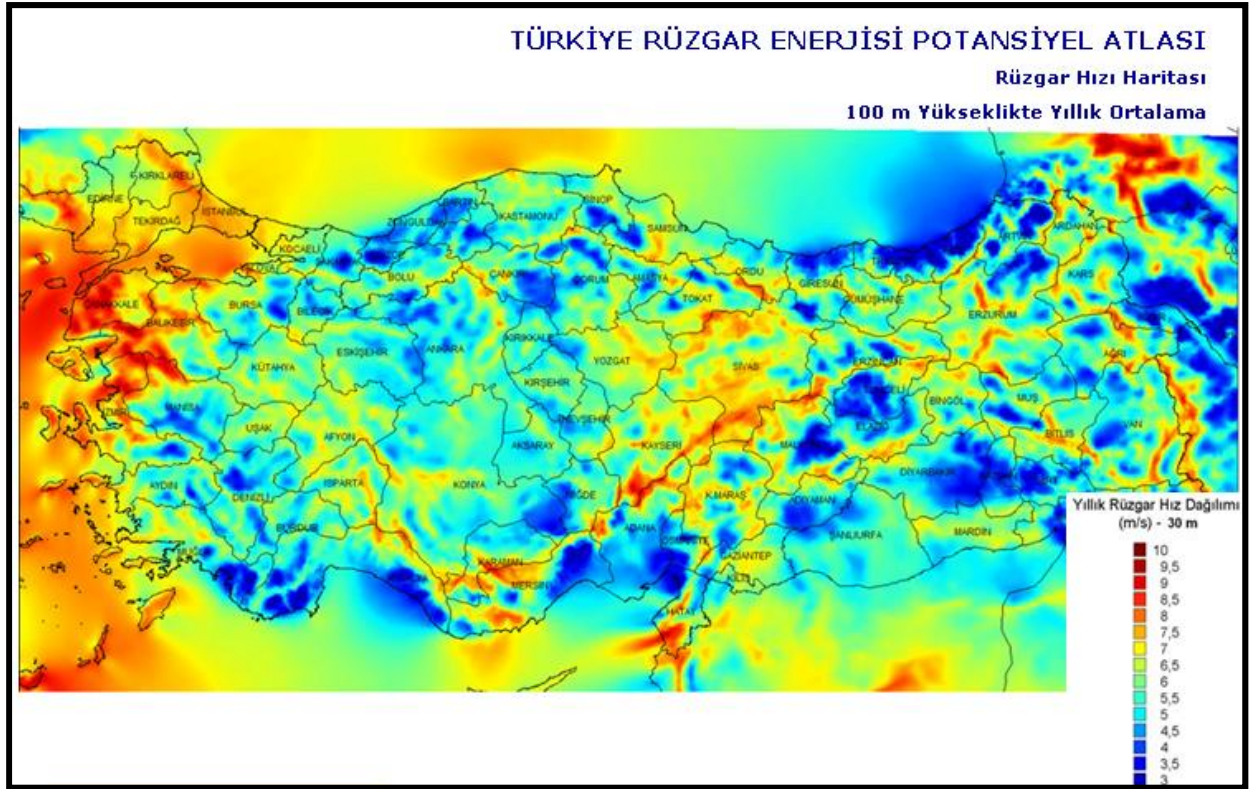
Türkiye'de rüzgâr enerji potansiyelini öğrenmek amacıyla rüzgar ölçümleri, diğer yapılan meteorolojik ölçümlerle birlikte Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır [7]. Ülkemiz rüzgar enerjisi açısından oldukça fazla bir potansiyele sahiptir. Türkiye'nin toplam kurulu gücü 2017 Kasım sonu EPDK'dan alınan verilere göre 83.138,9 MW düzeyindedir [9].

Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri kurulumunda yıllık artış miktarı Şekil 6’da ve yıllık toplam kurulum ise şekil 7’de yer almaktadır. Şekil 6’da 2007 ile 2017 yılları arası rüzgar enerji tesislerindeki artış miktarı gösterilmektedir.



Şekil 7. Türkiye’deki Rüzgar Enerjisi Santralleri İçin Yıllık Kurulum [5]

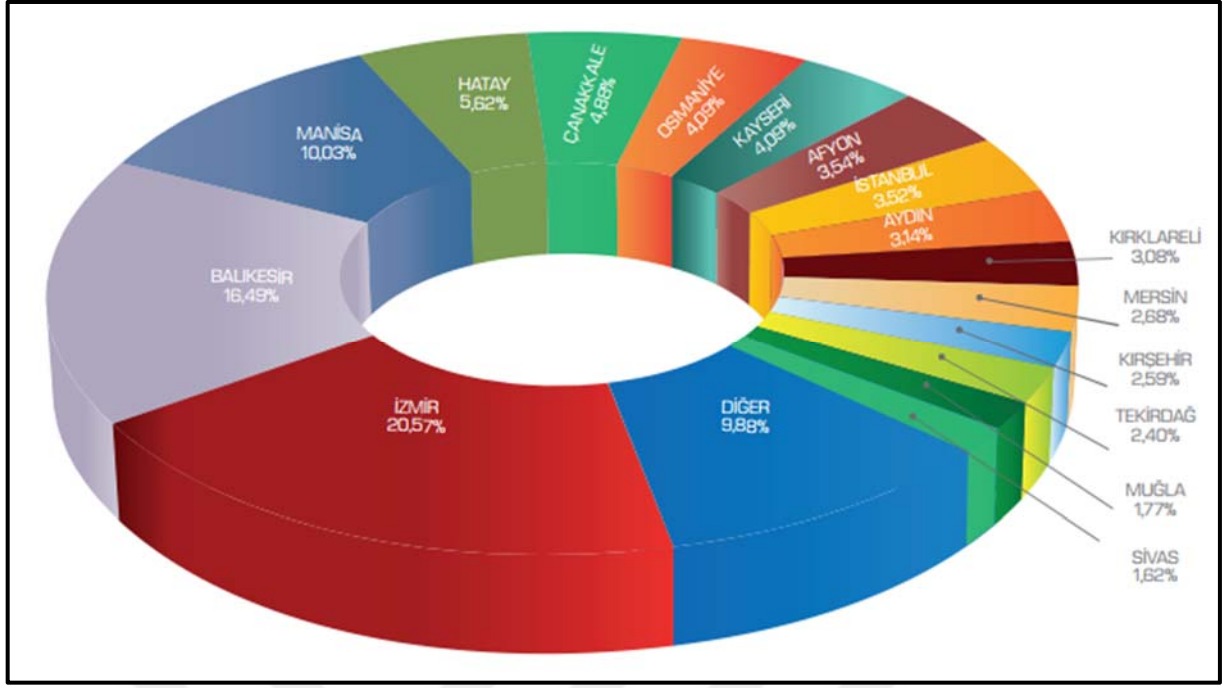
Türkiye’de potansiyel rüzgara sahip bölgeler belirlenip ona göre santral kurulacak alana karar verilmelidir. Bunun için Türkiye potansiyel rüzgar atlası oluşturulmuştur. Böylece rüzgara en çok sahip bölgeler seçilebilir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere 100m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgar hızlarına göre renk dağılımı yapılmıştır. Kırmızı renge sahip alanlar en yüksek rüzgar hızı olan bölgelerdir.



Şekil 8. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası [10]

2.3.1 Türkiye’deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin İllere Göre Dağılımı

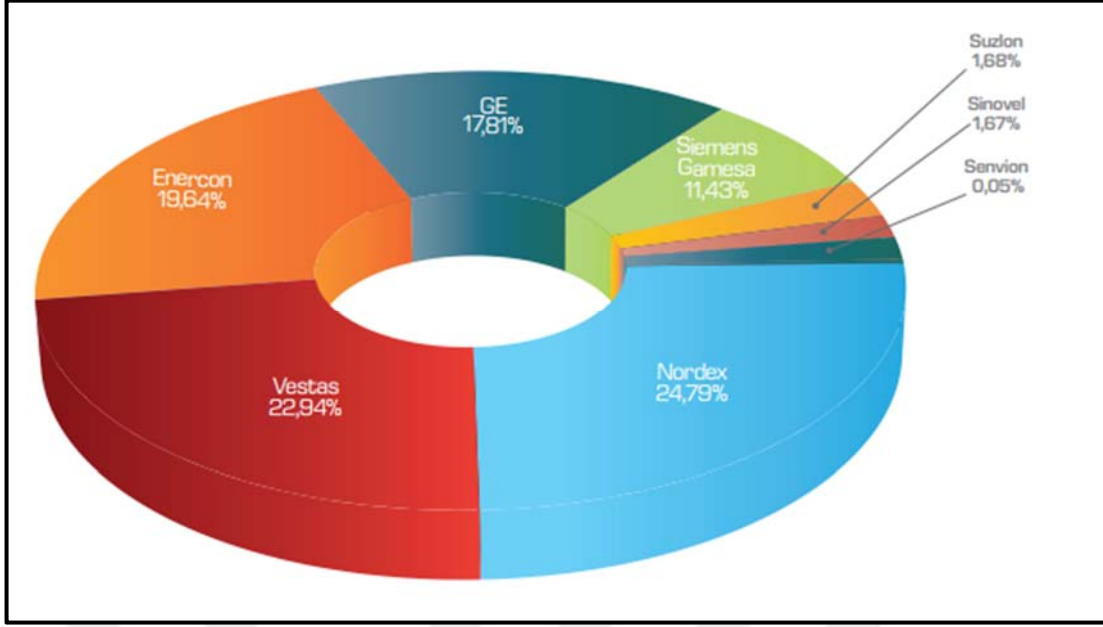
Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle rüzgar potansiyeline sahip bir bölgedir ve bu değerlendirilmelidir. Şekil 9’da işletmedeki rüzgar enerjisi tesislerinin illere göre dağılımları yer almaktadır. En çok rüzgar enerjisi tesisi kurulan iller arasında başta İzmir, Balıkesir ve Manisa yer almaktadır. Rüzgarı en çok alan bölgelerdeki illerde kurulumlar artmaktadır. Bu nedenle oluşturulacak rüzgar çiftliği optimizasyon uygulamasında Ege bölgesinde İzmir ilinde bir arazi kullanılacaktır.



Şekil 9. Türkiye’deki Rüzgar Enerji Tesislerinin İllere Göre Dağılımları [5]

2.3.2 Türkiye’deki Rüzgar Enerjisinin Türbin Markalarına Göre Dağılımı

Bir rüzgar santralinin en büyük maliyetini rüzgar türbinleri oluşturmaktadır. Rüzgar türbin satışı yapan bir çok firma bulunmaktadır. Aşağıdaki tabloda rüzgar enerji tesislerinin türbin markalarına göre dağılımları gösterilmektedir. Şekil 10’da görüldüğü üzere rüzgar türbin markalarında Nordex %24,84, Vestas %23,37 ve Enercon %20,55 paya sahiptir. Bu üç marka rüzgar türbin alımında en çok tercih edilen firmalardır. Rüzgar çiftliği optimizasyon yerleşim planı çalışmasında E-markaya ait türbinler kullanılacaktır.



Şekil 10. Türkiye’deki Rüzgar Enerji Tesislerinin Türbin Markalarına Göre Dağılımları [5]

2.4 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası

Rüzgar enerjisi potansiyel atlası Türkiye’deki oluşan rüzgar kaynaklarının belirli özelliklerini ve dağılımlarını incelemek amacıyla üretilmiştir. Burada rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde kullanılacak bölge (saha) seçimi için detaylı bilgilere ulaşmak, örneğin rüzgar kaynak haritalarını, rüzgar atlası bilgilerini elde etmek adına altyapı oluşturulmaktadır. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası; mikro, orta ve büyük ölçekli hava tahmin modelleri kullanılarak elde edilen rüzgâr kaynak bilgilerinin üretildiği atlasıdır. Bu modeller yardımıyla 30, 50, 70 ve 100m yüksekliklerde günlük, aylık, yıllık ve hatta mevsimlik olarak rüzgar hız ortalamaları, 50m yükseklikteki kapasite faktörü, 50m yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları, sıcaklık değerleri, yer seviyesi ve 50m yüksekliklerde aylık basınç değerleri ortaya konmuştur.

Bir rüzgar enerji atlası tüm rüzgar potansiyeli olan bölgeleri seçmek için kullanılabilmektedir. Yüksek çözünürlüğe sahip rüzgar kaynağı haritaları ve bu haritalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda birçok kullanıcı bu atlaslardan yararlanabilmektedir. [8].

2.5 Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Parçalar

Rüzgar türbinlerini oluşturan birçok mekanik aksam bulunmaktadır. Rüzgarın oluşturduğu kinetik enerji rotorda mekanik enerjiye dönüşür. Pervane milinin dönüş hareketi arttırılarak gövdedeki jeneratöre iletilir. Daha sonra jeneratörden elde edilmiş olan elektrik enerjisi aküler yardımıyla direk olarak alıcılara ulaştırılır ya da depolanabilir. Rüzgar türbin temel elemanları makine dairesi (nacelle), kule (tower), pervane kanatları (rotor blades), türbin göbeği (hub), şaft, düşük hız şaftı, yüksek hız şaftı, dişli kutusu, jeneratör, rüzgar ölçer (anemometre), yön ölçüm sensörü, fren (break) şeklindedir [8].

2.5.1 Makine Dairesi

Makine dairesi (nacelle) türbin kanadı hariç bütün mekanik elemanları içerisinde bulunduran bir tür kabindir. Makine dairesi, pervaneden gelen rüzgar enerjisinin mekanik aksam yardımıyla elektrik enerjisine çevrildiği yerdir. Güç aksamı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için bir jeneratör, kulenin üzerinde türbin yönünü rüzgara doğru döndürebilmek için bir dönen yatak (yaw sürücü), işlem kontrolü ve izlenmesi adına elektronik sistemler barındırır [8]. Makine dairesi, rüzgar türbininin dişli kutusu ve elektrik üretici gibi tüm parçalarını içermektedir. Görevli, makine dairesine türbin kulesinden girebilir. Makine yeri solunda, pervane kanatları ve rotor göbeği bulunur [11].

2.5.2 Kule

Rüzgâr türbininin kulesi (tower), makine yeri ve pervanenin taşındığı gövde kısmıdır. Genellikle rüzgar türbinlerinde zeminden yükseğe doğru çıkıldıkça rüzgar hızları artacağından kulenin yüksek olması avantaj olarak kabul edilir. Rüzgar türbin kuleleri, dairesel biçimde ya da kafes biçiminde olabilir. Dairesel kulelerde türbinin tepe noktasına ulaşmak için merdiven olabildiğinden görevlilerin herhangi bir aksaklıkta müdahale edebileceği alanlara ulaşması adına daha güvenlidir, bu nedenle en çok tercih edilen kule tipidir. Kafes kulelerinin ise avantajı daha ucuz olmalarıdır. Rüzgar türbinleri yüksekliklerine göre ve kurulu güçlerine göre değişimler göstermektedir. Rüzgar türbinlerinde kule yüksekliği ne kadar fazla olursa o kadar avantaj artmaktadır, çünkü daha çok rüzgar ile üretim artış gösterir. Kule yüksekliği

saha koşullarına göre de değişim göstermektedir. Rüzgar türbin kuleleri 20 ile 30m arasında değişmektedir. Uzunluğu belirleyen en önemli faktör ulaşım zorluklarıdır [11].

2.5.3 Pervane Kanatları

Rüzgar türbin parçası olan pervane kanatları (rotor blades), rüzgârı alır ve rüzgârın gücünü pervane göbeğine (hub) ulaştırır. Rüzgar türbinlerinin pervanesini oluşturan kanat, rüzgar türbinindeki en önemli parçalardan birisidir. Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; elyaf, alüminyum, çelik, plastik ve ağaçtan üretilmektedir. Gelişmiş rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen çoğu, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler. Pervane kanatları Alüminyum ise, çeliğe göre daha hafif olduklarından, rüzgara karşı yorulma durumları daha iyidir ve aşınmalara daha dayanıklıdır. Rüzgar türbinlerinin kanat tasarımının yapılması oldukça detaylı bir süreci kapsamaktadır. Tasarım sürecinin temel amacı aerodinamik yapının en verimli şekilde kullanılmasına özen göstermektir [8].

2.5.4 Rotor Göbeği

Rüzgâr türbininde kanatların bağlandığı ortadaki parçaya rotor göbeği (hub) denmektedir. Hub boyutları rüzgar türbin gücüne göre değişmektedir. Rotor göbeği kanatlardan aldığı gücü transmisyon mili denilen parça aracılığıyla jeneratöre iletir [8].

2.5.5 Şaft

Pervanelerin dönme hareketiyle ona bağlı bulunan şaft da dönmeye başlar. Şaftın dönmesiyle de motor içinde hareket sağlanır ve motorun çıkışında elektrik enerjisi elde edilmiş olur [11].

2.5.6 Yüksek Hız Şaftı

Dişli kutusu ile dönme hızı artırılarak yüksek hız şaftı, jeneratöre kinetik enerjiyi aktarır. Jeneratörde elektromanyetik indüksiyon ile enerji üretimi gerçekleştirilerek trafolar sayesinde istenilen şebekeye elektrik enerjisi aktarılır. Kısacası yüksek hız şaftı jeneratörü iletken ve dişli kutusu ile jeneratör arasında yer alan şafttır [8].

2.5.7 Düşük Hız Şaftı

Düşük hız şaftı, rüzgar türbin kanatlarından gelen hareketi bağlantılarla önce dişli kutusuna sonra da jeneratöre aktarır [11].

2.5.8 Dişli Kutusu

Rüzgardan elde edilen mekanik enerji iletim sistemi ile jeneratöre verilerek elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşüm dişli kutusu (gearbox) sayesinde sağlanır. Rüzgar türbinlerinin en önemli parçalarından biri olan dişli kutusu, jeneratör ile ana şaft arasında yer almaktadır [8].

2.5.9 Jeneratör

Rüzgâr türbini jeneratörleri oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmeyi sağlarlar. Rüzgar türbinleri ile oluşturulmuş rüzgar enerji santrallerinde tercih edilen jeneratörler, doğru akım veya alternatif akım jeneratörleri olabilir. Rüzgar pervaneyi bir dişli kutusu üzerinden hareket ettirerek jeneratörü döndürür [8].

2.5.10 Rüzgar Ölçer

Rüzgar hızının ölçümünü yapan ve elektronik kontrol sistemine ileten bir ölçüm cihazıdır. Anemometrenin (rüzgar ölçer) anlamı yunan dilinde rüzgardır. Türbin verimi hesaplanması yapılırken de anemometre ölçümünden yararlanır. Anemometreden alınan elektronik sinyaller ile rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi rüzgâr hızı yaklaşık olarak 5 m/s'ye ulaştığında rüzgâr türbinini devreye almak için kullanılır [11].



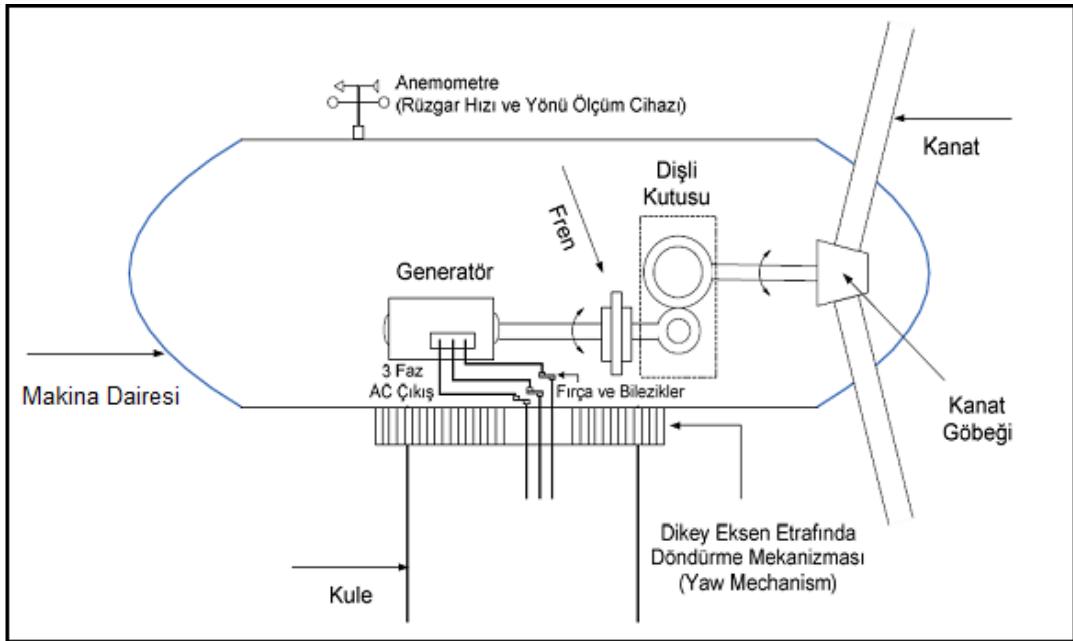
Şekil 11. Rüzgar Ölçer [12]

2.5.11 Yön Ölçüm Sensörü

Yön ölçüm sensörü, rüzgar türbinlerinde rüzgarın esme yönünü belirleyerek bunu kontrol sistemine iletir. Yön ölçüm sensörü ile rüzgar hangi yönlerden esmekte anlaşılmaktadır [8].

2.5.12 Fren

Rüzgar türbinlerinin bazı ekipmanlarının herhangi bir ani durum esnasında acil olarak durabilmesi gerekmektedir. Fren (break) aşırı hız sebebiyle oluşan yüklenme veya bir problem ortaya çıktığında önlem amaçlı pervaneyi durdurmaya yarar [8].



Şekil 12. Rüzgar Türbin Parçaları [13]

2.6 Rüzgar Türbinleri Çalışma Prensibi

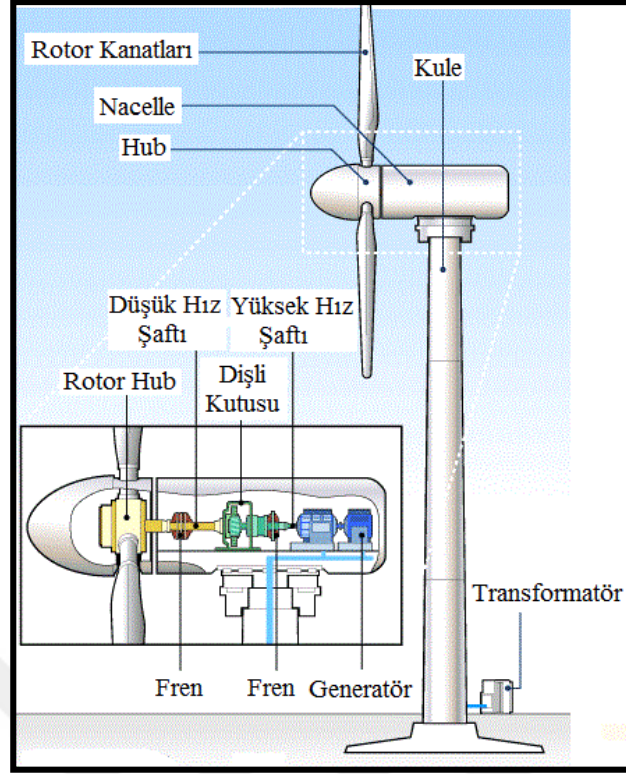
Rüzgar türbinleri genel olarak rüzgardan aldıkları enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin çalışma prensibini anlayabilmek adına öneme sahip iki aerodinamik kuvvet iyi bilinmelidir. Bunlar kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetleridir.

Kaldırma kuvveti , akış yönüne dik olarak oluşan bir kuvvettir. Örneğin; uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet neden olmaktadır. Bunun için özellikle adı kaldırma kuvveti olarak isimlendirilmiştir.

Sürüklenme kuvveti ise, cisim üzerinde akış tarafında oluşan bir kuvvettir. Örneğin; düz bir zemin üzerinde oluşabilecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90 derece dik geldiği durumda oluşur. Minimum sürüklenme kuvveti ise hava akışı cismin yüzeyine paralel durumdayken meydana gelir.

Rüzgar Santralleri kurulumu tamamlandıktan sonra pervaneler rüzgarın (havanın) hareketiyle bağlı oldukları şaftı döndürür. Uygun bir jeneratör ile de bu hareket enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sağlanır [14].

Kısacası rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi anlatılacak olursa, hareket halindeki hava (rüzgar) kanatlara çarparak pervaneleri döndürmeyi sağlar ve böylece pervaneler rotorda kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşümünü gerçekleştirirler. Sonrasında rotor milinin dönme hareketi hızlandırılarak jeneratöre aktarılır. Şekil 13’de rüzgar türbin örneği üzerindeki gösterilen parçalar ile çalışma prensibi tamamlanmaktadır [15].



Şekil 13. Rüzgar Türbin Elemanları [14]

2.7 Rüzgar Türbinlerinin Güçlerine Göre Sınıflandırılması

Günümüzde kullanımı gerçekleşen rüzgar türbinleri, tip ve boyut olarak değişik özelliklere göre tasarlanmaktadır. Rüzgar türbinleri değişik çalışma özelliklerine sahiplik açısından aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

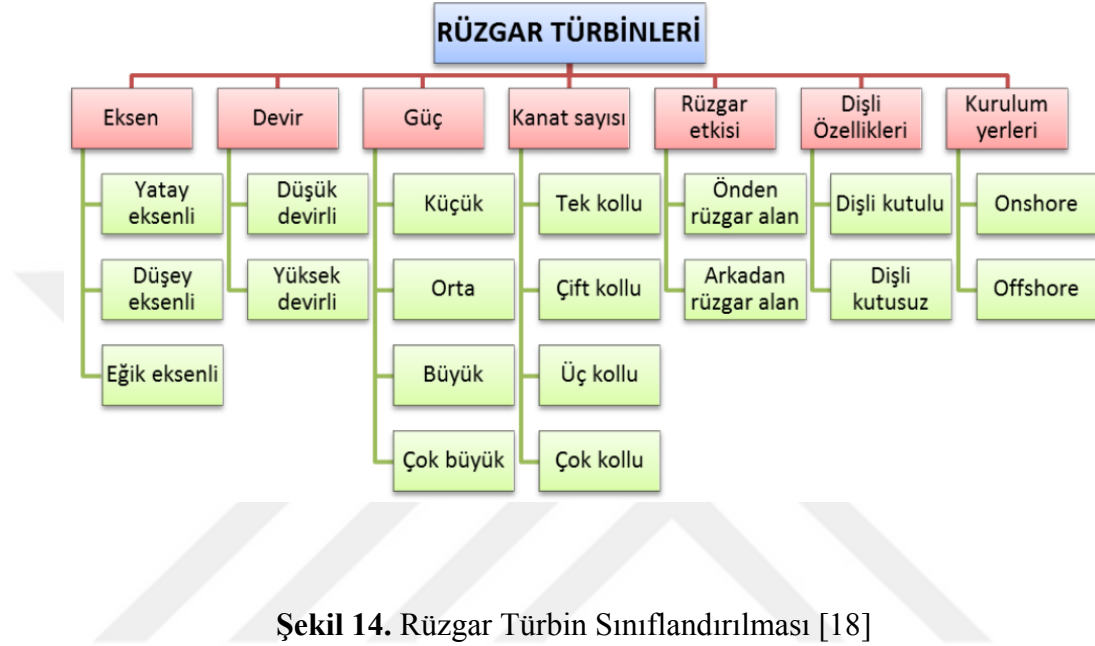
- 0 W – 100 W = Mikro Sistemler
- 100 W – 10 kW = Mini Sistemler
- 10 kW – 50 kW = Küçük Sistemler
- 50 kW – Üstü = Büyük Sistemler [16].

2.8 Rüzgar Türbin Çeşitleri

Rüzgar türbinleri büyüklüklerine ve modellerine göre ama genellikle dönme eksenlerine göre sınıflandırılmaktadır. Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine sınıflandırılırsa üç gruba ayrılırlar:

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri
- Eğik eksenli rüzgar türbinleri

Aşağıda bulunan şekil 14’de rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması belirtilmiştir [17].



2.8.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kanatlar rüzgar yönüne göre dik ve dönme eksenleri rüzgar önüne paralel şekildedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %45 civarındadır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri araziye yerden 20-30m yüksekte ve çevredeki var olan engellerden 10m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. Rotor kanatlarının sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönüş sağlamaktadır.

Rüzgar hızının, rotor kanadı uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı (λ) denir. Eğer;

$\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor,

$\lambda = 6 - 8$ Üç kanatlı rotor,

$\lambda = 9 - 15$ İki kanatlı rotor,

$\lambda > 15$ Tek kanatlı rotor kullanılır.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri kendi içinde dörde ayrılırlar.

- Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri
- İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri
- Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri
- Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri [18].

2.8.1.1 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin inşa edilmesinin asıl sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede de rotorun döndürme momentini ve makine ağırlığını en aza indirmektir. Tek kanatlı rüzgar türbinlerinde mekanizma hareketinin iyi sağlanabilmesi ve ilave olabilecek yüklere karşı aerodinamik dengesizlik için hub (türbin göbeği) çok iyi ve güçlü yapılmalıdır. Rotor kanadı, kanat üzerinde oluşan yükleri azaltmayı sağlayacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz yapılabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşılıklı ağırlıkla denge sağlanmalıdır. Tek kanada sahip rüzgar türbinlerinin kanatlarının uç hızı, üç kanatlı rüzgar türbinlerinininkine göre daha azdır. Rüzgar türbinlerinde ne kadar kanat sayısı artarsa gürültü o oranda artmaktadır. [18].



Şekil 15. Tek Kanatlı Rüzgar Türbini [19]

2.8.1.2 İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetini azaltmak adına bu iki kanatlı türbin fikri ortaya çıkmıştır. İki kanatlı rüzgar türbinleri çok fazla üretime geçememiştir, sadece bir kaç üretilmiştir. İki kanatlı rotorun balansı, tek kanatlı rotora göre karşılaştırıldığında daha düzgündür. Ama iki kanatlı rüzgar türbinlerinde rotorun sebep olduğu hareketleri önlemek için teknik güç gerekmektedir. Bu nedenle maliyette bir artış meydana gelecektir. Rüzgar türbin göbeğindeki oluşan titreşimin azalması için rotora hesaplama sistemi yerleştirilmektedir. Bu yerleşim, rotor kanadına dik ve iki rotor şaftına dikey olacak şekilde yapılmalıdır. Kanat uç hızları üç ve daha fazla kanat yapısına sahip türbinlere oranla daha yüksektir. Bu rüzgar türbinlerinin yüksek gürültü ve düşük rüzgar hızlarında (3m/sn) çalıştırılması dezavantajıdır. Günümüzde piyasadaki duruma bakılırsa iki kanatlı rotora hiçbir ilgi gösterilmemektedir [18].



Şekil 16. İki Kanatlı Rüzgar Türbini [19]

2.8.1.3 Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Bu türbin tipleri en çok yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinleridir. Dünyada her noktada üç kanatlı rüzgar türbinleri tercih edilmektedir. Bu türbin tipinin kullanılmasının başlıca sebebi dönme momentinin daha orantılı ve düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, hub içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70m/sn'den az olduğundan sarsıntısız dönebilmekte, gürültü seviyeleri düşük olmakta ve göz estetiğine

bakılacak olursa gayet orantılı yapıya sahiptirler. Bu nedenle insanlar tarafından en çok tercih edilen türbin modelidir [18].



Şekil 17. Üç Kanatlı Rüzgar Türbini [19]

2.8.1.4 Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Bu türbin modeli rüzgar türbinleri arasında en gelişmemiş ve eski olandır. Uzun yıllar sadece su pompası için kullanılmış olan bu türbin tipleri moment gereksinimi sebebiyle çok kanatlı üretilmiş olmaktadır. Çok kanatlı rüzgar türbinleri ağır kanat yapısı yüzünden yavaş hızda çalışırlar. Türbin kanatlarının sahip olduğu genişlikler, pervane göbeğinden (hub) uçlara doğru gidildikçe artış göstermektedir [18].



Şekil 18. Çok Kanatlı Rüzgar Türbini [19]

2.8.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin dönüş yönleri rüzgar yönüne dik ve düşey konumda olduğundan türbin kanatları da düşeydir. Bu türbin modeli rüzgarı kaldırma gücüne ve aynı zamanda rüzgarı her açıdan, yönden alabilme durumuna sahiptir. Bu türbin modellerinin verimi yaklaşık olarak %35 civarındadır. Bu türbin modelleri az rüzgar hızlarında su pompalamak için tasarlanmıştır. Vites kutuları ve üreteçleri toprak seviyesine yerleştirilebildiğinden kule gereksinimi yoktur. Bu nedenle düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorunda kalırlar ve “yaw” (eğim) mekanizmasına gereksinimleri kalmamaktadır. Bu türbinler yere bağlantıları çelik halatlar ile sağlanmaktadır. Kanat sayılarında artış olduğunda malzemede artacağından çok rüzgar hızı alan zamanlarda verimleri azalmaktadır. Bu türbinler kendi içlerinde üçe çeşide ayrılırlar.

- Savonius Rüzgar Türbinleri
- Darrieus Rüzgar Türbinleri
- H-Darrieus Rüzgar Türbinleri [18].

2.8.2.1 Savonius Modeli Rüzgar Türbinleri

Savonius rüzgar türbin modeli, Finlandiya’lı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından 1925 yılında bulunmuştur. Bu tip rüzgar türbinleri dikey eksenli rüzgar türbinlerinden daha üstündürler, bunun sebebi kendi kendilerine ilk harekete başlayabilmeleri, her açıdan gelen rüzgar ile çalışabilmeleri, az miktarda rüzgar hızlarında çalışmaları verimli olması ve yapım maliyeti çok tutmamasıdır. Savonius rüzgar türbinleri iki disk arasına yerleştirilmiş olup kanat adında iki yarım silindir şekilden oluşmaktadır. Savonius tip türbinler rüzgarın sahip olduğu hız etkisi yüzünden pozitif ve negatif moment oluşturmaktadırlar. Pozitif olan moment daha büyük olduğundan türbin dönüşü pozitif yönde gerçekleşir. Bu rüzgar türbinlerinin performansları fazla olmadığından su pompası ve havalandırmalar için tercih edilmişlerdir. Savonius rüzgar türbinlerinin olumsuz koşulları olması dışında üstünlükleri de vardır fakat performansları düşük olduğundan kullanılmamaktadırlar [18].



Şekil 19. Savonius Tipi Rüzgar Türbini [20]

2.8.2.2 Darrieus Modeli Rüzgar Türbinleri

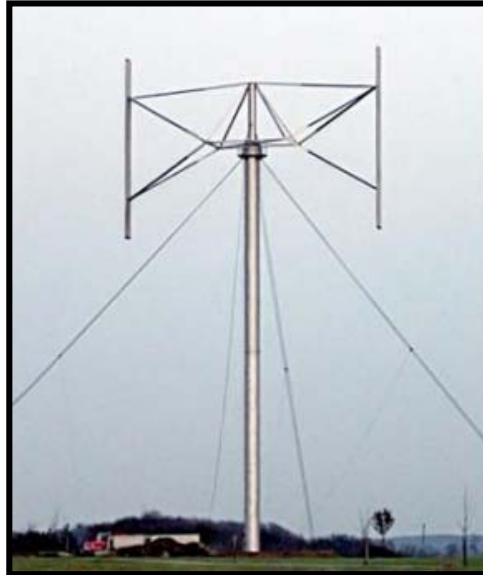
Bu rüzgar türbinleri Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir. Darrieus rüzgar türbin kanatları hava ile etkileşim içinde olduklarından performansları iyi durumdadır. Kanada ve Amerika geçmiş yıllarda bu Darrieus rüzgar türbinlerinin kanat tasarımlarında büyük çalışmalar yapmışlardır. Darrieus rüzgar türbinleri iki veya üç kanatlı olabilir. Pervane kanatlarındaki eğimler sayesinde çekme gerilimleri azalmaktadır. Bu sebeple rahatlıkla yüksek hıza sahip rüzgarlarda çalışabilmektedirler [18].



Şekil 20. Darrieus Tipi Rüzgar Türbini [21]

2.8.2.3 H-Darrieus Modeli Rüzgar Türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinleri arasında en önemlilerden biridir. Darrieus rüzgar türbinlerinin geliştirilmesiyle oluşmuş daha karmaşık yapıya sahip bir türbin modelidir. Darrieus rüzgar türbinlerinden iki önemli farkı bulunmaktadır. Bunlar; kanatlara durdurma ve hareket kontrolü (pitch) özellikleridir, aerodinamik profili düzdür [18].



Şekil 21. H-Darrieus Tipi Rüzgar Türbini [22]

2.8.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Eğik eksenli rüzgar türbinleri dönme yönleri düşey olarak, rüzgar yönünde bir açı oluşturan rüzgar türbin modelleridir. Bu tip rüzgar türbinlerinin pervane kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır [18].

2.9 Rüzgar Türbininin Kurulacağı Arazi Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Özellikler

Rüzgar türbinleri enerji santralının kurulacağı bölge de en az 1 yıl ölçüm yapılmalıdır. Ölçüm direği dikilmeden önce arazi belirlemede dikkat edilmesi gereken bazı kriterler vardır. Rüzgar Enerji Potansiyel Atlasından faydalanılarak arazi seçimi yapılabilir. Rüzgar türbin enerjisi santral yatırımının temeli arazi seçimindeki kriterlere dayanmaktadır. Bu amaçla rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler belirlenmesi gerekmektedir. Arazi ön etütleri ile hazırlıklar yapılarak bölgelere keşif gezileri düzenlenmelidir. Arazi seçimindeki önemli hususlar aşağıda başlıklar halinde yer almaktadır [8].

2.9.1 Sahaya Ulaşılabilirlik

Bölgeye ulaşım zor olmamalıdır. En azından bir servis yolu veya toprak yolun olması bile yeterlidir. Daha ileriki aşamalarda bölgeye tırlar ile gelecek teçhizatlar, vinçlerle türbinlerin yerleşiminin yapılacağı unutulmamalıdır. Bölge seçilirken arazinin konumu bu nedenle önem taşımaktadır [8].

2.9.2 Trafo Merkezi ve Enerji Nakil Hatları

Rüzgar türbinleri yerleşiminde en dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi trafo merkezlerine ve enerji nakil hatlarına olan mesafelerdir. Ülkemizde rüzgar elektrik santralının trafo merkezlerine bağlantısına izin verilmektedir, doğrudan enerji nakil hatlarına girdi-çıkı (saplama) nadir olarak izin verilmektedir [8]. Rüzgar türbin yerleşimde trafoya ve enerji nakil hattına uzaklık yatırım maliyetini etkileyen önemli faktörlerdendir. Aynı zamanda enerji iletimi sırasında kayıplar ön plana alındığında kullanılacak arazinin trafolar ve enerji nakil hattı olan bölgelere yakın olması yüksek önem taşımaktadır [23].

2.9.3 Askeri veya Stratejik Bölgeler

Arazinin askeri veya gizli bir stratejik önemi olabilir. Bu konuda araştırılmalı, bölgede bulunan en yakın askeri birliğe konu sorulmalıdır. Askeri ve stratejik bölgelere rüzgar enerji santrali kurulmamalıdır [8].

2.9.4 Milli Park, Muhafaza Ormanı

Bölge milli park, muhafaza ormanları sınırları içerisinde kalmamalıdır. Aksi takdirde rüzgar ölçüm direği dikimi için bile izin alınamaz. Bu konuda sorun çıkmaması için arazi seçimi dikkatle yapılmalıdır [8].

2.9.5 Bölgenin Elektrik Enerjisi Talebi ve Enerjinin Pazarlanması

Rüzgar enerji santralleri enerji ihtiyacının karşılanabilmesi adına mümkün mertebe enerji talebinin yüksek olduğu bölgelere kurulmalıdır [8].

2.9.6 Arazinin Jeolojik ve Topografik Yapısı, Eğimi ve Büyüklüğü

Arazi rüzgar türbinlerinin montajı ve çalışmasına uygun bir eğim ve büyüklükte olmalıdır. Tarım alanı olan arazilere yerleşim yapılmamalıdır. Jeolojik yapı olarak da imara uygun, fazla engebeli bir yapıya sahip olmamalıdır [8].

2.9.7 Arazi Sahipliğinin Belirlenmesi

Arazi bölgesinin sahibinin de bilinmesi çok önemlidir. Bölge, Orman Bakanlığı, Belediye Alanı, Hazine, Milli Emlak vb. gibi kurum, tüzel veya özel kişilere ait olabilir. Ülkemizdeki bölgeler genellikle Orman Bakanlığı'na aittir. Bu nedenle araştırılarak bölge seçimi yapılmalıdır [8].

2.10 Lisanssız Rüzgar Enerji Santral Kurulumu

Yeni çıkarılan yenilenebilir enerji kanunu ile Aralık 2010 tarihinden itibaren üreticiler rüzgar enerjisi santral kurulum alanında 1 MW kapasiteye kadar rüzgar türbinleri kurulumunu lisans almadan elektrik üretimini yapabilirler ve kullanmadıkları fazla olan enerji şebekelere satılabilmektedir. Bu çıkarılan yeni kanun ile beraber Türkiye enerji tasarrufu yapmayı hedefleyerek yenilenebilir temiz enerji üretimini amaçlamaktadır. Bunun için rüzgar türbinleri ile enerji üretenlere devlet teşvikler sağlamaktadır. Lisanssız rüzgar enerjisi üretimi 1 MW'a kadar olan rüzgar türbinleri için geçerli olmaktadır. Her arazinin şartları farklı olduğundan ön analiz yapıp türbin güçleri ona göre seçilmelidir [24].

2.11 Lisans Başvurusu

Rüzgar türbin kurulumunda tüm çalışmalar yapıldıktan ve yatırımın yapılacağına karar verildikten sonra EPDK'da ön lisans başvurusu yapılmaktadır. Ön lisans ve üretim lisans başvurusu kısmını ayıran temel unsurlar inşaat öncesi dönem ve inşaat dönemidir. İnşaat öncesi dönemde yapılması gerekenler aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

- Bağlantı ve Sistem Kullanım Anlaşması,
- Yerleşim Yeri Temini,
- Bildirimler,
- Ruhsatlar,
- Onay aşamaları,
- Kaynak kullanım hakkının belgelenmesi,
- Tesis yeri sahasının mülkiyet veya kullanım hakkının elde edilmesi,
- İmar planlarının onaylanması,
- Ön proje onayının alınması,
- Bağlantı ve sistem kullanım anlaşmaları için başvuru yapılması,
- Askeri Yasak Bölgelere ilişkin görüşün alınması,
- Teknik Etkileşim İzninin alınması,
- ÇED Belgesinin alınması,
- Yapı ruhsatına ilişkin belgenin alınması,
- Kaynak kullanım, katkı payı anlaşmasının yapılması gerekmektedir.

Şekil 22. İnşaat Öncesi Dönemde Lisans Başvurusu için Gerekli Belgeler [5]

İnşaat dönemi sonrasında da üretim için başvuru yapılmaktadır [25].



Şekil 23. Rüzgar Türbin Kurulumu [26]

2.12 Rüzgar Verimi ve Mikro Konumlandırma

Rüzgar enerji santrali kurulacak saha içinde rüzgar türbinlerinin en fazla üretim yapabilecek şekilde optimum olarak yerleştirilmesi işlemine mikro konumlandırma denir. Mikro konumlandırma yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli şey ise, yalnızca haritaya bağımlı kalarak değil de mutlaka proje sahasının görülüp, gezilip daha sonra yapılmasıdır. Bölgeye yapılan ziyaretlerde rüzgar türbinlerinin hangi noktaya konulacağı dikkatli bir şekilde seçilmelidir. En yüksek verimi elde edebilmek adına rüzgar türbinlerinin rüzgarın yönüne ve tarlanın arazisine göre yerleştirilmesi gerekmektedir. Mikro konumlandırma sayesinde rüzgar enerjisinden maksimum yararlanılabilir. Rüzgar türbinlerinin ne derece verimli olduğu aşağıdaki bilgiler ile anlaşılmaktadır;

- Rüzgar türbinlerinin yerleştirildiği konum,
- Her türbinin tek başına olduğu zaman yapacağı üretim MWh (Tek),
- Her türbinin rüzgar çiftliği içerisinde yapacağı üretim MWh (Santral),
- Her türbinin ne derece verimli yerleştirildiğidir [8].

2.13 Rüzgar Türbinlerinde Wake Etkisi

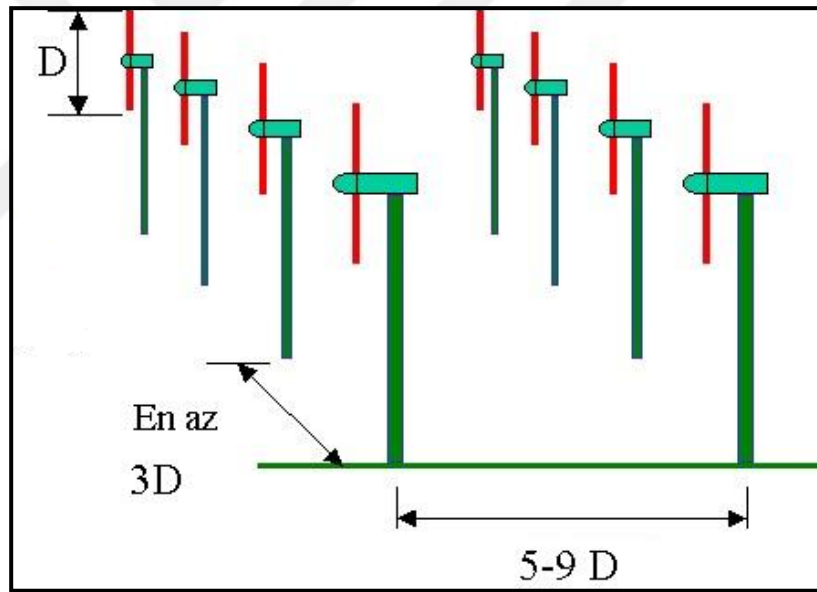
Rüzgar türbinlerinden elektrik üretimi yapılması, seçilecek arazinin ve bölgenin meteorolojik özelliklerine ve türbin tasarımına bağlıdır. Rüzgar enerji santrali kurulumu için saha seçimi doğru yapılmalı ve türbinler rüzgar yönlerine göre yerleştirilmelidir. Çünkü rüzgar türbinlerinin arkasındaki bölgede wake etkisi meydana gelmektedir. Rüzgâr türbinleri genellikle aşağı yöne doğru esen rüzgar gölgeleri oluştururlar. Türbin uçlarına duman eklenirse, bir türbinin arkasındaki wake izini görmek mümkündür [12]. Wake etkisi türbinin akıntı yönünde azalan rüzgarından, akıntı yönünün tersinden giren rüzgarın enerjisini çıkartır [27].



Şekil 24. Wake Etkisi [27]

2.14 Rüzgar Türbinlerinin Yerleşim Etkisi (Park Effect)

Her rüzgar türbini rüzgardaki enerjiyi aldıktan sonra elektrik enerjisine çevirir daha sonra ise rüzgarı yavaşlatır. Bu nedenle rüzgar türbin yerleşim planlarında rüzgar türbin arkalarında rüzgar yönüne göre mesafe bırakılmalıdır. Rüzgar enerjisi santral yerleşimlerinde türbinler birbirlerinden en az 3 rotor çapı uzaklığında kurulurlar. Bunun sebebi türbinlerin rüzgar akan yönde oluşturacağı fazla türbülansdan kaçınmaktır. Kısacası bir rüzgar çiftliği modelinde türbinlerin sıralar arası mesafesi 7 rotor çapı ile 9 rotor çapı arasında ve birbirlerinden uzaklıkları ise 3 rotor çapı uzaklığı kadar olmalıdır. Ayrıca rüzgar türbinleri çevresinde oluşabilecek engel sebepleri göz önüne alınırsa, cismin boyutunun 20 katı mesafeye göre türbin yerleşimi yapılmalıdır [28].



Şekil 25. Rüzgar Türbin Yerleşim Planı [28]

2.15 Rüzgar Türbinlerinde Tünel Etkisi (Tunnel Effect)

Yüksek binalar veya dar geçitli dağların arasında tünel etkisi hissedilmektedir. Rüzgarlı hava, dağlar veya binalar arasında sıkışır böylece rüzgarın hızı engeller arasında hissedilir derecede artış gösterir. Rüzgar hızı açık alanda 5m/s hızla esiyorsa, dağ arasındaki bölgede 8 m/s hıza sahip olarak esebilmektedir. Rüzgar türbini şekil 26'da görüldüğü üzere iki dağ

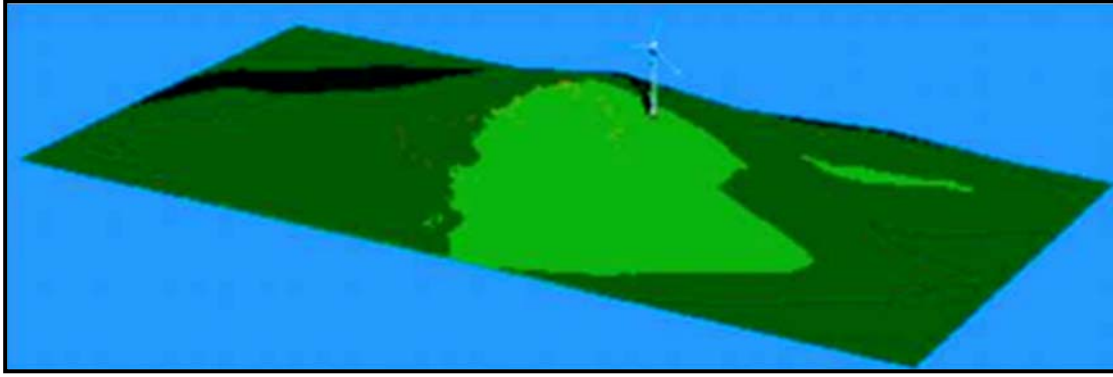
arasına yerleştirilirse normal hızından daha fazla rüzgar gücüne tabi kalarak esebilmektedir. Böylece çevrede bulunan araziden daha yüksek bir rüzgar hızı elde edilebilir. Fakat iyi bir tünel etkisi elde etmek için rüzgar türbini yerleştirildiği tepeler engebeli ve pürüzlü alanlar olmamalıdır. Eğer tepeler engebeli ve pürüzlü olursa türbülanslar meydana gelebilir. Rüzgar farklı yönlerde eser ve böylece rüzgar türbinleri verimli çalışmaz [29].



Şekil 26. Tünel Etkisi [29]

2.16 Rüzgar Türbinlerinde Tepe Etkisi

Rüzgar türbinleri yerleşimlerinde türbinler tepe üstlerine yerleştirilebilmektedir. Tepelerde daha çok rüzgar olduğundan bu avantaj kullanılır. Fakat rüzgar türbinin rotorundan geçerken düzensiz halde olduğundan tepe (dik) alanlarda veya engebeli yerlerde rüzgar türbülans etkisini göz önünde bulundurmak gereklidir [29].

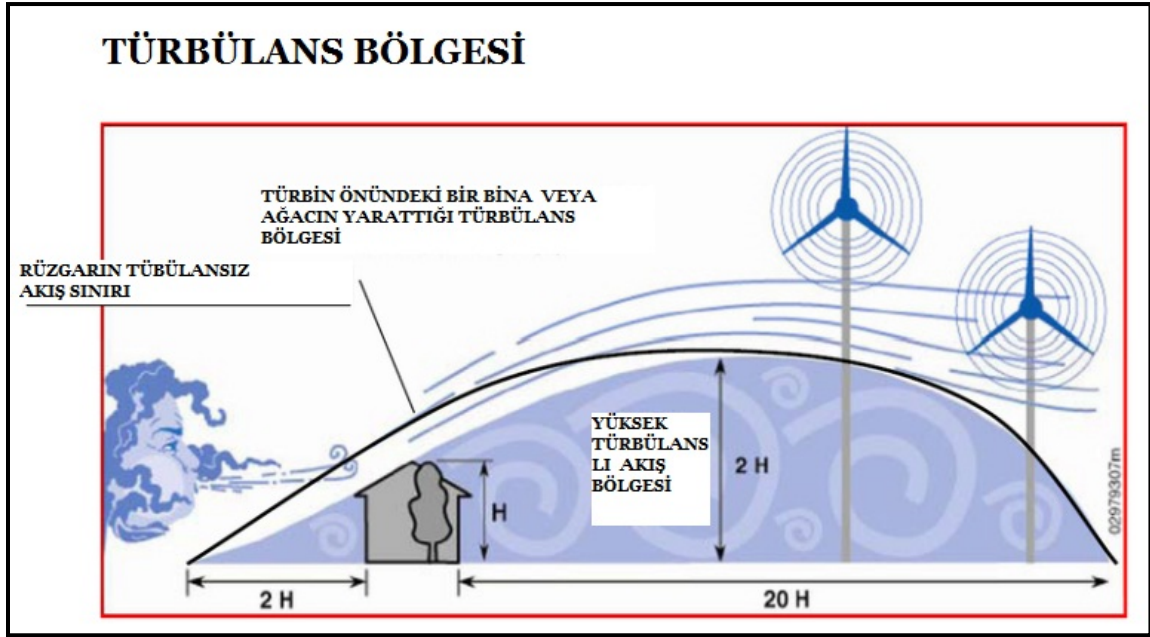


Şekil 27. Tepe Etkisi [29]

2.17 Rüzgâr Türbini Arkasında Oluşan Türbülans

Yerleşim alanlarında rüzgâr düşük şiddetli, değişik yönlerden ve türbülanslı esmektedir. Rüzgâr türbininin kanatlarına çarpan hava, enerjisinin bir kısmını bırakarak yönünü ve hızını da değiştirerek düzensiz bir şekilde akmaya başlar. Türbülanslı hava hareketlerinden oluşan bu iz, rüzgâr altında bulunan diğer türbinlerin çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle rüzgâr tarlalarının yerleşimi yapılırken türbinlerin rüzgârı karşılayacak şekilde ve birbirlerinden olabildiğince uzakta olmasına dikkat edilmelidir. Diğer yandan ise arazinin etkin kullanılması ve şebekeye bağlantı masraflarının en aza indirilmesi için türbinler birbirine olabildiğince yakın inşa edilmelidir [30].

Şekil 28’de türbülanslı bölge gösterilmektedir. Çevredeki faktörlerin yarattığı türbülans ve ne kadar mesafe etkide bulunduğu görülmektedir.



Şekil 28. Türbülans Etkisi [31]

Topografik farklılıklar nedeniyle tepeler ve dağların rüzgâr almayan yamaçları türbülans etkisinde kalır. Coğrafi yükseltilerin rüzgar almayan kesimlerinde oluşan türbülans etkisi şekil 29 ‘da gösterilmektedir.



Şekil 29. Rüzgar Almayan Bölgelerdeki Türbülans Etkisi [30]

2.18 Rüzgar Enerji Santrali Proje Aşamasındaki Maliyetler

Rüzgar türbin kurulum maliyetleri sırasıyla fizibilite çalışması, (saha incelenmesi, rüzgar kaynağının değerlendirilmesi, çevresel değerlendirme maliyet tahmini, rapor hazırlığı, seyahat konaklama masrafları), proje geliştirme (enerji satış anlaşması, izinler ve onaylar, arazi hakkı ve incelenmesi, finansman), Mühendislik (mikro konumlandırma, mekanik proje, elektriksel proje, inşaat projesi, ihale ve sözleşme), yenilenebilir enerji araçları (rüzgar

türbinleri, yedek parçalar), enerji üretim santrallerinde tüm proseslerin incelenmesi (rüzgar türbin temelleri, rüzgar türbin montajı, yol inşaatı, enerji nakil hattı ve malzemeleri, nakliye montaj maliyetleri), gerekli çeşitli masraflar (personel eğitimi, işletmeye alma aşamasındaki masraflar), işletme (yedek parça, işletme ve bakım, sistem kullanım bedeli, varsa arazi kirası, vergiler, iletim hattı bakımı, genel ve yönetsel giderler). Rüzgar enerjisi santral projelerinin ekonomisi rüzgar türbin fiyatları ve enerji üretimine bağlıdır. Maliyeti etkileyen faktörler teknik ve ekonomik olarak ikiye ayrılmaktadır. Bir rüzgar çiftliği oluşturup kurulum yapmak her zaman için tek bir türbin kurulum maliyetine göre daha avantajlı ve ucuzdur [29]. Rüzgar enerji santral yapımı için gereken maliyet kalemleri aşağıdaki gibidir.

- Proje geliştirme masrafları,
- Rüzgar türbin maliyeti,
- Rüzgar enerji santrali inşaat masrafları,
- Diğer elektrik teçhizatlar,
- Proje yönetim masrafları,
- Montaj masrafları,
- Diğer masraflar [8].

2.19 Rüzgar Enerji Çiftliğini Etkileyen Çevresel Faktörler

Rüzgar çiftliği ve türbin alanlarında enerji üretimini etkileyen faktörler bulunmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan rüzgar enerjisi diğer enerjiler gibi çevreye zarar vermemekte ve rüzgar enerjisinde herhangi bir emisyon atmosfere verilmemektedir. İklim değişiklikleri, enerjide dış ülkelere bağımlılık, küresel etkiler gibi çevresel problemler sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmaktadır. Fosil yakıt tüketimi olmadığından rüzgar gücünden enerji elde edilmesi atmosferde kirliliğe sebep olmamakta ve tehlike arz etmemektedir. Rüzgar çiftliği kurulumu yapanların, her proje için bir Çevresel Etki Değerlendirmesi yapması gerekir. Rüzgâr santrallerinin çevresel etkileri; arazi kullanımı, gürültü, görsel ve estetik etkiler, doğal hayat ve habitata etki, elektromanyetik alan etkisi, gölge ve titreşimler olarak sıralanabilir. Rüzgar türbinlerinin kesikli bir enerji kaynağı olması da dezavantaj olarak söylenebilir. Rüzgar çiftliklerinin, göç güzergahları gibi kuş ya da yaras

gruplarını çeken bölgelere kurulmamasına büyük özen gösterilmelidir. Aksi takdirde rüzgar türbinlerinin işletimi kuşlara zarar verebilmektedir [32].

Rüzgar türbin enerjisinden elde edilecek elektrik üretimi için büyük arazilere ihtiyaç vardır. Rüzgar enerjisinin herhangi bir engel olmayan düzgün arazide üretim yapması ile üretilen enerji birim elektrik başına gereken alandan çok geniş alanlar gerektirmektedir. Rüzgar gücünün fazla olduğu bu yerler genellikle doğada kurulum yapılamayacak arkeolojik alanlar, park alanları, özel mülk alanları ile çakışabilmektedir [8].



3. METASEZGİSEL ALGORİTMALAR

Optimizasyon, verilen bir amaç için belirli işlemler uygularken en iyi çözümü elde etme sürecine denmektedir. Optimizasyon yönteminde her zaman en iyiye ulaşma söz konusudur. Verilen bütün çözümler arasında en doğru ve iyi olanın seçilmesidir. Optimizasyon içinde değişik yapılara sahip olduğundan ve matematiksel özellikler taşıdığından, süreklilik, nonlinearlik, dış bükeylik gibi farklı niteliklere sahip problemlerin cevaplanmasında çeşitli algoritmalar üretilmesini gerektirmiştir. Artık günümüzde tüm farklı problem yapıları çözümlenmesi için değişik algoritmalar geliştirilmektedir [33].

Metasezgisel algoritmaların uygulanması, en iyi ya da en iyiye ulaşılmış yakın çözümleri bulmak için arama uzayını hızlı bir şekilde araştırmaktır. Metasezgisel algoritmalar, basit olan arama algoritmalarından karmaşık öğrenme süreçlerine kadar geniş bir alanı içermektedirler. Metasezgisel algoritmalar; Genetik Algoritma, Tavlama Benzetimi, Karınca Kolonisi algoritması, Tabu Arama tekniğidir. Metasezgisel algoritmalar kendi içlerinde de sınıflandırılmaktadır; kullanılan amaç fonksiyonuna ve komşuluk yapısına, benzer buldukları kaynaklara, aramada kullandıkları çözüm sayısına ve hafıza kullanımına göre sınıflandırılırlar [34].

3.1 Tavlama Benzetimi Algoritması

Tavlama benzetimi algoritması Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından 1983 yılında geliştirilmiş olup birçok metasezgisel teknik gibi çözüm uzayında değişken olarak aramada bulunan bir yöntemdir [35]. Benzetilmiş tavlama algoritması, farklı değişkenlere sahip fonksiyonların en küçük ve en büyük değerlerinin bulunmasında ve aynı zamanda küçük değerlere sahip doğrusal olmayan fonksiyonlarında en küçük değerlerinin hesaplanması için tasarlanmıştır.

Tavlamanın anlamını açıklamak gerekirse malzemenin içyapısını kullanılabilir duruma getirmek için gereken ısı işlemlerin tamamının yapılmasıdır.

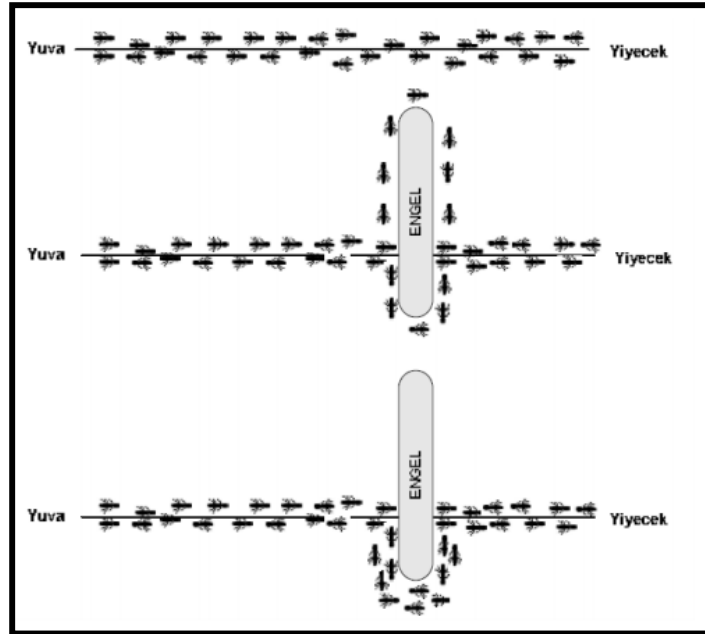
Benzetilmiş tavlama algoritması; yol bulma problemlerinde çözüme ulaşmak adına, elektronik devrelerin tasarımında, kesme ve paketleme yapılan problemlerde, görüntü işlemede, akış çizelgeleme ve iş çizelgeleme problemlerinde ve seyahat problemlerinde iyi sonuçlara ulaştırmaktadır [36].

3.2 Karınca Kolonisi Algoritması

Karınca koloni algoritması karıncaların koloni olarak hareket ettikleri ve bu sırada gerçekleştirdikleri davranışları konu alan sürü zekası tekniği olarak bilinir. Karınca algoritmaları Marco Dorigo ve meslektaşları sayesinde kuadratik tarama ve gezgin satıcı problemi gibi yapılması oldukça zor optimizasyona ait problemlerin çözümünde kullanılmak üzere metasezgisel bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu algoritma tekniği kısaca ele alınacak olursa karıncaların koloni halinde hareket etme özellikleri ile göstermiş oldukları davranış biçimlerini konu olarak almış sürü zekası tekniğidir.

Bu algoritma tekniği Karıncaların sürü halinde hareket ederek besinlerini arama davranışlarından yola çıkarak bulunmuştur. Karıncalar besin kaynaklarından yuvalarına ulaşmak için her zaman en kısa yolu bulma niteliğine sahiptirler. Başka sebeplerden dolayı karıncaların yuvalarına ulaşacakları yol uzarsa bile her zaman en kısa yola yönelebilmektedirler.

Şekil 30'da görüldüğü gibi karıncalar, başlangıçta düz bir yolu takip etmekte ve aynı zamanda feromen olarak bilinen bir maddeyi yol güzergahına bırakarak kendilerinden sonra gelen karıncaların yollarını bulmalarını kolaylaştırmaktadırlar [37].



Şekil 30. Karıncaların En Kısa Yolu Bulması [37]

Karınca kolonisi algoritma çalışma süreci karıncalar tarafından güncellenen feromen izleriyle en iyi çözüm yolu bulunması için bilgi oluşturmakta her iterasyonda bu bilgiler güncellenmektedir. Karınca kolonisi algoritmasına ait döngü řu şekildedir;

- Başlangıç olarak karıncaların yarattığı feromen değerleri belirlenir.
- Karıncaların oluşturulan her düğüme rastgele bir şekilde yerleşimleri yapılır.
- Her karıncanın kullandığı yolun toplam uzunlukları hesaplanır.
- En iyi çözüm yapılır.
- Yeterlilik durumu sağlanana kadar ve maksimum iterasyon sayısı elde edilene kadar devam eder [37].

3.3 Tabu Arama Algoritması

Tabu arama algoritması insan hafızasının çalışma şeklinden yararlanılarak F. Glover tarafından sunulmuş bir tekniktir. Tabu araştırması yapılan çözümler arasında komşuluk oluşturmak ile bu çözümler ile ilgili bilgileri saklamaya yönelik hafızaya sahiptir. Bu saklanan bilgiler tabu listesi olarak adlandırılır, yeni çözüm kümelerinin oluşmasında kullanılır. Kötü sonuç veren bölgelerdeki elemanlarla daha fazla işlem yapılmaması, çözüme daha az hesaplamayla gidilmesini sağlar. İyi sonuç verenlerin ise daha sonraki iterasyonda komşu sayıları artmaktadır. Bunun sonucunda algoritma verimliliği artmış olur. Geriye dönüşler önlenmek için hareketler tabu listesine kaydedilerek yapılması yasaklanır.

Tabu arama algoritması işleyiş şekli; başlangıç çözümünün bulunması, hareket mekanizması, komşuluk, hafıza, tabu listesi, tabu yıkma kriterleri, durdurma koşulu şeklinde ilerlemektedir [38].

3.4 Genetik Algoritma

Genetik algoritma Charles Darwin tarafından geliştirilmiş bir evrim teorisine dayanır. Bu algoritma sayısal olarak çözümlemeye giden bir optimizasyon tekniği olmaktadır. Genetik algoritmalar çözümlenmesi zor ve hatta imkansız olarak düşünülen problemlerin çözüm yollarında tercih edilerek kullanılmaktadır. Bu algoritmalar mühendislik alanında oldukça kullanılarak diğer metasezgisel yöntemlere oranla iyi sonuçlar vermektedirler.

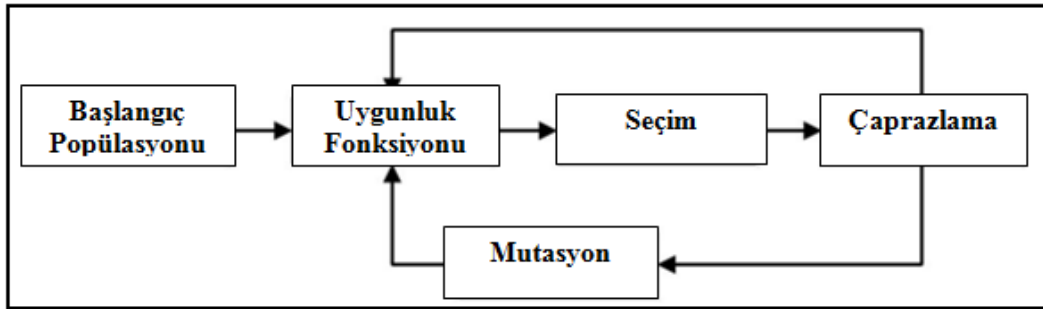
Genetik algoritmalar optimizasyon uygulamalarında, deneysel olarak yapılan çalışmalarda kullanılmaktadırlar. Bu algoritmalar, bazı doğal olayları modelleyen değişken

algoritmalar olup biyolojik evrimin ilerleme yöntemini kullandıklarından genetik algoritma olarak isimlendirilmişlerdir.

Genetik algoritmaların hareket ettikleri teoriye göre hayatta güçlü olan kalır. Böylece zayıf yapıya sahip canlılar yeni canlı üretme açısından güçsüz durumda kalacaklardır, yani ya yeni canlı üretemeyecek boyutta az bir ömre sahip olacak ya da yeni canlılar üretemeyecek kadar zayıf durumunda olacaklardır. Fakat diğer yandan bakılırsa güçlü yapıdaki canlılar uzun süre hayatta olacak ve daha çok üreyeceklerdir. Bu algoritmada amaç güçlü canlı sayısını arttırmak ve böylece giderek daha da güçlü canlı üretmektir. Bu üreme olayı arasında güçlü canlılardan güçsüz yapıda canlı oluşursa bu mutasyon olarak adlandırılmaktadır.

Genetik algoritmalarda problemlere ait değişken yapıları kromozomlarla ifade edilir. Kromozomlar seçilerek popülasyon oluşturulmaya çalışılır, bu seçilen kromozomlar çözüm değerlerini ifade etmektedir. Bu oluşan çözümlerin tamamına ise popülasyon denilmektedir.

Kromozomlar arasında yapılan değişimler genetik operatörler sayesinde gerçekleşir. Bu genetik operatörler çaprazlama, seçme, mutasyon vb. operatörlerdir. Operatörlerden geçen kromozomlar amaç fonksiyonunun alacağı değere göre rastgele seçilir. Bu genetik algoritma tekniğinde her bir iterasyonda daha iyi ve en iyi çözüm değerleri elde edilmeye çalışılmaktadır [35].



Şekil 31. Genetik Algoritma Yapısı [35]

Genetik algoritma içerisinde yer alan tanımlar aşağıda açıklanmaktadır.

Gen: Canlıların ömür boyu değişmeyen karakterlerinin oluşmasını sağlar ve bu karakterlerin canlıdan canlıya aktarımlarının sağlanmasında büyük rol oynamaktadırlar.

Kromozom: Genlerin bir araya gelmesiyle kromozomlar oluşur. Canlılar 0da kalıtsal bilgiyi taşıyan yapıya kromozom denmektedir.

Genotip: Oluşan bir canlıya onu oluşturan iki ebeveyninden aktarılan bütün özelliklere genotip denmektedir. Genotipler genlerin birleşmesiyle oluşurlar. Bir kromozomda yer alan genetik yapı olarak adlandırılır.

Fenotip: Canlıların dış yapısını oluşturan özelliklerdir. Genotip de yer alan genlerin birleşmesiyle açığa çıkan dış özelliklerdir.

Alel: Oluşan bir karakterin ortaya çıkarılmasında fazlaca rol oynamaktadır. Göz renginin ya da saç renginin aynı canlıdan gelmesine rağmen farklı olmasının nedeni aleldir.

Ebeveyn Seçimi: Kendi aralarında ne kadar uygunluk oranı fazla ise bireyin seçilme olasılığı o kadar artmaktadır.

Şema: Kromozomlarda bulunan genlerin gösteriliş biçimine şema denilmektedir. Örneğin “011011” ve “101010” gibi iki gen dizisinin şema ile gösterimi “**101*” şeklinde çıkmaktadır.

Çaprazlama: İki ebeveynin her bir kromozomlarının rastgele biçimde birbirine geçişi sağlanması olayıdır. Buradaki amaç ise ebeveynlerden ortaya çıkan farklı yapıdaki genleri oluşan bireylere aktarmaktır. Çaprazlama ile yapılan her değer oluşan çözümün farklı bir sonuç çıkarmasına sebep olmaktadır.

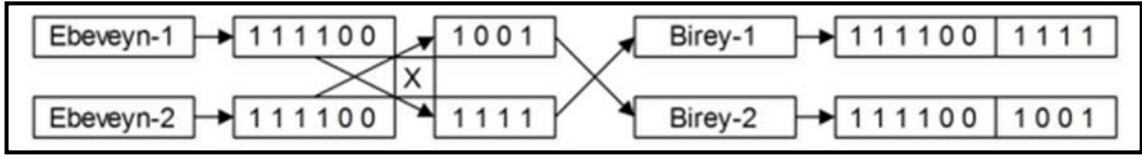
Mutasyon: Ebeveynlerden oluşan bireylere gen iletimi gerçekleşirken bogen aktarımının bozulması durumuna denmektedir.

Uygunluk Fonksiyonu: Genetik algoritma popülasyon da bulunan kromozomlardan rastgele biçimde çözüm değeri seçer ve bu değeri hesaplar. Bu uygunluk fonksiyonu ile en iyi olan çözüm değeri seçilmektedir.

Popülasyon Büyüklüğü: Genetik algoritmalarda popülasyon büyüklüğü önemlidir. Bunun sebebi popülasyonun olması gerektiğinden küçük olması ya da büyük olması algoritmanın oluşturacağı performansını etkilemektedir. Sonuçta popülasyon değerinin büyük çıkması çözüm süresini uzatmakta, düşük çıkması ise araştırmanın yeterli genişlikte olmamasına sebep olmaktadır [35].

3.4.1 Genetik Algoritmalarda Tek Noktalı Çaprazlama

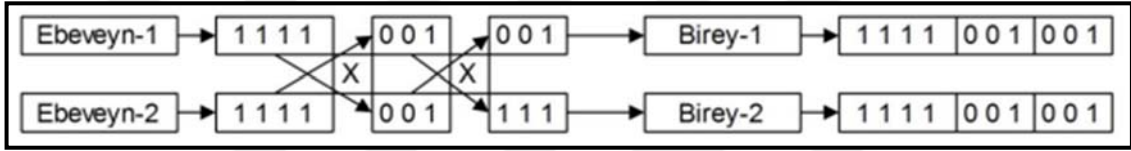
Tek noktalı çaprazlamada iki ebeveyn arasında rastgele tek bir noktadan seçilerek kromozom çaprazlaması gerçekleştirilir. Seçilen çaprazlama sonucunda birey kromozomlarını ebeveynlerinden almaktadır. Geriye kalan kromozomlarda diğer bireye ait olacaktır. Şekil 32’de görüldüğü gibi bu tip çaprazlamaya tek noktalı çaprazlama adını almaktadır [35].



Şekil 32. Tek Noktalı Çaprazlama [35]

3.4.2 Genetik Algoritmelerde Çift Noktalı Çaprazlama

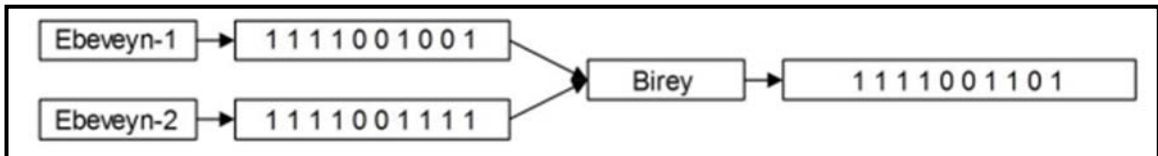
Çift noktalı çaprazlamada iki ebeveyn arasında rastgele iki nokta seçilmektedir. Seçilen iki nokta arasında kalan kromozomlar çaprazlanarak ortaya iki yeni birey çıkarılmaktadır. Şekil 33’de çift noktalı çaprazlama gösterilmektedir [35].



Şekil 33. Çift Noktalı Çaprazlama [35]

3.4.3 Genetik Algoritmelerde Tek Biçimli Çaprazlama

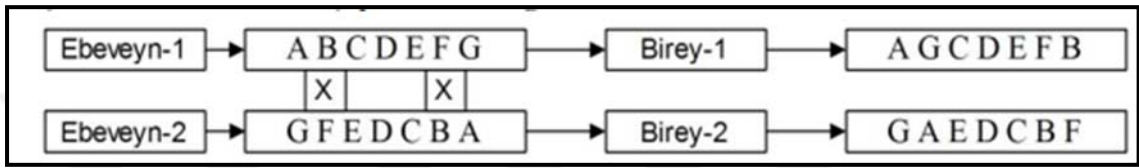
Bu çaprazlama tekniğinde iki ebeveynin kromozomları birleşimden oluşturulacak yeni bireye aktarılmaktadır. Tek biçimli çaprazlama tekniğinde çaprazlama rastgele bir olasılığa göre gerçekleştirilemez. Bu çaprazlamada ortaya tek bir birey çıkmaktadır. Şekil 34’de tek biçimli çaprazlama tekniği yer almaktadır.



Şekil 34. Tek Biçimli Çaprazlama [35]

3.4.4 Genetik Algoritmelerde Sıralı Kromozom Çaprazlama

Sıralı kromozom çaprazlaması belirli bir sıraya göre gerçekleştirilmektedir. Bu çaprazlama yapılacak işin önceliklerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Her iş bir harf ile temsil edilir. Yapılacak işin 7 adımda tamamlanacak olduğunu varsayarsak “A B C D E F G” bu işin sıralı kodlaması olabilir. Bu kodlamada A işin başlangıç kromozomunu, G ise işin bitiş kromozomunu temsil etmektedir. Bu çaprazlama yöntemi oluşturulacak bireylerin sıra ve sayılarının önem taşıdığı zamanlarda tercih edilebilir [35].



Şekil 35. Sıralı Kromozom Çaprazlama [35]

4. RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİNLERİNİN MİKRO KONUMLANDIRMA OPTİMİZASYONU UYGULAMASI

Teknolojide artan gelişmelere rağmen rüzgar türbinlerinin yerleşiminde optimizasyon çalışmasına ait sınırlı sayıda literatür bulunmaktadır. Bunun sebebi çok yönlü problem yapısına sahip olmasıdır. Araştırmalar sırasında literatürde genetik algoritma tekniği kullanılarak yapılmış rüzgar türbin yerleşim planı ile ilgili bazı makaleler yer almaktadır.

Bir rüzgar çiftliğinde rüzgar türbin topluluklarında türbin aralarındaki mesafeler rüzgar hızı, rüzgar yönü ve türbin boyutlarına bağlıdır. Patel'e göre rüzgar türbinleri arasındaki optimum boşluk rüzgar yönünde 8-12 rotor çapları arasında bulunur. Rüzgar türbinleri yerleşiminde arka arkaya iki türbin arkasında çapraz mesafe Rüzgarın estiği yöne dik 1,5-3 rotor çapında alınır. Ammara ve diğerleri arazide yapılan yerleşimde türbinler arası boşlukları düzensiz kullananların yoğun üretim elde etmeleri için yerleşim planı önermiştir. Böylece seyrek yerleşim yapılan duruma benzer fakat daha az arazi alanı kullanıyor olacaklardır. Bu yaklaşım ile bir miktar rüzgar türbini için gerekli olan arazi alanında azalma sağlanmıştır.

Mosetti ve diğerleri optimizasyonda genetik algoritmaya dayalı konumlandırma planı önermiştir. Yapılan bu araştırma ile rüzgar türbin çiftliği optimizasyonu performans değerlendirmesi için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Burada yatırım maliyeti ve elde edilen toplam güç optimize edilmiş değişkenlerdir. Seçilen rüzgar türbin yerleşim ve maliyet modelleri optimizasyon algoritmasının tekniğini göstermenin amacıdır. Optimal olarak yerleştirilmiş rüzgar türbinlerinin güç hesapları, rastgele yerleşim yapılan türbinler ile karşılaştırılırken sunulan en uygun durum en basit olarak yapılmış yerleşim planlarını bile sağlamamaktadır. Bu çalışma optimizasyonda genetik algoritma tekniği ile optimum durumların belirlenmesini amaçlamaktadır [39].

Matematiksel model kullanılarak rüzgar çiftliğinde türbinlerin yerleşim planı sorunu optimize edilir. Fakat yine de istenmeyen rüzgar türbin çiftlik yerleşim sorunları gibi benzer sorunlara ait problemler bulunmaktadır. Rüzgar çiftliklerinde yapılacak olan yerleşim için rüzgar türbin yerleşim optimizasyonuna ait ilk katkı Mosetti, Poloni ve Diviacco tarafından yapılmıştır. Mosetti'nin makalesinde genetik algoritma kullanılmıştır. Jensen rüzgar alanı içinde hız hesabını basitleştirmek adına momentumun wake etkisi içinde korunduğunu varsaymıştır.

On yıl sonra 2004 yılı içinde, Öztürk ve Norman rüzgar türbin çiftlik yerleşiminde optimizasyon yöntemini uygulamaya yönelik ikinci makaleyi yayınlamıştır. Jensen'in wake modelini kullanarak ve Mosetti'nin rüzgar türbin çiftliği maliyet modelini kullanarak rüzgar türbinlerinin maksimum maliyet elde edilinceye kadar yönlerinin değiştirilmesi veya türbin eklenmesi gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemden türbinlerin yerlerini ayarlamak için yararlanılır, fakat maksimum yerleşim planı ve maliyet için arama yöntemlerine devam edilmelidir.

Son olarak 2005 yılında Grady, Hussaini ve Abdullah aynı modelleri kullanarak makale yayınlamışlardır. Mosetti'nin yazdığını revize ederek rüzgar türbin çiftliği yerleşimini iyileştirmek için bazı algoritma değişiklikleri yapmışlardır.

Bu üç makalede birbiri ile ilişki içerisindedir. Çünkü tüm makaleler wake etkisini ve maliyet modelini, benzer amaç fonksiyonlarını kullanarak analiz etmektedirler. Sadece uyguladıkları optimizasyon teknikleri farklıdır [40].

Birden çok rüzgar türbininin bulunduğu rüzgar enerjisi üretim tesislerinde, türbinlerin birbirlerine göre yerleşimi önemlidir. Bir rüzgar türbininden geçen rüzgarın enerjisinin bir kısmı türbin tarafından emilir. Bu nedenle bir türbinin arkasına başka bir türbin gelmesi halinde, azalan rüzgar enerjisi nedeniyle arkadaki türbinin enerji üretimi de azalır. Türbinler arası mesafe arttıkça etkisi azalan bu durum, wake etkisi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde, mikro konumlandırma olarak adlandırılan, rüzgar türbinlerinin yerleşim planının oluşturulması için genetik algoritma ile bir çözüm önerisi ve uygulaması anlatılmıştır.

4.1 Rüzgar Enerjisinin Gücü

Rüzgar türbinleri, rüzgar akış hızından meydana gelen kinetik enerjiyi kullanmaktadırlar. Rüzgar türbin kanatları, rüzgarın kinetik enerjisinin bir kısmını alarak pervanelerin arkasında rüzgar hızının azalmasına neden olurlar [8]. Rüzgar enerjisinin potansiyeli, rüzgar hızı ve esme süresi ile ilgilidir. Rüzgar gücü hesaplama işlemi aşağıdaki formül ile gerçekleştirilmektedir [41].

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot C_p \cdot v^3 \quad (1)$$

Formülde yer alan ifadelerin açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

P = Güç (Watt)

ρ = Hava Yoğunluğu (kg/ m^3)

V = Rüzgar Hızı (m/s)

C_p = Rüzgar Türbini Güç Faktörü (Betz Limiti)

A = Rotor Alanı (m^2)

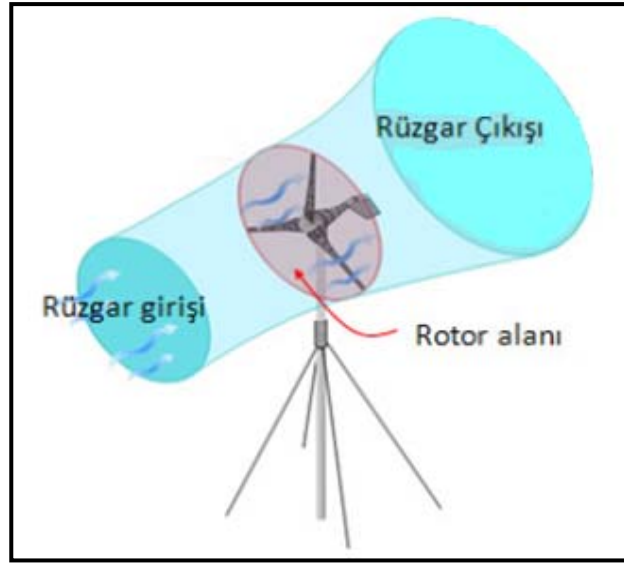
C_p , rüzgar türbini güç faktörünü ifade eder ve türbinlere göre değişen bir sabittir. Rüzgar türbin veriminin yüzdelik ifadesidir. Maksimum değeri yaklaşık % 59,3 olarak alınır. Bu değer Betz Limiti olarak adlandırılır. P hava yoğunlunu ifade eder, sıcaklık ve yüksekliğe göre değişir. Uluslararası standart atmosfer koşullarında havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/ m}^3$ 'tür. (Deniz seviyesinde, $+15^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve $1013,25 \text{ mb}$ atmosfer basıncında). A , Rotorun kapladığı alanı (m^2) rotor yarıçapı (r) ile hesaplanır. Aşağıda rüzgar türbininin rotor alanı hesabı verilmektedir [41].

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2)$$

4.2 Rüzgar Türbinlerinde Betz Limiti

Rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin, türbin ve koşullar ideal düzeyde olsa bile bir üst limit vardır. 1926 yılında Betz tarafından çıkarılan bu limite Betz limiti denilmektedir. Betz bu teoremin hesaplamasını gerçekleştirirken enerjinin korunumu yasalarını kullanmıştır.

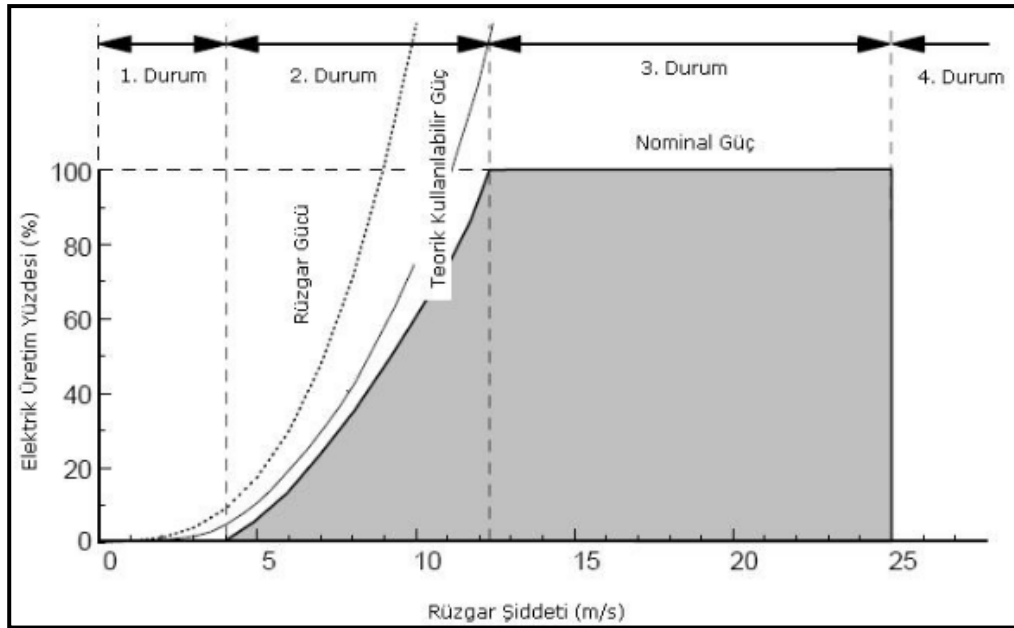
Betz'in teoremine bakıldığında sonsuz sayıda türbin kanadı olduğu, diskin çevresinde türbülans etkisi olmadığı, hesaplamalar sağlanırken oluşan akışın dağılmaz ve homojen yapıda olduğu kabul edilmiştir. Betz bu ideal disk teorisinden hareketle diskten geçen havanın akış hızı her noktada eşit olmasına rağmen basınç aniden düşmektedir [12].



Şekil 36. Betz Limiti [12]

4.3 Rüzgar Türbinlerinde Güç Eğrisi

Rüzgar türbinlerinin farklı rüzgar hızlarında elektriksel güç çıkışının nasıl değişeceği güç eğrileri ile gösterilmektedir. Bir rüzgar türbini tarafından üretilen maksimum elektrik enerjisi gücüne anma gücü, türbinin rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye başladığı rüzgar hızına ise anma rüzgar hızı denilmektedir. Rüzgar türbinlerinde örnek bir güç eğrisi grafiği şekil 37’de verilmektedir.



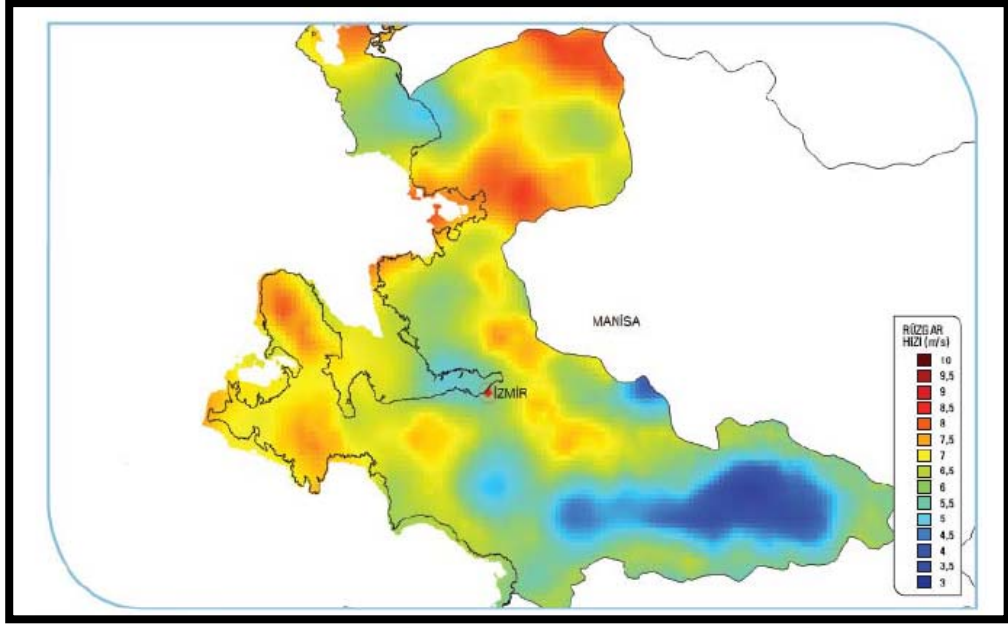
Şekil 37. Rüzgar Türbini Güç Eğrisi [29]

Şekil 37’de 1.durumda rüzgar hızı 0 m/s ile 4 m/s arasındadır, burada elektrik enerji üretimi %10 gözükmemektedir. 2. Durumda rüzgar hızı 4 m/s ile 12 m/s arasında ve elektrik enerji üretimi %100 seviyesine ulaşmaktadır. 3. Durumda ise rüzgar şiddeti hızını korumakta ve elektrik enerji üretimi sabit durumdadır. Bu durumda nominal güç sağlanmış olur. 4. durumda rüzgar hızı daha fazla artmamakta ve elektrik enerji üretimi yoktur.

Rüzgar türbinlerinin modellerine göre devreye girebileceği hıza cut-in, belli miktarda rüzgar hızından sonra ise güvenlik sebebi ile devreden çıktıkları hıza da cut-out denir. Giriş hızının üzerinde meydana gelen hızlarda türbin modellerine göre değişik oranda elektrik enerjisi üretimi sağlanmaktadır. Türbin modeline göre rüzgar hızlarının etkisi ve enerji üretimi değişiklik gösterir. Güç eğrisi hesaplamaları türbin pervanesinin 2,5–3 katı kadar uzakta bir mesafeye konulan anemometre direği ölçümleri ile belirlenir [8].

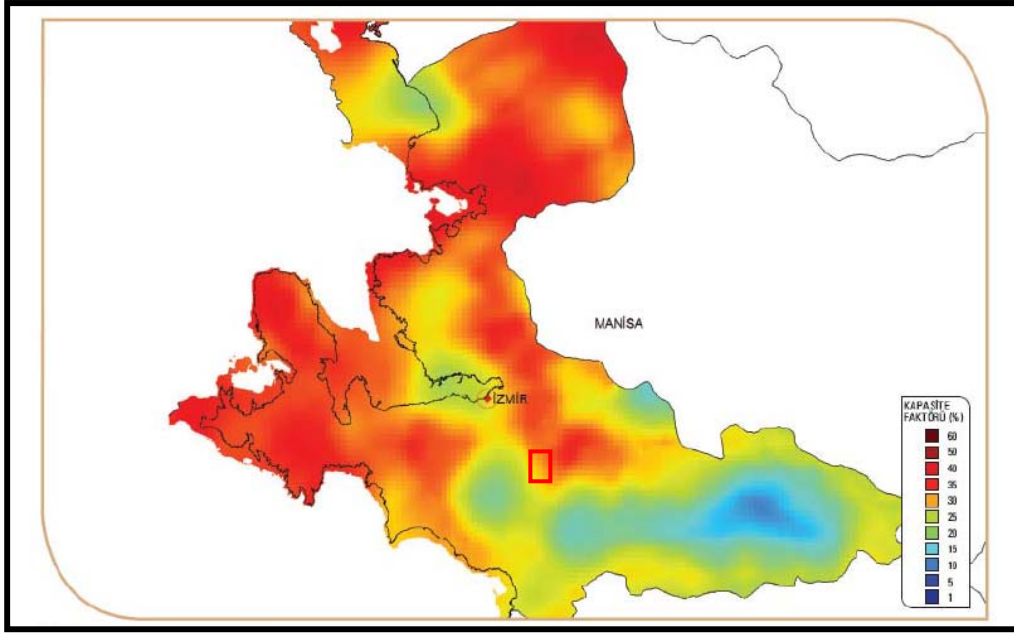
4.4 Rüzgar Türbini Çiftliği Kurulacak Bölgenin Seçimi

Dünyada bakıldığında Türkiye jeolojik konumu itibari ile rüzgar ve güneş enerjilerinden fayda sağlayabilecek bir konuma sahiptir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nden alınan genel verilere göre, özellikle Marmara ve Ege bölgesi yüksek rüzgar potansiyeline sahip bölgelerdir. Bu bölgelerde rüzgar enerjisi kurulumu yoğunluk kazanmıştır. Bu çalışmada örnek uygulaması yapılan Rüzgar Enerjisi tarlası için, İzmir Adnan Menderes Havalimanına yakın bir bölge seçilmiştir. Bölgedeki rüzgar hızları aşağıdaki grafikte renk dağılımlarıyla gösterilmektedir.



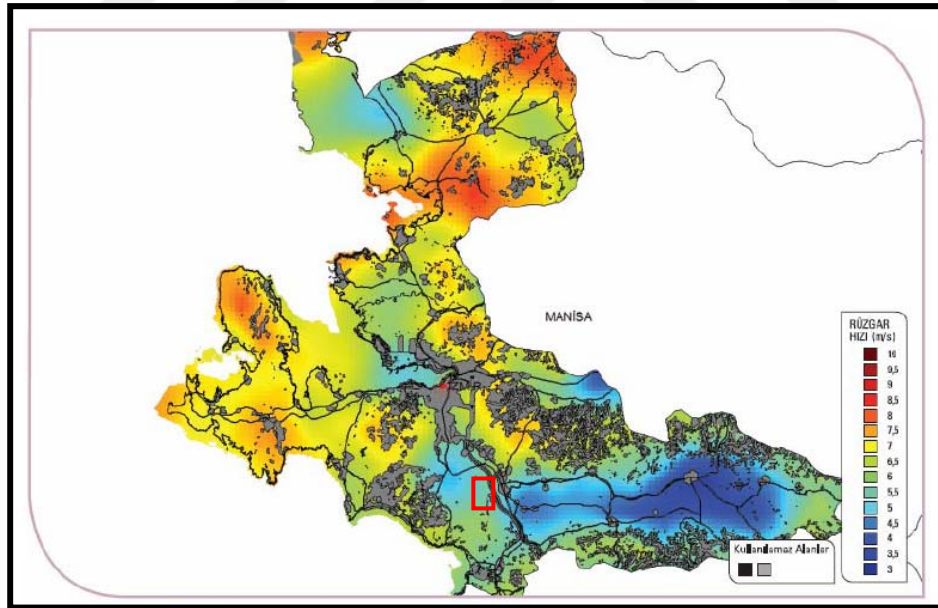
Şekil 38. Rüzgar Hız Dağılımı [42]

Rüzgar türbin kurulumlarında arazi seçiminde, rüzgar alan bir bölge olması, trafo kapasitelerinin yeterli olması ve enerji nakil hatlarının santrale yakın olması önemli faktörlerdir. Rüzgarlı bir bölge olması üretilen enerjinin verimliliği için gereklidir. Arazinin kurulacağı bölgede trafo kapasiteleri dolu olması durumunda santral kurulumu yapılamamaktadır. Enerji nakil hatlarına yakınlık ise kullanılan kablo, direk vb. ekipmanların az maliyet ile karşılanmasını sağlamaktadır. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası'ndan alınan şekillere (Şekil 38, şekil 39, şekil 40 ve şekil 41) bakıldığında İzmir iline ait hız dağılımları, kapasite faktörü dağılımı, rüzgar enerjisi santrali kurulabilir alanlar ve Trafo merkezleri ile enerji nakil hatları görülmektedir [42].



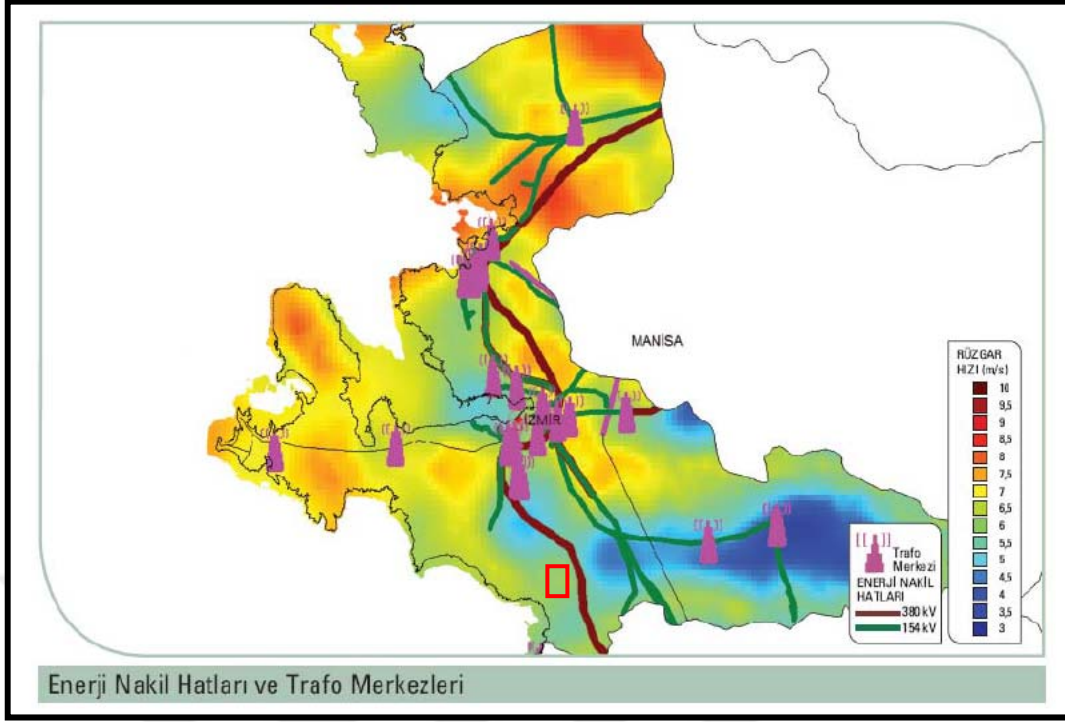
Şekil 39. İzmir İlinde Kapasite Faktör Dağılımı [42]

Rüzgar Türbin kurulmaya karar verildiğinde en önemli hususlardan biri kapasite faktörünün yeterli olup olmadığıdır. Şekil 39’da koyu kırmızı ile gösterilen alanlar kapasite faktörünün yüksek olduğu alanlardır.



Şekil 40. İzmir İlinde Rüzgar Enerjisi Santrali Kurulabilir Alanlar [42]

Şekil 40’da rüzgar türbinlerinden elde edilecek rüzgar enerji santrallerinin kurulabilmesi için uygun yerler gösterilmiştir, kurulamaz alanlar gri renklerle belirtilmektedir. Bu alanlar dikkate alınarak kurulum yapılacak arazi değerlendirilmelidir.



Şekil 41. İzmir İli Trafo Merkezleri ve Enerji Nakil Hatları [42]

Şekil 41’de Enerji nakil hatları ve Trafo merkezleri konumları gösterilmektedir. Kurulum yapılacak bölge trafo merkezlerine ve enerji nakil hatlarına yakın olarak tercih edilmelidir.

4.5 Rüzgar Türbin Çiftliği için Kullanılacak Türbin Marka Özellikleri

Kurulacak rüzgar çiftliğinde Model1, Model2, Model3, Model4 ... Model12’ye ait rüzgar türbin verileri kullanılacaktır. M-1, M-2 ve M-3 türbin modelleri 800kW ve 900kW çıkış güçlerine sahiptir. M-4, M-5, M-6, M-7, M-8, M-9 türbin modelleri 2000 kW ve 3050 kW çıkış gücü arasında bulunmaktadır. M-11 modeli ise 7580 kW çıkış gücüne sahip olmaktadır. Her koşula ve rüzgar hızına uygun çeşitli türbinler bulunmaktadır. Rüzgar türbinlerine ait yaklaşık fiyat listesi aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Her türbin fiyatı yaklaşık olarak kW başına 900.000 € olarak alınmaktadır [3].

Tablo 1. Rüzgar Türbin Model ve Fiyat Listesi

RÜZGAR TÜRBİN MODELLERİ	W	kW	Fiyat
M-1	900	0,9	810000
M-2	800	0,8	720000
M-3	800	0,8	720000
M-4	2350	2,35	2115000
M-5	2300	2,3	2070000
M-6	2000	2	1800000
M-7	2350	2,35	2115000
M-8	3050	3,05	2745000
M-9	3000	3	2700000
M-10	4200	4,2	3780000
M-11	4200	4,2	3780000
M-12	7580	7,58	6822000

Modellerin rotor çaplarına ve teknolojilerine bağlı olarak üretim kapasiteleri değişiklik göstermektedir. Tablo 1’de örnek rüzgar türbin modelleri üretim kapasiteleri ve tahmini maliyetleri görülmektedir.

Problemin birinci aşamasında doğrusal model ile tablo1’deki rüzgar türbin modellerinden biri seçilerek problemin ikinci aşamasında seçilen türbin modeli kullanılacaktır.

4.6 Rüzgar Çiftlik Yerleşiminde Kullanılacak Rüzgar Türbin Güçleri

İzmir’de Adnan Menderes Havalimanına yakın araziye en uygun rüzgar türbinleri seçilerek yerleşim yapılırken, kullanılacak model türbinlerine ait rüzgar hızına göre türbinlerden elde edilebilecek güç değerleri, Ek-13’deki tabloda yer almaktadır. Bu tablodaki değerler türbinlere ait güç eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Koyu renk ile gösterilmiş bölgeler türbinlerin üretebilecekleri en yüksek güçleri ifade etmektedir. Araziye yerleşim yapılırken türbinlerin konumlarından dolayı oluşacak wake etkisini hesaplamak ve ona göre yerleşim yapmak için bu rüzgar güçleri kullanılmıştır [3].

4.7 Rüzgar Enerjisi Çiftliğinde Optimizasyon Uygulaması

Genetik algoritma yöntemi ile yapılacak rüzgar çiftliği yerleşiminde Microsoft Excel çözücüsü olan Solver kullanılacaktır. Solver’da yerleşik çözücülerden evrimsel çözücüde dahil biri seçilerek çözüm elde edilir. Solver metasezgisel (evrimsel) çözücü modelleriyle, herhangi bir Excel formülüyle çalışır ve global çözümleri bulur. Genellikle küresel olarak en uygun çözümleri bulur [43].

Bu uygulama iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama türbin tipinin seçimi ve olası adedinin belirlenmesidir. Bu aşamada doğrusal bir model kullanılarak bütçe ve alan kısıtları altında problem değerlendirilmektedir. İkinci aşamada ise ilk aşamada seçilen rüzgar türbinlerinin eldeki araziye genetik algoritma tekniği yardımıyla mikro konumlandırması yapılmaktadır.

4.7.1 Türbin Tipinin Seçimi ve Adedinin Belirlenmesi

Bu aşamada, ikinci aşamadaki mikro konumlandırma probleminde kullanılacak rüzgar türbin modelleri belirlenmekte ve kullanılacak türbin sayısı hesaplanmaktadır. Bu problem için oluşturulan doğrusal modelin çözümü Excel Solver eklentisi yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan rüzgar türbin modelleri, bu modellere ait güçler ve güç eğri grafikleri; İzmir Adnan Menderes Bölgesine ait rüzgar hız verileri aşağıda anlatılmaktadır. Ayrıca alan kısıtında kullanılacak türbin modellerinin kapladığı alan, yıllık üretimleri ve maliyetleri sunulmuştur.

4.7.2 Rüzgar Türbinlerinde Güç Eğri Grafikleri

Her bir rüzgar türbin modeli için oluşturulmuş olan güç eğri grafiklerinden faydalanılarak, belirli rüzgar koşulları altında türbinlerin güç üretim değerleri belirlenmiştir. Kullanılacak M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, M-8, M-9, M-10, M-11, M-12 rüzgar türbinlerine ait güç eğri grafikleri Ek-1, Ek-2, Ek-3, Ek-4, Ek-5, Ek-6, Ek-7, Ek-8, Ek-9, Ek-10, Ek-11, Ek-12’de verilmektedir. Bu grafikler incelenerek Ek-13’de bulunan tablo oluşturulmuştur. Bu tabloda koyu renk ile gösterilmiş alanlar rüzgar türbinlerinin ulaştığı maksimum güç değerlerini vermektedir.

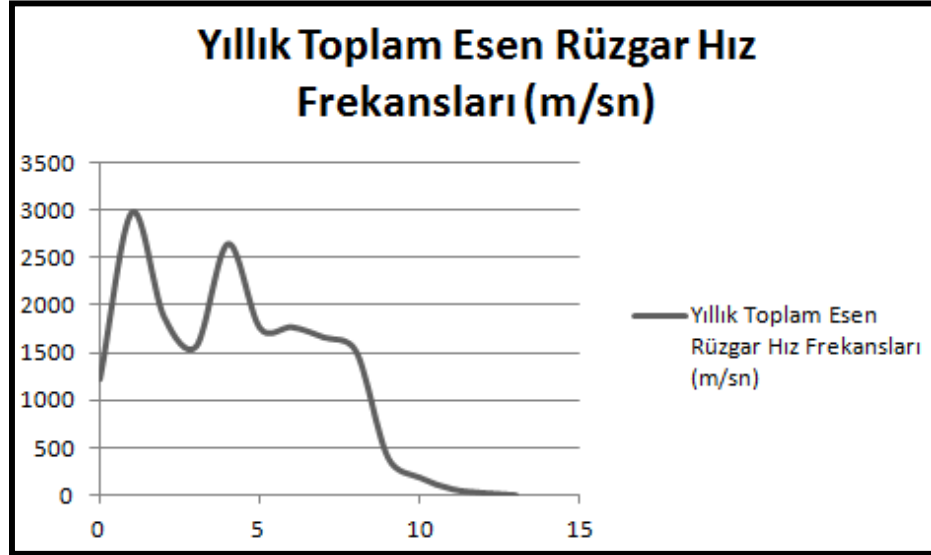
4.7.3 İzmir Adnan Menderes Bölgesi Rüzgar Hız Verileri

İzmir ilinde, Adnan Menderes bölgesinde 120m yüksekliğe ait, 2016 yılı içerisinde her yarım saatte bir alınmış rüzgar hız verileri ile çalışılmıştır [44]. Hangi rüzgar hızlarına, bir yıl boyunca, hangi sıklıkla karşılaşıldığı belirlenmiştir. Elde edilen rüzgar hız frekansları her bir türbinin güç değerleri ile çarpılarak yılda ne kadar enerji ürettiği hesaplanır.

Tablo 2. Rüzgar Hızları ve Yıllık Toplam Hız Frekansları

Rüzgar Hızları (m/sn)	Yıllık Toplam Rüzgar Hız Frekansları
0	1226
1	2983
2	1882
3	1568
4	2652
5	1762
6	1774
7	1665
8	1519
9	397
10	188
11	68
12	28
13	4

Şekil 42’de hesaplanan rüzgar hızlarına göre yıllık toplam esen rüzgar hız frekansları, grafik şeklinde verilmektedir. Şekil 42’de en son hız değeri 13m/sn olarak görülmekte, maksimum yükseklik ise 3000m gözlemlenmiştir.



Şekil 42. İzmir Adnan Menderes Bölgesi Yıllık Toplam Esen Rüzgar Hız Frekansları

4.7.4 Rüzgar Türbinlerinin Yerleşiminde Alan İşgali Hesabı

Bir rüzgar türbininin araziye yerleşimi yapıldığında kapladığı alan rotor yarıçapına (r) bağlı olarak, πr^2 formülü ile hesaplanır. Buradaki r rotorun yarıçapıdır ve rotorun kapladığı gerçek alan hesaplanmış olur. Fakat uygulanacak problemde türbin yerleşimleri sırasında wake etkisi dikkate alınacak olduğundan rotor alanları hesaplanırken 3D mesafeler ile yerleşim yapılır. Bunun sebebi rüzgar türbinlerinin arkasında oluşan wake etkisinden türbinlerin etkilenmemelerini sağlamaktır. Hesaplanacak rüzgar türbinlerinin rotor çapları 3D mesafe katsayısı ile çarpılır. Elde edilen bu değerın karesi alınır böylece rüzgar türbininde rotorun kapladığı aralıklı alan hesaplanmış olur. Rüzgar türbinlerinin rotor çapları aşağıda verilmektedir.

Rüzgar türbinlerinin rotor çapları;

M-1 = 44m, M-2 = 48m, M-3 = 52,9m, M-4 = 103m, M-5 = 71m, M-6 = 82m, M-7 = 92m, M-8 = 101m, M-9 = 115,7m, M-10 = 141m, M-11 = 127m, M-12 = 127m

4.7.5 Rüzgar Türbin Model ve Miktar Seçiminde Bütçe ve Arazi Kısıtları

Rüzgar türbinlerinin araziye yerleşimi yapılırken toplam maliyet dikkate alınmalı, ona göre rüzgar türbin adedi ve gücü kullanılmalıdır. Aynı zamanda rüzgar türbin yerleşimi için seçilmiş olan arazinin kaç m² olduğu yerleşim planı oluşturmak için önemlidir. Optimizasyon probleminde toplam bütçe (maliyet) ve arazi boyutları kısıt olarak tanımlanmıştır. Toplam bütçe 15.000.000,00 € ve kullanılan arazi İzmir ili Adnan Menderes Havalimanına yakın bir mevkide 2.000.000 m² olarak alınmıştır. Bu değerler ile araziye hangi türbin modelinden ve kaç adet yerleştirileceği çözümlenmiştir.

Aşağıda bulunan şekil 43’de Adnan Menderes Havalimanına yakın noktada seçilen arazinin görseli bulunmaktadır. Arazide bulunan ağaç, ev, yer şekillerinde bozukluk sebebiyle problemin ikinci aşamasında arazi için oluşturulan matriste kullanılmayan bölgeler olarak belirlenmiş ve koyu renk ile gösterilmektedir. Rüzgar türbinlerine yerleşim yapılırken arazinin engebeliği ve diğer koşullar sebebiyle türbinler sıra sıra yerleştirilememektedir. Seçilmiş olan arazinin enlemi: 38°16'43.09"K boylamı: 27°14'12.91"D şeklindedir. Kare içerisine alınmış bölgedeki 2.000.000 m²’lik araziye yerleşim yapılacaktır.



Şekil 43. Adnan Menderes Havalimanına Yakın Arazi Uydu Görünüşü

4.7.6 Doğrusal Model

Problemin çözümü için matematiksel model oluşturulmuştur ve kısıtlar verilmiştir. X_i , i türbin modelinden araziye kurulabilecek adet sayısını vermektedir. Her bir türbin tipi için bu eşleştirme aşağıdaki gibi olacaktır. Burada X_i tamsayı değişkendir.

$$\begin{aligned} X_1 &= M-1, X_2 = M-2, X_3 = M-3, X_4 = M-5, X_5 = M-6, X_6 = M-7, X_7 = M-8, X_8 = M-4, \\ X_9 &= M-9, X_{10} = M-10, X_{11} = M-11, X_{12} = M-12, \\ X_i &\in \mathbb{Z}^+ \end{aligned}$$

Y_i , i'ninci model türbin modelinden kullanılıp kullanılmadığını gösteren yapay değişkendir. Burada Y_i 'ler 0,1 tamsayı olarak alınır. ($Y_i \in \{0,1\}$)

Yapay Değişken Kısıtı;

$X_i - mY_i \leq 0$ (m çok büyük bir sayı olmak üzere) Buradaki X_i ve Y_i yapay değişkenlerdir.

$$\begin{aligned} X_1 - 1000 Y_1 &\leq 0, X_2 - 1000 Y_2 \leq 0, X_3 - 1000 Y_3 \leq 0, X_4 - 1000 Y_4 \leq 0, X_5 - 1000 Y_5 \leq 0, X_6 - \\ 1000 Y_6 &\leq 0, X_7 - 1000 Y_7 \leq 0, X_8 - 1000 Y_8 \leq 0, X_9 - 1000 Y_9 \leq 0, X_{10} - 1000 Y_{10} \leq 0, \\ X_{11} - 1000 Y_{11} &\leq 0, X_{12} - 1000 Y_{12} \leq 0 \end{aligned}$$

Bu eşitliğin sağlanması için m değerinin büyük bir sayı alınması gerekmektedir. Bu problemde 1000 olarak alınmıştır.

Yapay değişkenlerin toplamı;

$Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8 + Y_9 + Y_{10} + Y_{11} + Y_{12} \leq 1$ olmalıdır. Üç boyutlu rüzgar türbin yerleşimi için hesap yapılmadığından dolayı Y_i tek çeşit türbin olmalıdır.

Toplam Maliyet (Bütçe) Kısıtı;

$$\begin{aligned} 810000 * X_1 + 720000 * X_2 + 720000 * X_3 + 2070000 * X_4 + 1800000 * X_5 + 2115000 * X_6 + \\ 2745000 * X_7 + 2115000 * X_8 + 2700000 * X_9 + 3780000 * X_{10} + 3780000 * X_{11} + 6822000 * \\ X_{12} &\leq \text{Toplam Bütçe} \end{aligned}$$

Buradaki X değerleri türbin adetlerini vermektedir, diğer çarpanlar ise türbinlerin maliyetleridir. Toplam bütçeyi aşmamak adına konulmuş bir kısıttır.

Arazi Alan Kısıtı;

$$48400 * X_1 + 57600 * X_2 + 69960 * X_3 + 126025 * X_4 + 168100 * X_5 + 211600 * X_6 + 255025 * X_7 + 265225 * X_8 + 334662 * X_9 + 497025 * X_{10} + 403225 * X_{11} + 403225 * X_{12} \leq \text{Toplam Alan}$$

Arazi alan kısıtında X_i değerleri türbin adetlerini ve diğer çarpan ise rüzgar türbinlerinin her birinin kapladıkları alanları ifade etmektedir. Bu kısıt toplam alandan küçük veya eşit bir alana yerleşim yapılması için konulmuştur.

4.7.7 Excel Solver ile Doğrusal Model Çözümü

İlk aşamada doğrusal model optimizasyonu yapılarak hangi türbin modelinden ve kaç adet kullanılacağı belirlenmiştir. Türbin tipleri, bu türbinlerin güçleri, yıllık üretimleri, maliyetleri, her türbinin kapladıkları alan işgalleri, birim maliyete göre üretim, birim alana göre üretim ve hesaplanacak olan türbin adetleri ek 16'da tablo haline getirilmiştir. Bu problemde X_i türbin adetlerini ve Y_i hangi türbinden kaç adet kullanıldığını gösteren yapay değişkenlerdir. Çözüm için Excel eklentiler bölümünden Solver yüklenir. Bu çözücü açılarak matematiksel modelde oluşturulan değişkenler ve kısıtlar girilir çöz denilerek çözüm sağlanır. Sonuçta 7 adet M-4 türbininden kullanılması hem arazi hemde bütçe göz önüne alınarak uygun bulunmuştur. M-4 Model rüzgar türbininin özellikleri Tablo 3'de yer almaktadır.

Tablo 3. M-4 Model Rüzgar Türbininin Özellikleri

MODEL M-4 RÜZGAR TÜRBİN ÖZELLİKLERİ	
Rüzgar Türbin Gücü	2350 kW
Rüzgar Türbin Rotor Çapı	103
Rotor Süpürme Alanı	95481
Rüzgar Türbin Hub Yüksekliği	138m
Güç Katsayısı	0,45
Rüzgar Türbin Kanat Sayısı	3
Güven Faktörü	0,186

4.8 İkinci Aşama: Mikro Konumlandırma Problemi

Birinci aşamada problem doğrusal model ile çözülerek hangi türbinden ve kaç adet kullanılacağı belirlenmiştir. İkinci kısımdaki problemde kullanılacak türbinlerin yerleşim optimizasyonları genetik algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümü için ilk aşamadaki veriler haricinde wake etkisi göz önüne alınarak, rüzgar türbinlerinin yerleşimi sırasında hangi yönlerden kaç m/sn rüzgar hızı esmekte olduğu kullanılmıştır. Seçilmiş olan M-4 rüzgar türbin modelinin araziye yerleşimleri matris şeklinde karelere bölünerek ifade edilmiştir. Bu karelerden her bir tanesi arazide tek bir türbinlik alan olarak tasarlanmıştır. Solver çözücüsü ile türbin olan kareler 1 ile doldurulmuştur. Belirlenen değişken ve kısıtlar Solver’da genetik algoritma ile çözülmüştür. Çözüm yapılan arazi çizimi Excel’de karelere ayrılarak ve türbin yerleşimi yapılamaz alanlar koyu renk ile doldurularak belirtilmiştir. Türbin yapılamaz alanların sebebi yer şekilleri ve çevresel etkenlerdir.

Tablo 4’de rüzgar türbinlerinin Excel Solver genetik algoritma ile yerleşimi yapılacağı alan gösterilmektedir.

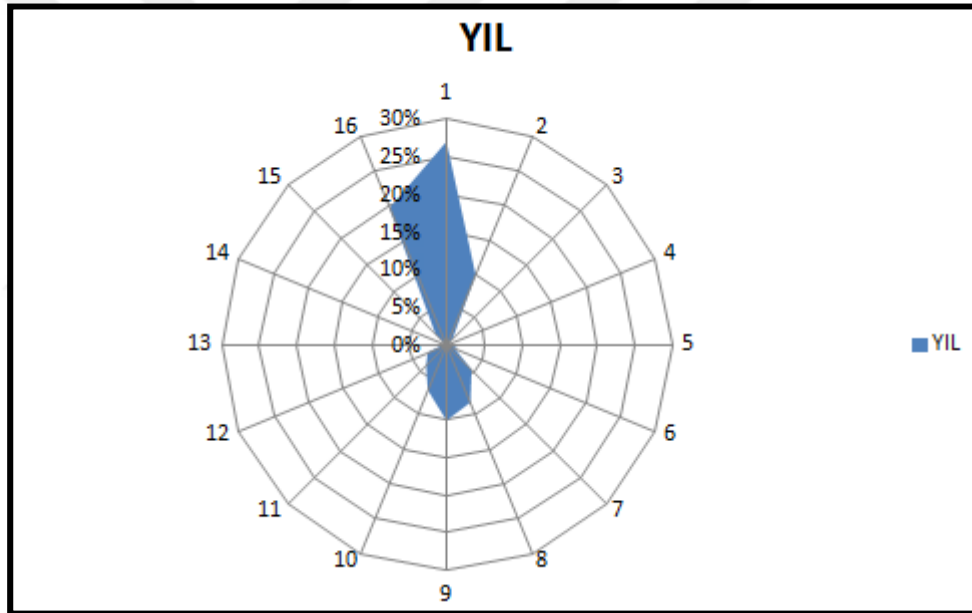
Tablo 4. Rüzgar Türbin Yerleşimi Yapılacak Arazi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										

Bu problemdeki amaç seçilen rüzgar türbinlerinin wake etkisini dikkate alarak en optimum konuma yerleştirilmesi ve üretilen enerjinin maksimuma ulaşmasıdır. Rüzgar türbinleri yerleşimleri sırasında arka arkaya geldiklerinde oluşan wake etkisindeki azalmada dikkate alınmıştır.

4.8.1 Adnan Menderes Bölgesine Ait Rüzgar Yön Verileri

Rüzgar türbinleri yerleşimi yapılırken rüzgarın hızı haricinde hangi yönden estiği de dikkate alınacaktır. Rüzgar türbin yerleşiminde kullanılmak üzere tüm yönlerden bir yıl boyunca ne kadar rüzgar estiği ek 14'te verilmektedir. Bu veriler 2002 altıncı ay ile 2017 dördüncü ay arasındadır. Ek 14'te rüzgar yönleri incelendiğinde en fazla rüzgarın kuzey yönünden estiği ve en çok Ağustos ayında % 41,1 oranla estiği gözlemlenmiştir. Rüzgar hız bileşenleri ek 15'te belirtildiği gibi kuzey, güney, doğu, batı yönleri vektörel bileşenlerine ayrılarak hesaplanmıştır [45]. Şekil 44'te bir yıl boyunca Adnan Menderes bölgesinde esmiş rüzgar hız verileri yüzdesel olarak bulunmaktadır.



Şekil 44. Adnan Menderes Bölgesi Bir Yıllık Rüzgar Hız Verileri Grafiği [45]

4.8.2 Rüzgar Türbin Yerleşiminde Oluşan Wake Etkisi Hesabı

Rüzgar türbin yerleşimi yapılırken türbinlerin araziye konumlandırılmasında wake etkisi dikkate alınmıştır. Burada Jensen modelindeki wake etkisi hesabı kullanılmaktadır. Wake etkisi hesabı yapılabilmesi için öncelikle eksenel indüksiyon faktörü ve sürüklenme sabiti hesaplanmalıdır. 100m ile 2000m arasında wake etkisi hesaplandığında rüzgar türbinlerinin

yerleşim yapıldığı noktada kendisinden önce gelen rüzgar türbini de hesaba katılarak artan wake etkisi sonucu elde edilmiştir.

1.Sürüklenme sabiti hesabı;

$$k = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{Z_H}{Z_0}\right)} \quad (3)$$

Burada;

Z_H = Türbin hub yüksekliği

Z_0 = Yüzey pürüzlülüğü

Formül (3) ile her bir türbin modeli için sürüklenme sabitleri bulunmuştur. Birinci problemde seçilmiş olan M-4 türbin modelinin sürüklenme sabiti kullanılacaktır.

2.Eksenel indüksiyon faktörü hesabı;

$$\alpha = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - C_T}) \quad (4)$$

Burada;

C_T = Türbin üreticisinin belirlediği güven katsayısıdır.

$$C_T = 4\alpha k(1-k) \quad (5)$$

Belirlenen türbin modeli ile yerleşim yapılırken türbinler arasında oluşan wake etkisi formül (6) ile hesaplanmaktadır.

$$3.\text{Rüzgar hızındaki azalma (Wake etkisi hesabı); } 1 - \frac{U}{U_0} = \frac{2\alpha}{\left(1 + k\frac{x}{r}\right)^2} \quad (6)$$

Formülde bulunan;

U = Rüzgar türbininden çıkan rüzgarın hızı

U_0 = Rüzgar türbinine giren rüzgarın ilk hızı

α = Eksenel indüksiyon faktörü

k = Sürüklenme sabiti

x = Öndeki türbine olan uzaklık

r = Türbin yarıçapını ifade etmektedir.

Bu formül kullanılarak 100m ile 2000m arası oluşan wake etkisi hesaplanmıştır.

Aşağıda bulunan tablo 5’de 120 Metreye göre M-4 rüzgar türbinine ait yapılan hesaplamalar sonucu yer almaktadır.

Tablo 5. M-4 Rüzgar Türbinine ait 120m’de Bulunan Hesaplar

HESAPLAMALAR SONUCU	
Hava Yoğunluğu (ρ)	1,225 kg/m ³
Eksenel İndüksiyon Faktörü (α)	0,049
Rüzgar Türbin Hub Yüksekliği (ZH)	138m
Yüzey Pürüzlülüğü (Z0)	0,005
Wake Etkisi Sabiti (k)	0,053
Wake Hesabı	0,049

4.8.3 İkinci Uygulama, Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Genetik Algoritma ile Mikro konumlandırılması

Birinci problem çözümünde elde edilen 7 adet E-marka M-4 model kullanılan rüzgar türbininin, wake etkisi hesabı, rüzgar yönleri, rüzgar hızları, arka arkaya konumlandırılacak türbinler arasındaki mesafe ele alınarak araziye yerleşimi, Excel solver eklentisi genetik algoritma çözücüsü ile yapılmıştır. Genetik algoritma ile çözülen problemde türbin bulunan alanlar 1 ile ifade edilmiştir. Böylece matrisin hangi alanlarına rüzgar türbin yerleşimi yapıldığı görülmektedir.

Genetik algoritma türbinlerin yerleştirilebileceği aday hücrelerden oluşan arazideki yerleşimi ifade eden matrise, öncelikle türbin etkisinin hangi hücreye etki ettiği hesaplanmıştır. Daha sonra kaç hücre öncesinde rüzgar türbini var o hesaplanmış, rüzgar türbini varsa maruz kaldığı wake etkisi ifade edilmiştir. Ayrıca her hücre için wake etkisinden geriye kalan rüzgar hızı yüzdesi bulunmuştur. Her rüzgar türbininin rüzgardan faydalanma yüzdeleri bulunmuş ve sonra her rüzgar türbininin ürettiği enerji hesaplanmıştır. Türbinlerin

ürettiği enerji hesaplanırken Kuzey, Batı, Doğu ve Güney yönlerinin rüzgar esme yüzdeleri ile Adnan Menderes bölgesinden alınan saatlik frekanslar çarpılmıştır. Bu değerler kullanılarak ve interpolasyon yöntemi ile türbinlerin enerji üretimleri, bulundukları karelerde hesaplanmıştır. Bütün hesaplar her yön için ayrı olarak tekrarlanmıştır. Her yön için bulunan değerler toplandığında bir yıl boyunca üretilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

İkinci problemin çözümü için amaç fonksiyonları, değişkenler ve kısıtlar aşağıda yer almaktadır. Ek 17’de 7 adet matris üzerinde genetik algoritma ile araziye yapılan rüzgar türbin yerleşimi yer almaktadır.

Amaç Fonksiyonu;

Kuzey = 56.786.483,51 kWh

Batı = 3.760.705,461 kWh

Doğu = 3.373.306,241 kWh

Güney = 30.689.754,78 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 94.610.250kWh

Excel Solver kullanılarak genetik algoritma çözümü yapılmıştır. Çözümde amaç fonksiyonları yukarıdaki değerler alınmıştır. Hedef hücre en büyükle olarak seçilmiştir.

Değişkenler;

Karelerin oluşturduğu Matriste koyu renk ile boyalı alanlar hariç yerler seçilmiştir. Bunlar problemdeki değişken hücrelerdir. Türbinlerin yerleştirileceği alanlardır. Koyu renk ile boyalı alanlar yer şekilleri vb. nedenlerle yerleşimin yapılmayacağı alanlar olarak kabul edilmiştir.

Kısıtlar;

Karelerin oluşturduğu matriste koyu renk ile boyalı olmayan alanlar seçilmiş sonrada ikili düzen işaretlenmiştir. Bunun sebebi matriste bulunan karelere türbin varsa 1 yoksa 0 değerini yerleştirilmesidir.

Toplam türbin kısıtı eklenmiştir. Toplam türbinler = 7 olarak seçilir. Birinci problemde hesaplandığı üzere 7 adet M-4 rüzgar türbin yerleşimi yapılacağından bu kısıt eklenmiştir. Toplam türbinler matriste koyu renk ile boyalı olmayan alanların tamamını temsil etmektedir.

Maliyet hesaba katılmadığı durumda rüzgar türbin adedini arttırarak türbinlerin araziye yerleşimini sağlayabiliriz. 14 adet rüzgar türbinleri matris üzerine genetik algoritma ile yerleşim yapıldığında üretilen enerji aşağıdaki gibi gözlemlenmektedir. Ek 18’de yerleşim planı bulunmaktadır.

Kuzey = 112.228.614,5 kWh

Batı = 7.521.410,922 kWh

Doğu = 6.746.612,482 kWh

Güney = 61.379.509,57 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 187.876.147,5 kWh

21 adet rüzgar türbinleri matris üzerine genetik algoritma ile yerleşim yapıldığında üretilen enerji aşağıdaki gibi gözlemlenmektedir. Ek 19'da yerleşim planı bulunmaktadır.

Kuzey = 163.711.867,7 kWh

Batı = 11.233.570,95 kWh

Doğu = 10.076.374,07 kWh

Güney = 91.673.102,63 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 276.694.915,3 kWh

Ek 20, ek 21, ek 22 ve ek 23'te 7 adet rüzgar türbininin genetik algoritma ile dört rüzgar yönü için yerleşimi yapıldığında sırasıyla kuzey, güney, doğu ve batı yönleri için, her bir rüzgar türbininin yıllık olarak ürettiği enerji miktarları yer almaktadır.

4.8.4 İkinci Uygulama, Seçilen Rüzgar Türbinlerinin Normal Mikro Konumlandırılması

Problemin ikinci aşamasında kullanılacak olan 7 adet E-marka M-4 model rüzgar türbinlerinin araziye yerleşimi, matris üzerinde genetik algoritma ile değil de istenilen karelere standart yöntem ile yerleşimi yapılmıştır. Bu yerleşim yapılırken 3D ve 5-9D mesafe kuralları göz önünde bulundurulmuştur. Matrisin hangi alanlarına rüzgar türbin yerleşimi yapıldığı 1 ile gösterilmiştir. Yapılan yerleşimin amacı genetik algoritma yapılmadan yerleştirilen rüzgar türbinlerinden elde edilecek verim nedir bunu görmektir. Ek 24'de matris üzerinde araziye yapılan 7 adet rüzgar türbin yerleşimi yer almaktadır. 7 adet rüzgar türbini için standart yöntem ile yapılan yerleşim sonucu ayrı ayrı dört yön olarak hesaplandığında üretim aşağıdaki gibidir.

Kuzey = 56.116.515,88 kWh

Batı = 3.653.177,336 kWh

Doğu = 3.276.854,844 kWh

Güney = 29.812.256,71 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 92.858.804,77 kWh

Maliyet kısıtı nedeniyle 7 adet türbin yerleştirilebilmektedir. Maliyeti hesaba katmayarak, alana göre 14 adet ve 21 rüzgar türbini yerleşimi standart yöntem ile matris üzerinde yapılmıştır. Ek 25’de matris üzerinde araziye yapılan 14 adet rüzgar türbin yerleşimi yer almaktadır. 14 adet rüzgar türbini için standart yöntem ile yapılan türbin yerleşim sonucu üretilen enerji ayrı ayrı dört ön için aşağıda verilmektedir.

Kuzey = 109.967.598,7 kWh

Batı = 7.329.504,251 kWh

Doğu = 6.574.474,573 kWh

Güney = 59.813.428,75 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 183.685.006,2 kWh

Ek 26’da matris üzerinde araziye yapılan 21 adet rüzgar türbin yerleşimi yer almaktadır. 21 adet rüzgar türbini için standart yöntem ile yapılan türbin yerleşim sonucu üretilen enerji ayrı ayrı dört ön için aşağıda verilmektedir.

Kuzey = 163.220.397,4 kWh

Batı = 10.991.011,7 kWh

Doğu = 9.858.801,425 kWh

Güney = 89.693.664,5 kWh

Toplam yıllık enerji üretimi = 273.763.875 kWh

Genetik algoritma ile yapılan çözümle karşılaştırıldığında bu çözümlerde enerji üretiminde azalma görülmüştür. Bu azalış türbin sayısı arttıkça çoğalmıştır. Sebebi wake etkisi dikkate alınmadan standart yöntem ile yerleştirilen türbinlerdir. Genetik algoritma ile yapılan türbin yerleşimde wake etkisi dikkate alınarak en uygun konumlara rüzgar türbinleri yerleştirilmiştir. Standart yöntem ile yapılan yerleşimde ise rüzgar türbinleri rastgele

konumlandırılmıştır. İki yerleşim arasındaki farka bakıldığında üretilen enerji miktarı genetik algoritma ile daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Rüzgar türbinlerinin yerleşimi optimizasyonda genetik algoritma ile yapılmasının sebebi arazi boyutuna, maliyete ve wake etkisine dikkat ederek en fazla verimi elde etmektir.



5. SONUÇ

Dünyada büyük sorun haline gelen enerji ihtiyacı, yenilenebilir enerji kaynakları ile çevreye zarar vermeden ve giderek artarak çözüm sağlamaktadır. Gelecek nesillerin enerji ihtiyacını karşılamak ve bu ihtiyacı karşılariken çevreye zarar vermemek için yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi vb. enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında rüzgar enerjisi tesislerinin optimizasyonu ve uygulaması incelenmiş ve iki aşamalı çözüm uygulanmıştır. Öncelikle doğrusal model ile hangi türbin modelinden ve kaç adet kullanılacağı belirlenmiş daha sonra wake etkisi göz önüne alınarak genetik algoritma ile araziye en verimli şekilde rüzgar türbinlerinin yerleşiminin nasıl yapılması gerektiği belirlenmiştir. Bu hesap yapılırken 4 temel rüzgar yönü dikkate alınmıştır. Sonucunda ne kadar rüzgar enerjisi üretildiği hesaplanmıştır.

Çalışmanın amacı rüzgar tarlasına türbinlerin verimli şekilde yerleşimini sağlamak ve en yüksek enerji üretimini elde etmektir. Bunun için ise doğrusal model ve genetik algoritma kullanılmıştır. Bu tür teknikler, yapılacak olan yatırımda üretilecek enerjiyi ve rüzgar türbinlerinin hangi konumlarda olmaları durumunda daha verimli enerji üretileceğini görmek adına fayda sağlamaktadır.

Rüzgar türbinlerinden enerji üretmek isteyenler bu uygulama sayesinde rüzgar tarlalarına kaç adet türbin yerleştirmeleri gerektiğini ve nasıl konumlandırılması gerektiğini görerek verimli enerji üretimini sağlayabilirler. Bunu sağlamak için ise rüzgar türbin modelinin, gücünün, adedinin ve türbin konumunun seçimi önem taşımaktadır.

İkinci aşamada uygulanan Genetik algoritma probleminde elde edilecek verimi görmek adına toplam türbin sayısı bütçeden dolayı 7 ile sınırlıdır. Ancak, maliyet sınırının olmaması durumunda algoritmanın başarımının değerlendirilebilmesi için, 14 türbin ve 21 türbin için de çözüm yapılmıştır.

Genetik algoritma kullanmadan rüzgar türbinleri araziye matris üzerine rüzgar türbinlerinin yerleşiminde kullanılan standart kurallara göre yerleşim yöntemi ile 7 adet, 14 adet ve 21 adet yerleşim yapılarak, genetik algoritma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Normal uygulamayla genetik algoritma sonuçları arasında üretilen enerji miktarı açısından önemli bir fark bulunmaktadır. Fark arazideki türbin sayısı 14 ve 21 olarak yoğunlaştığında çoğalmaktadır. Böylece genetik algoritma ile yapılan çözümün daha faydalı ve verimli olduğu gösterilmiştir.

Bunun gibi yüksek maliyetli yatırımlarda ne kadar sürede kazanç sağlanmaya başlanacağı önemlidir. Bu nedenle, yatırım maliyetinin ne kadar yılda geri dönüşü olacağı da hesaplanmıştır. Sonucunda Genetik algoritma ile bulunan çözümün daha kısa bir süre içerisinde geri dönüşünün sağlanacağı görülmüştür. Geri dönüş hesabı yapılırken Yenilenebilir Enerji Kanunu yasalarındaki rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi için uygulanacak fiyat 7,3 Dolar Cent alınarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada rüzgar tarlasında türbin yerleşiminin mümkün olmadığı alanlar da göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada yerleşim yapılan arazinin düz bir yapıya sahip olduğu varsayılmıştır. Ancak eğimli arazi yapısının bulunduğu durumlarda da yerleşim yapılması mümkün olabilir. Bu çalışmanın devamında eğimli arazilerin türbin yerleşimi probleminin çözümü üzerine çalışılabilir.



KAYNAKLAR

- [1]http://www.powerenerji.com/wp-content/uploads/2016/05/Alternative_Energies-728x375.jpg, erişim tarihi: 03.06.2017.
- [2]http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx, 22.02.2017.
- [3]<http://www.enercon.de/home/>, erişim tarihi: 12.01.2017.
- [4]http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/turkiyede-ruzgar-enerjisi-ve-gelisimi/6859?fb_comment_id=149834878503856_609964412490898#ad-image-0, erişim tarihi: 11.03.2017.
- [5]<http://www.tureb.com.tr/>, erişim tarihi: 27.01.2017.
- [6]<https://www.iea.org/>, erişim tarihi: 20.02.2017.
- [7]Şenel, M. C., Koç, E., 2013 ‘Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme’, Mühendis ve Makine, cilt 56, sayı 663, ss. 46-56, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- [8]Durak, M., Özer, S., Mart 2008, Rüzgar Enerjisi Teorik ve Uygulama Kitabı.
- [9]http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=88369, erişim tarihi: 13.01.2018.
- [10]http://www.ecoenerji.net/haber_detay.asp?haberID=16, erişim tarihi: 24.03.2017.
- [11]<http://www.arsivbelge.com/yaz.php?sc=2619>, erişim tarihi: 13.03.2017.
- [12]Taşkın, B., Haziran 2013 ‘Niğde İlinde Kurulabilecek Rüzgar Enerji Santralinin Fiziksel ve Ekonomik Analizi’, Niğde Üniversitesi.
- [13]Özpınar, A., ‘Rüzgar enerjisi, teşvikleri ve kurulum maliyetleri’, İstanbul Ticaret Üniversitesi.

[14]<http://www.bilgiustam.com/ruzgar-enerjisi-nedir-nasil-calisir/>, erişim tarihi: 16.06.2017.

[15]<http://bilmiyorsan.com/ruzgar-turbini-nedir-nasil-calisir/>, erişim tarihi: 17.06.2017.

[16]<http://www.wpenerji.com/images/egitim/TUREB%20%20RUZGAR%20ENERJISI.pdf>,
erişim tarihi: 27.06.2017.

[17]Nurbay, N., Çınar, A., ‘‘Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbiriyle Karşılaştırılması’’,
Kocaeli Üniversitesi.

[18]Elibüyük, U., Üçgöl, İ., 2014, Rüzgar Türbinleri Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Yöntemleri.

[19]<http://bilimirfan.blogspot.com.tr/2016/01/ruzgar-enerjisi.html>, erişim tarihi: 06.11.2017.

[20]<http://www.makelci.com/2015/04/ruzgar-turbini-nasil-calisir/savonius-ruzgar-turbini/>,
erişim tarihi: 29.11.2017.

[21]<http://www.makelci.com/2015/04/ruzgar-turbini-nasil-calisir/darrieus-ruzgar-turbini/>,
erişim tarihi: 11.05.2017.

[22]<http://www.wikizero.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvRGFycmldXNfciVDMYVCQ3pnJUMzJUEycl90JUMzJUJDcmJpbmk>, erişim tarihi:
05.10.2017.

[23]Kıncay, O., Doğan, B., Akbulut, U., Rüzgar Enerjisi III. Bölüm, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[24]<http://www.ruzgarenerjisikulubu.com/>, erişim tarihi: 22.08.2016.

[25]<http://www.enerjimag.com/turkiyede-ruzgar-enerjisi-santrali-nasil-kuruluyor/>, erişim
tarihi: 11.05.2017.

[26]<http://makina-market.com.tr/cpt/detay/7708/turkiyede-tek-seferde-kurulan-en-buyuk-ruzgar-santrali-tamamlandi>, erişim tarihi: 11.05.2017.

[27]<http://www.reshaber.com/site/?sf=bldt&dl=&ky=400>, erişim tarihi: 02.05.2017.

[28]<http://yagmurvedostluk.blogcu.com/ruzgarin-olusumu-ozellikleri-ve-hesaplamalari/4116620>, erişim tarihi: 10.04.2017

[29]Baloğlu, H., Müsiad Kırıkkale Dergisi.

[30]Odyakmaz, O., 2008, ‘Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Santrallerde Enerji Üretimi ve Denetimi’, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[31]https://forum.donanimhaber.com/m_65888715/tm.htm, erişim tarihi: 16.03.2017.

[32]Varınca, K., Varank, G., ‘Rüzgar Kaynaklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerileri’, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[33] Uğur, D., Kuşku, U., Mayıs 2013 ‘Parçacık Sürü Optimizasyonuile Mühendislik Optimizasyon Problemlerive Başlangıç Değer Problemlerinin Çözümü’, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[34] Apaydın, Ö., Türkkan, A., 2012-2013 ‘Metasezgisel Yöntemler’, Endüstriyel Çizelgeleme Dersi Projesi, Bahar Dönemi.

[35] Özdemir, M.,2013 ‘Zaman Kısıtı Altında Takım Oryantiring Problemlerinin Yapay Arı Kolonisi Yaklaşımı ile Çözümü’, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[36]<http://www.wikizero.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvQmVuemV0aWxtaSVDNSU5RI90YXZsYW1h>, erişim tarihi: 05.10.2017.

[37] Aydın, İ., Karınca Koloni Algoritması, Metasezgisel Yöntemler, Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.

[38] <http://melihhilmiuludag.com/tabu-arama-algoritmasi/>, erişim tarihi: 09.10.2017.

[39] Hussaini, M., February 2005, Placement of wind turbines using genetic algorithms.

[40] Gonzalez, J., Gonzalez, A., Santos, J., August, 2010, Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm.

[41] <https://tutasi.com/2012/10/17/17/>, erişim tarihi: 20.11.2017.

[42] <http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/IZMIR-REPA.pdf>, erişim tarihi: 23.01.2017.

[43] <http://www.solver.com/genetic-algorithms-excel>, erişim tarihi: 14.11.2017.

[44] <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>, erişim tarihi: 19.03.2017.

[45] https://www.windfinder.com/forecast/izmir_menderes, erişim tarihi: 13.01.2017.

EKLER

Ek-1: M-44 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-2: M-48 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-3: M-53 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-4: M-70 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-5: M-82 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-6: M-92 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-7: M-101 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-8: M-103 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-9: M-115 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-10: M-141 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-11: MP4 M-126 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-12: MP8 M-126 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği

Ek-13: Rüzgar Türbin Modellerinin Maksimum Güçleri

Ek-14: İzmir İli Adnan Menderes Bölgesi Rüzgar Esme Yüzdeleri

Ek-15: İzmir İli Adnan Menderes Bölgesi Aylık Rüzgar Esme Yönleri

Ek-16: Doğrusal Model Çözümü

Ek 17. Genetik Algoritma ile 7 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

Ek 18. Genetik Algoritma ile 14 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

Ek 19. Genetik Algoritma ile 21 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

Ek 20. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Kuzey Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

Ek 21. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Güney Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

Ek 22. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Doğu Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

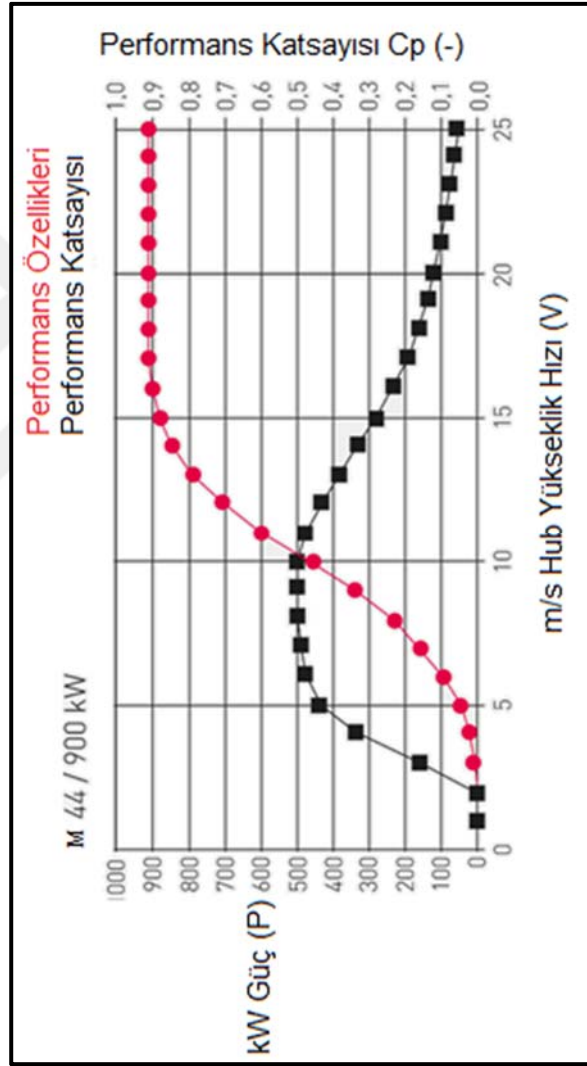
Ek 23. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Batı Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

Ek 24. Standart Yöntem ile 7 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

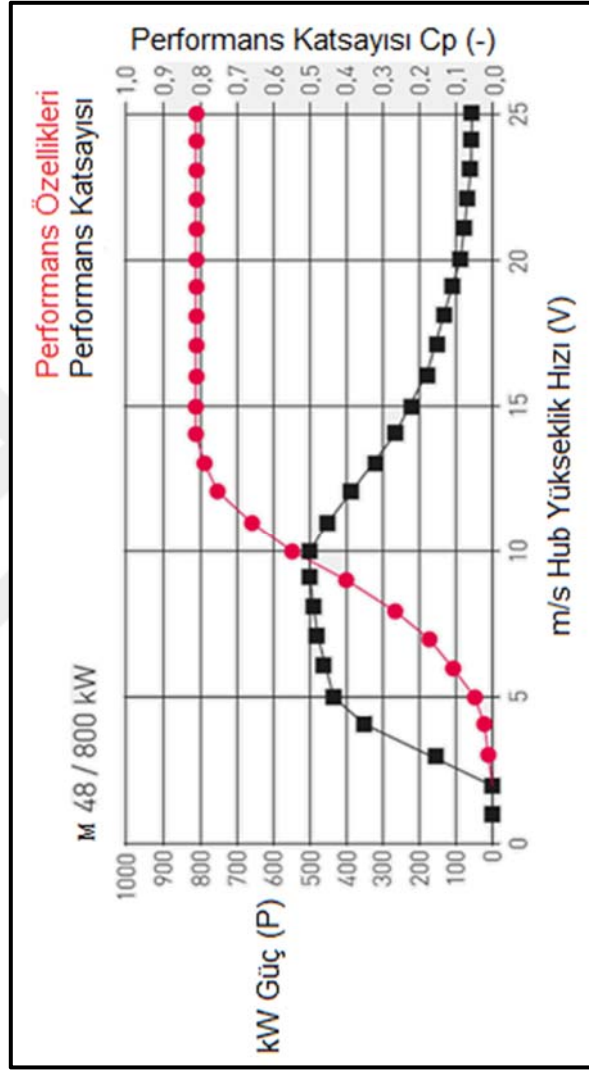
Ek 25. Standart Yöntem ile 14 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

Ek 26. Standart Yöntem ile 21 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

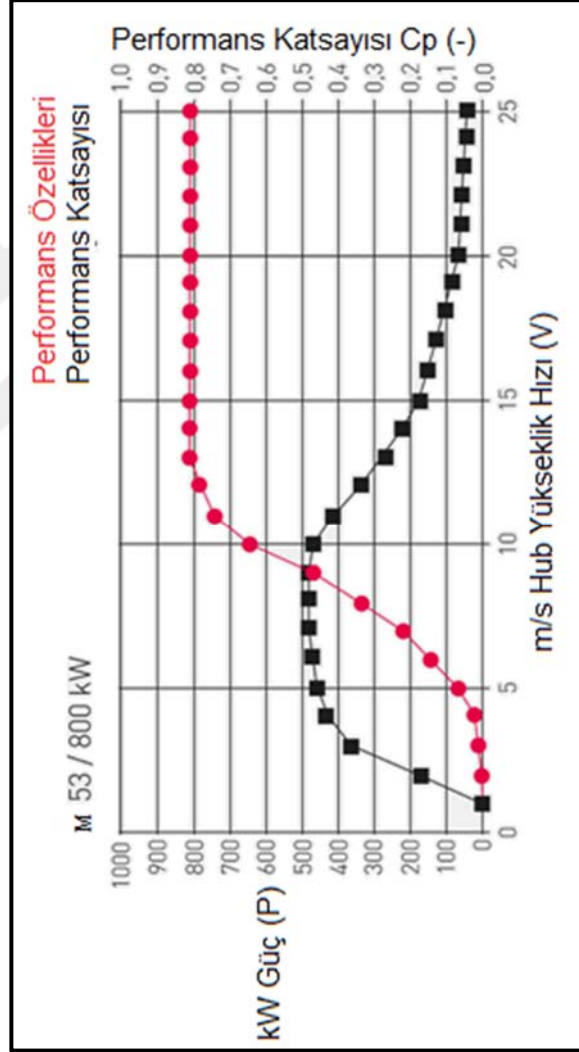
Ek 1. M- 44 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



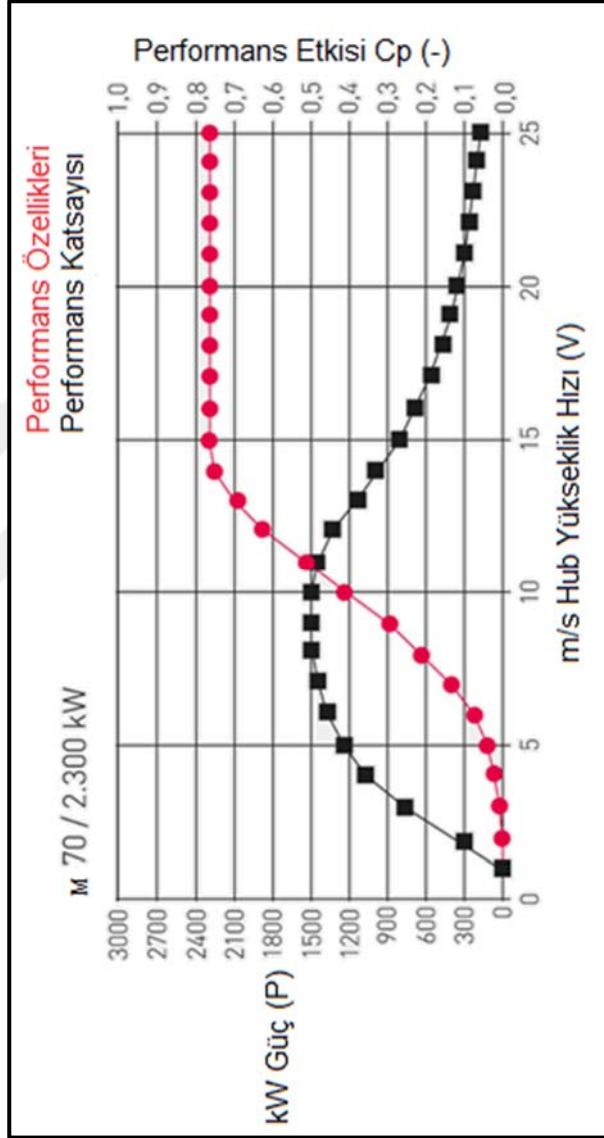
Ek 2. M- 48 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



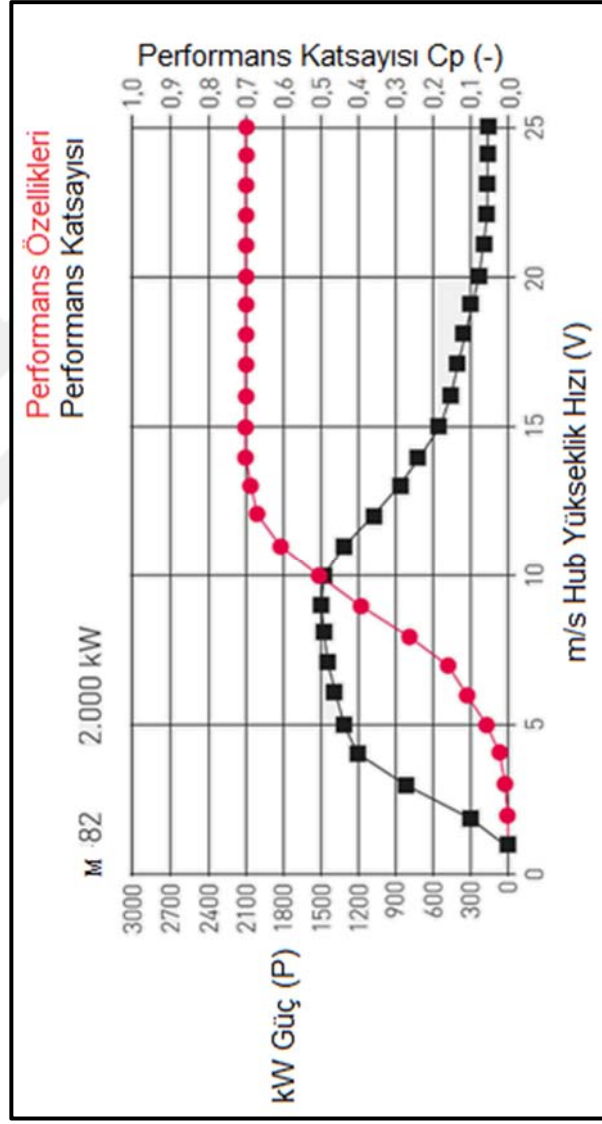
Ek 3.M-53 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



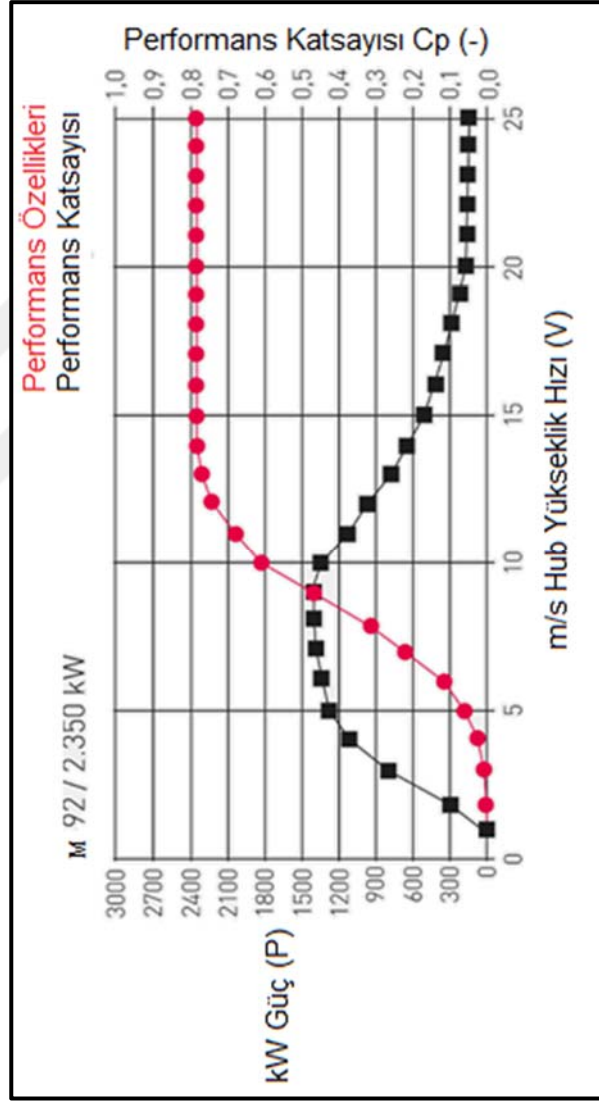
Ek 4. M-70 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



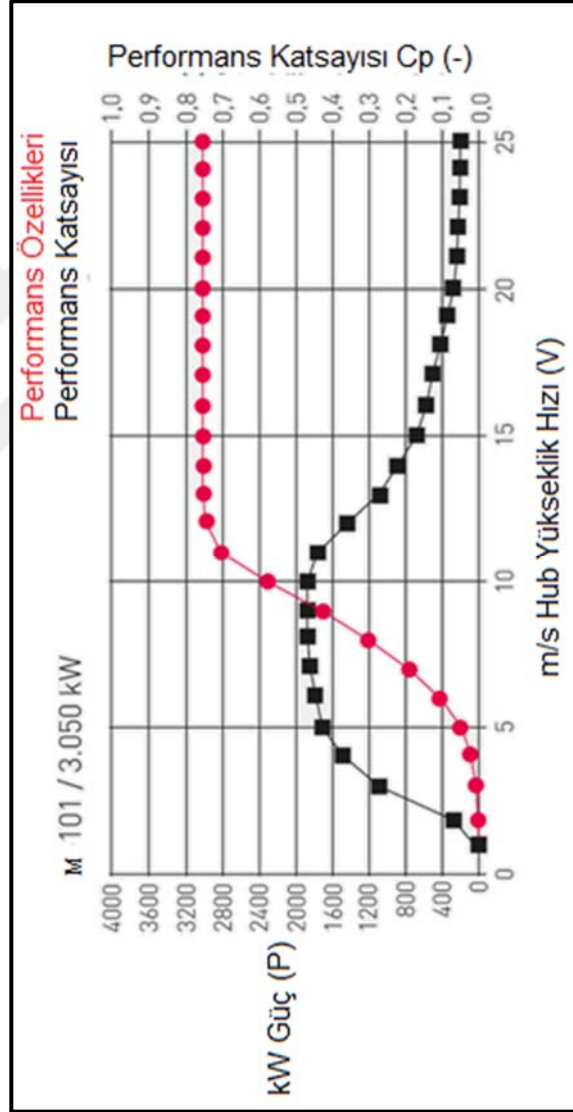
Ek 5. M-82 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



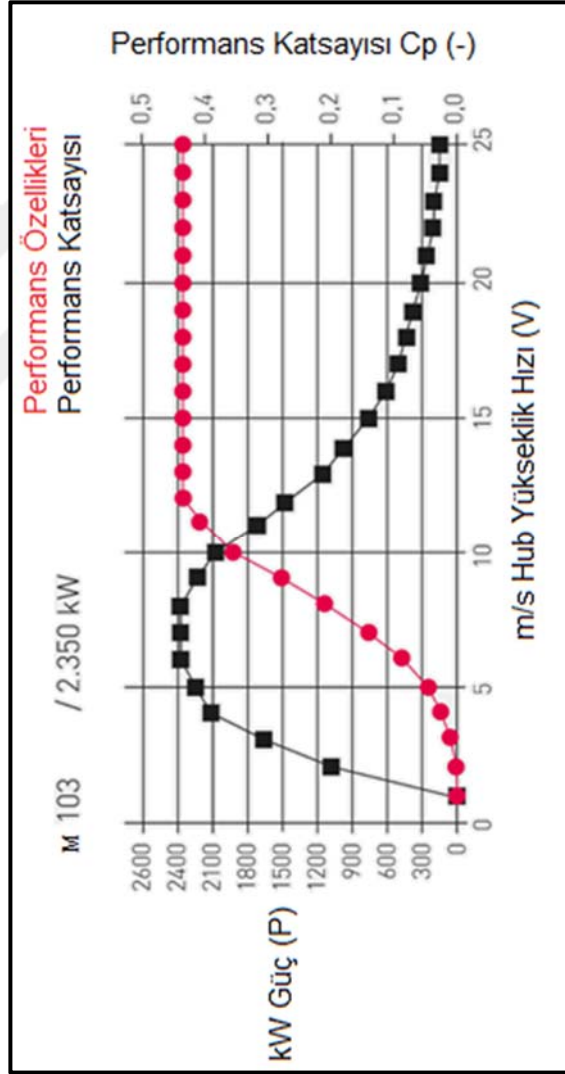
Ek 6. M-92 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



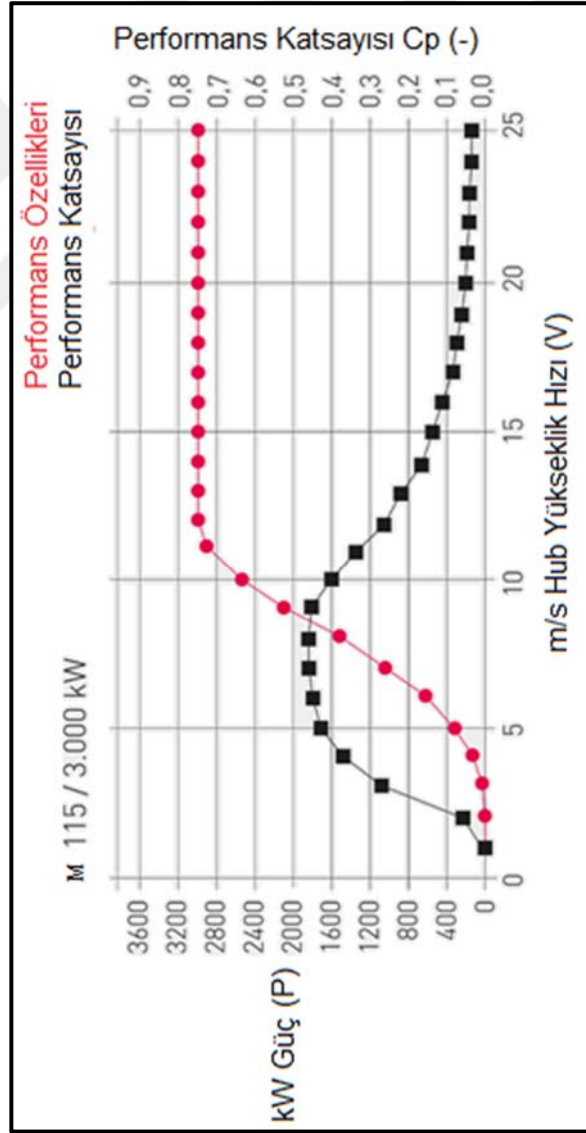
Ek 7. M-101 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



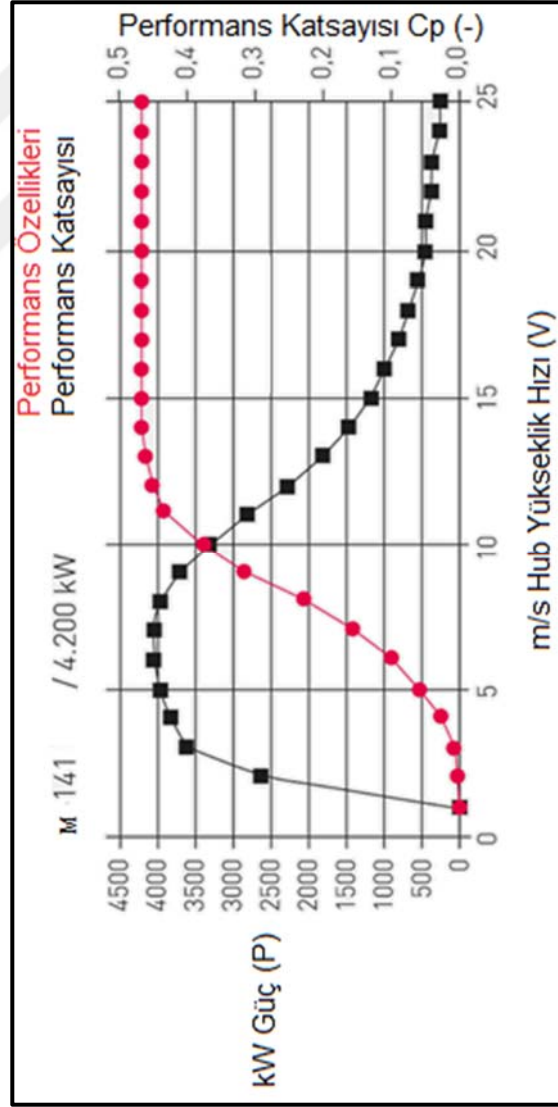
Ek 8. M-103 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



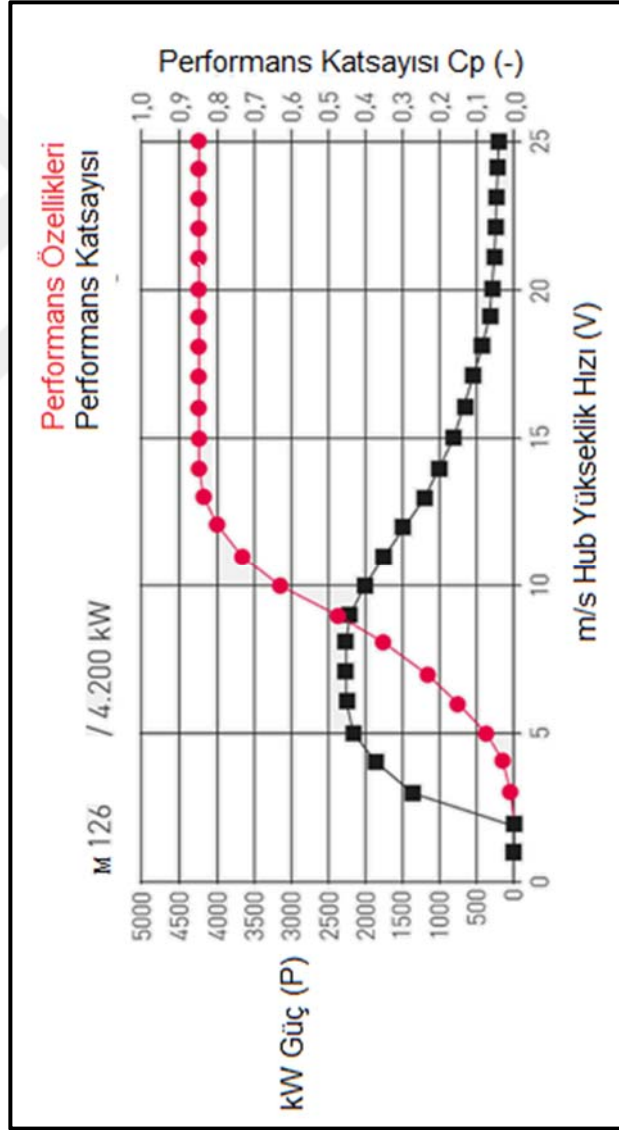
Ek 9. M-115 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



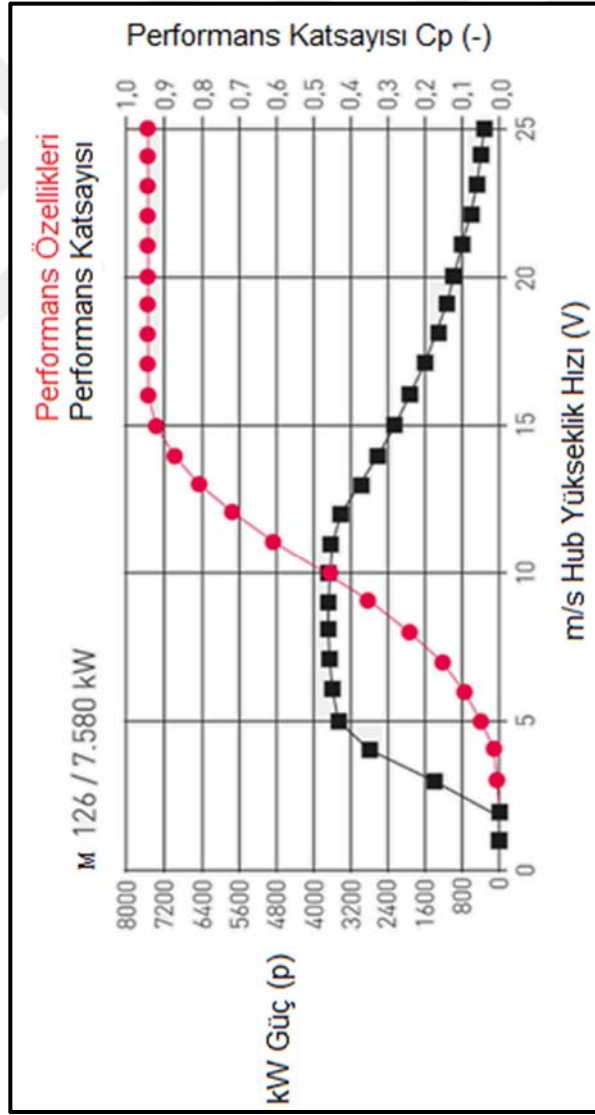
Ek 10. M-141 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



Ek 11. M-P4 M-126 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



Ek 12. M-P8 M-126 Rüzgar Türbini Güç Eğri Grafiği [2]



Ek.13 Rüzgar Türbin Modellerinin Maksimum Güçleri

Rüzgar Hızları (m/s)	M-44	M-48	M-53	M-70	M-82	M-92	M-101	M-103	M-115 3200 kW	M-115 3000 kW	M-141	Mp4 M-126	Mp8 M-126
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	180	300	300	300	300	1100	700	300	2600	0	0
3	180	150	380	750	800	800	1100	1650	1300	1100	3600	1400	1500
4	320	350	430	1100	1200	1100	1500	2100	1500	1500	3800	1900	2800
5	420	420	450	1200	1300	1250	1650	2250	1700	1700	4000	2100	3300
6	480	460	460	1400	1350	1350	1700	2300	1750	1800	4050	2300	3500
7	490	470	480	1480	1400	1370	1800	2300	1800	1900	4050	2350	3700
8	500	490	480	1500	1450	1400	1900	2300	1900	1900	4000	2350	3800
9	500	500	480	1500	1500	1400	1900	2200	1800	1700	3700	2200	3800
10	500	500	470	1500	1500	1300	1900	2100	1700	1600	3300	2000	3800
11	480	440	430	1400	1300	1100	1750	1700	1400	1300	2800	1800	3700
12	420	390	320	1300	1050	1000	1400	1500	1100	1100	2300	1500	3300
13	390	310	280	1100	900	750	1100	1100	900	900	1800	1100	3000
14	320	260	220	1000	700	650	900	1000	700	600	1500	1000	2600
15	290	210	190	800	600	500	700	750	500	500	1200	800	2400
16	220	190	150	700	500	450	600	600	450	450	1000	700	2000
17	200	150	120	500	400	400	500	500	400	350	800	500	1600
18	150	120	100	450	350	300	400	400	300	300	700	400	1300
19	120	110	90	380	300	200	350	350	200	250	600	300	1000
20	110	100	80	310	250	150	300	300	100	200	500	300	900
21	100	80	70	300	200	140	200	280	100	200	500	250	800
22	90	60	70	250	150	140	200	200	100	190	400	250	700
23	80	50	50	200	150	140	150	200	100	190	400	240	500
24	60	50	30	160	150	140	150	100	100	150	300	240	300
25	50	50	30	150	150	140	100	100	90	150	300	230	200
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek 14. İzmir İli Adnan Menderes Bölgesi Aylık Rüzgar Yüzdeleri [54]

	OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM	ARALIK
Kuzey	18,7%	19,2%	18,6%	20,7%	22,6%	30,2%	39,1%	41,1%	33,6%	32,0%	24,6%	23,5%
Kuzey kuzey Doğu	8,0%	9,7%	8,1%	9,7%	7,4%	11,9%	11,3%	11,2%	11,1%	11,7%	12,2%	8,2%
Kuzey Doğu	0,8%	1,0%	1,3%	0,9%	0,7%	1,9%	1,6%	1,6%	1,7%	0,9%	0,7%	1,1%
Doğu kuzey doğu	0,2%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%
Doğu	2,7%	1,9%	1,8%	2,0%	1,7%	1,1%	0,5%	0,7%	1,2%	2,0%	2,4%	3,0%
Doğu güney doğu	2,2%	2,1%	1,3%	0,7%	0,3%	50,0%	1,3%	0,2%	0,5%	1,4%	1,9%	1,8%
Güney doğu	10,2%	8,1%	5,2%	4,6%	3,1%	1,5%	0,3%	0,4%	1,7%	3,8%	7,3%	9,8%
Güney güney doğu	14,5%	14,3%	12,1%	8,6%	5,5%	2,3%	1,3%	1,4%	4,0%	7,7%	13,2%	15,1%
Güney	15,0%	15,7%	15,0%	14,3%	10,3%	4,9%	1,8%	2,1%	5,6%	10,2%	13,8%	13,0%
Güney güney batı	7,5%	8,1%	10,1%	11,3%	10,4%	3,9%	1,3%	1,4%	4,5%	6,8%	7,3%	5,8%
Güney batı	3,8%	3,5%	5,8%	6,4%	7,0%	3,2%	1,5%	2,0%	3,8%	3,9%	2,6%	2,5%
Batı güney batı	1,6%	1,4%	3,8%	4,6%	6,2%	3,9%	1,6%	1,6%	3,3%	2,2%	0,9%	0,9%
Batı	1,6%	0,5%	0,7%	0,7%	1,0%	0,6%	0,2%	0,4%	0,7%	0,4%	0,3%	0,4%
Batı kuzey batı	0,2%	0,5%	0,4%	0,0%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%
Kuzey batı	1,9%	1,1%	2,2%	1,3%	2,7%	4,1%	3,4%	2,8%	2,1%	1,1%	1,4%	1,4%
Kuzey kuzey batı	12,1%	12,7%	13,7%	14,3%	20,7%	29,7%	35,5%	32,9%	25,6%	15,8%	11,0%	13,5%

Ek 15. İzmir İli Adnan Menderes Bölgesi Aylık Rüzgar Esme Yönleri [54]

	YIL				
Kuzey	27,1%	56,90%			
Kuzey kuzey doğu	10,10%		1,14%		60,02% KUZEY
Kuzey doğu	1,20%	59,90%			
Doğu kuzey doğu	0,10%		0,06%		3,57% DOĞU
Doğu	1,80%	3,00%			
Doğu güney doğu	1,10%		0,51%		
Güney doğu	4,70%	27,90%			
Güney güney doğu	8,30%		4,19%		
Güney	10,10%	24,90%			32,44% GÜNEY
Güney güney batı	6,50%		3,34%		
Güney batı	3,80%	28,30%			
Batı güney batı	2,70%		0,46%		3,97% BATI
Batı	0,50%	3,40%			
Batı kuzey batı	0,20%				
Kuzey batı	2,10%	60,30%	0,12%		100,00%
Kuzey kuzey batı	19,70%		1,98%		
Toplam	100,00%	88,20%	11,80%		

Ek 16. 1.Problem Doğrusal Model Çözümü

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	
Xi-Mıjı	0	0	0	0	0	0	0	7,00000001	0	-1000	0	0	
Yı	0,00E+00	0	0	0	0	0	0	-6,561E-12	0	1	0	0	1
Güç	900 kW	800 kW	800 kW	2300 kW	2000 kW	2350 kW	3050 kW	2350 kW	3000 kW	4200 kW	4200 kW	7580 kW	
Türbin Tipleri	E-44	E-48	E-53	E-70	E-82	E-92	E-101	E-103	E-115	E-141	E-p4 E-126	E-p8 E-126	
Xi	Adet	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	
Yıllık Üretim	4636250	4580920	5530440	15012000	15219350	14647250	19347700	27024700	19604100	50018850	23915000	36312900	
Maliyet	810000	720000	720000	2070000	1800000	2115000	2745000	2115000	2700000	3780000	3780000	6822000	14805000
Alan İlgali	7744	9216	11184	20164	26896	33856	40804	42436	53546	79524	64516	64516	2000000
Birim maliyete göre	5,723765	6,362389	7,681194	7,251174	8,455194	6,925414	7,048342	12,777636	7,260778	13,232500	6,326720	5,322911	
Birim Alana göre üri	598,68931	497,0616	494,0716	744,4951	565,85924	432,633802	474,1618469	636,834292	366,117257	628,978044	370,683241	562,851076	

Ek 17. Genetik Algoritma ile 7 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										1
2										
3										
4										
5										
6										
7						1				
8			1							
9										
10										
11										
12										
13				1						
14								1		
15										
16										
17										
18							1			
19										
20									1	

Ek 18. Genetik Algoritma ile 14 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										1
2									1	
3					1					
4				1						
5										
6	1									
7								1		
8									1	
9			1							
10		1								
11										
12										
13						1				
14										
15					1					
16										
17							1			
18										
19										1
20								1		

Ek 19. Genetik Algoritma ile 21 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										1
2									1	
3					1					
4				1						
5						1				
6	1									
7								1		
8										1
9			1							
10		1								
11								1		
12			1							
13	1					1				
14		1								
15					1					
16									1	
17							1			
18								1		
19							1			
20										1

Ek 20. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Kuzey Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1				0	0	0	0	0	0	8112355
2				0	0	0	0	0	0	0
3				0	0	0	0	0	0	0
4				0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0		
6	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	0	0	0	0	0	8112355	0	0		
8	0	0	8112354,8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	8112354,8	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	8112354,8	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16							0	0	0	0
17							0	0	0	0
18							8112354,8	0	0	0
19							0	0	0	0
20							0	0	8112354,8	0

Ek 21. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Güney Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1				0	0	0	0	0	0	4384251
2				0	0	0	0	0	0	0
3				0	0	0	0	0	0	0
4				0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0		
6	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	0	0	0	0	0	4384251	0	0		
8	0	0	4384250,7	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	4384250,7	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	4384250,7	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16							0	0	0	0
17							0	0	0	0
18							4384250,7	0	0	0
19							0	0	0	0
20							0	0	4384250,7	0

Ek 22. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Doğu Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1				0	0	0	0	0	0	481900,9	
2				0	0	0	0	0	0	0	0
3				0	0	0	0	0	0	0	0
4				0	0	0	0	0			
5	0	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	0	0	0			
7	0	0	0	0	0	481900,9	0	0			
8	0	0	481900,89	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	481900,89	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	481900,89	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16							0	0	0	0	0
17							0	0	0	0	0
18							481900,89	0	0	0	0
19							0	0	0	0	0
20							0	0	481900,89	0	0

Ek 23. 7 Adet Rüzgar Türbininin Genetik Algoritma ile Batı Yönünden Üretilen Enerji Miktarları

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1				0	0	0	0	0	0	537243,6
2				0	0	0	0	0	0	0
3				0	0	0	0	0	0	0
4				0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0		
6	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	0	0	0	0	0	537243,6	0	0		
8	0	0	537243,64	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	537243,64	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	537243,64	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16							0	0	0	0
17							0	0	0	0
18							537243,64	0	0	0
19							0	0	0	0
20							0	0	537243,64	0

Ek 24. Standart Yöntem ile 7 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2							1			
3										
4										
5										
6		1								
7										
8										
9										
10	1				1			1		
11										
12										
13										
14										
15							1			
16										
17										1
18										
19										
20										

Ek 25. Standart Yöntem ile 14 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2				1				1		
3										
4										
5			1							
6	1						1			
7										
8										
9				1						1
10								1		
11										
12	1									
13		1							1	
14										
15					1					
16										
17								1		
18										1
19										
20										

Ek 26. Standart Yöntem ile 21 Adet Rüzgar Türbin Yerleşimi

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1				1						
2							1			
3										1
4								1		
5		1								
6						1				
7			1							
8	1				1					
9				1						1
10							1			
11									1	
12		1						1		
13						1				
14			1							1
15	1				1					
16										
17										
18										
19										
20							1			

ÖZGEÇMİŞ

24 Ağustos 1992 tarihli, İstanbul doğumludur. 2011 yılında Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başlamıştır. 2015 yılında mezun olduktan sonra Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği bölümü Yüksek Lisansına kaydolmuştur. Özel bir enerji şirketinde Teknik Satış Mühendisi olarak, çalışmaktadır.



Buket KÜYÜK