

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**CBS TABANLI DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA SİSTEMİ İLE
DENİZÜSTÜ RÜZGÂR SANTRALLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ:
KUZEY EGE ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

Arife Tuğsan İŞİAÇIK ÇOLAK

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşme ve Uzaktan Algılama Programı

AĞUSTOS 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**CBS TABANLI DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA SİSTEMİ İLE
DENİZÜSTÜ RÜZGÂR SANTRALLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ:
KUZEY EGE ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

**Arife Tuğsan İŞİAÇIK ÇOLAK
(705112006)**

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşme ve Uzaktan Algılama Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çiğdem GÖKSEL

AĞUSTOS 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 705112006 numaralı Doktora Öğrencisi Arife Tuğsan İŞİAÇIK ÇOLAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “CBS TABANLI DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA SİSTEMİ İLE DENİZÜSTÜ RÜZGÂR SANTRALLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: KUZEY EGE ÖRNEĞİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Çiğdem GÖKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Cengizhan İPBÜKER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Nesibe Necla ULUĞTEKİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Füsun BALIK ŞANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 21 Haziran 2021
Savunma Tarihi : 04 Ağustos 2021





Aileme ithafen,



ÖNSÖZ

Günümüzde artarak devam eden enerji ihtiyacının temel sebepleri, sanayileşme ve ticari faaliyetlerin öngörülemeyen gelişimi olarak değerlendirilmektedir. Ancak, enerji ihtiyacı karşılanırken ortaya çıkan maliyetler ve çevrenin gördüğü zarar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi beraberinde getirmiştir. Bu noktada şüphesiz rüzgâr enerjisi ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin jeopolitik ve Ege Denizi'nin kritik öneme sahip olması dolayısıyla rüzgâr santrallerinin mekânsal analizinin önemli bir soruna çözüm olacağı düşünülmüş, bu anlamda katkı vermek hedeflenmiştir.

“CBS Tabanlı Denizel Mekânsal Planlama Sistemi İle Denizüstü Rüzgâr Santrallerinin Değerlendirilmesi: Kuzey Ege Örneği” başlıklı tez çalışmasında her daim pozitif enerjisi ve vizyonu ile yardım, destek ve ilgisini esirgemeyen her şeyden önce değerli danışman hocam Prof. Dr. Çiğdem GÖKSEL'e, önerileri ve yönlendirmeleriyle yol açan değerli tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Cengizhan İPBÜKER'e ve Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, doktora çalışmam sırasında mesleki birikimlerinden yararlandığım Yük. Müh. Gizem ŞENEL'e, Yük. Müh. Hamid Reza SOLTANI'ye; İTÜ Denizcilik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT'e verdikleri katkılardan dolayı çok teşekkür ederim. Bugünlere ulaşmamda çok büyük emeği bulunan, hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu çalışma sırasında da desteklerini hiç eksik etmeyen sevgili annem ve babama, çalışmam boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen, eşim Kapt. Emre Erim ÇOLAK'a ve kendileriyle geçireceğim zamandan feragat eden kızım Tuğsan ve oğlum Ataman'a sonsuz teşekkür ederim...

Ağustos 2021

Arife Tuğsan İŞİAÇIK ÇOLAK



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi ve Bu Kaynaklara Yönelişin Nedenleri	2
1.2 Türkiye’de Yenilebilir Enerji Kaynakları	3
1.3 Türkiye’de Yenilebilir Enerji: Rüzgâr Enerjisi.....	5
1.4 Problemin Tanımı.....	5
1.5 Çalışmanın Amacı.....	6
1.6 Literatür Taraması	7
1.6.1 Açık deniz rüzgâr türbinlerinin mekânsal planlamasında CBS’nin kullanımı	7
1.6.2 Rüzgâr türbinlerinin alan seçiminde ÇÖKA kullanımı: AHP ve Fuzzy TOPSIS	12
1.6.3 Rüzgâr türbinlerinde enerji/ ekserji verimliliğinin önemi.....	14
2. AÇIK DENİZ RÜZGÂR ENERJİSİ.....	17
2.1 Rüzgâr Enerjisi.....	17
2.1.1 Rüzgâr türbin temel bileşenleri	17
2.1.2 Rüzgâr türbinleri, ilgili parametreler ve güç ifadesi	19
2.1.3 Rüzgâr enerjisini etkileyen faktörler	19
2.2 Deniz Üstü (Offshore) Rüzgâr Enerjisi.....	20
2.2.1 Rüzgâr türbinlerinin yer seçimine etki eden faktörler	21
2.2.2 Türbin ve temel seçimi.....	22
2.3 Açık Deniz ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Karşılaştırılması.....	23
2.4 Maliyet Hesaplanması ve Fizibilite.....	26
2.5 Çevreye ve Canlılara Etkisinin Değerlendirilmesi.....	27
2.6 Rüzgâr Enerjisi ve Enerji / Ekserji Verimliliği	29
2.6.1 Enerji ve ekserji tanımı	29
2.6.2 Enerji ve ekserji analizi.....	30
2.6.3 Enerji ve ekserji verimlilikleri	30
2.6.4 Açık deniz rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji analizi	31
3. DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA	35
3.1 Denizel Mekânsal Planlamada Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Önemi.....	38
3.2 Çok Ölçütlü Karar Analizi (ÇÖKA)	39

3.2.1 Analitik hiyerarşi yöntemi (Analytic hierarchy process, AHY)	43
3.2.2 Bulanık ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği (Bulanık TOPSIS)	44
3.2.2.1 Bulanık mantık	44
3.2.2.2 Bulanık TOPSIS	45
4. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER	49
4.1 Çalışma Alanı	49
4.1.1 Bozcaada	51
4.1.2 Gökçeada	53
4.1.3 Enez	55
4.1.4 Saros	57
4.2 Kuzey Ege Coğrafi Bilgi Sisteminin Oluşturulması	58
4.3 Çok Ölçütlü Karar Analizi için Ölçütlerin Belirlenmesi	59
4.3.1 Batimetri	61
4.3.2 Karasuları	61
4.3.3 Yasaklı Alanlar, Atış Sahaları ve Dalışa Yasak Sahalar	61
4.3.4 Rüzgâr verileri	62
4.3.5 Gemi rotaları, limanlar ve demirleme sahaları	63
4.3.6 Kıyıya Uzaklık	64
4.3.7 Gemi Batık ve Mayın Sahası Alanları	65
4.3.8 Yerleşim alanları	65
4.3.9 Deniz koruma alanlarına uzaklık	66
4.3.10 Trafo merkezlerine olan uzaklık	67
4.3.11 Fay hatlarına uzaklık	68
4.3.12 Denizaltı kabloları	68
5. KUZEY EGE DENİZİNDE AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBÜN KURULUMU İÇİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR ANALİZİ UYGULAMASI VE ENERJİ-EKSERJİ HESABI	71
5.1 AHY ile Kuzey Ege Denizi Çalışma Alanlarının Uygunluk Haritasının Oluşturulması	73
5.1.1 Verilerin hazırlanması ve sınıflandırılması	73
5.1.2 Analitik hiyerarşi yöntemi ile ağırlıkların belirlenmesi	75
5.1.3 Uygunluk haritasının oluşturulması	77
5.2 Bulanık TOPSIS ile Uygun Alanların Sıralanması	78
5.3 Enerji ve Ekserji Verimliliği	82
5.3.1 Açık deniz rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji analizi uygulama sonuçları ..	82
5.3.1.1 Bozcaada	82
5.3.1.2 Gökçeada	85
5.3.1.3 Enez	87
6. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	91
6.1 Tartışma	91
6.2 Sonuçların Değerlendirilmesi	94
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AHP	: Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarsi Prosesi)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
ÇÖKA	: Çok Ölçütlü Karar Analizi
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DMP	: Denizel Mekânsal Planlama
EEZ	: Exclusive Economic Zone (Münhasır Ekonomik Bölge)
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
ELECTRE	: Elemination and Choice Translating Reality English
FANP	: Fuzzy Analysis Network Process (Bulanık Analitik Ağ Prosesi)
FAHP	: Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Bulanık Analitik Hiyerarşı Prosesi)
FTOPSIS	: Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity of an Ideal Solution (Bulanık İdeal Çözümeye Dayalı Sıralama Tekniği)
GPS	: Global Positoning System (Küresel Konumlandırma Sistemleri)
GNSS	: Global Navigation Satellite System (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi)
IFS	: Intuitionistic Fuzzy Set (Sezgisel Bulanık Küme)
IRENA	: The International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
MADA	: Multiattribute Decision Analysis
MODA	: Multiobjective Decision Analysis
MSP	: Maritime Spatial Planning (Denizel Mekânsal Planlama)
NIS	: Negative Ideal Solution (Negatif İdeal Çözme)
OWA	: Order Weight Avarage (Sıralı Ağırlık Ortalama)

OWF	: Offshore Wind Farm (Açık Deniz Rüzgâr Çiftliği)
PIS	: Positive Ideal Solution (Pozitif İdeal Çözme)
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
SMAA	: Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis (Stokastik Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi)
TOPSIS	: Technique for Order Preference by Similarity of an Ideal Solution (İdeal Çözüme Benzerlik. Bakımından Sıralama Performansı Tekniği)
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

SEMBOLLER

A	: Alan
CO₂	: Karbondioksit
GW	: GigaWatt
GWh	: GigaWatt-saat
kg/m³	: Kilogram/metreküp
km	: Kilometre
km²	: Kilometrekare
kW	: KiloWatt
m	: Metre
m/s	: Metre/saat
m/sn	: Metre/saniye
MW	: MegaWatt
ρ	: Yoğunluk
P_o	: Rüzgâr Gücü
TWh	: TeraWatt-saat
V	: Hız



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü 2018-2019, GigaWatt (GW) [7].	4
Çizelge 2.1 : Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Avantajları.	24
Çizelge 2.2 : Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Dezavantajları.	25
Çizelge 2.3 : Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin deniz canlıları üzerinde etkileri [78].	29
Çizelge 3.1 : İkili karşılaştırma ölçeği [111].	42
Çizelge 3.2 : Ölçütlerin önem ağırlığının belirlenmesi için sözel değişkenler ve üçgen bulanık sayılar (Chen (2000)’dan uyarlanmıştır).	46
Çizelge 3.3 : Ölçüt derecelendirmeleri için sözel değişkenler (Chen (2000)’dan uyarlanmıştır).	47
Çizelge 4.1 : Bozcaada’da Ortalama Rüzgâr Hızı ve Ortalama Esme Sayısı.	53
Çizelge 4.2 : En Hızlı Esen Rüzgârın Yönü ve Hızı [121].	54
Çizelge 4.3 : Kuzey Ege Denizi Bilgi Sistemine dahil edilen ölçüt verileri.	59
Çizelge 4.4 : Farklı Coğrafi Alanlarda Yapılan Açık Deniz Türbin Konumlandırılmasında Kullanılan Kriter ve Limitleri.	60
Çizelge 4.5 : Çalışmada Kullanılan Kriterlerin Limitleri ve Harici Kriterler.	70
Çizelge 5.1 : Ölçütlerin derecelendirilmesi için belirlenen değerler.	75
Çizelge 5.2 : Offshore rüzgâr türbini alan seçimi için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi.	76
Çizelge 5.3 : Normalize edilmiş karşılaştırma matrisi ve ölçüt ağırlıkları.	76
Çizelge 5.4 : Bulanık karar matrisi.	78
Çizelge 5.5 : Normalleştirilmiş bulanık karar matrisi.	80
Çizelge 5.6 : Ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi.	80
Çizelge 5.7 : Alternatiflerin FPIS ve FNIS’e olan uzaklıkları.	81
Çizelge 5.8 : Alternatifler için hesaplanan yakınlık katsayısı değerleri ve alternatif sıralamaları.	81



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : CBS-ÇÖKA: girdi-çıktı perspektifi (Malczewski, 1999).	39
Şekil 3.2 : Karar probleminin hiyerarşik yapısı; aik k özniteliğinin (ölçüt) i alternatifine göre değeri ($k = 1, 2, 3$, ve $i = 1, 2, 3, 4$) (Malczewski ve Rinner (2015)'ten uyarlanmıştır).....	43
Şekil 3.3 : Üçgen bulanık sayı (Chen (2000)'dan uyarlanmıştır).....	46
Şekil 4.1 : Türkiye 50 m yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hız haritası [117].....	49
Şekil 4.2 : Çalışma alanı ve sınırları.....	50
Şekil 4.3 : Bozcaada bölgesi.....	52
Şekil 4.4 : Gökçeada bölgesi.....	55
Şekil 4.5 : Enez bölgesi.....	56
Şekil 4.6 : Saros bölgesi.....	57
Şekil 4.7 : Batimetri.....	61
Şekil 4.8 : (a) Askeri eğitim ve atış alanları ve (b) dalışa yasak sahaları.....	62
Şekil 4.9 : Rüzgâr hızı.....	63
Şekil 4.10 : (a) Gemi rotaları, (b) limanlar (c) demirleme sahaları.....	64
Şekil 4.11 : Gemi batık ve mayın sahası alanları.....	65
Şekil 4.12 : Yerleşim yerleri.....	66
Şekil 4.13 : Deniz koruma alanları.....	66
Şekil 4.14 : Trafo merkezleri.....	67
Şekil 4.15 : Fay hatları.....	68
Şekil 4.16 : Denizaltı kabloları.....	69
Şekil 5.1 : Çalışma akış diyagramı.....	72
Şekil 5.2 : Kısıtlama haritası.....	74
Şekil 5.3 : Uygunluk haritası.....	77
Şekil 5.4 : Bozcaada rüzgâr frekans diyagramı.....	83
Şekil 5.5 : Bozcaada ortalama güç ve hız diyagramı.....	83
Şekil 5.6 : Bozcaada enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.....	84
Şekil 5.7 : Bozcaada rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.....	84
Şekil 5.8 : Gökçeada rüzgâr frekans diyagramı.....	85
Şekil 5.9 : Gökçeada Ortalama Güç ve Hız Diyagramı.....	85
Şekil 5.10 : Gökçeada enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.....	86
Şekil 5.11 : Gökçeada rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.....	86
Şekil 5.12 : Enez rüzgâr frekans diyagramı.....	87
Şekil 5.13 : Enez ortalama güç ve hız diyagramı.....	88
Şekil 5.14 : Enez enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.....	88
Şekil 5.15 : Enez rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.....	89



CBS TABANLI DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA SİSTEMİ İLE DENİZÜSTÜ RÜZGÂR SANTRALLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: KUZEY EGE ÖRNEĞİ

ÖZET

İçinde bulunduğumuz yüzyıl daha önce benzerine rastlanmamış bir enerji ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bunun temel sebebi, hiç kuşkusuz ki sanayileşme ve endüstriyel faaliyetlerin öngörülemeyen gelişimidir. Teknolojinin hızı, süreci beslemiş, dolayısıyla kullanılan enerji kaynaklarının azalması ve tükenmesi konusu günümüzün en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Gereksinim duyulan enerjinin tükenebilir değil, yenilenebilir ve sürdürülebilir olması ile enerji kaynaklarının üretilmesi konusu birçok disiplinin enerji konusundaki çalışmalarında önemli bir araştırma alanı olmuştur. Özellikle, temiz ve tükenmeyen enerji olan rüzgâr enerjisi pek çok çalışmanın ve uygulamanın konusudur. Rüzgâr enerjisinden yararlanma konusundaki gelişmeler ve buna bağlı olarak çalışmaların ve yatırımların dünyada ve Türkiye’de paralel olduğu görülmektedir.

Türkiye’nin üç tarafının denizlerle çevrili olması, denizüstü rüzgâr santrallerinden yararlanabilme avantajını ön plana çıkartmaktadır. Türkiye denizlerinin jeopolitik önemi ve özellikle uluslararası anlamda kritik öneme sahip Ege Denizi’nin, deniz üstü rüzgâr santralleri konusundaki potansiyelinden yararlanmak için çok yönlü mekânsal analizlerin gerçekleştirilmesi önemli ve gerekli görülmektedir. Bu çalışmayla Türkiye’de, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanmak amacıyla ortalama rüzgâr potansiyeli yüksek, ancak, kısıt alanlarının da çok fazla olduğu Kuzey Ege Denizi’nde, rüzgâr enerji türbinlerinin konumlandırılacağı bölgelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, çalışmanın birincil hedefi: Türkiye’nin Kuzey Ege deniz sahasında, potansiyel rüzgâr türbin sahalarının yer tespitinin yapılması ve uygunluk alanlarının belirlenerek, bölge için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir Denizel Mekânsal Planlama Sistemi oluşturmaktır. Bu kapsamda, alternatif bölgelerin belirlenerek sıralandığı, CBS ve çok ölçütlü karar verme tekniklerinin kullanıldığı bir karar modeli uygulanmıştır. Çalışmanın ikincil hedefi ise, Kuzey Ege Denizi açık deniz türbinleri kurulumu için ideal alanların enerji verimliliğini ortaya koymak için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirmektir.

Çalışmanın ilk bölümünde, ‘Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi’ ve ‘Bu Kaynaklara Yönelişin Nedenleri’, ‘Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları’, ve ‘Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi’nin önemi açıklanmıştır.

İkinci bölümde, ‘Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi’, ‘Rüzgâr türbin temel bileşenleri’, ‘Rüzgâr enerjisini etkileyen faktörler’, ‘Açık Deniz Rüzgâr türbinlerinin yer seçimine etki eden faktörleri’, ‘Açık Deniz Türbinlerinin Çevreye ve Canlılara Etkisinin Değerlendirilmesi’ ve ‘Rüzgâr Enerjisi ve Enerji / Ekserji Verimliliği’ açıklanmış, ek olarak deniz ve kara ve rüzgâr türbinlerinin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, ‘Denizel Mekânsal Planlamanın’ amacı, ülkeler ve deniz alanları için önemi, denizden enerji elde etme konusundaki kapasitesi ve etkisi açıklanmıştır. Ayrıca, denizel mekânsal planlamada coğrafi bilgi sistemlerinin önemine yer verilmiştir. Bu bölümde, Çok Ölçütlü Karar Analizi (ÇÖKA) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşik Yöntem ve FTOPSIS (Bulanık İdeal Çözüme Dayalı Sıralama Tekniği) yöntemleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde çalışma alanı hakkında bilgi verilmiş ve Kuzey Ege Denizi’nin çalışma alanı olarak seçiminin temel nedenleri ele alınmıştır. Kuzey Ege’nin yüksek rüzgâr hızı kapasitesine sahip olması, adaların (Bozcaada ve Gökçeada) ana karaya yakın olmaları dikkate alınan ilk ölçütler olmuştur. Ayrıca, denizel mekânsal planlama sürecinde CBS-ÇÖKA yaklaşımında kullanılacak diğer ölçütler ile rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji verimliliğine esas olan veriler açıklanmıştır. Bu bölümde, Kuzey Ege Coğrafi Bilgi Sistemi veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanına aktarılan vektör ve raster veri formatındaki tüm veriler, belirlenen limitler ve kısıtlamalara göre analize hazır hale getirilmiştir. Farklı coğrafi alanlarda yapılan açık deniz türbin konumlandırılmasında kullanılan ölçüt ve limitler için yapılan literatür taraması, benzer kriterlerin farklı coğrafi alanlarda nasıl değerlendirildiği özet bir çizelge ile sunulmuştur.

Beşinci bölümde, gerçekleştirilen uygulama açıklanmıştır. Ayrıca, birden fazla alternatifin içinden seçim yapılmasının gerekli olduğu durumlarda kullanılan ÇÖKA yöntemlerinden bulanık mantığı kullanan Bulanık TOPSIS uygulanmıştır. Yapılan AHY ve bulanık TOPSIS uygulamaları sonrasında, Bozcaada Kuzey, Enez ve Gökçeada Güney, Batı ve Doğu alanları uygun bölgeler olarak tespit edilmiştir. Bulanık TOPSIS yöntemi ile de en uygun alan sırasıyla: Bozcaada, Enez Gökçeada Güney, Gökçeada Uğurlu Limanı ve Gökçeada Doğu olarak belirlenmiştir. Uygulamanın son adımında, açık deniz rüzgâr türbinlerinin konumlandırılacağı alanların enerji ve ekserji verimliliği hesaplanmıştır. Rüzgâr türbininin verimliliği ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiler, beş yıllık ortalama aylık rüzgâr, sıcaklık, basınç ve bağıl nem değerleri kullanılarak gösterilmiştir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimlilik performansı, HTW5.0-126 rüzgâr türbini modeli çalışma alanlarının açık deniz bölgesinde bulunduğu varsayılarak değerlendirilmiştir. Geniş aralıklı devreye girme ve devreden çıkma (cut in- cut out) hızları, yüksek gücü ve açık deniz için uygun olması açısından bu model seçilmiştir. Toplam enerji, ekserji ve türbinde üretilen toplam enerji hesabı yapılmıştır ve Bozcaada, Gökçeada ve Enez için belirli rüzgâr hızı aralığında enerji ve ekserji verimliliği ortaya konulmuştur.

Tez çalışmasının son bölümü olan Tartışma ve Sonuçların Değerlendirilmesi başlığında, Kuzey Ege Denizi’nde açık deniz rüzgâr türbinleri konusunda yapılan akademik çalışmalar ile ilgili karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmenin sonucunda; açık deniz rüzgâr türbinlerinin potansiyel alanlarının tespiti yapılırken, denizel mekânsal planlamanın vurgulamış olduğu; çoklu sektörel bakış açısı ile değerlendirilme yapılması ve mümkün olduğunca kullanılan ilgili ölçüt sayısının fazla olması gerekliliğinin önemi belirtilmiştir.

Kuzey Ege Denizi gibi stratejik öneme sahip, uluslararası denizcilik seyir hat yoğunluğu oldukça fazla olan, çevresel hassasiyeti yüksek bir deniz alanında; denizel mekânsal planlamanın gerekliliğine göre oluşturulmuş CBS veri tabanlı bütünleşik bir uygulama ile (ÇÖKA yöntemleri ile uygun yerleri belirleme, uygun yerlerin sıralanması ve son adımda çalışma bölgelerinin enerji ve ekserji verimlilik analizi)

doğruluğu ve uygunluğu yüksek açık deniz rüzgar türbinleri potansiyel alanları bu tez çalışması ile ortaya konmuştur.





EVALUATION OF OFFSHORE WIND TURBINE SITE SELECTION WITH GIS-BASED MARINE SPATIAL PLANNING SYSTEM: THE NORTH AEGEAN SEA

SUMMARY

The century we live in has created an unprecedented energy need. The main reason for this is the development of all kinds of industries and the point reached today. The enormous breakthrough in technology has fed the process, and the energy resources used have come face to face with the danger of extinction.

The largest energy source in the world is still fossil fuels. For millions of years, living species have decomposed to form fossil fuels with the effect of pressure. These resources have been used so far, and it looks like they will be used for a while. The depletion and reduction of resources have resulted in higher prices, and the excessive use of these fuels has adversely affected and continues to harm the environment. Fossil fuels are running out, which brings along the search for new energy.

However, the energy sought should be renewable rather than exhaustible. The new energy sources sought should be sustainable as well as renewable. Therefore, resources must be produced without risk. The energy that constantly uses natural resources for its production and can renew itself without depletion can only be obtained from natural resources. The energy expended in this direction would also pollute the environment at deficient levels; however, nature may easily absorb this pollution. The primary source of wind energy is the sun. While the energy sought is renewable and sustainable, the sun, the source of the continuity of life, is precisely the inexhaustible source sought.

As it is known, the sun's rays do not heat the sea and the land at the same level; this is because the heat-trapping capacities of the sea and the land are different. Wind also occurs due to the pressure difference between the sea and the land due to the temperature difference. Wind turbines are installed in areas with much wind and convert the movement energy of the wind into electrical energy.

Wind energy occurs according to many different variables, such as the earth's rotation and surface friction. Due to the unpredictability of these variables, renewable wind energy was not preferred until recently. The installation of wind turbines led to high costs. However, these costs have decreased incomparably over the years, and thanks to technological developments, the wind has become measurable, and today wind energy has become one of the most preferred energy types.

In parallel with the developments in the world, the developments in Turkey have been in a similar direction. The spatial analysis of wind power plants is thought to solve a fundamental problem because seas surround Turkey on three sides, and its geopolitical importance, especially the Aegean Sea, has critical importance, and this thesis aims at the stated purpose. The primary purpose of this study is to determine

the location of potential wind turbine sites in the North Aegean sea area of Turkey and determine their suitability areas to create a Geographical Information Systems-based marine spatial planning system for the region. A decision model has been proposed in which GIS and multi-criteria decision-making techniques are used together to determine alternative regions. The criteria with the determined vector data format were made using Geographic Information Systems software. In this study, while multi-criteria decision-making techniques were used to evaluate and compare the criteria, the Fuzzy TOPSIS method was used to compare the Gökçeada, Bozcaada and Enez study areas with each other and to determine the ideal area.

The main reasons for selecting this study area are the high wind speed capacity of the North Aegean Sea, the proximity of Bozcaada and Gökçeada to the mainland, and the compliance of these regions with various criteria specified in the study. However, deploying offshore wind turbines to the sea and putting the system into operation are costly investments. The necessary step to establish wind power plants in the offshore area is to ensure the efficiency of the energy to be obtained.

In the last step of the study, the exergy and energy efficiency analysis to be obtained from the system on a selected sample turbine is made. For the calculation of efficiencies, five-year meteorological parameter data of the determined stations were also used.

The first part of the study, 'Importance of Renewable Energy Sources' and 'Reasons for These Sources', 'Renewable Energy Sources in Turkey', and 'Wind Energy in Turkey' are explained.

In the second part of the study, 'Offshore Wind Energy', 'Wind turbine main components', 'Factors affecting wind energy', 'Factors affecting the location of Offshore Wind turbines' are discussed, and 'Evaluation of the Impact of Offshore Tribunes on the Environment and Living Organisms' and 'Offshore Energy and Exergy Efficiency' are evaluated. At the end of the chapter, the advantages and disadvantages of onshore and offshore wind turbines are compared.

In the third chapter, the purpose of 'Marine Spatial Planning', its formation, the importance of maritime spatial planning for countries, the importance of maritime spatial planning in terms of energy extraction from the sea are explained. Next; The importance of geographic information systems in marine spatial planning is given. In this study, GIS and multi-criteria decision making in the determination of alternative regions are the goals, since it is aimed to establish a Geographical Information Systems (GIS)-based marine spatial planning system for the region by determining the location of potential wind turbine sites and determining the appropriate areas in the North Aegean sea area of Turkey. A decision model has been proposed in which decision-making techniques (Analytical Hierarchy Process) are used together.

In the fourth chapter, firstly, the criteria to be used in the GIS-MCDA approach in the marine spatial planning process and the data required to prepare these criteria in the form of GIS layers and the data used to calculate wind turbine energy and exergy efficiency are explained. In the continuation of the fourth chapter, the data used in the study, the excluded areas and the criteria are explained one by one. The Criteria and Limits Used in Offshore Tribune Positioning in Different Geographical Areas literature review has been made, and how similar criteria are evaluated in different geographical areas is presented with a table. At the end of the fourth chapter, the Criteria, Limitation Limit, Ideal Value and Condition chart used in this study are

presented for each parameter, and only the criteria used in the articles published on the positioning of the North Aegean Sea wind turbines are also cited.

In the fifth chapter, the criteria with the determined vector data format are made using GIS software. In addition, Fuzzy TOPSIS, one of the MCDA methods, is applied for the wind power plant location selection to ensure that the decision is made more accurate when choosing from more than one alternative. The methodology applied in AHP is divided into three stages. The first phase is the data collection phase, which includes creating a GIS system and depicting information in different thematic layers. After data collection was completed, all thematic layers were mirrored in WGS84, UTM Zone 35 to ensure data integration. Also, vector layers have been converted to raster format for further analysis. The second phase, the exclusion step, includes removing non-conforming areas and applying surface restrictions according to the exclusion criteria. In the next step, the transition of the areas deemed appropriate in the previous stage to the evaluation stage was evaluated with a series of criteria (evaluation criteria). In the last step, a pairwise comparison matrix was made, and the relative weights of the criteria were calculated. Based on the calculated weights, a suitability map was generated for offshore wind farms using a weighted overlay tool in ArcMap 10.6 software.

First of all, relevant alternative fields and criteria are defined. Alternative areas are defined as Enez, Gökçeada South, Gökçeada East and Gökçeada West, and Bozcaada. The criteria is defined as seven criteria used in the AHP analysis. Accordingly, a fuzzy decision matrix is created by using the verbal triangular numbers defined for the grading of the criteria.

After the AHP and fuzzy TOPSIS applications, Bozcaada North, Enez and Gökçeada South, West and East areas are determined as suitable regions. With the fuzzy TOPSIS method, the most suitable area is concluded respectively as Bozcaada, Enez, Gökçeada South, Gökçeada Uğurlu Harbor and Gökçeada West.

End of fifth Chapter, as last step; the energy and exergy efficiency of the areas where offshore wind turbines locations are calculated. The relationships between the efficiency of the wind turbine and the meteorological variables are shown using the five-year average monthly wind, temperature, pressure and relative humidity values. The efficiency performance of wind energy systems has been evaluated assuming that the HTW5.0-126 wind turbine model study areas are located in the offshore region. This model has been chosen for its wide range of cut in cut out speeds, high power and suitability for the open sea. Total energy and exergy and total energy produced in the turbine are calculated. As a result of the analysis, energy and exergy efficiency are revealed in a certain wind speed range for Bozcaada, Gökçeada and Enez.

In the last part of the thesis, comparative evaluations were made about academic studies on offshore wind turbines in the North Aegean Sea. As a result of the evaluation; While determining the potential areas of offshore wind turbines, marine spatial planning emphasized; The importance of making an evaluation with a multi-sectoral perspective and the necessity of having as many relevant criteria used as possible were emphasized.

In a maritime area of strategic importance, such as the North Aegean Sea, with a high density of international maritime cruise lines, and high environmental sensitivity; Potential areas of offshore wind turbines with high accuracy and suitability have been determined with an integrated application with a GIS database created

according to the necessity of marine spatial planning (determining suitable places with MCCA methods, ordering suitable places, and energy and exergy efficiency analysis of the working areas in the last step) with this thesis study.



1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki öngörülemeyen artış, teknolojiideki gelişmeler ve bu doğrultuda sanayileşmenin geldiği nokta, enerjiye olan ihtiyacın süratle ve yükselerek artmasının temel sebepleri olarak değerlendirilmektedir. Sanayileşmenin ve endüstriyel faaliyetlerin çoğalmasıyla artan enerji talebi, mevcut enerji kaynaklarının hızla ve doğa/çevre düşünülmeden tüketilmesine neden olmaktadır.

Enerji kaynakları kullanılış biçimlerine ve dönüştürülebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanılışlarına yönelik olarak yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları; dönüştürülebilme özelliklerine göre ise birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak ayrılmaktadır. Enerji değişim ya da dönüşüme uğramamış ise birincil (primer) enerji olarak isimlendirilmektedir. Birincil enerji kaynakları; nükleer, hidrolik, petrol, kömür, doğal gaz, su, biokütle, dalga, gelgit, güneş ve rüzgârdır. Doğada enerji direkt olarak; kömür, petrol, doğalgaz, jeotermal, su, güneş, rüzgâr, uranyum, biyoyakıt, olarak isimlendirilen “birincil enerji” kaynaklarından elde edilmektedir. Bu enerji kaynaklarından, petrol, doğalgaz ve kömür, fosil kaynaklıdır, diğerleri ise yenilenebilir enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları dönüştürülerek ikincil enerji kaynağı olan “elektrik” üretilmektedir [1]. Enerji talebinin büyük bir kısmını karşılayan petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanımı son yüzyılda önemli ölçüde artmıştır. Ancak, bu yakıtların kullanımı, küresel olarak ortalama sıcaklığın artması, tükenmesi ve ozon tabakasının delinmesi ve doğanın ve çevrenin kirlenmesi, iklim krizinin de etkisiyle dünyada önemli çevre sorunlarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi ve Bu Kaynaklara Yönelişin Nedenleri

Yenilenebilir enerji, doğada var olan ve sürekli tekrarlanan güneş, jeotermal, dalga, rüzgâr gibi doğal süreçler kullanılarak elde edilen temiz enerjidir. Fosil enerji kaynaklarının aksine, temiz enerji kaynakları tükenmez ve sürdürülebilir. Yenilenebilir enerji, çevresel, ekonomik ve sosyal sorunların çözümü nedeniyle sürdürülebilir kalkınmada önemli bir yere sahipken, fosil yakıtların neden olduğu sorunlara etkin bir çözümdür.

1970'lerden bu yana, dünya çapındaki enerji krizleri, enerji güvenliği konusundaki endişeleri artırmış ve ülkeleri sınırlı fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynakları aramaya yönlendirmiştir. Bu bağlamda, yaşanan petrol krizleri bir yandan ülkeleri birincil enerji kaynaklarının sınırlı olduğu gerçeğiyle yüzleştirirken, diğer yandan dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı daha fazla ilgiye yol açmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle fosil kökenli enerji kaynakları açısından zengin olmayan ülkelerin gündemlerinde de yer almaya başlamıştır.

Atmosferde mevcut olan sera gazları birikiminde, insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan artışlar, küresel ısınmaya neden olmaktadır. Sera gazları ağırlıklı olarak enerji üretiminden geldiğinden, enerjinin hangi kaynaktan geldiği ve nasıl tüketildiği sorusu iklim politikasında oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Küresel sera gazı emisyonlarının üçte ikisine neden olan enerji sektörü, iklim koruma hedeflerine ulaşılmasında kilit rol oynamaktadır [2].

Fosil yakıtların çevreye etkisi ve tükenebilir olmaları, insanları çevre dostu ve sınırlı bir ömrü olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bunlar kaynağı herhangi bir maddeye bağlı olmayan doğal enerji kaynaklarıdır ve büyük bir bölümü güneş enerjisinin form değiştirmesi ile meydana gelmektedir [3].

Rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen enerjisi, dalga enerjisi, biokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji türlerinden dünyada en hızlı yükselen enerji çeşidi; rüzgâr enerjisi olarak değerlendirilmektedir. Avrupa Birliği (AB) perspektifinde de öne çıkan çevre konusunda rüzgâr enerjisi, sürdürülebilir olmasının yanı sıra, çevre dostu niteliği ile önemli bir kaynaktır. Son yıllarda, rüzgâr enerji sistemlerinin yüksek potansiyeli nedeniyle pek çok

araştırmanın konusu olmuş ve rüzgâr türbini enerjisi, ekserji ve ekonomik analiz alanında çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [9;10].

Rüzgâr enerjisi mevcut durumu, potansiyeli ve dünya genelinde gelecekteki yararlanılabilirliği için tespitler aşağıda ifade edilmektedir.

Küresel rüzgâr endüstrisi için 2020 yılı, yıllık % 53 artışla ve kurulmuş 93 GW'lık yeni kapasite ile en iyi yıl olmuştur. Günümüz itibari ile dünya çapında 743 GW'lık rüzgâr enerjisi kapasitesinden yararlanılmaktadır [4].

Küresel açık deniz rüzgâr piyasası 2024 yılına kadar ortalama % 18,6 ve on yılın sonuna kadar % 8,2'lik ortalama yıllık büyüme hızıyla, yeni yıllık kurulumların 2025'te 20 GW ve 2030'da 30 GW'ı aşması beklenmektedir. 2019 yılında, deniz üstü rüzgâr türbinleri, küresel yeni rüzgâr enerjisi tesislerinin % 10'unu oluşturmaktayken, küresel açık deniz rüzgâr sektörüne, önümüzdeki on yıl içinde 205 GW'ın üzerinde yeni açık deniz rüzgâr kapasitesinin ekleneceği beklenmektedir [4].

Dünyanın en büyük bölgesel açık deniz rüzgâr pazarı olan Avrupa'da, açık deniz rüzgâr türbinleri için 2050 yılı planında 450 GW öngörülmekte ve bu kapasitenin de Avrupa elektriğinin % 30'unu karşılayacağı beklenmektedir. 2050'deki 450 GW hedefinin % 85'lik dilimi Kuzey Denizine aittir.

2050 yılında, AB'nin istikrarlı büyümeyi sürdürmesi beklenmektedir. Ancak Avrupa dışındaki, ağırlıklı olarak Asya ve Kuzey Amerika'dan gelen yeni kurulumların 2020 yılında ilk kez Avrupa'yı geçmesi ve 2030 yılına kadar Avrupa'daki hacmi aşmaya devam etmesi beklenilmektedir. Beklenti, yakın vadede (2020-2024), Avrupa dışındaki büyümenin çoğunluğunun Çin ve Tayvan tarafından olacağı; 2024 yılından itibaren ise Açık Deniz Projesinin faaliyete geçmesiyle ABD'nin de, bu büyümenin içinde olacağı yönündedir [5].

1.2 Türkiye'de Yenilebilir Enerji Kaynakları

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (The International Renewable Energy Agency-IRENA) 2020 Yılı Yenilenebilir Enerji İstatistikleri Raporu'nda, Türkiye'de toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2010 yılında 17 bin 369 MegaWatt (MW) olarak saptanırken, 2019 yılında bu değerin 44 bin 587 MW'a yükselmiş olduğu tespit edilmiştir. 2019 yılı kapasite verilerine göre Türkiye'de hidroelektrik kapasitesi 28 bin 503 MW, rüzgâr enerjisi 7 bin 591 MW, güneş enerjisi 5 bin 996

MW, biyoenerji 983 MW, biyogaz 534 MW, jeotermal 1.515 MW olarak ifade edilmiştir [6].

Türkiye'nin 2019 yılında tespit edilen kurulu gücü 90 bin MW'a ulaşmıştır. Bu kurulu gücün yarısı yenilenebilir enerji kaynaklarından, % 15'lik kısmı ise güneş ve rüzgâr enerjisinden sağlanmaktadır. Türkiye'nin, 2019 yılında; güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kurulu gücünün % 20'ye yakın olduğu, küresel jeotermal kurulu güç sıralamasında dünyada 4. sırada olduğu, toplam küresel hidroelektrik kapasite içerisinde ise % 3'lük payı ile dünyada 9. sırada yer aldığı görülmektedir. Türkiye, güneş enerjisinde Çin ve ABD'den sonra 3. sırada yer alırken, güneş enerjisiyle su ısıtmak için 2019'da artırılan yeni kapasitede ise dünyada Çin'den sonra 2. sırada bulunmaktadır [7]. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanma kapasitesi Çizelge 1.1'de sunulmuştur [8].

Çizelge 1.1 : Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücü 2018-2019, GigaWatt (GW) [7].

	Güneş	Rüzgâr	Hidrolik	Biyokütle	Jeotermal	Toplam
2018	5.098	6.994	28.292	670	1.282	42.338
2019	5.995	7.591	28.503	801	1.514	44.405
2018-2019 Değişim Oranı (%)	17,58	8,53	0,74	19,62	18,10	4,65
Genel Kurulu Güç İçindeki Oranı (%)	6,57	8,32	31,23	0,88	1,66	48,65

2020 Dünya Enerji İstatistikleri Raporu (Statistical Review of World Energy 2020)'na göre; Türkiye, 2019 yılında toplam 45,3 teravat-saatlik (TWh) elektrik üretimini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamıştır ve elektrik üretimindeki büyüme oranı % 20'ye ulaşmıştır. Türkiye'de 2019 yılında, rüzgâr enerjisi ile 21,7 TWh elektrik üretilmiştir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına bakıldığında; rüzgâr enerjisi ilk sırada yer alırken, 12,7 TWh elektrik üretimiyle jeotermal enerji ve biokütle enerjisi ikinci sırada, toplamda 10,9 TWh'lik üretimle güneş enerjisi ise üçüncü sırada yer almıştır [9].

1.3 Türkiye’de Yenilebilir Enerji: Rüzgâr Enerjisi

Türkiye’nin rüzgâr enerji potansiyelinin mevcudiyeti, enerjide dışa bağımlılığının azaltılması ve AB üyeliğine aday olunması nedeniyle sınırsız ve sürdürülebilir rüzgâr enerjisi teminine ihtiyacı beraberinde getirmektedir. Son yıllarda kurulan ve işletilen rüzgâr enerjisi türbinleri birçok ülkede alternatif enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [10].

Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının arasında rüzgâr enerjisi, Türkiye'nin coğrafi konumundan dolayı büyük bir potansiyele sahiptir [11]. Türkiye de açık deniz rüzgâr enerjisi planı olan ülke konumundadır. Buna uygun olarak da bir rüzgâr enerjisi planına sahiptir. Türkiye toplam kurulu güç kapasitesi açısından Avrupa'nın ilk altı ülkesi ve dünyanın ilk yirmi ülkesi arasında yer almaktadır [12]. 2023 yılına kadar 20 GW kurulu rüzgâr gücü kapasitesine ulaşması hedeflenmektedir [13]. 2020 yılı sonu itibari ile Türkiye’de toplam kurulu güç rüzgâr enerjisi 8.288 MW’tır. İşletmedeki rüzgâr enerji santral sayısı 197, kurulu türbin sayısı 3.351, inşa halindeki rüzgâr enerji santrallerinin sayısı ise 53’tür. 2020 ilk altı aylık üretim oranı % 8,52 olarak belirlenmiştir [14].

1.4 Problemin Tanımı

Üç tarafı denizler ile kaplı olan ve dolayısıyla açık deniz rüzgâr santralleri için büyük avantajı olan Türkiye’nin; çok yönlü kurgulanmış mekânsal bir bilgi sistemi içinde değerlendirilerek çalışılmış, açık deniz rüzgâr türbinleri için potansiyeli yüksek olan alanların belirlenmesine ihtiyacı olduğu açıktır. Hâlihazırda, Türkiye’de henüz gerçekleştirilmiş veya projelendirilmiş bir açık deniz rüzgâr santrali projesi bulunmamaktadır. Çevreyi gözeterek, denizlerimizden enerji de dâhil olmak üzere maksimum verim sağlayabilmek için, açık deniz rüzgâr türbin kurulum projelerinin tartışılması, çalışılması ve projelendirilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, konumlandırılacak açık deniz rüzgâr çiftliklerinin, denizciliğin farklı sektörleriyle, çevre koruma kanunları ile insan ya da herhangi bir canlıya zarar vermeyecek şekilde ve ülke komşulukları bağlamında siyasi ve hukuki bir ihtilafa sebebiyet vermeksizin yapılması esas olmalıdır.

1.5 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın genel amacı, Türkiye’de, yenilenebilir enerjiden daha fazla yararlanmak maksadıyla ortalama rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu Kuzey Ege Denizinde CBS Tabanlı Denizel Mekânsal Planlama Sistemi ile Denizüstü Rüzgâr Santrallerinin konumlandırılacağı bölgelerin belirlenmesi ve enerji verimliliğinin saptanmasıdır.

Bu çalışmanın birincil hedefi; Kuzey Ege Deniz sahasında, kısıtlı alanların çalışma alanından hariç tutularak, rüzgâr türbinleri için potansiyel yerlerin belirlenmesi ve bu amaca koşut olarak Kuzey Ege için Denizel Mekânsal bir bilgi sistemi oluşturmaktır. Potansiyel bölgelerin belirlenmesinde, CBS ve çok ölçütlü karar verme tekniklerinin beraber kullanıldığı bir karar modeli kullanılmıştır.

Açık deniz alanına rüzgâr santrallerinin kurulması için, elde edilecek enerjinin verimliliğinin değerlendirilmesi gereklidir. Bu bağlamda bu çalışmanın ikincil hedefi; seçilmiş olan en ideal rüzgâr türbin modeli ile rüzgâr hızı, sıcaklık ve bağıl nem verileri de kullanılarak çalışma alanının enerji ve ekserji potansiyelini ortaya koymaktır.

Çalışma kapsamında, Kuzey Ege Denizi’ne konumlandırılacak rüzgâr enerji santralleri ile ilgili değerlendirmeye esas olan ölçütler ve kısıtlar, denizel mekânsal planlama bağlamında çok yönlü olarak ele alınmış ve uygulanmıştır. Batimetri, rüzgâr hızı, gemi rotalarına uzaklık, sualtı kablo ve boru hatlarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya uzaklık, limanlara yakınlık, trafo merkezlerine uzaklık, demirleme alanı, fay hattına uzaklık, gemi batıklarına ve mayınlı sahalara uzaklık, eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahalara ve Saros Koruma Bölgesi değerlendirme ve kısıtlama ölçütleri olarak belirlenmiştir. Ölçüt ağırlıklarının belirlenmesi için AHY’den yararlanılmış ve AHY sonucunda elde edilen potansiyel alanların sıralanması için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Potansiyel rüzgâr türbini alanları için seçilen türbin modeli üzerinden ilgili istasyonların meteorolojik parametreleri de kullanılarak sistemden elde edilecek ekserji ve enerji verimliliği analizi gerçekleştirilmiştir.

1.6 Literatür Taraması

Bu tez kapsamında literatür çalışması üç alt başlık gözetilerek yapılmıştır. Bunlar: “Açık Deniz Rüzgâr Türbinlerinin Mekânsal Planlamasında CBS’nin Kullanımı”, “Rüzgâr Türbinlerinin Alan Seçiminde Çok Kriterli Karar Analizi Kullanımı: AHY ve Fuzzy TOPSIS” ve “Rüzgâr Türbinlerinde Enerji/ Ekserji Verimliliğinin Önemi” şeklindedir.

1.6.1 Açık deniz rüzgâr türbinlerinin mekânsal planlamasında CBS’nin kullanımı

Vagiona ve Karanikolas (2012) Yunanistan’da açık denizin en verimli alanlarını, deniz üstü rüzgâr türbinlerinin kurulumu için araştırmışlar ve çalışmalarında Çok Kriterli Karar Analizi (ÇÖKA) yöntemlerinden AHY’yi, CBS ile entegre etmişlerdir. Bu kapsamda ilk olarak; 6 m/s’den az rüzgâr hızı olan alanları, koruma alanlarını ve derinliğin 30 metre (m)’nin üstünde olduğu bölgeleri çalışma alanlarının dışında tutmuşlardır. Değerlendirme ölçütlerini ise ortalama rüzgâr hızı, koruma alanlarına uzaklık, gemi güzergâhlarına uzaklık, kıyıya uzaklık ve elektrik şebekelerine uzaklık olarak belirlemişler ve ikili karşılaştırma yöntemi ile ağırlıklandırmışlardır. CBS ortamında oluşturdukları harita sonucu, on adet bölge arasından yaptıkları değerlendirmede, deniz üstü rüzgâr santrallerinin kurulumu için en iyi üç seçeneği belirlemişlerdir [15].

Vasileiou vd., (2017) çalışmalarında, Yunanistan’da hibrit açık deniz rüzgâr ve dalga enerji sistemlerinin kurulumu için uygun alanların belirlenmesinde AHY ve CBS’yi birlikte kullanmışlardır. Çalışmalarında; askeri alanları, petrol ve doğalgaz arama alanlarını, açık deniz yenilenebilir enerji projelerinin kurulmuş ya da planlanmış olduğu alanları, koruma alanlarını, rüzgâr hızının 6 m/s’den az olduğu alanları, dalga enerji potansiyelinin 5 kW/m’den az olduğu alanları, derinliğin 500 m’den fazla olduğu alanları ve kıyıdan uzaklığı 25 km’den az olan alanları değerlendirmeye almamışlardır. Kriterleri ise rüzgâr hızı, dalga enerjisi potansiyeli, deniz derinliği, kıyıya uzaklık, elektrik şebekesine uzaklık, nüfus, deniz trafik yoğunluğu ve limanlara uzaklık olarak belirlemişlerdir. İkili karşılaştırmalar ile ölçütlerin önceliklerini belirlemişler ve ağırlıklarını hesaplamışlardır. CBS ortamında oluşturdukları uygun olmayan alanların dışında kalan alanlar içerisinde, ileri değerlendirme için aday olan on iki uygun alanı hibrit rüzgâr ve dalga sistemlerinin

yerleştirilmesine ilişkin tercih sırasını belirlemek için; mevcut rüzgâr hızı, dalga enerjisi potansiyeli ve derinlik olarak ağırlıkları en fazla olan en önemli üç değerlendirme ölçütünü kategorilere ayırmışlardır. Kriterlerin uygun alanlar üzerindeki etkilerine göre en uygun alandan en az uygun alana doğru sıralamışlardır [16].

Mahdy ve Bahaj (2018) çalışmalarında, CBS tabanlı ÇÖKA yöntemleri ile Mısır'da deniz üstü rüzgâr santrallerinin kurulumu için en uygun alanları araştırmışlardır. Öncelikle Kızıldeniz'deki deniz yollarını, limanları, askeri bölgeleri, koruma alanlarını, kablo ve boru hatlarını, balıkçılık alanlarını ve petrol ve doğalgaz çıkarma alanlarını çalışma alanlarının dışında tutmuşlardır. Kriterlerini ise derinlik, deniz tabanı çökel tipleri, rüzgâr yoğunluğu, kıyıya uzaklık ve elektrik şebekesine uzaklık olarak belirlemişler ve ikili karşılaştırmalar ile ağırlıklandırmışlardır. CBS için hazırlanan veri katmanları ile Ağırlıklı Doğrusal Birleştirme yöntemi kullanılarak uygunluk haritası elde etmişler ve Kızıldeniz çevresinde kurulabilir uygun alanların olduğunu tespit etmişlerdir [17].

Gavériaux vd., (2019) deniz üstü rüzgâr türbininin yerleştirilmesi için çalışma alanı olarak Hong Kong Körfezi'ni belirlemişler ve yöntem olarak CBS ve ÇÖKA'yı kullanmışlardır. Çalışmada ilk olarak, deniz üstü rüzgâr santrallerinin kurulumuna uygun olmayan alanları; denizaltı kablolarının bulunduğu yerler, demirleme alanları, balıkçılık alanları, yasak bölgeler, çamur bertaraf alanı ve koruma alanları olarak belirlemişler ve çalışma alanlarına özgü teknik, sosyo-ekonomik ve çevresel kısıtlamalar oluşturmuşlardır. Kriterlerini ise kıyıdan uzaklık, flora ve fauna alanlarına uzaklık, sosyal alanlara uzaklık, limanlara uzaklık, balıkçılık alanlarına uzaklık, elektrik şebekesine uzaklık, rüzgâr hızı ve derinlik olarak belirlemişler ve ikili karşılaştırma yöntemi ile ağırlıklandırmışlardır. CBS ortamında ağırlıklı ölçüt katmanları ile elde ettikleri haritayı; uygun olmayan alanlar, daha az uygun, uygun, çok uygun ve son derece uygun alanlar olarak beş farklı uygunluk derecesine ayırmışlardır. Ayrıca, çalışmalarında kullandıkları yöntem güncellenebilir olduğundan deniz tabanı özellikleri gibi ek ölçütlerin de eklenebileceğini vurgulamışlardır [18].

Sofia vd., (2020)'nin yaptıkları çalışmada, Yunanistan'daki sığ sularda açık deniz rüzgâr türbinlerinin verimli bir şekilde geliştirilmesine odaklanılmaktadır. Entegre bir mekânsal enerji planlama yaklaşımı ile önerilen yöntem CBS kullanılarak, ulusal

mekânsal planlama ölçeğinde uygulanmıştır. Çalışma dört farklı aşamadan oluşmaktadır:

1. Sahadaki açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun alanların belirlenmesi (makro konumlandırma yapılandırması),
2. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin temel teknik özelliklerinin yanı sıra açık deniz rüzgârının mikro konumlandırma yapılandırmalarının belirlenmesi,
3. Her bir potansiyel açık deniz rüzgâr projesinin toplam yatırım maliyetinin tahmin edilmesi,
4. Özel değerlendirme ölçütlerine göre açık deniz rüzgâr türbinleri için en uygun potansiyel sahaların önceliklendirilmesi.

Önerilen yöntemin nihai sonuçları, bir deniz sahası uygunluk endeksinin geliştirilmesi ve bu endekste açık deniz rüzgâr türbini konumlandırması için farklı politika yönelimlerinin etkilerinin değerlendirilmesidir. Bu çalışmada; genel uygunluk endeksinin, potansiyel sahaların uzman kararlarının özneliği konusundaki sağlamlığını test etmek ve böylece önerilen yöntemin güvenilirliğini değerlendirmek senaryolar uygulanmıştır [19].

Al-Shabeeb vd., (2016)'nin yapmış oldukları çalışmanın amacı: Ürdün'ün kuzeybatısındaki rüzgâr türbini için potansiyel alanları belirlemek ve etkili bir CBS ile seçilen sahaların rüzgâr türbini için kullanılması halinde Ürdün'deki mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesidir. AHY, rüzgâr türbini sahalarını etkileyen beş fiziksel ölçüte (rüzgâr hızı, yağış, eğim, yükseklik ve arazi kullanımı) dayalı olarak çalışma alanındaki rüzgâr türbini için potansiyel sahaları belirlemek için yeni bir yaklaşım kullanılmıştır. Her bir ölçütün önemi, uzmanların görüşlerine dayanmaktadır. Her bir ölçüt için derecelendirmeler, mevcut literatür taramasına dayanmaktadır. Uzman görüşleri arasındaki tutarlılık oranı ikili karşılaştırma yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve her bir ölçüt için bir nihai ağırlık hesaplanmıştır. CBS ortamında ağırlıklı doğrusal kombinasyon ÇÖKA yöntemi kullanılarak bir rüzgâr türbini uygunluk haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanının % 45'inin yüksek ve çok yüksek rüzgâr türbini uygunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir [20].

Villacreses, vd. (2017)'nin çalışmalarında, Ekvator'da rüzgâr santralleri kurmak için en uygun yeri seçmek için çok ölçütlü karar verme yöntemlerine sahip bir CBS

uygulamak ve kurulacak rüzgâr enerji santralleri için en uygun bölge seçimini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çok ölçütlü karar verme yöntemleri arasındaki karşılıklı ilişkileri analiz etmek için Pearson korelasyon katsayısını kullanmışlardır. Bu araştırmada, meteorolojik parametreler (rüzgâr hızı, hava yoğunluğu), kabartma (eğim), lokasyon (trafo merkezlerine uzaklıklar, yol ağı, kentsel alanlar, iletim hatları, şarj noktaları) ve çevresel parametreler (bitki örtüsü) gibi farklı seçim ölçütleri dikkate alınmıştır. Değerlendirme sonucunda, en yüksek genel performans indeksi ile kurulum için en uygun bölge olduğu belirlenmiştir. Bu makalede, AHY, farklı yerlerde rüzgâr türbinleri kurmak için ölçütlerin ağırlığını hesaplamak için kullanılmıştır. Çalışma sonucu olarak çok ölçütlü karar verme yönteminin rüzgâr türbinleri için ideal lokasyonları seçmek için güçlü bir araç olduğunu göstermektedir [21].

Atıcı, vd., (2015) rüzgâr enerjisi santralleri için saha seçimi problemlerini ele almakta ve en uygun sahaların belirlenmesi için yapısal bir prosedür önermeyi amaçlamaktadır. Uygulama alanı Türkiye'nin batısıdır. Metodoloji esas olarak iki aşamadan oluşmaktadır: İlk aşama, uygun olmayan alanların önceden ortadan kaldırılması ve ikinci aşama, mevcut olanların değerlendirilmesidir. CBS, veri katmanları oluşturmak ve eleme ölçütlerini ve kısıtlamaları uygulamak için kullanılır. Alternatif kara alanları, her biri bir rüzgâr türbini kurmaya yetecek kadar büyük olan aynı boyutlu ızgaralar açısından ele alınır. Problem, sırayla çeşitli hücrelerin bir araya getirildiği 13 alanda değerlendirilmiştir. Uygun bölgelerin sıralanmasında Elimination and Choice Translating Reality English (ELECTRE) ve Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis (SMAA) yöntemleri kullanılmıştır [22].

Al-Yahyai ve diğerleri (2012) Umman'da ÇÖKA kullanarak rüzgâr tarlaları için uygunluk indeksi oluşturma uygulaması yapmışlardır. Rüzgâr çiftliği konumlandırması, bir dizi alternatif yer ve bir dizi seçim ölçütlerinden oluşan ÇÖKA problemi olarak düşünülebilir. Bu çalışmada, CBS ortamında rüzgâr çiftliği arazi uygunluk indeksi ve sınıflandırması elde etmek için AHP-OWA (Order Weight Avarage) Sıralı Ağırlık Ortalama toplama fonksiyonu ile AHY kullanılarak çok ölçütlü karar verme yaklaşımı uygulanmış, rüzgâr tarlaları için uygunluk indeksi türetilmiş ve CBS ortamında sınıflandırılmıştır. Bölge CBS ile çok uygun, orta derecede uygun, çok az uygun ve uygun değil şeklinde dört sınıfa ayrılmıştır. Son

olarak farklı yüksekliklerdeki değerlere göre sınıfların kapladığı alanlardaki değişim yüzdeleri yorumlanmıştır [23].

Santos vd., (2020) alışmalarında yüzen bir açık deniz rüzgâr türbininin geliştirilmesinde CBS mekânsal analiz yöntemlerini kullanan bir metodoloji geliştirmeyi amaçlamıştır. Yüzen bir açık deniz rüzgâr türbini planlanmasında, rüzgâr kaynağının yüksek olduğu alanları belirlemenin önemi ve açık deniz rüzgâr türbininin fizibilitesi açısından ekonomik sonuçları ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, bazı kısıtlamaların (çevresel alanlar, seyrüsefer kısıtlı alanları, derinlikler, limanlar, tersaneler, vb.) açık denizde yüzen rüzgâr türbinini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bu alışma, kara rüzgârı konusunda tecrübeye sahip bir bölge olan Galiçya bölgesi (İspanya'nın kuzeybatısı) için uygulanmıştır [24].

Tercan vd. (2020)'i açık deniz rüzgâr türbinleri için yer seçimi, rüzgâr hızı, su derinliği, sahil şeritleri, balıkçılık alanları, nakliye yolları, çevre koruma alanları, ulaşım ve askeri bölgeler gibi parametrelerin ortaklaşa araştırılması gereken çok ölçütlü bir karar verme problemini çalışmalarında kullanmışlardır. Bu çalışmanın amacı, iki farklı ülkede (farklı yasal, politik ve sosyoekonomik özelliklere sahip) deniz dibine sabitlenmiş açık deniz rüzgâr türbinlerinin konumlandırmasını değerlendirmek için entegre bir yöntem geliştirmektir. Uygulanan metodolojide ÇÖKA ve CBS birleştirilmiştir Kiklad Adalarında (Yunanistan) ve İzmir bölgesinin deniz alanında (Türkiye) uygulanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları; Türkiye'de çalışma alanının 519 km²'sinin (% 10,23), Yunan bölgesinde ise çalışma alanının sadece 289 km²'sinin (% 3,22) açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun olduğunu göstermiştir. Bu mekânsal uygunluk analizi, bölgesel ölçekte mekânsal deniz planlaması için bazı yararlı tavsiyelerin yanı sıra her iki ülkedeki yeni açık deniz rüzgâr türbinlerinin ön değerlendirmesine de katkıda bulunmaktadır [25].

Gavériaux vd., (2019) alışmalarında, uygun deniz alanlarının araştırılmasını, herhangi bir açık deniz yenilenebilir enerji sistemi projesinin erken bir aşamasında ön koşul olarak sunmuşlardır. Bu alışma, Hong Kong Körfezi'nde bir açık deniz rüzgâr türbinlerini uygulamak için en uygun deniz alanlarını belirlemek için metodolojik bir çerçeve sunmaktadır. Bu çerçeve, ÇÖKA ve CBS'nin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Analizin ilk aşamasında, ilk olarak bir açık deniz rüzgâr türbininin konuşlandırılması için uygun olmayan alanlar belirlenmiştir. Analizin ikinci aşamasında, uygun deniz alanları ÇÖKA ve farklı senaryolar kullanılarak

sıralanmıştır. Son olarak, tüm yaklaşımı iyileştirmek için bir maliyet analizi ve Hong Kong Körfezi'ndeki önceki çalışmalarla bir karşılaştırma yapılmıştır [26].

Aydiner (2020); CBS Tabanlı Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile Ege Denizi'nde Rüzgâr ve Dalga Enerji Sistemleri için Yer Seçimi, yüksek lisans tez çalışmasında Ege Denizi'nde, entegre rüzgâr ve dalga enerji sistemlerinin yer seçimi için CBS ve ÇÖKA yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) ile uygun alanlar araştırılmıştır. Rüzgâr hızı, belirgin dalga yüksekliği, deniz derinliği, trafo merkezlerine uzaklık, limanlara uzaklık, kıyıya uzaklık ve deniz tabanı çökel tipi ölçüt olarak kullanılmıştır. Hariç tutulan alanlarda kuş göç yolları, yasaklı sahalar, kablo yolları ve koruma alanları değerlendirilmiştir. Bu çalışmada Ege Denizi rüzgâr ve dalga enerjisi sistemleri kurulumu için uygunluk haritası beraber oluşturulmuştur [27].

1.6.2 Rüzgâr türbinlerinin alan seçiminde ÇÖKA kullanımı: AHP ve Fuzzy TOPSIS

Vagiaona vd., (2018) bu çalışmada, bölgesel düzeyde sürdürülebilir açık deniz rüzgâr türbini gelişimi için Yunanistan'ın uygun alanlarının değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için entegre bir metodoloji uygulamışlardır. Çalışma; metodolojik çerçeve ve ulusal yasal çerçeve (Yenilenebilir Enerji Alanları için Mekânsal Planlama ve Sürdürülebilir Kalkınma Özel Planı) tarafından önerilen çeşitli konumlandırma kriterlerinin (teknik, mekânsal, ekonomik, sosyal ve çevresel) uygulanmasını içermektedir. Bu çalışmada, birleşik olarak CBS ve ÇÖKA yöntemleri ile AHY ve TOPSIS kullanılmıştır. Tüm yöntem, bölgesel düzeyde açık deniz rüzgâr türbini planlaması için bir karar verme süreci sağlamıştır. Önerilen metodoloji ve bu çalışmanın çıktıları, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir mekânsal gelişimini ve politikasını sağlamak için kullanılması gerektiği belirtilmiştir [28].

Shafiee (2014) çalışmasında, denizaşırı rüzgâr enerji türbinleri ile ilişkili riskleri azaltmak için bir bulanık analitik ağ süreci modeli geliştirmiştir. Açık deniz yenilenebilir enerji projeleriyle ilişkili risklerin azaltılması için uygun bir stratejinin seçilmesinin gerekliliğini çalışmasında savunmuştur. Çok karmaşık ve kritik bir görevdir. Bu çalışmanın amacı, açık deniz rüzgâr türbini için "en uygun risk azaltma stratejisini" seçmek için FANP (Bulanık Analitik Ağ Süreci) yaklaşımı önermektir.

Önerilen model, karar vericinin dört farklı karşılaştırma ölçütlerine göre en iyi stratejiyi seçmesi gereken dört olası alternatiften oluşmaktadır. Bunlar; güvenlik, katma değer, maliyet ve fizibilitedir. Model, daha sonra 2 MW'lık 30 rüzgâr türbininden oluşan bir açık deniz rüzgâr türbini için uygun bir risk azaltma stratejisi belirlemek için uygulanmıştır [29].

Sánchez-Lozano, vd. (2015), çalışmalarında kara rüzgâr çiftliği saha seçimi gibi trend olan bir karar problemiyle başa çıkmak için farklı ÇÖKA yöntemlerinin bazı bulanık yaklaşımları birleştirilmiştir. Kriterlerin ağırlıklarını elde etmek için FAHP (Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci) uygulanırken, alternatifleri değerlendirmek için Bulanık İdeal Çözüme Dayalı Sıralama Tekniği (FTOPSIS) kullanılmıştır. İspanya'nın güneydoğusundaki Murcia Bölgesi kıyısı, çalışma alanı olarak seçilmiştir. Üçlü bulanık sayılar aracılığıyla bulanık bir karar matrisine dönüştürülen alternatiflerin ve ölçütlerini elde etmek için CBS uygulanmıştır [30].

Chaouachi vd. (2017), bu çalışma açık deniz rüzgâr sahaları değerlendirmesi için AHY ve CBS'yi kullanarak çok ölçütlü mekânsal karar analizi sunmaktadır. Önerilen saha seçimi doğrultusunda; elektrik şebekesinin işletme güvenliği yönlerini, ekonomik yatırımı, işletme maliyetlerini ve her bir potansiyel sahaya göre kapasite performanslarını ele almışlardır. İlk olarak kısıtlamalarla sınırlanan alanlar belirlenmiş ve 60 m'den fazla derinlikteki alanları değerlendirilmemiştir. Trafo merkezleri için yalnızca 110 kW ve üzeri voltaj seviyeli trafoları değerlendirmeye alınmış ve kıyıdan 60 km'lik sınır dâhilinde en uygun alan çalışılmıştır [31].

Daneshvar vd., (2019) çalışmalarında Türkiye için rüzgâr enerjisi santrali yer seçimini araştırmışlardır. Bu amaçla Türkiye için alternatif rüzgâr santrali yerleri belirlemişlerdir. Alternatifleri değerlendirmek için rüzgâr potansiyeli, konum, maliyet ve sosyal faydalar olmak üzere dört boyutta 10 ölçüt seçilmiştir. Bu amaca ulaşmak için sezgisel bulanık küme (IFS) ile birlikte TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS yönteminin temel amacı, alternatifleri en iyiden en kötüye sıralamaktır. IFS'nin etkinliğini göstermek için, problem aynı veriler kullanılarak Fuzzy TOPSIS yöntemi ile çözülmüştür [32].

Mayaki vd. (2018) makale çalışmalarında, Nijerya'daki en uygun açık deniz rüzgâr türbini konumunun çok ölçütlü bir değerlendirmesini sunmuştur. Seçmiş oldukları saha ölçütleri ile Analitik Hiyerarşi Süreci kullanılarak üç alternatif konum (sırasıyla

Lagos, Warri ve Port-Harcourt'ta Victoria Adası, Koko ve Abbonema) ve uygun bir seçim yapmak için bulanık TOPSIS çok ölçütlü karar verme aracı kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, Victoria Adası'nın (Lagos) 894.23 ile en yüksek rakam kümülatif değerine sahip olduğunu, Koko'nun (Warri) 740.04 ve Abbonema'nın (Port-Harcourt) 756.9 değerine sahip olduğunu göstermiştir [33].

Yaşar (2013) Bulanık Topsis ve Bulanık Vikor Yöntemi Kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Santral Yer Seçimi yüksek lisans tezi çalışmada rüzgar enerjisi santrali yer seçimi çok kriterli karar verme problemine bulanık TOPSIS ve bulanık VIKOR yöntemleri kullanılarak kara rüzgar türbinleri için çözüm önerisi sunulmuştur. Anket yardımıyla uzmanlardan bilgi alınmış, çıkan sonuçlar doğrultusunda sayısal analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. [34].

1.6.3 Rüzgâr türbinlerinde enerji/ ekserji verimliliğinin önemi

Literatürde ilk kez yenilenebilir rüzgâr türbinlerinin ekserji analizinin yapıldığı çalışma Koroneos vd. (2003)'nin yaptığı çalışmadır. Ancak bu çalışmada sadece rüzgâr türbinlerinin elektrik üretimi dikkate alınmış ve 9 m/sn'nin üzerindeki rüzgâr hızları için rüzgâr türbinlerinin ekserji verimliliği sıfır olarak hesaplanmıştır [35]. Koroneos vd., sadece elektrik üretimine bağlı olarak, sadece rüzgâr türbininin ekserjisini dikkate almışlardır. Bu çalışmanın genişletilmiş bir versiyonunda Jia vd., (2004) tarafından yapılmıştır [36]. Dinçer ve Rosen (2005), sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerjinin termodinamik yönlerini araştırmış ve ekserji ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki ilişkiyi açıklamışlardır [37]. Dinçer ve Rosen (2007) kitabında rüzgâr enerjisinin ekserji analizi, enerji ve ekserji analizi sonuçları arasında önemli farklılıklar olduğunu belirtmektedir. Kapasite faktörünü inceleyen klasik bir rüzgâr enerjisi verimlilik analiz tekniğine göre, ortaya çıkan rüzgâr enerjisi verimliliği fazla çıkmaktadır. Kapasite faktörü normalde rüzgâr türbininin ürettiği nominal gücün yüzdesini ifade etmektedir [38].

Le Corre vd., (2013) çalışmalarında, Avrupa'daki yenilenebilir enerji potansiyelinin, özellikle de güneş ve rüzgârın, iki literatür modelini kullanarak fizik tabanlı bir değerlendirmesini ele almıştır. İlk olarak hava durumu verileriyle bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Gerçek sıcaklık, basınç, bağıl nem, küresel radyasyon ve rüzgâr hızı verileri, arazi kullanımının eş alanlarına dayalı olarak Avrupa için enerji ve ekserji haritaları geliştirmek için kullanılmıştır. Rüzgâr ekserji verimliliği için

paradoksal bir sonuç elde edilmiştir. Rüzgâr hızının 5 m/s'den az olduğu yerlerde yıllık ortalama ekserji verimliliği rüzgâr hızının 7 m/s'den fazla olduğu durumdan daha büyük çıkmıştır. Yapılan bu çalışma yıllık enerji üretimine dayalı bir yenilenebilir enerji seçimi için rehber niteliği taşımaktadır [39].

Ehyaei vd., (2019) çalışmalarında; Tahran (orta rüzgâr potansiyeli) ve Manjil (yüksek rüzgâr potansiyeli) olmak üzere iki şehirde nominal gücü 10 kW olan bir Bergey Excel-S rüzgâr türbininin enerji, ekserji, ekonomik, gelişmiş ekserji ve genişletilmiş ekserji analiz hesaplarını sunmuşlardır. Sonuçlar, rüzgâr türbininin enerji verimliliğinin Manjil'de (% 3,33) Tahran'dan (% 1,08) daha yüksek olduğunu göstermiştir ancak Manjil'de ekserji verimliliği % 10.8 çıkarken Tahran'da % 6.43 çıkmıştır. Gelişmiş ekserji analizi, rüzgâr türbininin önlenebilir ekserji imhası yüzdesinin rüzgâr hızı ile arttığını göstermektedir. Genişletilmiş ekserji analizi, rüzgârlı bölgelerde, en yüksek ekserji yüzdesinin sistemin girdi ve çıktı ekserji akışları ve güç üretimi (% 88,7) tarafından sergilendiğini, orta rüzgâr hızı potansiyeline sahip bölgelerde ise ekserjinin eşit olduğunu göstermektedir [40].

Ozgener ve Ozgener (2007) yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbini sistemlerinin ekserji ve güvenilirlik analizini gerçekleştirmiş ve Türkiye'deki yerel bir rüzgâr türbini için uygulamışlardır. Çalışma alanı İzmir'dir. Küçük rüzgâr türbini jeneratörünün ekserji performansı ve güvenilirliği, bir örnek gösterimle (1,5 kW) değerlendirilmiştir. Üç kanatlı, 3 m çaplı yatay eksenli bir rüzgâr türbininin başlangıç performansı saha testlerinde ölçülmüş, daha sonra ortalama teknik kullanılabilirlik, gerçek kullanılabilirlik, kapasite faktörü ve ekserji verimlilik değeri, Eylül 2002'den Kasım 2003'e kadar analiz edilmiş ve sırasıyla; % 94.20, % 51.67, % 11.58 ve % 0-48.72 olarak bulunmuştur [41].

Barthelmie ve Jensen (2010) yaptıkları çalışmada, Danimarka'daki Nysted'deki büyük açık deniz rüzgâr türbininden gelen güç çıkışını kullanarak rüzgâr çiftliği verimliliği ile rüzgâr hızı, yönü, türbülans ve atmosferik stabilite arasındaki ilişkileri ölçmüşlerdir. Bu çalışma ile rüzgâr çiftliği verimliliğinin, rüzgâr hızlarının ve rüzgâr yönünün dağılımına büyük ölçüde bağlı olduğu ancak türbin aralığının iz etkisi kayıplarının ve türbin verimliliğinin de ölçülebileceği gösterilmiştir [42].



2. AÇIK DENİZ RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1 Rüzgâr Enerjisi

Komşu iki basınç bölgesi arasındaki basınç farklarından dolayı oluşan ve yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket eden hava akımı olan rüzgârın şeklini; dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmesi, yerel ısı dağılımı, rüzgâr öncesi farklı atmosfer olayları ve rüzgârın topografik yapısı oluşturmaktadır. Arazi; rüzgâr özellikleri, yerel coğrafi farklılıklara ve zamana ve alana olarak dünyanın eşit olmayan ısınmasına bağlı olarak değişir. Rüzgâr, hız ve yön olmak üzere iki parametre ile temsil edilir. Rüzgâr hızı yükseklikle artar ve teorik kuvveti rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak değişir. Rüzgâr enerjisi uygulamalarında, ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği, düşük kapasite katsayıları ve değişken enerji üretimi gibi dezavantajlar söz konusudur. Rüzgâr enerjisinin avantajları ise şu şekilde sıralanabilir: [43];

1. Atmosferde serbest olarak bulunur.
2. Çevre dostu, yenilenebilir ve temiz bir enerjidir.
3. Rüzgârın yok olma riski yoktur.
4. Maliyeti şu anki mevcut enerji santralleri ile rekabet edebilecek seviyeye ulaşmıştır.
5. Bakım-tutum ve operasyon maliyetleri düşüktür.
6. Yereldir ve dış bağımlılık söz konusu değildir.
8. Teknolojisinin kurulumu ve çalıştırılması diğer enerji çeşitlerine göre kolaydır.
9. Devreye alma işlemi kısa sürede gerçekleşebilir.

2.1.1 Rüzgâr türbin temel bileşenleri

Rüzgâr türbinleri, rüzgârı elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerin temel yapısal unsurları olup, hareket eden havanın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye sonra elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. [44].

Rüzgâr türbinleri, elektrik jeneratörleri olarak elektrik şebekesine bağlanır. Bu şebekeler bataryayı şarj eden bir devre, yerleşim alanı ölçekli bir güç sistemi, izole bir şebeke ya da genel elektrik şebekesi olabilir. Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşümü, temel aerodinamik gücün mekanik enerjiye dönüştürülmesi ve ardından kanatlar vasıtasıyla dönen şafta tork uygulanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile gerçekleştirilir [45].

Rüzgâr türbinleri eksenlerine göre yatay veya dikey eksenli olarak imal edilmektedir. Bu tiplerden en yaygın olanı yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, dönüş eksenleri rüzgâr yönüne paralel ve rotor kanatları rüzgâr yönüne dik olacak şekilde çalışır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, farklı sayıda rotor kanadına sahip olan ve rüzgârı önden alan veya rüzgârı arkadan alan sistemler olarak da çeşitlilik gösterirler.

Bu tip rüzgâr türbinleri tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ya da çok kanatlı rüzgâr türbinleridir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri; Rüzgâr, kuleyi sızdırmadan rotora çarptığında, bu, ileri veya ileri rüzgâr (rüzgâr ters), yani kuleye ilk dokunan türbin, ardından rotor durumunda geri veya geri rüzgâr (alçak rüzgâr) olarak bilinir. Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbinleri, yatay eksenli ve üç kanatlı rüzgâr türbinleridir [46].

Teknolojik ilerlemeye paralel olarak günümüzde 1,0 ile 6,0 MW arasında güce sahip yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Yeni nesil üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat çapları 100 m'ye ulaşmıştır. Rüzgâr türbinlerinin modern rotor göbekleri yerden 60-100 m yüksekliktedir. Bir rüzgâr türbininin ürettiği enerji miktarı, esas olarak türbin göbeğinin yüksekliğindeki rüzgâr hızına bağlıdır. [47]. Rüzgâr türbinlerinde rotor ana mile düşük hızda bağlanmaktadır. Rüzgârın kinetik enerjisi rotor vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülmekte ve ana milin düşük hızdaki dönme hareketi, araç gövdesi üzerindeki dişli sistemine (dişli kutusu vb.) ve oradan da jeneratöre iletilmektedir. Şanzıman sistemi, jeneratör ve yardımcı ünite gövde içerisinde yer almaktadır. Ayrıca; fren ekipmanları, kontrol komut sistemleri, direksiyon motorları ve mekanik cihazlar, anemometreler ve kanatlar gibi ölçüm cihazları bulunmaktadır [44].

2.1.2 Rüzgâr türbinleri, ilgili parametreler ve güç ifadesi

Havada serbestçe hareket eden hava, rüzgâr şeklindeki hareketinden dolayı belirli bir kütle ve kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji ve momentumun korunumu ilkelerinden yola çıkarak atmosferde serbest olarak hareket eden rüzgârın teorik gücün; hava yoğunluğuna ve rüzgârın ilerleme yönünün dik kesit alanına ve rüzgâr hızı ile doğru ile orantılıdır [47]. Teorik rüzgâr gücü, esas olarak rüzgâr hızının metre küpü ile orantılıdır. Bu nedenle rüzgâr hızının yüksek olduğu ve daha fazla enerjinin üretilebileceği bir yerde rüzgâr çiftliği kurmak ekonomiktir. Rüzgâr türbinleri ancak belirli bir rüzgâr hızında elektrik üreterek çalışabilir. Bu "devreye girme hızının (cut in)" altında sistem tamamen durur. Rüzgâr hızı arttıkça sistemden çekilen elektrik enerjisi artar. Her bir rüzgâr türbini için sistemin aldığı güç, "nominal hız" olarak adlandırılan belirli bir rüzgâr hızında maksimum değerine ulaşır. Rüzgâr hızı, rüzgâr hızının nominal değerini aşarsa, tesisat tarafından alınan güç, teslim edilen güç, nominal güç olacaktır. Sisteme zarar vermemek için belirli bir rüzgâr hızından sonra rüzgâr türbini otomatik olarak durdurulur. Bu maksimum hız, sistemin "devreden çıkma hızı (cut out) " olarak bilinir. Başka bir deyişle, bir rüzgâr türbini, devreye girme ve devreden çıkma hızları arasında elektrik üretir. Modern rüzgâr türbinlerinin devreye girme hızları 3-4 m/s, nominal hızları 11-15 m/s ve devreden çıkma hızları 25-30 m/s arasındadır [47, 48].

2.1.3 Rüzgâr enerjisini etkileyen faktörler

Rüzgârdan elde edilen güç etkileyen ana faktör; havanın yoğunluğu, rotorun taradığı alan ve rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır. Rüzgâr hızı çevresel faktörlere göre değişmekte olup, rotor alanı ve performans katsayısı tasarım faktörlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu faktörler aşağıda incelenmiştir:

- **Rüzgâr rejimi:** Rüzgârın ürettiği enerji, rüzgâr hızının metre küpü ile orantılı olduğu için dikkate alınması gereken en önemli nokta rüzgârın hızı ve değişkenliğidir. Performans formülüne bağlı olarak rüzgâr hızındaki hafif bir artış bile üretime olan etkileri artırmaktadır. Bir türbin veya rüzgâr çiftliğinin ekonomik olarak uygulanabilir olup olmadığını anlamak, ortalama rüzgâr hızı hakkında uzun vadeli yıllık bilgi gerektirir [45,49, 50].
- **Yerel coğrafya:** Kurulacak rüzgâr türbininin rüzgâr profilini etkileyen en önemli faktör, yerden sürtünmeyi ortadan kaldıran yerel coğrafi konumdur. Yerden

yükseklik arttıkça zeminden kaynaklanan sürtünme ortadan kalkacak ve rüzgâr hızı artacaktır.

- **Hava yoğunluğu:** Rüzgârdan elde edilen güç, rotordan geçen havanın yoğunluğu ile orantılıdır. Gaz kanununa göre, hava yoğunluğu doğrudan basınçla ilgilidir ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Yükseklik arttıkça basınç azalmaktadır. Bu nedenle deniz seviyesine yakın ve düşük sıcaklıktaki alanlarda enerji üretim verimliliği daha yüksektir [50,51].
- **Kule yüksekliği:** Rüzgâr hızı artışını kullanmanın avantajlarından biri türbin kulesinin yüksekliğidir. Ayrıca, kulenin yüksek olması, çevrenin pürüzlülük ve olası engellerin olumsuz etkilerinden etkilenmeyi en aza indirmektedir [45].
- **Kanat Boyu ve sayısı:** Teorik olarak, rotor tarama alanı arttığında, enerji üretimi de doğru orantılı olarak artacaktır, rotor tarama alanı da kanat boyunun karesiyle bağıntılıdır [45].
- **Türbin yerleşimi:** Rotordan geçtikten sonra hava akışının basıncı, hızı ve enerjisi azalır. Ancak, türbülanslı yapıya giren hava akımı belli bir mesafe sonra eski haline dönmektedir ki buna iz etkisi adı verilir [52]. Arka rüzgâr alanında birden fazla türbini olan bir türbin, iz etkisine maruz kalırsa üretilecek enerji azalır. Bu durum da türbülansa ve yorgunluğa neden olur. Bu nedenle, türbinleri rüzgâr çiftliğine yerleştirirken belirli bir mesafe korunmalıdır.

2.2 Deniz Üstü (Offshore) Rüzgâr Enerjisi

Açık deniz (Offshore) rüzgâr türbinlerindeki araştırma ve yatırım 1990'larda, Norveç'in Norgesund kentinde kurulan ilk açık deniz rüzgâr türbini ile başlamış, 1991'de resmi olarak ticari işletmeye alınmıştır. Winderby, Danimarka, 450 KW güç üretebilen 11 rüzgâr türbini kurmuştur. 2000'li yıllarda açık deniz rüzgâr enerjisinin gelişimi hızlanmıştır. [53- 55].

Günümüzde açık deniz rüzgâr türbinleri ülkeler ve enerji yatırımcıları tarafından tercih edilmektedir. Tercih nedeninde asıl etken, su kütlesi üzerindeki rüzgârdan elde edilen enerjinin çok daha fazla olması ve bu potansiyelin kullanılabileceği alanın yeterince büyük olmasıdır. Açık deniz rüzgâr santrallerinin kurulması için dikkate alınması gereken faktörler aşağıda listelenmiştir [53- 55].

- Rüzgâr profili, enerji üretimi ve kapasite faktörü,
- Su derinliği
- Kıyıya uzaklık ve konum,
- Deniz koşulları, kurulum ve bakım,
- Çevreye ve canlılara olan etki,
- Görsellik, ses ve tasarım,
- Ticari gemi deniz trafiği,
- Askeri kullanım ve yasaklı sahalar,
- Balıkçılık,
- Boru hatları ve kablolar vb.

2.2.1 Rüzgâr türbinlerinin yer seçimine etki eden faktörler

- **Rüzgâr profili ve enerji üretimi:** Deniz rüzgârlarının en önemli özelliği rüzgâr hızının karadan daha yüksek ve daha az değişken olmasıdır. Araştırmalara göre; denizde rüzgâr hızının en yakın ana karadan % 20-25 daha fazla olduğu görülmüştür [54-56]. Dolayısıyla, türbin daha uzun bir süre maksimum kapasitesinde çalışır ve daha küçük rüzgâr hızı değişiklikleri, daha az türbin yorgunluğu ve şebekeye daha kararlı güç aktarımı ile sonuçlanır. Rüzgâr hızındaki artış, açık deniz rüzgâr türbinleri elektrik üretiminde % 150 artışa ve rüzgâr çiftliğinin kapasite faktöründe % 25'ten % 40'a artışa neden olabilmektedir [44,57].
- **Su derinliği, zemin yapısı ve temeller:** Mevcut teknoloji, türbinin belirli bir derinliğe kadar kurulmasına izin vermektedir. Derinlik arttıkça temel için gerekli malzeme ve işlemler artacak, dolayısıyla maliyet artacaktır [50].
- **Kıyıya uzaklık kurulum:** Kıyıya olan uzaklık; kurulum, işletme ve bakım maliyetlerini arttırır. Kurulum sırasında gemiler kıyı ile kurulum alanı arasında çalışacağı için, kıyıya olan mesafe ne kadar fazlaysa, dönecek iletim hattını ve bununla doğru orantılı olarak maliyetini etkileyecektir. İşletme sırasında, bakım için, temel ve türbinleri kontrol etmek için rüzgâr çiftliğine düzenli ziyaretler yapılacaktır. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin, büyük yerleşim yerlerinin yakınında

da kurulabilmesi uygun ise iletim hatları ve kablolarının kullanımı azalacağından maliyet düşebilir [45,50].

- **Deniz koşulları, kurulum ve bakım:** Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarımında nem koruması için özel sistemler kurulmalıdır. Aynı zamanda dalgaların ve akıntıların temel tasarımı yapılmalı, soğuk iklimlerde donma ihmal edilmemelidir. Açık deniz operasyonları, bakım ve kurulum süresini etkileyen ve nihayetinde yatırım ve işletme maliyetlerini artıran faktörlerdendir [44,50,55].
- **Çevreye ve canlılara olan etki:** Deniz kuşlarının yuvalarının yakınına açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulması ekolojik olarak tehlikelidir [55]. Açık deniz türbinlerinin kuş ölüm oranı, kara türbinlerinki ile hemen hemen aynı görünmektedir. İletişim kurmak için ses sinyalleri kullanan birçok deniz memelisi, sistem tesis edilirken sesten etkilenebilmektedir. Türbinden gelen ses, ses kaynağına 1 km mesafede fark edilebilir hale gelmektedir. Diğer bir etki, su altında döşenen yüksek gerilim kablolarının ürettiği manyetik ve elektrik alanlardır. Bu bölgelerde avlanmayı ve yön bulmayı algılayan bazı deniz canlıları olumsuz etkilenebileceği hakkında görüş ve yorumlar bulunmaktadır [55,57]. Çakılarak kurulumu yapılan temel tipleri çevredeki balıklar ve suda yaşayan memeliler üzerinde zararlı etkileri söz konusu olabilecektir. Yerçekimli ağırlık temelli veya vakumlu keson gibi sessizce inşa edilen temeller bir alternatif çözümdür. Bunların yanı sıra, açık deniz petrol ve gaz endüstrileri, diğerlerinin aksine, üç boyutlu formlarından dolayı balıklara ve diğer türlere ev sahipliği yapmaktadır [47,58].

2.2.2 Türbin ve temel seçimi

Kara ve deniz rüzgâr türbinleri teknik olarak benzer olmasına rağmen, inşaat teknolojisinde bazı farklılıklar bulunmaktadır. Açık denize kurulacak rüzgâr türbinleri uzun yıllar deniz suyuna, tuza ve neme maruz kaldığından dış duvarlarında özel kaplamalar kullanılmaktadır. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin içi kapalı ve hava geçirmez şekilde tasarlanmalıdır. Dalgalara ve akıntılara uzun süre dayanabilmesi için temel yapıyı belirlerken, birkaç temel faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Birincisi, açık deniz rüzgâr türbinlerinin kule yüksekliği ve ağırlığıdır. İkinci faktör deniz tabanı yapısıdır. Son olarak, temelin atılacağı yerde suyun derinliğidir. Günümüzde yaygın kullanıma sahip dört ana temel tipi bulunmaktadır. Bunlar,

yerçekimi merkezli (gravity), tek kazık (monopile), üçayak (tripod) ve ceket (jacket) tipi temellerdir. Ayrıca, derin sularda kullanılabilen yüzer (floating) tip temeller de günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [55, 59, 60].

2.3 Açık Deniz ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Karşılaştırılması

Kara ve deniz rüzgâr türbinleri arasındaki temel fark, enerji üretimlerinin tutarlılığıdır. Özellikle, daha yüksek ve daha tutarlı rüzgâr hızları nedeniyle, açık deniz rüzgâr türbinleri, karadaki rüzgâr türbinlerinden daha yüksek sabit bir oranda elektrik üretme potansiyeline sahiptir [44]. Kara rüzgâr türbinlerinin faydalarından bazıları, deniz aşırı bir ortama yerleştirilmiş rüzgâr türbinlerinden daha kolay erişilebilmeleri ve doğrudan yerel şebekeye bağlanabilmeleridir [61]. Kara rüzgâr santrallerinin inşasındaki en büyük sorun ise, gürültü kirliliğinin ortaya çıkması ve bunun insanlar ve çevredeki çevre üzerindeki olumsuz etkisidir [62]. Aksine, açık deniz rüzgâr türbinleri insanlardan uzak olduğu için, rüzgâr çiftliği inşası hakkında tesisleri ile ilgili olarak, kara rüzgâr türbinlerinden daha az şikâyet bulunmaktadır [63-65]. Açık deniz ve kara rüzgâr türbin sistemlerinin birbirlerine göre teknik farklılıkları da söz konusudur. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin ve kara rüzgâr türbinlerinin avantajları Çizelge 2.1’de, dezavantajları ise Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 : Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Avantajları.

Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri Avantajları

Daha hızlı ve daha sabit rüzgârlar nedeniyle daha yüksek elektrik üretim potansiyeline sahiptir

Daha istikrarlı oranda enerji sağlamaktadır.

Oluşturduğu görüntü ve gürültü kirliliği insanların yaşam alanından uzak olduğundan, insan hayatına etkisi azdır. Gürültü ve görüntü kirliliği yaşam alanlarını etkilemediği için kara türbinlerinden iki hatta 3 kat daha büyük olabilmektedir.

Büyük boyutlarda olabileceğinden; araziye müdahale etmeye gerek kalmadan daha yüksek enerji üretimi ve malzeme maliyetleri için daha yüksek verimlilik sağlayabilir.

Temiz ve yenilenebilir enerji sağladığı için halk sağlığı maliyetlerini düşürmektedir.

Kara Rüzgâr Türbinleri Avantajları

Daha basit nakliye lojistiği ve kurulum işlem adımları gerekmektedir.

Kurulumun yapılacağı bölgede Rüzgâr türbinleri de üretilmekte, bu da yerel ekonomik gelişmeyi teşvik etmektedir. Ulaşımdan nihai konuma emisyonları azaltabilmektedir.

Karada hava daha sakin olduğu için rüzgâr türbinleri daha az aşınmakta ve bu nedenle daha az bakım gerektirmektedir.

Çizelge 2.2 : Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri ve Kara Rüzgâr Türbinlerinin Dezavantajları.

Açık Deniz Rüzgâr Türbinleri Avantajları Dezavantajları

Kurulum ve güç iletimi maliyetleri yüksektir.

Sualtı gürültüsü ve türbinler, su kütlesindeki hayvanları etkilemektedir.

Uygulanması zordur ve bakımı ek maliyet gerektirmektedir.

Bir sistem arızası sonraki enerji geri kazanım süresi uzun olabilmektedir.

Deniz şartlarından dolayı çeşitli lojistik problemlerle karşılaşılabilir.

Teknik iş gücü ve teknik ekipmanın türbinlere ulaşması için bir mesafe bulunmaktadır, bu da türbinlerin maliyetini ve arıza-bakım süresini artırmaktadır.

Deniz ekosistemi üzerindeki etkisi için az sayıda bilimsel veri bulunmaktadır.

Kara Rüzgâr Türbinleri Dezavantajları

Mevcut peyzajın önünde bir engel olarak görülmektedir.

Görüntü ve gürültü kirliliğine neden olmaktadır.

Kesintisiz güç üretimi hava akışını sürdürmek için türbin ve türbin rotorunun çapının 7 katı olan herhangi bir engelden minimum 150 m uzaklıkta olması gerekmektedir.

Arazi maliyetleri ve olası kentsel genişleme nedeniyle, potansiyel alan sınırlı kalmaktadır.

Doğal korumanın öncelikli olduğu veya yerleşim koşullarının dikkate alınması gereken alanlarda rüzgâr türbinleri inşa etmek yasaktır (konuttan gerileme mesafesi, gürültü emisyonu ve gölge düşürme vb. gibi bir dizi yerel yasal standart vardır).

Kuşlar için bir tehdit oluşturmaktadır.

Gelen rüzgâr, yakındaki ormanlar, tepeler, binalar veya kuleler gibi oluşumlar tarafından engellenebilmektedir. Bu durum, rüzgâr türbininin güç çıkış performansı azalmakta ve yıl boyunca sürdürülebilir enerji üretilmemektedir.

Açık deniz rüzgâr türbinleri ile kara rüzgâr türbinleri arasındaki teknik farklılıklar genel olarak sunulan altı maddede özetlenebilir.

1. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde korozyondan korumak için özel bir dış koruma kaplaması yapmak gerekmektedir.
2. Açık deniz rüzgâr türbinlerinin tasarımını yaparken temel amaç rüzgârdan enerjiyi verimli olarak almak için en iyi aerodinamik verimi elde etmektir.
3. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde kanat hızı daha yüksektir.
4. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde yağlama sisteminin servis süresi daha uzundur ve sistemdeki birçok yatak otomatik olarak yağlanır. Ayrıca açık deniz rüzgâr türbinlerinde; şanzımandaki özel bir yağ filtreleme sistemi, yağ kalitesinin uzun süre korunmasını sağlar.
5. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde en büyük maliyet parametrelerinin başında türbinlerin temel inşası ve deniz altından en yakın kara parçasına çekilen iletim hatları oluşturmaktadır.
6. Açık deniz rüzgâr türbinlerinde yatırım maliyetlerinin % 33'ü rüzgâr türbinleri iken, altyapının % 24'ü yatırım maliyetidir. Kara rüzgâr türbinlerinde ise yatırım maliyetlerinin % 68'i rüzgâr türbinleri iken, altyapının % 9'u yatırım maliyetidir.

2.4 Maliyet Hesaplanması ve Fizibilite

Deniz üstü rüzgâr santrallerinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engelin ilk yatırım ve bakım maliyetlerinin yüksek olması olarak ifade edilebilir. Kule temelleri ve türbin montajları karadaki santrallere göre çok daha zor ve yüksek maliyetlidir. Kurulum sırasında kullanılan yüzer vinçler ve diğer deniz taşıt araçları, liman masrafları ve bakım sırasında gerekli deniz taşıtları veya helikopter masrafları deniz üstü rüzgâr santrallerinin maliyetini oldukça artırmaktadır. Ayrıca, yük dengelemesi için ve elektrik şebekesine bağlantı için gerekli giderlerinde hesap edilmesi gerekmektedir.

2.5 Çevreye ve Canlılara Etkisinin Değerlendirilmesi

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin gelişmeleriyle ilgili başlıca çevresel kaygılar, artan gürültü seviyeleri, çarpışma riski, denizel ekosistemlerde meydana gelebilecek değişiklikler, gıda ağlarındaki oluşabilecek farklılıklar ve artan gemi trafiğinden kaynaklanan kirlilik veya deniz tabanındaki çökeltilerden kirletici maddelerin salınmasıdır. Genel olarak, açık deniz rüzgâr platformlarının da denizel ortama ve denizel canlılara özellikle türbinlerin kurulum aşamasında zarar verdiği söylenebilmektedir. Ancak, bazı çalışmalar, bu konuda henüz yeterli sayıda bilimsel çalışma yapılmadığı yönündedir. Yapılan çalışmaların değerlendirmesi aşağıda özetlenmiştir [65-67].

Inger vd. (2009)'nin 'Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research' başlıklı makale çalışmasının sonuç kısmında, rüzgâr çiftliklerinin kuş popülasyonları üzerinde, kara türbinleri kadar zararlı bir etkiye sahip olmayabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, bu tesislerin denizdeki bozulmuş deniz habitatlarında biyolojik çeşitliliği artırma kapasitesine katkıda bulunabileceği de bir avantaj olarak belirtilmektedir [65].

Farklı araştırmacılara tarafından yapılan çalışmalarda çevresel yarardan söz edilmektedir. Örneğin, Gill (2005) 'The influence of offshore windpower on demersal fish' başlıklı yayınında rüzgâr türbini temellerinin, hayvanların bağlandığı bir yüzey sağlayarak yapay resifler gibi davranabilmekte olduğundan bahsedilmiştir [68]. Wilhelmsson vd., (2006)'nin 'Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation' başlıklı yayınında, Hollanda'da, ilk açık deniz rüzgâr çiftliğinde kapsamlı bir izlemenin sonuçları açıklanmaktadır. Bu çalışmada, ilgili alanda çok sayıda fauna grubu üzerinde iki yıllık sonuçlar derlenmiş ve özetlenmiştir. Çalışma, jeneratörler arasındaki kumlu alandaki bentoslar üzerinde kısa vadeli bir etki olmadığını gösterirken, monopilerin yeni türlerin ve yeni fauna topluluklarının kurulmasına yol açtığını belirtmektedir. Temellerin etrafında hareket halinde olan balık türleri üzerinde küçük etkiler tespit edilmiş, türbin temellerinin morina balıkları için yuva olduğu ifade edilmiştir [69]. Sonuç olarak, balıklar ve deniz memelileri dâhil olmak üzere kabuklu deniz ürünleri ve kabuklu deniz hayvanlarını besleyen hayvanların sayısının artabilir olduğu belirtilmiştir [70-72].

Bir diğ er olası fayda, konut etkisidir. Açık deniz r zg ar çiftlikleri ve açık deniz su ürünleri yeti tirciliğı bir e -yönetim yaklaşımı içinde potansiyel olarak işletilebilir. Açık deniz r zg ar türbinleri, entegre bir planlama ile açık deniz alanlarının çok i levli kullanımını sağılayabilir. R zg ar türbinlerinin etrafındaki güvenli tampon bölgenin, bir deniz koruma alanı haline gelebileceğı,        bu alandaki deniz trafiğinin azaltılacağı ve gelecekte açık deniz r zg ar türbinlerini açık deniz su ürünleri yeti tirciliğı ile birleştirme fırsatları olabileceğı ifade edilmektedir [73].

Açık deniz r zg ar türbinlerinin sayısı arttıkça, çevresel izleme ve değıerlendirme yöntemleri de zamanla gelişmektedir. Açık deniz r zg ar enerjisi ile ilgili çevresel çalışmaların çoğı, deniz memelilerinin gürültüye maruz kalmasının etkilerini içermekte ve deniz ku larının türbinlere çarpma riskinin türden t re değı iklik g sterdiğıine işaret etmektedir.

Deniz aşırı inşaat aşamalarına bakıldığında, en önemli faaliyetin türbinin kurulumu olduğı ve bunun için gerekli malzemenin temini sırasında deniz trafiğinin yoğunlaştığı, deniz memelilerinin en çok bu aşamada etkiye maruz kaldığı gözlemlenmiştir [74]. Kazık tesisi ve kurulum sırasında yayılan yüksek sesler, potansiyel olarak işitme hasarına, canlıların birbirlerine yaptıkları akustik  ağırılarının maskelenmesine veya gürültüden kaçınmaya çalışan hayvanların doğıal yaşam alanlarının dışına çıkmasına neden olabilmektedir [75]. Balıklar da benzer şekilde bu seslerden etkilenebilmektedir ve deniz memelilerinin, deniz kaplumbağalarının ve balıkların; çarpışma, araştırma ve kurulum faaliyetleriyle ilişkili gemi hareketlerinden rahatsız olma riski gözlemlenmiştir [76]. Çalışma sırasında üretilen elektriğı ileten kablolar da elektromanyetik alanlar oluşması nedeniyle, elektro veya manyetik alanlara duyarlı canlı türlerinin hareketlerini ve navigasyonunu etkileyebileceğı ifade edilmektedir [77]. Deniz  st  r zg ar türbinlerinin deniz canlıları üzerinde etkileri  izelge 2.3'te özetlenmiştir [78].

R zg ar türbinlerinin radyo ve televizyon sinyallerini etkileyebilecek elektromanyetik etkileri bulunmaktadır. Bunun nedeni, eski nesil r zg ar türbinlerinin metal kanatlara sahip olmasıdır. Ancak, günümüzde kullanılmaya ba layan sentetik malzemelerden üretilen yeni nesil türbin kanatları bu etkiyi en aza indirmiştir.

Çizelge 2.3 : Deniz üstü rüzgâr türbinlerinin deniz canlıları üzerinde etkileri [78].

Kategori	Biyoçeşitlilik	Varlık	Olumsuz etkiler	Dolaylı faydalar
Bentik habitat ve bentik canlılar	Artış	Sert kabuklular habitat artışı	Yumuşak kabuklular habitatlarının kısmi yitimi	Habitatları trol balıkçılığının yol açacağı hasarlardan korunması
Balıklar	Bulgu yok	Artış	Bulgu yok	Balıkçılık baskısının azaltılması
Yunuslar	-	Belirlenmemiş	Belirlenmemiş	Hedef dışı av riskinin azalması
Foklar	-	Artış	- Bulgu yok	- Hedef dışı av riskinin azalması
Deniz kuşları	Azalış	Bazı türlerde azalma, diğer türlerde artış	Potansiyel habitat kaybı ve çarpışma riski	Belirlenmemiş
Göç eden kuşlar	-	-	Engel oluşumu	-

2.6 Rüzgâr Enerjisi ve Enerji / Ekserji Verimliliği

2.6.1 Enerji ve ekserji tanımı

Enerji, çoğunlukla iş yapabilme becerisi olarak tanımlanmaktadır. Max Planck, enerjiyi “bir sistemin kendisi dışında etkinlik üretme yeteneği” olarak betimlenmektedir. Enerji farklı formlarda meydana çıkabilir veya kullanılabilir. Bunlardan en çok karşılaşılanları elektrik, ısı, mekanik, kimyasal, kinetik, potansiyel, manyetik, nükleer enerjidir. Bir iş yaparken, bir sistem bu enerji tiplerinin bir bölümünü ya da tamamını kullanabilir. Sistemin barındırdığı bu enerjilerin tamamına toplam enerji denir [79].

Belirli bir durumdaki sistemden sağlanabilecek kullanılabilir maksimum iş, ekserji olarak tanımlanmaktadır. Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belli bir başlangıç halinden tersinir bir hal değişimi ile çevrenin bulunduğu hale (ölü hale) getirilirse elde edilir. Tersinir hal değişimi; bir yönde gerçekleştikten sonra, çevrede herhangi bir iz bırakmadan, aksi yönde gerçekleştirilebilen hal değişimidir. Elde edilen bu işe, kullanılabilirlik veya ekserji denir. Bu tanım, bir makinenin termodinamik yasalarına ters düşmeden yapabileceği işin üst sınırını belirlemektedir.

Bir sistemin toplam ekserjisi, kinetik, potansiyel, ısı ve kimyasal ekserjilerinin toplamına eşittir [80]. Rüzgâr enerjisi ile güneşten gelen ışımla dünya atmosferinde ısınmaya neden olur. Isındığında yoğunluğu azalan hava yükselir ve bu havanın yerini soğuk hava doldurur. Söz konusu hava akımı, dünyanın kendi etrafında dönmesiyle, büyük ölçüde kinetik enerji taşıyan hava hareketlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Rüzgâr enerjisi, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir. Rüzgâr türbinleri, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye eviren sistemlerdir. Rüzgâr akımının yüklendiği kinetik enerjinin kanatlı bir türbini, mekanik olarak döndürmesi sonucunda türbine bağlı jeneratör grubunda elektrik üretilir. Rüzgâr santrallerinin kurulacağı yerler için vasatı rüzgâr ve saatlik rüzgâr hızları çoğunlukla meteoroloji istasyonlarından elde edilmektedir [81].

2.6.2 Enerji ve ekserji analizi

Bu analiz tipi, bir sisteme dâhil olan enerjinin ne şekilde dağıldığını tespit etmek amacıyla termodinamiğin birinci yasası temeline göre yapılmaktadır. Bu analizde, dâhil olan 100 birimlik enerjinin ne amaçlarla kullanıldığı tespit edilerek sistemin verimli çalışıp çalışmadığı konusunda bir yorum yapma imkânı sağlamaktadır. Bu analiz sonuçları gözden geçirilerek sistemin hangi kısımlarında iyileştirmeler yapılabileceği konusunda yorum yapılabilir [79].

2.6.3 Enerji ve ekserji verimlilikleri

Termodinamiğin birinci yasası doğrultusunda yapılan enerji analizi, kullanılabilir maksimum enerjiyi tespit etmek açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle herhangi bir sistemde kullanılabilir en fazla enerjiyi görmek için, termodinamiğin ikinci yasasına dayalı ekserji analizinin yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla, sistemin verilen enerjiye oranla hangi miktarda ne kadar verimli olduğu ile birlikte, sistemden daha fazla ne kadar iş elde edilebileceği görülmektedir. Bu durum, sistemde iyileştirme yapmak için de yararlı olmaktadır.

Sistem performansını bir işlem süresince nasıl değiştiğini görmek için hem enerji verimliliğini, hem de ekserji verimliliğinin incelenmesi uygundur. Enerji verimliliği çıkan işin toplam işe oranıdır;

$$\eta = W_{\text{çıkış}} / W_{\text{rüzgâr}} \quad [82] \quad (2.1)$$

Ekserji verimi ise çıkan işin rüzgârın ekserjisinin oranıdır;

$$\varepsilon = W_{\text{çıkış}} / E_{\text{akış}} \quad [82] \quad (2.2)$$

Rüzgâr, güneş, hidrolik ve dalga enerjisi gibi yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu meteorolojik değişkenlerle ilgilidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının meteorolojik özellikleri bilinmez ve/veya hesaba katılmazsa, enerji yatırımlarıyla ilgili bilgilerde önemli boşluklar ortaya çıkabilecektir [82].

2.6.4 Açık deniz rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji analizi

Rüzgâr türbinlerinin ekserji analizi, enerji araştırmalarından çok, artan performans hakkında fikir vermektedir. Bir rüzgâr türbininin çıktısı, üretilen elektriğin rüzgâr türbini ile süpürülen bölgede rüzgâr potansiyeli enerjisine oranı olarak düşünülebilir. Rüzgâr Türbini verimlilikleri ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiler, hava değişkenleri değiştikçe rüzgâr türbini verimlilik modellerinin çıktısını vermektedir.

Rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji verimliliği, meteorolojik ve rüzgâr türbini parametreleri arasındaki ilişki nedeniyle rüzgâr hızı, basınç, sıcaklık ve bağıl nem gibi meteorolojik parametrelerden doğrudan etkilenmektedir.

Rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji verimliliği, meteorolojik ve rüzgâr türbini parametreleri arasındaki ilişki nedeniyle rüzgâr hızı, basınç, sıcaklık ve bağıl nem gibi meteorolojik parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Bu verimlilikleri analiz etmek için Bozcaada, Gökçeada ve Enez meteoroloji istasyonu için aylık ortalama rüzgâr, sıcaklık, basınç ve bağıl nem değerleri T.C. Devlet Meteoroloji İşleri'nden alınmıştır. Bozcaada Damlacık (2015-2019 yılları), Gökçeada Uğurlu Limanı (2015-2019 yılları), Enez Mendirek (2015-2020 yılları) meteorolojik veri istasyonlarından; aylık ortalama nispi nem, aylık ortalama rüzgâr hızı ve aylık ortalama sıcaklık verileri kullanılmıştır.

Rüzgâr frekansı diyagramları her alan için alınan meteorolojik verilerin yıllık ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak hesaplanmıştır.

Metrekare başına ortalama rüzgâr gücü yoğunluğu, Denklem 2.1 kullanılarak 2015'ten 2019'a kadar her aydaki rüzgâr gücü yoğunluğuna göre hesaplanmıştır. 2015-2019 yılları arasında ortalama aylık rüzgâr gücü ve hızı elde edilmiştir.

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 d \quad (2.3)$$

- Weibull şekil faktörü, ölçek faktörü ve Weibull sayısı, gamma fonksiyonu kullanılarak enerji örüntü faktörüne göre hesaplanır. Weibull şekli ve ölçek

faktör tablosu ve diyagramı ile rüzgâr olasılığı yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif fonksiyon hesaplanır.

HTW5.0-126 rüzgâr türbini modeli esas alınarak rüzgârın enerji ve ekserji miktarı hesaplanmıştır. Türbinin teknik özellikleri Çizelge 2.4’de gösterilmektedir. Türbin özetle aşağıdakilere göre seçilir [83].

- Hesaplama da kullanılmak üzere spesifikasyon, parametre ve verilerin mevcut olduğu açık denizde kullanıma uygun türbin.
- Türbin nominal gücü, rüzgâr hızının farklı aralıklarında ve rüzgârın modeli veya olasılığında maksimum gücü elde etmek için önemlidir.
- Türbinin çapı, özellikle düşük rüzgâr hızında güç üretimini etkileyen türbin kanadı süpürme alanı açısından önemli bir faktördür.

Günümüzde rüzgâr türbinlerinin çoğu, düşük rüzgâr hızından (kesme hızı) mümkün olan çok yüksek rüzgâr hızına (kesme hızı) kadar güç üretme kapasitesine sahiptir. Türbinin doğru seçimi, rüzgâr kalitesinin ve projenin sermaye maliyetinin bir fonksiyonudur.

Düşük enerji üretimine sahip rüzgâr türbininin seçilmesi, projenin başlangıç maliyetini düşürebilir, ancak toplam enerji üretimi karşılaştırıldığında, projenin işletme ve bakım maliyetini arttırarak daha fazla sayıda türbin kullanılmasını gerektirir ve bu durum üretilen elektrik için KiloWatt saat başına fiyatını artışına neden olabilir.

Çizelge 2.4 : Türbin Teknik Özellikleri.

Parametre	Özellikler
Çıkış Gücü	5000Kw
Rotor yarıçapı	126m
Yükseklik	90m ve üzeri
Kanat Sayısı	3
Rotor yönü	Rüzgâr estiği yönde
Türbin çıkış voltajı	33.000 V
Devreye girme hızı	4 m/s
Devreden çıkma hızı	25m/s

Farklı hızdaki rüzgâr gücü aşağıdaki denklem ile bulunabilir;

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.4)$$

Burada A, bıçak Süpürme Alanıdır ve ρ , verilen yükseklikteki hava yoğunluğudur.

Rüzgâr hızının farklı aşamalarındaki değişimi aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$C_p = 4a (1 - a)^2 \quad (2.5)$$

Eksenel indüksiyon faktörü ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanır:

$$a = V_1 - \frac{V_2}{V_1} \quad (2.6)$$

V_1 ve V_2 'nin, yükseklikte rüzgâr hızı ve türbin kanadından önceki rüzgâr hızı olduğu yer. Rüzgâr kanadından önceki ve sonraki rüzgâr hızı $V_2 = V_3$ 'e eşittir.

Aşağı yönde rüzgâr hızı V_4 şuna eşittir:

$$V_4 = V_1 (1 - 2a) \quad (2.7)$$

Rüzgârın ekserjisi şu şekilde bulunabilir:

$$extoplam = ex(kinetik) + ex(potansiyel) + ex(fiziksel) + ex(kimyasal) \quad (2.8)$$

Rüzgâr türbininde potansiyel ekserji ihmal edilebilir düzeydedir. Fiziksel ekserji, kimyasal ekserji ve kinetik enerjinin hesaplama formülü hesaplanır. Basınç, yukarı akışta, türbin kanadından önce, türbin kanadından sonra ve aşağı akıştaki basınç değişimleridir, Bernoulli denklemi uygulanarak bulunabilir. Basıncın değişimi, Bernoulli denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (2.9)$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad (2.10)$$

Burada p1, p2, p3 ve p4, kanattan önce, kanattan sonra ve aşağı akış basınçları ve hava yoğunluğudur.

Rüzgâr enerjisi ve ekserji verimlilikleri aşağıdaki gibidir:

$$\text{enerji verimliliği } \eta = E_{out}/W \quad (2.11)$$

$$\text{ekserji verimliliği } \psi = E_{out}/Ex \quad (2.12)$$

W ve Ex sırasıyla toplam girdi enerjisi ve ekserjidir ve Eout toplam üretilen enerji veya elektrik çıktısıdır.

3. DENİZEL MEKÂNSAL PLANLAMA

Denizel çevrede insan faaliyetlerinin çeşitliliğinin artması ve yoğunlaşması nedeniyle, hem denizel çevre ekosisteminin sürdürülebilirliği, hem de çevre ve insan etkinliklerinin dengeli bir şekilde yürütülebilmesi için çok yönlü bir bakış açısı ile kurgulanmış bir planlama sistemine ihtiyaç olduğu açıktır. Bu bağlamda, denizel çevreyi gözeterek; ekonomik, ekolojik ve sosyal hedefler doğrultusunda, beşeri faaliyetlerin zamansal ve mekânsal olarak kurgulandığı bir planlama ve yönetim yaklaşımının sürdürülebilirlik için gerek koşul olduğu ifade edilebilir [78].

Denizel mekânsal planlama (DMP), genel olarak politik bir süreçle belirlenen ekolojik, ekonomik ve sosyal amaç ve hedeflere ulaşmak için deniz alanlarındaki insan faaliyetlerinin mekânsal ve zamansal dağılımını analiz eden ve eşgüdüm içinde uygulamayı planlayan bir kamu süreci olarak tanımlanmaktadır [82, 84]. Denizel mekânsal planlamanın ekosistem tabanlı, bütünlük, yer veya alan tabanlı, uyarlanabilir, katılımcı, stratejik ve öngörülü olması temel özellikleridir. DMP süreci, deniz alanlarına yönelik sosyal ve ekonomik hedeflere açık ve planlı bir şekilde ulaşmak için kalkınma taleplerini ekosistem koruma ilkesi ile dengelemektedir. Etkili bir DMP süreci, sektörler ve devlet kurumları arasında entegrasyonu sağlamalı, stratejik ve geleceğe yönelik olmalı ve tüm süreç boyunca paydaşların aktif katılımını sağlamalıdır [85].

Ehler ve Douvere'ye göre; etkili bir DMP süreci sürdürülebilir kalkınma ve ekosistem hizmetlerinin sürdürülmesine yönelik bir temel üzerine kurulmalıdır. Ayrıca, ekolojik, ekonomik, sosyal, kültürel amaç ve hedefleri de dengelemelidir [82].

Birçok ülke, deniz taşımacılığı, petrol ve gaz geliştirme, açık deniz enerjisi, açık deniz su ürünleri yetiştiriciliği ve atık bertarafı gibi pek çok farklı insan faaliyeti için deniz alanlarını belirlemektedir. Ancak, bu planlamanın genellikle sektör bazında veya durum bazında, diğer insan faaliyetleri veya deniz ortamı üzerindeki etkileri çok fazla dikkate alınmadan yapıldığında iki ana tür çatışma söz konusu olmaktadır.

(1) Deniz alanları üzerinde insan kullanımları arasında ihtilafların bulunması veya

ihtilaf oluşması beklentisi (kullanıcı-kullanıcı çatışmaları), (2) Deniz alanları üzerinde insan kullanımlarının, bulunduğu ekosistem üzerinde ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliğini tehlikeye atması, biyoçeşitliliğe zarar vermesi gibi nedenlerin varlığı veya beklentisidir (kullanıcı-doğa çatışmaları).

Örneğin, açık deniz rüzgâr türbinleri ve balık çiftlikleri için ayrılacak yerlerin belirlenmesi insan kullanımları arasında oluşacak ihtilafların giderilmesine yönelik bir planlama sağlarken, ekosistem açısından hassas ve önemli bölgelerin tespiti ve bu bölgelerin insan faaliyetlerinden etkilenmeyecek şekilde koruma altına alınması, ekosistemin korunmasına yönelik bir planlama sağlamaktadır [78].

Deniz alanlarının bazı bölgeleri hem ekolojik hem de sosyo-ekonomik açılarından diğer deniz alanlarından daha zengin ve önemli olabilmektedir [87]. Türler, habitatlar, hayvan popülasyonları, petrol ve gaz yatakları, kum ve çakıl yatakları, sürekli rüzgârlar veya dalgalar deniz alanlarında homojen bir şekilde dağılmamaktadır. Bu nedenle; mekânsal ve zamansal dağılımları anlamak ve bunları haritalandırmak, etkili deniz mekânsal planlamasının temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Denizel mekânsal planlamanın önemli sonuçları, uyumlu kullanımları geliştirmek ve kullanımlar arasındaki ihtilafları azaltmaktır. İklim değişikliği ve diğer uzun vadeli baskılar (örneğin aşırı avlanma ve/veya aşırı avlanma nedeniyle bu dağılımların nasıl değişebileceğinin incelenmesi veya habitat kaybı) denizel mekânsal planlama için bir başka önemli çalışma alanıdır [88]. Denizel mekânsal planlamada başlıca hedef, bir deniz alanı veya deniz ekosistemi için kapsamlı bir mekânsal yönetim planının oluşturulmasıdır. DMP, bu anlamda, tüm sistemi bir “gelecek vizyonuna” doğru yönlendiren bir sistemdir. Bu kapsamda, DMP’nin yönetilecek olan deniz alanı için sadece güncel koşulların belirlenmesi ve uygulanması yerine, 10 yıllık ve/veya 20 yıllık bir gelecek hedefi olan, kapsamlı, öngörülü bir mekânsal yönetim planının olması tercih edilmelidir. Bu planın, ilgili bölgenin siyasi ve sosyal önceliklerini de yansıtması gerekmektedir. Denizel mekânsal planlama, genel olarak bir çok karar verici paydaşlar için rehberlik sağlamayı amaçlamaktadır. DMP bütünsel ve tamamlayıcı bir şekilde, güvenle karar verme araçlarına sahip olmaları için, sektörlerin faaliyetlerden sorumludur.

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan baskılar, genellikle deniz alanlarının yönetimini iyileştirmeye yönelik girişimlere yol açmıştır [89]. Eylül 2012’de, Avrupa

Komisyonu, AB için Mavi Büyüme stratejisini geliştirmiştir. AB'nin Bütünleşik Denizcilik Politikası, AB'nin Avrupa'daki denizcilik sektörlerinin sürdürülebilir ekonomik iyileşmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Mavi Büyüme'nin potansiyel itici güçleri beş ana başlıkta sınıflandırılmıştır. Bu başlıklar; su ürünleri yetiştiriciliği, denizel yenilenebilir enerji, deniz madenciliği, deniz biyoteknolojisi ve kıyı-deniz turizmidir [90].

12 Mart 2013 tarihinde, AB Komisyonu entegre kıyı yönetimi ve denizel mekânsal planlama konusunda yeni bir ortak girişim başlatmıştır. Taslak Yönerge şeklini alan teklif, AB üye devletlerinde deniz ve kıyı faaliyetlerinin sürdürülebilir büyümesini ve kıyı ve deniz kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik etmek için denizel mekânsal planlama ve entegre kıyı yönetimi için bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır [91]. 2012 yılında AB Mavi Büyüme Stratejisi'nin başlangıcından itibaren, denizler Avrupa ekonomisinin itici güçlerinden biri olarak görülmektedir. DMP bu kapsamda, sürdürülebilir Mavi Büyüme için ve zorlukların üstesinden gelmek için anahtar araçlardan biri olarak değerlendirilmektedir [92].

DMP'nin, çalışma alanlarından biri denizde yenilenebilir enerjidir [93]. Deniz üzerine yerleştirilecek olan rüzgâr türbinlerinin kurulumu için mekânsal analizinin yapılması ve karar verme ölçütlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir [94]. Bir açık deniz rüzgâr çiftliği (OWF)'nin kurulması için endüstrinin mekânsal gereksinimlerini anlamak ve bu gereksinimlere göre planlamak önemlidir. Bir açık deniz rüzgâr türbininin lokasyonun belirlenmesinde, sadece türbinlere değil; aynı zamanda trafo merkezine ve kara şebekesine olan verimli bağlantılara da dikkat edilmelidir. Bireysel türbinlerin mekânsal düzeni, bir deniz rüzgâr çiftliğinin geliştirilmesinde oldukça büyük bir öneme sahiptir. Su derinliği, rüzgâr hızı, karasal ağa bağlantı, deniz tabanı, kıyıya yakınlık, yakındaki limanlar ve ulaşım tesisleri, deniz taşımacılığı, doğa alanları, balıkçılık, mühimmat, kablolar ve boru hatları, sualtı kültür mirası veya çevresel etkiler deniz rüzgâr çiftliği sahalarının planlama ölçütleridir.

Rüzgâr türbinlerinin konumlarının potansiyelini değerlendirmek, mekânsal planlamasını yapabilmek, uygulanacak metodolojileri planlamak ve kurulacak sistemi optimize etmek için Coğrafi Bilgi Sistemleri denizel planlama çalışmaları için önemli bir araçtır [94-97].

3.1 Denizel Mekânsal Planlamada Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Önemi

DMP'nin gerçekleştirilebilmesi için karar vericiler ve/veya plancılar, veriye ulaşmak, ilgili verileri kullanmak, arşivlemek, yönetmek ve analiz etmek için Coğrafi Bilgi Sistemlerine gereksinim duymaktadır. Ayrıca, tekrarlı bir süreç olan Denizel Mekânsal Planlamanın farklı aşamalarında yeni verilerin sisteme dâhil edilmesi ve işlenmesi de söz konusudur [98]. Uzaktan algılama, CBS, GPS (Küresel Konumlandırma Sistemleri), GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ve su altı otonom sistemleri gibi araçlar ve teknikler, mekânsal ve zamansal verileri daha hızlı erişilebilir hale getirmekte ve DMP'yi zaman içinde önemli ölçüde iyileştirebilmektedir [99].

DMP farklı kullanımlar için alan ayırarak ve bölgelendirme uygulayarak farklı deniz kullanımları arasındaki çatışmaları ve olumsuz etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. DMP'de temel zorluk, çoklu ekolojik, ekonomik ve sosyal hedefler arasında denge sağlayan mekânsal seçimler yapmaktır. Sürdürülebilir bir mekânsal planlama tüm insan faaliyetlerinin deniz ortamı üzerindeki kümülatif etkilerini anlamlı ekolojik ölçeklerde hesaba katmalıdır [100]. Bu bağlamda her tür coğrafi veriyi toplamak, depolamak, güncelleştirmek, analiz etmek, yönetmek ve sunmak için tasarlanmış bir sistem olan CBS, DMP sürecine dâhil edilebilir. İlk olarak, CBS araçları bir deniz alanındaki biyo-fiziksel, sosyo-ekonomik ve yönetsel özelliklerin tanımlanması için de kullanılmaktadır. Bu bilgiler DMP sürecindeki temel bilgilerdir. İkinci olarak, CBS bu verileri ve analiz sonuçlarını mekânsal dağılımını tanımlamak, sorgulamak veya tematik haritalar şeklinde görselleştirmek için etkili bir araçtır. Dolayısıyla CBS, yönetim performansının değerlendirilmesi ve belirli biyofiziksel, sosyo-ekonomik ve yönetim faktörleri üzerindeki etkileri ölçmek için göstergelerin elde edilmesi için de kullanılabilir. Üçüncü olarak ise, CBS farklı ölçekte, farklı kaynaktan alınmış ve üretilmiş mekânsal verilerin birleştirilmesine olanak tanımaktadır [101].

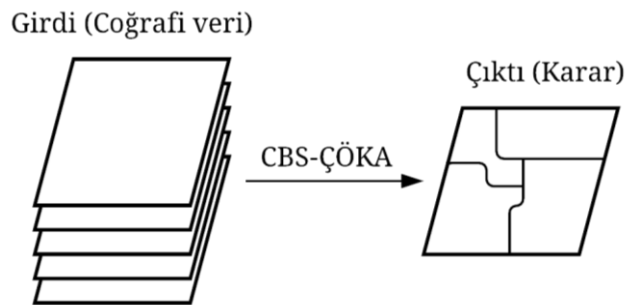
CBS teknolojisindeki gelişmeler, çevresel sorunları çözme ve farklı kaynaklardan elde edilen büyük miktarda veriyi entegre etme kabiliyeti sayesinde DMP'de dâhil olmak üzere birçok mekânsal planlama alanının ilerlemesine katkıda bulunmuştur [102-103]. CBS, farklı yönetim alternatifleri arasındaki karmaşıklığı modelleme, belirsizlikle başa çıkma (örneğin rastgele süreçler veya veri eksiklikleri), çok sayıda

ölçekte (örneğin yerel, ulusal, küresel) işlev görme kabiliyeti sayesinde etkili bir karar destek sistemidir [104]. İşlevsel bir deniz mekânsal planlama sisteminin geliştirilmesi için hedeflenen CBS uygulaması aşamalı olarak oluşturulmalıdır.

CBS, kara veya denizde rüzgâr türbinlerinin kurulumu için uygun alanların belirlenmesinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. CBS tabanlı modellerin tasarımı ve uygulanması, denizel alanlardaki ilgili sorunları çözebilir ve bunun bir sonucu olarak, olumsuz etkiler en aza indirilirken açık deniz rüzgârının sürdürülebilirliği ve karlılığı maksimize edilir [105].

3.2 Çok Ölçütlü Karar Analizi (ÇÖKA)

CBS tabanlı ÇÖKA, rüzgâr türbinlerinin mekânsal olarak konumlandırması için en etkili yöntemdir [106]. ÇÖKA, birçok ölçüt ve veri katmanına sahip mekânsal problemlere yönelik kararların alınmasında kullanılan bir tekniktir ve rüzgâr türbinlerinin mekânsal planlama ve konumlandırmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [107]. En temel düzeyde, CBS-ÇÖKA, karar vererek bilgi elde etmek üzere coğrafi verileri ve değer yargılarını (karar vericinin tercihleri) dönüştüren ve birleştiren bir süreç olarak ifade edilebilir (Şekil 3.1) [107]. Bu kapsamda, CBS, farklı coğrafi verileri ayrı katmanlarda görüntülemek, analiz etmek ve işlemek, yeni veri katmanları üretmek ve / veya uygun arazileri belirlemek için kullanılırken, ÇÖKA alternatiflerin geliştirilmiş kriterlerini karşılaştırarak uygunluğu değerlendirmek için kullanılmaktadır [108].



Şekil 3.1 : CBS-ÇÖKA: girdi-çıktı perspektifi (Malczewski, 1999).

Çok ölçütlü karar verme problemi temel olarak 6 alt bileşeni içermektedir; (i) ulaşılmaya çalışılan amaç veya amaçlar dizisi, (ii) karar verme sürecine dâhil olan değerlendirme kriterlerine ilişkin tercihleri ile birlikte karar verici veya karar vericiler grubu, (iii) karar vericilerin alternatif hareket tarzlarını değerlendirdiği bir

dizi değerlendirme kriteri (hedefler ve/veya öznitelikler), (iv) karar alternatifleri, yani karar veya eylem değişkenleri, (v) kontrol edilemeyen değişkenler ve (vi) her bir alternatif öznitelik çifti ile ilişkili sonuçlar veya sonuçlar kümesi. Bir mekânsal çok ölçütlü karar problemi, belirli bir değerlendirme ölçütlerine göre bir veya daha fazla alternatifin seçiminin yapıldığı (bunların sıralaması gerçekleştirildiği) bir dizi coğrafi olarak tanımlanmış ölçütleri içermektedir[109].

Ölçüt, hem öznitelik kavramını, hem de hedefi içeren genel bir terimdir. Bu nedenle, ÇÖKA, hem çok amaçlı hem de çok özellikli karar vermeyi içeren genel bir terim olarak kullanılmaktadır. Bu anlamda ÇÖKA'nın genel özellikleri üç başlıkta incelenebilir:

- (i) Çok amaçlı karar analizi (multiobjective decision analysis, MODA) ve çok özellikli karar analizi (multiattribute decision analysis, MADA),
- (ii) Bireysel ve grup karar verme,
- (iii) Kesinlik ve belirsizlik altında karar verme (yani, olasılıklı (probabilistic) ve belirsiz (fuzzy) karar verme).

Yenilenebilir enerji için yer seçimi, karmaşık çok ölçütlü bir karar verme problemidir. CBS-ÇÖKA süreci genellikle problemin tanımlanması, ölçüt katmanlarının normalleştirilmesi, ölçüt ağırlıklarının belirlenmesi adımlarından oluşur. Bu adımlardan sonra ölçütler hakkındaki bilgilere göre ve ÇÖKA yöntemleriyle bölgesel uygunluk değerlendirmesi veya lokasyonların sıralaması yapılır. Bu şekilde yenilenebilir enerji santrallerinin inşası için en uygun yer belirlenebilecektir [110].

• Problemin tanımlanması

Tüm karar verme yöntemleri problemin tanımlanması ile başlar. Bu aşamada alternatifler formüle edilerek, problem ve çalışma alanı tanımlanır. Bu aşama kararları gerektiren koşullar için araştırmayı içermektedir [109].

• Değerlendirme ölçütleri

Karar problemi belirlendikten sonra, değerlendirme ölçütleri seti (hedefler ve öznitelikler) belirlenir. İkinci aşama olan değerlendirme ölçütlerinin tanımlanması; belirli bir bölgenin yenilenebilir enerji santrallerinin kurulumu için uygunluğunun

değerlendirilmesinde özel bir etkiye sahip olan ve hariç tutulan ölçütlerinin tanımlanması ile gruplanmasını içeren karmaşık ve önemli bir süreçtir [103].

Değerlendirme ölçütleri ve coğrafi varlıklar arasındaki ilişkiler haritalar ile ifade edilmektedir. Değerlendirme ve kısıtlama olmak üzere iki tür ölçüt haritası vardır. Değerlendirme ölçüt haritası, alternatiflerin performansını değerlendirmek için kullanılır. Değerlendirme ölçüt haritaları, aynı zamanda öznitelik haritaları, tematik haritalar veya veri katmanları olarak da adlandırılır. Kısıtlama haritaları ise, özniteliklerin ve karar değişkenlerinin alabileceği değer üzerindeki sınırlamaları göstermektedir [109].

- **Ölçüt katmanlarının normalleştirilmesi**

Üçüncü aşama, ölçütlere ilişkin katmanların normalleştirilmesidir. Elde edilen veriler, gerçek sayısal değerlerden ve/veya karar vericinin görüşlerinden elde edilir. Daha sonra, nicel hesaplamalarda kullanılabilmeleri için normalize edilirler. [110]. Bu amaçla ölçütler, haritaları oluşturmak için mevcut bilgi türleri temelinde sınıflandırılırlar. Ölçüt katmanlarını karşılaştırılabilir hale getirmek için Doğrusal Ölçek Dönüşümü, Değer/Fayda fonksiyonu ve Bulanık Mantık gibi bir dizi yaklaşım kullanılabilir [110].

- **Ölçüt ağırlıklarının belirlenmesi**

Dördüncü aşama, değerlendirme ölçüt ağırlık katsayılarının belirlenmesidir. Ölçütler problem içinde aynı derecede anlamlı olmadığından, bireysel ölçütlerin etkisini, onlar için uygun ağırlık katsayıları kullanarak tanımlamak gerekmektedir [106]. Ağırlık, dikkate alınan diğer ölçütlere göre önemini belirten atanan bir değerdir [111]. Ölçütlerin normalize ağırlıklarının hesaplanmasında ağırlıklandırma yöntemleri kullanılmaktadır. CBS-ÇÖKA perspektifinden bakıldığında, ağırlıklandırma ölçütleri küresel ve yerel olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Global teknikler tercihlerin mekânsal homojenliği varsayımına dayanan sıralama, derecelendirme, ikili karşılaştırma ve entropi yaklaşımlarını içerir. Bu yöntemler, karar vericilerin değerlendirme ölçütlerine göre tercihlerini belirtmelerini gerektirir [111].

Ölçüt ağırlıkları $w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_n$, olmak üzere, $0 \leq w_k \leq 1$, ve $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ koşullarını sağlaması gerekmektedir. Ağırlık ne kadar büyükse, ölçüt o kadar önemlidir.

İkili karşılaştırma yöntemi: Bu yöntem bir oran matrisi oluşturmak için ikili karşılaştırmaları içermektedir. İkili karşılaştırmalar girdi olarak alınır ve göreceli ağırlıklar çıktı olarak üretilir. Ağırlıklar, karşılıklı oran matrisinin maksimum öz değeri ile ilişkili öz vektörün normleştirilmesiyle belirlenir. Ölçütleri karşılıklı olarak derecelendirmek için 1'den 9'a kadar değerlere sahip bir temel ölçek kullanır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : İkili karşılaştırma ölçeği [111].

Önem derecesi	Tanım
1	Eşit derecede önemli
3	Orta derecede önemli
5	Güçlü derecede önemli
7	Çok güçlü derecede önemli
9	Aşırı derecede önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

İkili karşılaştırmalar, C matris olmak üzere, $C = [c_{kp}]_{n \times n}$ şeklinde düzenlenir. Burada c_{kp} , k ve p ölçütlüleri için ikili karşılaştırma derecelendirmesidir. Matris oluşturulduktan sonra, ölçek ağırlık vektörü $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ hesaplanabilir. Öncelikle C matrisi aşağıdaki formüle göre normalize edilir.

$$c_{kp}^* = \frac{c_{kp}}{\sum_{k=1}^n c_{kp}}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.1)$$

Daha sonra ağırlıklar aşağıda verilen eşitliğe göre hesaplanır:

$$w_k = \frac{\sum_{p=1}^n c_{kp}^*}{n}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.2)$$

Sonraki aşamada ikili karşılaştırmalı yargılarının tutarlılığını hesaplanır. Tutarlılık oranı (TO) aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$TO = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n-1)} \quad (3.3)$$

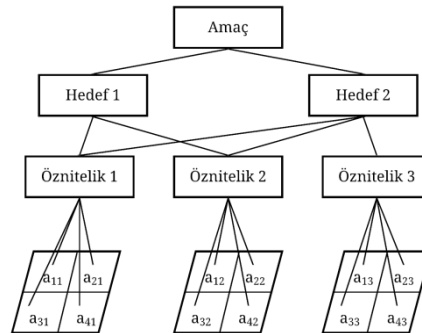
Buradaki eşitlikte λ_{max} maksimum özdeğer ve RI, yani rastgele indeks, rastgele oluşturulmuş ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık indeksidir. RI karşılaştırılan ölçüt sayısına (n) göre değişkenlik gösterir ve n = 2, 3, 4, 5, 6, 7, ve 8 için sırasıyla RI = 0.00, 0.58, 0.92, 1.12, 1.24, 1.32, ve 1.41 değerlerini alır [110]. Tutarlılık oranı TO < 0.10 olması durumu ikili karşılaştırmalarda makul bir tutarlılık düzeyini gösterir;

bununla birlikte, $CR \geq 0.10$ ise, yargıların tutarsız olduğu sonucuna varılır. Bu gibi durumlarda, ikili karşılaştırma matrisi C'deki orijinal değerler yeniden gözden geçirilerek revize edilmelidir [111].

ÇÖKA, karar problemlerini yapılandırmak ve alternatif kararları tasarlamak, değerlendirmek ve önceliklendirmek için Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP), İdeal Çözüm Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS) gibi yöntemler sunar [107].

3.2.1 Analitik hiyerarşi yöntemi (Analytic hierarchy process, AHY)

Saaty (1980) tarafından önerilen AHP en kapsamlı ÇÖKA yöntemlerinden biridir. Bu yöntem üç ilkeye dayanmaktadır: Ayırıştırma (decomposition), karşılaştırmalı değerlendirme (comparative judgment) ve önceliklerin sentezi (synthesis of priorities). Ayırıştırma ilkesi, bir karar sorununun, temel unsurlarını yakalayan bir hiyerarşiye ayrıştırılmasını gerektirir. Karşılaştırmalı değerlendirme, hiyerarşik yapının (Şekil 3.2) belirli bir düzeyindeki öğelerin, bir üst düzeydeki ebeveynlerine göre ikili karşılaştırmalarının değerlendirilmesini gerektirir. İkili karşılaştırma, AHP yönteminde kullanılan temel ölçüm biçimidir. Sentez ilkesi ise, hiyerarşinin çeşitli düzeylerindeki türetilmiş oran ölçeği önceliklerinin her birinin, hiyerarşinin en alt düzeyindeki öğeler (yani alternatifler) için bileşik bir öncelikler kümesi oluşturulmasını içerir. Bu ilkeler göz önüne alındığında, AHP yöntemi (i) AHP hiyerarşisinin oluşturulması, (ii) ikili karşılaştırma yöntemini kullanarak hiyerarşik yapının her bir ögesine önem ağırlıklarının atanması ve (iii) genel bir öncelik derecelendirmesinin oluşturulması olmak üzere üç ana adımı içerir [111].



Şekil 3.2 : Karar probleminin hiyerarşik yapısı; a_{ik} k öz niteliğinin (ölçüt) i alternatifine göre değeri ($k = 1, 2, 3$, ve $i = 1, 2, 3, 4$) (Malczewski ve Rinner (2015)'ten uyarlanmıştır).

Amaç, hedef, öznetelik ve alternatifleri içeren tipik bir hiyerarşik yapıda AHP modeli, genel değerlendirme puanını (veya öncelik derecelendirmesini) aşağıdaki şekilde tanımlar:

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_l w_{k(l)} v(a_{ik}) \quad (3.4)$$

Burada;

$v(a_{ik})$ = Değer fonksiyonu,

w_l = l hedefi ile ilişkili ağırlıklar ($l = 1, 2, \dots, p$), ve

$w_{k(l)}$ = l 'inci hedefle ilişkili k 'inci özelliğe atanan ağırlıklardır.

CBS ve AHP'yi entegre etmek için kullanılan yaklaşımlar iki gruba ayrılabilirler. İlk olarak, AHP, ölçüt haritası katmanlarıyla ilişkili ağırlıkları tahmin etmek için bir araç olarak CBS'ye entegre edilebilir. Ağırlıklar tahmin edildikten sonra, ağırlıklı doğrusal kombinasyon (weighted linear combination, WLC) kuralı kullanılarak ölçüt haritası katmanlarıyla birleştirilir. Bu yaklaşım, alternatiflerin ikili olarak karşılaştırılmasının zor olduğu durumlarda, çok sayıda alternatif içeren problemler için önemlidir. İkinci olarak ise, AHP yöntemi, alternatifleri temsil eden seviye dâhil olmak üzere hiyerarşi yapısının tüm seviyeleri için öncelikleri birleştirmek için bir yöntem olarak kullanılır. Bu yaklaşım ile nispeten daha az sayıda alternatif değerlendirilebilir [110-111].

3.2.2 Bulanık ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği (Bulanık TOPSIS)

3.2.2.1 Bulanık mantık

Bulanıklık (Fuzziness), kesin tanımlanmış sınırları olmayan bir dizi nesneyi veya öğeyi tanımlayan bir belirsizlik türüdür. Bu tür kesin olarak tanımlanmamış nesne kümeleri bulanık kümeler olarak adlandırılır [112]. Bulanık sayı ve sözel değişken (linguistic variable) kavramları, bulanık ÇÖKA'nın temelini oluşturur. Bulanık mantık, kısmi gerçek kavramını işlemek için genişletilmiş geleneksel (Boolean) mantığın bir üst kümesidir. Evet, / Hayır, Doğru / Yanlış veya Siyah / Beyaz gibi geleneksel değerlendirmeler arasında ara değerlerin tanımlanmasına izin veren çok değerli bir mantıktır. Bulanık bir küme, nesnelerin kısmen birden çok kümeye ait olmasına izin verir. Bulanık kümeler teorisinde, bir M bulanık kümesinin üyelik

fonksiyon $\mu_M(x)$ ile tanımlanır ve nesnenin üyelik değeri veya derecesi 0 ile 1 arasında herhangi bir değer alabilir. Bir x ögesi, $\mu_M(x) = 1$ ise kesinlikle M 'ye aittir ve $\mu_M(x) = 0$ ise M 'ye ait değildir. Bir ögenin üyelik değerinin yüksek olması M kümesine ait olma derecesinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir [112-113].

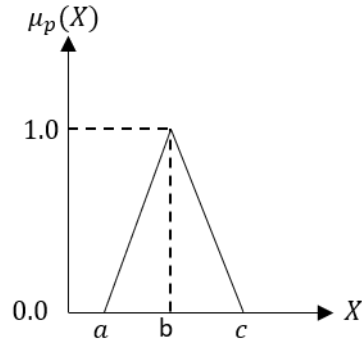
Malczewski (2002)'ye göre sözel bilginin bir kombinasyonunu gerçekleştirmek için iki ana yaklaşım türü vardır: doğrudan yaklaşım ve dolaylı/sembolik yaklaşım [108-109]. Yaklaşım veya dolaylı yaklaşım, sözel terimlerle ilişkili üyelik değerlerini belirlemek için trapezoidal veya üçgen gibi üyelik fonksiyonları sözel terimlerin değerini belirlemek için kullanılır. Bu yaklaşım, geleneksel CBS-ÇÖKA yöntemlerini "bulanıklaştırmak (fuzzify)" için kullanılır. Doğrudan veya sembolik yaklaşım, hesaplama için etiketleri doğrudan kullanır. Bu, sözel terimler kümesinin bir ölçek üzerinde eşit olarak dağıtılmış sıralı bir yapı olduğu öncülüne dayanmaktadır.

3.2.2.2 Bulanık TOPSIS

Hwang ve Yoon (1981) tarafından önerilen İdeal Çözüme Benzerliğe (Görelî Yakınlığına) Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS) yaygın olarak kullanılan ÇÖKA yöntemlerinden biridir [115]. Bu yöntem, seçilen alternatifin en kısa mesafeden Pozitif İdeal Çözüme (Positive Ideal Solution, PIS) (maliyet ölçütlerini en aza indiren ve fayda ölçütlerini maksimize eden çözüm) ve en uzak mesafeden Negatif İdeal Çözüme (Negative Ideal Solution, NIS) sahip olması gerektiği prensibine dayanmaktadır [115].

Chen (2000), TOPSIS yöntemini üçgen bulanık sayılarla genişleterek bulanık TOPSIS yöntemini ortaya koymuştur [116]. Şekil 3.3 $\tilde{n}$ bulanık sayısının üçgen üyelik fonksiyonunu temsil etmektedir. Üyelik fonksiyonlarından üçgen fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mu_k(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{a-x}{a-b}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (3.5)$$



Şekil 3.3 : Üçgen bulanık sayı (Chen (2000)’dan uyarlanmıştır).

Buna göre, eğer $\tilde{x} = (a_1, b_1, c_1)$ ve $\tilde{y} = (a_2, b_2, c_2)$ iki üçgen bulanık sayı ise aralarındaki mesafe aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$d(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]} \quad (3.6)$$

Bulanık TOPSIS için üçgen bulanık sayılar kullanılarak işlem adımları aşağıda sıralandığı gibidir.

Adım 1: K tane karar verici olduğu varsayımında, k’ıncı karar vericinin A alternatifine ait C_{ij} ölçütü için bulanık derecesi $x_{ij}^{\sim k} = (a_{ij}^k, b_{ij}^k, c_{ij}^k)$ ve önem ağırlığı $w_{ij}^{\sim k} = (a_{j1}^k, b_{j2}^k, c_{j3}^k)$ olarak gösterilir. Buna bağlı olarak, ölçütlerin önem ağırlığının belirlenmesi için Çizelge 3.2’de verilmiş olan uygun sözel değişkenlerden ve ölçütlere göre alternatifler için sözel derecelendirmeler seçilir.

Çizelge 3.2 : Ölçütlerin önem ağırlığının belirlenmesi için sözel değişkenler ve üçgen bulanık sayılar (Chen (2000)’dan uyarlanmıştır).

Sıralama	Üçgen Bulanık Sayılar
Çok düşük	(0, 0, 0.1)
Düşük	(0, 0.1, 0.3)
Orta derecede düşük	(0.1, 0.3, 0.5)
Orta	(0.3, 0.5, 0.7)
Orta derecede yüksek	(0.5, 0.7, 0.9)
Yüksek	(0.7, 0.9, 1.0)
Çok yüksek	(0.9, 0.9, 1.0)

Adım 2: Bulanık karar matrisini oluşturmak ve her bir ölçütün bulanık ağırlığını belirlemek için sözel değerlendirme Çizelge 3.3 yardımıyla üçgen bulanık sayılara dönüştürülür.

Çizelge 3.3 : Ölçüt derecelendirmeleri için sözel değişkenler (Chen (2000)’dan uyarlanmıştır).

Sıralama	Üçgen Bulanık Sayılar
Çok zayıf	(0, 0, 1)
Zayıf	(0, 1, 3)
Orta derecede zayıf	(1, 3, 5)
Vasat	(3, 5, 7)
Orta derecede iyi	(5, 7, 9)
İyi	(7, 9, 10)
Çok iyi	(9, 9, 10)

Adım 3: Normalleştirilmiş bulanık karar matrisi oluşturulur. Normalleştirilmiş bulanık karar matrisi $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$ olmak üzere:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right) \text{ ve } c_j^* = \max_i \{c_{ij}\} \text{ (yararar ölçütü)} \quad (3.7)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{c_{ij}^-}, \frac{a_j^-}{c_{ij}^-} \right) \text{ ve } c_j^- = \min_i \{a_{ij}\} \text{ (maliyet ölçütü)} \quad (3.8)$$

Adım 4: Ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi oluşturulur. Ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi $\tilde{V} = (\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times w_j)$ olarak tanımlanır.

Adım 5: Bulanık pozitif ideal çözümü (FPIS, A^*) ve bulanık negatif ideal çözümü (FNIS, A^-) hesaplanır.

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*), \quad \tilde{v}_{ij}^* = \max_i \{v_{ij3}\}; \quad (3.9)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-), \quad \tilde{v}_{ij}^- = \min_i \{v_{ij1}\} \quad (3.10)$$

Adım 6: Her bir alternatifin FPIS ve FNIS’e olan uzaklıklar hesaplanır. d_i^* ve d_i^- sırasıyla FPIS ve FNIS’e olan uzaklıkları tanımlamaktadır.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}^*, \tilde{v}_j^*), \quad (3.11)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}^-, \tilde{v}_j^-), \quad (3.12)$$

Adım 7: Her bir alternatif için yakınlık katsayısı (closeness coefficient, CC_i) hesaplanır.

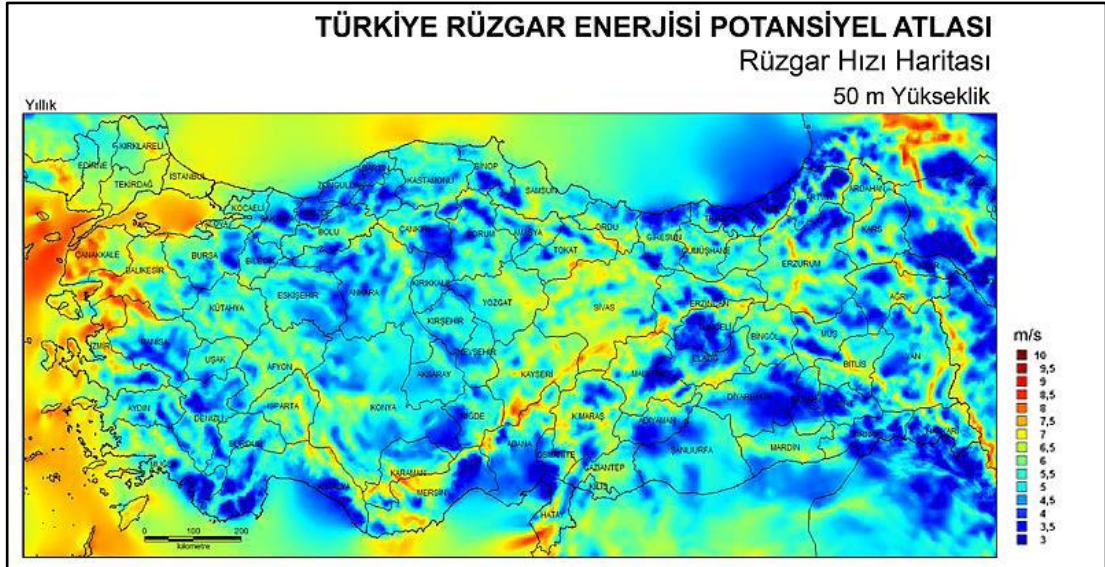
$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*} \quad (3.13)$$

Adım 8: Alternatifler sıralanır. En yüksek yakınlık katsayısına sahip alternatif, en iyi alternatifi temsil eder.

4. ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

4.1 Çalışma Alanı

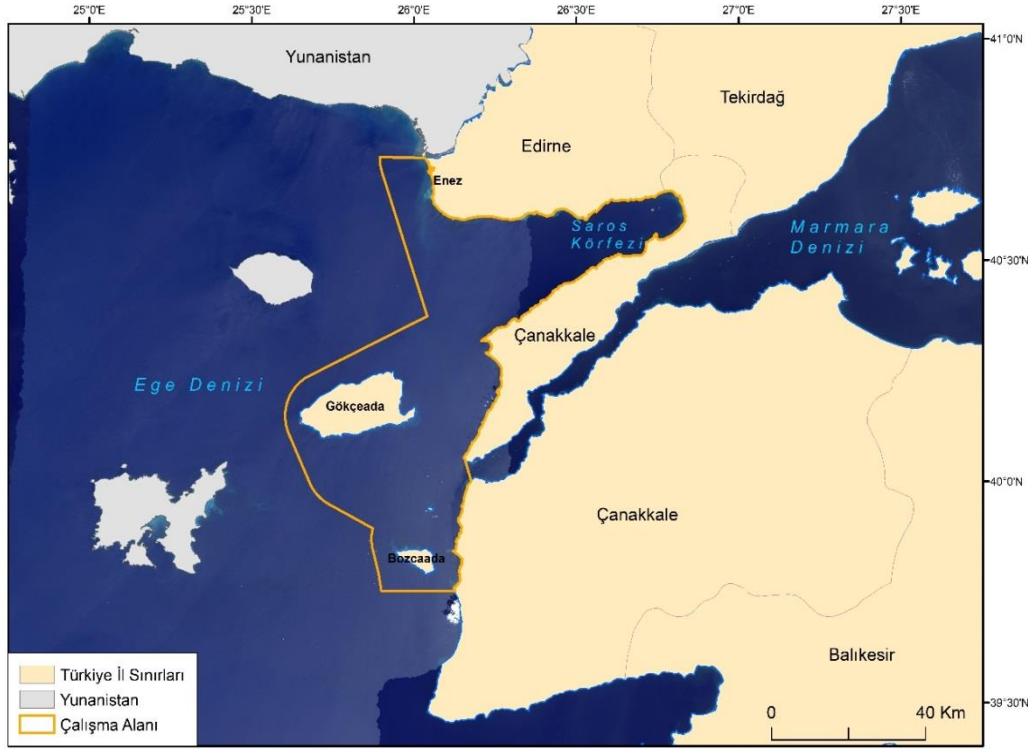
Türkiye’de rüzgâr enerji potansiyeli ele alındığında, bu konuyla ilgili Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7.5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilerek, Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyelinin 48 bin MW olduğunu bildirilmiştir. Benzer bir çalışma da Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından 2002 yılında DMİ istasyon verileri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmaların amacı potansiyeli yüksek bölgeler hakkında bilgilendirme sağlamak, olası bir yatırım için fizibilite çalışmasında ilk izlenimi oluşturmaktır. 50 m yükseklik için üretilmiş Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) incelendiğinde (Şekil 4.1) Ege’nin kıyı kesimi, Marmara Denizi çevresi ve Akdeniz’in güney ve doğu kesimleri yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir [117].



Şekil 4.1 : Türkiye 50 m yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hız haritası [117].

Ege Denizi batıda, güney sınırının batı noktasından itibaren ederek, kuzeyde Meriç Nehri'ne kadar Yunanistan sahillerini takip etmektedir. Türkiye ile Yunanistan

arasındaki kara sınırını da oluşturan Meriç Nehir ağzını birleştiren hattı takip ederek, Türkiye kıyılarını izlemekte ve doğu sınırı, Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü'nde de Çanakkale Boğazı güney sınırı olarak belirtilen, Mehmetçik Burnu ile Kumkale Burnu'nu birleştiren hat ile Türkiye sahillerinin, Ege Denizi güney sınırının doğudaki bitiş noktasına kadar devam etmektedir. Çalışma alanı ve çalışma alanının sınırları Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Çalışma alanı toplamda 407.060,7 hektardır.



Şekil 4.2 : Çalışma alanı ve sınırları.

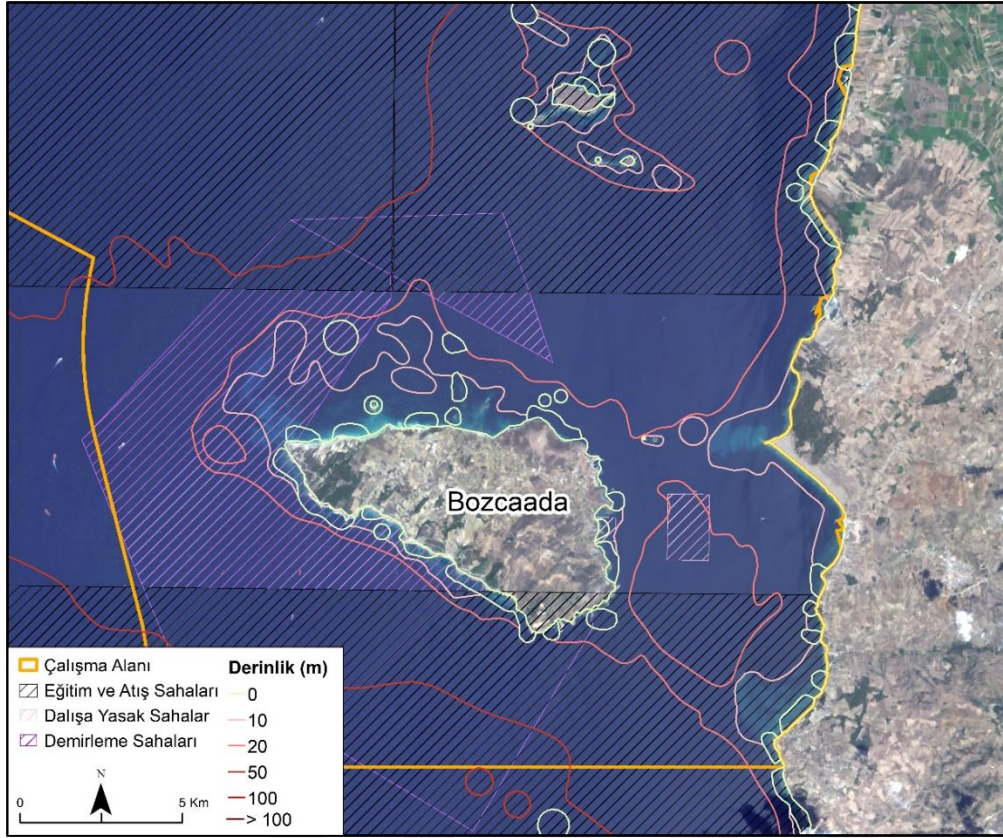
Açık deniz rüzgâr türbini kurulacak alanların uygun yer seçimi, mümkün olan azami rüzgâr gücü çıktısını tahmin etmek için kapsamlı bir çalışma yapılması gerekmektedir. Doğru ve güvenilir rüzgâr verileri, seçilen bölgenin potansiyel bir rüzgâr enerjisi değerlendirmesi için çok önemlidir. Türkiye Rüzgâr haritasını incelendiğinde Bozcaada, Gökçeada, Çanakkale ve Aliaga en yüksek ortalama rüzgâr hızı alan bölgeler olduğu görülmektedir.

Geleneksel ticari ve rekreasyonel etkinlik türlerini destekleyen zengin ve çeşitli bir doğal çevreye sahip Ege Denizi, aynı alanın rekabet eden kullanımları arasında doğrudan çıkar çatışmaları ortaya çıkabilecek önemli bir denizdir [118]. Bölgesel suların 6 mil sınırlaması, Ege Denizi'nde Münhasır Ekonomik Bölge (Exclusive Economic Zone/EEZ) kısıtı, rüzgâr çiftliklerini adalara veya ana karaya yaklaştırır.

Kıyı bölgesinin seçiminde deniz yatağının morfolojisi ve su derinliği de çok önemli ölçütlerdir [119]. Bu çalışmada, öncelikle Türkiye 50 m yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hız haritası dikkate alınarak, Kuzey Ege Denizi sahasında Bozcaada, Gökçeada, Enez ve Saros bölgeleri çalışma alanları olarak seçilmiştir.

4.1.1 Bozcaada

Bozcaada, Ege Denizi'nin kuzeydoğusunda yer alır ve Çanakkale Boğazı'na on iki mil mesafededir. Bozcaada, çevresinde 17 küçük adacık bulunan 37.6 km² alana sahiptir. Türkiye'nin Gökçeada (286 km²) ve Marmara Adası (113.4 km²)'ndan sonra 3. büyük adasıdır (Şekil 4.3) Bulunduğu mevki itibariyle stratejik bir öneme sahiptir. Bağlı bulunduğu Çanakkale ilinin merkez ilçesine 45 km, Geyikli beldesine 6.4 km, Midilli'ye 50 km ve Gökçeada'ya 30 km mesafede yer almaktadır. Adanın ekonomik getirisinin büyük kısmı turizm sektöründendir. Bozcaada ve çevresi kışın Azor yüksek basıncı ile Sibiryâ yüksek basıncı, yazın ise yazın Azor yüksek basıncı ile Basra alçak basıncının etkisindedir. Bu hava kütleleri arasında cephe sistemlerine bağlı olarak şekillenen orta enlem gezici alçak basınçlarından etkilenmektedir. Bu durum, hafif dalgalanmalarla birlikte aylık ortalama rüzgâr hızının bütün yıl enerji üretim sınırının üstünde olmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.3 : Bozcaada bölgesi.

Çanakkale Boğazı'nın Ege Denizi'ne doğru olan çıkışında yer almasına bağlı olarak boğazın kuzeydoğu güneybatı doğrultulu uzanışı rüzgârın boğazdan geçerek doğrudan Bozcaada'ya yönelmesine neden olmaktadır. [120].

Bozcaada, kışın daha yüksek olmak üzere yılın her ayında rüzgâr almaktadır. Çanakkale Boğazı'nın çıkışındaki konumu nedeniyle, çoğunlukla kuzey rüzgârlarına maruz kalmaktadır. Bozcaada'daki kuzeydoğu, kuzey kuzeydoğu ve kuzey kuzeybatı yönlerinde hâkim olan rüzgârların toplam rüzgâr yönünün neredeyse yarısını içermektedir. Yıllık ortalama rüzgâr hızı en yüksek, güneyden 10.6 m / s'dir.

Kuzeyden ikinci en yüksek yıllık ortalama rüzgâr hızı 7.3 m/s'dir. Aylara göre ortalama rüzgâr hızı 7,7 m/s ile Şubat ayında maksimum, Mayıs ayında en düşük rüzgâr 4,9 m/s'dir. En yüksek rüzgâr hızına sahip aylar kış mevsimine denk gelir. Ada, Çanakkale Boğazı'nın güneydoğusundaki konumu ve boğazın tam çıkışından dolayı kuzey rüzgârlarına açıktır. Son 34 yılda gözlemler; yıllık ortalama rüzgâr hızı 6,19 m/s olarak kaydedilmiştir. Ortalama fırtınalı gün sayısı (rüzgâr hızı > 17.2 m/sn) yılda 21.3'tür. Kuvvetli rüzgâr ile ortalama yıllık gün sayısı (rüzgâr hızı 10.8-17.1 m/sn) 92.9 gündür [121]. Bozcaada'da ortalama rüzgâr hızı ve ortalama esme sayısı çizelgede (4.1)'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 : Bozcaada'da Ortalama Rüzgâr Hızı ve Ortalama Esme Sayısı.

Yönler	Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)	Yıllık Ortalama Esme Sayısı
Kuzey	7,3	1211
Kuzeydoğu	5,4	566
Batı	3,4	116
Kuzeybatı	4,2	177
Güney	10,6	420
Güneybatı	4,9	200
Güneydoğu	5,5	249
Doğu	3,8	243

4.1.2 Gökçeada

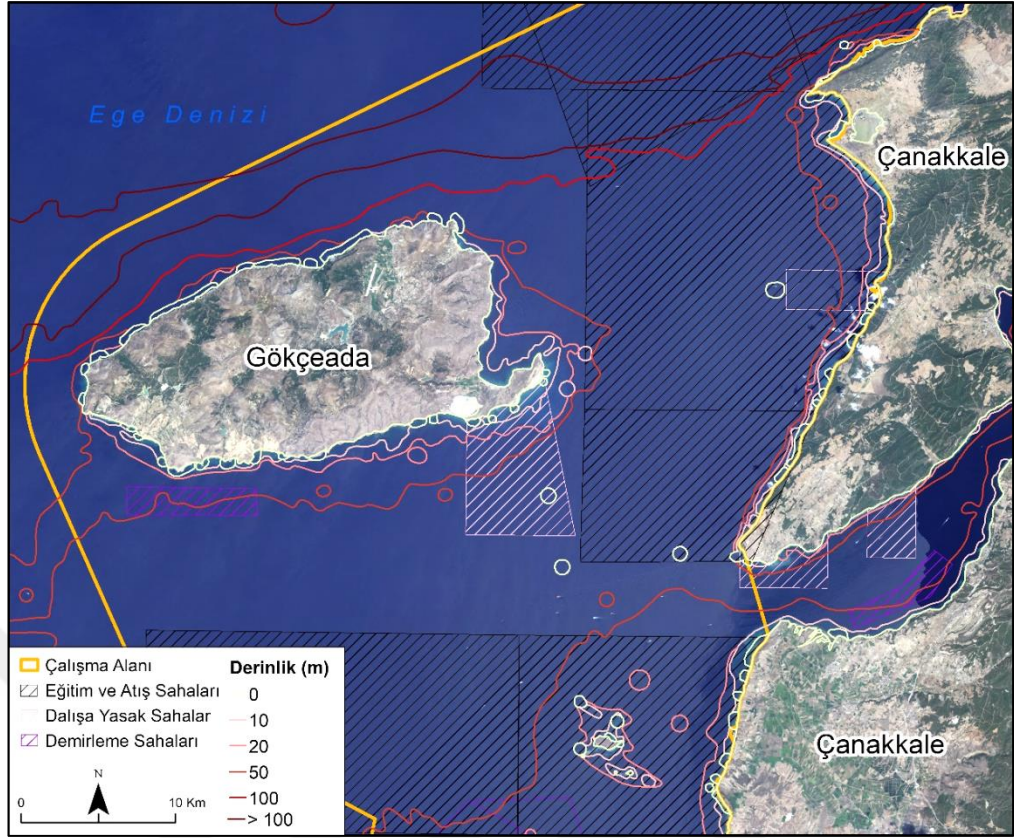
Gökçeada, Türkiye'nin en büyük adasıdır ve Marmara bölgesindeki Çanakkale iline bağlıdır. Sahil şeridinin uzunluğu 92 km ve alanı 279 km²'dir. Çevresi 85.2 km, uzunluğu ve genişliği 29.6 x 9.2 km'dir. Gelibolu Yarımadası 20 km, Limni Adası'na 19 km ve Semadirek Adası'na 22 km uzaklıktadır. Gökçeada'nın elektrik ihtiyacı, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)'nin Kumlimanı trafo merkezinin Gökçeada fiderinden beslenen, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ)'nin 31,5 kW'lık orta gerilim hattıyla karşılanmaktadır. Bozcaada'dan farklı olarak Gökçeada'nın kuzey ve güney kıyıları faylar nedeniyle farklı topografik özelliklere sahiptir. Adanın kuzey kıyısını kesen fay, Ege Denizi'ndeki Kuzey Anadolu fayının devamıdır. Bu fay Marmara Denizi'nden Saroz Körfezi'ne geçer ve Gökçeada kuzeyi açıklarından güneybatıya doğru devam eder. Bu faylar adanın kuzeyinde birden derinleşen deniz morfolojisini ve Kuzey Ege çukurluğunu oluşturmaktadır. Adanın kuzey kıyısı sarp kayalıklardan oluşur. Güney sahili geniş, hafif eğimli bir sahil şeridine sahiptir. [121]. Çizelge 4.2, Gökçeada meteoroloji istasyonunda 1990-2000 yılları arasındaki 10 yıllık gözlem periyodu verilerinin aylık ortalamasını vermektedir. [121].

Çizelge 4.2 : En Hızlı Esen Rüzgârın Yönü ve Hızı [121].

Aylar	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Yıllık	Rasat
En hızlı esen rüzgârın yönü	K-KD	B-GB	K-KD	K-KD	K-KD	K-KD	K-KD	K-KD	KD	K-KB	K-KD	K-KD	K-KD	10 yıl
En hızlı esen rüzgârın hızı (m/s)	34	30	32	28	22	29	21	29	23	24	24	35	34.7	10 yıl

Genel olarak tüm iklimatik rasat saatlerine göre yapılan gözlem verileri incelendiğinde, rüzgâr hızı ortalama değerlerinin Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarında yılın en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Gökçeada'da ortalama kuvvetli rüzgârlı gün sayısı, bir yıl boyunca aylık fırtınalı gün sayısından fazladır. Kış aylarında ise 12,8 gün ile yıllık en yüksek ortalamaya Aralık ayında ulaşılmaktadır. Şubat ayında 9,1 gün ile kış mevsiminin minimum değerine ulaşır. İlkbaharın en yüksek değeri Mart ayında 11,6 gündür. Nisan ayında 11,4 gün, Mayıs ayında 10,8 gün ile en düşük düzeye yaklaşır. Yaz mevsiminin başında Haziran ayında 8,5 gün ile yılın en düşük değerine ulaşır. Temmuz ayında 12,8 gün ile yükselerek, Ağustos ayında 14,8 gün ile yılın en yüksek değerini bulmaktadır. Sonbahar mevsiminde Eylül ayında 12,4 gün, Ekim ayında 12,8 gün ve 9,9 gün ile sonbahar mevsiminin en düşük değerine sahip olur. Dolayısıyla, Gökçeada rüzgâr potansiyeli açısından Türkiye'nin en önemli bölgelerinden biridir (Şekil 4.4).

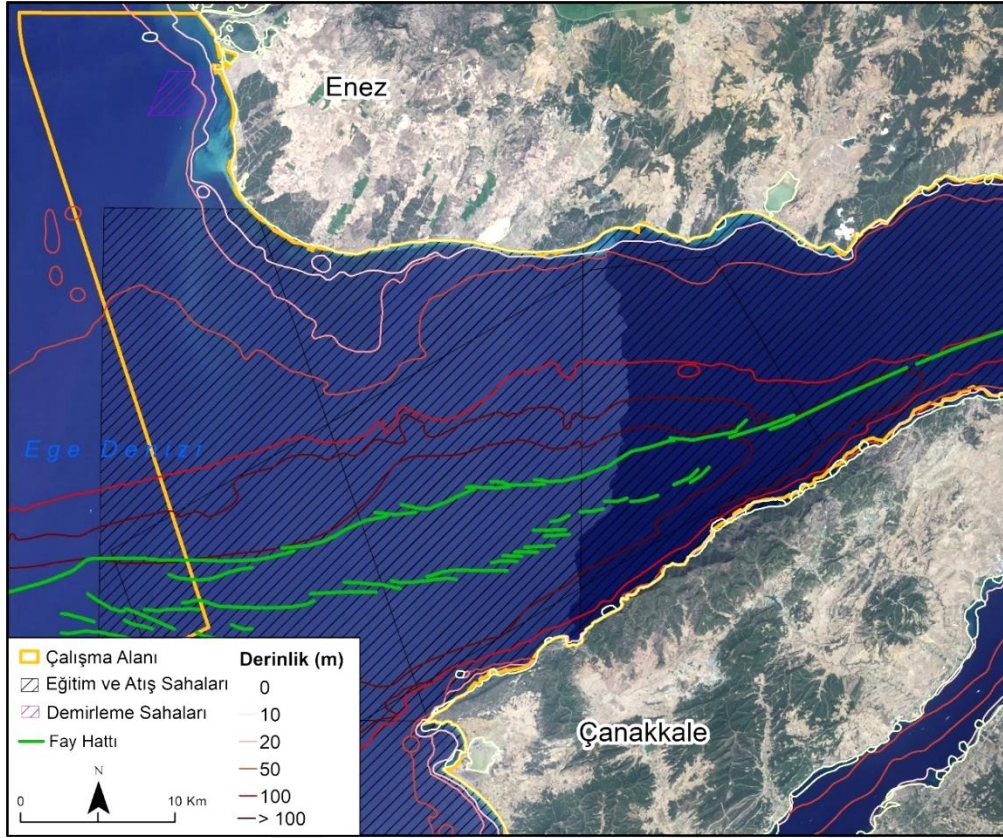


Şekil 4.4 : Gökçeada bölgesi.

Gökçeada için önemli bir diğer konu ise, Gökçeada Deniz Parkı'nın mevcudiyetidir. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığın tarafından yayınlanan 2012/65 Numaralı Deniz ve İç Sularda Su Ürünleri Avcılığını Düzenleyen Tebliğ'in ikinci bölümündeki 5. Madde kapsamında Ege Denizi'ndeki yer yasakları başlığı (o) bendinde “Çanakkale İli, Gökçeada İlçesinde; Gökçeada Deniz Parkı'nın bulunduğu Yıldız Koyu (40° 14.186' K – 25° 54.230' D) ile Çiftlik Koyu (40° 14.432' K – 25° 56.112' D) arasında kıyıdan itibaren 1 mil uzunluğundaki alanda) su ürünleri avcılığı yasaktır” ibaresi ile yayınlanmıştır [122].

4.1.3 Enez

Enez, Türkiye'nin Edirne ilinin bir ilçesi ve aynı zamanda ilçenin merkezinde yer alan bir kasabadır. Enez ilçesinin 21 km kuzeyinde İpsala, 60 km doğusunda Keşan ilçesi, güneyde ve batıda Ege Denizi ve Yunanistan ile idari ve millî sınır ile çevrilmiş olup, Meriç Nehri'nin denize döküldüğü Ege'nin Kuzey sahilinde bir yarımada üzerinde yer almaktadır. İlçe, toplamda 30 km deniz, 44 km idari sınırlara sahiptir. Saros Körfezi kuzey kıyılarında sulak alanlar oldukça yaygındır.



Şekil 4.5 : Enez bölgesi.

Meriç deltasında Türkiye-Yunanistan sınırını teşkil eden Meriç Nehri'nden (doğu kolu) başlayarak, daha doğuda Erikli Köyü kıyılarına kadar olan kıyılarda çok sayıda lagün yer almaktadır. Meriç Nehri'nin Ege Denizi'ne döküldüğü noktada yer alan "Meriç Deltası Sulak Alanı", Türkiye ve Yunanistan topraklarında "Uluslararası Öneme Sahip" "A Sınıfı" sulak alandır. "Uluslararası öneme sahip" 16 "A Sınıfı" sulak alandan biridir (Şekil 4.5). Meriç Deltası'nın Yunanistan'daki kısmı, 1975'ten beri "uluslararası öneme sahip" bir sulak alan (Ramsar bölgesi) (9,267 ha); "Özel sit alanı", "Kuşlar için önemli alan" ve "Özel koruma alanı"dır, Meriç Deltası'nın Türkiye'deki kısmı (9.200 ha) "Kuşlar için önemli alan", "Tabiat rezervi" (1991'den beri) (2.369 ha), "Site" ve "Milli Park" (2005 yılından itibaren Gala Gölü ve Pamuklu Gölleri)" alanıdır [123-124].

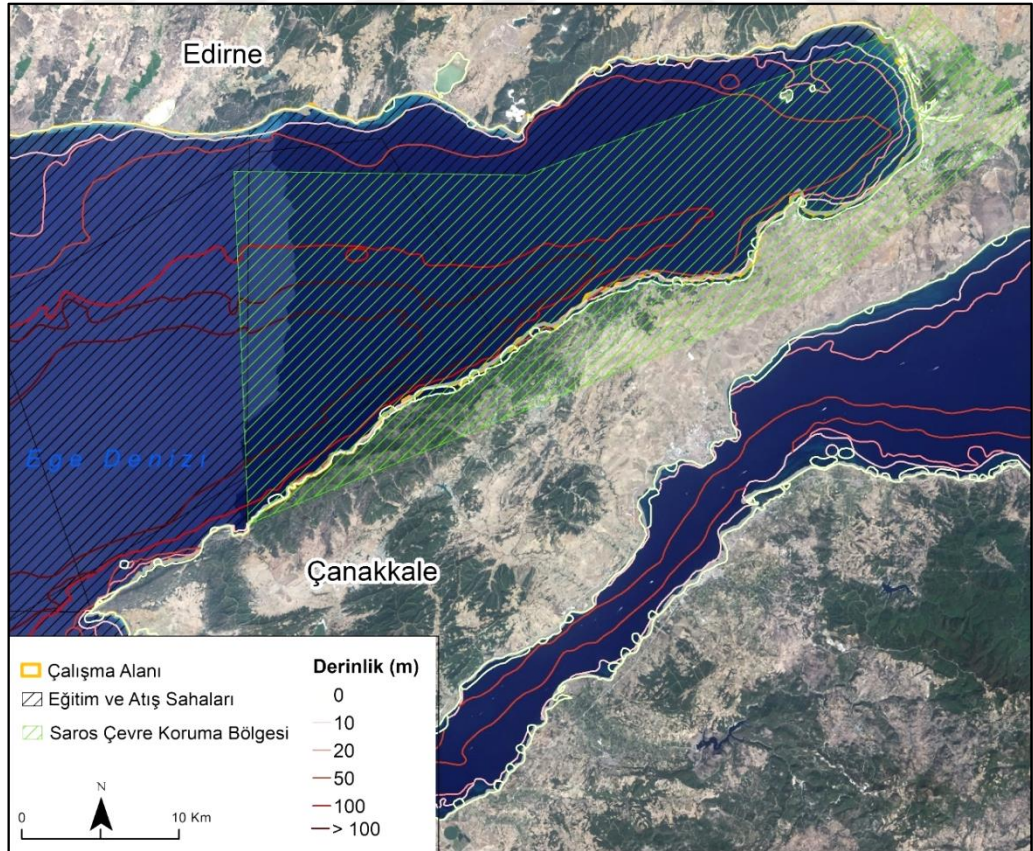
Enez ilçesi, denize girme ve güneşlenme süresi yaz mevsimi için yaklaşık 2 aylık (15 Haziran-15 Ağustos) bir süreyi kapsamasına rağmen; denizi ve kumsallarıyla, deniz turizmi için önemli bir potansiyele sahiptir. 18.12.1981 tarih ve 2565 sayılı Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Kanunu ve bu kanunun uygulanmasına ilişkin 30.04.1983 tarihli Askeri Yasak Bölgeler ve Güvenlik Bölgeleri Yönetmeliği kapsamında birinci ve ikinci derece "kara askeri yasak bölgeleri" ile birinci ve ikinci derecede "deniz askeri yasak bölgeleri" kapsamında kalmaktadır [125].

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından yapılan çalışmalara göre, Trakya bölgesinde Edirne'nin güneyinde, Tekirdağ'ın doğu ve güneyinde ve Kırklareli'nin doğusunda rüzgâr santralleri için uygun alanlar bulunduğu ve bölgede önemli bir rüzgâr potansiyeli olduğu değerlendirilmektedir [126].

Bölgede yer alan, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü'nün korumasında olan ve Türkiye'nin 36. Milli Parkı ilan edilen Gala Gölü Milli Parkı, Büyük Gala Gölü, Küçük Gala Gölü, Pamuklu Gölü ve (Hisarlı Dağı ve yamaçları ile toplam 6.087 hektardır. Türkiye'nin önemli doğa alanları, önemli kuş alanları ve önemli bitki alanları listelerinde bulunan ve Ramsar Kriterlerine sahip bir sulak alan özelliğindedir [127].

4.1.4 Saros

Ege Denizi'nin kuzeydoğusunda yer alan Saros Körfezi'ni, güney ve doğusundan Çanakkale ilinin Gelibolu ve Eceabat ilçeleri, kuzeyini ise Edirne ilinin Keşan ve Enez ilçeleri çevrelemektedir. Saros, 22.12.2010 tarih ve 27793 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile Özel Çevre Koruma Bölgesi olarak ilan edilmiştir. Bu nedenle, Saros bölgesi, bu tez çalışmasında çalışma alanı olmaktan çıkarılmıştır (Şekil 4.6) [128].



Şekil 4.6 : Saros bölgesi.

4.2 Kuzey Ege Coğrafi Bilgi Sisteminin Oluşturulması

Dünyada ve ülkemizde deniz üstü rüzgar enerji santrallerinin yer seçimine dair pek çok önemli çalışma yapılmıştır. Genel olarak bu çalışmalarda, çalışılacak bölgenin coğrafi konum ve stratejik önemine bağlı olarak, kullanılan ölçütler ve kısıtlar farklılık göstermektedir.

Önem ve öncelik durumuna göre, aynı farklılıklar analizlerde ve değer aralıklarının seçiminde de ortaya çıkmaktadır. İlgili konularda önceki çalışmalar incelendiğinde büyük bir çoğunluğunda, özellikle kategorizasyon ve değer atama işlemlerinin uzman görüşlerine dayalı olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan tüm ölçütler ve kısıtlar oluşturulan veri tabanına girilmiş ve CBS ile analiz edilerek, sonuçlara varılmıştır.

Kuzey Ege Denizi'nde açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun yer seçiminde kullanılacak ölçütlerin ve analiz dışı bırakılacak alanların belirlenmesinde; güncel literatür, yasal düzenlemeler, ekolojik, ekonomik ve sosyal açıdan kısıtlamalar değerlendirmeye alınmıştır.

Bu çalışmada değerlendirilmeye alınan ölçütler batimetri, rüzgâr hızı, gemi yoğunluğu, su altı kablolarına olan uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya olan uzaklık, liman ve demirleme sahalarına olan uzaklık ve trafo merkezlerine olan uzaklık olarak belirlenmiştir. Kısıtlama ölçütleri ise askeri eğitim ve atış sahaları, koruma bölgeleri, dalışa yasak sahalar mayınlı sahalar, batık alanları ve demirleme sahaları olarak belirlenmiştir. Ölçütler için gerekli veriler toplanıp ArcMap 10.6 yazılımından yararlanılarak bir CBS veri tabanı oluşturulmuştur. Elde edilen tüm veriler çalışma alanı içerisinde kalacak şekilde kesildikten sonra verilerin bütünlüğünün sağlanması ve analiz edilebilmesi için Universal Transverse Mercator (UTM) projeksiyonu World Geodetic System (WGS) 1984 Datumu, Zone 34 N koordinat sistemine aktarılmıştır.

Bu çalışmada Denizel Mekânsal Planlama Kuzey Ege Denizi Bilgi Sistemi ekolojik, sosyo-ekonomik, coğrafi ve politik olmak üzere dört ana başlıkta kurgulanmıştır. Çizelge 4.3'te, bu çalışma kapsamında, Denizel Mekânsal Planlama bakış açısı ile oluşturulan Kuzey Ege Bilgi Sistemine dâhil edilen veriler ve kaynakları listelenmiştir.

Bu çalışmanın altlık verisi olarak 2018 yılına ait 30 metre mekânsal çözünürlüğe sahip Landsat 8 OLI uydu görüntülerinden oluşturulan mozaik Ege görüntüsü kullanılmıştır. Ayrıca, 1/25 000 ve 1/50 000 ölçekli Edirne ve Çanakkale haritaları ve Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı'ndan temin edilen çeşitli ölçeklerde Ege haritalarından yararlanılmıştır.

Çizelge 4.3 : Kuzey Ege Denizi Bilgi Sistemine dâhil edilen ölçüt verileri.

Veri	Kaynak	DMP Kapsamı
Batimetri	EMODnet Merkez Portalı [129]	Ekolojik/Coğrafi
Gemi Rotaları		Sosyo-Ekonomik-Politik
Rüzgâr Hızı	Global Rüzgâr Atlası[130]	Ekolojik/Coğrafi
Trafo Merkezleri	Türkiye Yenilenebilir Enerji Rüzgâr Enerjisi (RES) [118]	Sosyo-Ekonomik
Kıyı Çizgisi	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı	Ekolojik/Coğrafi
Yerleşim Alanları		Sosyo-Ekonomik
Liman ve Demirleme Sahaları		Sosyo-Ekonomik
Dalışa Yasak Sahalar		Sosyo-Ekonomik/Ekolojik
Su Altı Kabloları		Sosyo-Ekonomik
Askeri Eğitim ve Atış Sahaları	Denizcilere İlanlar (2018)	Politik
Demirleme Sahaları		Sosyo-Ekonomik
Mayınlı Sahalar		Sosyo-Ekonomik/Coğrafi
Batık Gemiler		Sosyo-Ekonomik
Saros Koruma Alanı		Ekolojik
Fay Hatları	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü	Coğrafi

4.3 Çok Ölçütlü Karar Analizi için Ölçütlerin Belirlenmesi

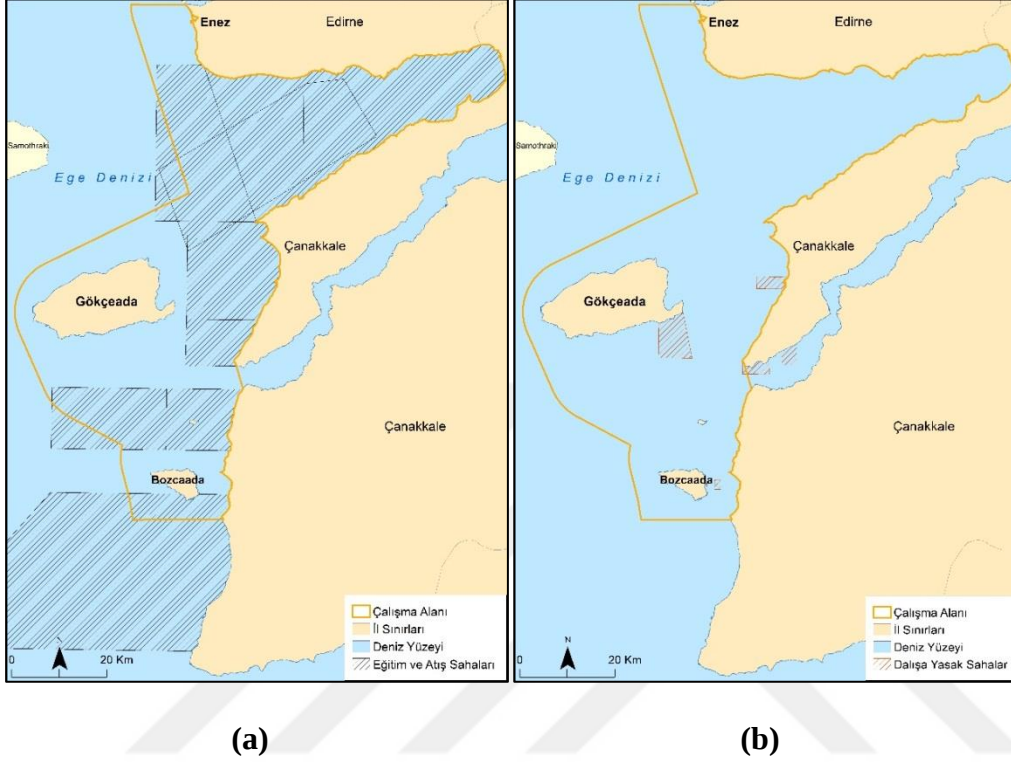
Açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun yer tespiti aşamasında göz önünde bulundurulacak ölçütler çalışma alanı ve amaca göre değişiklik gösterebilmektedir [131-132]. Yapılan ilgili araştırmalarda açık deniz rüzgar santralleri için kullanılan ölçüt, limit ve kısıtlara dair değerlendirme yapılmış ve özet olarak Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Aynı deniz alanlarında yapılan çalışmalar incelendiğinde standart bir

ölçüt değerlendirilmesinin olmadığı, parametrelerin üst sınır ve/veya alt sınırlarında farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Ancak, genel olarak değerlendirmede hariç tutulan ölçütlerin birçok çalışmada benzer olduğu gözlenmektedir. İlgili çalışmalar ve elde edilen veriler göz önünde bulundurularak ölçütler izleyen bölümlerde açıklanmıştır.

Çizelge 4.4 : Farklı Coğrafi Alanlarda Yapılan Açık Deniz Türbin Konumlandırılmasında Kullanılan Kriter ve Limitleri.

Yayın	Ülke/Deniz	Parametreler Kullanılan
Argin, vd. (2019) Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection [13]	Türkiye/ Tüm Kıyılar İdeal Alan: Bozcaada, Bandırma, İnebolu, Gökçeada Samandağ	Rüzgâr hızı: 3m/s ve üzeri Karasuları sınırı Ege Denizi için: 6nm (11km) Kısıtlama: Askeri Alanlar Sualtı boru hattı ve Kablolar: 500 m Yaşam alanlarına uzaklık: 1 km Derinlik için seçilen ideal derinlik: 45m
Chaouachi, vd. (2017) Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States [31]	Baltık Denizi	Batimetri üst limit: 60 m Ortalama ideal rüzgâr hızı: 7.5m/s Kıyıdan uzaklık üst limit: 60km
Mahdy and Bahaj (2018) Multi criteria decision analysis for offshore wind energy potential in Egypt [107]	Mısır/ Kızıl Deniz-Akdeniz	İdeal rüzgâr hızı: 5-9 m/s. Offshore platformlarından petrol ve gaz kuyularından en az 1 km uzaklık Sualtı kabloları: Kısıtlı Alan Derinlik limitler 5maltı ve 60müstü Kıyıya en yakın uzaklık limit: 1.5km Askeri alanlar: Kısıtlı
Tercan vd., (2020) A GIS-based multi-criteria model for offshore wind energy power plants site selection in both sides of the Aegean Sea [25]	Türkiye ve Yunanistan/ Tüm Ege Denizi	Rüzgâr hızı limit: < 6 m/sn Derinlik üst limit: 70 m Kıyıdan uzaklık alt limit 1.5 km, üst limit: 25 km Deniz trafik rotaları alt limit uzaklık: 1 km Sualtı boru ve kablo hatları alt limit 250m
Saleous vd. (2016) GIS-based Wind Farm Site Selection Model Offshore Abu Dhabi Emirate, UAE [133]	Birleşik Arap Emirlikleri	İdeal Rüzgâr Hızı: 5-6 m/s Alt limit 4,5m/s Offshore platformlarından petrol ve gaz kuyularından en az 250 uzaklık Sualtı kabloları: 250m Derinlik: 20m'den sonrası uygun değil
Vagiaon, vd. (2018) Sustainable Site Selection for Offshore Wind Farms in the South Aegean—Greece [28]	Yunanistan/ Güney Ege Denizi	Derinlik üst limit: 60m Rüzgâr hızı alt limit: 6m/s Mavi bayrak sahillerinden uzaklık alt limit: 1000m Yaşam alanlarından uzaklık alt limit: 1000m Denizcilik Rotaları: 3km
Diaz vd., (2021) A Multi-Criteria Approach to Evaluate Floating Offshore Wind Farms Siting in the Canary Islands (Spain) [134]	Kanarya Adaları	Kısıt: Askeri alanlar Balıkçılık alanları Korumalı hassas alanlar Limitler: Su hattı kabloları alt limit: 500m Deniz trafik alt limit <500 m Rüzgâr hızı <4 m/s Derinlik alt limit <50 m Kıyıdan uzaklık <4.3 nm >200 nm

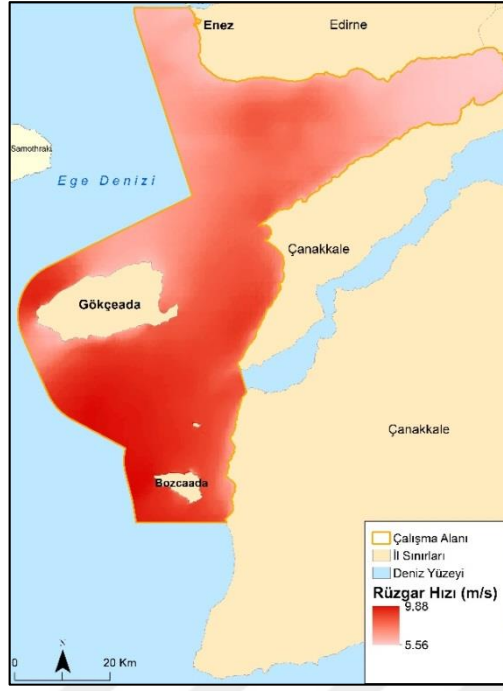
alan bulunmaktadır. Türbin yerleşim uygunluk analizinde, askeri eğitim ve atış alanları (Şekil 4.8(a)) ve dalışa yasak sahaları (Şekil 4.8(b)) kapsam dışı bırakılmıştır. İlgili kısıtlama verileri CBS veri tabanına vektör veri olarak eklenmiştir.



Şekil 4.8 : (a) Askeri eğitim ve atış alanları ve (b) dalışa yasak sahaları.

4.3.4 Rüzgâr verileri

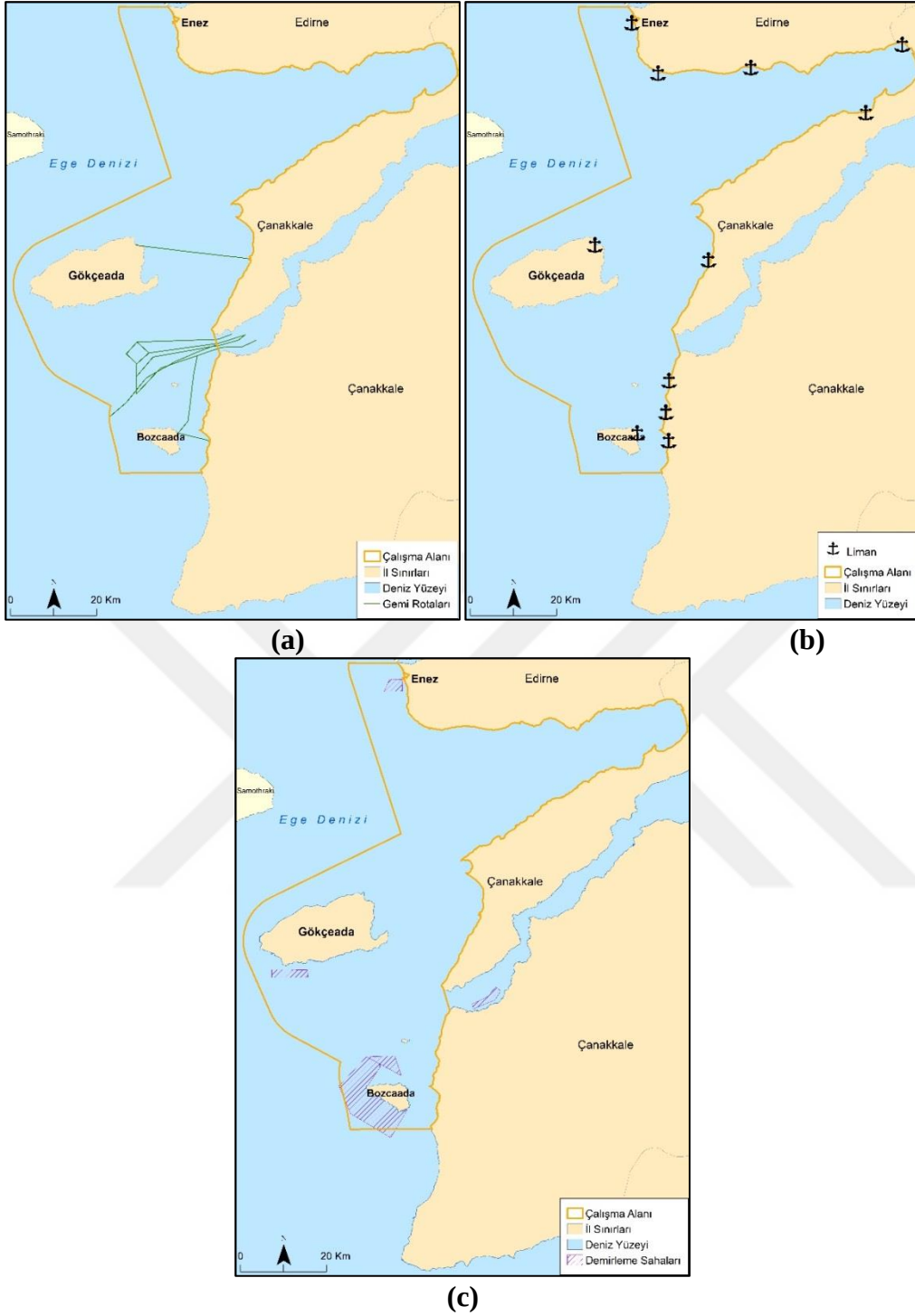
Bu çalışmada rüzgâr hızı alt limit 6 m/s olarak seçilmiştir. Alıntılama yapılan ve çizelgede belirtilen ilgili yayınlarda da rüzgâr hızı kriteri için deniz seviyesinden belirli yükseklikte verilen değer ölçüt olarak kullanılmıştır. Rüzgâr hızı verisi Global Wind Atlas [130] internet sitesi üzerinden raster veri olarak temin edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Rüzgâr hızı.

4.3.5 Gemi rotaları, limanlar ve demirleme sahaları

Gemi rotaları değerlendirildiğinde yüksek rüzgâr değeri olmasına rağmen Çanakkale Limanı ve gemilerin ana rotası üzerinde olan Çanakkale Boğazı rotası üzerinde olan mevkiiler rüzgâr çiftliği için ideal değildir. Rüzgâr çiftliklerinin kurulması nedeniyle gemiler ile açık deniz rüzgâr kuleleri arasında çarpışma tehlikesi meydana getirebilir. Bu çalışmada, gemi rotalarına uzaklık, ortalama alt limit olarak 3000 metre olarak ele alınmıştır. Gemi rotaları, limanlar ve demirleme sahaları vektör veri olarak CBS veri tabanına dâhil edilmiştir (Şekil 4.10(a), Şekil 10(b) ve Şekil 4.10(c)).



Şekil 4.10 : (a) Gemi rotaları, (b) limanlar (c) demirleme sahaları.

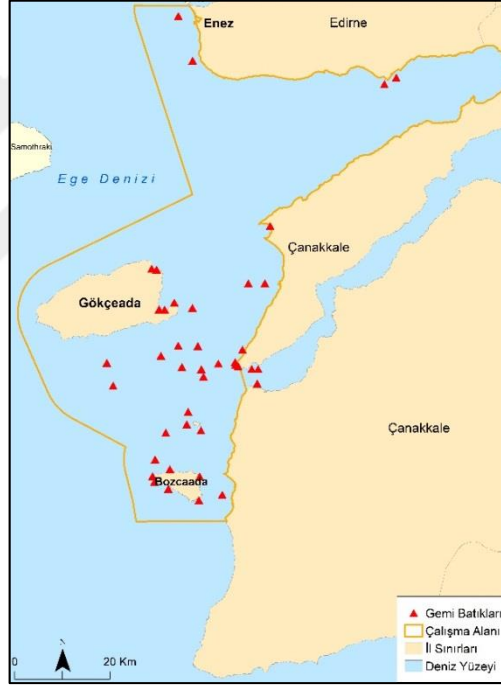
4.3.6 Kıyıya Uzaklık

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin en büyük maliyet parametrelerinin başında temel inşası ve deniz altından en yakın kara parçasına çekilen iletim hatları oluşturmaktadır ve bu nedenle türbinlerin maliyetini belirleyen, tesisin karaya uzaklığı ve kurulacağı derinliktir. Batimetri ölçütüne bağlı olarak, kıyıya olan mesafeler değişkenlik göstermektedir. Türbin kurulumu için mümkün olan ideal derinlik 15-75 m'dir.

Dolayısıyla derinliği bu sınırlarda olan rüzgâr türbini kurulumlarının kıyıya olan mesafesi, batimetri parametresine bağlı olarak değişkenlik gösterecektir [135]. Çalışmada, batimetri 15-50 m arası düşünüldüğünde, ortalama kıyıya olan mesafenin Çanakkale kıyıları boyunca, 1.5-18 km arası ve Gökçeada kıyıları boyunca 1-5 km arası uzaklıkta olduğu görülmektedir.

4.3.7 Gemi Batık ve Mayın Sahası Alanları

Kuzey Ege Denizi'nin özellikle Gelibolu kıyıları ve Saros Körfezi'nde savaş zamanından kalma mayınlar olduğu ayrıca Kuzey Ege Deniz sahasında da batık gemilerin mevcut olduğu bilinmektedir. Denizcilere verilen ilanlardan batık gemi alanları ve mayınlı sahaların mevkileri tespit edilmiştir ve CBS veri tabanına vektör veri olarak dâhil edilmiştir. 500 m'lik tampon alanı ile batıkların olduğu lokasyonlar işlenmiş ve hariç alanlar olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : Gemi batık ve mayın sahası alanları.

4.3.8 Yerleşim alanları

Açık Deniz rüzgâr türbinleri, dönen kanatların göz alması, jeneratör ve kanatların dönüş sesi, kanatların bıraktığı hareketli gölgenin göze etkisi gibi etkiler nedeniyle yerleşim yerlerine belirli bir mesafede konumlandırılmalıdır. Her ne kadar günümüz teknolojisinde kanatların dönüş sesi gürültüsü azaltılmış olsa da, bu tez çalışmasında alt limit 1500 m olarak belirlenmiştir. Yerleşim yeri verileri CBS veri tabanına vektör veri olarak eklenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Yerleşim yerleri.

4.3.9 Deniz koruma alanlarına uzaklık

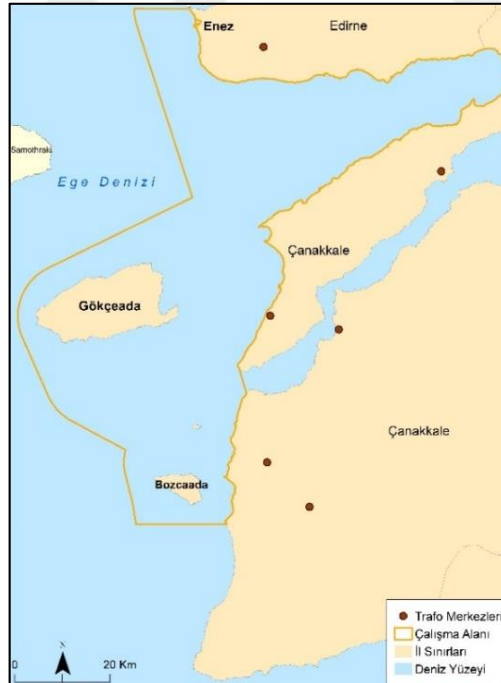
Yasayla korunan alanlar, rüzgâr enerjisi tesisi kurulumu için uygun alanlar olarak kabul edilmemektedir. Tüm deniz koruma alanları deniz park alanları da dâhil bu çalışmada harici alan olarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanı içerisinde yer alan Saros Çevre Koruma Bölgesi'ne ait vektör veri CBS veritabanına aktarılmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 : Deniz koruma alanları.

4.3.10 Trafo merkezlerine olan uzaklık

Açık deniz rüzgâr çiftlikleri ile sistemdeki güç iletim şebekeleri arasındaki uzaklık, olası elektrik şebeke mesafesi olarak tanımlanır. Türbinlerin var olan yeraltı santrallerinden uzaklığı da, projenin ekonomisini önemli ölçüde etkilemektedir. Trafoları veya enerji hatlarına olan mesafe yatırım maliyetlerini önemli ölçüde etkileyen bir faktör olmakla birlikte, seçilen alanın enerji hatlarına ve trafoları yakınlığı, enerji iletimindeki kayıplar dikkate alındığında büyük önem taşımaktadır. Gökçeada'nın elektrik ihtiyacı, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'nin Kum Limanı Trafo Merkezi'nin Gökçeada fiderinden beslenen, Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ)'nin 31,5 kW'lık orta gerilim hattıyla karşılanmaktadır [136-137]. Bozcaada'nın elektrik ihtiyacı ise, TEİAŞ'ın Ezine Trafo Merkezi'nden karşılanmaktadır [137]. Bu nedenle Ege kıyıları boyunca uygulamada, Çanakkale - Çimento, Ezine, Çanakkale Trafo Merkezleri dikkate alınmıştır. Trafo merkezlerine uzaklık, Trafo merkezleri verisi, YEGM tarafından hazırlanan il bazlı rüzgâr enerjisi teknik potansiyelleri bilgilerinden elde edilmiştir [117]. Çalışmada maliyet analizi ön planda tutulmadığı için, trafo merkezlerine karadan mesafe olarak herhangi bir üst kısıtlama getirilmemiştir. Rüzgâr türbinleri trafo alanlarına mesafesi ne kadar yakınsa o kadar idealdir. Trafo merkezlerine ait vektör veri CBS veri tabanına aktarılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Trafo merkezleri.

4.3.11 Fay hatlarına uzaklık

Çalışma alanı sınırları içerisinde yer alan Ganos ve Saros Fay Hattı yer almaktadır. Maden Tetkik Arama Enstitüsü tarafından yayınlanan haritalardan yararlanılarak bu fay hatları vektör veri olarak CBS veri tabanı içerisine aktarılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Fay hatları.

4.3.12 Denizaltı kabloları

Denize kurulacak enerji sistemlerinin kurulumu ya da bakımı sırasında, işlemlerin yapıldığı bölgenin etrafında kabloların ya da boru hatlarının olması gemiler ile ya da mevcut türbinlerinin alt yapısının kurulumu esnasında kaza riski oluşturabilmektedir. Bu nedenle kablo ve boru hattı çevresine olan mesafe en az 500 m olarak belirlenmiştir. Denizaltı kabloları verisi CBS veri tabanına vektör veri olarak aktarılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 : Denizaltı kabloları.

Bu çalışmada kullanılan ölçütler Çizelge 4.5’te özetlenmiştir. Bozcaada, Gökçeada ve Enez bölgesi için seçilen ölçütlerde seçilen lokasyonların özellikleri dikkate alınmış ayrıca Kuzey Ege Denizi rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması ile ilgili literatürden yararlanılmıştır [13,15,16,19,25,28,104,132,138,139,140,141].

Çizelge 4.5 : Çalışmada Kullanılan Kriterlerin Limitleri ve Harici Kriterler.

	Kriterler	Kısıtlama Limiti	İdeal Değer	Durum	Referans
P1	Batimetri	10 < x > 60 m	30 m	Kısıtlama/Ölçüt	[13]
P2	Rüzgâr hızı	0 - 6 m/s	8 m/s	Kısıtlama/Ölçüt	[15]
P3	Gemi rotalarına uzaklık	0 - 3000 m	5 km	Kısıtlama/Ölçüt	[16]
P4	Sualtı kablo ve boru hatlarına uzaklık	0 - 500 m	1.5 km	Kısıtlama/Ölçüt	[19]
P5	Yerleşim alanlarına uzaklık	0 - 1500 m	3 km	Kısıtlama/Ölçüt	[25]
P6	Kıyıya uzaklık	0 - 1500 m	3 km	Kısıtlama/Ölçüt	[28]
P7	Limanlara yakınlık	0 - 1500 m	3 km	Kısıtlama/Ölçüt	[28]
P8	Trafo merkezlerine uzaklık	-	1.5-2 km	Ölçüt	[104]
P9	Demirleme alanı	Tamamı	-	Kısıtlama	[132]
P10	Fay hattına uzaklık	0 - 1500 m	-	Kısıtlama	[138]
P11	Gemi batıklarına uzaklık	0-500 m	-	Kısıtlama	[139]
P12	Eğitim ve atış sahaları	Tamamı	-	Kısıtlama	[140]
P13	Dalışa yasak sahalar	Tamamı	-	Kısıtlama	[141]
P14	Saros Koruma bölgesi	Tamamı	-	Kısıtlama	

5. KUZEY EGE DENİZİNDE AÇIK DENİZ RÜZGÂR TÜRBÜN KURULUMU İÇİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR ANALİZİ UYGULAMASI VE ENERJİ-EKSERJİ HESABI

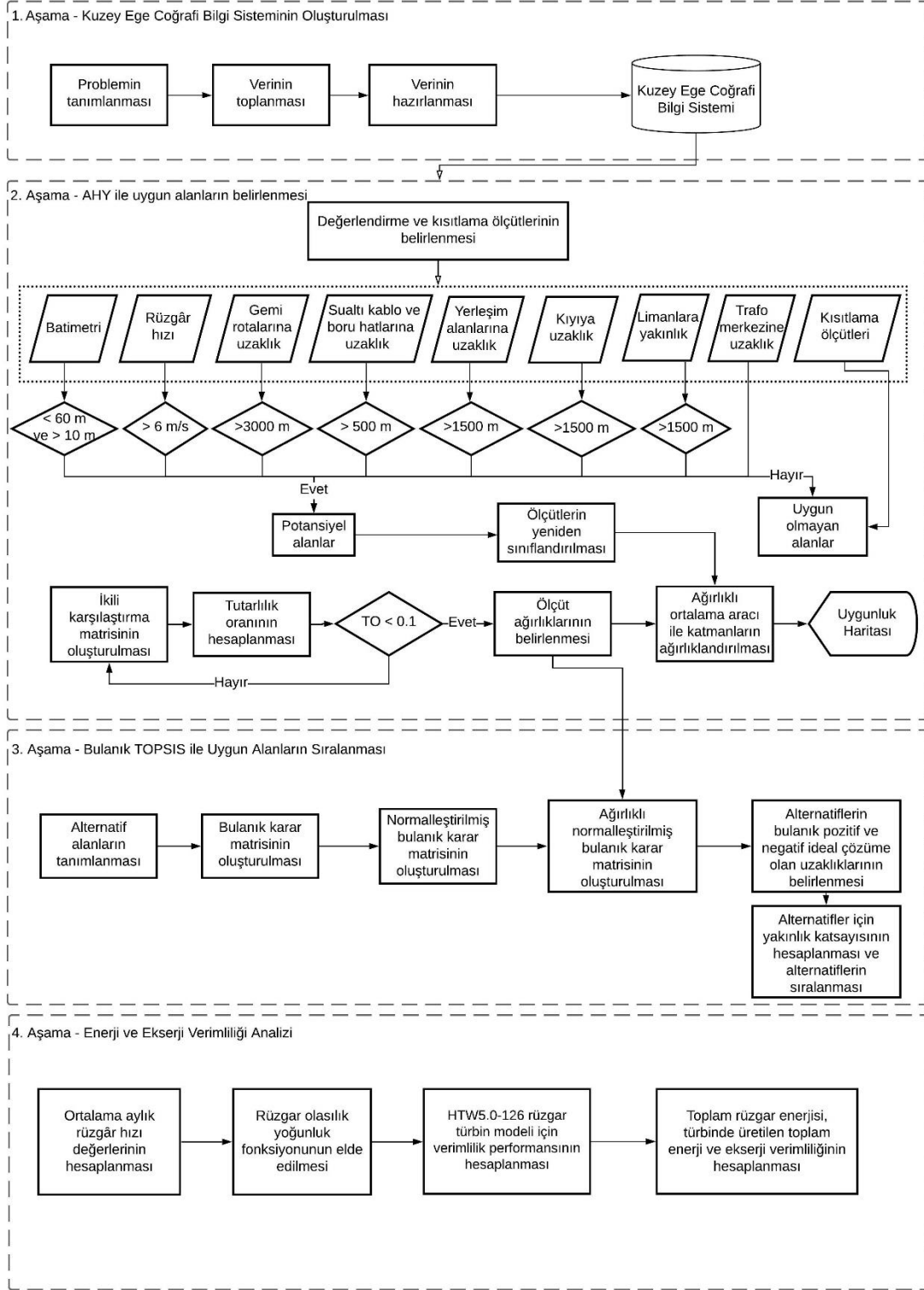
Bu çalışmanın amacı, Kuzey Ege Denizinde açık deniz rüzgâr türbin kurulumu potansiyelini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle potansiyel açık deniz rüzgâr türbin sahası kurulumu için uygun alanların belirlenmesi için denizel mekânsal planlama kurgusuyla CBS oluşturulmuştur. Potansiyel bölgelerin belirlenmesinde, CBS ve çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin beraber kullanıldığı bir karar modeli oluşturulmuştur.

Çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 5.1’de sunulmuştur.

Birinci aşamada bir önceki bölümde detayları verilen DMP bağlamında kurgulanmış Kuzey Ege Bilgi Sistemi’nin oluşturulmuş, Kuzey Ege Denizi’ndeki açık deniz rüzgâr türbin kurulumu için potansiyel alanların tespiti için kısıtlama ve değerlendirme ölçütleri literatür ve yasal düzenlemeler esas alınarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada ÇÖKA yöntemlerinden AHY’den yararlanarak uygun alanlar belirlenmiştir. Veriler yeniden sınıflandırılıp analize hazır hale getirildikten sonra, değerlendirme ölçütleri esas alınarak AHY ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş ve ölçüt ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra hesaplanan ağırlıklar ile açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulumu için uygunluk haritası oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada, AHY sonucunda belirlenen uygun alternatif alanların sıralandırılması için ÇÖKA yöntemlerinden Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Bu adımda öncelikle bölgeler tanımlanmış ve sonrasında AHY’de kullanılan yedi ölçüt ile Bulanık TOPSIS uygulanmıştır. Sözel üçgen sayılardan yararlanarak bulanık karar matrisi oluşturulduktan sonra her biri ölçüt için AHY ile belirlenen ağırlık değerinden yararlanılarak normalleştirilmiş bulanık karar matrisinin oluşturulmuştur. Sonrasında yakınlık katsayısı hesaplanarak alternatif bölgeler sıralandırılmıştır.



Şekil 5.1 : Çalışma akış diyagramı.

Çalışmanın dördüncü aşamasında açık deniz rüzgâr türbinlerinin konumlandırılacağı alanların enerji ve ekserji verimliliği hesaplanmıştır. İlk adımda; rüzgâr frekansı diyagramları oluşturulup, metrekaşe başına ortalama rüzgâr gücü her alan için alınan meteorolojik verilerin yıllar arasındaki ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak

hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile rüzgâr olasılığı yoğunluk fonksiyonu elde edilmiştir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimlilik performansı hesapları için HTW5.0-126 rüzgâr türbini modeli çalışma alanlarının açık deniz bölgesinde bulunduğu varsayılarak değerlendirilmiştir. Her bir çalışma alanı için toplam rüzgâr enerjisi ve ekserji verimliliği ve türbinde üretilen toplam enerji ve ekserji potansiyeli ortaya konulmuştur.

5.1 AHY ile Kuzey Ege Denizi Çalışma Alanlarının Uygunluk Haritasının Oluşturulması

Açık deniz rüzgâr türbin kurulumu için uygun alanların belirlenmesi ve haritalanması amacıyla öncelikle problem tanımı yapılmış, Kuzey Ege Bilgi Sistemi oluşturulmuş ve ardından Bölüm 4.3'te açıklanan değerlendirme ve kısıtlama ölçütleri belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te verildiği üzere, batimetri, rüzgâr hızı, gemi rotalarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya uzaklık, limanlara yakınlık ve trafo merkezlerine uzaklık değerlendirme ölçütü olarak belirlenirken, sualtı kablo ve boru hatlarına uzaklık, demirleme alanı, fay hattına uzaklık, gemi batıklarına uzaklık, eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahalar ve Saros Koruma bölgesi olarak tanımlanan alan kısıtlama alanları olarak çalışmaya dâhil edilmiştir. Ek olarak, batimetri, rüzgâr hızı, gemi rotalarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya uzaklık ve limanlara yakınlık ölçütleri için uygun olmayan değerler de kısıtlama alanları olarak tanımlanmıştır.

5.1.1 Verilerin hazırlanması ve sınıflandırılması

Batimetri ve rüzgâr hızı ölçütleri için kısıtlama değerleri içerisinde kalan piksel değerleri *öznitelik ile çıkarma (mekânsal analiz)* aracı ile bu verilerden çıkarılmıştır.

Gemi rotalarına uzaklık, sualtı kablo ve boru hatlarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya uzaklık, limanlara yakınlık, fay hattına uzaklık ve gemi batıklarına uzaklık ölçütleri için belirlenen kısıtlama limitlerinin ilgili verilerden çıkarılması için öncelikle *öklit uzaklığı (mekânsal analiz)* aracı kullanılarak raster veri katmanı oluşturulmuştur. Daha sonra ilgili kısıtlama limitleri *öznitelik ile çıkarma (mekânsal analiz)* aracı ile bu verilerden çıkarılmıştır.

Elde edilen tüm kısıtlama verileri vektör veriye dönüştürülmüş ve ardından demirleme alanları, eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahalar ve Saros Koruma

Bölgesi verileri ile *birleştirme* aracı kullanılarak birleştirilerek tek bir kısıtlama veri katmanı elde edilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.2 : Kısıtlama haritası.

Verilerin sınıflandırılması aşamasında Çizelge 4.5'te verilen ideal değerler ve verilerin minimum/maksimum değerleri esas alınarak her bir ölçüt için 1 (en az uygun) – 4 (en çok uygun) aralığında değerler atanmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 : Ölçütlerin derecelendirilmesi için belirlenen değerler.

	Min-max	1 (en az uygun)	2 (az uygun)	3 (uygun)	4 (en çok uygun)
Batimetri (m)	-10 - -60	-60 – -50	-50 - -40	-40 - -30	-30- -10
Rüzgâr hızı (m/s)	6.0011 - 9.88	6-6.5	6.5-7.5	7.5-8	over 8
Gemi rotalarına uzaklık (km)	3 - 68.105	3 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 68.105
Yerleşim alanlarına uzaklık (km)	1.5 - 27.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 27.5
Kıyıya uzaklık (km)	1.5 - 20.342	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 20.342
Limanlara yakınlık (km)	1.5 - 35.002	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 35.002
Trafo merkezlerine uzaklık (km)	0.948 - 53.243	53.243 - 30	20- 30	11- 20	0.948 - 11

Uygunluk haritasının oluşturulması için verilerin sınıflandırılmasına Çizelge 5.1 esas alınarak tüm veriler *yeniden sınıflandırma (mekânsal analiz)* aracı kullanılarak yeniden sınıflandırılmış ve analize hazır hale getirilmiştir.

5.1.2 Analitik hiyerarşi yöntemi ile ağırlıkların belirlenmesi

Çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biri olan AHY, ölçütlerin ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemde ölçütlerin belirlenmesi aşamasından sonra ikili karşılaştırmalar yapılarak tutarlılık oranı hesaplanır. Tutarlılık oranı kabul edilebilir sınır içerisinde ise ölçüt ağırlıkları belirlenmiş olur.

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulurken Çizelge 3.1 esas alınarak 1-9 birimlik ölçek esas alınmıştır. Çizelge 5.2’de açık deniz rüzgâr türbini alan seçimi için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi görülmektedir.

Çizelge 5.2 : Offshore rüzgâr türbini alan seçimi için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi.

	Batimetri	Rüzgâr hızı	GRU	YAU	Kıyıya uzaklık	Limanlara yakınlık	TMU
Batimetri	1	1/2	4	7	3	7	7
Rüzgâr hızı	2	1	8	9	5	9	8
Gemi rotalarına uzaklık (GRU)	1/4	1/8	1	5	2	4	4
Yerleşim alanlarına uzaklık (YAU)	1/7	1/9	1/5	1	1/3	1/3	1/3
Kıyıya uzaklık	1/3	1/5	1/2	3	1	3	3
Limanlara yakınlık	1/7	1/9	1/4	3	1/3	1	1/2
Trafo merkezlerine uzaklık (TMU)	1/7	1/8	1/4	3	1/3	2	1

İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasından sonra matristeki her bir eleman sütun toplamına bölünerek normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 5.3). Normalize edilmiş karşılaştırma matrisinde her satırın ortalaması hesaplanarak ağırlık vektörü hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 : Normalize edilmiş karşılaştırma matrisi ve ölçüt ağırlıkları.

	Batimetri	Rüzgâr hızı	GRU	YAU	Kıyıya uzaklık	Limanlara yakınlık	TMU	Ağırlık
Batimetri	0.25	0.23	0.28	0.23	0.25	0.27	0.29	0.27
Rüzgâr hızı	0.50	0.46	0.56	0.29	0.42	0.34	0.34	0.415
Gemi rotalarına uzaklık (GRU)	0.06	0.06	0.07	0.16	0.17	0.15	0.17	0.120
Yerleşim alanlarına uzaklık (YAU)	0.04	0.05	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.027
Kıyıya uzaklık	0.08	0.09	0.04	0.10	0.08	0.11	0.13	0.090
Limanlara yakınlık	0.04	0.05	0.02	0.10	0.03	0.04	0.02	0.041
Trafo merkezlerine uzaklık (TMU)	0.04	0.06	0.02	0.10	0.03	0.08	0.04	0.050

Sonraki adımda oluşturulan matrisin ve elde edilen ağırlıklarının kabul edilebilirliğinin belirlenmesi için tutarlılık oranı (TO) hesaplanmıştır. Tutarlılık oranının hesaplanabilmesi için öncelikle λ_{max} maksimum özdeğer ikili karşılaştırma matrisi ile ağırlık vektörünü çarpılarak 7.77 olarak elde edilmiştir. Karşılaştırılan ölçüt sayısına göre değişkenlik gösteren RI bu çalışmada 7 adet ölçüt kullanıldığından 1.32 olarak alınmıştır. Sonrasında TO aşağıdaki formül ile 0.097 olarak hesaplanmıştır.

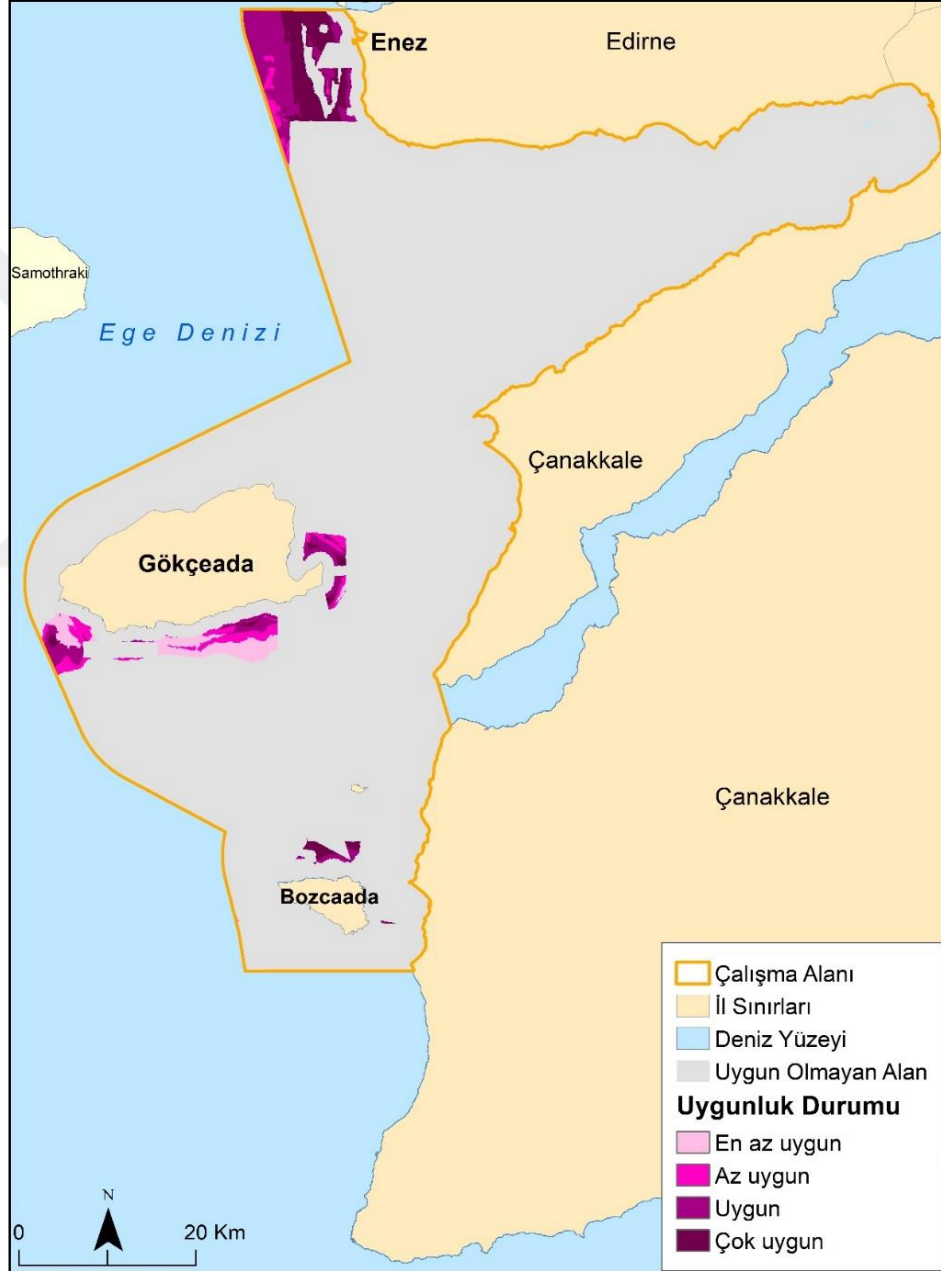
$$TO = \frac{7.77 - 7}{1.32 \times (7 - 1)} \quad (5.1)$$

TO < 0.10 olduğundan dolayı ikili karşılaştırmalarda makul bir tutarlılık düzeyi olduğu görülmüştür. Dolayısıyla offshore rüzgâr türbinleri için uygun alanların

belirlenmesinde elde edilen ağırlıkların analiz için kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

5.1.3 Uygunluk haritasının oluşturulması

Açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulabileceği alanların uygunluk haritasının oluşturulabilmesi amacıyla sınıflandırılan değerlendirme ölçütleri tematik haritaları ve AHY ile elde edilen ağırlıklar birlikte analiz edilmiştir.



Şekil 5.3 : Uygunluk haritası.

Yeniden sınıflandırılan veriler ve her bir ölçüt için belirlenen ağırlığın ilgili ölçüt ile işleme alınabilmesi için *ağırlıklı ortalama (mekânsal analiz)* aracı kullanılmıştır. Ölçütlere ait tematik veri katmanları AHY ile belirlenen ilgili ağırlıkları ile çarpılarak birleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun alanların derecelendiği tek bir veri katmanı elde edilmiştir. Daha sonrasında elde edilen raster veri katmanı en az uygun, az uygun, uygun ve çok uygun olmak üzere *Doğal Aralık (Jenks)* veri sınıflandırma yöntemi kullanılarak dört sınıfa ayrılmıştır (Şekil 5.3).

5.2 Bulanık TOPSIS ile Uygun Alanların Sıralanması

Bulanık küme teorisi ile birleştirilen ÇÖKA tekniği, karar verme konularındaki belirsizlikle başa çıkmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık TOPSIS, bulanık küme teorisi ile ölçütlerin değerini temsil etmek için üçgen bulanık sayı kullanan geleneksel TOPSIS yönteminin bir kombinasyonudur. Genel olarak, sözel değişkenler, karar vericiler tarafından bulanık TOPSIS yönteminde ölçütlerin ağırlıklarını ve alternatiflerin derecelendirmelerini değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada uygun alanlar belirlendikten sonra alanların derecelendirilmesi amacıyla Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır.

Öncelikle ilgili alternatif alanlar ve ölçütler tanımlanmıştır. Alternatif alanlar Enez, Gökçeada Güney, Gökçeada Doğu, Gökçeada Batı (Uğurlu Limanı) ve Bozcaada olarak tanımlanmıştır. Ölçütler ise AHY analizinde kullanılan yedi ölçüt olarak tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak ölçütlerin derecelendirilmesi için tanımlanan sözel üçgen sayılardan (Çizelge 3.5) yararlanarak bulanık karar matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 : Bulanık karar matrisi.

	Batimetri			Rüzgâr hızı			GRU			YAU			Kıyıya uzaklık			Limanlara yakınlık			TMU		
Enez (A1)	9	10	10	7	9	10	3	5	7	1	3	5	3	5	7	5	7	9	1	3	5
Gökçeada Uğurlu Limanı (A2)	9	10	10	3	5	7	5	7	9	5	7	9	7	9	10	5	7	9	1	3	5
Gökçeada Güney (A3)	7	9	10	3	5	7	9	10	10	7	9	10	7	9	10	3	5	7	3	5	7
Gökçeada Doğu (A4)	7	9	10	3	5	7	7	9	10	9	10	10	7	9	10	1	3	5	7	9	10
Bozcaada (A5)	9	10	10	9	10	10	9	10	10	9	10	10	9	10	10	9	10	10	7	9	10
c_j^*	10			10			10			10			10			10			10		

Ardından her bir ölçüt için $c_j^* = \max_i \{c_{ij}\}$ belirlenip karar matrisinin her bir elemanının c_j^* değerine bölünerek normalleştirilmiş bulanık karar matrisi oluşturulmuştur (Çizelge 5.5).

Ardından normalleştirilmiş bulanık karar matrisinin her bir elemanı, ilgili ölçüt için AHP ile belirlenen ağırlık değeri ile çarpılarak ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi $\tilde{V} = (\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times w_j)$ (Çizelge 5.6) oluşturulmuştur.



Çizelge 5.5 : Normalleştirilmiş bulanık karar matrisi.

	Batimetri			Rüzgâr hızı			GRU			YAU			Kıyıya uzaklık			Limanlara yakınlık			TMU		
Enez	0.9	1	1	0.7	0.9	1	0.3	0.5	0.7	0.1	0.3	0.5	0.3	0.5	0.7	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5
Gökçeada Uğurlu Limanı	0.9	1	1	0.3	0.5	0.7	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	0.7	0.9	1	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5
Gökçeada Güney	0.7	0.9	1	0.3	0.5	0.7	0.9	1	1	0.7	0.9	1	0.7	0.9	1	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
Gökçeada Doğu	0.7	0.9	1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.9	1	0.9	1	1	0.7	0.9	1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
Bozcaada	0.9	1	1	0.9	1	1	0.9	1	1	0.9	1	1	0.9	1	1	0.9	1	1	0.7	0.9	1

Çizelge 5.6 : Ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi.

	Batimetri			Rüzgâr hızı			GRU			YAU			Kıyıya uzaklık			Limanlara yakınlık			TMU		
Enez	0.23	0.26	0.26	0.29	0.37	0.42	0.04	0.06	0.08	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.05	0.06	0.08	0.00	0.01	0.02
Gökçeada Uğurlu Limanı	0.23	0.26	0.26	0.12	0.21	0.29	0.06	0.08	0.11	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.00	0.01	0.02
Gökçeada Güney	0.18	0.23	0.26	0.12	0.21	0.29	0.11	0.12	0.12	0.04	0.05	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.06	0.01	0.02	0.03
Gökçeada Doğu	0.18	0.23	0.26	0.12	0.21	0.29	0.08	0.11	0.12	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04
Bozcaada	0.23	0.26	0.26	0.37	0.42	0.42	0.11	0.12	0.12	0.05	0.05	0.05	0.02	0.03	0.03	0.08	0.09	0.09	0.03	0.04	0.04

Ağırlıklı normalleştirilmiş bulanık karar matrisi elde edildikten sonra her bir ölçüt için $\tilde{v}_{ij}^* = \max_i\{v_{ij3}\}$ ve $\tilde{v}_{ij}^- = \min_i\{v_{ij1}\}$ belirlenerek bulanık pozitif ideal çözümü (FPIS, A^*) ve bulanık negatif ideal çözümü (FNIS, A^-) hesaplanmıştır.

$$A^* = (0.14, 0.51, 0.22, 0.09, 0.04) \quad (5.2)$$

$$A^- = (0.07, 0.25, 0.07, 0.00, 0.00) \quad (5.3)$$

Her bir alternatifin sırasıyla FPIS ve FNIS'e olan uzaklıkları tanımlayan d_i^* ve d_i^- Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.7 : Alternatiflerin FPIS ve FNIS'e olan uzaklıkları.

	d_i^*	d_i^-
Enez	0.26	0.43
Gökçeada Uğurlu Limanı	0.36	0.34
Gökçeada Güney	0.36	0.35
Gökçeada Doğu	0.37	0.34
Bozcaada	0.06	0.60

Daha sonrasında her bir alternatif için yakınlık katsayısı (CC_i) Denklem 3.10 ile hesaplanarak alternatifler sıralanmıştır (Çizelge 5.8).

Çizelge 5.8 : Alternatifler için hesaplanan yakınlık katsayısı değerleri ve alternatif sıralamaları.

	CC_i	Normalize CC_i	Sıralama
Enez	0.62	0.206	2
Gökçeada Uğurlu Limanı	0.49	0.163	4
Gökçeada Güney	0.50	0.166	3
Gökçeada Doğu	0.48	0.162	5
Bozcaada	0.90	0.30	1

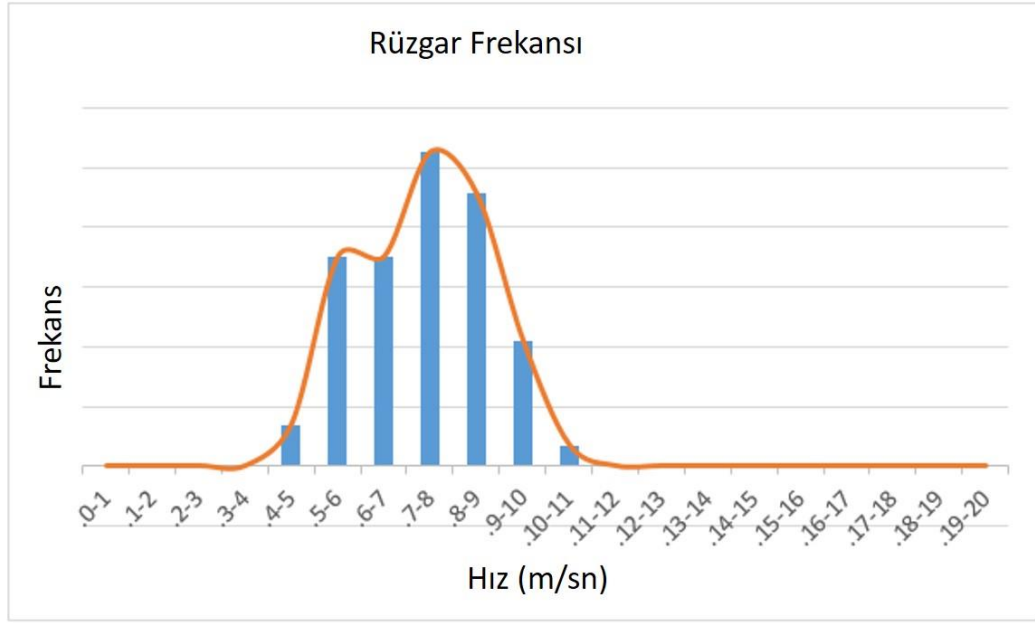
5.3 Enerji ve Ekserji Verimliliği

5.3.1 Açık deniz rüzgâr türbini enerjisi ve ekserji analizi uygulama sonuçları

T.C. Devlet Meteoroloji İşleri'nden Bozcaada, Gökçeada ve Enez meteoroloji istasyonundan; enerji ve ekserji verimlilikleri analiz etmek için aylık ortalama nispi nem, aylık ortalama rüzgâr hızı ve aylık ortalama sıcaklık verileri kullanılmış, verilerin yıllık ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak Rüzgâr frekansı diyagramları her alan için hesaplanmıştır. Sırasıyla; Weibull şekil faktörü, ölçek faktörü ve Weibull sayısı, rüzgâr olasılığı yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif fonksiyon hesaplanmıştır. Rüzgar kanat hızları hesap edildikten sonra; rüzgâr ekserjisi hesap edilmiştir. En son adımda Rüzgâr enerjisi ve ekserji verimlilikleri Bölüm 2.4'te açıklanan (2.9) ve (2.10) verimlilik formülleri uygulanarak bulunmuştur. Toplam girdi enerjisi ve ekserjinin; toplam üretilen enerji veya elektrik çıkışına bölünerek Enerji ve ekserji verimliliği sonuç olarak hesap edilmiştir. Bozcaada, Gökçeada ve Enez diyagram ve hesaplama sonuçları aşağıda verilmiştir.

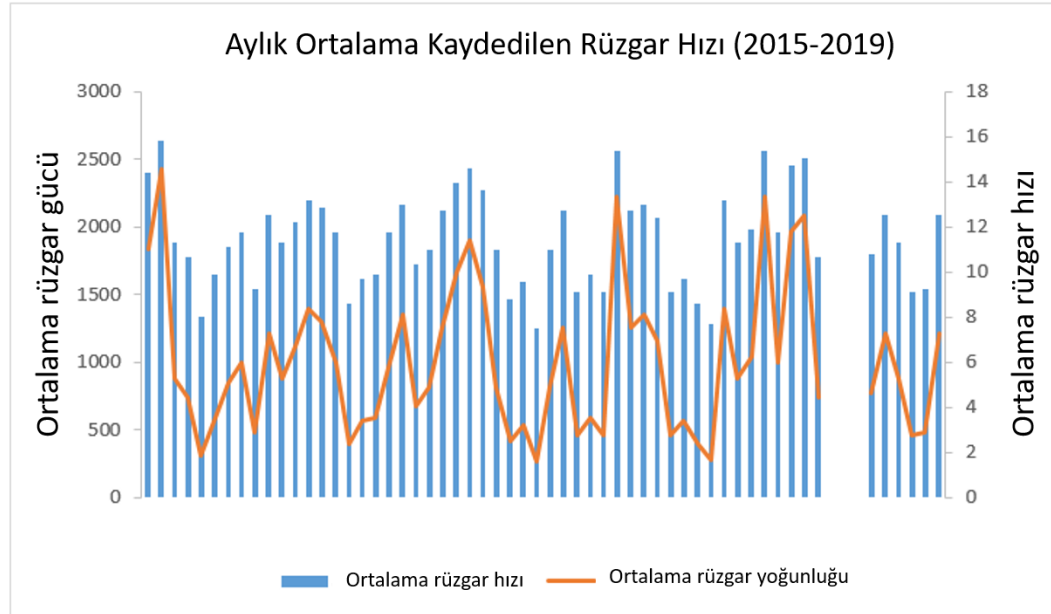
5.3.1.1 Bozcaada

Mevcut meteorolojik veriler ve rüzgâr türbinlerinin seçilen özellikleri ile enerji ve ekserji verimliliklerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Şekil 5.4'te Bozcaada için 2015-2019 yılları arası ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak rüzgâr frekansı diyagramı hesaplanmıştır.



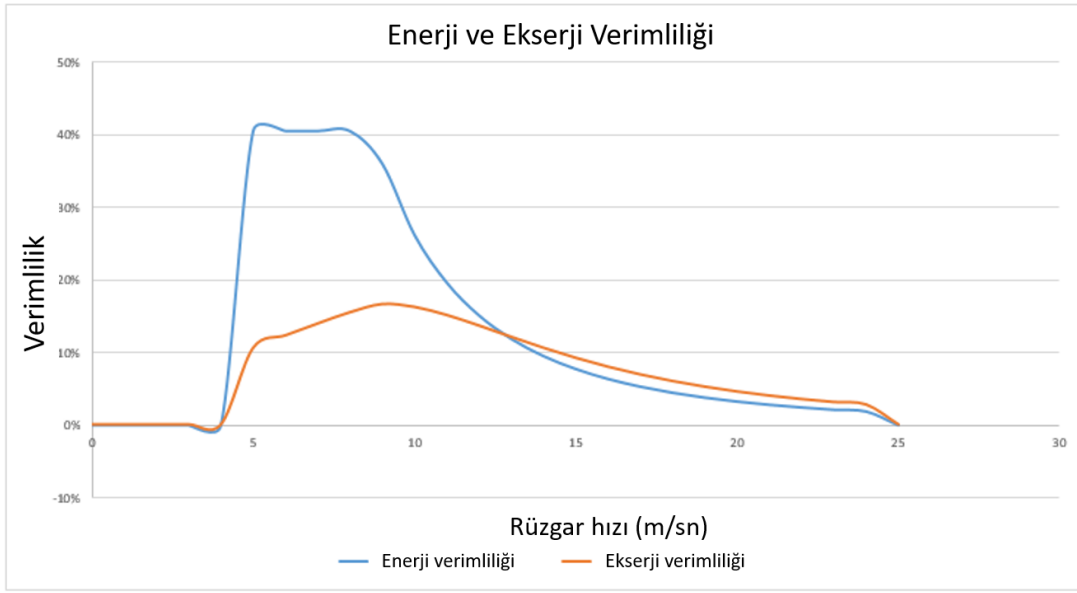
Şekil 5.4 : Bozcaada rüzgâr frekans diyagramı.

2015-2019 yılları arasında aylık ortalama rüzgâr gücü ve hızı üretilmekte ve Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

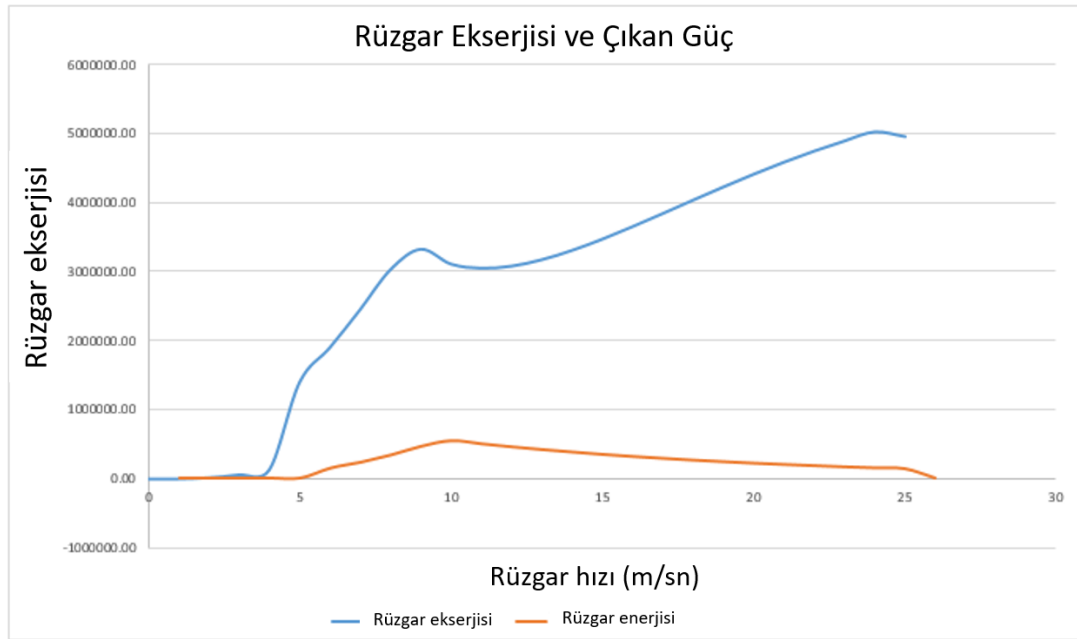


Şekil 5.5 : Bozcaada ortalama güç ve hız diyagramı.

En iyi enerji verimliliği ve ekserji verimliliğinin 5 m / s ile 9 m / s arasındaki rüzgâr hızı aralığında oluştuğu enerji verimliliği ve ekserji verimliliği analizi sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Üretilen enerji miktarı olan 9 m / s, hafif bir eğimle azalan bir eğilim gösterir. Şekil 5.7 bu değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 5.6 : Bozcaada enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.

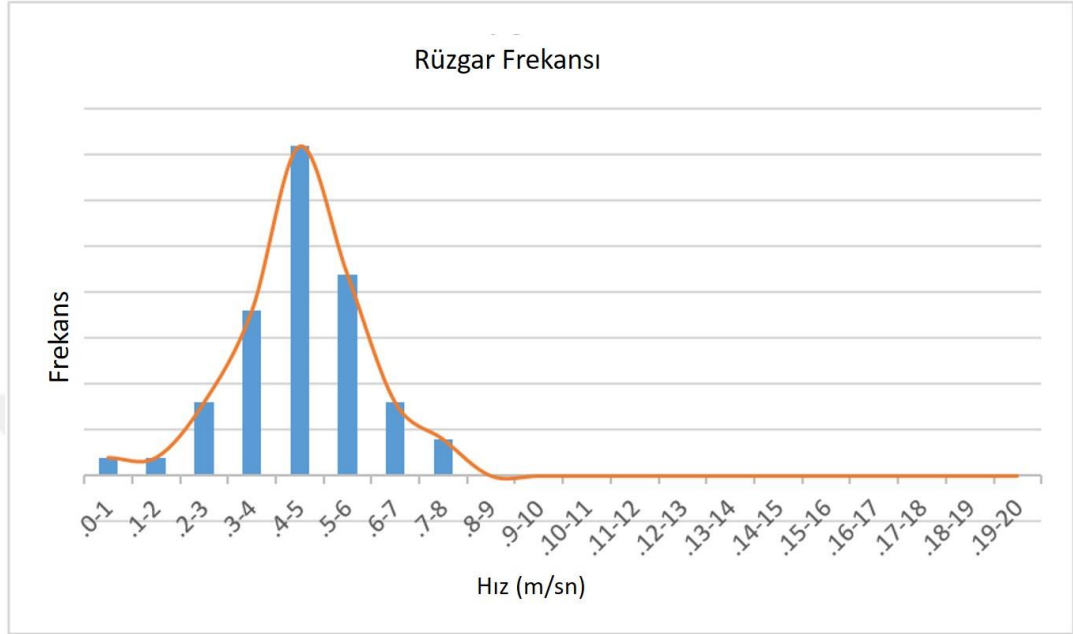


Şekil 5.7 : Bozcaada rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.

Çalışma alanındaki toplam enerji ve ekserji ve türbin toplam üretilen enerji sonuçları; Türbin kinetik enerjisi (potansiyel): 111.71 GWh, Türbin toplam enerjisi (nominal güç dikkate alınarak): 19.62 GWh, Türbin toplam üretilen enerji 16.24 GWh ve Toplam Ekserji: 75.66 GWh'dır.

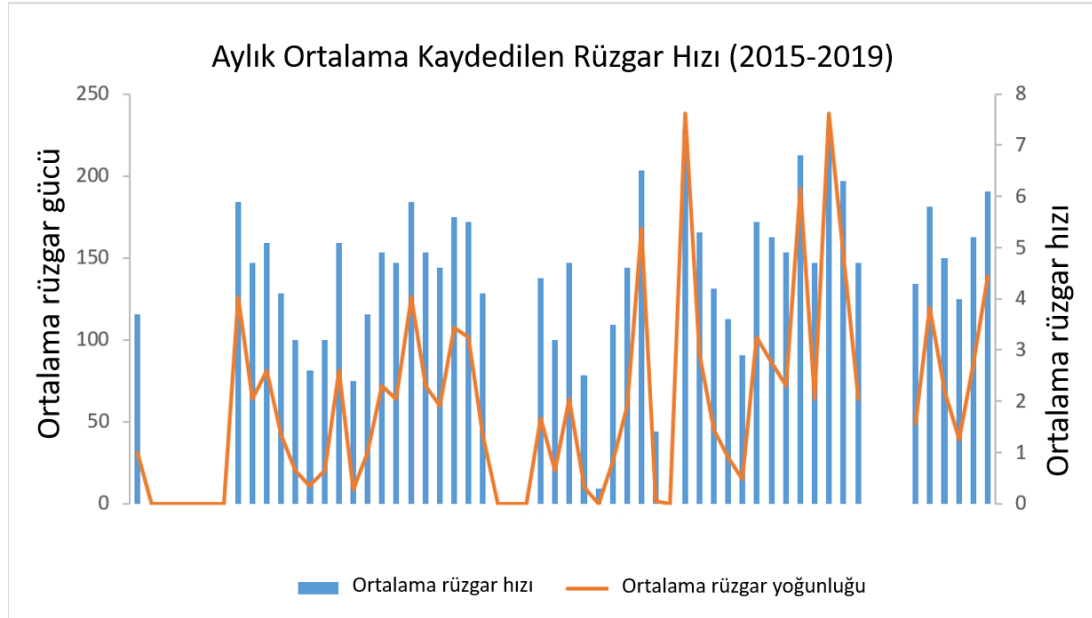
5.3.1.2 Gökçeada

Şekil 5.8’de Gökçeada için 2015-2019 yılları arası ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak rüzgâr frekansı diyagramı hesaplanmıştır.



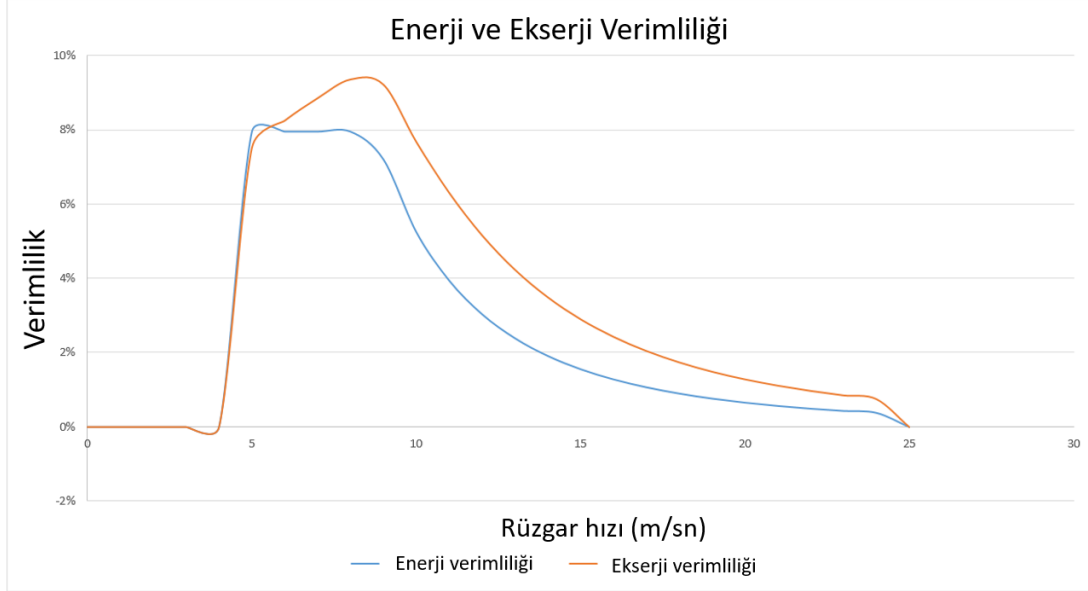
Şekil 5.8 : Gökçeada rüzgâr frekans diyagramı.

2015-2019 yılları arasında aylık ortalama rüzgâr gücü ve hızı oluşturulmuş ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

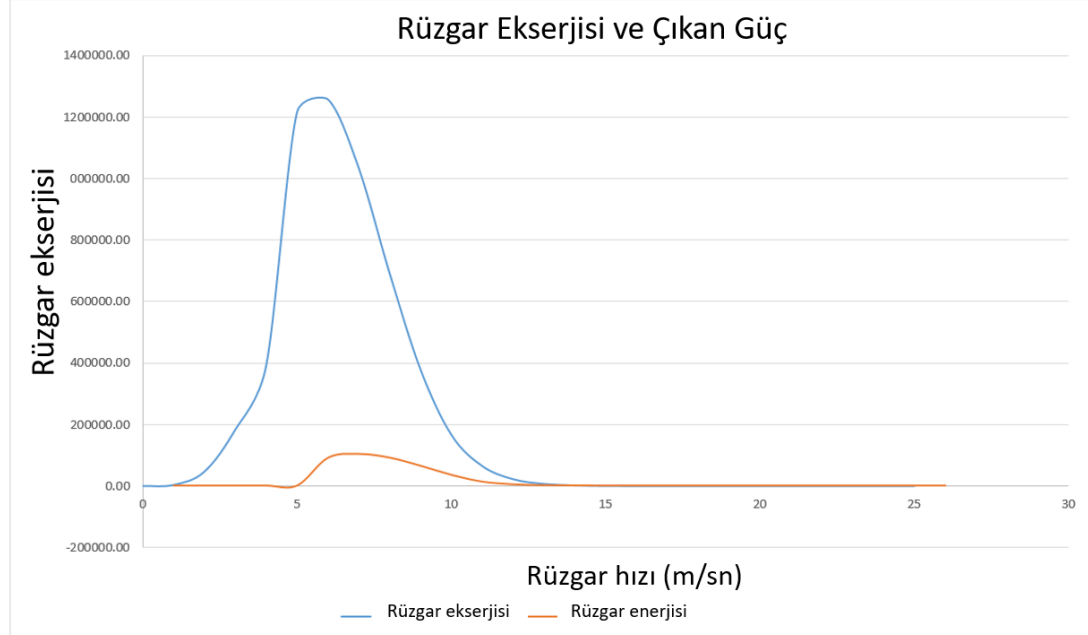


Şekil 5.9 : Gökçeada Ortalama Güç ve Hız Diyagramı.

En iyi enerji verimliliği ve ekserji verimliliğinin 5 m / s ile 10 m / s arasındaki rüzgâr hızı aralığında olduğu enerji verimliliği ve ekserji verimliliği analizi sonuçları 5.10’da gösterilmektedir. Üretilen enerji miktarı olan 10 m / s, hafif bir eğimle azalan bir eğilim gösterir. Şekil 5.11 bu değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 5.10 : Gökçeada enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.



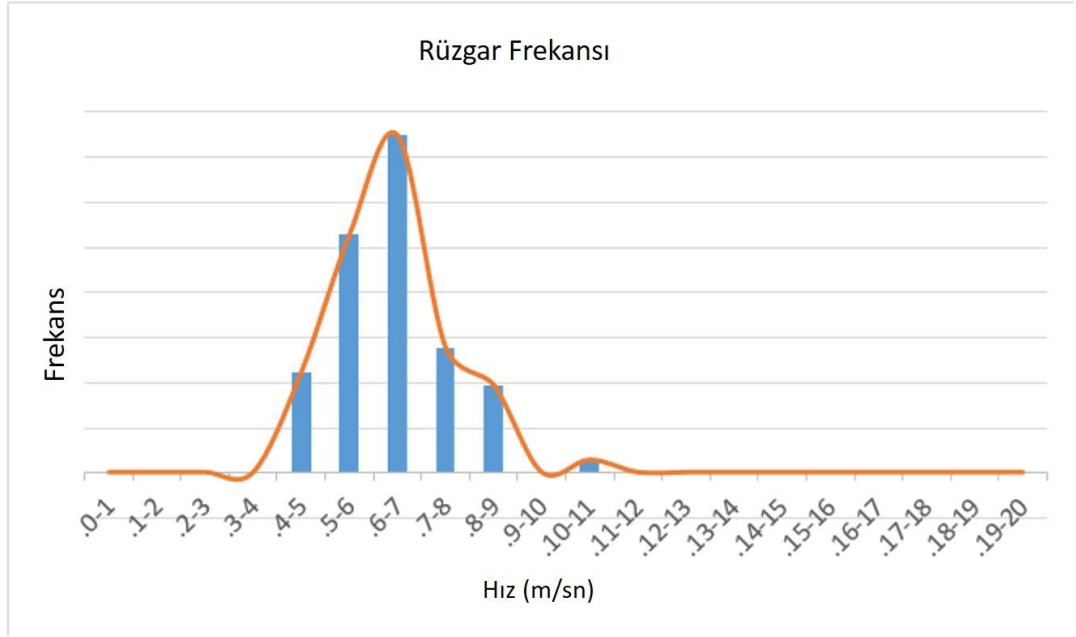
Şekil 5.11 : Gökçeada rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.

Çalışma alanındaki toplam enerji ve ekserji ve türbin toplam üretilen enerji sonuçları; Türbin kinetik enerjisi (potansiyel): 6.55 GWh, Türbin toplam enerjisi (nominal güç

dikkate alınarak): 5.09 GWh, Türbin toplam üretilen enerji 4.21 GWh ve Toplam Ekserji: 5.47 GWh'dır.

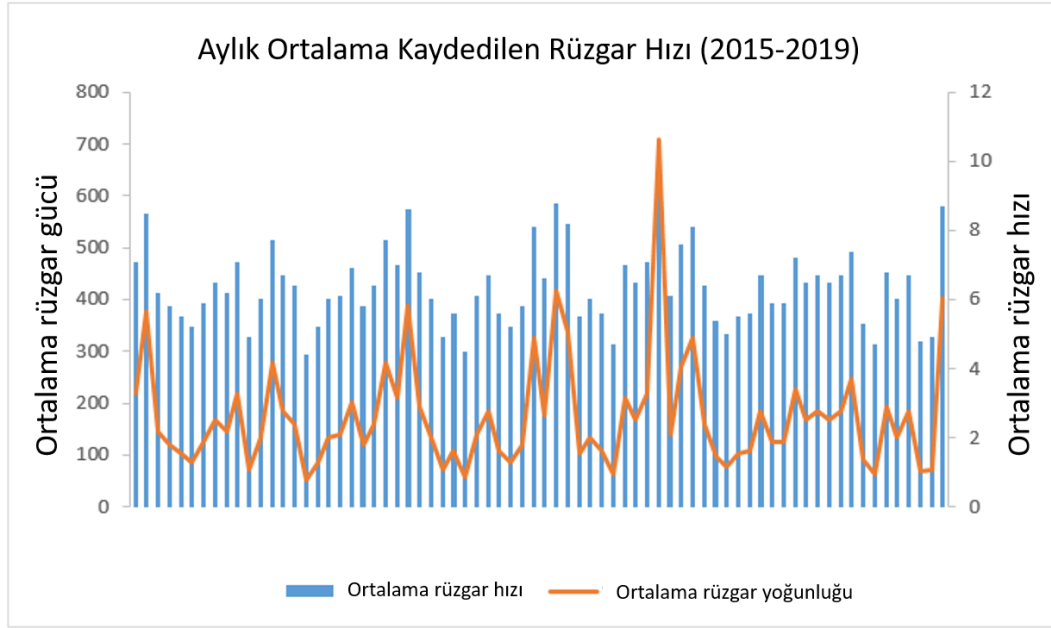
5.3.1.3 Enez

Şekil 5.12 Enez için 2015-2020 yılları arası ortalama aylık rüzgâr değerleri esas alınarak rüzgâr frekansı diyagramı hesaplanmıştır.



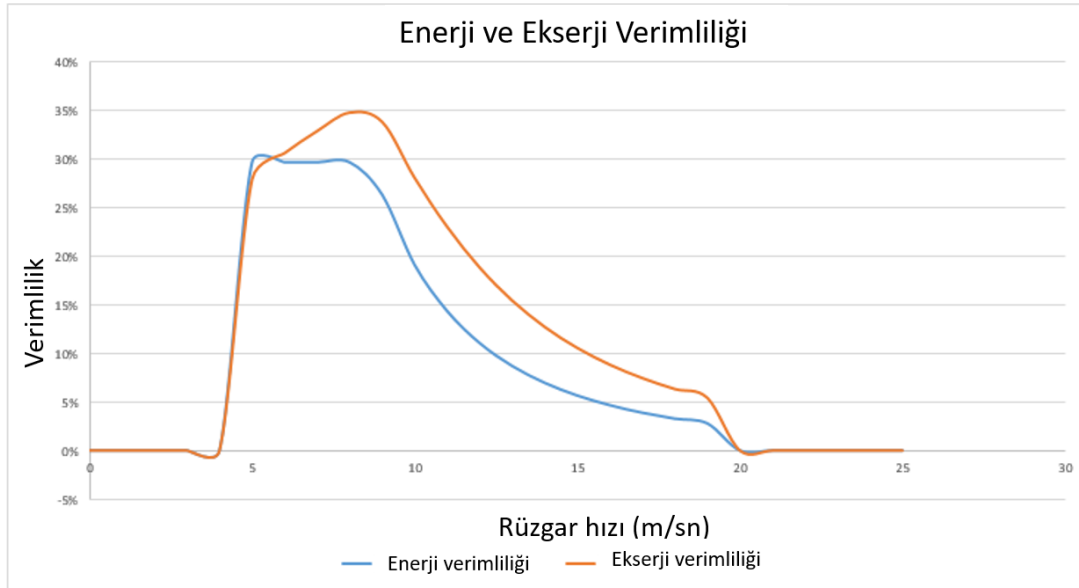
Şekil 5.12 : Enez rüzgâr frekans diyagramı.

2015-2020 yılları arasında aylık ortalama rüzgâr gücü ve hızı oluşturulmuş ve 5.13'te gösterilmiştir.

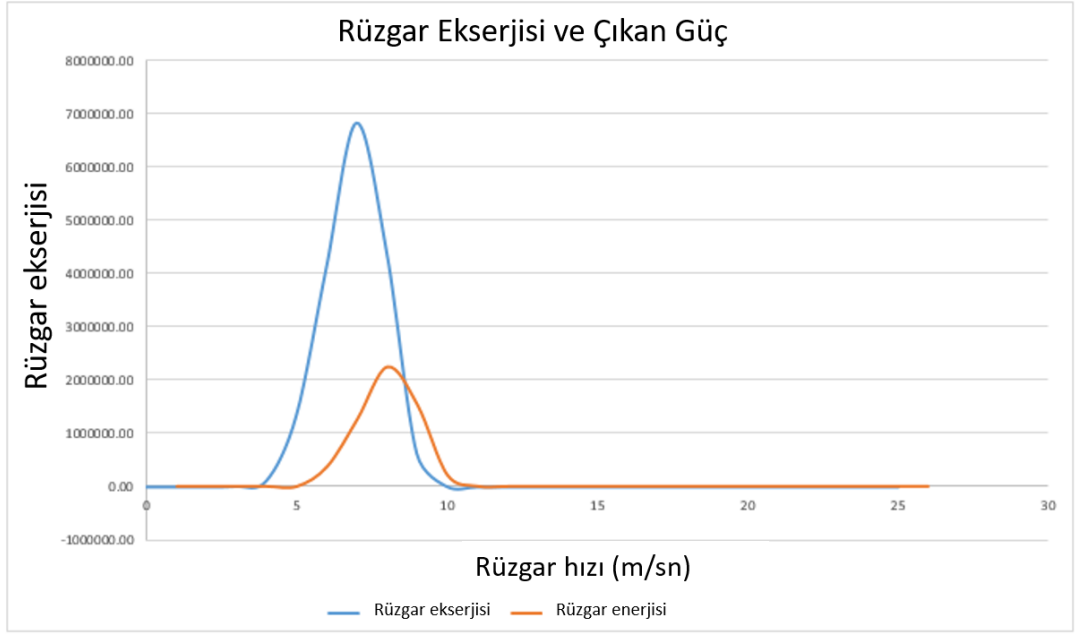


Şekil 5.13 : Enez ortalama güç ve hız diyagramı.

En iyi enerji verimliliği ve ekserji verimliliğinin 4.5 m / s ile 10 m / s arasındaki rüzgâr hızı aralığında olduğu enerji verimliliği ve ekserji verimliliği analizi sonuçları 5.14’te gösterilmektedir. Üretilen enerji miktarı olan 10 m / s, hafif bir eğimle azalan bir eğilim gösterir. 5.15 bu değişiklikleri göstermektedir.



Şekil 5.14 : Enez enerji ve ekserji verimliliği dağılımı.



Şekil 5.15 : Enez rüzgâr ekserji ve farklı rüzgâr hızlarında oluşan rüzgârdan elde edilen güç.

Çalışma alanındaki toplam enerji ve ekserji ve türbin toplam üretilen enerji sonuçları; Türbin kinetik enerjisi (potansiyel): 19.22 GWh, Türbin toplam enerjisi (nominal güç dikkate alınarak): 18.95 GWh, Türbin toplam üretilen enerji 15.68 GWh ve Toplam Ekserji: 17.44 GWh'dır.

Enerji hesaplamaları, Bozcaada, Gökçeada ve Enez'de mevcut rüzgar enerjisi miktarının sırasıyla 19,62, 5,09 ve 18,95 GW olduğunu göstermektedir. Teknik ve ulaşım dâhil olmak üzere sistemdeki tüm kayıplar nedeniyle Bozcaada, Gökçeada ve Enez'de üretilen enerji miktarı sırasıyla 16,24, 4,21 ve 15,68 GWh'dir. Ayrıca Bozcaada'nın toplam ekserjisi 75,66 GWh, Gökçeada 5,47 GWh ve Enez 17,44 GWh'dir.

Ekserji verimliliğine göre enerji verimliliği için her üç sahadaki karşılaştırmalı sonuçlar, Bozcaada'da 5 ila yaklaşık 12 m/s arasındaki rüzgar hızlarında ekserji verimliliğinden daha yüksek bir enerji verimliliği seviyesine işaret etmektedir. Aynı durumda, diğer iki istasyonda enerji verimliliğine göre ekserji verimliliği tam tersidir ve ekserji verimliliği enerjiden daha yüksektir. Tüm konumlarda 12 m/s'den sonraki rüzgâr hızlarında ekserji verimliliği daha yüksektir.



6. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Tartışma

Denizel mekânsal planlama bakış açısı ile oluşturulan bir bilgi sistemi ile verilerin analizinin gerçekleştirilmesi, Kuzey Ege’de Açık Denizüstü Rüzgar Türbinlerinin tesisi için yer seçiminde büyük önem arz etmektedir. Kuzey Ege’nin farklı bölgelerinde çeşitli amaçlar için gerçekleştirilmiş ve yayınlanmış çalışmalar bulunmaktadır.

Örneğin; Güzel (2012), tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında Bozcaada ve Gökçeada örnek çalışma alanları için Wind Atlas Analysis and Application Program (WaSP) programı kullanarak açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyeli incelenmiştir. Çalışmada açık deniz rüzgâr tarlasının uygun olup olmadığı ve uygunsa hangi koşullar ve senaryolar altında olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Fizibilite çalışması için 20m’den sığ, ve 45m’den sığ tüm derinlik kategorilerini kapsayacak şekilde 2 farklı derinlik senaryosu hazırlanmıştır. İlk senaryoda 20m ve altı için, bu senaryoda Bozcaada uygunluk haritası gemi batıkları ve Bozcaada Kuzeybatı demirleme sahası ile kısmen çatışmaktadır. İkinci senaryo alanı 45m için ise demirleme sahasına denk gelmektedir. Gökçeada rüzgâr tarlası yerleşimi 20m ve altı için, Gökçeada’nın doğusu uygun alan olarak tespit edilmiştir. Gökçeada rüzgâr tarlası yerleşimi 45m için Gökçeada’nın doğusu ve güneydoğusu uygun alan olarak değerlendirilmiştir. Bu alanlarda dalışa yasak sahalar, kısmen limana yakın alanlar mevcuttur.

Yerci (2015) tez çalışmasında, Türkiye’de yer alan 55 kıyı bölgesi içinden belirlenen kriterleri sağlayan Bozcaada, Bandırma, Gökçeada, İnebolu ve Samandağ bölgelerinde deniz üstü rüzgâr santralleri kurulabilecek bölgelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin muhtemel konumları hakim rüzgâr yönü, deniz derinliği ve kıyıdan uzaklıkları baz alınarak, ağırlıklı rüzgâr yönü dağılım grafiği ve seyir haritaları kullanılarak belirlenmiştir. Bozcaada için önerilen alanlarda gemi trafik rotaları ile çok yakındır. Ayrıca demirleme sahaları ve batimetri çalışmaya

dâhil edilmemiştir. Aynı şekilde Gökçeada için uygun olarak belirtilen çalışma sahası limanlar, sualtı kablo yolları, dalışa yasaklı sahalar ve gemi batıklarının olduğu bölge ile çakıştığı görülmektedir.

Akalın (2018) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında, CBS ve ÇÖKA tekniklerinden Bulanık Analitik Hiyerarşi Yöntemi (BAHP)'nin beraber kullanıldığı bir karar modeli önermiştir. Ege Denizi açık deniz rüzgâr enerji santralleri kurulumu için alternatif bölgeler en uygun alanlar ve uygun alanlar olmak üzere kategorize edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, Ege Denizinde açık deniz rüzgâr enerji santralleri kurulumu için en uygun olarak Çanakkale, Gökçeada ve Bozcaada kıyılarının belirlenmiştir. Kullanılan eşit ağırlıklı olarak değerlendirilen beş ölçütün analizi sonunda belirlenen Bozcaada'nın Kuzey, Batı ve Güney bölgelerinin demirleme sahaları, dalışa yasak sahalarla tamamen ve gemi rotalarıyla kısmi olarak çakıştığı görülmüştür. Dalışa yasak ve askeri eğitim ve atış sahası olmasına rağmen Çanakkale alanı uygun alan olarak belirlenmiş olduğu görülmektedir. Gökçeada için güneyi bu tez çalışması sonucu ile uygunluk göstermektedir. Ancak Gökçeada Uğurlu Limanı'nın demirleme sahası; Gökçeada Doğu tarafının ise gemi batıkları, limanlar ve dalışa yasak sahalar ve gemi rotasının bulunduğu bölgelerin uygun alan olarak belirlendiği görülmüştür.

Çalı vd., (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bandırma, Bozcaada ve Gökçeada çalışma alanı seçilmiş ve seçilen alanların tekno maliyet analizi yapılmıştır. Fakat, çalışmada yer seçimi analizleri gerçekleştirilmediğinden, önerilen alanlarda, gemi trafik rotaları, demirleme sahaları ve batimetri verilerinin dikkate alınmadığı görülmüştür. Detaylı olarak Gökçeada çalışma bölgesi için uygun olarak belirtilen alan limanlara, su altı kablolarına yakın, gemi batıklarının bulunduğu bir alan olup dalışa yasaklı saha içerisinde de yer almaktadır.

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, Argin vd., (2019) rüzgâr verilerinden Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) simülasyon programı kullanılarak istatistik veriler elde etmişler ve bunun sonucunda, Bozcaada, Bandırma, Gökçeada, İnebolu ve Samandağ en uygun alan olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada, kıyıya yakınlık, demir sahaları, mayınlı sahalar, gemi batıkları ve limanlar ölçüt olarak değerlendirilmemiştir. Dolayısıyla, Bozcaada için önerilen alanlar gemi trafik rotalarına, Gökçeada için önerilen alanlar ise liman ağzına yakınlık, sualtı kablo yolları, gemi batıkları ve dalışa yasaklı sahalarla yakındır.

Emeksiz vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, on adet ölçüt kullanarak açık deniz rüzgâr türbinleri için yer seçimi amaçlanmıştır. Kullanılan kriterler arasında demir sahası, mayınlı sahalar ve batıklar bulunmamaktadır. Bozcaada doğu ve kuzey doğu alanında belirtilen uygun alanlar demirleme sahasıyla çakışmaktadır. Gökçeada sahası ise bu tez çalışmasında uygun alan olarak belirlenen Gökçeada Güney alanı ile paralellik göstermektedir.

Aydiner (2020) tarafından gerçekleştirilen tez çalışmasında Ege Denizi'nde entegre rüzgâr ve dalga enerji sistemlerinin yer seçimi için CBS ve ÇÖKA yöntemlerinden AHY ile uygun alanlar araştırılmıştır. Rüzgâr hızı, belirgin dalga yüksekliği, deniz derinliği, trafo merkezlerine uzaklık, limanlara uzaklık, kıyıya uzaklık ve deniz tabanı çökel tipi ölçüt olarak kullanılmıştır. Gökçeada'nın rüzgâr türbini için bu çalışmaya göre uygun olmayan alanlar, az uygun alan olarak görünmektedir. Gökçeada'nın güneybatısından karasuları sınırı aşıldığı görülmektedir. Yine Gökçeada güneydoğu bölgesi yasaklı saha olmasına rağmen az uygun olarak değerlendirilmiştir. Kuzeyden ve Güneyden Türk Boğazlar Sistemine giriş rotası üzerinde Bozcaada'nın batısı uygun alan olarak değerlendirilmiştir. Bozcaada demirleme sahaları, Bozcaada doğu tarafı liman sahası, Bozcaada ve ana kara rota hattı uygun alan olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada Edirne bölgesi de en az uygun alan olarak belirlenmiştir.

Tortumoğlu ve Doğan (2021) Ege Denizi'nde açık deniz rüzgâr türbinleri kurulumu için uygun yer seçim ölçütlerinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ege bölgesinde kıyıya yakın olan 14 adet meteoroloji istasyonundan alınan rüzgâr verileri WAsP programı ile analiz edilmiştir. Yasaklı sahalar, derinlik, rüzgâr verisi ve kara suları sınırı ölçüt olarak kullanılmıştır. Gökçeada için oluşturulmuş rüzgâr hızının değişiminin ve türbin yerleşiminin verildiği görselde Gökçeada'nın sadece güneydoğusuna ve doğusuna türbin yerleşim planında dalışa yasaklı sahaların, limanın ve batıkların olduğu lokasyona yerleştirilmiş ve ana gemi rotasına ve sualtı kablo hattına yakın olduğu görülmüştür. Bozcaada uygunluk haritası batimetri, batık, kuzey ve batı demirleme sahası, kıyıya yakınlık değerlendirilmeden oluşturulmuştur. Çalışmada Çanakkale ve Ayvacık bölgeleri rüzgâr hızı açısından uygun olsa da sualtı kablo hatları, yasak sahalar ve gemi rotalarına yakın alanlardan dolayı türbin yerleşimine uygun alanlar olmadığı belirtilmiştir.

Kuzey Ege'nin çalışma bölgesi dışında gerçekleştiren Açık Denizüstü Rüzgâr Türbinlerinin tesisi için Tercan vd., (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İzmir ve Yunanistan'da yer alan Cylade adası civarı incelenmiştir. Araştırmacılar yedi ölçüt kullanarak CBS – Bulanık AHY yönteminden yararlanmıştır.

Şahin (2020) tarafından yapılan derleme niteliğindeki çalışmada Açık Denizüstü Rüzgâr Türbinleri için Danimarka'daki türbinler ele alınmış, diğer ülkeler ve ülkemizin potansiyeli ile kıyaslanmıştır. Danimarka modelinin Türkiye rüzgâr potansiyeli göz önüne alındığında ülkemiz için uygun bir model olduğu yazar tarafından belirtilmiştir.

Konuyla ilgili olarak gerçekleştirilmiş bu çalışmaların tümü değerlendirildiğinde, akademik çalışmaların, sadece ulaşılabilen veri ve bu veriye dayalı olarak öngörülen ölçütler ve kısıtlarla çalışıldığı sonucuna varılmıştır. Bahsi geçen akademik çalışmalar bu tez çalışması ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde iki önemli sonuca ulaşılmıştır. Bunlardan birincisi, hiç kuşkusuz ki veri yeterliliği ve buna dayalı olarak veri kalitesidir. Çalışmalar veri açısından incelendiğinde; pek çok çalışmada önerilen bölgelerin (eksik veri nedeniyle) gerçekte uygun olmayan yerler olduğu saptanmıştır. İkinci sonuç ise; mevcut verilerin mekânsal bir bilgi sistemi içerisinde analiz edilmemesidir. Bu durum da veri eksikliğinde olduğu gibi uygun olmayan yer seçimlerine neden olmuştur.

6.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Denize kıyısı olan ülkelerin özgün ekonomik bölgeleri denizlerin % 40'ını oluşturmaktayken, % 60'ını açık denizler oluşturmaktadır. Ülkelerin ekonomik olarak büyümesi ve kalkınması için denizlerden en yüksek verimi almak ve aynı zamanda çevresel olarak denizlere zarar vermemek için, denizel mekânsal planlama kavramı ortaya konulmadan önce, Baltık ülkeleri, Çin ve diğer birçok ülke denizlerin mekânsal olarak etkin planlanması ve bütünleşik yönetimi için birçok çalışma ve proje gerçekleştirmiştir. 2006 yılında DMP ile ilgili olarak, UNESCO ve IOC (Intergovernmental Oceanography Commission) organizasyonu ile DMP ile ilgili ilk Konferans gerçekleştirilmiştir. 2008'de Avrupa Komisyonu tarafından DMP ile ilgili bir yol haritası kaleme alınmış ve son olarak da 2014 yılında da Avrupa Birliği 2021 yılına kadar üye ülkelerin denizel mekânsal planlamalarını tamamlaması için bir dizi direktif yayınlamıştır. Günümüz itibari ile dünyada, başta Avrupa Birliği ülkeleri

olmak üzere, Asya, Afrika, Güney ve Kuzey Amerika ve bazı Ortadoğu ülkeleri DMP uygulayan, planlama sürecinde olan veya yeniden düzenleyen yetmiş ülke bulunmaktadır. Türkiye’de 2021 yılı itibariyle denizel mekânsal planlama konusu ile ilgili yayınlanan tek çalışma Baltaoğlu’nun, (2021) “Türkiye Deniz Alanlarının Ekosistem Tabanlı Deniz Alanları Planlaması Açısından Değerlendirilmesi” başlıklı Doktora Tezidir.

Kuzey Ege’de Açık Denizüstü Rüzgâr Türbinlerinin tesisi için yer seçimi ve enerji-ekserji verimliliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında; oluşturulan bilgi sistemi, denizel mekânsal planlamanın, ekolojik, sosyo-ekonomik, politik ve coğrafi özellikler perspektifi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu perspektif, bir ölçüte, kısıta ya da herhangi bir sektör ve/veya mesleki disipline bağlı olmaksızın, çok disiplinli bir bakış açısı ile bütüncül ve çok yönlü bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır.

Türk Boğazları Sisteminin bir parçası olan Çanakkale Boğazı, Karadeniz’e gemilerin seyir edebilmesi için var olan tek suyoludur. Türk Boğazları Sistemine Çanakkale Boğazı’ndan güneyden giriş rotası, özellikle Bozcaada’nın kuzey ve batı açıklarına oldukça yakındır. Kuzey rüzgârların hakim olduğu Ege Denizi’nde, kuvvetli rüzgâr ve fırtınalarda gemiler, hem gemi hem de personel emniyeti açısından Bozcaada’nın güneyine demirleyerek, fırtınadan neta oluncaya kadar demir sahalarında demir atarak alargada beklemektedirler. Demirleme sahaları, gemilerin emniyeti ve güvenliği için çok önemli ve güvenli bekleme deniz sahalarıdır. Gemi trafiğinin çok olduğu Kuzey Ege Denizi’nde özellikle Bozcaada’nın güney demir sahası için alternatif bir farklı demirleme sahası yoktur. Denizcilerin emniyeti ve gemilerin güvenliği için bu bölgenin önemi tartışılmazdır.

Açık deniz rüzgâr türbinleri yer seçimleri için ihtiyaç duyulan en önemli ölçüt rüzgâr hızı olmakla beraber; askeri tatbikat alanları, askeri yasak alanlar, batimetri, özgün ekonomik bölge sınırları, kıyıya uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, denizcilik rotaları, limanlar, marinalar, yeraltı boru ve kablo hatları, fay hatları, ekolojik kısıtlar ile görsel ve sosyal kısıtlamalar da kullanılan diğer ölçütlerdir.

Bu çalışmada toplam on dört kriter kullanılmıştır. Bu kriterlerden; batimetri, rüzgâr hızı, gemi rotalarına uzaklık, sualtı kablo ve boru hatlarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, kıyıya uzaklık, limanlara yakınlık ve trafo merkezlerine uzaklık

ölçüt olarak kullanılmış, demirleme alanı, fay hattına uzaklık, gemi batıklarına uzaklık, eğitim ve atış sahaları, dalışa yasak sahalar ve Saros Koruma bölgesi kısıtlama olarak değerlendirilmiştir. Güvenilir veri temini sağlanamadığından, çalışmada balıkçılık ve turizm verileri ölçüt olarak kullanılmamıştır. Yapılan literatür çalışmasından sonra, farklı coğrafi alanlarda yapılan açık deniz türbin konumlandırılmasında kullanılan kriter ve limitlerin farklılığı tespit edilmiş ve yapılan çalışmanın amacına uygun kriterler değerlendirmeye alınmıştır.

Dört aşamada gerçekleştirilen bu tez çalışması sonucunda Kuzey Ege Denizi için açık deniz rüzgâr enerji santralleri kurulumu için uygun olan bölgeler Enez, Gökçeada Güney bölgesi, Gökçeada Doğu bölgesi, Gökçeada Batı bölgesi ve Bozcaada olarak tanımlanmıştır. AHY ile uygunluk haritası oluşturulmuş, uygun alanlar tespit edilmiştir. Uygun olan alanların diğerlerine göre daha üstün olduğunu saptamak ve kriterlerin ağırlıklarının ve alternatiflerin derecelendirmelerini değerlendirmek için Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Alternatifler için hesaplanan yakınlık katsayısı değerlerine göre alternatifler sırasıyla; Bozcaada, Enez, Gökçeada Güney, Gökçeada Uğurlu Limanı ve Gökçeada Doğu olarak elde edilmiştir.

Son adımda; bu alanların birbirlerine olan üstünlüklerini anlamak ve karşılaştırma yapabilmek için açık deniz rüzgâr türbinlerinin konumlandırılacağı alandaki meteorolojik parametreler ve rüzgâr gücü ile sistemin enerji ve ekserji verimliliği hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile sistemin verilen enerjiye göre ne kadar verimli olduğunun yanı sıra, sistemden daha fazla ne kadar iş elde edilebileceği görülmektedir. Rüzgâr türbininin verimliliği ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiler, beş yıllık ortalama aylık rüzgâr, sıcaklık, basınç ve bağıl nem değerleri kullanılarak gösterilmiştir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimlilik performansı, HTW5.0-126 rüzgâr türbini modeli çalışma alanlarının açık deniz bölgesinde bulunduğu varsayılarak değerlendirilmiştir. Toplam enerji ve ekserji ve türbinde üretilen toplam enerji hesabı yapıldığında; Bozcaada, Gökçeada ve Enez için belirli rüzgâr hızı aralığında enerji ve ekserji verimliliği ortaya çıkarılmıştır. Bu hesaplamada vurgulanması gereken en önemli nokta; rüzgâr türbini verimlilikleri ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkidir. En önemli parametre olan rüzgâr gücü, kübik rüzgâr hızıyla orantılı olduğundan, enerji ve ekserji verimliliğindeki varyans, diğer üç meteorolojik değişkene (sıcaklık, basınç ve bağıl nem) göre, rüzgâr

hızındaki değişkenliği daha yakından yansıtmaktadır. Ayrıca, türbin kanatlarının konumlandırılacağı deniz seviyesinden yükseklik elde edilecek rüzgâr gücü için çok önemlidir. Türbinin çapı, özellikle düşük rüzgâr hızında güç üretimini etkileyen türbin kanadı da süpürme alanı açısından önemli bir faktördür. Bu faktör, açık deniz rüzgâr türbinlerinin, karadaki rüzgâr türbinlerine göre en büyük avantajıdır. Karada konumlandırılan türbinlerin kanat çapı çevre ve yaşam alanı kısıtlamalardan dolayı, açık deniz türbinlerinin kanat çapı kadar geniş olamamaktadır. Ayrıca açık denize alanlarına yerleştirilen türbinlerde pürüzlülük sıfıra yakın bir değer olduğu için türbinlere ulaşan rüzgâr, direk olarak kanatlara çarpmakta sonuç olarak elde edilen rüzgâr gücünü artırmaktadır. Çalışma alanlarının toplam enerji ve ekserji ve türbin toplam üretilen enerji sonuçlarına göre verimlilik sırasıyla; Bozcaada, Enez ve Gökçeada'dır.

Kuzey Ege Denizinde deniz üstü rüzgâr santrali kurulumu açısından uygun alanların belirlenmesinde en önemli iki kriterin batimetri ve rüzgâr hızı olduğu bilinmektedir. Ancak, günümüz teknolojisi ve mühendisliğinde, batimetrinin en önemli parametre olmaktan çıktığı görülmektedir. Bugün birçok açık deniz rüzgâr türbinleri için ülkeler yüzer açık deniz türbinlerini tercih etmeye başlamışlardır. Üstelik, yüzer türbin modellerinin deniz ekosistemine ve dip yapısına vereceği zarar sabit ayaklı açık deniz türbinlerine göre daha az olduğu ifade edilmektedir. Ancak, yapılan bu çalışmada derinlik, üst limit olarak sabit ayaklı açık deniz türbinleri kullanılacağı varsayılarak 60 metre olarak hesaba katılmıştır.

Limanlara yakınlık ile ilgili ölçütte bir ikilem durumu söz konusu olmuştur. Açık deniz türbinlerinin konuşlandırılmasında limana yakınlık hem bir avantaj hem de bir dezavantaj olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada ideal ölçüt kriteri 3 km olarak alınmış, alt limit ise 1.5 km olarak seçilmiştir. Limana yakın konuşlandırılan türbinler limana girecek olan gemileri tehlikeye sokabilir. Ayrıca gemiler de türbinler için tehlike ihtiva edebilir. Kurulum esnasında, yakın mesafede olmanın lojistik açıdan sağladığı katkı önemli bir avantajdır (inşaat sürecinde, ekipman ve malzemeler, ağır deniz vinç ve mekanizmaları deniz nakliyesi ile gemiler üzerinden yapılacağı için, kablo döşenmesi, türbin ayaklarının deniz dibine sabitlenmesi operasyonlarında). Yine de ölçüt alt limitin 1.5 km mesafe verilmesi gemi trafiği, gemi ve türbin emniyet açısından doğru olduğu düşünülmektedir.

Bozcaada çalışma alanı, rüzgâr gücü olarak en kuvvetli alan olması, ana karaya yakın olması, limana ideal mesafede olması, deprem fay hattından uzak olması ve Ezine trafo merkezine yakın olması sebebiyle çok avantajlı konumdadır. Ancak, batı ve doğu kısmında Çanakkale Boğaz trafiği, Bozcaada'nın güney, batı ve kuzey batı kısmının demir sahası alanı olması başlıca nedenleri ile Bozcaada'nın uygun alanı sadece Bozcaada'nın kuzey deniz sahasında çıkmıştır. Yine de Bozcaada'nın kuzey bölgesinde rüzgârı çok alan bir deniz sahası olduğu için ve kriterlerde en yüksek ağırlık ölçütü rüzgâr parametresi olduğu için bu çalışmada Bozcaada en ideal alandır. Batimetri, ana karaya ve limana yakın olması da Bozcaada'nın diğer avantajlarıdır.

Gökçeada rüzgâr gücü; Bozcaada'nın rüzgâr gücü ile karşılaştırıldığında, elde edilen beş yıllık meteorolojik verilere ve literatür çalışmasındaki uzun vadeli ölçümlere göre Gökçeada'nın Bozcaada'ya göre çok daha zayıf olduğu rahatlıkla ifade edilebilir. Ancak yine de yapılan enerji ve ekserji hesaplarına göre, açık deniz rüzgâr türbinleri kurulduğunda verim elde edileceği görülmektedir.

Gökçeada'nın üç bölgesindeki uygun alanların karşılaştırılmasında etkin ölçütler; batimetri, gemi rotalarına uzaklık, yaşam alanlarına uzaklık, limanlara yakınlık ve trafo merkezlerine uzaklıktır. Adanın kuzey kıyılarından geçen fay, Kuzey Anadolu Fayının Ege Denizi'ndeki devamıdır. Gökçeada'nın kuzey bölgesi fay hattına çok yakın olduğu için uygun olmayan alan olduğu görülmüştür. Gökçeada'nın güneyi meteorolojik - oşinografik özelliklerden dolayı şiddetli dalgalarla aşınmayan güney kıyılarındaki ise hafif eğimli yayvan bir kıyı şekli bulunmaktadır. Bu durum Gökçeada'nın güneyini diğer alanlarına göre daha uygun kılmaktadır. Diğer önemli bir faktör ise, Gökçeada Deniz Parkı'nın mevcudiyetidir. Bu nedenle, Gökçeada'nın güneydoğu yönü, çalışmada kısmen hariç tutulmuştur. Gökçeada'da uygunluk haritası üç bölge olarak incelenmiştir. Gökçeada'nın güneyi, adanın en ideal bölgesidir. Gökçeada batı bölgesinin Çanakkale Boğazına doğru seyreden gemi trafiğine yakın olması ve ana kara trafo merkezine uzak olması dezavantaj bir durum oluşturmuştur. Ayrıca, küçük de olsa demirleme sahası bulunmaktadır, ancak hemen yakınında Uğurlu Limanı olması avantajlı bir durum yaratmıştır. Gökçeada'nın doğusunda ise; ana kara trafo merkezine yakınlık avantaj iken, limana çok yakın anakara - ada vapur hattına yakın olması bir dezavantajdır. Ayrıca ana karadan Gökçeada doğru uygulama alanına doğru sualtı kablo yolları mevcuttur.

Gökçeada'nın güney alanının en uygun olduğu alan sonucuna varılmıştır. Gemi rotalarından ve demirleme alanlarından uzaktır. Gökçeada'nın batısına göre ana kara trafo merkezine yakındır. Kıyıya ve yaşam alanlarına uzaklığı da ideal sınırlardadır. Adanın diğer alanlarına göre kıyıya paralel uzun bir hat olarak çıkan uygun alan, türbinlerin yerleşiminde önem arz etmektedir. Ancak belirtilmelidir ki, tüm çalışma alanları içinde rüzgâr gücü olarak en zayıf olan alan Gökçeada'dır. Türbin seçiminin de geniş kanatlı modellerin seçilmesi bu dezavantajı ortadan kaldırabilir.

Enez bölgesi verimlilik ve uygunluk olarak sıralamada ikinci olarak sonuçlanmıştır. Bunun temel nedeni rüzgâr gücüdür. Enez bölgesinde kısıtlayıcı kriterler fazladır. Enez, deniz turizmi ve balıkçılık açısından önemli bir bölgedir. Ayrıca, “kara askeri yasak bölgeleri” ile birinci ve ikinci derecede “deniz askeri yasak bölgeleri” kapsamındadır. Türkiye'nin 36. Milli Parkı olarak ilan edilen Gala Gölü Milli Parkı burada yer almaktadır. Meriç Deltası içinde bulunan Türkiye'nin önemli doğa alanları, önemli kuş alanları ve önemli bitki alanları listelerinde bulunan ve Ramsar Kriterlerine sahip bir sulak alan özelliğindedir. Yukarıdaki korumalı ve yasaklı alanlar çalışma alanından hariç tutulduktan sonra Enez limanına çok da yakın olmayan bu alan, uygun alan olarak değerlendirilmiştir. Enez rüzgâr gücü ve batimetri ölçütlerinde Gökçeada'dan daha avantajlıdır. Ancak gemi rotalarına, Enez limanına ve yaşam alanlarına yakın olması ve trafo merkezine uzak olması Enez'in dezavantajlı ölçütleridir.

Saros bölgesi, Saros Özel Koruma Alanı olması nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Kuzey Ege Denizi Bilgi Sistemi ile açık deniz rüzgâr türbinlerinin yer seçimi ve açık deniz rüzgâr türbinlerinden elde edilecek mevcut rüzgâr gücü potansiyelini ortaya koymayı hedefleyen bu çalışma denizel mekânsal planlama perspektifi ve çok disiplinli bir bakış açısı ile oluşturulmuştur. Veri üretim hızının çok hızlı olduğu içinde bulunduğumuz zamanda, veri standartı ve kalitesinin yüksek olması, verinin ulaşılabilir olması ve atıl emek oluşmaması için veri tekrarının minimum olması gerekmektedir. Bu bağlamda denizel mekânsal planlama ilkeleriyle oluşturulan CBS'nin mekân ve zaman kavramları bağlamında verilerin yönetilmesi, güncellenmesi, depolanması ve analiz edilmesi ülkemizde açık deniz rüzgâr enerjisinin etkin kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yapıda oluşturulacak bir CBS, çalışmalarda kavramsal bir modeli temsil etmesini, kurumlar

tarafından üretilecek verilerin tekrarını minimuma indirilmesini ve kurumlar arası veri paylaşımını mümkün kılmasını sağlayacaktır.

Bu bakış açısı ile değerlendirildiğinde ülkemizin deniz alanlarının kapsamlı, bütünüleyici ve geleceğe yönelik tüm paydaş ve sektörleri bir araya getiren denizel mekânsal planlamasını hazırlaması stratejik, ekonomik ve ekolojik açıdan çok önemlidir. Denizlerimizdeki kaynaklardan güvenli, sürdürülebilir, çevre dostu ve etkin yararlanmanın mümkün olduğu ve ülkemizin mevcut rüzgâr gücü potansiyelinin ortaya konulmasının yerel ve temiz enerji kaynaklarının kullanılması açısından faydalı olduğu ifade edilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, M.** (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, 4, pp.33-54,.
- [2] **U.S. Energy Information Administration.** (2013). *International Energy Outlook 2013 with Projections to 2040*, U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585
- [3] **Şengül, Ü., Sibel, T., A. Şermin., Şengül, A.** (2014). Türkiye Gökçeada'da yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli, *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 6 (11), 41-55.
- [4] **WFO.** (2020). *Global offshore wind report 2019*. Germany: World Forum Offshore Wind
- [5] **WFO.** (2021). *Global offshore wind report 2020*. Germany: World Forum Offshore Wind
- [6] **IRENA.** (2020). *Renewable energy statistics 2020*. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency
- [7] **REN21.** (2019). *Renewables 2019 global status report*. France: REN21 Secretariat
- [8] **URL-1** <<http://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>> erişim tarihi: 05.01.2021.
- [9] **British Petroleum Company.** (2020). *BP statistical review of world energy*. London: British Petroleum Co.
- [10] **Sahin, M., Bilgili, H., Akilli.** (2005). The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 93 (2) 171–183.
- [11] **İlkiliç, C. ve Aydın, H.** (2015). Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey, *Renew Sustain Energy, Rev* 44:78–86. doi:10.1016/j.rser.2014.12.010.
- [12] **Cali, U., Erdogan, N., Kucuksari, E., Argin, M.** (2018). Techno-economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey. *Energy Strategy Reviews*, Vol. 22, pp.325-336.
- [13] **Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., Cali, U.** (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection. *Energy Strategy Rev.* 23, 33–46, doi: 10.1016/j.esr.2018.12.2005
- [14] **TUREB.** (2020). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu*. Ankara : Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.

- [15] **Vagiona, D.G. & Karanikolas, N.M.** (2012). A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece, *Global NEST Journal*, 14:2, 235-243.
- [16] **Vasileiou, M., Loukogeorgaki, E., Vagiona, D.G.** (2017). GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 745-757. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.161
- [17] **Mahdy, M. & Bahaj, A.S.** (2018). Multi criteria decision analysis for offshore wind energy potential in Egypt. *Renewable Energy*, 118, 278-289. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.021
- [18] **Gavériaux, L., Laverrière, G., Wang, T., Maslov, N., Claramunt, C.** (2019). GIS based multi-criteria analysis for offshore wind turbine deployment in Hong Kong. *Annals of GIS*, 25 (3), 207-218, doi: 10.1080/19475683.2019.1618393
- [19] **Spyridonidou, S. & Dimitra G. V.** (2020). Spatial energy planning of offshore wind farms in Greece using GIS and a hybrid MCDM methodological approach. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 5:2, 24.
- [20] **Al-Shabeeb, A. R., Al-Adamat, R., Mashagbah, A.** (2016). AHP with GIS for a preliminary site selection of wind turbines in the North West of Jordan. *International Journal of Geosciences*, 07 (10), 1208–1221. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.710090>
- [21] **Villacreses G., Gaona G., Martínez-Gomez J., Juan Jijon D.** (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador, *Renewable Energy*, 109, 275-286.
- [22] **Atici, K., Şimşek, A., Ulucan, A., Tosun, M.** (2015). A GIS-based multiple criteria decision analysis approach for wind power plant site selection. *Utilities Policy*, 37, 86-96
- [23] **Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., Al-Badi, A.** (2012). Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 44, 80-87.
- [24] **Santos, L., Galdo, M., Vizoso, A.** (2020). Managing the oceans: Site selection of a floating offshore wind farm based on GIS spatial analysis, *Marine Policy*, Volume 113, 103803, ISSN 0308-597X.
- [25] **Tercan, E., Tapkın, S., Latinopoulos, D., Dereli, M., Tsiropoulos, A., Ak, A.** (2020). A GIS-based multi-criteria model for offshore wind energy power plants site selection in both sides of the Aegean Sea. *Environ Monit Assess* 192, 652. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08603-9>
- [26] **Gavériaux, L., Laverrière, G., Wang, N., Claramunt, C.** (2019). GIS-based multi-criteria analysis for offshore wind turbine deployment in Hong Kong, *Annals of GIS*, 25:3, 207-218, DOI: 10.1080/19475683.2019.1618393
- [27] **Aydiner, İ.** (2020). *CBS Tabanlı analitik hiyerarşi yöntemi ile ege denizi'nde rüzgâr ve dalga enerji sistemleri için yer seçimi.* (Yüksek Lisans tezi).

- [28] **Vagiona, D.G. & Kamilakis, M.** (2018) Sustainable site selection for offshore wind farms in the South Aegean—Greece. *Sustainability*, 10, 749.
- [29] **Shafiee M.** (2014). A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. *Expert Systems with Applications*, 42, 2143–2152.
- [30] **Sánchez-Lozano, J.M., García-Cascales, M.S., Lamata, M.T.** (2016). GIS-based onshore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods, Evaluating the case of Southeastern Spain. *Applied Energy*, 171, 86–102.
- [31] **Chaouachi, A., Covrig, C.F., Ardelean, M.** (2017). Multi-criteria selection of offshore wind farms: case study for the Baltic States. *Energy Policy*, 103, 179-192. doi: 10.1016/j.enpol.2017.01.018
- [32] **Daneshvar, B., Yildizbasi, A., Arikan, Ü.** (2018). Using intuitionistic fuzzy TOPSIS in site selection of wind power plants in Turkey. *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2018, 14 pages.
- [33] **Mayaki, A., Adedipe, O., Lawal, A.** (2018). Multi-Criteria Evaluation of the Appropriate Offshore Wind Farm Location in Nigeria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 413, 9–13 July 2018, Mechanical Engineering Department, Covenant University, Ota, Nigeria
- [34] **Yaşar, A.** (2013). *Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemi kullanılarak rüzgar enerjisi santral yer seçimi.* (Yüksek Lisans Tez). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [35] **Koroneos, C., Spachos, N., Moussiopoulos, N.** (2003). Exergy analysis of renewable energy sources. *Renewable Energy*, 28:295–310.
- [36] **Jia, Z., Wang, Y., Wu, M.** (2004). Investigation on wind energy-compressed air power system. *Journal of Zhejiang University Science* 5 (3):290–295.
- [37] **Dincer, I. & Rosen, A.** (2005). Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9:169–189.
- [38] **Dincer, I. & Rosen, A.** (2007). Exergy Analysis of Renewable Energy Systems, Exergy, In Elsevier Science (Eds), *Exergy Energy, Environment and Sustainable Development, (1st Edition), Chapter 10*, pp: 163-228. Retrieved from: <https://www.elsevier.com/books/exergy/dincer/978-0-08-044529-8>
- [39] **Le Corre, O., Dincer, I., Broc, J.** (2013). Energetic and exergetic assessment of solar and wind potentials in Europe. *Int. J. Exergy*, 13 (2), pp.175-200.
- [40] **Ehyaei, A., Ahmadi, A., Rosen, M.** (2019). Energy, exergy, economic and advanced and extended exergy analyses of a wind turbine, *Energy*

Conversion and Management, Volume 183, Pages 369-381, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.008>.

- [41] **Ozgener, O. & Ozgener, L.** (2007). Exergy and reliability analysis of wind turbine systems: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 8, Pages 1811-1826, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.004>.*
- [42] **Barthelmie, R.J. & Jensen, L.E.** (2010). Evaluation of wind farm efficiency and wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm. *Wind Energy, 13: 573-586. <https://doi.org/10.1002/we.408>*
- [43] **URL-2** <<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>> erişim tarihi: 01.10.2020.
- [44] **Elibüyük, U. ve Üçgül, İ.** (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Yekarum e-Dergi, vol.2, pp.1-14.*
- [45] **Güzel, B.** (2012), *Açık deniz rüzgâr enerjisi, fizibilite adımları ile Bozcaada ve Gökçeada örnek çalışması.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul
- [46] **Nurbay, N. ve Çınar, A.** (2005). Rüzgâr türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası (Editör), *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, pp: 19-21, Ankara.
- [47] **URL-3** <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx> erişim tarihi: 09.10.2020.
- [48] **URL-4** <<https://www.enerjiportali.com/ruzgar-enerjisi-nedir/>> erişim tarihi: 12.10.2020.
- [49] **Kurban, M., Hocaoglu, F. O., Kantar, M.** (2011). Rüzgâr enerjisi potansiyelinin tahmininde kullanılan iki farklı istatistiksel dağılımın karşılaştırmalı analizi. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences, 13 (1), 103 - 109.*
- [50] **Oksel, C.** (2015). *Deniz üstü (offshore) rüzgâr enerjisi potansiyelinin araştırılması ve Antakya Körfezi için verimliliğinin incelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay
- [51] **Bingöl F.** (2018). Rüzgâr enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması. *Politeknik Dergisi, 21(2): 273-281, DOI: 10.2339/politeknik.385523*
- [52] **Çelik, İ., Yıldız, C., Şekkeli, M.** (2019). Deniz üstü rüzgâr enerji santrallerinde rüzgâr türbini çıkış gücü hesabında temel iz etkisinin değerlendirilmesi için bir model. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi. 9 (1): 1-9*
- [53] **Akalın, S.** (2018). *Açık deniz rüzgâr enerjisi türbinlerinin kurulum yeri seçimi için bir model önerisi.* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [54] **Durak, M. ve Özer, S.** (2007). *Rüzgâr enerjisi: teori ve uygulama* (Birinci Baskı). Impress Basım, Ankara, Mart 2008.

- [55] **Şahin, M.** (2020). Açık deniz rüzgâr sistemleri üzerine bir inceleme ve Danimarka modeli. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 54-67. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/rteufemud/issue/55230/654902>
- [56] **EWEA.** (2007). *Delivering offshore wind power in Europe*. Denmark: European Wind Energy Association.
- [57] **Snyder, B. & Kaiser, M.J.** (2009). Ecological and Economic Cost-Benefit Analysis of Offshore Wind Energy. *Renewable Energy, Volume 34*, (6), pp: 1567-1578.
- [58] **URL-5** <<https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>> erişim tarihi: 14.10.2020.
- [59] **Yerci, V.** (2015). *Türkiye denizlerindeki rüzgâr enerjisi potansiyeli ve deniz üstü rüzgâr santralleri kurulabilecek bölgelerin belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Mevlana Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- [60] **Yavuz, İ. ve Özbay, H.** (2020). Rüzgâr Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2 (2), 58-68. DOI: 10.46387/bjesr.800527
- [61] **Kaldellis, J. K., & Kapsali, M.** (2013). Shifting towards offshore wind energy—Recent activity and future development. *Energy Policy*, 53, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.03>
- [62] **Zheng, C. W., Li, C. Y., Pan, J., Liu, M. Y., Xia, L. L.** (2016). An overview of global ocean wind energy resource evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1240–1251. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.063>
- [63] **Nissenbaum, M., Aramini, J., Hanning, C.** (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise and Health*, 14 (60), 237. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.102961>
- [64] **URL-6** <<https://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-are-advantages-and-disadvantages-offshore-wind-farms>>, erişim tarihi: 01.11.2020.
- [65] **Durak, M. ve Özer, S.** (2008). *Rüzgâr Enerjisi: Teori ve Uygulama*. Ankara: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği.
- [66] **Inger, R., Attrill, M.J., Bearhop, S., Broderick, A.C., Grecian, W.J., Hodgson D.J., ... Godley B.J.** (2009). Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. *J Appl Ecol*, 46:1145–1153.
- [67] **Boehlert GW & Gill AB.** (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis. *Oceanography*, 23:68–81.
- [68] **Gill, AB.** (2005). Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *J Appl Ecol*, 42:605–615.
- [69] **Wilhelmsson, D., Malm, T., Öhman, M.C.** (2006). The influence of offshore windpower on demersal fish. *ICES J Mar Sci*, 63:775–784.

- [70] **Lindeboom, HJ., Kouwenhoven, HJ., Bergman, MJN., Bouma, S., Brasseur, S., Daan, R., ... Scheidat, M.** (2011). Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation, *Environ Res Lett*, 6:035, 101.
- [71] **Maar, M., Bolding, K., Petersen, JK., Hansen, JLS., Timmermann, K.** (2009). Local effects of blue mussels around turbine foundations in an ecosystem model of Nysted off-shore wind farm, Denmark. *J Sea Res*, 62:159–174.
- [72] **Russell, DJF., Brasseur, SMJM., Thompson, D., Hastie, GD., Janik, VM., Aarts, G., ... McConnell, B.** (2014) Marine mammals trace anthropogenic structures at sea. *Curr Biol*, 24:R638–R639.
- [73] **Buck, BH., Krause, G., Rosenthal, H.** (2004). Extensive open ocean aquaculture development within wind farms in Germany: the prospect of offshore co-management and legal constraints. *Ocean Coast Manag*, 47:95–122.
- [74] **Sun, X., Huang, D., Wu, G.** (2012). The current state of offshore wind energy technology development. *Energy*, 41:298–312.
- [75] **Madsen PT, Wahlberg M, Tougaard J, Lucke K, Tyack P.** (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Mar Ecol Prog Ser*, 309:279–295
- [76] **Popper, AN. & Hastings, MC.** (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *J Fish Biol*, 75:455–489.
- [77] **Westerberg, H & Lagenfelt I.** (2008). Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel. *Fish Manag Ecol*, 15:369–375.
- [78] **Baltaoğlu S.** (2021) *Türkiye Deniz Alanlarının Ekosistem Tabanlı Deniz Alanları Planlaması Açısından Değerlendirilmesi.* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Denizel Çevre Anabilim Dalı, İstanbul.
- [79] **Karakoç, H., Erbay, B., Karakoç, N.** (2011). *Enerji Analizi, Açıköğretim Fakültesi Yayını No: 1457, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2486, Anadolu Yayınları.*
- [80] **Kurtaran, A.** (2019). *İsdemir Kuvvet Santrali Enerji ve Ekserji Analizi.* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman.
- [81] **İkbal, F.** (2010). *Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinde Optimizasyon.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [82] **URL-7** <<https://www.enerjiportali.com/termodinamik-yasalari-nelerdir/>>, erişim tarihi: 15.11.2020.
- [83] **URL-8** <https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_05/R5-02/index.html>, erişim tarihi: 08.11.2020.
- [84] **Ehler, C.** (2018). In Offshore Energy and Marine Spatial Planning (Eds: Katherine L. Yates, Corey J. A. Bradshaw), *Marine Spatial Planning:*

an idea whose time has come. (First edition) Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315666877>

- [85] **Ehler, C. N., & Douvere, F.** (2007). *Visions for a sea change: Report of the first international workshop on marine spatial planning.* France: UNESCO.
- [86] **Ehler, C. N., & Douvere, F.** (2009). *Marine spatial planning: A step-by-step approach toward ecosystem-based management.* France: UNESCO.
- [87] **Crowder, L. & Norse, E.** (2008). Essential ecological insights for ecosystem-based management and marine spatial planning. *Marine Policy*, 32 (5), pp. 772–778.
- [88] **Molinos, J.G., Halpern, B.S., Schoeman, D.S., Brown, C.J., Kiessling, W., Moore, P.J., ... Burrows, M.T.** (2016). Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. *Nature Climate Change*, 6 (1), pp. 83-88.
- [89] **Lawrence, D., Kenchington, R., Woodley, S.** (2002). *The Great Barrier Reef: Finding the Right Balance.* Victoria, Australia: Melbourne University Press, p. 263.
- [90] **EU Commision Maritime Affairs and Fisheries.** (2018). *Annual economic report on EU blue economy.* Belgium: Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries European Commission.
- [91] **EU Commision Maritime Affairs.** (2012). *Progress of the EU's Integrated Maritime Policy.* Luxembourg: Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries.
- [92] **EU Commission.** (2012). *Communication from The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions Blue Growth, Opportunities for Marine and Maritime Sustainable Growth.* Brussels: European Commission.
- [93] **URL-9** <<https://www.marinedealnews.com/deniz-alanlarinin-kullaniminin-planlanmasi/>> erişim tarihi: 27.01.2021
- [94] **Ehler, C. & Douvere, F.** (2010). An International Perspective on Marine Spatial Planning Initiatives, Environments. *Journal Volume Environments* 37 (3): 9-20.
- [95] **Jones, C., Ciais, P., Davis, J., Friedlingstein, P., Gasser, T., Peters, P., ... Wiltshire, A.,** (2016). Simulating the Earth system response to negative emissions. *Environ. Res. Lett.* 11 (9). doi: 10.1088/1748-9326/11/9/095012
- [96] **Dupont, C., Gourmelon, F., Meur-Ferec, C., Herpers, F., & Le Visage, C.** (2020). Exploring uses of maritime surveillance data for marine spatial planning: A review of scientific literature. *Marine Policy*, 117. doi:10.1016/j.marpol.2020.103930
- [97] **Depellegrin, D., Menegon, S., Farella, G., Ghezzi, M., Gissi, E., Sarretta, C., ... Barbanti, A.** (2017). Multi-objective spatial tools to inform maritime spatial planning in the Adriatic Sea. *Sci Total Environ*, 609, 1627-1639. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.264

- [98] Ehler, C., & Douvere, F. (2009). An International Perspective on Marine Spatial Planning Initiatives. *Enviroments Journal Volume*, Vol. 37 (3): 9-20.
- [99] Gee, K., Blazauskas, N., Dahl, K., Göke, C., Hassler, B., Kannen, A., Leposa, ... Zaucha, J. (2019). Can tools contribute to integration in MSP? A comparative review of selected tools and approaches. *Ocean & Coastal Management*, 179. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.104834
- [100] Snickars, M., & Pitkänen, T. (2007). *GIS tools for marine planning and management: BALANCE Interim (Report No. 28)*. Retrieved from: <https://balance-eu.org/xpdf/balance-interim-report-no-28.pdf>. Finland: Interreg Baltic Sea Region.
- [101] Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2006). *An Introduction to Geographical Information Systems* (Third ed.). England: Pearson Education Limited.
- [102] Stelzenmüller, V., Lee, J., South, A., Foden, J., & Rogers, S. I. (2013). Practical tools to support marine spatial planning: A review and some prototype tools. *Marine Policy*, 38, 214-227.
- [103] Noble, M. M., Harasti, D., Pittock, J., & Doran, B. (2019). Linking the social to the ecological using GIS methods in marine spatial planning and management to support resilience: A review. *Marine Policy*, 108. doi:10.1016/j.marpol.2019.103657
- [104] Spyridonidou, S., & Vagiona, D. G. (2020). Systematic Review of Site-Selection Processes in Onshore and Offshore Wind Energy Research. *Energies*, 13 (22). doi:10.3390/en13225906
- [105] Christidis, T., & Law, J. (2012). Review: The use of geographic information systems in wind turbine and wind energy research. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4 (1). doi:10.1063/1.3673565
- [106] Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (7), 703-726. doi:10.1080/13658810600661508
- [107] Mahdy, M., & Bahaj, A. S. (2018). Multi criteria decision analysis for offshore wind energy potential in Egypt. *Renewable Energy*, 118, 278-289. doi:10.1016/j.renene.2017.11.021
- [108] Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- [109] Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377-403. doi:10.1016/j.renene.2020.04.137
- [110] Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science (1st ed.)*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [111] Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- [112] Zadeh L.A. (1965). Fuzzy sets. *Inform. and Control*, vol: 8 (3), 338-353.

- [113] **Malczewski, J.** (2002). Fuzzy screening for land suitability analysis. *Geographical and Environmental Modelling*, 6 (1), 27–39.
- [114] **Nădăban, S., Dzitac, S., Dzitac, I.** (2016). Fuzzy TOPSIS: a general view. *Procedia Computer Science*, 91, 823-831.
- [115] **Hwang, C.L. & Yoon K.P.** (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications, a state of-the-art survey*. Berlin: SpringerVerlang.
- [116] **Chen, CT.** (2000). Extension of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems* 114: 1–9.
- [117] **YEGM.** (2018). *Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası*. http://www.yegm.gov.tr/YEKrepa/REPA-duyuru_01.html (Erişim tarihi:11.09.2018).
- [118] **Sahin, M., Bilgili, M., Akilli, H.** (2005). The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 93 (2), 171–183.
- [119] **Malkoc, Y.** (2007). The role of wind energy in Turkish electric energy supply. *Chamb Electr Eng Turkey Energy J*;3:45–50.
- [120] **Doğan, M.** (2011). *Beşeri Coğrafya Açısından Bozcaada*. İstanbul: İmleç, pp.187.
- [121] **TÜDAV (2001).** *Ulusal Ege Adaları 2001 Toplantısı Bildiriler Kitabı*, Öztürk, B., Aysel, V. (Editör), TÜDAV Yayın no:7, Çanakkale.
- [122] **URL-10** <<https://tudav.org/calismalar/koruma-alanlari/gokceada-deniz-parki/tudav-onerisi-ile-gokceada-deniz-parkinin-sinirlari-genisletildi/>>, erişim tarihi 10.11.2020.
- [123] **URL-11** <<https://tr.wikipedia.org/wiki/Enez>>, erişim tarihi 10.11.2020.
- [124] **Yaşar, O.** (2010). Saros körfezi kuzey kıyılarında yer alan lagün göllerini [Enez-Erikli (Keşan) arası] etkileyen çevresel tehditler. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*. Cilt:9 (33),166-187.
- [125] **Ceylan S.** (2009). *Ankara Üniversitesi, Türkiye Coğrafyası Araş ve Uyg. Mer. (TÜCAUM), V. Ulusal Coğrafya Semp.*(16–17 Ekim 2008), Bildiriler Kitabı, Ankara, 403-419.
- [126] **URL-12** <<http://www.enez.gov.tr/enez-gala-golu>> erişim tarihi: 10.11.2020.
- [127] **URL-13** <<https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-yenilenebilir-enerji>> erişim tarihi: 30.10.2019.
- [128] **URL-14** <<https://tvk.csb.gov.tr/saros-ozel-cevre-koruma-bolgesi-yonetim-plani-onaylandi-haber-221434>>, erişim tarihi: 10.11.2020.
- [129] **URL-15** <<https://emodnet.eu/en/portals>>, erişim tarihi: 10.11.2020.
- [130] **URL-16** <<https://globalwindatlas.info>>, erişim tarihi: 10.11.2020.
- [131] **Tortumluoğlu, M. ve Doğan, M.** (2021). Açık deniz rüzgâr türbinleri için uygun yer seçim kriterlerinin irdelenmesi ve Kuzey Ege kıyılarına uygulanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23 (67), 25-41.

- [132] **Colak, T. A. I., Senel, G., & Goksel, C.** (2021). GIS-based maritime spatial planning for site selection of offshore wind farms with exergy efficiency analysis: a case study. *International Journal of Exergy*, 34 (2), 255-268.
- [133] **Saleous, N. & Mazrouei S.** (2016). GIS-based wind farm site selection model offshore Abu Dhabi Emirate, UAE. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 41, 437–441.
- [134] **Díaz, H. & Guedes S.** (2021). Multi-Criteria Approach to Evaluate Floating Offshore Wind Farms Siting in Canary Islands. *Energies*, 14 (4), 865.
- [135] **Malhotra, S.** (2011). Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations. D.I. Al-Bahadly (Ed.), *Wind Turbines*, pp. 248-262.
- [136] **Yılmaz, U.** (2008). *Gökçeada'da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi.* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [137] **Hökelek, M.** (2001). *Türkiye elektrik (enterkonnekte) iletim sistemi.* Kayseri,: TEİAŞ İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü.
- [138] **Aydin, N.Y., Kentel, E., Duzgun, S.** (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 364–373.
- [139] **Bili, A. & Vagiona, D.G.** (2018). Use of multicriteria analysis and GIS for selecting sites for onshore wind farms: The case of Andros Island (Greece). *Eur. J. Environ. Sci.* 2018 (8), 5–13.
- [140] **Latinopoulos, D. & Kechagia, K.** (2015). GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renew. Energy*, 78, 550–560.
- [141] **Spyridonidou, S., Vagiona, D.G., Loukogeorgaki, E.** (2020). Strategic Planning of Offshore Wind Farms in Greece. *Sustainability* 12, 905.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

: Arife Tuğsan İŞİAÇIK ÇOLAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, Yakın Doğu Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü (Burslu, 3.85/4.00)
- **Yüksek lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı, Deniz Ulaştırma Mühendisliği Program (3.72/4.00)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- İTÜ Denizcilik Fakültesi Eğitim Gemisi MTA Sismik-1'in Gemi Kaptanı.
- İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesinde; İTÜ KKTC Denizcilik Fakültesinde ve International Maritime College of Oman'da meslek dersleri vermiştir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Uluslararası Makaleler:

- **Colak İsiacik T.**, Senel, G., Goksel, C. (2021), GIS-based maritime spatial planning for site selection of offshore wind farms with exergy efficiency analysis: a case study, *International Journal of Exergy (IJEX)*, Vol. 34, No. 2,

Uluslararası Bildiri:

- **Colak İsiacik T.**, Goksel, C., (2019) Maritime Spatial Planning of Northern Aegean Sea with Regard to Offshore Wind Energy, Conference: 8th Global Conference on Global Warming, Qatar, April 2019, ISBN: 978-605-66381-7-6