YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN RÜZGAR VE DALGA İKLİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: KARADENİZ ÖRNEĞİ

Fulya İŞLEK

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

Haziran, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN RÜZGAR VE DALGA İKLİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: KARADENİZ ÖRNEĞİ

Fulya İŞLEK tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Danışman Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üy. Cihan ŞAHİN, Üye Yıldız Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Serdar BEJİ, Üye İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Esin ÇEVİK, Üye Yıldız Teknik üniversitesi

Prof. Dr. Oral YAĞCI, Üye İstanbul Teknik Üniversitesi Danışmanım Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması; Karadeniz Örneği başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Fulya İŞLEK

İmza



Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – TUBİTAK tarafından 117Y333 numaralı ve "Akarsu Delta Sistemlerinin İklim Değişikliği Etkilerine Karşı Kırılganlığı: Sakarya Nehri Deltası Örneği" isimli proje kapsamında desteklenmiştir.

Aileme

ve

Biricik eşime

Tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesi ve gerçekleştirilmesinde, bilgisini, tecrübesini ve desteğini esirgemeyen, değerli görüş ve önerileri ile daima bana yol gösteren, tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerini paylaşan, değerli görüş ve önerileri ile çalışmamı geliştiren, fikirleri ile katkı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cihan ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim boyunca ve tez çalışmam süresince bilgilerinden her zaman yararlandığım Yıldız Teknik Üniversitesi Kıyı Liman Mühendisliği programındaki tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu sürecin her aşamasında beni sonsuz sabır ve tevazu ile destekleyen, sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli babam Selahattin İŞLEK'e, annem Mükerrem İŞLEK'e ve ağabeyim Sercan İŞLEK'e en derin teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde koşulsuz sevgi ve sonsuz sabırları ile maddi manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Ağacan İŞLEK'e sonsuz saygılarımı sunar, teşekkürlerimi borç bilirim.

Fulya İŞLEK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	x				
XISALTMA LİSTESİ xii					
ŞEKİL LİSTESİ xiv					
ΓΑΒLΟ LİSTESİ xi					
ABSTRACT	xxi				
1 GİRİŞ	1				
1.1 Literatür Özeti	1				
1.2 Tezin Amacı	19				
1.3 Hipotez	20				
2 YENİDEN ANALİZ RÜZGAR VERİ KAYNAKLARI	22				
2.1 Giriş	22				
2.2 ECMWF	24				
2.2.1 İklim yeniden analiz nedir?	24				
2.2.2 İkilim gözlemi için yeniden analiz	25				
2.2.3 ERA5	25				
2.2.4 ERA-Interim	26				
2.2.5 ERA-Interim/Land	26				
2.2.6 ERA-20C	26				
2.2.7 ERA-20CM	26				
2.2.8 CERA-20C	27				
2.2.9 CERA-SAT	27				
2.3 NOAA	27				
2.3.1 Yeniden analiz veri setleri	27				
2.3.2 NCEP/NCAR R1	28				
2.3.3 NCEP/DOE R2	28				
2.3.4 NCEP NARR	28				
2.3.5 20. Yüzyıl Yeniden Analiz (V2 ve V2c)	29				
2.3.6 NCEP/CFSR+CFSv2	29				

2.	4 ECMWF ve NOAA Veri Tabını için Veri Setlerinin Seçimi	. 29
	2.4.1 ECMWF veri tabanı	. 29
	2.4.2 NOAA veri tabanı	. 32
3 U	ZUN DÖNEM RÜZGAR İKLİMİ	36
3.	1 Rüzgar İklim Verileri	. 36
	3.1.1 ECMWF ERA-Interim verileri ile rüzgar karakteristikleri	. 37
	3.1.2 NCEP/CFSR verileri ile rüzgar karakteristikleri	. 45
	3.1.3 Yerel rüzgar iklimi	. 53
3.	2 Ortalama Deniz Seviyesi Basıncı	. 69
	3.2.1 ERA-Interim verileri ile ortalama deniz seviyesi basınç değişimi	. 69
	3.2.2 CFRS verileri ile ortalama deniz seviyesi basınç değişimi	. 72
	3.2.3 Yerel ortalama deniz seviyesi basıncı	. 76
3.	3 Deniz Seviyesi Değişimi	. 78
3.	4 Deniz Yüzeyi Sıcaklığı Değişimi	. 82
3.	5 Rüzgar Gücü Değerlendirmesi	. 85
	3.5.1 Uzun dönemli rüzgar gücü değerlendirmesi	. 85
	3.5.2 Mevsimsel rüzgar gücü değerlendirmesi	. 87
4 II	I. NESİL DALGA MODELLEMESİ	90
4.	1 MIKE 21 SW	. 90
	4.1.1 Giriş	. 90
	4.1.2 Uygulama alanları	. 91
	4.1.3 Temel denklemler	. 92
	4 1 4 Savisal uvgulama	113
4.	1.1. + Suyisar uygulania	
	2 SWAN	118
	2 SWAN	118 118
	 2 SWAN	118 118 120
	 2 SWAN	118 118 120 120
	 2 SWAN	118 118 120 120 121
	 2 SWAN	118 118 120 120 121 124
5 U	 2 SWAN	 118 120 120 121 124 126
5 U 5.	 2 SWAN	 118 120 120 121 124 126
5 U 5.	 2 SWAN 4.2.1 SWAN modeli genel formülasyon 4.2.2 SWAN kapsadığı süreçler 4.2.3 Rüzgar Nedeniyle dalga üremesi 4.2.4 Enerji kaybı 4.2.5 SWAN ile gerçekleştirilecek çalışmalar için öneriler ZUN DÖNEM DALGA İKLİMİ 1 MIKE 21 SW Sayısal Modelinin Kalibrasyonu 5.1.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli araştırması 	 118 120 120 121 124 126 139

	5.2	SWAN Sayısal Modelinin Kalibrasyonu	161
		5.2.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli araştırması	178
		5.2.2 Yerel dalga iklimi	189
	5.3	Dalga Gücü Değerlendirmesi	200
		5.3.1 Dalga gücünün uzun dönemli ortalamaları	201
		5.3.2 Dalga gücünün uzun dönemli değişim eğilimi	203
		5.3.3 Dalga gücünün değişkenliği	205
		5.3.4 Dalga gücünün mevsimsel ortalaması	206
		5.3.5 Mevsimsel dalga gücünün değişim eğilimi	209
		5.3.6 Yerel dalga gücü analizleri	210
6	RÜ	ZGAR İKLİM PROJEKSİYON MODELLERİ	219
	6.1	Giriş	219
	6.2	Genel Sirkülasyon Modeli (GCM)	220
	6.3	Bölgesel Sirkülasyon Modeli (RCM)	223
	6.4	Rüzgar İklim Analizleri	225
		6.4.1 Tarihsel rüzgar verileri	226
		6.4.2 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için rüzgar hız projeksiyonları	234
		6.4.3 Yerel rüzgar iklim projeksiyonları	247
	6.5	Rüzgar Gücü Projeksiyonlarının Değerlendirmesi	267
		6.5.1 Rüzgar gücü projeksiyonlarının uzun dönemli ortalamaları	268
		6.5.2 Rüzgar gücü projeksiyonlarının değişimi	271
		6.5.3 Rüzgar gücü projeksiyonlarının mevsimsel ortalamaları	273
		6.5.4 Rüzgar gücü projeksiyonlarının mevsimsel değişimi	276
		6.5.5 Rüzgar gücü projeksiyonlarının değişkenliği	280
		6.5.6 Yerel rüzgar gücü projeksiyonları	281
7	DA	LGA İKLİM PROJEKSİYONU	289
	7.1	Giriş	289
	7.2	Model Kurulumu	289
		7.2.1 Ölçülen dalga verileri ile karşılaştırma	290
		7.2.2 Yeniden analiz verileri ile karşılaştırma	294
	7.3	RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için dalga parametre projeksiyonları	299
		7.3.1 Dalga parametre projeksiyonlarının uzun dönemli ortalamaları	299
		7.3.2 Dalga parametre projeksiyonlarının değişimi	305

7.3.3 Dalga parametre projeksiyonlarının değişim eğilimi	311			
7.3.4 Yerel dalga iklimi projeksiyonların	317			
7.4 Fırtına Analizi ve Ekstrem Dalga İklimi	329			
7.4.1 Fırtına analizi	329			
7.4.2 Ekstrem dalga iklimi	334			
8 SONUÇ VE ÖNERİLER	339			
KAYNAKÇA	347			
A TEMEL KAVRAMLAR	360			
B RÜZGAR İKLİMİNİN UZAMSAL DAĞILIMLARI				
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR				

AD	Aylık Değişkenlik
δ	Basıklık katsayısı
H _s	Belirgin dalga yüksekliği
γ	Çarpıklık katsayısı
DK	Değişim Katsayısı
Δ	Değişim eğilimi
0	Derece
S _{ds,br}	Derinliğe bağlı kırılmalar sonucu enerji kaybı
S _{nl}	Doğrusal olmayan enerji transferi
T _e	Enerji periyodu
T _{m-1,0}	Enerji periyodu
Ν	Firtina sayisi
t	Fırtına süresi
GD	Gelecekteki Değişim
Hz	Hertz
S	Kaynak fonksiyonu
μ	Konum parametresi
Sdsw	Köpüklenme nedeniyle meydana gelen enerji kaybı
u3,w	
C _{ds}	Köpüklenme parametresi
C _{ds} H _{maks}	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği
C _{ds} H _{maks} V _{maks}	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV MD	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV MD M	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV MD \overline{M} T _m	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri Ortalama dalga periyodu
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV MD \overline{M} T _m X _m	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri Ortalama dalga periyodu Ortalama değer
C _{ds} H _{maks} V _{maks} MAV MD \overline{M} T _m X _m V _m	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri Ortalama dalga periyodu Ortalama değer
C_{ds} H_{maks} V_{maks} MAV MD \overline{M} T_{m} x_{m} V_{m} β	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri Ortalama dalga periyodu Ortalama değer Ortalama rüzgar hızı Ölçek parametresi
C_{ds} H_{maks} V_{maks} MAV MD \overline{M} T_{m} x_{m} V_{m} $\overline{0}$	Köpüklenme parametresi Maksimum dalga yüksekliği Maksimum rüzgar hızı Mean Annual Variability Mevsimlik Değişkenlik Modellenen verinin ortalama değeri Ortalama dalga periyodu Ortalama değer Ortalama rüzgar hızı Ölçek parametresi

T _p	Pik dalga periyodu
RB	Rölatif Bias
RD	Rölatif Değişim
S _{in}	Rüzgar alanından gelen enerji girdisi
V	Rüzgar hızı
С	Santigrat
H _{m0}	Spektrumdan elde edilen belirgin dalga yüksekliği
σ	Standart sapma
U ₁₀	Su seviyesinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızı
U ₁₀₀	Su seviyesinden 100 m yukarıdaki rüzgar hızı
α	Şekil parametresi
S _{ds,b}	Taban sürtünmesinden kaynaklanan enerji kaybı
σ^2	Varyans
g	Yerçekimi ivmesi
z ₀	Yüzey pürüzlülüğü
V ₉₀	90 persantil rüzgar hızı
V ₉₅	95 persantil rüzgar hızı
V ₉₉	99 persantil rüzgar hızı

KISALTMA LİSTESİ

ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique développement Inter-National
AOŞ	ARALIK-OCAK-ŞUBAT
AR	Assessment Report
ASR	Arctic System Reanalysis
CanESM	Canadian Earth System Model
CDF	Cumulative Distribution Function
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CNRM	Centre National de Recherches Meteorologiques
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling
COSMO	Consortium for the small-scale modeling-
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DHI	Danish Hydraulic Institute
DIA	Discrete Interaction Approximation
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DOE	Department of Energy
D-Var	Dimensional-Variational
EC-EARTH	European community Earth-System Model
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EEA	European Environment Agency
EEK	Eylül-Ekim-Kasım
ESD	Empirical-Statistical Downscaling
ESGF	Earth System Grid Federation
ESRL	Earth System Research Laboratory
FNL	Final
GCM	Global Climate Model
GCM	Global Climate Model

GEV	Generalized Extreme Value
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFS	Global Forecast System
HadGEM	Hadley Centre Global Environment Model
HTA	Haziran-Temmuz-Ağustos
INM	Institute for Numerical Mathematics
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
JMA	Japan Meteorological Agency
JRA	Japanese Reanalysis
LAMs	Limited Area Models
LR	Low-Resolution
LTA	Lumped Triad Approximation
MARS	Meteorological Archival and Retrieval System
MERRA	Modern-ERA Retrospective Analysis
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MNM	Mart-Nisan-Mayıs
MOHC	Met Office Hadley Centre
MPI-ESM	Max Planck Institute Earth System Model
MR	Medium-Resolution
MSL	Mean Sea Level
NARR	North American Regional Reanalysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCDC	National Climatic Data Center
NCEI	National Centers for Environmental Information
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NetCDF	NETwork Common Data Form
NorESM	Norwegian Earth System Model
OI	Optimum Interpolation
PDF	Probability Density Function

R1, 2	Reanalysis 1, 2
RAOBs	Radiosonde Observations
RCA	Rossby Centre Regional Climate Model
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
REMO	REgional MOdel
RU-07	Russian domain for 7 km
SCAT	Scatterometer
SHOD	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi
SLA	Sea level Anomaly
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SRES	Special Report on Emissions
SSTA	Sea Surface Temperature Anomaly
SW	Spectral Wave
SWAN	Simulated WAves Nearshore
WAM	Wave MOdel
WAMDI	Wave Model Development and Implementation
WCRP	World Climate Research Program
WGCM	Working Group on Coupled Modelling
WPD	Wind Power Density
WRF	Weather Research and Forecasting

Şekil 1.1 IPCC (2014)'te verilen (a) 1986–2005 dönemindeki ortalamaya göre yıllık ve küresel ortalama kara ve okyanus yüzey sıcaklığı değişimi. (b) 1986–2005 dönemdeki ortalamaya göre yıllık ve küresel ortalama deniz seviyesi değişimi. (c) Küresel ortalama sera gazı konsantrasyonları. Karbondioksit (CO2, yeşil), Metan (CH4, turuncu) ve Azot oksit (N2O, kırmızı). (d) Küresel antropojenik CO2 emisyonları. 13

Şekil 1.2 Farklı RCP senaryolarına göre radyasyon zorlama seviyelerinin zamanla değişimi (Meinhausen vd., 2011)......16

- Şekil 2.1 Yeniden analiz yapılandırması (Poli, 2013)......24
- **Şekil 2.3** NCEP/NCAR R1 verileri ile 1 Ocak 1982 18:00 için hesaplanan bileşke rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı..33
- **Şekil 2.4** NCEP CFSR verileri ile 1 Ocak 1982 18:00 için hesaplanan bileşke rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı..34
- Şekil 3.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları; (a1–a4) V_m, (b1–b4) t, (c1–c4) DK.1, 2, 3 ve 4 numaralandırması on yılları göstermektedir.......41
- Şekil 3.2 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları. (a) V_m, (b) t, (c) DK.......43
- **Şekil 3.3** ERA-Interim rüzgar verileri için Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar ikliminin değişimi, (a) V_m , (b) t, (c) DK44
- Şekil 3.5 CFSR rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları, (a) V_m, (b) t, (c) DK......51

Şekil 3.6 CFSR rüzgar verileri için Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar ikliminin değişimi, (a) V_m , (b) t, (c) DK
Şekil 3.7 Detaylı yerel analizler için kritik durumları temsil eden konumlar53
Şekil 3.8 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile Karadeniz çalışma alanı üzerinde detaylı araştırılması planlanan üç referans noktasının konumları
Şekil 3.9 Aynı meridyen üzerindeki rüzgar karakteristiklerinin 1979–2018 yılları arasındaki uzamsal değişimi; (a, d) V _m , (b, e) t, (c, f) DK. (a–c) ERA- Interim, (d–f) CFSR
Şekil 3.10 Seçilen üç nokta için rüzgar gülü; (a) ERA-Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir57
Şekil 3.11 Seçilen üç nokta için rüzgar hızının eklenik aşılma olasılığı. (a) ERA- Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir. 58
Şekil 3.12 Seçilen üç nokta için rüzgar hızının uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri, (a, c) ERA-Interim, (b, d) CFSR. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç nokta için maksimum rüzgar hız değerlerini göstermektedir
Şekil 3.13 Seçilen üç noktada rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. (a) ERA-Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir
 Şekil 3.14 Rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimleri. (a) V_m, (b) DK, (c) V_{maks}, (d) N, (e) t. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.
 Şekil 3.15 Ekstrem rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimleri, (a) V₉₉, (b) V₉₅, (c) V₉₀. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir
Şekil 3.16 Rüzgar kaynaklarının değişkenliği, (a) çarpıklık, (b) basıklık katsayıları. Panellerdeki düz mavi çizgi çarpıklık ve basıklık katsayılarının normal dağılımı için değerlerini göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir
Şekil 3.17 Seçilen üç noktada; (a) N1, (b) N2, (c) N3, yıllık oluşma olasılıklarına göre rüzgar hızının ekstrem değer dağılımı
Şekil 3.18ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları71
Şekil 3.19 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

- **Şekil 3.33** 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama mevsimsel WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal

- Şekil4.1Doğrudan etkileşim yaklaşımında kullanılan çift yönlü etkileşim
yapılandırmaları (Komen vd., 1994)103
- Şekil 5.2 Karadeniz çalışma alanı için model hesap ağı.....128

- Şekil 5.7 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimumlarının Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımları......142
- Şekil 5.8 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları......144

- **Şekil 5.14** Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen sonucları göstermektedir. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç maksimum belirgin dalga yüksekliği değerini nokta için göstermektedir.....156

- Şekil 5.17 Karadeniz çalışma alanı için batimetri ağı 163

- Şekil 5.24 Belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik,
 (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Filyos, (e) Samsun, (f) İstanbul Boğazı 175
- Şekil 5.26 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0} 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimumlarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları......180
- Şekil 5.28 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0} maksimum değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı..... 186
- Şekil 5.29 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0} ortalama değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı..... 189

- Şekil 5.33 Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen sonucları göstermektedir. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç maksimum belirgin dalga yüksekliği nokta değerini için göstermektedir......195

- **Şekil 5.45** Seçilen 12 referans noktasında ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için elde edilen dalga gücünün 40 yıllık (1979–2018) dağılım grafiği.

- Şekil 6.13 Yıllık maksimum rüzgar hızının uzun dönemli eğilimleri; (a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's ttestine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller, sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sonuçları göstermektedir......246

- **Şekil 6.18** Seçilen üç noktada rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. RCP4.5 senaryosuna göre (a) orta gelecek, (b) yakın

- Şekil 6.28 Mevsimsel ortalama WPD'de yakın gelecek için öngörülen değişimler ve bunların farklı güven seviyeleri için Student t-testine göre istatistiksel anlamlılığı. Satırlar mevsimleri, sütunlar yakın gelecek iki RCP senaryosuna göre elde edilen sonuçları temsil etmektedir.......279

- Şekil 6.30 Rüzgar gücü zamansal değişkenlik indekslerinin uzamsal dağılımları. Sol ve sağ paneller sırasıyla gelecek dönem (2021–2100) için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları ile elde edilen sonuçları göstermektedir.281

- **Şekil 6.32** Seçilen 15 noktada 2021–2100 yılları arasındaki 80 yıllık dönem için ortalama WPD'nin aylık değişkenliği; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5........284
- **Şekil 6.33** Seçilen 15 noktada 2021–2100 yılları arasındaki 80 yıllık dönem için aylık ortalama WPD'nin yönlü değişkenliği; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5287

- Şekil 7.17 Yıllık ortalama T_m parametresinin uzun dönemli değişim eğilimleri;
 (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's ttestine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e, f)

- Şekil 7.19 Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasında tarihsel ve RCP4.5 senaryosuna göre gelecek dönemler için ortalama dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi; (a) H_{mo, ort}, (b) H_{maks, ort}, (c) T_{m, ort}, (d) T_{p, ort} Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir..320
- Şekil 7.20 Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasında tarihsel ve RCP8.5 senaryosuna göre gelecek dönemler için ortalama dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi; (a) H_{mo, ort}, (b) H_{maks, ort}, (c) T_{m, ort}, (d) T_{p, ort} Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir..322

Şekil	7.2	7 Seç	ilen	beş	noktada	yıllık	oluşma	olasılık	larına	göre	belirgin	dalga
		yükse	kliği	inin	ekstrem	değer	dağılımı;	(a, b)	tarihse	l, (a)	yakın ge	elecek,
		(b) oi	rta g	elece	ek				•••••		• • • • • • • • • • • • • •	337



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1Dünyanın farklı bölgelerinde yeniden analiz verileri ile yapılan çalışmalar
Tablo 1.2 Karadeniz dalga iklimi için SWAN spektral dalga modeli ile yapılanönceki çalışmalar9
Tablo 1.3 Karadeniz dalga gücü için SWAN spektral dalga modeli ile yapılanönceki çalışmalar
Tablo 1.4 Karadeniz dalga iklimi için MIKE 21SW ile yapılan önceki çalışmalar
Tablo 1.5 RCP iklim senaryolarının karakteristikleri (MGM, 2021)15
Tablo 1.6IPCC Beşinci Değerlendirme raporuna göre küresel ısınma (°C) ve küresel su seviyesi (m) artış projeksiyonları (IPCC, 2014)
Tablo 2.1 Atmosferik veri kaynakları23
Tablo 2.2 Yeniden analiz için dikkate alınan veri kaynakları ve karakteristik özellikleri
Tablo 3.1 ERA-Interim verileri ile on yıllık ve 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgarkarakteristiklerinin istatistiksel parametreleri
Tablo 3.2 CFSR rüzgar verileri ile on yıllık ve 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgarkarakteristiklerinin istatistiksel parametreleri
Tablo 3.3 Seçilen üç nokta için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verilerine görerüzgar hızının istatistiksel parametreleri60
Tablo3.4ERA-InterimveCFSRverileriiçinhesaplananrüzgarkarakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri66
Tablo 3.5 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerinekarşılık gelen ekstrem rüzgar hız ve RD değerleri
Tablo 3.6 Beş yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerleri
Tablo 3.7 On yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerleri 78
Tablo 3.8Seçilen üç nokta için ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, beş yıllık ve on yıllık ölçekte değişim eğilim değerleri
Tablo 4.1SWAN'da sayısal ayrıklaştırma için önerilen seçenekler (SWAN Team, 2017a)
Tablo 4.2Modelin uygulanması için SWAN önerilen fiziksel süreçler (SWAN Team, 2017a)

Tablo 5.1 Ölçüm istasyonları, koordinat, derinlik, ölçüm tarihi ve ölçülen dalga parametreleri127 Tablo 5.2 Karadeniz çalışma alanına ait model hesap ağının özellikleri....... 128

 Tablo 5.3 Kalibre edilmiş model parametreleri
 130

 Tablo 5.4 MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan ve Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonlarında ölçülen **Tablo 5.5** Seçilen üç nokta için H_{m0} parametresinin istatistiksel parametreleri 156 Tablo 5.6 ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri 158 Tablo 5.7 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerine karşılık gelen ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri160 Tablo 5.9 SWAN yazılımıyla hesaplanan ve Gelendzhik ile Karaburun istasyonlarında ölçülen dalga parametrelerinin (H_s, T_m) farklı C_{ds} parametreleri için istatistiksel değerlendirmesi171 Tablo 5.10 SWAN yazılımıyla hesaplanan ve Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, istasyonlarında İstanbul Samsun. Boğazı ölçülen dalga parametrelerinin istatistiksel değerlendirmesi......177 **Tablo 5.11** Seçilen üç nokta için H_{m0} parametresinin istatistiksel parametreleri Tablo 5.12 ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri 197 Tablo 5.13 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerine karşılık gelen ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri 199 Tablo 5.14 Seçilen 12 referans noktasında yıllık dalga gücünün temel özellikleri Tablo 5.15 Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktası için hesaplanan dalga Tablo 5.16 Karadeniz üzerinde seçilen 12 noktada mevsimsel ortalama dalga Tablo 6.2 EURO-CORDEX kapsamında RCA4 tarafından dinamik olarak ölçeklendirilmiş CMIP5 GCM'lerin listesi (Strandberg vd., 2014). En sağdaki sütun bu çalışmada dikkate alınan verileri göstermektedir. 224 Tablo 6.3 Karadeniz çalışma alanında ortala rüzgar hızının 1979–2005 yılları

Tablo 6.4 1970–2005 yılları için mutlak RB değerleri
Tablo 6.5Ortala rüzgar hızının iki iklimi senaryona göre yakın gelecek ve orta gelecek için istatistiksel parametreleri
Tablo 6.6 Seçilen üç noktada rüzgar ve fırtına karakteristiklerinin tarihsel, yakın gelecek ve orta gelecek dönemleri için uzun dönemli değişim eğilimleri ve bunların %90 güven sınırı254
Tablo 6.7 Tarihsel ve gelecek dönemler için seçilen üç noktada MAV endeksi261
Tablo 6.8Tarihsel ve gelecek dönemler için üç referans noktasında 16 yönlü ve1yönden bağımsız olarak rüzgar hızının ortalama, medyan ve moddeğerleri264
Tablo 6.9 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemleri içinekstrem rüzgar hızları ve RD değerleri
Tablo 6.10 Mevsimsel ortalama WPD'nin tarihsel ve gelecek dönemler için istatistiksel parametreleri
Tablo 6.11 Detaylı analizler için seçilen 15 referans noktasının özellikleri 282
Tablo 7.1Model doğrulamasında kullanılan ölçüm dalga istasyonlarının özellikleri
Tablo 7.2Modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin istatistiksel parametreleri295
Tablo 7.3 Ortalama dalga parametrelerinin istatistik değerleri
Tablo 7.4 Detaylı analiz için seçilen beş noktanın özellikleri
Tablo 7.5Ortalama dalga parametrelerinin tarihsel ve gelecek dönemlerdekiuzun dönemli değişim eğilimleri323
Tablo 7.6Tarihsel ve gelecek dönemler için seçilen beş noktada Hm0parametresinin istatistiksel parametreleri
Tablo 7.7t _m (H _{m0} ≥4 m) parametresinin tarihsel ve gelecek dönemlerdeki değişim eğilimleri
Tablo 7.8 Seçilen beş noktada farklı yineleme dönemlerine karşılık gelen ekstrembelirgin dalga yüksekliği ve RD değerleri.338

Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması: Karadeniz Örneği

Fulya İŞLEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

1979–2018 (40 yıl) yıllarındaki Karadeniz rüzgar iklimi yeniden analiz verileri ile, dalga iklimi üçüncü nesil spektral dalga modeli kullanılarak araştırılmıştır. Rüzgar/dalga karakteristiklerinin uzun dönemli ortalamaları, uzun dönemli değişkenlikleri, uzun dönemli değişim eğilimleri tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde alansal olarak incelenmiştir. Karadeniz üzerinde farklı özellik gösteren noktalarda rüzgar/dalga ve fırtına karakteristiklerinin detaylı yerel analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlere göre seçilen referans noktalarında; uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi ile, uzun dönemli ve bunların dönemsel değişkenliği PDF grafikleri ile, rüzgar hızı/belirgin dalga yüksekliğinin yönlü davranışı rüzgar/dalga gülü ve eklenik aşılma olasılıkları ile ve ekstrem rüzgar/dalga iklimi en büyük değer analizi ile değerlendirilmiştir.

1979 yılından 2018 yılına doğru Karadeniz üzerinde ortalama deniz seviyesi basıncında azalma, deniz yüzeyi sıcaklığında artma ve deniz seviyesinde

yükselme eğilimlerine; rüzgar/dalga ve fırtına karakteristiklerinin artma eğilimleri eşlik etmiştir.

Karadeniz'in gelecekteki rüzgar/dalga ikliminin belirlenmesi, küresel iklim değişikliğinin rüzgar/dalga iklimi üzerindeki olası etki/etkilerinin irdelenmesi ve yenilenebilir (rüzgar ve dalga) enerji açısından en uygun konum(ların) atanması için 2021–2100 yıllarını kapsayan bölgesel iklim modelinden (RCM) elde edilen iklim verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada, SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tarafından geliştirilen RCA'nın (Rossby Centre Regional Climate Model) dördüncü versiyonu RCA4'ten alınan beş bölgesel iklim modeli (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR) dikkate alınmıştır. Beş RCA4 tarihsel veri arasından Karadeniz çalışma alanını en iyi tanımlayan bir iklim modeli ile detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 1979–2005 yılları için yeniden analiz verileri ile beş RCA4 tarihsel verileri alansal olarak karşılaştırılmış ayrıca yerel ölçüm verileri ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Alansal ve yerel olarak yapılan detaylı analizler, EC-EARTH rüzgar verilerinin Karadeniz rüzgar iklimini, EC-EARTH rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga verilerinin Karadeniz dalga iklimini tahmin etme performansının diğer dört RCA4 iklim verilerinden daha iyi olduğunu göstermiştir. EC-EARTH iklim verileri kullanılarak Karadeniz'in rüzgar/dalga iklim projeksiyonları iki iklim (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryolarına göre 2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek için ayrı ayrı irdelenmiştir. Rüzgar hız (V_m , V_{90} , V_{95} , V_{99}) ve dalga parametre (H_s , H_{max} , T_m , T_p) projeksiyonlarının; tarihsel döneme göre nasıl değiştiği gelecekteki değişim (GD) ile, gelecekteki değişkenliği değişim katsayısı (DK) ile, gelecekteki değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi kullanılarak tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde istatiksel olarak anlamlı eğilimlerin değerlendirilmesiyle incelenmiştir. Tarihsel dönem, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları yakın ve orta gelecek dönemleri için rüzgar/dalga ve fırtına karakteristiklerinin detaylı yerel analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlere göre seçilen referans noktalarında; uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi ile, uzun dönemli ve bunların dönemsel değişkenliği PDF grafikleri ile, rüzgar hız/belirgin dalga yüksekliği projeksiyonlarının yönlü davranışı rüzgar/dalga gülü ve eklenik aşılma olasılıkları ile ve ekstrem rüzgar/dalga iklimi en büyük değer analizi ile değerlendirilmiştir.

Ortalama rüzgar/dalga parametre projeksiyonlarının tüm Karadeniz üzerinde özellikle yakın gelecek (2021–2060) RCP4.5 senaryosu göre artma eğiliminde (rüzgar hızında %+3'e, dalga parametrelerinde %+3.5'e ulaşan), orta gelecek (2061–2100) RCP8.5 senaryosuna göre azalma eğiliminde (rüzgar hızında %-6'yı, dalga parametrelerinde %-5'i aşan) olacağı belirlenmiştir. 2021 yılından 2100 yılına doğru rüzgar/dalga iklim projeksiyonlarının değişim eğilimlerinin ve değişkenliklerinin doğu Karadeniz'de batısına kıyasla daha belirgin olacağı saptanmıştır. Ekstrem rüzgar hızı/belirgin dalga yüksekliği parametrelerinin değişim eğiliminin ortalama rüzgar/dalga parametrelerinin değişim eğiliminden çarpıcı şekilde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hızı/belirgin dalga yüksekliğinin tarihsel döneme göre batı ve doğu Karadeniz'de rüzgar hızı için sırasıyla %7 ve %27, belirgin dalga yüksekliğinde %4 ve %25 değerleriyle artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, rüzgar/dalga iklim projeksiyonlarının, ekstrem rüzgar/dalga parametreleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, Karadeniz, MIKE 21 SW, SWAN, yeniden analiz ve projeksiyon verileri

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

xxxiv

Investigation of the Impact of Global Climate Change on Wind and Wave Climate: A Case Study of the Black Sea

Fulya İŞLEK

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL

The Black Sea wind climate was evaluated using reanalysis data, wave climate was assessed using the third-generation spectral wave model covering the period of 1979–2018 (a 40-year). Long-term averages, long-term variability, and long-term trends of wind/wave characteristics were investigated over the entire Black Sea. Detailed local analyzes for wind/wave and storm characteristics were conducted at selected points with showing special characteristics on the Black Sea. At reference points selected according to the analyzes, long-term trends using linear regression, long-term and inter-annual variations using PDF graphs, directional behavior of wind speed/significant wave height using wind/wave rose and the probability exceedance probabilities of wind speed/significant wave height, and extreme wind/wave climate using extreme value analysis (EVA) were evaluated.

From 1979 to 2018 over the entire Black Sea, a decreasing tendency in mean sea level pressure, a warming tendency in sea surface temperature, a rising
tendency in sea level accompanies increasing trends in wind/wave and storm characteristics

To determine the future wind/wave climate over the Black Sea, to detect the possible impact(s) of global climate change on the wind/ wave climate, and to assign the most suitable location(s) in terms of renewable (wind and wave) energy, the regional climate models (RCMs) were used covering the period of 2021–2100. In the present study, among the five regional climate models (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR) obtained from RCA4, which is the fourth version of RCA (Rossby Centre Regional Climate Model) developed by SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), were carried out detailed analyzes to determine one RCA4 model that the best consistency with the Black Sea wind/wave climate. For this purpose, the five RCA4 historical data were compared with the reanalysis data over the entire basin and local wind/wave measurements. Detailed spatial and local analyzes show that a relatively better agreement for the EC-EARTH data, i.e., EC-ERTAH compared to the other four RCA4 historical data provides slightly better performance in the prediction of the Black Sea wind/wave climate. The Black Sea wind/wave climate projections were analyzed for two future time slices: near future corresponding to the 2021-2060 period and middle future corresponding to the 2061–2100 period under the two climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). Wind speed (V_m, V₉₀, V₉₅, V₉₉) and wave characteristics (H_s, H_{max}, T_m, T_p) projections; future change (FC) using the relative difference between two future periods and one historical period, future variability using the coefficient of variation (CV), long-term future trends using linear regression by evaluating the statistical significance levels over the entire Black Sea were assessed. Detailed local analyzes for wind/wave and storm characteristics were conducted for both historical and future periods under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. At reference points selected according to the analyzes; long-term trends using linear regression, long-term and inter-annual variations using PDF graphs, annual variability with MAV index, directional behavior of wind speed/significant wave height using wind/wave rose, and the probability exceedance probabilities of wind speed/significant wave height, and extreme wind/wave climate using extreme value analysis (EVA) were evaluated.

Mean wind/wave parameter projections over the entire Black Sea exhibits significant increasing trends (reaching +3% for wind speed, reaching +3.6% for wave parameters) in the near future (2021–2060) under the RCP4.5 scenario, significant decreasing trends (exceeding -4% for wind speed, exceeding -6% for wave parameters) in the middle future (2061–2100) under the RCP8.5 scenario. From 2021 to 2100 future change and variability in the wind/wave parameter projections is more exaggerated in the eastern Black Sea compared to the western part. The rate of change in the extreme wind speed/significant wave height parameters. For example, in the 100-year return period, the extreme wind speed/significant wave height increased approximately +7% and +27% for the wind speed, +4% and +25% for the significant wave height, in the western and eastern Black Sea, respectively, compared to the historical period. This result revealed that wind/wave climate projections have a significant effect on extreme wind/wave parameters.

Keywords: Climate change, Black Sea, MIKE 21 SW, SWAN, reanalysis and projection data

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Literatür Özeti

Karadeniz'in iklim ve atmosferik koşullarının değişkenliği, coğrafi konumu, yarıkapalı havza olması, karmaşık orografi ve kompleks batimetriye sahip olması nedenleriyle havzadaki rüzgar ve dalga iklimi, yıllardır çeşitli çalışmaların ve araştırma projelerinin konusu olmuştur.

Karadeniz iklim koşulları, Azorlar ve Sibirya yüksek basınç alanlarını ve Asya alçak basınç alanlarını (Arkhipkin vd., 2014) oluşturan atmosferik sirkülasyon koşullarının etkisi altındadır (Cherneva vd., 2008). Bu koşullar, siklonik* ve antisiklonik** aktivitelerden kaynaklanmaktadır. Azor antisiklonu yıl boyunca etkisini gösterirken, Akdeniz siklonu ve Doğu Avrupa (Sibirya) antisiklonu özellikle kış aylarında etki göstermektedir (Valchev vd., 2010). Dolayısıyla Karadeniz'de kışın, kuzeyli rüzgarlar hakimdir (Rusu vd., 2014). Mevsimsel iklim değişkenliği, Karadeniz'in kuzey ve batı kesimlerinde daha sık görülen kış fırtınaları ile havza üzerinde oldukça belirgindir (Valchev vd., 2010; Rusu vd., 2014).

Karadeniz'in özgül rüzgar yapısı, havzanın etrafını saran doğuda Kafkas Dağları, güneyde Kuzey Anadolu Dağları, kuzeyde Kırım Dağları ve batıda Balkan Dağları ile bölgenin orografi özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Havzanın doğusunda yer alan yüksek Kafkas Dağları ve güneyinde yer alan daha alçak Kuzey Anadolu Dağları; doğu, güney ve güneydoğudan esen rüzgarlar için topoğrafik bir bariyer etkisi oluşturmakta ve Karadeniz rüzgar karakteristiklerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Nispeten alçak Kırım Dağları, havzanın kuzey kesiminde düşük seviyeli rüzgarları etkilemektedir. (Zecchetto ve De Bisasio, 2007; Garmashov vd., 2016; Kubryakov vd., 2019; Islek vd., 2020a). Karadeniz'in doğu kesimindeki rüzgar iklimi havzanın orografik yapısının etkisi altında iken, batı tarafındaki rüzgar iklimi çoğunlukla kara ve deniz arasındaki ısı zıtlığından kaynaklanan muson etkisinin altındadır (Zecchetto ve De Bisasio, 2007; Efimov ve Anisimov, 2011; Kubryakov vd., 2019).

Doğru ve güvenilir rüzgar iklim değerlendirmeleri, yüksek cözünürlüklü rüzgar alanlarının analizlerini gerektirmektedir (Rusu vd., 2009; Islek vd., 2020a). Dünya üzerinde farklı bölgelerde çeşitli rüzgar veri kaynakları ile yapılan, karşılaştırmalı çalışmaların bazıları **Tablo 1.1**'de verilmiştir. **Tablo 1.1**'de özetlenen çalışmalar, genel olarak ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR verilerinin daha gerçekçi ve ölçülen rüzgar verileriyle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar (yani daha küçük ortalama karekök hatası, RMSE) verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalar, ERA- Interim rüzgar verilerinin daha iyi sonuç vermesinin, veri asimilasyonu için 3D-Var (üç boyutlu varyasyon analizi) verine 4D-Var (dört boyutlu varyasyon analizi) kullanılmasından kaynaklanabileceğini öne sürmüştür. NCEP verilerinin ikinci versiyonunda (NCEP/NCAR R2, Kanamitsu vd., 2002), NCEP verilerinin ilk versiyonunda (NCEP/NCAR R1, Kalnay vd., 1996) karşılaşılan veri benzeştirme hataları daha fazla gözlem verileri eklenerek düzeltilmiştir (Kanamitsu vd., 2002). Ancak, aynı enstitü tarafından üretilen NCEP/CFSR (Saha vd., 2010; Saha vd., 2014) ile karşılaştırıldığında, NCEP-R2 verilerinin enlemde ve boylamda daha kaba uzamsal çözünürlüğe sahip olduğu ve sınırlı sayıda uydu gözlem verileri kullanıldığı belirtilmektedir. Birçok karşılaştırmalı çalışmada, NCEP/CFSR verilerinin, ERA-Interim verilerine benzer sonuçlar bulduğunu ve NECP/CFSR verilerinin geçerli bir alternatif olduğu belirtilmiştir.

^{*}Siklon, atmosferde bir alçak basınç alanı çevresinde hızla dönen rüzgarların oluşturduğu şiddetli fırtınadır. Siklonlar güney yarımkürede saat yönünde, kuzey yarımkürede saat yönünün tersi istikamette dönerler.

^{**} Antisiklon veya yüksek basınç, 1013 milibardan yüksek basınç alanlarına denir.

^{***}Muson iklimi, tropikal iklim özellikleri taşıyan Güney, Güneydoğu ve Doğu Asya'da Mayıs ve Eylül arasında güneybatıdan esen ve yağmur getiren veya Ekim ile Nisan arasında kuzeydoğudan esen mevsimlik hakim rüzgar.

Çalışma Alanı	Zaman Aralığı	Yeniden Analiz Verileri	Organizasyon	Önerilen	Kaynak	
		NCEP-R2	NCEP/DOE			
Antarktika		IRA-25	IMA	FRA-	Bromwich	
Kitasi	1989–2009	ERA-Interim	ECMWE	Interim	vd 2011	
ititubi		MERRA	NASA	meerim	Vu. 2011	
		CESR	NCEP			
Günev Atlantik		NCEP-R1	NCEP/NCAR			
Avrupa Bölgesi		JRA-25	JMA	ERA-	Menendez	
ve Akdeniz	1989–2009	ERA-40	ECMWF	Interim	vd. 2011	
Havzası		ERA-Interim	ECMWF			
		NCEP-R1	NCEP/NCAR			
		NCEP-R2	NCEP/DOE	ERA-	Tabata	
Endonezya	2006-2008	JRA-25	JMA	Interim	vd., 2011	
		ECMWF	ECMWF		2	
		MERRA	NASA			
İskandinavya	2004–2011	CFSR	NCEP	ERA-	Jimenez	
,		ERA-Interim	ECMWF	Interim	vd., 2011	
		CFSR	NCEP	OTOD and	Deces	
TI'L & DI	10/05/1998-	NCEP-R1	NCEP/NCAR	CFSR and	Bao ve Zhang,	
libet Platosu	9/08/1998	ERA-Interim	ECMWF	ERA-		
		Era-40	ECMWF	Interim	2012	
		NCEP-R2	NCEP/DOE	EDA	Corrella	
İber Yarımadası	2008	ERA-Interim	ECMWF	ERA-	Carvallio	
		CFSR	NCEP	Interim	va., 2012.	
		NCEP-R2	NCEP/DOE			
		ERA-Interim	ECMWF			
Doutolia	01/01/2008-	CFSR	NCEP	ERA-	Carvalho	
PORTEKIZ	31/12/2008	MERRA	NASA	Interim	vd., 2014.	
		NCEP-GFS	NCEP			
		NCEP-FNL	NCEP			
Peru						
Hawaii					Stopa ve	
Meksika körfezi	1070 2000	ERA-Interim	ECMWF	ERA-	Chaung	
NW Atlantik	17/9-2009	CFSR	NCEP	Interim	2014	
Alaska					2014.	
NE Pasifik						

Tablo 1.1 Dünyanın farklı bölgelerinde yeniden analiz verileri ile yapılançalışmalar

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

JMA Japan Meteorological Agency

JRA-25 Japanese 25-year Reanalysis

MERRA Modern-ERA Retrospective Analysis

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCEP/CFSR National Centers for Environmental Prediction/ Climate Forecast System Reanalysis

NCEP/DOE NCEP/Department of Energy

NCEP/NCAR NEP/National Center for Atmospheric Research

NCEP-FNL NCEP-Final

NCEP-GFS NCEP-Global Forecast System

NCEP/R1 NCEP/Reanalysis 1

NCEP/R2 NCEP/Reanalysis 2

Dünya'nın farklı bölgelerinde oldukça uzun veri setleri kullanılarak fırtına özelliklerinin değişkenliğini (örneğin, Kuzey Avrupa, Lozano vd., 2004; Kuzey Atlantik Okyanusu, Pasifik Okyanusu ve Hint Okyanusu, Webster vd., 2005), derin deniz ve yakın kıyı rüzgar gücü potansiyelinin (Örneğin, Suudi Arabistan Baseer vd,. 2017; Tayland'ın güney kısmı, Luankaeo ve Tirawanichakul, 2017; İran Zabol bölgesi, Pishgar-Komleh ve Akram, 2017; Çin kıyıları, Liu vd., 2019) araştıran çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak, Karadeniz rüzgar iklimi ve karakteristikleri için uzun dönemli analizlere dayanan kısıtlı sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Valchev vd., (2012), 1948 ve 2010 yıllarını kapsayan 63 yıl için batı Karadeniz'de meydana gelen fırtınaları araştırmış ve bu fırtınaların değişim eğilimlerini irdelemişlerdir. Onbir fırtına için, fırtına yapısındaki olası uzun dönemli değişiklikler fırtına süresi; integral, ortalama ve özgül fırtına dalgası enerjisi; rüzgar hızı ve yönü kullanılarak incelenmiştir. Batı Karadeniz fırtına özelliklerinde belirgin bir artan/azalan eğilimin olmadığını tespit etmişlerdir.

Onea ve Rusu (2012), 14 yıllık (1999–2012) rüzgar verilerini (hava istasyonları, uydu verileri ve iki atmosferik veri; ECMWF ERA-Interim ve NOAA NCEP kullanarak, Karadeniz rüzgar yapısını ve rüzgar enerji potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmacıların sonuçları, enerjik rüzgar koşullarının batı Karadeniz'de daha sık meydana geldiğini ve bu bölgenin rüzgar enerjisinin çıkarılması için daha uygun konum olduğunu göstermiştir.

Velea et al. (2014), ekstrem rüzgar olaylarının meydana gelebileceği ocak ayı için mevcut (2001–2009) ve yakın gelecek (2011–2040) dönemleri için Karadeniz üzerindeki ekstrem rüzgarları incelemişlerdir. Havzanın güney bölgesi hariç, batı ve kuzey Karadeniz'de orta ve kuvvetli rüzgar ikliminin azalan eğilimler göstereceğini saptamışlardır. Bunun nedeninin, muhtemelen kuzey ve batı havzasında daha güçlü atmosferik ısınma ile bağlantılı olarak tüm havzadaki atmosferik nemdeki olası artıştan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Rusu (2019a), batı Karadeniz'in rüzgar ve dalga gücünü 30 yıllık (1987–2016) bir dönem için değerlendirmiş ve rüzgar ile dalga özellikleri açısından birkaç

referans noktasında detaylı analizler yapmıştır. Ortalama rüzgar gücünün en yüksek değerlerinin Romanya kıyılarında ve Ukrayna kıyılarının batı yakasında olduğunu, en yüksek ortalama dalga gücünün İstanbul Boğazı yakınlarında olduğunu belirlemiştir.

Cakmak vd., (2019), Karadeniz kıyıları boyunca beş konumdaki rüzgar ölçümleri ile karşılaştırarak atmosferik rüzgar alanlarının kalitesini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla üç farklı hava merkezinden (NCEP, NASA ve ECMWF) dört farklı rüzgar alanını (CFSR, ERA-Interim, ERA-Interim operasyonel ve MERRA (Araştırma ve Uygulamalar için Modern Çağ Retrospektif Analizi)) kullanmışlardır. ECMWF veri setinin havzanın batı tarafında daha iyi sonuç verdiği, CFSR rüzgar alanlarının ise havzanın doğu tarafında ve Gloria açık deniz konumunda daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Nedelcu ve Rusu (2022), kuzeybatı Karadeniz'in rüzgar iklimini Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeoekolojisi Enstitüsü (GeoEcoMar) tarafından sağlanan 6 yıllık (2015–2020) veri kullanarak araştırmışlardır. Karadeniz havzasının yenilenebilir enerji projelerinin geliştirilmesi için zengin kaynaklara sahip dinamik bir ortam olduğunu rapor etmişlerdir.

Karadeniz gibi yarı kapalı havzaların karmaşık ortamlar olduğu ve rüzgar/dalga iklim özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmek için yüksek çözünürlüklü uzamsal alanların gerekli olduğu iyi bilinmektedir (Rusu vd., 2009). Bu amaçla, bu çalışmada Karadeniz rüzgar iklimi ECMWF ve NOAA NCEP veri tabanından elde edilen yüksek çözünürlüklü rüzgar alanları kullanılarak değerlendirilmiştir (Bölüm 3).

Dalga iklimi, ekstrem dalga ve dalga gücü değerlendirmeleri, uzun dönemli rüzgar ve dalga verilerini gerektirmektedir. Swain (1997), dalga iklimi ve ekstrem dalga istatistikleri hakkında güvenilir bilgilerin en az 10–30 yıllık rüzgar ve dalga ölçümü gerektirdiğini belirtmiştir. Dalga yükseklikleri, dalga periyotları ve dalga yönleri gibi dalga özelliklerine, yerinde ölçümler ve uzaktan algılanan kayıtlar üzerinden ulaşılabilmektedir. Ancak, dalga parametrelerinin yerinde ölçülmesi zor, pahalı ve zaman alıcı olduğundan ölçülen dalga verileri genellikle kısa süreler için mevcuttur. Diğer taraftan altimetre verilerinde sadece belirgin dalga yüksekliği kayıtlarının bulunması, uydu verilerinin bazı ekstrem olayları kaçırması ve yüksek uzamsal ve zamansal çözünürlüğe sahip olması gibi dezavantajları nedenleriyle, üçüncü nesil spektral dalga modellerinden elde edilen dalga tahminleri, uzun dönemli dalga özelliklerini elde etmek için en iyi alternatiflerden biri olmaktadır. Karadeniz'deki dalgaları modellemek için yaygın olarak kullanılan üçüncü nesil spektral dalga modelleri; WAM (WAMDI Grup, 1988), Wavewatch III (Tolman, 1991), SWAN (Simulated WAves Nearshore) (Booij vd., 1999) ve MIKE 21 SW (Spectral Wave) (DHI, 2007)'dir. Bu modeller ile yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Rusu vd. (2000), Karadeniz havzasındaki ekstrem dalga koşullarını SWAN ile gerçekleştirilen benzeşimlerde iki farklı rüzgar veri kaynağı kullanarak (NCEP ve ECMWF) araştırmışlardır. Analizler havzanın doğu ve batı kıyısı için gerçekleştirilmiş, doğu kıyısı yerinde ölçülmüş verilerle, batı kıyısı Gloria ölçüm istasyonundan elde edilen verilerle kalibre edilmiştir. İstatistiksel parametrelerden elde edilen sonuçlar atmosfer modellerinden elde edilen rüzgar hızlarının, ölçüm değerlerinden daha küçük olduğunu göstermiştir. NCEP rüzgar alanlarının genellikle ölçümlere daha yakın olduğu ve ECMWF rüzgar alanı kullanıldığında elde edilenlerden daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. İkinci aşamada, yakın kıyı dalga modeline dayanan bir dalga tahmin sistemi Karadeniz'e uyarlanmıştır (Black SWAN). SWAN modeline dayanan bu dalga tahmin sistemi, dalga üremesini ve yakın kıyı dalga dönüşüm süreçlerini içeren ve dalgaları benzeştiren bir yapıya sahiptir. Black SWAN ile yapılan benzeşimlerden, Karadeniz havzasındaki dalga iklimi ve yakın kıyı dalga etkisi hakkında güvenilir bilgiler sağlandığı rapor edilmiştir.

Trusca (2006), Karadeniz'in kendine özgü koşullarına daha iyi uyum sağlayabilmesi için SWAN sayısal modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bunun için (Bondar, 1989) tarafından kurulan Karadeniz'in tek boyutlu spektrumunu, Karadeniz dalgalarının frekanslarını ve enerjilerini daha iyi gösteren iki boyutlu spektruma dönüştürmüştür (MarNeRo spektrumu). SWAN teorik spektrumları (JONSWAP ve Pierson-Moskowitz) kullanılarak elde edilenler ile iki boyutlu MarNeRo spektrumundan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. MarNeRo spektrumuyla daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar SWAN gibi sayısal dalga modelleri için iki boyutlu MarNeRo spektrumunun kullanılmasının daha uygun olduğuna ulaştırmıştır. Bu yeni parametrelendirme sonuçlarının ümit verici olduğunu ve geliştirilen SWAN modelinin Karadeniz yakın kıyı dalga tahmini için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Cherneva vd. (2008), Karadeniz çalışma alanına üçüncü nesil dalga modeli olan WAM C4'ün kurulumunu ve doğrulamasını detaylı olarak açıklamışlardır. Rüzgar alanları, küresel NCEP yeniden analiz projesinden 1958–1998 yılları için alınan veriler kullanılarak bölgesel atmosfer modeli (REMO) ile hesaplanmıştır. Doğrulama, dalga modeli çıktısının üç derin su bölgesine yerleştirilen yönlü şamandıra ölçümleri ve Karadeniz kıyısına yakın orta derinlikte bir noktada alınan dalga ölçer verilerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, modellenen ve ölçülen veriler arasındaki uyumun tatmin edici olduğunu ve benzeşim kalitesinin daha enerjik ve daha şiddetli rüzgar ve dalga koşulları altında arttığını göstermiştir. Doğrulamanın ardından, 1958–1998 yıllarını kapsayan 41 yıllık dalga tahmini yapılmıştır.

Valchev vd. (2013), Karadeniz derin deniz dalga enerji potansiyelini 59 yıllık (1948–2006) bir dönem için değerlendirmişlerdir. Benzeşimler REMO bölgesel atmosferik modelinden gelen rüzgar alanları kullanılarak, WAM spektral dalga modeli ile gerçekleştirilmiştir. Karadeniz'in en enerjik bölgesinin, dalga gücünün maksimum 3.5 kW/m'ye ulaştığı güneybatı tarafı olduğunu belirlemişlerdir. Havzanın batı tarafının, doğusuna kıyasla neredeyse iki kat daha fazla dalga gücü potansiyeline sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Divinsky ve Kosyan (2015), 1990–2014 yıllarını kapsayan 25 yıllık dalga iklimini iki spektral dalga modeli, MIKE 21 SW ve SWAN, kullanarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, her iki modelin de benzer ve karşılaştırılabilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Daha sonra araştırmacılar (Divinsky ve Kosyan, 2017), Karadeniz dalga ikliminin uzamsal ve zamansal değişkenliğini araştırmak için 37 yıllık (1979–2015) ERA-Interim rüzgar alanlarıyla desteklenen MIKE 21 SW modelini kullanmışlardır. Dalga gücünün Karadeniz'deki uzamsal dağılımının homojen olmadığını belirlemişlerdir.

Myslenkov vd. (2021), Karadeniz rüzgar dalgalarını tahmin etmek için NCEP GFS (Global Forecasting System) ve COSMO-RU07 (Consortium for the smallscale modeling-Russian domain for 7 km) rüzgar alanları ile desteklenen Wavewatch III ve SWAN spektral dalga modellerini kullanmışlardır. Model sonuçlarının tahmin kalitesini değerlendirmek için uydu verileri ile karşılaştırmışlar ve elde edilen istatistiksel analizler, dalga tahmin kalitesinin tatmin edici derecede iyi olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada uzun dönem dalga karakteristiklerinin elde edilmesi amacıyla SWAN ve MIKE 21 SW üçüncü nesil spektral dalga modelleri kullanılmıştır (Bölüm 5). Karadeniz dalga iklimi ve dalga gücü için SWAN spektral dalga modeli ile yapılan önceki çalışmalardan bazıları sırasıyla **Tablo 1.2** ve

Tablo 1.3'te verilmiştir. Karadeniz çalışma alanında MIKE 21 SW spektral dalga modeli ile yapılan çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, dünyanın farklı bölgelerinde MIKE 21 SW ile yapılan çalışmalardan bazıları **Tablo 1.4**'te özetlenmiştir.

Çalışma Alanı	Zaman Aralığı	Rüzgar Girdisi Çözünürlük		Sonuç	Kaynak
Karadeniz	2004	ALADIN		MarNeRo spektrumunun, model sonuçlarının doğruluğunu artırdığı belirlenmiştir.	Trusca (2006)
Batı Karadeniz	1958–2007 (50 yıl)	ECMWF NCEP/NCAR	3 h; 0.5°x0.5°	Batı Karadeniz'in rüzgar ve dalga iklimi, yüksek uzamsal ve mevsimsel değişkenlik göstermiştir.	Valchev vd. (2010)
Karadeniz	1979 2003 2012	ECMWF ERA-Interim ALADIN ALADIN	6 h; 0.75°x0.75° 3 h; 0.25°x0.25° 3 h; 0.125°x0.125°	ERA Interim rüzgar alanlarının kaba çözünürlüklü olması, dalgaların önemli ölçüde düşük tahminine neden olduğu belirtilmiştir.	Galabov (2013)
Karadeniz	2002	WRF ile ERA-Interim	0.5°x0.5°	Karadeniz üzerindeki model sonuçlarının doğruluğu (hem WRF hem de SWAN) kuzey Karadeniz'de biraz daha iyi sonuçlar vermiştir.	Rusu vd. (2014)
Karadeniz	1996	ECMWF ERA-Interim ECMWF ERA-40 ECMWF Operasyonel NCEP/CFSR NASA MERRA JRA-25	6 h; 0.25°x0.25° 6 h; 0.25°x0.25° 6 h; 0.25°x0.25° 1h; 0.312°x0.312° 1 h; 2/3°x1/2° 6 h; 2.5°x2.5°	CFSR rüzgar alanları ile desteklenen SWAN modeli, diğer rüzgar alanlarından daha iyi sonuç vermiştir.	Van Vledder ve Akpinar (2015)
Kuzeydoğu Karadeniz	1979–2010 2011–2015 01/01/2010 31/12/2011	NCEP/CFSR NCEP/CFSv2 GFS tahmin WRF yeniden analiz ve tahmin	1 h; 0.3°x0.3 1 h; 0.2°x0.2° 3 h; 0.5°x0.5 1 h; 1.0°x1.0°	WRF rüzgar alanları ile desteklenen SWAN modelinden elde edilen maksimum dalga yüksekliğinin bazı tahminlerinin, GFS rüzgar alanlarına göre daha doğru olduğu belirlenmiştir.	Myslenkov vd., (2016)
Karadeniz	1987–2016 (30 yıl)	NCEP/CFSR	3 h; 0.3125°x0.3125°	Uzun dönemli değişim eğilimlerinin havzanın batı kesiminde arttığı, doğu kesiminde ise azaldığı belirlenmiştir.	Onea ve Rusu (2019b)
Batı Karadeniz	1980–2020 (41 yıl)	ECMWF ERA5	1 h; 0.25°x0.25°	1980 yılından 2020 yılına doğru fırtına sayısında hafif artış eğilimi belirlenmiştir.	Galabov (2020)

Tablo 1.2 Karadeniz dalga iklimi için SWAN spektral dalga modeli ile yapılanönceki çalışmalar

Çalışma Alanı	Zaman Aralığı	Rüzgar Girdisi	Çözünürlük	Sonuç	Kaynak
Batı Karadeniz	1996–2003 2003	ECMWF ERA-Interim ALADIN	0.25°x0.25° 0.125°x0.125°	En yüksek ortalama dalga gücünün 3–7 kW/m arasında olması gerektiği belirtilmiştir.	Galabov ve Kortcheva (2013)
Karadeniz	1995–2009	ECMWF ERA-Interim	6 h; 0.25°x0.25°	En yüksek ortalama dalga gücünün batı Karadeniz'de 3 kW/m 'ye ulaştığı belirlenmiştir.	Akpinar ve Kömürcü (2013)
Karadeniz	1999–2013 (15 yıl)	NCEP/CFSR	3 h; 0.312°x0.312°	En yüksek ortalama dalga gücünün batı Karadeniz'de 4.5 kW/m 'ye ulaştığı saptanmıştır.	Rusu (2015)
Karadeniz	2012–2015	ALADIN	0.125°x0.125°	En yüksek ortalama dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de 4.5 kW/m ila 5kW/m arasında değiştiği belirlenmiştir.	Galabov (2015)
Karadeniz	1979–2009 (31 yıl)	NCEP/CFSR	1 h; 0.312°x0.312°	En yüksek ortalama dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de 5.7 kW/m 'ye ulaştığı belirlenmiştir.	Akpinar vd., (2017)
Batı Karadeniz	1987–2016 (30 yıl)	NCEP/CFSR	3 h; 0.312°x0.312°	En yüksek ortalama dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de 4.3 kW/m 'ye ulaştığı belirlenmiştir.	Rusu (2019a)

Tablo 1.3 Karadeniz dalga gücü için SWAN spektral dalga modeli ile yapılanönceki çalışmalar

ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique développement Inter-National) WRF (Weather Research and Forecasting)

Çalışma Alanı	Zaman Aralığı	Rüzgar Girdisi Çözünürlük		Sonuç	Kaynak
Erie Gölü, Kuzey Avrupa	2002	1 saatlik ölçür	n verisi	Belirgin dalga yüksekliğinde SWAN, dalga periyodunda ise MIKE 21 SW daha iyi tahmin performansı göstermiştir.	Moeini ve Etemad- Shahidi (2007)
Hint Okyanusu	2005	QuickSCAT	0.25°x0.25°	MIKE 21 SW modelinin, Hint Okyanusu'ndaki rüzgar ve soluğan dalgalarını iyi benzeştirdiği belirlenmiştir.	Remya vd. (2012)
Karayip Denizi	1979–2008 (30 yıl)	NCEP/NARR (North American Regional Reanalysis)	3 h; 0.3°x0.3°	Ort. dalga gücünün 8–14 kW/m arasında olduğu saptanmıştır.	Appendini vd., (2015)
Karadeniz	1979–2015 (37 yıl)	ECMWF ERA- Interim	3 h; 0.25°x0.25°	En yüksek ort. dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de 8–10 kW/m 'ye ulaştığı belirlenmiştir.	Divinsky ve Kosyan (2017)
Güney Brezilya	1997–2006 (10 yıl)	NCEP/CFSR	3 h; 0.5°x0.5°	Yakın kıyı ve derin denizdeki en yüksek ort. dalga gücünün sırasıyla 6.7 kW/m ve 22.3 kW/m'ye ulaştığı tespit edilmiştir.	Lisboa vd., (2017)
Karadeniz	1979–2016 (37 yıl)	ECMWF ERA- Interim	6 h; 0.125°x0.125 °	Havzanın batısı, doğusuna kıyasla daha büyük dalga gücü potansiyeline sahiptir.	Abdollahzad- ehmoradi vd. (2018)
Karadeniz	1979–2018 (40 ул)	ECMWF ERA- Interim	3 h; 0.25°x0.25°	Rüzgar ve soluğan dalgasının ort. dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de sırasıyla 6–7 kW/m, 2.0–2.5 kW/m'ye ulaştığı tespit edilmiştir.	Divinsky ve Kosyan (2019)
Mangalya Plajı, Batı Karadeniz	2016	NCEP/CFSv2		Dalgaların daha güçlü olduğu kış aylarında (özellikle ocak ve şubat aylarında) kıyı erozyonunun güçlendiği belirlenmistir.	Anton vd. (2019)
Hazar Denizi	2011–2015	ECMWF ERA- Interim	6 h; 0.75°x0.75°	15 yıllık süre içinde en yüksek ort. dalga gücü potansiyeline, 3.6 kW/m değeri ile Aralık ayında ulaşılmıştır.	Jahangir ve Mazinani (2020)

Tablo 1.4	Karadeniz	dalga	iklimi için	MIKE	21SW	ile y	apılan	önceki	çalış	malar
-----------	-----------	-------	-------------	------	------	-------	--------	--------	-------	-------

İklim değişikliğine bağlı olarak atmosferik parametrelerdeki değişim eğilimlerinin 21. yüzyılın sonuna kadar devam etmesi tahmin edilmektedir. Son otuz yılın her biri, Dünya yüzeyinde ölçülen sıcaklığın 1850 yılından bu zamana, bir önceki on yıldan daha sıcak olduğunu ortaya koymuştur. 1983'ten 2012'ye kadar olan dönem, Kuzey Yarımküre'de son 1400 yılın muhtemelen en sıcak 30 yıllık dönemini oluşturmaktadır. Doğrusal bir eğilimle hesaplanan küresel ortalama kara ve okyanus yüzey sıcaklığı verileri, bağımsız olarak üretilmiş çok sayıda veri kümesinin mevcut olduğu 1880 ila 2012 dönemi boyunca 0.85 [0.65–1.06] °C'lik bir ısınmayı göstermektedir (IPCC, 2014). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2014 raporunda, küresel kara ve okyanus yüzeyi sıcaklığı değişimi, küresel su seviyesi değişimi, küresel sera gazı konsatrasyonları ve küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının bu zamana kadar arttığını ve bu artışların devam edeceğini bildirmiştir (**Şekil 1.1**).



Şekil 1.1 IPCC (2014)'te verilen (a) 1986–2005 dönemindeki ortalamaya göre yıllık ve küresel ortalama kara ve okyanus yüzey sıcaklığı değişimi. (b) 1986–2005 dönemdeki ortalamaya göre yıllık ve küresel ortalama deniz seviyesi değişimi. (c) Küresel ortalama sera gazı konsantrasyonları. Karbondioksit (CO2, yeşil), Metan (CH4, turuncu) ve Azot oksit (N2O, kırmızı). (d) Küresel antropojenik CO2 emisyonları

Atmosferik parametrelerdeki bu değişikliklerin, rüzgar ikliminde ve dolayısıyla dalga ikliminde değişikliklere yol açacağı beklenmektedir. Birçok araştırmacı (Hdidouan ve Staffell, 2017; Lemos vd., 2019; Chowdhury vd., 2019) küresel iklim değişikliğinin, rüzgar ve dalga ikliminin uzamsal ve zamansal karakteristikleri (rüzgar hızı, fırtına süresi, fırtına sayısı, ekstrem olay, dalga yüksekliği) üzerinde değişimlere neden olacağını öngörmektedir. Değişen iklim, derin deniz ve kıyı operasyonlarını etkileyecek, kıyı morfodinamiğini (kıyı çizgisi şeklini ve yönünü, kıyı boyu ve kıyıya dik malzeme taşınımı) değiştirecektir. Gelecekteki iklim bilgisi, atmosfer-okyanus araştırmaları, denizcilik faaliyetleri, derin deniz ve kıyı yapılarının planlanması, yenilenebilir enerji çiftliklerinin tasarımı ve uygun konumların belirlenmesi gibi çeşitli uygulamalar için çok önemlidir.

Son yıllarda, iklim verilerinin gelecekteki olası değişim eğilimlerini araştırmak, ekstrem olayları yakalamak ve bunların nedenlerini sorgulamak için birçok araştırmacı iklim verilerinin tarihsel ve gelecekteki (projeksiyon) benzeşimlerini sağlayan küresel ve bölgesel modellerden elde edilen sonuçları kullanmaktadır.

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), iklim sistemini anlamak, iklim anlayışını iyileştirmek, gelecekteki iklim değişikliği ve belirsizlikler hakkında tahminler sağlamak için Dünya İklim Araştırma Programı'nın (WCRP, World Climate Research Program), Birleşik Modelleme Çalışma Grubu (WGCM, Working Group on Coupled Modelling) tarafından kurulmuştur. CMIP5 projenin 2010–2014 yıllarında tamamlanan beşinci aşamasındadır ve IPCC'nin Beşinci Değerlendirme Raporunda yeni bir dizi iklim modeli deneyleri yayınlanmıştır. CMIP5 arşivleri, 28 farklı uluslararası modelleme grubu tarafından yaklaşık 60 farklı küresel iklim modelinden (GCM, General Circulation Model) iklim senaryoları içermektedir (Hemer ve Trenham, 2016).

IPCC (2014)'te iklim değişikliği değerlendirmeleri için emisyon şiddetini tanımlayan temsili konsantrasyon senaryo setleri (Representative Concentration Pathway, RCP2.6, 4.5, 6.0 ve 8.5) oluşturmuştur. Bu iklim senaryoları sera gazları ve aerosoller gibi yer yüzünün radyasyon dengesini bozan maddelerin gelecekte atmosferdeki konsantrasyonlarının tahmin edilmesine dayanmaktadır. Bu senaryolar ışınımsal ya da radyasyon zorlama seviyelerine göre isimlendirilmektedir. IPCC 2014 raporunda belirlenen dört tip RCP senaryolarına ait genel bilgiler **Tablo 1.5**'te özetlenmiştir.

Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, RCP2.6 pik ve düşüş senaryosudur. Senaryonun temelini 2010–2020 yıllarında radyasyon zorlama seviyesinin 3.1 W/m²'de pike ulaşacağını ve daha sonra 2100'de 2.6 W/m²'ye düşeceği varsayımı oluşturmaktadır. RCP4.5 ve RCP6.0 denge senaryolarıdır, yani radyasyon zorlama seviyesinin 21. yüzyıldan sonra sırasıyla 4.5 W/m² ve 6.0 W/m²'ye stabilize olacağını öngörmektedir. RCP8.5, 2100 yılına kadar radyasyon zorlama seviyesinin 8.5 W/m²'ye ulaşacağı yüksek konsantrasyonlu bir radyasyon zorlama seviyesini temsil etmektedir (Meinshausen vd., 2011; Van Vuuren vd., 2011).

Senaryo Adı	Işınımsal Zorlama Değeri	Değere Ulaşma Zamanı	Işınımsal Zorlama Değişimi	Toplam Konsantrasyon (CO₂ eşdeğer)	Emisyonlar (KYOTO protokolü sera gazları)
RCP2.6	~ 3.0 W/m ²	2100 öncesi	3.0 W/m²'e ulaşmadan zirve ve düşüş	Zirve ~490 ppm ve düşüş (2100'de)	Yüzyılın ilk çeyreğinde düşüş
RCP4.5	4.5 W/m ²	2100 öncesi	Hedefi geçmeden Stabilizasyon	~650 ppm (2100'de)	Yüzyılın ortalarından itibaren düşüş
RCP6.0	>~6.0 W/m ²	2100 sonrası	Hedefi geçmeden Stabilizasyon	~850 ppm (2100'de)	Yüzyılın son çeyreğinde düşüş
RCP8.5	8.5 W/m ²	2100'de	Yükselme	~1370 ppm (2100'de)	2100'e kadar artış devam ediyor

 Tablo 1.5
 RCP iklim senaryolarının karakteristikleri (MGM, 2021)



Şekil 1.2 Farklı RCP senaryolarına göre radyasyon zorlama seviyelerinin zamanla değişimi (Meinhausen vd., 2011)

IPCC (2014), 21. yüzyılın ortası ve sonu (2046–2065 ve 2081–2100) için 1986–2005 dönemine göre dört RCP senaryosu altında olması beklenen küresel ısınma ve küresel ortalama su seviyesi artış projeksiyonlarını Beşinci Değerlendirme Raporunda vermiştir (**Tablo 1.6**). Bu değerlendirmelere (**Tablo 1.6**) göre 21. yüzyılın ortası ve sonu için dört RCP senaryoları altında küresel sıcaklığın artacağı, okyanusların ısınmaya devam edeceği, küresel ortalama su seviyesinin yükseleceği tahmin edilmektedir (IPCC, 2014).

	Senaryo	20	46–2065	20	081–2100
	Adı	Ortalama	Muhtemel aralık	Ortalama	Muhtemel aralık
Küresel	RCP2.6	1.0	0.4–1.6	1.0	0.3–3.7
Ortalama Yüzey Sıcaklığı	RCP4.5	1.4	0.9–2.0	1.8	1.1–2.6
	RCP6.0	1.3	0.8–1.8	2.2	1.4–3.1
Değişimi (°C)	RCP8.5	2.0	1.4–2.6	3.7	2.6–4.8
		Ortalama	Muhtemel aralık	Ortalama	Muhtemel aralık
Küresel	RCP2.6	0.24	0.17-0.32	0.40	0.26-0.55
Ortalama Deniz	RCP4.5	0.26	0.19–0.33	0.47	0.32–0.63
Seviyesi Artışı	RCP6.0	0.25	0.18-0.32	0.48	0.33–0.63
(m)	RCP8.5	0.30	0.22-0.38	0.63	0.45-0.82

Tablo 1.6 IPCC Beşinci Değerlendirme raporuna göre küresel ısınma (°C) veküresel su seviyesi (m) artış projeksiyonları (IPCC, 2014)

Küresel iklim değişikliğinin farklı iklim senaryolarına göre gelecekteki Karadeniz rüzgar ve dalga karakteristikleri üzerindeki olası etkileri ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma yapılmıştır.

Koletsis vd. (2016) Akdeniz ve Karadeniz'in rüzgar hızı ve rüzgar gücü potansiyelini mevcut (1961–1990) ve iki ayrı gelecek (2021–2050, 2061–2090) dönemleri için analiz etmişlerdir. Analizlerde, ENSEMBLES projesi çerçevesinde üretilen altı bölgesel iklim modeli benzeşimlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Karadeniz rüzgar iklimi ile ilgili sonuçlar, ortalama rüzgar gücünün (500–900 W/m²) gelecek dönemlerde küçük değişiklikler (±50 W/m²) göstereceğini ortaya koymuştur.

Davy vd. (2018), iklim değişikliğinin Karadeniz rüzgar gücü üzerindeki etkilerini RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 2021–2050 ve 2061–2090 dönemleri için araştırmışlardır. Değerlendirmelerde, SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tarafından geliştirilen RCA'nın (Rossby Centre Regional Climate Model) dördüncü versiyonu olan RCA4'ten alınan beş bölgesel iklim modelinin ortalaması kullanılmıştır. Tarihsel (1979–2004) dönem ile iki ayrı gelecek (2021–2050, 2061–2090) dönemlerin karşılaştırması sonucunda iki iklim senaryosuna göre iklim değişikliğinin Karadeniz'deki rüzgar kaynakları üzerinde belirgin bir olumsuz etkisinin olmayacağını göstermiştir. Diğer taraftan Rusu (2018), yakın gelecekte (2021–2050) rüzgar hızının artacağını ancak rüzgar yönünün yüksek değişkenlik göstereceğini rapor etmiştir. Rusu (2018), yakın gelecek RCP8.5 senaryosu için SMHI tarafından sağlanan RCA4 benzeşimlerini ve tarihsel dönem (1987–2016) için NCEP tarafından sağlanan rüzgar alanlarını kullanmıştır.

Karadeniz'in yakın gelecekteki (2021–2050) rüzgar gücü potansiyeli iki iklim senaryosuna göre Ganea vd. (2018) tarafından değerlendirilmiştir. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekteki iklim projeksiyonları, SMHI tarafından sağlanan RCA4 benzeşimleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Tarihsel (1981–2010) analizler için hem SMHI tarafından sağlanan RCA4 benzeşimleri hem de ECMWF tarafından sağlanan ERA-Interim rüzgar alanları kullanılmıştır. Yirmi dört referans noktasında yapılan detaylı analizler, yüzyılın ortalarına kadar dikkate alınan iki RCP senaryosu arasındaki farkların çok yüksek olmamasından dolayı, iki iklim senaryosunun öngördüğü rüzgar hızları arasında belirgin bir farklılığın (0.4 m/s'den küçük) olmayacağını göstermiştir. Benzer sonuçlar Rusu (2019b) tarafından Karadeniz'in yakın gelecekteki (2021–2050) rüzgar kaynaklarının değerlendirmesi için de belirlenmiştir. SMHI RCA4 tarafından RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için öngörülen rüzgar alanları kullanılmıştır. Tarihsel dönem (1976–2005) için RCA4 tarihsel rüzgar alanları kullanılarak değerlendirmiştir. Rusu (2019b), iki iklim senaryosuna göre öngörülen ortalama rüzgar gücü arasında gelecekte büyük farklılıkların olmayacağını rapor etmiştir.

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre Karadeniz'in yakın gelecek (2021–2050) ve uzak gelecek (2071–2100) dönemlerindeki dalga gücü potansiyeli Rusu (2019c) ve (2020) tarafından araştırılmıştır. Gerekli olan dalga parametreleri, SMH RCA4'ten sağlanan EC-EARTH iklim verileri için SWAN ile elde edilmiştir. Rusu (2019c) yakın gelecekte (2021–2050) iki iklim senaryosuna göre dalga gücünün batı ve kuzeydoğu Karadeniz'de artacağını, güneydoğu Karadeniz'de azalacağını rapor etmiştir. Diğer taraftan Rusu (2020), uzak gelecekte (2071–2100) iki iklim senaryosuna göre dalga gücünün neredeyse tüm Karadeniz'de azalma eğiliminde olacağını belirtmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Karadeniz üzerinde daha önce yapılan rüzgar ve dalga iklim çalışmaları çoğunlukla yeniden analiz verileri kullanılarak gerçekleştirilmiş, geleceğe yönelik projeksiyon verileri ve bu verileri girdi olarak kullanan üçüncü nesil spektral dalga modeli ile yapılan çalışmalar çok kısıtlı kalmaktadır.

Bu çalışmada küresel iklim değişikliğinin Karadeniz'de rüzgar ve dalga iklimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki gibi çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Karadeniz rüzgar iklimi; önce yeniden analiz verileri kullanılarak 1979–2018 yılları için *rüzgar iklimi* belirlenmiş daha sonra küresel iklim değişikliğinin rüzgar iklimi üzerindeki olası etki/etkilerini araştırmak için rüzgar projeksiyon verileri yardımıyla 2021–2100 yılları için *rüzgar iklim projeksiyonu* irdelenmiştir. Karadeniz'in mevcut ve gelecekteki *rüzgar iklimi,* rüzgar karakteristikleri (ortalama rüzgar hızı, maksimum rüzgar hızı, rüzgar hızının persantil değerleri), fırtına karakteristikleri (fırtına şiddeti, fırtına sıklığı ve fırtına süresi) ve ekstrem değer analizi ile değerlendirilmiştir.
- Karadeniz dalga iklimi; önce yeniden analiz rüzgar verilerini girdi olarak kullanan üçüncü nesil sayısal dalga modelleri (MIKE21 SW ve SWAN) ile 1979–2018 yılları için *dalga iklimi* belirlenmiş daha sonra küresel iklim değişikliğinin dalga iklimi üzerindeki olası etki/etkilerini araştırmak için üçüncü nesil sayısal dalga modeli (MIKE21 SW) ile 2021–2100 yılları için *dalga iklim projeksiyonu* incelenerek değerlendirilmiştir. Karadeniz'in mevcut ve gelecekteki dalga iklimi, dalga karakteristikleri (belirgin ve maksimum dalga yüksekliği, ortalamam ve pik dalga periyodu) ve fırtına karakteristikleri (fırtına şiddeti, fırtına sıklığı ve fırtına süresi) ve ekstrem değer analizi ile irdelenmiştir.

1.3 Hipotez

Karadeniz'in rüzgar ve dalga ikliminin araştırıldığı bu çalışmada hipotez aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

H1) Karadeniz *rüzgar karakteristikleri* ve *rüzgar gücü* uzun dönemli değişim eğilimindedir.

H1-1) 1979–2018 yılları için ECMWF ERA-Interim verileri ile değerlendirilen Karadeniz *rüzgar karakteristikleri* ve *rüzgar gücü,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H1-2) 1979–2018 yılları için NOAA NCEP CFSR+CFSv2 rüzgar verileri ile değerlendirilen Karadeniz *rüzgar karakteristikleri* ve *rüzgar gücü*, uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H1-3) 1979–2018 yılları için farklı rüzgar verileri ile değerlendirilen Karadeniz *ekstrem rüzgar iklimi,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H2) Karadeniz *ortalama deniz seviyesi basıncı,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H3) Karadeniz *deniz seviyesi,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H4) Karadeniz *deniz yüzeyi sıcaklığı,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H5) Karadeniz *dalga karakteristikleri,* uzun dönemli değişim eğilimindedir.

H5-1) *MIKE 21 SW* yazılımına girdi olarak kullanılan ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR rüzgar verileri ile elde edilen 40 yıllık (1979–2018) *dalga karakteristikleri,* uzamsal ve zamansal olarak değişim eğilimindedir.

H5-2) *SWAN* yazılımına girdi olarak kullanılan ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR rüzgar verileri ile elde edilen 40 yıllık (1979–2018) *dalga karakteristikleri* ve *dalga gücü*, uzamsal ve zamansal olarak değişim eğilimindedir.

H2-3) Üçüncü nesil spektral dalga modelleri yardımıyla elde edilen 40 yıllık dalga karakteristikleri ile yapılan *ekstrem dalga iklimi,* uzamsal ve zamansal olarak değişim göstermektedir.

H6) Karadeniz *rüzgar karakteristikleri* ve *rüzgar gücü,* küresel iklim değişikliğinin etkisi altında değişim eğilimindedir.

H6-1) Bölgesel sirkülasyon modelinden (RCM) RCA4 iklim veri seti (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR) kullanılarak 1979–2005 yılları için elde edilen *tarihsel rüzgar iklimi*, uzamsal olarak değişim göstermektedir.

H6-2) RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) *rüzgar iklim ve rüzgar gücü projeksiyonu*, tarihsel (1970–2005) döneme göre değişim göstermektedir.

H6-3) RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) *rüzgar iklim ve rüzgar gücü projeksiyonu*, tarihsel (1970–2005) döneme göre değişim göstermektedir.

H7-4) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının *ekstrem rüzgar iklimi ve karakteristikleri* üzerinde daha belirgin etkisi gözlenmektedir.

H7) Karadeniz *dalga karakteristikleri* küresel iklim değişikliğinin etkisi altında değişim eğilimindedir.

H7-1) MIKE 21 SW modeline girdi olarak kullanılan RCA4 iklim veri seti (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR) ile 1979–2005 yılları için elde edilen *tarihsel dalga iklimi* uzamsal olarak değişim göstermektedir.

H7-2) RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) *dalga iklim projeksiyonu*, tarihsel (1970–2005) döneme göre değişim göstermektedir.

H7-3) RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) *dalga iklim projeksiyonu*, tarihsel (1970–2005) döneme göre değişim göstermektedir.

H7-4) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının *ekstrem dalga iklimi ve karakteristikleri* üzerinde daha belirgin etkisi gözlenmektedir.

2 YENİDEN ANALİZ RÜZGAR VERİ KAYNAKLARI

2.1 Giriş

Dünya üzerinde ölçülen kara, deniz ve hava ölçümlerinin yer aldığı birçok veri tabanı bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları aşağıda verilmiştir.

- Kutup Sistemi Yeniden Analizi (Arctic System Reanalysis, ASR)
- COSMO Yeniden Analiz (COSMO-REA)
- ECMWF (ERA-Interim, ERA-40, ERA-15, ERA-20C)
- Japonya Meteoroloji Ajansı (Japanese Reanalysis, JRA-25, JRA-50)
- ✤ NASA-MERRA, NASA-MERRA2
- NOAA (CFSR, NCEP/NCAR R1, NCEP/DOE R2, NARR, 20. YY Yeniden Analiz [V2, V2c])

Bu veri tabanları; benzeştirme yöntemi (gözlem değerleri ile model değerlerinin birleştirilmesi), uzamsal ve zamansal çözünürlüğü, model alanı (Kuzey Kutbu, Kuzey Amerika, Küresel) ve kapsadığı süreç bakımından birbirlerinden ayrılmaktadır.

Bu veri tabanlarından dalga modeline girdi olarak kullanılacak (10 m yükseklikteki u hızı (m/s), 10 m yükseklikteki v hızı (m/s) ve ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa)) parametreler, çalışılacak zaman aralığı (bu çalışma için 1979–2018), çalışma alanı (Karadeniz) göz önüne alındığında **ECMWF** ve **NOAA** veri tabanları detaylı olarak incelenecektir (**Tablo 2.1**).

Adı	Kaynak	Zaman uzunluğu	Zamansal	Uzamsal
ERA5		1979–	1 sa 6 sa	0.25°x0.25°
ERA-Interim		1979–2019	6 sa	0.75°x0.75° 1°x1° 1.125°x1.125° 1.5°x1.5° 2°x2° 2.5°x2.5° 2°x2°
				Kullanıcı tanımlar
ERA-Interim/Land		1979 – 2010	6 sa	0.125°x0.125°
ERA-40	ECMWF	1957 – 2002	6sa	0.225°x0.225°
ERA-15		1979 – 1993	6sa	0.25°x0.25°
ERA-20C		1900 – 2010 3sa		$0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$
ERA-20CM		1900 – 2010	3sa	0.75°x0.75°
CERA-SAT		2008 – 2016	3 sa	1°x1°
CERA-20C			1901 – 2010	3 sa
				Kullanıcı Tanımlar
NCEP CFSR		1979–2010	1sa 6sa	0.312°x0.312° 0.5°x0.5° 1.875°x1.904° 2.5°x2.5°
NCEP CFSv2	NOAA	2011–	1sa 6sa	0.205°x0.204° 0.5°x0.5° 1.875°x1.904° 2.5°x2.5°
NCEP/NCAR R1		1948-	6sa	2.5°x2.5°
NCEP/DOE R2		1979–	6sa	2.5°x2.5°
NCEP NARR		1979–	3sa	0.3°x0.3°

2.2 ECMWF

1975 yılında kurulan, Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF, European Centre for Medium Range Weather Forecasts), 34 eyalet tarafından desteklenen bağımsız bir uluslararası kurumdur. Kurumun merkezi İngiltere'de Londra'nın batısında Reading kasabasında yer almaktadır (ECMWF, 2018).

ECMWF hem bir araştırma enstitüsü hem de 7/24 operasyonel bir hizmet vermektedir. Üye devletlere sayısal hava tahminleri üretmekte ve iletmektedir. Bu veriler, üye ülkelerdeki ulusal meteorolojik hizmetlere tamamen açıktır (ECMWF, 2018). Türkiye'de, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ECMWF'nin temsilcisidir. DMİ, ECMWF'nin verilerine giriş iznine sahiptir ve aynı zamanda bu iki kurum karşılıklı bilgi alışverişinde bulunmaktadır.

ECMWF, *atmosfer, kara yüzeyi ve okyanusların* yakın geçmişlerini tanımlayan küresel veri setleri oluşturarak, arşivlenmiş gözlemlerin *'yeniden analiz edilmesi'* amacıyla belirli aralıklarla tahmin modellerini ve veri toplama sistemlerini kullanmaktadır. Yeniden analiz verisi; iklim değişikliğini gözlemlemek, araştırma ve eğitim çalışmaları ve ticari uygulamalar için kullanılmaktadır (ECMWF, 2018)

2.2.1 İklim yeniden analiz nedir?

Gözlem değerleri ile modellenenlerin birleştirilmesiyle elde edilen, güncel hava tahmininin sayısal bir açıklamasıdır (**Şekil 2.1**).



Şekil 2.1 Yeniden analiz yapılandırması (Poli, 2013)

Yeniden analiz veri setleri farklı rakımlardaki hava sıcaklığı, basınç ve rüzgar gibi atmosferik parametreler ile yağış miktarı, toprak nem içeriği ve deniz yüzeyi sıcaklığı gibi yüzey parametrelerinin tahminini kapsamaktadır. Bu tahminler yeryüzündeki tüm konumlar için üretilmektedir ve on yıllarca ya da daha fazla geriye uzanabilen uzun bir zaman süresini kapsamaktadır. İklim yeniden analiz verileri terabaytlarca yer kaplayan geniş veri setlerinden oluşmaktadırlar. Bu yeniden analiz veri setleri .grib ya da net CDF (**NET**work **C**ommon **D**ata **F**orm) formatında kamu kullanımına uygun hale getirilmiştir (ECMWF, 2018).

2.2.2 İklim gözlemi için yeniden analiz

İklim değişimini gözlemlemek, gözlem ve yeniden analizlere zamanında erişilmesini gerektirmektedir. Tüm yeniden analiz süresince tutarlı bir veri seti elde etmek amacıyla tek bir model versiyonu ve veri benzeştirme yöntemi kullanmak, yeniden analiz için önemli bir gerekliliktir. Eğer yeniden analiz gerçek zamana yakın devam ettirilebilirse, iklimdeki değişimleri ve uzun zaman ölçeğindeki değişkenliği gözlemlemek için kullanılabilmektedir (ECMWF, 2018).

ECMWF'de birçok analiz edilmiş veri setleri mevcuttur. Kullanıcısına geniş aralıkta uzamsal çözünürlük sunmasının yanı sıra 'Kullanıcı tanımlar' komutu ile istenilen çözünürlükte veri alınmasına imkan vermektedir. ECMWF'deki veri setlerinden hangisinin kullanılacağı çalışma için belirlenen parametreler ve analiz edilecek zaman aralığı dikkate alınarak seçilecektir. **Tablo 2.1**'de ECMWF için verilen veri setleri aşağıda açıklanmıştır.

2.2.3 ERA5

ERA5, ECMWF küresel hava ve ikliminin beşinci nesil atmosferik yeniden analiz veri setidir ve 1950 yılından günümüze kadar olan dönemi kapsayan küresel iklim verilerini sunmaktadır. Bu yeniden analiz veri seti Avrupa Birliği tarafından finanse edilen Kopernik İklim Değişikliği Servisi (Copernicus Climate Change Service, C3S) tarafından üretilmektedir.

2.2.4 ERA-Interim

ERA-Interim 1979 yılından 2018 Ağustos ayına kadar gerçek zamanlı olarak sürekli güncellenen küresel atmosferik yeniden analizdir. MARS (ECMWF'deki meteorolojik verilerin ana deposu) ve veri sunucusundaki ERA-Interim sonuçlarının kalite kontrolü ve oluştuğunda üretimdeki teknik sorunların giderilmesi için iki aylık bir gecikmeye müsaade edecek şekildedir ve ayda bir güncellenmektedir (ECMWF, 2018).

ERA-40, 1957–2002 arasındaki 46 yıllık atmosferik yeniden analizdir.

ERA-15, 1900–2010 arasındaki 15 yıllık atmosferik yeniden analizdir.

2.2.5 ERA-Interim/Land

ERA-Interim/Land, kara yüzeyi parametrelerini 1979 yılından 2010 yılına kadar olan, yatayda 80 km'lik uzamsal çözünürlükte inceleyen küresel yeniden analizdir.

Toprak, bitki örtüsü, kar gibi bileşenlerin küresel kara yüzeyi durumunun (nem içeriği ve/veya sıcaklığı) gelişimini anlamak ve araştırmak için kullanılmaktadır. Son yıllardaki iklim değişikliği etkisini anlamak için bu konular oldukça önemlidir (ECMWF, 2018).

2.2.6 ERA-20C

ECMWF'nin 20.yy'da, 1900–2010 arasındaki ilk atmosferik yeniden analizidir. Sadece yüzey basınç ve yüzey deniz rüzgarlarının gözlemlerini benzeştirmektedir. ERA-CLIM projesinin bir sonucudur (ECMWF, 2018).

2.2.7 ERA-20CM

ECMWF'nin 1900–2010 yılları için on atmosferik model entegrasyonunu tanımlamaktadır. ERA-20CMv0 ve ERA-20CM olmak üzere iki versiyonu vardır. Her biri 10 üyeli bir topluluktan oluşan iki projenin sonucudur (CMIP5 ve HadISST2). Atmosferik gözlemler benzeştirilmediğinden bu veri deposu iklimin istatistiksel bir tahminini vermektedir (Hersbach vd., 2015).

CERA-20C, 1901–2010 yılları arasında 20. yüzyılın iklim yeniden analizidir. Yüzey basıncı ve yüzey deniz rüzgarı gözlemlerinin yanı sıra okyanus sıcaklığı ve tuzluluk profillerinini benzeştiren CERA benzeşim sistemini temel almaktadır. ECMWF'deki 10 üyeli topluluğun CERA benzeşim sistemi ile gerçekleştirdiği benzeşimleri içermektedir. ERA-CLIM2 projesinin bir sonucudur (ECMWF, 2018).

2.2.9 CERA-SAT

CERA-SAT, 2008 ile 2016 yılları arasında 8 yıllık bir yeniden analiz veri setidir. ERA-CLIM2 projesi kapsamında, modern uydu çağında bulunan tam gözlem sistemi ile birlikte birleştirilmiş yeniden analizdir. CERA-SAT, CERA benzeşim sistemini kullanan 10 üyeli bir topluluktan oluşmaktadır (ECMWF, 2018).

2.3 NOAA

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Amerika Birleşik Devletleri'nin Dünya'daki hava ve deniz olaylarını araştırması amacıyla görevlendirilmiş bir kurumudur. 1807 yılında kurulmuş olan NOAA, hava, deniz ve gökyüzündeki tehlikeleri araştırıp, okyanus ve kıyı kaynaklarının korunması konusunda araştırma ve geliştirme yapmaktadır. Ulusal hava merkezinin en temel birimidir ve ABD'nin ticari bölümü içinde yer almaktadır, merkezi Maryland-Silver Spring'dedir (NOAA, 2015).

2.3.1 Yeniden analiz veri setleri

İklim tahmininde kullanmak için yeniden analiz veri setlerini sağlamaktadır. Yeniden analiz veri setleri; iklim istatistikleri üzerindeki modelleme değişikliklerinin etkilerini azaltmak için tüm yeniden analiz periyodu boyunca, iklim gözlemlerinin aynı model kullanılarak benzeştirilmesiyle (girdi sağlayarak) oluşturulmuştur. Gözlemler; gemiler, uydular, yer istasyonları, RAOB'lar ve radar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan alınmaktadır (RAOB: Isı, basınç, nem yükseklik, rüzgar gibi gözlemleri içermektedir). Bu yeniden analiz veri setleri .nc formatında kamuya uygun hale getirilmiştir (NOAA, 2010). NOAA birçok alt birimden oluşmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- ESRL (Earth System Research Laboratory)
- NCDC (National Climatic Data Center)
- NCEP (National Centers for Environmental Prediction)
- NCEP/NCAR (National Center for Atmospheric Research) RI
- NCEP/DOE (Department of Energy) R2
- NCEP NARR (North American Regional Reanalysis)

2.3.2 NCEP/NCAR R1

Bu yeniden analiz NOAA için türünün ilk örneğidir. NCEP, çok çeşitli hava durumu gözlemleri (gemiler, uçaklar, RAOB'lar, istasyon verisi, uydu gözlemleri vb.) ile başlatılan aynı iklim modelini kullanmaktadır Aynı model kullanılarak, model değişikliklerinin neden olabileceği sorunlar olmaksızın iklim/hava durumu istatistikleri ve dinamik süreçleri incelenebilmektedir. Gerçek zamanlı gözlemler kullanılarak veri seti sürekli güncel tutulmaktadır (NOAA, 2010).

2.3.3 NCEP/DOE R2

NCEP, kendi ilk yeniden analizlerinin ikinci bir sürümünü üretmiştir. İkinci sürümde, birinci sürüme kıyasla, daha fazla gözlem verileri eklenmiş, benzeştirme hataları giderilmiş ve modelin daha iyi bir sürümü kullanılmıştır (NOAA, 2010).

2.3.4 NCEP NARR

NARR yeniden analizi, Kuzey Amerika bölgesinde çok yüksek çözünürlüklü çıktı üretmek için yapılmıştır. Gözlemsel veriler benzeştirilen yağışın da ilavesiyle NCEP I'e benzemektedir. NARR model bölgesi; küresel, daha düşük çözünürlüklü model içine yerleştirilmiştir. Çıktılar, daha fazla kar, buz ve yağış ile ilgili değişkenlerin eklenmesiyle NCEP I ve II modellerine benzemektedir (NOAA, 2010).

2.3.5 20. Yüzyıl Yeniden Analiz (V2 ve V2c)

20. Yüzyıl Yeniden Analiz Sürüm2 ve 2c veri seti, 1851–2014 arasında altı saatlik aralıklarla alınan küresel hava durumunu ve bunların belirsizliğini kapsamaktadır. Yüzey ve deniz seviyesi basınç gözlemleri, atmosferin tam durumunu tahmin etmek ve bu tahmindeki belirsizlikleri gidermek için Ensemble Kalman Filter tekniğinin en gelişmiş versiyonunu kullanan NCEP sayısal hava durumu tahmin modelinin entegrasyonlu bir oluşumundan alınan, kısa dönemli tahminle birleştirilmiştir. İlave gözlemler ve zamanla değişen CO₂ konsantrasyonu, solar değişkenlikler ve volkanik aerosolları kapsayan NCEP modelinin yeni bir sürümü, Versiyon 2'de kullanılmıştır. Bu veri setinin uzun zaman aralığı bilim adamlarına, Pasifik Onyıl Salınımı ve Atlantik Onlarca yıl Salınımı gibi daha uzun dönem ölçekli iklim süreçlerini incelemelerini ve bunların yanında tarihsel iklim ve hava durumu olaylarının dinamiklerine bakmalarını sağlamıştır. Doğrulama testleri ile sadece basıncı kullanımanın troposfere kadar olan alanda daha uygun atmosferik alanlar oluşturduğunu göstermiştir (NOAA, 2010).

2.3.6 NCEP/CFSR+CFSv2

NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), 1979–2010 yıllarını kapsamaktadır. Bu veri setinin saatlik ve 6 saatlik çözünürlükleri mevcuttur. Ancak, tüm parametreler tüm çözünürlüklerde mevcut değildir, bu yüzden mevcut olanın tam tanımları için ayrıntılı incelenmelidir. 2011'den geleceğe uzanan gerçek zamanlı yeniden analizi ise CFSv2'dir. Bu yeni ürün, CFSR'yi oluşturmak için kullanılan aynı modelin sonucudur.

2.4 ECMWF ve NOAA Veri Tabını için Veri Setlerinin Seçimi

2.4.1 ECMWF veri tabanı

Rüzgar ve dalga ikliminin araştırıldığı bu çalışmada gerekli olan parametreler (10 m u (m/s), 10 m v (m/s), ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa)), zaman aralığı (1979–2018) ve çalışma alanı düşünüldüğünde ECMWF için ERA-Interim seçilmiştir. Bu seçim ile analiz edilecek zaman aralığı tek bir veri tabanından

alınmıştır ve böylece veri setlerinin, gözlemleri benzeştirme yöntemlerinin farklılığından arındırılmıştır.

NOT: 1979–2018 yılları için yeniden analiz verileri ile yapılan Karadeniz rüzgar iklim çalışmalarında ERA5 verileri yerine ERA-Interim rüzgar verilerinin kullanılmasının sebebi, araştırmaların başladığı 2015–2016 yıllarında ERA5 verilerinin henüz gelişme aşmasında olmasındandır. Tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında, rüzgar iklim projeksiyonlarının yeniden analiz rüzgar verileri ile karşılaştırma çalışmalarında (Bölüm 6), araştırmalar hem ERA-Interim hem de ERA5 rüzgar verileri için gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ECMWF ERA-Interim veri tabanından indirilen rüzgar verileri;

- 10 m yükseklikteki u rüzgar hız bileşeni (m/s)
- 10 m yükseklikteki v rüzgar hız bileşeni (m/s)
- Ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa)'dır.

ECMWF ERA-Interim veri tabanının atmosferik modelinden elde edilen 10 m yükseklikteki u ve v rüzgar hız bileşenleri (m/s) sırasıyla enlem ve boylamda su yüzeyinden 10 metre yukarısındaki rüzgar hızlarına karşılık gelmektedir. Yönleri kartezyen koordinat sistemiyle aynıdır. u hız bileşeninin pozitif yönü doğuya, v hız bileşeninin pozitif yönü ise kuzeye doğrudur. Rüzgar hız bileşenlerinin uzamsal çözünürlüğü enlemde ve boylamda 0.25°'dir (ECMWF, 2008; Janssen vd., 2005).

Çalışmada kullanılacak olan veriler, 01/01/1979 ve 12/31/2018 tarihleri arasındaki rüzgar verilerini içermektedir. Bu verilerin zamansal çözünürlüğü 6 saattir. Bu çözünürlük, tüm Karadeniz çalışma alanı için temin edilen veri tabanında her bir noktada günde 4 kez veri kaydının olduğu, yani bir nokta için yılda 1460 adet veri kaydı alındığı anlamına gelmektedir. Toplam 40 yıllık veri olduğundan bir noktadaki toplam veri kaydı 58400 adettir. Temin edilen verilerin uzamsal çözünürlüğü 0.25°x0.25° olduğundan tüm Karadeniz üzerinde ağlara bölünen alanda, her bir ağın kesişim noktası, veri kaydını temsil etmektedir. Bu sayısal ağ, tüm Karadeniz üzerinde 65x29'luk bir matrise karşılık gelmektedir. Tüm çalışma alanı dikkate alındığında, anlık bir veri kaydında 1885 adet veri bulunmaktadır.

Çalışmada kullanılan 10 m yükseklikteki u ve v rüzgar hız bileşenleri (m/s) ve ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa) ECMWF veri tabanından yıllık dosyalar halinde indirilmiştir. Bu üç parametreyi de içeren 40 yıl için, 40 adet veri dosyası oluşturulmuştur.

ECMWF ERA-Interim'den temin edilen bütün veriler GRIB uzantılı dosya formatında indirilmiştir. GRIB dosya formatı; veri alışveriş ve biriktirme formatıdır. Bu dosya formatında veriler, etkin bir şekilde paketlenmekte, sıkıştırılmakta ve bu yolla verilerin biriktirilmesi ve iletilmesi etkin bir biçimde yapılmaktadır. Ancak, GRIB dosyalar içindeki verilerin bu dosyaların içinden çıkarılmadan herhangi bir yazılımda açılması ve/veya okunabilmesi mümkün olamamaktadır. GRIB dosyalarından verilerin çıkarılabilmesi için özel bir yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla çok az program mevcuttur. Bu çalışmada, dosyalar önce .txt formatına daha sonra kullanılacak olan dalga modelinin okuyacağı formata dönüştürülmüştür.

ECMWF ERA-Interim veri tabanından alınan verilerin uzamsal çözünürlüğü 0.25°x0.25°, zamansal çözünürlüğü 6 saattir. **Şekil 2.2**, ECMWF ERA-Interim veri tabanı kullanılarak dikkate alınan çalışma bölgesi, Karadeniz'de 26°–42°E ve 40°–47°N sınırları, için herhangi bir zamandaki bileşke hızı göstermektedir.



Şekil 2.2 ECMWF ERA-Interim verileri ile 1 Ocak 1982 18:00 için hesaplanan bileşke rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

2.4.2 NOAA veri tabanı

Çalışmada gerekli olan (10 m u ve v hız bileşenleri (m/s)) veriler, NCEP/DOE R2 (1979–) veri setinde olmadığından, bu veri seti elenmiştir. NCEP/NCAR R1 (1948–), NCEP; CFSR (1979–2010) ve CFSv2 (2011–)'de istenilen veriler yer aldığından rüzgar girdisi olarak kullanılabilir sonucuna ulaşılmıştır. NCEP/NCAR R1 (1948-) sadece 2.5°x2.5° uzamsal çözünürlükte verilere sahip olduğundan bu çözünürlük seçilmemiştir. NCEP; CFSR (1979-2010) ve CFSv2 (2011-) ise her iki sürümde de en ince 0.5°x0.5° çözünürlük olduğundan seçilmiştir.

2.4.2.1 NCEP/NCAR R1

NCEP/NCAR R1 veri setinden Karadeniz'de 25°–42.5°E ve 40°–47°N sınırları için aşağıdaki verileri dikkate alınmıştır.

- 10 m yükseklikteki u rüzgar hız bileşeni (m/s)
- 10 m yükseklikteki v rüzgar hız bileşeni (m/s)
- Ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa)'dır.

Çalışmada kullanılan veriler, 01/01/1979 ve 12/31/2018 tarihleri arasındaki rüzgar verilerini içermektedir. Bu verilerin zaman çözünürlüğü 6 saattir. Bu çözünürlük, tüm Karadeniz için temin edilen veri tabanında her bir noktada günde 4 kez veri alındığı ifade etmektedir. Her bir yıl için ayrı ayrı u, v ve p dosyaları oluşturulmuş 40 yıl analiz edileceği için toplamda 40x3 dosya Temin edilen verilerin uzamsal cözünürlüğü 2.5°x2.5° hazırlanmıştır. olduğundan tüm Karadeniz üzerinde 4x8'lik bir matrise karşılık gelmektedir. Böylelikle, tüm çalışma alanı dikkate alındığında, anlık bir veri kaydında 32 adet veri bulunmaktadır. Bu veri seti ECMWF ERA-Interim'den elde edilen veri seti ile karşılaştırıldığında çok kaba kalmaktadır. ECMWF ERA-Interim veri seti Karadeniz üzerinde 1885 nokta dikkate alırken, NCEP/NCAR R1, 32 nokta dikkate alması (uzamsal çözünürlüğü nedeniyle), bu veri setinin oldukça kaba bir çözünürlüğe sahip olduğunu ve çalışma alanının rüzgar iklimi için yeteri ayrıntıya imkan veremediğini göstermektedir.

Şekil 2.3, NOAA NCEP/NCAR R1 veri tabanı kullanılarak dikkate alınan çalışma bölgesi, Karadeniz'de 26°–42°E ve 40°–47°N sınırları, için herhangi bir zamandaki bileşke hızı göstermektedir.





2.4.2.2 NCEP CFSR ve CFSv2

NCEP CFSR ve CFSv2 veri setinden Karadeniz'de 26°–42°E ve 40°–47°N sınırları için aşağıdaki verileri alınmıştır.

- 10 m yükseklikteki u rüzgar bileşeni (m/s)
- 10 m yükseklikteki v rüzgar bileşeni (m/s)
- Ortalama deniz seviyesi basıncı (Pa)'dır.

Çalışmada kullanılan veriler, 01/01/1979–01/01/2010 için CFSR ve 01/01/2010–12/31/2017 için CFSv2'den alınmıştır. Bu verilerin zamansal çözünürlüğü 1 ve 6 saatlik verilerden oluşmaktadır. Zamansal olarak saatlik, uzamsal olarak 0.5°x0.5° çözünürlüğe sahip veriler analiz edilmiştir. Bu da Karadeniz üzerinde 15x33'lik bir matrise karşılık gelmektedir. Böylelikle, tüm çalışma alanı dikkate alındığında, anlık bir veri kaydında 495 adet veri bulunmaktadır. ECMWF ERA-Interim'den alınan veri seti Karadeniz üzerinde 1885 nokta, NCEP/NCAR R1 32 nokta, CFSR 495 nokta dikkate alması bu veri setinin ECMWF ERA-Interim'den elde edilen veri setine göre uzamsal olarak daha kaba ancak NCEP/NCAR R1'e göre daha ince olduğu sonucuna ulaştırmıştır. Zamansal olarak 1 saatlik verileri ile CFSR+CFSv2 bir yıl için 8760 zaman adımına sahip iken 6 saatlik çözünürlüklü ERA-Interim için bir yıllık verinin 1460 zaman adımına sahip olması, CFSR+CFSv2 verilerinin zamansal olarak daha ince olduğu anlamına gelmektedir.

Bu veri setlerinin incelenmesiyle zamansal ve uzamsal çözünürlüklerin veriler üzerindeki etkisi incelenecektir. Her iki veri seti ile de yapılan rüzgar iklimi tahmini karşılaştırılacaktır. Gerek duyulması halinde CFSR ve CFSv2 için diğer uzamsal çözünürlükler de değerlendirilmiştir.

Şekil 2.4 NOAA NCEP CFSR Veri tabanı kullanılarak dikkate alınan çalışma bölgesi, Karadeniz'de 26°–42°E ve 40°–47°N sınırları, için herhangi bir zamandaki bileşke hızı göstermektedir.



Şekil 2.4 NCEP CFSR verileri ile 1 Ocak 1982 18:00 için hesaplanan bileşke rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

Tablo 2.2, **Tablo 2.1**'de verilenler arasından yapılan seçimleri ve bu seçimlerin kısa bir özetini göstermektedir.

	Zaman	Çözüni	ürlük	1 yıl için		
Veri Kaynağı	Uzunluğu	Uzunluğu Uzamsal		Zaman	Boyutu	Eleman
				aumn		349131
ECMWF→ERA-Interim	1979–2018	0.25°x0.25°	6 sa.	1460	29x65	1885
NOAA→NCEP/NCAR R1	1979–2018	2.5°x2.5°	6 sa.	1460	4x8	32
NOAA \rightarrow NCEP CFSR	1979–2010	0 5°x0 5°	1 sa	8760	15x30	495
NOAA→NCEP CFSv2	2011-2018	0.5 X0.5	i bu.	0,00	10/100	170

Tablo 2.2 Yeniden analiz için dikkate alınan veri kaynakları ve karakteristiközellikleri
Çalışma kapsamında dikkate alınan ECMWF ve NOAA NCEP veri tabanlarından indirilen veriler matris olarak düşünülürse, sadece uzamsal çözünürlük iki boyutlu bir matrisi, zamansal çözünürlük ile de üç boyutlu bir matrisi tanımlamaktadır. Tüm Karadeniz çalışma alanını; ECMWF ERA-Interim 0.25°x0.25° uzamsal çözünürlük için (30x66) matris ile, NOAA NCEP/NCAR R1 2.5°x2.5° uzamsal çözünürlük için (4x8) matris ile, NOAA NCEP/CFSR+CFSv2 verileri 0.5°x0.5° uzamsal çözünürlük için (15x33) matris ile tanımlamaktadır. Şekil 2.5, bu veri tabanlarından indirilen verilerin bir yıllık zaman adımı ile birlikte değerlendirildiğinde elde edilen üç boyutlu matrisi göstermektedir.



Şekil 2.5 Çalışma kapsamında dikkate alınan verilerin x-y-t olarak üç boyutlu matrisi

Bu çalışmada 1979–2018 zaman aralığını kapsayan 40 yıl dikkate alınmıştır. Dolayısıyla 40 yılı kapsayan tüm zaman adımları dikkate alındığında Karadeniz çalışma alanını tanımlayan matris; ECMWF ERA-Interim, NCEP/NCAR R1 ve NCEP/CFSR 30x66x(1460x40), verileri için sırasıyla 4x8x(1460x40), 15x33x(8760x40) boyutunda elde edilmiştir. Bu çalışmada NCEP/NCAR R1 verilerinin, ECMWF ERA-Interim verilerine göre neredeyse 10 kat, NCEP/CFSR verilerine göre nerdeyse 5 kat daha kaba olması (yani Karadeniz çalışma alanını yalnızca 32 eleman ile temsil etmesi), uzamsal çözünürlüğünün bölgesel ve yerel ölçekte detaylı araştırmalar yapmaya yetersiz kalması sebepleriyle NCEP/NCAR R1 veri seti, araştırma kapsamı dışında bırakılmış ve detaylı analizlere ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR verileri ile devam edilmiştir.

3.1 Rüzgar İklim Verileri

Rüzgar iklim değerlendirmesi, en büyük (ekstrem) değer rüzgar istatistiği, rüzgar gücü analizleri için uzun dönemli rüzgar verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu analizlerin güvenilir olması için (Swain, 1997) en az 10 ila 30 yıllık verilerden yapılan analizlerin kabul edilebilir olduğunu belirtmiştir.

Rüzgar iklim verileri,

- Yerinde yapılan uzun süreli ölçümlerden,
- Kıyı alanlarındaki meteoroloji istasyonlarından,
- ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) veya NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) gibi uluslararası hava tahmin merkezlerinden elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada Karadeniz rüzgar ikliminin belirlenmesi için uzun dönemli rüzgar verileri kullanılarak, ortalama rüzgar hızı, maksimum rüzgar hızı, rüzgar hızının 99., 95. ve 90. persantil değerleri, fırtına sıklığı, fırtına şiddeti ve rüzgar hızının değişim katsayısı hesaplanmıştır. Uzun dönemli rüzgar verileri için ECMWF ve NOAA/NCEP veri tabanlarından (Detaylı bilgi için Bakınız Bölüm 2) 10 m yükseklikteki u ve v (m/s) rüzgar hız bileşenleri 1979–2018 yılları için indirilmiştir. Karadeniz üzerindeki ortalama deniz seviyesi basıncı, aynı veri tabanlarından elde edilmiş ve ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz rüzgar iklimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ECMWF ERA-Interim (bundan sonra ERA-Interim) verileri uzamsal olarak 0.25°x0.25°, zamansal olarak 6 saat çözünürlükte iken NCEP/CFSR (bundan sonra CFSR) verileri uzamsal olarak 0.5°x0.5°, zamansal olarak 1 saat çözünürlüktedir. Karadeniz çalışma alanı üzerindeki deniz seviyesi değişimlerini (Sea Level Anomaly, SLA) değerlendirmek için kullanılan çok amaçlı altimetre verileri

uzamsal olarak 0.125°x0.125° ve zamansal olarak günlük çözünürlüğe sahiptir. Bu veri seti için 1993–2018 yıllarını kapsayan 26 yıllık deniz seviyesi değişimi irdelenmiştir. Karadeniz üzerindeki deniz yüzey sıcaklığını değerlendirmek için 0.25°x0.25° uzamsal çözünürlüğe ve 1 günlük zamansal çözünürlüğe sahip olan deniz yüzey sıcaklığı değişimleri (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) incelenmiştir. Bu veri seti için 1981–2018 yılları arasındaki 38 yıllık Karadeniz'in yüzeyi sıcaklığı değişimi araştırılmıştır.

Rüzgar verileri kullanılarak uzun dönem ve en büyük değer istatistikleri yapılabilmektedir. Uzun dönem rüzgar istatistiği genellikle operasyonel amaçlar için kullanılmasına karşın en büyük değer istatistiği çoğunlukla boyutlandırma ve tasarım yüklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Saatlik ortalama rüzgar hızlarının yönlere göre frekans dağılımlarının yıllık ve mevsimsel olarak belirlenmesi, uzun dönem rüzgar istatistiğidir. En büyük değer rüzgar istatistiği ise, en yüksek rüzgar hızlarının uzun süreli yinelenme dönemleri için belirlenmesidir (10, 50, 100, ... yıllık yinelenme dönemleri gibi) (AYGM 2015. Bu çalışmada Karadeniz rüzgar ikliminin belirlenmesi için rüzgar karakteristiklerinin hem uzun dönemli hem de en büyük değer istatistiği analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde dikkate alınan istatistiksel parametrelerin tanımları ve denklemleri EK A'da verilmiştir.

3.1.1 ECMWF ERA-Interim verileri ile rüzgar karakteristikleri

Rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değerlendirmesi için öncelikle ECMWF ERA-Interim veri tabanından 1979–2018 yılları için tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayan 40° – 47° N ve 26° – 42° E sınırları için uzamsal çözünürlüğü $0.25^{\circ}x0.25^{\circ}$, zamansal çözünürlüğü 6 saat olan rüzgar verileri (10 m yükseklikteki rüzgar hız bileşenleri) indirilmiştir. Daha sonra 1979–2018 zaman aralığının her bir yılı için ayrı ayrı rüzgar karakteristikleri yani ortalama rüzgar hızı (V_m), fırtına süresi (t) ve değişim katsayısı (DK) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler MATLAB yazılımı yardımıyla görselleştirilerek yıllık (**Şekil B.1**), on yıllık (**Şekil 3.1**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.2**) ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları elde edilmiştir. Bu grafiklerden faydalanılarak Karadeniz rüzgar ikliminde uzun dönemli değişim etkilerinin en fazla ve en az görüldüğü olası konum/konumlar belirlenmeye çalışılmıştır.

Karadeniz'in yıllık (**Şekil B.1**), on yıllık (**Şekil 3.1**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.2**) rüzgar karakteristikleri incelendiğinde 1979–2018 yılları için ortalama rüzgar hızı ve fırtına için en büyük değerlerin Karadeniz'in kuzeydoğusunda yer alan ve Kerç Boğazı ile Karadeniz'e bağlanan Rusya ve Ukrayna arasındaki iç deniz olan Azak Denizinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak çalışma alanı Karadeniz olduğu için Karadeniz üzerindeki en büyük değerler dikkate alınmıştır. Benzer şekilde Marmara Denizi'nde belirlenen büyük değerler de dikkate alınmamıştır.

Şekil B.1'de verilen Karadeniz'in rüzgar karakteristikleri yıllık ölçekte incelendiğinde 1979–2018 yılları için ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresi için en büyük değerlerin Karadeniz'in kuzeybatı, batı ve güneybatısı ile batı kıyılarında, özellikle güneybatı Karadeniz'de olduğu saptanmıştır. Genellikle ortalama rüzgar hızının büyük olduğu yerlerde (kuzeybatı Karadeniz kıyıları yani Romanya ve Bulgaristan'ın doğu kıyıları ile Edirne'nin İğne Ada kıyıları) fırtına süresinin uzun olduğu belirlenmiştir. Bu durum beklenen bir sonuçtur çünkü rüzgarın büyük hızlarda, düşük hızlardan daha fazla olması sınır değeri aşan fırtınanın, süresini artırmaktadır, diğer bir ifadeyle daha fazla V≥13.9 m/s olduğu anlamına gelmektedir. Fırtına süresinin en uzun olduğu 1993, 2014 ve 1996 yıllarının en büyük ortalama rüzgar hızına $V_{\text{m},1996}\!\!>\!\!V_{\text{m},2014}$ sahip olduğu tespit edilmiştir. En büyük ortalama rüzgar hızına sahip olmamasına rağmen 2001 yılında, Karadeniz'in batı kıyılarında (Romanya ve Bulgaristan'ın doğu kıyısı ile Edirne'nin İğne Ada kıyıları) diğer yıllardan daha belirgin şekilde daha uzun fırtına süreleri gözlenmiştir. 2001 yılı incelendiğinde ortalama rüzgar hızının Karadeniz'in kuzeybatı, batı, güneybatı, kuzey ve kuzeydoğu kıyılarında büyük olmasına karşın fırtına süresinin yalnızca Karadeniz'in kuzeybatı, batı, güneybatı kıyılarında daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bu durum 2001 yılı için Karadeniz'in batı kıyılarındaki rüzgar hızlarında V≥13.9 m/s olma durumunun havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha fazla olduğunu, havzanın kuzeybatı, kuzey ve kuzeydoğu bölgelerinde ortalama rüzgar hızının büyük ancak fırtına süresinin kısa olduğunu yani hız değerlerinin ortalama civarında ancak çok fazla V≥13.9 m/s olmadığı sonucuna ulaştırmıştır. Özellikle 2003, 2006, 2010, 2012, 2016 yıllarında daha düşük ortalama rüzgar hızı, daha uzun fırtına süresinin görülmesi beklenen durumun aksidir. Çünkü (özellikle 2000'li yıllar öncesi) büyük ortalama rüzgar hızı, daha uzun fırtına süresini tetiklemiştir. Fırtına süresinin uzun olması rüzgar hız değerlerinin daha fazla V≥13.9 m/s olduğunu, fırtına süresinin uzun ortalama rüzgar hızının düşük olması rüzgar hızının ortalama hıza göre çok değiştiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu yıllarda daha düşük ortalama rüzgar hızı ve daha uzun fırtına süresinin görülmesi, büyük rüzgar hızlarının olduğunu ancak ortalama rüzgar hızının düşük olmasına neden olacak düşük rüzgar hızlarının da olduğunu diğer bir ifadeyle rüzgar hız değerlerinin geniş aralıkta değiştiğini dolayısıyla daha büyük DK değerlerine sahip olduğunu belirtmektedir. İklim sisteminin özellikle 2000'li yıllardan sonra değişiminin hız kazanması, rüzgar hız değerlerinin geniş aralıkta değişmesinin bir nedeni olabileceğini düşündürmüştür (Şekil B.1).

Ortalama rüzgar hızın, çalışma alanı üzerinde rüzgar hızının nasıl değiştiği hakkında bilgi verebildiği ancak genel bir değerlendirme yapabilmek için tek olmadığı ΕK A'da verilen istatistiksel başına yeterli parametrelerin açıklamalarında belirtilmiştir. Çünkü aynı ortalamaya sahip olan verilerin değişkenlikleri birbirinden çok farklı olabileceği gibi birbirine benzer de olabilmektedir. Bunu ayırt etmek için rüzgar hızının DK değerleri 1979–2018 zaman aralığının her bir yılı için ayrı ayrı hesaplanmış ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları Şekil B.1'de verilmiştir. 1979–2018 yılları için Karadeniz çalışma alanı üzerinde rüzgar hızının DK değerlerinin 0.5 ila 0.7 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu uzamsal dağılım grafiklerinden DK'nın büyük değerlerinin doğu Karadeniz'de, küçük değerlerinin ise batı Karadeniz'de olduğu açıkça gözlenmektedir. Karadeniz çalışma alanı üzerinde genel olarak ortalama rüzgar hızının büyük olduğu batı Karadeniz'de DK değerlerinin göreceli olarak daha düşük, ortalama rüzgar hızının düşük olduğu doğu Karadeniz'de ise DK değerlerinin göreceli olarak daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar,

rüzgar ikliminin kuzey ve batı Karadeniz'deki rüzgarlarının havzanın diğer bölgelerinden daha kuvvetli, uzun ömürlü ve istikrarlı rüzgarlarla ve doğu Karadeniz'de ise batısına nispeten zayıf, kısa ömürlü ve oldukça değişken rüzgarlar ile karakterize edildiğini göstermektedir (**Şekil B.1**).

1979–2018 yılları için rüzgar karakteristiklerinin on yıllık ölçekte Karadeniz çalışma alanı üzerinde nasıl değiştiğinin belirlenmesi için 1979–1988 (V₁, t₁, DK₁), 1989–1998 (V₂, t₂, DK₂), 1999–2008 (V₃, t₃, DK₃) ve 2009–2018 (V₄, t₄, DK₄) veri setleri oluşturulmuştur. Bu süreler için rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.1**'de ve temel istatistiksel parametreleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

On yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarının genel olarak birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle Karadeniz'in batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama rüzgar hızına, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük DK değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. On yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinden ortalama rüzgar hızı ve fırtına sürelerinin son on yıla (2009–2018) doğru özellikle batı Karadeniz'de hafif bir şekilde arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.1a ve b, Tablo 3.1). DK değerlerinin dört 10 yılda da doğu Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük olması dikkat çekicidir. Ayrıca bu bölgede ortalama rüzgar hızının ve fırtına süresinin batısına kıyasla göreceli olarak daha küçük olduğu açıkça gözlenmektedir. 1980'li yıllardan 2010'lu yıllara doğru rüzgar hızının DK değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde arttığı ve doğu Karadeniz rüzgar hızı DK değerlerinin, batı Karadeniz'in DK değerlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç doğu Karadeniz'in rüzgar hızı değişkenliğinin batısına kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir (**Şekil 3.1**c, **Tablo 3.1**).



Şekil 3.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları; (a1–a4) V_m, (b1–b4) t, (c1–c4) DK.1, 2, 3 ve 4 numaralandırması on yılları göstermektedir.

ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan uzun dönemli (40 yıllık) rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.2**'de, temel istatistiksel parametreleri **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

40 yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarının (**Şekil 3.2**), on yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarına (**Şekil 3.1**)

benzer olduğu açıkça gözlenmektedir. Karadeniz'in batı ve kuzey bölgeleri, kışın kuvvetli kuzeydoğu (NE) rüzgarlarının etkisiyle daha büyük ortalama rüzgar hızlarına ve fırtına sürelerine sahip olmaktadır. Havzanın doğusunda yer alan Kafkas Dağları ve güneyinde yer alan Kuzey Anadolu Dağlarının yarattığı bariyer etkisi, güney ve doğu Karadeniz'de daha düşük rüzgar hızlarına neden olmaktadır. Dağlar, doğu, güney ve güneydoğudan esen rüzgarlar için topografik bir bariyer oluşturmaktadır (Islek vd., 2020a; Zecchetto ve De Bisasia, 2007; Garmashov vd., 2016; Kubryakov vd., 2019) ve doğu Karadeniz'in hakim rüzgar yönünde saat akrebinin tersi yönünde bir dönüşü ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.2a ve b). ERA-Interim rüzgar verilerine göre ortalama rüzgar hızı batı Karadeniz'de m/s'ye ulaşmasına karşın doğu Karadeniz'de 1.90 m/s'ye kadar 5.70 düşmektedir. DK'nın uzamsal dağılımı, ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresi ile ters orantılı olarak batıdan doğuya doğru artmaktadır. Diğer bir ifadeyle, DK, ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin en düşük olduğu doğu (özellikle güneydoğu) Karadeniz'de en büyük değerlerine, ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin büyük olduğu batı Karadeniz'de ise en düşük değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 3.2c).

1979–2018 yılları için Karadeniz rüzgar karakteristikleri ile ilgili yapılan yıllık (**Şekil B.1**), on yıllık (**Şekil 3.1**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.2**) analizler, batı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha stabil ve güçlü rüzgarlara (büyük V_m ve t, düşük DK), doğu Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerime kıyasla daha zayıf ve fazla değişkenliğe sahip rüzgarlara maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.2 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları. (a) V_m, (b) t, (c) DK

Tablo 3.1 ERA-Interim verileri ile on yıllık ve 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri

Yıl	V _m (m/s)			t (h)			DK		
	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.
1979–1989	1.858	4.301	5.681	0	30.102	110.486	0.514	0.575	0.679
1989–1998	1.861	4.344	5.719	0	31.671	110.093	0.504	0.569	0.671
1999–2008	1.908	4.403	5.694	0	29.667	102.495	0.509	0.568	0.678
2009–2018	1.981	4.404	5.690	0	38.722	142.101	0.519	0.573	0.682
1979–2018	1.900	4.362	5.701	0	32.417	114.43	0.514	0.572	0.677

Rüzgar karakteristiklerinin yıllık, on yıllık ve 40 yıllık uzamsal dağılımlarının birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Rüzgar karakteristiklerinin 1979 yılından 2018 yılına kadar nasıl değiştiği anlamak için son on yıl için hesaplanan rüzgar karakteristiklerinden (2009–2018, V₄, t₄, DK₄) ilk on yıl (1979–1988, V₁, t₁, DK₁) ilk on yıl için hesaplananlar çıkarılmış (V₄–V₁, t₁–t₄, DK₄–DK₁) ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.3**'te verilmiştir.

Şekil 3.3'te verilen rüzgar karakteristikleri arasındaki farklardan, özellikle ortalama rüzgar hızı farklarının $(V_4 - V_1)$ uzamsal dağılımının Karadeniz'i batı ve doğu olmak üzere ikiye ayırdığını açıkça göstermektedir (Islek vd., 2020a; Divinsky ve Kosyan, 2017). Batı Karadeniz'de ortalama rüzgar hız değerleri arasındaki farkın daha az olduğu, doğu Karadeniz'de ise farkın batısına kıyasla daha fazla olduğu gözlenmiştir (**Şekil 3.3**a). Bu sonuç 1979 yılından 2018 yılına doğru doğu Karadeniz'deki rüzgar hızının, batı Karadeniz'deki rüzgar hızından daha fazla değiştiğini göstermektedir. Fırtına süresi için de özellikle kuzeydoğu Karadeniz'de (NE yönünden gelen rüzgarlar için) farkın daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla on yıllar içindeki rüzgar karakteristikleri değişimlerinin özellikle doğu Karadeniz'de daha belirgin olduğu saptanmıştır. Batı Karadeniz'in yıllar içindeki değişimi daha stabil devam etmiştir. Genellikle farklar çok büyük çıkmamış, ancak doğu Karadeniz'deki değerlerin, batı Karadeniz'dekilerin neredeyse iki katı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.3). Bu sonuçlar, olası iklim değişikliği etkilerinin doğu Karadeniz rüzgar iklimi üzerinde havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha belirgin olarak ortaya çıktığını göstermektedir (Islek vd., 2020a).



Şekil 3.3 ERA-Interim rüzgar verileri için Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar ikliminin değişimi, (a) V_m , (b) t, (c) DK

Bu çalışmada yerel rüzgar iklim araştırmaları için iki kritik durum irdelenmiştir: (i) rüzgarın çok büyük ve çok düşük hızlarda buna bağlı olarak ortalamaya göre çok fazla değiştiğini belirten V_m ve fırtına süresi göreceli olarak büyük, DK göreceli büyük olan kritik durum. Birinci durum için doğu Karadeniz araştırılmış ve belirlenen konum/konumlarda küresel iklim değişikliğinin olası etki/etkileri irdelenmiştir. İkinci olarak rüzgarın ortalama etrafında (çok fazla sapmadan) değiştiğini gösteren (ii) V_m ve fırtına süresi göreceli büyük, DK göreceli düşük olduğu kritik durumudur. İkinci durumda, rüzgarın daha kararlı enerji potansiyeline sahip olduğu düşünülmüş ve detaylı yerel analizler için batı Karadeniz irdelenmiştir.

3.1.2 NCEP/CFSR verileri ile rüzgar karakteristikleri

Rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değerlendirmesi ECMWF ERA-Interim veri tabanından alınan verilerde yapıldığı gibi, ilk olarak NCEP/CFSR veri tabanından 1979–2018 yılları için tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayan 40°–47° N ve 26°–42° E sınırları için uzamsal çözünürlüğü 0.5°x0.5°, zamansal çözünürlüğü 1 saat olan rüzgar verileri (10 m yükseklikteki rüzgar hız bileşenleri) indirilmiştir. Daha sonra 1979–2018 yılları arasındaki her bir yılın rüzgar karakteristikleri (ortalama rüzgar hızı V_m, fırtına süresi t ve değişim katsayısı DK) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler MATLAB yazılımı yardımıyla görselleştirilmiş ve yıllık (**Şekil B.2**), on yıllık (**Şekil 3.4**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.5**) ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları elde edilmiştir. ERA-Interim verilerinde yapıldığı gibi, bu grafiklerden faydalanılarak Karadeniz rüzgar ikliminde uzun dönemli değişim etkilerinin en fazla ve en az görüldüğü olası konum/konumlar belirlenmeye çalışılmıştır.

ECMWF ERA-Interim veri tabanından indirilen verilerin uzamsal çözünürlüğü 0.25°x0.25°, zamansal çözünürlüğü 6 saat iken NCEP/CFSR veri tabanından indirilen verilerin uzamsal çözünürlüğü 0.5°x0.5°, zamansal çözünürlüğü 1 saattir. CFSR verilerinin zamansal çözünürlüğü ve ERA-Interim rüzgar verilerinin ise uzamsal çözünürlüğü daha incedir. Böylece farklı çözünürlüklerin veriler

üzerindeki etkisi araştırılmış ve her iki veri setinden elde edilen Karadeniz rüzgar iklim tahmini karşılaştırılmıştır.

Karadeniz'in rüzgar karakteristikleri yıllık (**Şekil B.2**), on yıllık (**Şekil 3.4**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.5**) ölçekte incelendiğinde 1979–2018 yılları için ortalama rüzgar hızının büyük değerlerinin Karadeniz'in kuzeybatı, batı, güneybatı, kuzey ve kuzeydoğu bölgelerinde olduğu belirlenmiştir. 1979–2018 yılları için en büyük değerlerin ise Karadeniz'in kuzeydoğusunda yer alan Azak Denizi ve güneybatısında yer alan Marmara Denizi'nde olduğu tespit edilmiştir. ERA-Interim rüzgar verilerinde olduğu gibi, araştırma Karadeniz çalışma alanı üzerinde olduğu için Karadeniz üzerindeki en büyük değerler dikkate alınmıştır. Bu durumda en büyük ortalama rüzgar hızının, Karadeniz'in kuzeybatı, batı ve güneybatısı ile batı kıyılarında olduğu belirlenmiştir.

1979–2018 yılları için fırtına süresinin en uzun olduğu 1996, 1993 ve 1987 yıllarının en büyük ortalama rüzgar hızlarına (V_{m,1996}>V_{m,1993}>V_{m,1987}) sahip olması, ortalama rüzgar hızının büyük olduğu yerlerde (Karadeniz'in batı kıyıları yani Romanya ve Bulgaristan'ın doğu kıyıları ile Edirne'nin İğne Ada kıyıları) fırtına süresinin daha uzun olacağı sonucunu desteklemektedir. Bu sonuç, ERA-Interim rüzgar verilerinde de belirlenmiş ve rüzgarın büyük hızlarda, düşük hızlardan daha fazla olması sınır değeri aşan fırtınanın, süresini artırması ile açıklanmıştı. Dolayısıyla bu sonuç, 1987 yılından 1996 yılına doğru rüzgar hız değerlerinin arttığını ve 1996 yılında daha fazla V≥13.9 m/s olduğunu belirtmektedir. ERA-Interim rüzgar verilerinde de en uzun fırtına süresinin 1993, 2014 ve 1996 yıllarında ortaya çıkması, CFSR rüzgar verileri ile sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir. 2003 2006, 2010, 2012 2015 yıllarında daha düşük ortalama rüzgar hızı, daha uzun fırtına süresinin görülmesi; rüzgar hızının ortalama rüzgar hızına göre çok değiştiğini (büyük ve düşük hızların bir arada olduğunu) belirtmektedir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra daha düşük ortalama rüzgar hız ile daha uzun fırtına süresinin görülmesi daha sık ortaya çıkmıştır (**Şekil B.1**).

Rüzgar hız verilerinin ortalama hıza göre nasıl değiştiğinin belirlenmesi için DK incelenmiştir. 1979–2018 yılları için CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan DK değerlerinin, ERA-Interim rüzgar verilerinden biraz daha büyük olarak, $0.50 \le DK \le 0.77$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Genel olarak, Karadeniz çalışma alanı üzerinde ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin büyük olduğu yerlerde (batı Karadeniz'de) DK değerlerinin göreceli olarak daha düşük, ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin düşük olduğu yerlerde (doğu Karadeniz'de) ise DK değerlerinin göreceli olarak daha büyük olduğu saptanmıştır (Benzer sonuç ERA-Interim rüzgar verileri ile de tespit edilmiştir **Şekil B.1**).

1979–2018 yılları için CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin yıllık ölçekteki değerlerinin (**Şekil B.2**) tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde ERA-Interim rüzgar verileri için hesaplanan değerlerden (**Şekil B.1**) daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Özellikle CFSR verileri ile hesaplanan ortalama rüzgar hızının ve dolaysıyla fırtına süresinin, ERA-Interim rüzgar verileri ile hesaplananlardan belirgin şekilde daha büyük olduğu gözlenmiştir.

ERA-Interim rüzgar verilerinde olduğu gibi, CFSR rüzgar verilerinde de rüzgar karakteristiklerinin on yıllık ölçekte nasıl değiştiğinin belirlenmesi için 1979–1988 (V₁, t₁, DK₁), 1989–1998 (V₂, t₂, DK₂), 1999–2008 (V₃, t₃, DK₃) ve 2009–2018 (V₄, t₄, DK₄) veri setleri oluşturulmuştur. Bu süreler için rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.4**'te ve temel istatistiksel parametreleri **Tablo 3.2**'de verilmiştir.

On yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarının genel olarak birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle Karadeniz'in batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama rüzgar hızına, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük DK değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. On yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinden ortalama rüzgar hızı ve fırtına sürelerinin son on yıla (2009–2018) doğru özellikle batı Karadeniz'de hafif bir şekilde arttığı tespit edilmiştir (**Şekil 3.1**a ve b, **Tablo 3.1**). DK değerlerinin dört 10 yılda

da doğu Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük olması dikkat çekicidir. Ayrıca bu bölgede ortalama rüzgar hızının ve fırtına süresinin batısına kıyasla göreceli olarak daha küçük olduğu açıkça gözlenmektedir. 1980'li yıllardan 2010'lu yıllara doğru rüzgar hızının DK değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde arttığı ve doğu Karadeniz'in rüzgar hızının DK değerlerinin belirgin şekilde batı Karadeniz'in DK değerlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç doğu Karadeniz'in rüzgar hızı değişkenliğinin batısına kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir (**Şekil 3.1**c, **Tablo 3.1**).

Şekil 3.4'te verilen rüzgar karakteristiklerinin on yıllık ölçekteki uzamsal dağılımlarından, dört 10 yılda da ortalama rüzgar hızı ve fırtına sürelerinin Karadeniz'in kuzeybatı, batı ve güneybatı bölgelerinde (çalışma alanını kapsamadığı için Azak Denizi hariç) havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir (**Şekil 3.4**a ve b, **Tablo 3.2**). Genel olarak ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin büyük olduğu batı Karadeniz'de daha düşük DK değerlerinin olduğu, ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin daha küçük olduğu doğu Karadeniz'de daha büyük DK değerlerinin olduğu tespit edilmiştir (**Şekil 3.4**c, **Tablo 3.2**). Denizin doğu kısmının, batı kısmına kıyasla daha büyük DK değerlerine sahip olması, doğu Karadeniz'in daha geniş aralıkta değişen rüzgar hızırama maruz kaldığını göstermektedir.

CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin on yıllık ölçekteki değerlerinin (**Şekil 3.4, Tablo 3.2**) tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde ERA-Interim rüzgar verileri ile hesaplananlardan daha büyük olduğu tespit edilmiştir (**Şekil 3.1, Tablo 3.1**).



Şekil 3.4 CFSR rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları. (a1–a4) V_m, (b1–b4) t, (c1–c4) DK. 1, 2, 3 ve 4 numaralandırması on yılları göstermektedir.

CFSR rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan 40 yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.5**'te ve temel istatistiksel parametreleri **Tablo 3.2**'de verilmiştir.

40 yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarının (**Şekil 3.5**), on yıllık ölçekteki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal dağılımlarına (Şekil 3.4) benzer olduğu saptanmıştır. Diğer bir ifadeyle Karadeniz'in batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama rüzgar hızı ile daha uzun fırtına sürelerine ve daha düşük DK değerlerine sahiptir. ERA-Interim rüzgar verilerinde olduğu gibi CFSR rüzgar verilerinde de Karadeniz'in doğusunda hakim rüzgar yönünün saat akrebinin tersi yönünde bir dönüş izlediği belirlenmiştir. Karadeniz'in doğusunda (Kafkas Dağları) ve güneyinde (Kuzey Anadolu Dağları) yer alan yüksek dağların oluşturduğu bariyer etkisi, doğu, güney ve güneydoğudan esen rüzgarlar için topografik bir bariyer oluşturmakta ve güney ve doğu Karadeniz'de daha düşük rüzgar hızlarına neden olmaktadır (Islek vd., 2020a; Zecchetto ve De Bisasia, 2007; Garmashov vd., 2016; Kubryakov vd., 2019) (Şekil 3.2a ve b). CFSR rüzgar verilerine göre ortalama rüzgar hızı, ERA-Interim rüzgar verilerinden biraz daha büyük olarak, batı Karadeniz'de 6.14 m/s'ye ulaştığı, doğu Karadeniz'de 1.94 m/s'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Fırtına süresinin uzamsal dağılımı, ortalama rüzgar hızının uzamsal dağılımına benzer bir davranış sergileyerek batı Karadeniz'de, doğusuna kıyasla daha uzun fırtına süreleri ortaya çıkmasına neden olmuştur. DK değerlerinin ise ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresi ile ters orantılı olarak doğu Karadeniz'de, batısına kıyasla daha büyük değerlere ulaştığı yani batıdan doğuya doğru DK değerleri arttığı belirlenmiştir (**Şekil 3.2**c).

CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin, yıllık (**Şekil B.2**) ve on yıllık (**Şekil 3.4**) ölçekteki değerlerinde olduğu gibi, 40 yıllık (**Şekil 3.5**, **Tablo 3.2**) ölçekteki değerlerinin de tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde ERA-Interim rüzgar verileriyle hesaplananlardan daha büyük olduğu belirlenmiştir (**Şekil 3.2**, **Tablo 3.2**).

1979–2018 yılları için Karadeniz rüzgar karakteristikleri ile ilgili yapılan yıllık (**Şekil B.2**), on yıllık (**Şekil 3.4**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.5**) analizler, ERA-Interim

rüzgar verilerinde olduğu gibi, Karadeniz'in bastının, doğusuna kıyasla daha stabil ve güçlü rüzgarlara (büyük V_m, uzun t, düşük DK), doğusunun ise batısına kıyasla daha değişken ve zayıf rüzgar hızlarına maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.5 CFSR rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları, (a) V_m, (b) t, (c) DK

Tablo 3.2 CFSR rüzgar verileri ile on yıllık ve 40 yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri

Yıl	V _m (m/s)			t (h)			DK		
	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.
1979–1989	1.906	4.803	6.091	0.023	97.382	240.464	0.514	0.588	0.710
1989–1998	1.955	4.880	6.245	0.016	93.440	260.859	0.494	0.573	0.677
1999–2008	1.989	4.872	6.135	0.005	93.338	303.393	0.503	0.575	0.692
2009–2018	1.849	4.755	6.135	0.145	107.663	268.109	0.510	0.602	0.757
1979–2018	1.942	4.830	6.144	0.019	97.996	269.873	0.509	0.586	0.699

CFSR verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin yıllık, on yıllık ve 40 yıllık ölçekteki uzamsal dağılımlarının benzer olduğu belirlenmiştir. CFSR verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin 1979 yılından 2018 yılına kadar nasıl değiştiği anlamak için, ERA-Interim verilerinde yapıldığı gibi, son on yıl için hesaplanan rüzgar karakteristiklerinden (2009–2018, V₄, t₄, DK₄) ilk on

yıl (1979–1988, V₁, t₁, DK₁) için hesaplananlar çıkarılmış (V₄–V₁, t₁–t₄, DK₄–DK₁) ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.6**'da verilmiştir.

Şekil 3.6'da verilen CFSR verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin on yıllar arasındaki farklarından belirgin bir sonuç bulunamamıştır. ERA-Interim rüzgar verilerinde denizin batı ve doğu olmak üzere ikiye ayrıldığı, batı Karadeniz'de rüzgar karakteristiklerinin on yıllar arasındaki farkın daha az ve doğu Karadeniz'de ise farkın belirgin şekilde daha fazla olduğu sonucu belirlenmişti (**Şekil 3.3**). Ancak CFSR rüzgar verileri için benzer durum söz konusu değildir. Bu duruma, NCEP/CFSR veri tabanından indirilen verilerinin uzamsal çözünürlüğün (0.5°x0.5°), ECMWF ERA-Interim veri tabanından indirilen verilerin uzamsal çözünürlüğüne göre (0.25°x0.25°) daha kaba olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla CFSR rüzgar verileri uzamsal olarak daha kaba kalmış, Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar karakteristiklerinin uzamsal değişimlerini yeterince tanımlayamamıştır.



Şekil 3.6 CFSR rüzgar verileri için Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar ikliminin değişimi, (a) V_m, (b) t, (c) DK

Bu çalışmada, ERA-Interim rüzgar verilerinde olduğu gibi, yerel rüzgar iklim araştırmaları için CFSR rüzgar verileri ile de iki kritik durum irdelenmiştir. Bunlar; (i) V_m ve fırtına süresi göreceli büyük, DK göreceli büyük ve (ii) V_m ve fırtına süresi göreceli büyük, DK göreceli düşük olduğu durumlardır. Birinci durum için küresel iklim değişikliğinin olası etki/etkilerinin en fazla görüldüğü konum/konumlar araştırılırken, ikinci durumda rüzgarın daha kararlı enerji potansiyeline sahip olduğu düşünülmüş ve bu konum/konumlar araştırılmıştır. ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri için bu iki kritik durum ayrı ayrı irdelenmiştir.

3.1.3 Yerel rüzgar iklimi

3.1.3.1 Yerel analizler için konum/konumların belirlenmesi

Şekil 3.7, ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için rüzgar karakteristikleri (V_m , t ve DK) ile yapılan detaylı analizler sonucu elde edilen konumları göstermektedir. Her yılın tüm zaman serisi dikkate alınarak en büyük ortalama rüzgar hızı (V_m), en uzun fırtına süresi (t), en büyük ve en düşük DK değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerlerin koordinatları harita üzerinde işlenerek görselleştirilmiştir.**Şekil 3.7**'de gösterilen mavi pin V_m 'nin büyük, beyaz pin fırtına süresinin uzun, pembe pin DK'nın büyük, yeşil pin DK'nın düşük olduğu değerler için belirlenen konumları temsil etmektedir.



Şekil 3.7 Detaylı yerel analizler için kritik durumları temsil eden konumlar Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Karadeniz rüzgar karakteristikleri üzerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliğinin olduğu saptanmış ve bunu daha detaylı araştırmak için aynı meridyen üzerinde üç referans noktası seçilmiştir. Seçilen üç nokta, genel olarak, batı, orta ve doğu Karadeniz'deki rüzgar karakteristiklerini temsil etmektedir. Karadeniz'in batısında yer alan N1 (28.5°E; 42.5°N), kuvvetli ve stabil rüzgar özellikleri ile kritik durum 2'yi temsil etmekte, Karadeniz'in doğusunda yer alan N3 (38.5E; 42.5°N) ise zayıf ve yüksek değişkenlikte rüzgar özellikleri ile kritik durum 1'i temsil etmektedir. Orta Karadeniz'de yer alan N2 (35.5°E; 42.5°N), orta rüzgar hızı ve orta değişkenliğe sahip rüzgar özellikleri ile N1'den N3'e geçişi temsil etmektedir. Seçilen üç referans noktasının Karadeniz verilmiştir. üzerindeki konumu Şekil **3.8**'de Bu konuma ait rüzgar karakteristikleri, 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.8 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile Karadeniz çalışma alanı üzerinde detaylı araştırılması planlanan üç referans noktasının konumları

3.1.3.2 Karadeniz rüzgar karakteristiklerinin batı-doğu değişkenliği

Şekil 3.9, aynı meridyen üzerinde rüzgar karakteristiklerinin 1979–2018 yılları için uzamsal değişkenliğini göstermektedir. **Şekil 3.8**'de sarı çizgi ile gösterilen 42.5°N enlemi boyunca uzanan kesit, tüm deniz üzerinden geçmekte ve yaklaşık 1308 km uzunluğuna sahiptir. Ortalama rüzgar hızları ERA-Interim verileri için 29°E ve 33°E boylamları arasında 5–6 m/s ile pik değerlerine ulaşmaktadır. Pik rüzgar hızlarının hem uzamsal genişliği (29°E ve 34°E boylamları arasında) hem de rüzgar hız aralığı (bazen 6 m/s'yi aşan) CFSR verilerinde daha büyüktür (Şekil 3.9a ve d). Fırtına süresileri ile ortalama rüzgar hızları arasında güçlü bir ilişki olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 3.9b ve e). Fırtına süresi, ortalama rüzgar hızında gözlemlenen benzer boylamlar arasında pik değerlerine ulaşmakta ancak yıllar arası değişkenliği daha fazladır. Ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresi doğu Karadeniz'e doğru azalırken, DK her iki veri seti için de doğu Karadeniz'e doğru genel bir artış eğilimine sahiptir (Şekil 3.9c ve f). Ortalama rüzgar hızı ve fırtına süresinin aksine, seçilen hat boyunca DK değerlerinin zaman dağılımının iki moda sahip olduğu tespit edilmiştir, bunlar: ERA-Interim verileri için 38°E boylam civarında baskın bir mod ve 27°E boylam civarında ortalanmış daha zayıf bir mod. Bu modlar, önemli ölçüde daha zayıf rüzgarlara sahip olmasına rağmen, havzanın doğu kesiminde fırtına özelliklerinde güçlü bir dönemsel değişkenliği göstermektedir. Havzanın batı kesimindeki güçlü fırtınalar, dönemsel olarak daha az değişkenlikle doğusuna kıyasla daha istikrarlı bir davranış göstermektedir. Bu modlar, düşük uzamsal (0.5°x0.5°) çözünürlük nedeniyle CFSR verileri için 39°E ve 26°E boylamlarına kaymaktadır. ERA-Interim verilerinin daha düşük (6 saat) zamansal çözünürlüğü, 1 saat zamansal çözünürlüğe sahip CFSR verilerininkinden daha kısa fırtına sürelerinin hesaplanmasına neden olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, 6 saat zamansal çözünürlüğe sahip olan ERA-Interim verileri için hesaplanan ortalama hız, yani altı saatlik zamansal ortalama rüzgar hızı, muhtemelen bu altı saatlik süre içinde meydana gelen bazı fırtınaların kaybolmasına neden olabilmekte ve dolayısıyla CFSR verilerine kıyasla daha kısa fırtına süreleri ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 3.9 Aynı meridyen üzerindeki rüzgar karakteristiklerinin 1979–2018 yılları arasındaki uzamsal değişimi; (a, d) V_m, (b, e) t, (c, f) DK. (a–c) ERA-Interim, (d–f) CFSR

3.1.3.3 Yerel analizler

Bu bölümde seçilen üç referans noktası için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile detaylı yerel analizler yapılmıştır. 1979–2018 yılları için iki farklı veri kaynağı ile Karadeniz rüzgar iklimi araştırılmış ve rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimleri irdelenmiştir.

Seçilen üç referans noktası için rüzgar gülü **Şekil 3.10**'da, rüzgar hızı eklenik aşılma olasılığı **Şekil 3.11**'de, rüzgar hızının uzun dönemli PDF (Probability Density Function, detaylar için bakınız EKA) ve CDF (Cumulative Distribution Function, detaylar için bakınız EKA) grafikleri **Şekil 3.12**'de ve rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği **Şekil 3.13**'te verilmiştir.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar hız verilerinin 1979–2018 yıllarındaki yönlü davranışını belirlemek için seçilen üç referans noktasındaki rüzgar gülleri 16 yönlü olarak 7 rüzgar hız sınıfında incelenmiştir (**Şekil 3.10**). Rüzgar gülü gruplandırılmış rüzgar hızlarının hangi doğrultudan ne oranla geldiğini göstermektedir. Hem ERA-Interim hem de CFSR verileri için batı Karadeniz'de (N1) hakim rüzgar yönü NE (**Şekil 3.10**a1 ve b1) olmasına karşın orta Karadeniz (N2) (**Şekil 3.10**a2 ve b2) ve doğu Karadeniz'de (N3) NW yönünden gelen rüzgarların (**Şekil 3.10**a3 ve b3) hakim olduğu belirlenmiştir. Doğu Karadeniz'de (N3) ikincil hakim rüzgar yönünün ERA-Interim verilerinde WNW (**Şekil 3.10**a3), CFSR verilerinde SE (**Şekil 3.10**b3) olması durumu dışında iki farklı veri kaynağıyla üç referans noktası için elde edilen hakim rüzgar yönlerinin büyük ölçüde birbirleriyle uyumlu olduğu saptanmıştır.

Batı-doğu rüzgar değişkenliği, rüzgar güllerinin sakin rüzgar oluşum yüzdeleriyle belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR verileri için batı Karadeniz'den (N1) doğu Karadeniz'e (N3) doğru sakin rüzgar oluşum yüzdesinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 3.10 Seçilen üç nokta için rüzgar gülü; (a) ERA-Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

Karadeniz'e ait uzun dönem rüzgar istatistiğinin belirlenmesi amacıyla rüzgar hızlarının eklenik aşılma olasılığı seçilen üç referans noktasında **Şekil 3.11**'de 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak irdelenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR verileri ile elde edilen rüzgar hızı eklenik aşılma olasılığı grafiklerinin benzer olduğu ve hakim rüzgar yönünün rüzgar gülünde (**Şekil 3.10**) belirlendiği gibi batı Karadeniz'de (N1) NE ve bu yönü NNE yönünün takip ettiği, orta Karadeniz'de (N2) hakim rüzgar yönünün WNW ve bu yönü ESE yönünü takip ettiği, doğu Karadeniz'de (N3) hakim rüzgar yönünü NW ve bu



yönü ERA-Interim verilerinde WNW, CFSR verilerinde SE yönünün takip ettiği belirlenmiştir.

Şekil 3.11 Seçilen üç nokta için rüzgar hızının eklenik aşılma olasılığı. (a) ERA-Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar hız verilerinin uzun dönemli (1979–2018, 40 yıllık) PDF ve CDF grafikleri seçilen üç referans noktası için **Şekil 3.12**'de, rüzgar hızının temel istatistiksel parametreleri **Tablo 3.3**'te verilmiştir. Belirlenen üç konumdaki maksimum rüzgar hız değerleri farklı renk ve işaretleyiciler ile PDF ve CDF grafiklerinin üstünde gösterilmiştir.

Şekil 3.12'de verilen rüzgar hızına ait PDF ve CDF grafiklerinin, her iki veri kaynağı için de benzer olduğu tespit edilmiştir. Batı-doğu değişkenliğin bir sonucu olarak batı Karadeniz'in (N1), orta (N2) ve doğu (N3) Karadeniz'e kıyasla daha büyük ortalama ve mod rüzgar hızlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Doğu Karadeniz (N3), en düşük ortalama rüzgar hız değerlerine sahip olmasına karşın batı Karadeniz ile kıyaslanabilir derecede yüksek maksimum (ekstrem) rüzgar hız değerlerine sahip olması doğu Karadeniz rüzgar hız değerlerinin daha geniş aralıkta değiştiğini yani rüzgar karakteristiklerinin havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha değişken olduğunu göstermektedir.

ERA-Interim verileri için batı Karadeniz'de yer alan N1'e ait PDF grafiğinin, orta Karadeniz'e yer alan N2 ve doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait PDF grafiklerinden daha geniş ve daha uzun kuyruklu olduğu, diğer bir ifadeyle orta Karadeniz'e yer alan N2 ve doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait CDF grafiğinin, batı Karadeniz'de yer alan N1'e ait CDF grafiğinden daha dik ve kısa kuyruklu olduğu belirlenmiştir. CFSR verileri için doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait PDF grafiğinin daha uzun kuyruklu olması batı (N1) ve orta (N2) Karadeniz'den daha büyük maksimum rüzgar hızına sahip olduğunu belirtmektedir. Bu sonuçlar, doğu Karadeniz'in, batısına kıyasla daha düşük ortalama rüzgar hızı ve göreceli olarak yüksek maksimum rüzgar hızı ile oldukça değişken rüzgar iklimine sahip olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Belirlenen üç referans noktası için de CFSR verileri için hesaplanan ortalama, mod ve maksimum rüzgar hız değerlerinin ERA-Interim verileri ile hesaplanan rüzgar hız değerlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir (**Tablo 3.3**).



Şekil 3.12 Seçilen üç nokta için rüzgar hızının uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri, (a, c) ERA-Interim, (b, d) CFSR. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç nokta için maksimum rüzgar hız değerlerini göstermektedir.

Tablo 3.3 Seçilen üç nokta için ERA-Interim ve CFSR rüzgar verilerine göre rüzgar hızının istatistiksel parametreleri

		ERA-In	terim		CFSR			
Min Min	Min.	Ort.	Mod	Maks.	Min.	Ort.	Mod	Maks.
V m	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
N1	0.016	5.79	5.0	21.10	0.022	6.25	6.0	24.17
N2	0.004	4.66	4.0	18.06	0.001	5.73	5.0	24.84
N3	0.013	4.02	3.0	19.55	0.010	5.05	4.0	26.00

ERA-Interim ve CFSR rüzgar hız verilerinin normalize edilen PDF'nin, 1979–2018 yıllarındaki dönemsel değişkenliği seçilen üç referans noktasında incelenmiştir (**Şekil 3.13**). Bu amaçla önce 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için rüzgar hızının PDF'si hesaplanmıştır. Daha sonra her yıl için elde edilen PDF, **Şekil 3.12** (a ve b)'de verilen rüzgar hızının uzun dönemli PDF'ye bölünmüş ve böylece 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için rüzgar hızının normalize edilen PDF'si hesaplanmıştır.

Belirlenen üç referans noktası için de ERA-Interim verileri ile elde edilen rüzgar hızına ait PDF dağılımlarının genişliğinin (**Şekil 3.13**a), CFSR verileri ile elde

edilenlerden (**Şekil 3.13**b) belirgin şekilde daha dar olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç CFSR verilerinde daha büyük rüzgar hız değerlerinin meydana gelme olasılığının, ERA-Interim verilerinde oluşma olasılıklarından önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Hem ERA-Interim hem de CFSR verileri için doğu Karadeniz'de (N3), neredeyse en düşük ortalama rüzgar hızlarına sahip olmasına karşın, ortalama rüzgar hızlarının oldukça büyük olduğu batı Karadeniz ile kıyaslanabilir derecede şiddetli rüzgar hızları görülmektedir. Bu durumu daha detaylı araştırmak için Bölüm 3.1.3.5'te ekstrem rüzgar hızı incelenmiştir.



Şekil 3.13 Seçilen üç noktada rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. (a) ERA-Interim, (b) CFSR. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

3.1.3.4 1979–2018 yılları için rüzgar karakteristikleri

Seçilen üç referans noktasında, rüzgar karakteristiklerinin 1979 yılından 2018 yılına doğru değişim eğilimi, en iyi uyum çizgisi kullanılarak doğrusal regresyon analizi ile araştırılmıştır. Analizlerde ilk olarak yıllık; ortalama rüzgar hızı (V_m), rüzgar hızının değişim katsayısı (DK), maksimum rüzgar hızı (V_m), fırtına süresi (t) ve fırtına sayısı (N) parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi irdelenmiş (**Şekil 3.14**) ve bu parametrelerin uzun dönemli değişim eğilimi değerleri **Tablo 3.4**'te verilmiştir. Daha sonra, seçilen üç referans noktasındaki ekstrem rüzgar hızlarının (yıllık; 99. persantil rüzgar hızı V₉₉, 95. persantil rüzgar hızı V₉₅, 90., persantil rüzgar hızı V₉₀) uzun dönemli değişim eğilimi incelenmiş (**Şekil 3.15**) ve bu parametrelere ait uzun dönemli değişim eğilimi değerleri **Tablo 3.4**'te verilmiştir. Son olarak, seçilen üç referans noktasındaki rüzgar gücü kaynağının ne kadar kararlı bir yapıya sahip olduğunu araştırmak için rüzgar hızının çarpıklık (γ) ve basıklık (δ) katsayılarının (Detaylar için bakınız EKA) uzun dönemli değişim eğilimi araştırılış (**Şekil 3.16**) ve uzun dönemli değişim eğilimi değerleri **Tablo 3.4**'te verilmiştir.

Kuvvetli rüzgarlarla karakterize edilen batı Karadeniz'de (N1), hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar verilerine göre ortalama rüzgar hızının hafif azalma eğilimi gösterdiği (**Şekil 3.14**a1, **Tablo 3.4**), buna karşılık orta ve zayıf rüzgarlarla karakterize edilen orta (N2) ve doğu (N3) Karadeniz'de, iki veri kaynağına göre ortalama rüzgar hızının hafif artış eğilimi gösterdiği (**Şekil 3.14**a2 ve a3, **Tablo 3.4**) belirlenmiştir. Yıllık maksimum rüzgar hızı değerlerinde batı Karadeniz'de (N1) belirgin bir değişim eğiliminin olmadığı (**Şekil 3.14**c1, **Tablo 3.4**), ancak havzanın doğusuna doğru (N2 ve N3) maksimum rüzgar hızında önemli bir artış eğilimi olduğu (%10'a ulaşan) tespit edilmiştir (**Şekil 3.14**c2 ve c3, **Tablo 3.4**).

Fırtına sayısı ve fırtına süresindeki uzun dönemli değişim eğilimlerinde, özellikle orta Karadeniz (N2), fırtına süresi ve sayısında ortalama %20'den fazla artışla daha dikkat çekicidir (**Şekil 3.14**d ve e, **Tablo 3.4**). CFSR rüzgar verilerinde, batı Karadeniz'deki (N1) fırtına sayısı, orta (N2) ve doğu (N3) Karadeniz'deki fırtına sayısı ile karşılaştırılabilirdir, ancak batı Karadeniz'deki (N1) fırtına süresi, orta (N2) ve doğu (N3) Karadeniz'deki fırtına süresinden belirgin şekilde çok daha fazladır (uzundur). Bu sonuç, batı Karadeniz'de doğusuna kıyasla daha uzun süre devam eden yani daha uzun ömürlü olan fırtınaların ortaya çıktığını, orta (N2) ve doğu (N3) Karadeniz'de ise kısa ömürlü tekil fırtınaların meydana geldiğini göstermektedir.

Coğrafi değişkenliğin bir sonucu olarak, batı Karadeniz'den (N1), doğu (N2) Karadeniz'e doğru ortalama rüzgar hızının kademeli olarak azaldığı (**Şekil 3.14**a, **Tablo 3.4**), buna karşılık değişim katsayısı değerlerinin arttığı (**Şekil 3.14**b, **Tablo 3.4**) tespit edilmiştir. Ancak maksimum rüzgar hızı için ortalama rüzgar hızı ve DK değerlerinde olduğu gibi doğuya doğru belirgin bir azalma/artma eğilimi belirlenememiştir (**Şekil 3.14**a ve c, **Tablo 3.4**). Bu sonuç doğu Karadeniz'de (N3) ortalama rüzgar hızının oldukça düşük olmasına karşın göreceli olarak yüksek maksimum rüzgar hızlarının ortaya çıktığını, diğer bir ifadeyle rüzgar hız değişkenliğinin daha fazla olduğunu belirtmektedir. Doğu Karadeniz'de (N1) DK değerlerinin havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük olması bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 3.14 Rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimleri. (a) V_m , (b) DK, (c) V_{maks} , (d) N, (e) t. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

Ekstrem rüzgar hız değerlerinin havzanın batısından doğusuna doğru 1979–2018 yılları arasında nasıl değiştiğinin araştırmak için rüzgar hızının 99., 95. ve 90. persantil değerlerinin değişim eğilimi araştırılmıştır (**Şekil 3.15**). Batı Karadeniz'den, doğu Karadeniz'e doğru ortalama rüzgar hız değerlerinin kademeli olarak azalıp, maksimum rüzgar hız değerlerinin havzanın batısında ve doğusunda birbirine yakın değerlerde olduğu tespit edilmişti (**Şekil 3.15**). Ancak rüzgar hızının 99., 95. ve 90. persantil değerlerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliği belirlenememiştir. Rüzgar hızının ekstrem (99., 95. ve 90 persantil) değerlerinin batı Karadeniz'de (N1), doğu Karadeniz'e (N3) kıyasla biraz daha büyük olduğu ve CFSR verileri ile hesaplanan bu değerlerin ERA-Interim ile hesaplananlardan daha büyük olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.15 Ekstrem rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimleri, (a) V₉₉, (b) V₉₅, (c) V₉₀. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

Ortalama rüzgar karakteristiklerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliği belirlenmesine karşın, rüzgar hızının çarpıklık (γ) ve basıklık (δ) katsayıları değerlerinin her iki veri kaynağı için seçilen üç referans noktasında birbirlerine çok yakın olduğu saptanmıştır (Şekil 3.16). Batı (N1) ve orta (N2) Karadeniz'de çarpıklık ve basıklık katsayısı değerlerinin 1979 yılından 2018 yılına doğru artma eğiliminde olduğu yani son yıllara doğru daha fazla sağa çarpık ve daha sivri olduğu, doğu Karadeniz'de (N3) ise bu katsayıların azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Batı (N1) ve orta (N2) Karadeniz'de rüzgar hız değerlerinin 1979 yılından 2018 yılına doğru daha fazla sağa çarpık olması; ortalamanın altındaki hız değerlerinin daha fazla olduğunu ve daha az basık yani daha sivri dağılım olması rüzgar hız değerlerinin daha dar aralıkta değiştiğini belirtmektedir. Doğu Karadeniz'de (N3) ise çarpıklık katsayısının azalması son yıllara doğru dağılımın normal dağılıma daha fazla yaklaştığını, basıklık katsayısının azalması daha basık yani rüzgar hız değerlerinin daha geniş aralıkta değiştiğini belirtmektedir. Doğu Karadeniz'de (N3) çarpıklık katsayısının azalma eğiliminde olmasına karşın değerlerin batı Karadeniz'de (N1) hesaplanan çarpıklık katsayısı değerlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Doğu Karadeniz'in batı Karadeniz'den daha büyük çarpıklık katsayısı değerlerine sahip

olması; Doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait dağılımın batı Karadeniz'de yer alana N1'e ait dağılımdan daha sağa çarpık bir dağılımı temsil ettiğini belirtmektedir.



Şekil 3.16 Rüzgar kaynaklarının değişkenliği, (a) çarpıklık, (b) basıklık katsayıları. Panellerdeki düz mavi çizgi çarpıklık ve basıklık katsayılarının normal dağılımı için değerlerini göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

		Nokta 1		Nokta	2	Nokta 3		
		ERA-Interim	CFSR	ERA-Interim	CFSR	ERA-Interim	CFSR	
v	(m/s)	-0.090	-0.062	0.156	0.152	0.242	0.086	
Vm	(%)	-1.68	-1.09	3.74	3.01	6.79	1.84	
DV		-0.0016	0.020	0.0016	0.008	-0.0078	0.008	
DK	(%)	-0.28	3.07	0.27	1.40	-1.05	1.15	
V.	(m/s)	0.456	-0.136	1.424	1.615	0.066	1.053	
V maks	(%)	2.68	-0.65	9.72	8.47	0.44	5.92	
+	(h)	6.057	44.760	14.204	34.846	5.53	-5.499	
t	(%)	6.85	25.48	174.88	32.25	75.12	-8.75	
N		1.041	-0.850	1.501	1.927	0.328	-2.114	
	(%)	20.69	-5.76	146.27	13.53	29.77	-19.05	
37	(m/s)	0.098	0.776	0.628	0.597	0.402	-0.156	
V 99	(%)	0.69	5.15	5.56	4.20	3.67	-1.16	
v	(m/s)	-0.308	0.074	0.257	0.382	0.390	0.090	
V 95	(%)	-2.70	0.61	2.84	3.40	4.62	0.85	
v	(m/s)	-0.355	-0.121	0.230	0.269	0.374	0.168	
V 90	(%)	-3.51	-1.13	2.95	2.77	5.23	1.85	
γ		0.059	0.140	0.055	0.074	-0.098	-0.066	
	(%)	9.02	18.49	7.29	10.53	-9.42	-8.53	
δ		0.304	0.406	0.312	0.359	-0.324	-0.246	
	(%)	9.51	11.56	8.69	10.01	-7.91	-6.81	

Tablo 3.4 ERA-Interim ve CFSR verileri için hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri

3.1.3.5 Ekstrem rüzgar iklimi

Ekstrem (en büyük) değer analizi her yılın maksimum rüzgar hızının dikkate alınmasıyla yapılmıştır. 1979–2018 yılları arasında 40 yıl olduğundan, en büyük değer analizinde olay sayısı 40 olmuştur. 1979–2018 yıllarını için iki farklı veri kaynağından (ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR) elde edilen veriler ile belirlenen rüzgar hızının ekstrem değer analizi GEV (Generalized Extreme Value) dağılımı kullanılarak irdelenmiştir (**Şekil 3.17**).

GEV dağılımı, ekstrem değer analizinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir ve GEV dağılımı, tip I, II ve III ekstrem değer dağılımı olarak da bilinen Gumbel, Frechet ve Weibull ekstrem değer teorisini kapsayan bir sürekli olasılık dağılımıdır (Ruggiero vd., 2010). Konum parametresi μ , ölçek parametresi β ve şekil parametresi α olan bir rastgele değişken *x* için kümülatif dağılım fonksiyonu aşağıda verildiği gibi dikkate alınmaktadır:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \alpha\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)\right]^{-1/\alpha}\right\}$$
(3.1)

GEV dağılımının parametrelerini tahmin etmek için birkaç yöntem vardır. Bu çalışmada GEV parametrelerinin belirlenmesinde en yaygın yöntemlerden biri olan maksimum olabilirlik (Coles, 2001; Katz vd., 2002; Soukissian ve Tsalis, 2015) yöntemi kullanılmıştır.

Seçilen üç referans noktası için rüzgar hızının GEV dağılımları **Şekil 3.17**'de, farklı yineleme dönemlerine (10, 50, 100 yıl) karşılık gelen rüzgar hız değerleri ve bu rüzgar hızlarının ERA-Interim verilerine göre CFSR verilerinden yüzde cinsinde değişim (RD, Rölatif Değişim) değerleri **Tablo 3.5**'te verilmiştir.

Güneybatı Karadeniz'de (N1), CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin, tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar verileri ile hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hız değerinin ERA-Interim verilerinde 21 m/s'yi aşarken, CFSR verilerinde 24 m/s'yi aştığı tespit edilmiştir. CFSR verileri ile 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için hesaplanan ekstrem rüzgar hız değerlerinin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan sırasıyla %19, %13 ve %12 daha yüksek tahmin ettiği saptanmıştır (**Tablo 3.5**, **Şekil 3.17**a).

Orta Karadeniz'de (N2), CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin, tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar verileri ile hesaplanan eğrinin belirgin şekilde üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hız değerinin ERA-Interim verilerinde 19 m/s'ye ulaşırken, CFSR verilerinde 24 m/s'ye aştığı saptanmıştır. CFSR verileri ile 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için hesaplanan ekstrem rüzgar hız değerlerinin, ERA-Interim verilerine göre hesaplananlardan yaklaşık %29 daha büyük olduğu tespit edilmiştir (**Tablo 3.5, Şekil 3.17**b).

Doğu Karadeniz'de (N3), CFSR rüzgar verisi ile için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin, tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar verisi ile hesaplanan eğrinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hız değerinin ERA-Interim verilerinde 18 m/s'yi aşarken, CFSR verilerinde 23 m/s'yi aştığı tespit edilmiştir CFSR verileri ile 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için hesaplanan ekstrem rüzgar hız değerlerinin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan sırasıyla %23, %27 ve %30 daha yüksek tahmin ettiği saptanmıştır (**Tablo 3.5, Şekil 3.17**c).

		V (m	/s)	RD (%)
	Yineleme			$\left(\frac{V_{CFSR} - V_{ERA-Interim}}{V_{ERA-Interim}}\right) * 100$
	Dönemi	ERA-Interim	CFSR	$V_{ERA-Interim}$
	(Yıl)			
	10	19.37±0.46	22.84±0.32	17.88
N1	50	21.11±0.94	23.95±0.49	13.44
	100	21.79±1.26	24.30±0.59	11.51
	10	17.16±0.33	22.09±0.41	28.78
N2	50	18.36±0.59	23.59±0.74	28.50
	100	18.79±0.74	24.13±0.95	28.46
	10	16.73±0.29	20.56±1.70	22.92
N3	50	17.76±0.48	22.60±1.21	27.29
	100	18.11±0.60	23.49±0.51	29.71

Tablo 3.5 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerine karşılık gelen ekstrem rüzgar hız ve RD değerleri



Şekil 3.17 Seçilen üç noktada; (a) N1, (b) N2, (c) N3, yıllık oluşma olasılıklarına göre rüzgar hızının ekstrem değer dağılımı

3.2 Ortalama Deniz Seviyesi Basıncı

3.2.1 ERA-Interim verileri ile ortalama deniz seviyesi basınç değişimi

Ortalama deniz seviyesi basıncının (P, hPa) rüzgar karakteristikleri üzerindeki etkisinin araştırması için ECMWF ERA-Interim veri tabanından 1979–2018 yılları için tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayan 40°–47° N ve 26°–42°E sınırları için uzamsal çözünürlüğü 0.25°x0.25°, zamansal çözünürlüğü 6 saat olan ortalama

deniz seviyesi basıncı verileri indirilmiştir. Daha sonra MATLAB yazılımı yardımıyla 1979–2018 yılları için, rüzgar karakteristiklerinde hesaplandığı gibi (Bölüm 3.1.1), yıllık (**Şekil B.3**), on yıllık (**Şekil 3.18**) ve 40 yıllık (**Şekil 3.19**) ortalamaları hesaplanmış ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılım grafikleri elde edilmiştir. Son olarak Bölüm 3.1.3'te belirlenen üç referans noktası için ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, beş yıllık ve on yıllık ölçekteki değişim eğilimi irdelenmiştir.

Şekil B.3'te ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için hesaplanan yıllık ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılım grafiklerinden havzanın doğusunun batısına kıyasla daha küçük ortalama basınç değerlerine maruz kaldığı belirlenmiştir. Bu ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde 1012.74 hPa </br>

1979–2018 yılları için ortalama deniz seviyesi basıcının on yıllık ölçekte Karadeniz çalışma alanı üzerinde nasıl değiştiğinin belirlenmesi için 1979–1988 (P₁), 1989–1998 (P₂), 1999–2008 (P₃) ve 2009–2018 (P₄) veri setleri oluşturulmuştur. Bu süreler için ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.18**'de verilmiştir.

Şekil B.3'te verilen yıllık ortalama deniz seviyesi basınç dağılımlarında olduğu gibi, **Şekil 3.18**'de verilen on yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının uzamsal dağılım grafiklerinde de göreceli olarak daha büyük ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin batı Karadeniz'de, göreceli olarak daha küçük ortalama değerlerin ise doğu Karadeniz'de olduğu tespit edilmiştir. Son on yıla doğru, yani 1980'li yıllardan 2010'lu yıllara doğru, nerdeyse tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin azaldığı açıkça gözlenmektedir. Özellikle kuzeydoğu Karadeniz üzerindeki ortalama basınç değerlerinin belirgin şekilde azalması dikkat çekicidir.


Şekil 3.18 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan 40 yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 3.19**'da verilmiştir.

40 yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımının (**Şekil 3.19**), yıllık (**Şekil B.3**) ve on yıllık (**Şekil 3.18**) ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının uzamsal dağılımlarına benzer olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle Karadeniz'in batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama deniz seviyesi basıncına sahip olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla **Şekil 3.19**'dan doğu Karadeniz'in, batı Karadeniz'e kıyasla daha düşük ortalama deniz seviyesi basıncına maruz kaldığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.19 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

Ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, on yıllık ve 40 yıllık ölçekteki uzamsal dağılımlarının birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Ortalama deniz seviyesi

basıncının 1979 yılından 2018 yılına doğru nasıl değiştiğini araştırmak için son on yıl için hesaplanan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinden (2009–2018, P₄), ilk on yıl (1979–1988, P₁) için hesaplananlar çıkarılmış (P₄-P₁) ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 3.20**'de verilmiştir.

Şekil 3.20 incelendiğinde son on yıl (2009–2018) için hesaplanan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin, ilk on yıl (1979–1990) için hesaplanan ortalama değerlerden daha küçük olduğu saptanmıştır. Tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde ortalama değerler arasındaki farkların, grafiğin sağ tarafındaki renk barından, negatif olduğu tespit edilmiştir. ECMWF ERA-Interim veri tabanından elde edilen ortalama deniz seviyesi basınç verileri ile belirlenen bu sonuç, 1979 yılından 2018 yılına doğru ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir.





3.2.2 CFRS verileri ile ortalama deniz seviyesi basınç değişimi

Ortalama deniz seviyesi basıncının (P, hPa) rüzgar karakteristikleri üzerindeki etkisinin araştırması için, ECMWF ERA-Interim veri tabanından alınan verilerinde yapıldığı gibi, NCEP/CFSR veri tabanından 1979–2018 yılları için tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayan 40°–47° N ve 26°–42°E sınırları için uzamsal çözünürlüğü 0.5°x0.5°, zamansal çözünürlüğü 1 saat olan ortalama deniz seviyesi basıncı verileri indirilmiştir. Daha sonra MATLAB yazılımı yardımıyla 1979–2018 zaman aralığı için, rüzgar karakteristiklerinde hesaplandığı gibi (Bölüm 3.1.2), yıllık (**Şekil B.4**), on yıllık (**Şekil 3.21**) ve 40

yıllık (**Şekil 3.22**) ortalamaları hesaplanmış ve uzamsal dağılım grafikleri elde edilmiştir. Son olarak Bölüm 3.1.3'te belirlenen üç referans noktası için ortalama deniz seviyesi basıncının değişim eğilimi incelenmiştir.

Şekil B.4'te CFSR verileri ile 1979–2018 yılları arasındaki her bir yıl için hesaplanan yıllık ortalama deniz seviyesi basıncının uzamsal dağılım grafiklerinden, yıllık ortalama değerlerinin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan biraz daha büyük olarak, 1012.77 hPa <P<1019.72 hPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu sınırlar içinde doğu Karadeniz'e ait ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin, batı Karadeniz'e kıyasla daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

1979–2018 yılları için ortalama deniz seviyesi basıcının on yıllık ölçekte Karadeniz çalışma alanı üzerinde nasıl değiştiğinin belirlenmesi için, ERA-Interim verilerinde hesaplandığı gibi, 1979–1988 (P₁), 1989–1998 (P₂), 1999–2008 (P₃) ve 2009–2018 (P₄) veri setleri oluşturulmuştur. Bu süreler için ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 3.21**'de verilmiştir.

Şekil B.4'te verilen yıllık ortalama deniz seviyesi basınç dağılımlarında olduğu gibi, **Şekil 3.21**'de verilen on yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının uzamsal dağılım grafiklerinin benzer olduğu yani batı Karadeniz'in göreceli olarak daha büyük ortalama basınç değerlerine, doğu Karadeniz'in ise göreceli olarak daha küçük ortalama basınç değerlerine maruz kaldığı tespit edilmiştir. Son on yıla doğru (2010–2018), yani 1980'li yıllardan 2010'lu yıllara doğru, Karadeniz üzerindeki ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin azaldığı saptanmıştır. ERA-Interim verilerinde de belirlendiği gibi özellikle kuzeydoğu Karadeniz üzerindeki ortalama eniz seviyesi basınç değerlerinin belirgin şekilde azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 3.21 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için 10 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan 40 yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 3.22**'de verilmiştir.

40 yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımının (**Şekil 3.22**), yıllık (**Şekil B.4**) ve on yıllık (**Şekil 3.21**) ölçekteki ortalama deniz seviyesi basıncının uzamsal dağılımlarına benzer olduğu saptanmıştır. Diğer bir ifadeyle Karadeniz'in batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama deniz seviyesi basınç değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. ERA-Interim verilerinde olduğu gibi, CFSR verilerinde de doğu Karadeniz'in, batı Karadeniz'e kıyasla daha düşük ortalama deniz seviyesi basıncına maruz kaldığı 40 yıllık ölçekteki ortalama deniz seviyesi grafiğinden (**Şekil 3.22**) söylenebilmektedir.



Şekil 3.22 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

CFSR verileri ile hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, on yıllık ve 40 yıllık ölçekteki uzamsal dağılımlarının birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Ortalama deniz seviyesi basıncının 1979 yılından 2018 yılına doğru nasıl değiştiğini anlamak için son on yıl için hesaplanan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinden (2009–2018, P₄), ilk on yıl (1979–1988, P₁) için hesaplananlar çıkarılmış (P₄-P₁) ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 3.23**'te verilmiştir.

Şekil 3.23'te verilen ortalama deniz seviyesi basıncının on yıllar arasındaki değişim grafiği incelendiğinde ilk on yıl (1979–1990) için hesaplanan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin, son on yıl (2009–2018) için hesaplanan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinden daha küçük olduğu belirlenmiştir. NCEP/CFSR veri tabanından elde edilen ortalama deniz seviyesi basınç verileri ile belirlenen bu sonuç, 1979 yılından 2018 yıllarına doğru ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.23 CFSR verileri ile Karadeniz çalışma alanı üzerindeki ortalama deniz seviyesi basıncının on yıllar arasındaki değişimi

Her iki veri kaynağı için de ortalama deniz seviyesi basıncının on yıllık (**Şekil 3.18** ve **Şekil 3.21**), 40 yıllık (**Şekil 3.19** ve **Şekil 3.22**) ortalama ve on yıllar arasındaki değişiminin uzamsal dağılım grafiklerinden (**Şekil 3.20** ve **Şekil 3.23**), 1979 yılından 2018 yılına doğru ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin azalma eğiliminde olduğu saptanmıştır. Bu sonucun küresel ısı değişimi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü ısı değişimi hava basıncında değişikliklere neden olmaktadır. Isınan hava, soğuyan havaya göre daha az yoğun olduğundan ve daha az hava basıncı oluşturduğundan yükseldiği

bilinmektedir. Dolayısıyla 1979–2018 yıllarının son yıllarına doğru (**Şekil 3.18** ve **Şekil 3.21**) ortalama deniz seviyesi basıncının sürekli azalması, 1979 yılından 2018 yılına doğru küresel ısının artması ile ilişkilendirilmiş ve bu durumun gelecekteki iklim sistemini önemli derecede etkileyeceği düşünülmektedir. Bu durum sonraki bölümlerde (Bakınız Bölüm 6 ve 7) projeksiyon verileri ile yapılan rüzgar ve dalga iklimi çalışmalarıyla daha detaylı incelenmiştir.

3.2.3 Yerel ortalama deniz seviyesi basıncı

ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR veri tabanından 1979–2018 yılları için indirilen ortalama deniz seviyesi basınç verilerinin, belirlenen üç referans noktası için yıllık, beş yıllık ve on yıllık değişim eğilimleri araştırılmış (**Şekil 3.24**) ve doğrusal regresyon analizi ile hesaplanan değişim eğilim değerleri **Tablo 3.8**'de özetlenmiştir. Ortalama deniz seviyesinin beş yıllık ve on yıllık ortalama değerleri sırasıyla **Tablo 3.6** ve **Tablo 3.7**'de verilmiştir.

Şekil 3.24'da verilen ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin seçilen üç referans noktasında yıllık (**Şekil 3.24**a), beş yıllık (**Şekil 3.24**b) ve on yıllık (**Şekil 3.24**c) değişim eğilimi grafiklerinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, 1979 yılından 2018 yılına doğru batı, orta ve doğu Karadeniz üzerinde, yani tüm çalışma alanı üzerinde, ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin azaldığını göstermektedir. Ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin on yıllar arası değişimini gösteren uzamsal dağılım grafiğinden de ortalama basınç değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde azalma eğiliminde olduğu belirlenmişti (**Şekil 3.20** ve **Şekil 3.23**).

Ortalama rüzgar karakteristiklerinde olduğu gibi (**Şekil 3.14**), ortalama deniz seviyesi basınç grafiklerinde de (**Şekil 3.24**) batı-doğu değişkenliği saptanmıştır. Batıdan doğuya doğru daha küçük ortalama rüzgar hızı, daha büyük DK değerlerine (**Şekil 3.14**) daha küçük ortalama deniz seviyesi basınç değerleri eşlik etmiştir. Özellikle doğu Karadeniz'de (N3), havzanın diğer bölgelerine kıyasla küçük ortalama rüzgar hızı ve ortalama deniz seviyesi basınç değerleri ortaya çıkmasına karşın göreceli olarak yüksek maksimum rüzgar hızlarının meydana gelmesi olması iklim sisteminin uzun dönemli değişim etkilerinin doğu Karadeniz üzerindeki bir sonucu olabileceğini düşündürmüştür.

Gerek ERA-Interim ve gerekse CFSR verileri ile hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının hem tüm Karadeniz çalışma alanı için elde edilen uzamsal dağılım grafiklerinden (yıllık, on yıllık, 40 yıllık ve on yıllar arası değişim grafiklerinden, **Şekil 3.18–Şekil 3.23**) hem de detaylı yerel analiz ile irdelenen üç referans noktasında (**Şekil 3.24**) 1979 yılından 2018 yılına doğru ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (**Tablo 3.8**). Bu durum küresel ısı değişimiyle ilişkilendirilmiştir. Çünkü ısı değişimi hava basıncında değişikliklere neden olmaktadır. Isınan havanın yükseldiği, soğuyan havaya göre daha az yoğun olduğu ve daha az hava basıncı oluşturduğu bilinmektedir. Dolayısıyla 1979 yılından 2018 yıllarına doğru (**Şekil 3.24**) basıncın sürekli azalması, ısının artması ile ilişkilendirilmiş ve bu durumun uzun dönemde iklim sistemini önemli derecede etkileyeceği düşünülmüştür. Karadeniz çalışma alanındaki küresel ısı değişimini ve olası etkilerinden biri olan deniz seviyesi değişimini daha detaylı incelemek için Bölüm 3.3'te deniz seviyesi değişimi ve Bölüm 3.4'te deniz yüzeyi sıcaklığı değişimi araştırılmıştır.



Şekil 3.24 Seçilen üç noktada ortalama deniz seviyesi basıncının (a) yıllık, (b) beş yıllık, (c) on yıllık ortalama değerlerinin değişim eğilimi. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

	I	ERA-Interin	n	CFSR			
YIL	N1 N2		N3	N1	N2	N3	
1979–1983	1016.36	1016.03	1015.70	1016.50	1015.56	1015.04	
1984–1988	1016.61	1016.24	1016.00	1016.83	1015.87	1015.19	
1989–1993	1017.76	1017.30	1016.95	1018.10	1017.08	1016.59	
1994–1998	1016.47	1016.11	1015.82	1016.76	1015.89	1015.52	
1999–2003	1016.37	1016.15	1015.98	1016.73	1016.03	1015.83	
2004–2008	1016.36	1016.16	1015.79	1016.81	1016.10	1015.74	
2009–2013	1015.33	1015.06	1014.63	1015.75	1015.15	1014.74	
2014–2018	1016.20	1015.87	1015.57	1016.63	1015.87	1015.44	

Tablo 3.6 Beş yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerleri

Tablo 3.7 On yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerleri

	I	ERA-Interin	n	CFSR			
YIL	N1	N2	N3	N1	N2	N3	
1979–1988	1016.48	1016.13	1015.85	1016.67	1015.71	1015.12	
1989–1998	1017.11	1016.71	1016.39	1017.43	1016.48	1016.06	
1999–2008	1016.37	1016.16	1015.89	1016.77	1016.07	1015.79	
2009–2018	1015.77	1015.47	1015.10	1016.19	1015.51	1015.09	

Tablo 3.8 Seçilen üç nokta için ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, beş yıllık ve on yıllık ölçekte değişim eğilim değerleri

		ERA-Interim			CFSR		
		N1	N2	N3	N1	N2	N3
P _{m_villik}	(hPa)	-1.014	-0.913	-1.019	-0.694	-0.347	-0.117
	(%)	-0.10	-0.09	-0.10	-0.07	-0.03	-0.01
P _{m_5yillik}	(hPa)	-5.456	-4.805	-5.148	-3.908	-1.973	-0.800
	(%)	-0.74	-0.62	-0.68	-0.48	-0.22	-0.08
P _{m_10yillik}	(hPa)	-11.283	-9.929	-10.737	-8.159	-4.044	-1.388
	(%)	-2.54	-1.94	-2.28	-1.35	-0.50	-0.15

3.3 Deniz Seviyesi Değişimi

Karadeniz çalışma alanı üzerindeki deniz seviyesi değişimlerini değerlendirmek için çok amaçlı altimetre verileri kullanılmıştır. Karadeniz çalışma alanında 0.125°x0.125° uzamsal çözünürlüğe sahip günlük deniz seviyesi anomali verileri, Uydu Oşinografik Verilerinin Fransız Arşivlenmesi, Doğrulanması ve Yorumlanması (French Archiving, Validation and Interpretation of the Satellite Oceanographic Data, AVISO; <u>http://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html</u>)'dan elde edilmiştir. Bu veri seti, çeşitli uydu görevlerinden elde edilen verilerin bir ürünüdür ve Ocak 1993'ten bugüne kadar olan süreyi kapsamaktadır. Deniz seviyesi anomali (Sea Level Anomaly, SLA) verileri, yirmi yıllık ortalama referans süresi (1993–2012) için hesaplanan belirli bir zaman ve bölgedeki ortalama deniz yüzeyi üzerindeki suyun yüksekliğini referans almaktadır. Bu veri seti için, incelenen süre 26 yıl yani 1993–2018 yıllarını kapsamaktadır. Rüzgar verileri için incelenen son yıl 2018 yılı olduğundan, çalışmadaki bütünlüğü korumak amacıyla 2018 yılına kadar olan deniz seviyesi değişimi verilerinin detaylı incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmada MATLAB yazılımı yardımıyla önce 26 yıllık ortalama SLA, daha sonra on yıllardaki değişimi incelemek amacıyla 1993-2002, 2003-2012, 2013–2018 yıllarındaki ortalama SLA verilerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları araştırılmıştır. SLA verileri için son veri seti, incelenen veri seti için son yılın 2018 yılı olması sebebiyle, altı yıllık ortalamayı içermektedir. Sekil 3.25 AVISO verileri ile 1993–2018 yılları için 26 yıllık ortalama SLA verilerinin, Sekil 3.26 AVISO verileri ile 1993-2002 (SLA1), 2003–2012 (SLA₂), 2013–2018 (SLA₃) yıllarındaki on yıllık ortalama SLA verilerinin Karadeniz calışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. On yıllar arasındaki değişimi daha yakından incelemek amacıyla 2013–2018 yıllarındaki ortalama SLA₃ değerlerinden, 1993–2000 yıllarındaki ortalama SLA₁ değerleri (SLA₃–SLA₁) çıkarılmış ve tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki SLA değerlerinin uzamsal olarak nasıl değiştiği araştırılmıştır (Şekil 3.27).

Şekil 3.25'ten 26 yıllık ortalama SLA değerlerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde artma eğimlinde olduğu SLA'nın pozitif değerlerinden açıkça gözlenmektedir. Bu değerlerin -10 cm ile 15 cm arasında değiştiği saptanmıştır.



Şekil 3.25 AVISO verileri ile 1993–2018 yılları için 26 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama SLA verilerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

Şekil 3.26'dan 1993–2002 yıllarından (SLA₁), 2013–2018 (SLA₃) yıllarına doğru deniz seviyesi değişiminin arttığı (deniz seviyesinin yükseldiği) ve bu artışın özellikle doğu Karadeniz'de daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. **Şekil 3.26**'da verilen 1993–2002 (SLA₁), 2003–2012 (SLA₂) ve 2013–2018 (SLA₃) yılları ortalama deniz seviyesi değişiminin maksimum değerinin doğu Karadeniz'de olduğu ve bu değerlerin sırasıyla 8 cm, 9 cm ve 11 cm'ye ulaştığı belirlenmiştir. Özellikle 2013–2018 (SLA₃) yıllarında doğu Karadeniz'in neredeyse tamamında, ortalama deniz seviyesi değişiminin bu maksimum değere (11 cm) eşit olduğu tespit edilmiştir.

Bölüm 3.2'de tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin 1980'li yıllardan 2010'lu yıllara doğru azalma eğilimine olduğu tespit edilmişti (**Şekil 3.18** ve **Şekil 3.21**). Deniz seviyesi değişiminin 1993–2002 (SLA₁) yıllarından, 2013–2018 (SLA₃) yıllarına doğru pozitif değerler ile artma eğiliminde olduğu ve bu değerlerin son yıllara doğru daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, azalan ortalama deniz seviyesi basınç değerlerine artan (yükselen) deniz seviyesi değişimi eşlik etmektedir.



Şekil 3.26 AVISO verileri ile 1993–2002 (SLA₁), 2003–2012 (SLA₂) ve 2013–2018 (SLA₃) yılları için hesaplanan ortalama SLA verilerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

Ortalama deniz seviyesi değişiminin 1993 yılından 2018 yılına doğrul değişimini daha detaylı araştırmak için son on yıl için hesaplanan ortalama deniz seviyesi değişimi (2013–2018, SLA₃) değerlerinden ilk on yıl için hesaplananlar (1993–2002, SLA₁) çıkarılmış (SLA₃-SLA₁) ve Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılım grafiği **Şekil 3.27**'de verilmiştir.

Şekil 3.27 incelendiğinde 1993–2002 (SLA₁) yıllarından, 2013–2018 (SLA₃) yıllarında doğru deniz seviyesi değişiminin neredeyse tüm Karadeniz üzerinde artış eğiliminde olduğu ve en büyük değerin batı Karadeniz'de 4 cm'ye ulaşırken doğu Karadeniz'de 6 cm'yi aştığı belirlenmiştir. Doğu Karadeniz'de son yıllara doğru (2013–2018) ortalama deniz seviyesi değişim değerlerinin belirgin şekilde artması oldukça dikkat çekicidir.



Şekil 3.27 AVISO verileri ile tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki ortalama SLA verilerinin on yıllar arasındaki değişimi

3.4 Deniz Yüzeyi Sıcaklığı Değişimi

Karadeniz üzerindeki deniz yüzey sıcaklığını değerlendirmek için 0.25°x0.25° uzamsal çözünürlüğe ve 1 günlük zamansal çözünürlüğe sahip olan deniz yüzey sıcaklığı anomali (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) verileri, optimum interpolasyon (OI) yöntemini kullanan Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) Ulusal Çevre Bilgi Merkezi (NCEI, National Centers for Environmental Information) veri tabanından indirilmiştir. SSTA verileri, Eylül 1981'den günümüze mevcuttur. Bu çalışmada SSTA verileri 1981–2018 yılları arasında 38 yılı kapsamaktadır. Rüzgar verileri için incelenen son yıl 2018 yılı olduğundan, çalışmadaki bütünlüğü korumak amacıyla 2018 yılına kadar olan deniz yüzey sıcaklığı değişimi verileri detaylı incelenmiştir.

Bu çalışmada MATLAB yazılımı yardımıyla önce 38 yıllık ortalama SSTA, daha sonra on yıllardaki ortalamaları incelemek amacıyla 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010, 2011–2018 yıllarındaki ortalama SSTA verilerinin tüm Karadeniz çalışma alanı boyunca uzamsal dağılımları araştırılmıştır. Son veri seti, incelenen veri seti için son yılın 2018 yılı olması sebebiyle, sekiz yıllık ortalama SSTA verilerini kapsamaktadır. **Şekil 3.28** NOAA/NCEI verileri ile 1981–2018 yılları için 38 yıllık ortalama SSTA verilerinin, **Şekil 3.29** NOAA/NCEI verileri ile 1981–1990 (SSTA₁), 1991–2000 (SSTA₂), 2001–2010 (SSTA₃), 2011–2018 (SSTA₄) on yıllık ortalama SSTA verilerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. On yıllar arasındaki değişimi daha

yakından incelemek amacıyla 2011–2018 yıllarındaki ortalama SSTA₄ değerlerinden, 1981–1900 yıllarındaki ortalama SSTA₁ değerleri (SSTA₄–SSTA₁) çıkarılmış ve tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki SSTA değerlerinin uzamsal olarak nasıl değiştiği araştırılmıştır (**Şekil 3.30**).

Şekil 3.28'den ortalama SSTA değerlerinin Karadeniz üzerinde artan bir eğilimde olduğu saptanmıştır. Ortalama SSTA'nın maksimum değerinin 1.07°C ile Karadeniz'in kuzeydoğu kıyılarında olduğu tespit edilmiş. Bölüm 3.2 ve 3.3'te doğu Karadeniz'in, batı Karadeniz'e kıyasla daha düşük ortalama deniz seviyesi basıncına ve daha büyük deniz seviyesi değişimine maruz kaldığı belirlenmişti. Dolayısıyla batı Karadeniz ile karşılaştırıldığında doğu Karadeniz'in, daha düşük ortalama deniz seviyesi basıncı ve daha büyük deniz seviyesi değişimlerine daha büyük deniz yüzeyi sıcaklığı değişimi eşlik ettiği söylenebilmektedir.



Şekil 3.28 NOAA/NCEI verileri ile 1981–2018 yılları için 38 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama SSTA verilerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

Şekil 3.29'dan 1981–1990 yıllarından (SSTA₁), 2011–2018 yıllarına (SSTA₄) doğru deniz yüzeyi sıcaklığı değişiminin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde belirgin şekilde arttığı ve bu artışın en büyük değerlerinin doğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde, ilk iki on yılda (1981–1990 ve 1991–2000) ortalama SSTA değerlerinde negatif değerlerin (yani azalan eğilimin) hakim olduğu, son iki on yılda (2001–2010, 2011–2018) ise belirgin şekilde pozitif değerlerin (yani artan eğilimin) hakim olduğu belirlenmiştir. Ortalama SSTA değerlerinin en büyük değerlerinin, 4 on yıllık ortalama grafiklerinde de kuzeydoğu Karadeniz kıyılarında olduğu saptanmıştır.

Bu sonuç, 1981 yılından 2018 yılına doğru Karadeniz çalışma alanında ortalama SSTA'nın pozitif değerler ile artma eğiliminde olduğu yani çalışma alanında küresel ısı değişiminde küresel ısınmanın hakim olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.29 NOAA/NCEI verileri ile 1981–1990 (SSTA₁), 1991–2000 (SSTA₂), 2001–2010 (SSTA₃) ve 2011–2018 (SSTA₄) yılları için hesaplanan ortalama SSTA verilerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

Ortalama deniz yüzeyi sıcaklığı değişiminin 1981 yılından 2018 yılına doğru değişimini daha detaylı araştırmak için son on yıl için hesaplanan ortalama deniz yüzeyi sıcaklığı değişimi (2011–2018, SSTA₄) değerlerinden ilk on yıl için hesaplananlar (1981–1990, SSTA₁) çıkarılmış (SSTA₄-SSTA₁) ve SSTA'nın Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 3.30**'da verilmiştir.

Şekil 3.30 incelendiğinde 1981–1990 (SSTA₁) yıllarından, 2011–2018 (SSTA₄) yıllarına doğru deniz yüzey sıcaklığı değişiminin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Deniz yüzeyi sıcaklığındaki en büyük değişim değerinin yaklaşık yaklaşık 1.64°C ile doğu Karadeniz'de olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.30 NOAA/NCEI verileri ile tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki ortalama SSTA verilerinin on yıllar arasındaki değişimi

3.5 Rüzgar Gücü Değerlendirmesi

ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR veri tabanlarından elde edilen rüzgar hız verileri kullanılarak tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki rüzgar gücü potansiyeli araştırılmıştır. İlk olarak rüzgar türbinin motor göbek yüksekliği, motorun yerden yüksekliği, belirlenmiştir. Wieringa (1993) ve Hdidouan ve Staffell (2017) modern türbinlerin göbek yüksekliğinin 100–150 m'ye kadar uygulanabilir olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada yeniden analiz verilerinin 1000 mBar basınç seviyesine yaklaşık 110 m yüksekliğe karşılık gelen rüzgar hız verileri kullanılmıştır.

Rüzgar gücü, 110 m yükseklikteki rüzgar hızı kullanılarak aşağıda verilen ifade yardımıyla hesaplanmıştır (Hdidouan ve Staffell, 2017; Davy vd., 2018):

$$WPD = \frac{1}{2}\rho V_m^3 \tag{3.2}$$

Burada WPD (Wind Power Density) rüzgar gücü yoğunluğunu (W/m²), ρ havanın özgül kütlesini (1.225 kg/m³) ve V_m belirli bir yükseklikteki (bu çalışmada 110 m) ortalama rüzgar hızını belirtmektedir.

3.5.1 Uzun dönemli rüzgar gücü değerlendirmesi

ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR verileri ile 110 m yükseklik için hesaplanan WPD'nin 1979–2018 yıllarındaki 40 yıllık ortalamasının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılım grafikleri **Şekil 3.31**'de verilmiştir. 40 yıllık ortalama WPD değerlerinin ERA-Interim verilerinde 4.51 W/m²–288.68 W/m² arasında değişirken, CFSR verilerinde daha büyük olarak 6.80 W/m²–368.48 W/m² arasında değiştiği belirlenmiştir. ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan rüzgar gücü değerleri arasındaki farkın, rüzgar hızları arasındaki farktan daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Çünkü rüzgar hızındaki küçük bir değişimin rüzgar hızının küpüyle ilişkili olan rüzgar gücü potansiyelinde büyük bir değişime neden olmaktadır (Islek vd., 2020a).

40 yıllık ortalama WPD'nin en yüksek değerlerinin batı Karadeniz'de olduğu ve bu değerlerin ERA-Interim (**Şekil 3.31**a) ve CFSR (**Şekil 3.31**b) verileri için sırasıyla 200 W/m² ve 300 W/m²'yi aştığı belirlenmiştir. Her iki veri kaynağı için elde edilen WPD'nin uzamsal dağılım grafiklerinden batı Karadeniz'in, doğu Karadeniz'e kıyasla daha büyük rüzgar gücü potansiyeline sahip olduğu açık bir şekilde gözlenmektedir. Bölüm 3.1'de batı Karadeniz rüzgar ikliminin havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha şiddetli, uzun ömürlü ve istikrarlı rüzgarlarla, buna karşılık doğu Karadeniz'in daha zayıf, kısa ömürlü ve oldukça değişken rüzgarlar ile karakterize edildiği belirlenmişti. Batı Karadeniz'in daha enerjik rüzgarlara kalması, daha büyük rüzgar gücü potansiyeli maruz ile sonuçlanmıştır. Bu bölümde WPD ile ilgili yapılan detaylı yerel analizler için Bölüm 3.1.3'te batı Karadeniz'de seçilen N1 (28.5°E; 42.5°N) konumu detaylı olarak irdelenmiştir.



Şekil 3.31 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (a) ERA-Interim, (b) CFSR

ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile Denklem (1) yardımı ile 110 m yükseklikteki rüzgar gücü N1 (28.5°E; 42.5°N) için hesaplanmış ve 1979 yılından 2018 yılına doğru yıllık ortalama WPD'nin değişim eğilimi **Şekil 3.32**'de verilmiştir. ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ortalama WPD'nin hafif azalma eğiliminde olduğu saptanmıştır (benzer sonuç, ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan ortalama rüzgar hızının değişim eğiliminde de belirlenmiştir, **Şekil 3.14** ve **Şekil 3.15**).

Yıllık ortalama WPD değerlerinin ERA-Interim ve CFSR verileri için sırasıyla 146.73 W/m²–237.31 W/m² ve 193.45 W/m²–341.84 W/m² arasında değiştiği saptanmıştır. CFSR verileri ile hesaplanan yıllık ortalama WPD değerlerinin ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan yaklaşık 40 W/m² daha büyük olduğu **Şekil 3.32**'den açıkça gözlenmektedir. CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin, ERA-Interim rüzgar verileri ile hesaplananlardan daha büyük olduğu benzer sonuç Bölüm 3.1.3'te yapılan yerel rüzgar iklim analizlerinde de belirlenmişti (Bakınız **Şekil 3.14** ve **Şekil 3.15**).



Şekil 3.32 ERA-Interim ve CFSR verileri ile N1 için hesaplanan yıllık ortalama WPD'nin uzun dönemli değişim eğilimi

3.5.2 Mevsimsel rüzgar gücü değerlendirmesi

Şekil 3.33, 1979–2018 yılları için Karadeniz çalışma alanında ERA-Interim ve CFSR rüzgar veri kaynağı ile 110 m yükseklikte hesaplanan 40 yıllık ortalama mevsimsel WPD'nin uzamsal dağılım grafiklerini göstermektedir. Bu çalışmada her mevsim için ortalama WPD, olağan mevsimsel aylara göre hesaplanmıştır, bunlar; kış–AOŞ (Ara–Oca–Şub), ilkbahar–MNM (Mar–Nis–May), yaz–HTA (Haz–Tem–Ağu) ve sonbahar–EEK (Eyl–Eki–Kas).

40 yıllık mevsimsel ortalama WPD'nin uzamsal dağılımlarının (**Şekil 3.33**), 40 yıllık ortalama WPD'nin uzamsal dağılımlarına (**Şekil 3.33**) benzer olduğu ancak dört mevsim için hesaplanan ortalama WPD şiddetlerinin birbirinden belirgin şekilde farklı olduğu belirlenmiştir.

Beklenildiği gibi kış ve yaz mevsimleri için hesaplanan WPD değerlerinin arasında önemli bir fark olduğu tespit edilmiştir. Kış mevsimi için hesaplanan ortalama WPD değerinin, 40 yıllık ortalama WPD değerinden yaklaşık %65 ve yaz mevsimi için hesaplanan ortalama WPD değerinden yaklaşık %185 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yaz mevsimi için hesaplanan ortalama WPD değerinin ise 40 yıllık ortalama WPD değerinden yaklaşık %42 daha düşük olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.33 1979–2018 yılları için 40 yıllık ölçekte hesaplanan ortalama mevsimsel WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar verileri ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

Batı Karadeniz'de belirlenen N1 (28.5°E; 42.5°N) için mevsimsel ortalama WPD'nin değişimi %95 güven aralığıyla **Şekil 3.34**'te verilmiştir. ERA-Interim ve CFSR verileri ile kış mevsimi için hesaplanan ortalama WPD değerinin, yaz mevsimi için hesaplanan WPD değerinden yaklaşık 250 W/m² daha büyük olduğu belirlenmiştir. ERA-Interim ve CFSR verileri için hesaplanan mevsimlerin ortalama WPD değerleri sırasıyla 184 W/m² ve 236 W/m²'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Kararlı ve sürdürülebilir rüzgar gücü için düşük seviyede zamansal değişimle birlikte yüksek seviyede kinetik enerjinin olması beklenmektedir. Batı Karadeniz'de yer alan N1 (28.5°E; 42.5°N) için dört mevsimde de % 95 güven aralığının oldukça dar olması, dört mevsim için de düşük seviyede zamansal

değişimin olduğunu belirtmektedir. Bu sonuç, batı Karadeniz'in kararlı, enerik ve sürdürülebilir rüzgar koşullarının sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.34 (a) ERA-Interim, (b) CFSR verileri ile batı Karadeniz'de (41.5° N; 28.5° E) belirlenen N1 için hesaplanan mevsimsel ortalama WPD'nin değişim eğilimi



4.1 MIKE 21 SW

4.1.1 Giriş

MIKE 21 SW, yapılandırılmamış ağlara dayanan yeni nesil spektral rüzgar-dalga modelini içerir. Model, derin deniz ve kıyı bölgelerinde rüzgar kaynaklı dalga ile soluğan dalgalarının gelişimini, sönümlenmesini ve dönüşümünü benzeştirmektir.

MIKE21 SW iki farklı formülasyona sahiptir:

- Yönsel ayrışmış parametrik formülasyon
- Tam spektral formülasyon

Yönsel ayrışmış parametrik formülasyon, dalga hareket korunum denkleminin parametrelendirilmesine dayanır. Parametrelendirme, frekans alanında yapılmıştır, dalga hareket spektrumunun sıfırıncı ve birinci momentleri belirlenmesiyle elde edilmektedir.

Tam spektral formülasyon, Komen vd. (1994) ve Young (1999)'da tanımlanan dalga hareket korunum denklemine dayanmaktadır, burada yönsel-frekans dalga hareket spektrumundan elde edilmektedir.

MIKE21 SW aşağıdaki fiziksel olayları içermektedir;

- Rüzgar etkisiyle dalga gelişimi
- Doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimi
- Köpüklenme nedeniyle sönümlenme
- Taban sürtünmesi nedeniyle sönümlenme
- Derinlik kaynaklı dalga kırılmasına bağlı sönümlenme

- Derinlik değişimlerinden dolayı sapma ve sığlaşma
- Dalga-akıntı etkileşimi
- Zamanla değişen su derinliğinin etkisi

Temel denklemlerin coğrafi ve spektral alanda ayrıklaştırılması merkezi sonlu hacimler metodu kullanılarak gerçekleştirilir. Coğrafi alanda, yapılandırılmamış bir ağ tekniği kullanılır. Zaman integrasyonu, çok serili açık yöntemin uygulandığı küçük adım yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilir.

4.1.2 Uygulama alanları

MIKE21 SW, derin deniz ve kıyı bölgelerinde dalga iklim tahmini için kullanılmaktadır.

Başlıca uygulama alanı derin deniz, kıyı ve liman yapılarının tasarımıdır, bu yapıların güvenli ve ekonomik tasarımı için dalga yüklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir. Ölçülen veriler çoğunlukla, ekstrem deniz koşullarının yeterince doğru tahminlerini yapabilmek için uzun süreler boyunca mevcut değildir. Bu durumda ölçülen veriler, MIKE21 SW kullanılarak önemli fırtınaların dalga koşullarının benzeştirilmesi yoluyla tahmin verileri ile tamamlanabilir.

MIKE21 SW özellikle eşzamanlı dalga tahmin ve analizi için bölgesel ölçekte ve yerel ölçekte uygulanabilmektedir. Ağın bölgesel kısmı için kaba uzamsal ve zamansal çözünürlük kullanılır ve kıyı çizgisindeki sığ su ortamını tanımlayan yüksek çözünürlüklü bir sınır ve derinlik uyarlamalı ağ kullanılır.

MIKE21 SW ayrıca büyük bir kısmı dalga koşulları ve buna bağlı dalga kaynaklı akıntılar tarafından oluşturulan katı madde taşınımının hesaplanması için de kullanılır. Dalga kaynaklı akıntı, surf bölgesinde meydana gelen gerilme akısındaki gradyanlarla üretilir. MIKE 21 SW, dalga koşullarını ve ilgili gerilme akısı hesaplamak için kullanılabilir.

4.1.3 Temel denklemler

4.2.3.1 Genel

Ağırlık dalgalarının dinamiği, dalga hareket yoğunluğuna ait taşınım denklemiyle tanımlanmaktadır. Küçük ölçekli uygulamalar için temel taşınım genellikle Kartezyen koordinatlar için formüle edilirken, küresel kutupsal koordinatlar ise büyük ölçekli uygulamalar için kullanılmaktadır. Dalga hareket yoğunluk spektrumu iki dalga faz parametresi fonksiyonudur ve zaman ile alanda değişmektedir. İki dalga faz parametresi, dalga sayısı vektörü \vec{k} ve büyüklüğü (k) ile dalga yönü (θ) olabilir. Ayrıca dalga faz parametreleri dalga yönü (θ) ile birlikte ya göreceli açısal frekans $\sigma = 2\pi f_r$ ya da mutlak açısal frekans $\sigma = 2\pi f_a$ olabilmektedir. Burada verilen modelin düzenlenmesinde parametre olarak dalga yönü (θ) ve göreceli açısal frekans (σ) seçilmiştir. Hareket yoğunluğu N(σ , θ), enerji yoğunluğu E(σ , θ) ile ilişkilidir.

$$N = \frac{E}{\sigma} \tag{4.1}$$

Yavaş değişen derinliklerde ve akıntılarda ilerleyen dalgalar için göreceli açısal frekans (akıntı hızıyla hareket eden referans bir bölge içerisinde gözlemlendiği gibi) ve mutlak açısal frekans (sabit bir bölge içerisinde gözlemlendiği gibi) arasındaki ilişki doğrusal dispersiyon ifadesi ile verilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{gktanh(kd)} = \omega - \vec{k}.\vec{U}$$
(4.2)

Burada *g*, yerçekimi ivmesini; *d*, su derinliğini ve \vec{U} akıntı hız vektörünü tanımlamaktadır. Dalga enerjisine ait grup hızı büyüklüğünün (c_g) akıntı ile ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k}$$
(4.3)

Dalga faz hızının (c) akıntı ile ilişkisi aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$c = \frac{\sigma}{k} \tag{4.4}$$

Frekans spektrumu, minimum frekans (σ_{min}) ve maksimum frekans (σ_{maks}) değerleri arasında sınırlıdır. Frekans spektrumu, kesme frekansında düşük frekans değerleri için deterministik prognostik kısım ve kesme frekansında yüksek frekans değerleri için analitik diyognostik kısım olarak ikiye ayrılmaktadır. Kesme frekansı WAMC4 modelinde (WAMDI Grup, 1988; Komen vd., 1994) yerel rüzgar hızına ve ortalama frekansa bağlıdır. Spektrumun deterministik kısmındaki dalga hareket yoğunluğu, taşınım denkleminin sayısal yöntem kullanılarak çözülmesiyle belirlenmektedir. Kesme frekansının üzerinde yani prognostik bölgenin limit değerinde aşağıda verilen parametrik koşul uygulanmaktadır;

$$E(\sigma,\theta) = E(\sigma_{maks},\theta) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{maks}}\right)^{-m}$$
(4.5)

Burada m, sabit bir değeri göstermektedir. Modelde m değeri 5 olarak alınmıştır. Maksimum prognostik frekans aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\sigma_{kesme} = min \left[\sigma_{maks}, maks(2.5\bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})\right]$$
(4.6)

 σ_{maks} deterministik dalga modelinde maksimum ayrık frekans olarak kullanılmaktadır, $\bar{\sigma}$ ortalama göreceli frekans, $\sigma_{PM} = g/(2.8u_{10})$ Pierson-Moskowitz ait tam gelişmiş dalga (u_{10} ortalama su seviyesinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızı) için pik frekansı tanımlamaktadır. Doğrusal olmayan taşınım hesaplamalarında ve kaynak fonksiyonlarda kullanılan integral parametrelerinin hesaplanmasında diyognostik koşul kullanılmaktadır. Minimum frekans altındaki spektral yoğunluklar sıfır olarak kabul edilmektedir.

4.2.3.2 Dalga hareket konum denklemi

Dalga hareket korunum denklemi, Kartezyen ve Küresel koordinatlarda formüle edilmiştir (Komen, 1994; Young, 1999).

<u>Kartezyen Koordinatlar</u>

Yatay kartezyen koordinatlarda dalga hareket korumun denklemi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \left(\vec{v} \, N \right) = \frac{S}{\sigma} \tag{4.7}$$

 $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ hareket yoğunluğunu, t zamanı, $\vec{x} = (x, y)$ kartezyen koordinatlarını ve $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ ise x alanında ilerleyen 4 boyutlu dalga grup hızını göstermektedir.

 σ , θ *ve S* enerji dengesi denklemi için kaynak terimidir. ∇ ; \vec{x} , σ *ve* θ alanındaki 4 boyutlu diferansiyel operatördür. İlerlemeye ait 4 karakteristik hız aşağıda verilmektedir.

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U}$$
(4.8)

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$
(4.9)

$$c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$
(4.10)

s; θ dalga yönündeki uzay koordinatı ve m ise *s*'ye dik doğrultudaki koordinatı göstermektedir. $\nabla_{\vec{x}}$; \vec{x} alanındaki 2 boyutlu diferansiyel operatördür.

Küesel koordinatlar

Küresel koordinatlarda korunmuş özellik hareket yoğunluğudur $\widehat{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$. Burada $\vec{x} = (\phi, \lambda)$ küresel koordinatlarda, ϕ enlemi, λ ise boylamı göstermektedir. Hareket yoğunluğu \widehat{N} ile normal hareket yoğunluğu N (normal enerji yoğunluğu E) arasındaki ilişki $\widehat{N} d\sigma d\theta d\phi d\lambda = N d\theta d\sigma dx dy$ ifadesiyle ya da aşağıdaki denklemle verilmiştir.

$$\widehat{N} = NR^2 \cos\phi = \frac{ER^2 \cos\phi}{\sigma} \tag{4.11}$$

Burada R dünyanın yarıçapıdır. Küresel koordinatlarda dalga hareket denge denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\frac{\partial \widehat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} c_{\phi} \widehat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_{\lambda} \widehat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} \widehat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} \widehat{N} = \frac{\widehat{S}}{\sigma}$$
(4.12)

Burada $\hat{S}(\vec{x}, \sigma, \theta, t) = SR^2 cos\phi$ toplam kaynak ve kuyu fonksiyonudur. Dört karakteristik yayılma hızı:

$$c_{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g \cos\theta + u_{\phi}}{R} \tag{4.13}$$

$$c_{\lambda} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \cos\theta + u_{\lambda}}{R \cos\phi}$$
(4.14)

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} - \frac{d}{R} \left(\frac{1}{\cos\phi} \frac{du_{\lambda}}{\partial\lambda} + \frac{du_{\phi}}{\partial\phi} - u_{\phi} \tan\phi \right) \right] - \frac{kc_{g}}{R} \left[\cos\theta \left(\sin\theta \frac{du_{\lambda}}{d\phi} + \cos\theta \frac{du_{\phi}}{d\phi} \right) + \frac{\sin\theta}{\cos\phi} \left(\sin\theta \frac{du_{\lambda}}{d\lambda} + \cos\theta \frac{du_{\phi}}{\partial\lambda} \right) \right]$$

$$-\cos\theta \tan\phi \left(u_{\lambda} \sin\phi + u_{\phi} \cos\theta \right)$$

$$c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{c_{g} \sin\theta \tan\phi}{R} + \frac{1}{Rk} \frac{\delta\sigma}{\delta d} \left(\sin\theta \frac{\partial d}{\partial\phi} - \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \frac{\partial d}{\partial\lambda} \right) + \frac{\sin\theta}{R} \left(\sin\theta \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial\phi} + \cos\theta \frac{\partial u_{\phi}}{\partial\phi} \right) -$$

$$\frac{\cos\theta}{R \sin\phi} \left(\sin\theta \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial\lambda} + \cos\theta \frac{\partial u_{\lambda}}{\partial\lambda} + \cos\theta \frac{\partial u_{\phi}}{\partial\lambda} \right)$$

$$(4.16)$$

Burada (u_{ϕ}, u_{λ}) ortalama derinlige göre akıntı hızının \vec{U} 'ya ait bileşenlerini göstermektedir. Dalga yönü deniz için kabul edilen (kuzeyden başlayarak pozitif saat yönünde) rüzgarın esme yöndür.

4.2.3.3 Kaynak fonksiyonları

Enerji kaynak terimi (S), farklı fiziksel olaylar sonucu meydana gelen kaynak fonksiyonların süperpozisyonunu temsil etmektedir.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$
(4.17)

Burada S_{in} rüzgarın ürettiği enerjiyi, S_{nl} doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşiminden dolayı meydana gelen enerji taşınımını, $S_{ds,w}$ köpüklenme nedeniyle enerji harcanımını, $S_{ds,b}$ taban sürtünmesi nedeniyle enerji harcanımını ve $S_{ds,br}$ derinlik nedeniyle kırılma sonucu enerji harcanımını göstermektedir.

4.2.3.3.1 Rüzgar girdisi

Janssen (1989), Janssen vd. (1989) ve Janssen (1991) çalışmalarında rüzgardan kaynaklanan dalga üremesinin büyüme oranının dalga yaşına da bağlı olduğunu göstermiştir. Bu deniz durumunun aerodinamik direnç ile ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır.

Kaynak girdisi S_{in} aşağıda verilmiştir.

$$S_{in} = (f, \theta) = maks(\alpha, \gamma E(f, \theta))$$
(4.18)

Burada α doğrusal büyümeyi, γ doğrusal olmayan büyüme oranını temsil etmektedir.

<u>Doğrusal olmayan büyüme</u>

Dalga büyüme oranının γ basit bir parametrelendirilmesi daha önce yaptığı ayrıntılı sayısal sonuçların bir eğri haline dönüştürülmesi ile Janssen (1991) tarafından verilmiştir. Janssen'in ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\gamma = \varepsilon \beta \sigma x^2 \tag{4.19}$$

 ε , havanın yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranını göstermektedir (ρ_a/ρ_w). σ ise göreceli açısal frekanstır ve *x* aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$x = \frac{u_*}{c} \cos\left(\theta - \theta_w\right) \tag{4.20}$$

Burada u_* rüzgar kayma hızını, *c* faz hızını ve θ ile θ_w sırasıyla dalga ve rüzgar yönünü göstermektedir. Sonuç olarak β aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$\beta = \frac{2.2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \qquad \mu \le 1 \beta = 0 \qquad \mu > 1$$
(4.21)

 κ , Von Karman sabitini temsil etmekte olup, 0.41 değerini almaktadır. μ ise boyutsuz kritik yüksekliği göstermektedir.

$$\mu = k z_c \tag{4.22}$$

Burada k dalga sayısı, z_c rüzgar hızı ile faz hızının birbirine eşit olduğu su seviyesi üzerindeki kritik yüksekliği tanımlamaktadır. Logaritmik rüzgar profili göz önüne alınacak olursa kritik yükseklik aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$z_c = z_0 \exp\left(\kappa/x\right) \tag{4.23}$$

WAM içerisindeki mevcut uygulamadaki Denklem (4.20) aşağıdaki ifade şeklinde değiştirilmiştir.

$$x = \left(\frac{u_*}{c} + z_{\alpha}\right)\cos\left(\theta - \theta_w\right) \tag{4.24}$$

 z_{α} değeri 0.011'dir. Janssen'e göre bu, WAM ile uygun büyüme oranının elde etmek için gereklidir.

(4.21) ve (4.24) denklemleri kullanılarak rüzgar girdisinden kaynaklanan büyüme oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\gamma = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \left(\frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu\right) \sigma \left[\left(\frac{u_*}{c} + z_\alpha\right) \cos(\theta - \theta_w) \right]^2 \qquad \mu \le 1$$

$$\gamma = 0 \qquad \mu > 1$$
(4.25)

$$\mu = k z_0 \exp(\kappa/x) \tag{4.26}$$

Belirli rüzgar hızı ve yönü için, belirli bir frekans ve yöne sahip dalganın büyüme oranı kayma hızına u_* ve deniz pürüzlülüğüne z_0 bağlı olmaktadır. u_* 'ı hesaplamak için Janssen rüzgar hızı u(z) için aşağıda verilen logaritmik profili kabul etmiştir.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_{ow}}{z_{ob} + z_{ow}}\right) \quad z_0 = z_{ob} + z_{ow}$$
(4.27)

 z_{ob} modelleri kapiler ağırlık dalgalarının, z_{ow} modelleri ise kısa ağırlık dalgalarının etkisidir. z_{ob} aşağıdaki gibi parametrelendirilmiştir.

$$z_{ob} = z_{Charnock} \, u_*^2 / g \tag{4.28}$$

 $z_{Charnock}$, Charnock parametresini göstermektedir. Varsayılan değer $z_{Charnock} = 0.01$ 'dir. Genellikle $z >> z_{ow}$ olmaktadır ve bu durumda;

$$u_* = \frac{\kappa u(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{4.29}$$

 u_* ve z_c 'ı hesaplamak için farklı üç formül model içerisinde uygulanmaktadır.

Ayrık Modelde Kullanılan Direnç Yasası

Burada $z = z_{ruzgar}$ seviyesindeki ruzgar hızı $U_w = u(z)$ ile ruzgar kayma hızı arasındaki ilişki aşağıdaki basit ampirik formül ile verilmektedir.

$$u_*^2 = C_D U_w^2, \qquad C_D = \alpha_{drag} + \beta_{drag} U_w \tag{4.30}$$

 α_{drag} ve β_{drag} sabit değerlerdir. Smith ve Banke (1975) tarafından kabul edilen değerler $z_{r\ddot{u}zgar} = 10m$, $\alpha_{drag} = 6.3x10^{-4}$ ve $\beta_{drag} = 6.6x10^{-5}$ 'dir. Bu durumda Denklem (4.29) kullanılarak elde edilen deniz pürüzlülüğü aşağıda verilmektedir.

$$z_0 = z_{r\ddot{u}zgar} \exp\left(-\frac{\kappa U_w}{u_*}\right) \tag{4.31}$$

Ayrık Modelde Kullanılan Charnock

 z_{ow} değerinin z_{ob} değerine göre küçük ise hava pürüzlülüğü aşağıda verilen ifade ile gösterilmektedir.

$$z_0 = z_{ob} = z_{Charnock} u_*^2 / g$$
 (4.32)

 $z = z_{r\ddot{u}zgar}$ seviyesinde verilen rüzgar hızı $U_w = u(z)$ için Denklemler (4.29) ve (4.32)'nin iteratif bir şekilde çözülmesi sonucu pürüz yüksekliğini z_0 ve kayma hızını u_* elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu tür tekrarlayan hesaplamaların sayısını sınırlandırmada, U_w 'nin farklı kombinasyonları için τ değerleri ön hesapları yapılarak saklanabilmektedir. U_w kullanım aralığı 0-50 m/s aralığında 0.5 m/s'dir.

<u>Birleşmiş Model</u>

Deniz pürüzlülüğü aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$z_0 = z_{ob} + z_{ow} = z_{ob} \left(1 - \frac{\tau_w}{\tau} \right)^{-0.5} = \frac{z_{Charnock} u_*^2}{g} \left(1 - \frac{\tau_w}{\rho_{hava} u_*^2} \right)^{-0.5}$$
(4.33)

 τ_w dalganın neden olduğu gerilme, τ ise toplam gerilmeyi $\tau = \rho_{hava} u_*^2$ göstermektedir. $z = z_{rüzgar}$ seviyesinde verilen rüzgar hızı $U_w = u(z)$ ve dalganın neden olduğu gerilme ile Denklemler (4.29) ve (4.30)'un iteratif bir şekilde çözülmesi sonucu u_* 'ın elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu tür tekrarlayan hesaplamaların sayısını sınırlandırmada, u_{10} ve τ_w 'nin farklı kombinasyonları için τ değerleri ön hesapları yapılarak saklanabilmektedir. u_{10} 'un kullanım aralığı: 0-50 m/s aralığında 0.5 m/s'dir. τ_w 'nin kullanım aralığı: 0-5 m²/s² aralığında 0.05 m²/s²'dir.

Dalganın neden olduğu gerilme aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\tau_w = \int \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} |_{\text{rüzgar}} \, df \, d\theta \tag{4.34}$$

Burada \vec{P} , dalga momentumunu göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{P} = \rho_w \sigma E(f, \theta) \vec{t} \tag{4.35}$$

 \vec{t} dalga yönü ($\vec{t} = \vec{k}/k$) boyunca olan birim vektörü göstermektedir. Denklem (4.18) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\int \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} = \rho_w \sigma \frac{\partial E}{\partial t} |_{\text{rüzgar}} \vec{t} = \rho_w \sigma \gamma F_{\vec{t}}$$
(4.36)

 γ rüzgar nedeniyle dalgadaki büyüme oranını göstermektedir. İntegralin düşük ve yüksek frekanslı kısımlara bölünmesiyle elde edilen formül aşağıda verilmektedir.

$$\vec{\tau}_w = \vec{\tau}_{w,prognostik} + \vec{\tau}_{w,diyagnostik}$$
(4.37)

$$\vec{\tau}_{w,prognostik} = \int_0^{f_{maks}} \int_{\theta} \rho_w \gamma E 2\pi f \, df \, d\theta \vec{t}$$
(4.38)

$$\vec{\tau}_{w,diyagnostik} = \int_0^{f_{maks}} \int_{\theta}^{\dot{t}} \rho_w \gamma E 2\pi f \, df \, d\theta \vec{t}$$
(4.39)

Burada f_{maks} maksimum prognostik frekansı tanımlamaktadır.

Prognostik kısım $\vec{\tau}_{w,prognostik}$ kesikli spektrum kullanılarak Denklem (4.38)'deki sayısal integresyonun hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Diyagonistik kısım $\vec{\tau}_{w,prognostik}$ Denklem (4.5) verilen spektrum biçimi f⁵ göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Bu yüksek frekanslı dalgalar için dalga hızı, derin sudaki dalgaya ait ifade ile hesaplanabilmektedir. Bu nedenle $c = g/2\pi f$ 'dir. Denklem (4.39) içine Denklem (4.5)'de m değeri 5 alındığında ve Denklem (4.25)'de yerine konduğunda elde edilen ifade aşağıda verilmektedir.

$$\vec{\tau}_{w,diyagnostik} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} f_{maks}^5 \,\rho_a u_*^2 \int\limits_{\theta}^{\cdot} E(f_{maks},\theta) \cos^2(\theta-\varphi) \,I_{\tau_w} \,d\theta \vec{l} \tag{4.40}$$

$$I_{\tau_w} = \int_{f_{maks}}^{\infty} \beta \, \frac{df}{f} \tag{4.41}$$

Denklem (4.41)'de kullanılan değişken f, yeni değişken y (rms ile tanımlanan boyutsuz pürüzlülük, $\sqrt{kz_0}$) ile değiştirildiğinde;

$$y = 2\pi f \sqrt{z_0/g} \tag{4.42}$$

Buna göre Denklem (4.41) yeniden yazıldığında aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$I_{\tau_w} = \int_{y_{maks}}^{l} \beta \frac{dy}{y} \tag{4.43}$$

 $y_{maks} = 2\pi f_{maks} \sqrt{z_0/g}$ değeri ve en üst limiti 1.0'dir. $z_{ch} = 0.0185$ olarak alındığında üst limit, Pierson Moskowitz pik frekansının 180 katı olan frekansa karşılık gelmektedir.

Denklem (4.43) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$I_{\tau_w} = \int_{f_{maks}}^{l} \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \frac{dy}{y}$$
(4.44)

$$\mu = k z_0 \exp(\kappa/x) = y^2 \exp(\kappa/x)$$
(4.45)

$$= \left(\frac{u_*}{C} + z_{\alpha}\right)\cos(\theta - \varphi) = \left[\frac{u_*}{\sqrt{gz_0}} y + z_{\alpha}\right]\cos(\theta - \varphi)$$
(4.46)

Denklem (4.45)'de Denklem (4.46) yerine konduğunda aşağıda belirtilen ifade elde edilmektedir.

$$\mu = y^{2} \exp\left\{\frac{\kappa}{\left(\frac{u_{*}}{\sqrt{gz_{0}}} y + z_{\alpha}\right)\cos(\theta - \varphi)}\right\}$$
(4.47)

 $\vec{\tau}_{w,diyagnostik}$ aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\vec{\tau}_{w,diyagnostik} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} f_{maks}^5 \rho_a u_*^2 \int_{\theta=\varphi+\pi/2}^{\varphi+\pi/2} E(f_{maks},\theta) \cos^2(\theta-\varphi) I_{\tau_w} d\theta \vec{l}$$
(4.48)

 I_{τ_w} , Denklem (4.44) ile μ ise Denklem (4.47) ile ifade edilmektedir.

Denklemler (4.44) ve (4.47)'den açıkça görüldüğü gibi verilen z_0 , u_* ve $(\theta - \theta_w)$ değerleri için $I_{\tau_w}(z_0, u_*, (\theta - \theta_w))$ hesaplanabilmektedir. I_{τ_w} 'nin etkisini görebilmek amacıyla bağlı olduğu parametrelerin farklı değerleri için ön hesaplamaları yapılmalıdır. Aynı işlem τ için de uygulanabilmektedir. Alternatif olarak, $z_0 = \alpha u_*^2/g$ ise I_{τ_w} ; $\alpha, u_* ve (\theta - \varphi)$ fonksiyonu olmaktadır. Bundan olayı I_{τ_w} için hesaplamalarda kullanılan parametre aralıkları verilmektedir: α değeri 0.001 aralıklarla 0.01 \rightarrow 0.11, u_* değeri 0.05 aralıklarla 0 \rightarrow 0.5 m/s ve $(\theta - \varphi)$ değeri $\pi/12$ aralıklarla $-\pi/2 \rightarrow \pi/2$ gitmekte olduğu gösterilmektedir.

Yukarıda açıklanan yöntemler arasında belirgin farklılıklar vardır bu da WAMC4 versiyonun da uygulanmaktadır.

$$\vec{\tau}_{w,diyagnostik} = \frac{(2\pi)^4}{g^2} f_{maks}^5 \rho_a u_*^2 .$$

$$\int_{\theta=\varphi+\pi/2}^{\varphi+\pi/2} E(f_{maks},\theta) \cos^3(\theta-\varphi) \, I'_{\tau_w}(\alpha,u_*) \, d\theta \vec{m}$$
(4.49)

$$I'_{\tau_{w}}(\alpha, u_{*}) = \int_{y_{maks}}^{l} \frac{1.2}{\kappa^{2}} \,\mu' \,\ln^{4} \,\mu' \frac{dy}{y} \tag{4.50}$$

$$\mu' = y^2 \exp\left\{\frac{\kappa}{\left(\frac{u_*}{\sqrt{gz_0}} y + z_\alpha\right)}\right\}$$
(4.51)

 \vec{m} , rüzgar yönüne ait birim vektörü göstermektedir. Denklem (4.51)'de kosinüs kısmının eksikliği hata olarak görülebilmektedir (denklem (4.47) ve (4.51) karşılaştırıldığında). Bu hata cos² (Denklem (4.48)) yerine cos³ (Denklem (4.49)) kullanılarak telafi edilememektedir. Buna ek olarak, neden yön olarak $\vec{\tau}_w$ dalga yönü yerine rüzgar yönü alındığı açıklanamamaktadır. Bu sonuçların yazılması sırasında bir sonraki model için WAM uygulanmaktadır (Denklem (4.49)'dan denklem (4.51)'e kadar).

4.2.3.3.2 Doğrusal olmayan etkileşimler, dörtlü dalga etkileşimleri

 S_{nl} (Hasselmann, 1962) için 3 boyutlu doğrusal olmayan Boltzman integral ifadelerinin tam hesaplamaları, genel sayısal bir dalga modeline dahil edilmesi çok zaman almaktadır. Bu nedenle S_{nl} 'nin parametrelendirilmesi gerekmektedir. Üçüncü nesil dalga modelleri S_{nl} parametrelendirilmesinde çoğunlukla doğrudan etkileşim yaklaşımını, DIA, kullanmaktadır. DIA yaklaşımı, Hasselmann vd. (1985) tarafından geliştirilmiştir. Aşağıdaki açıklama Komen vd. (1994)'ten alınmıştır.

Hasselmann vd. (1985) doğrusal olmayan etkileşim operatörünü, yakın ve sonlu mesafedeki etkileşim kombinasyonlarının küçük sayıda ayrık etkileşim yapılandırmasıyla birleştirerek oluşturmuştur. Doğrusal olmayan taşınımı, orta düzeyli etkileşim yapılandırmasının sadece bir sanal görüntü çifti ile iyi şekilde benzeşiminin yapılabileceğini bulmuşlardır. Her bir yapılandırmada iki dalga sayısı eşit alındığında $\vec{k}_1 = \vec{k}_2 = \vec{k}$ rezonans durumundan, olayı \vec{k} 'ya ait açı üzerinde konumlanmaktadır.

İkinci yapılandırma, k eksenine göre k_3 ve k_4 yansıtarak (**Şekil 4.1**) birinci yapılandırmadan elde edilmektedir. Referans dalga sayısı ölçüsü ve yönü, dalga sayısı alanı içerisinde devamlı değişime olanak vermektedir.



Şekil 4.1 Doğrudan etkileşim yaklaşımında kullanılan çift yönlü etkileşim yapılandırmaları (Komen vd., 1994)

Doğrusal olmayan operatörün sadeleştirilmesi taşınım integralinde kullanılan aynı simetrik birleştirme yöntemi ile yapılmaktadır. Bunun dışında faz alanında 5 boyutlu etkileşim yerine 2 boyutlu sürekli ortam ve doğrudan etkileşimin birleştirilmesini üstlenmektedir. Enerji, momentum ve hareket etkileşiminin korunumları tam olarak sağladığı durumdur.

Yapılandırmalar için:

$$\omega_{1} = \omega_{2} = \omega$$

$$\omega_{3} = \omega(1 + \lambda) = \omega_{+}$$

$$\omega_{3} = \omega(1 + \lambda) = \omega_{-}$$
(4.52)

Burada λ için hesaplamalarla yeterli uyumu göstermiş olan 0.25 değeri alınmaktadır. Rezonans durumundan dolayı k'ya bağlı $k_3(k_+)$ ve $k_4(k_-)$ dalga sayılarına ait açılar θ_3 ve θ_4 sırasıyla 11.5° ve -33.6° olarak bulunmuştur.

Doğrudan etkileşim yaklaşımının en basit formu dalga sayısı alanında hareket yoğunluğunun zaman içindeki değişim oranı olarak belirtilmektedir. Denge prensibine uygun olarak:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} N \\ N_+ \\ N_- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ +1 \\ -1 \end{pmatrix} c_g^{-8} f^{-19} \left[N^2 (N_+ + N_-) - 2NN_+ N_- \right] \Delta k \tag{4.53}$$

 $\frac{\partial N}{\partial t}, \frac{\partial N_{+}}{\partial t}, \frac{\partial N_{-}}{\partial t}$ dalga sayısının k, k_{+}, k_{-} (faz-alan elemanları Δk ve C sabitleri olan sonsuz küçük etkileşimi içinde doğrudan yaklaşımdan dolayı) hareket oranlarındaki değişimi belirtmektedir. S_{nl} net kaynak fonksiyonu denklem

(4.53)'ün tüm dalga sayıları, yönleri ve etkileşim yapılandırmalarını çözmesiyle elde edilmektedir.

Spektrum enerji yoğunluğunda $E(f_r, \theta)$, etkileşimde olan 3 dalga sayısı için kaynak fonksiyonlarındaki $S_{nl}(f_r, \theta) \left(=\frac{\partial E}{\partial t}\right)$ artış aşağıda verilmektedir (Hasselmann vd., 1985).

$$\begin{pmatrix} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{pmatrix} = \begin{cases} -2\frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f \Delta \theta} \\ (1+\lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_{+} \Delta \theta} \\ (1-\lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_{-} \Delta \theta} \end{cases} \phi (f, E, E_{+}, E_{-})$$
(4.54)

$$\emptyset(f, E, E_+, E_-) = C'g^{-4}f^{11} \left[E^2 \left(\frac{E_+}{(1+\lambda)^4} + \frac{E_-}{(1-\lambda)^4} \right) - \frac{2E E_+ E_-}{\left(1-\lambda^2\right)^4} \right]$$
(4.55)

Denklemde, C', C ile orantılı sayısal bir sabiti ifade etmektedir. Bu sabitin değeri $3*10^7$ olarak verilmektedir. Δf , Δf_+ , Δf_- sırası ile f_r , f_{r+} , f_{r-} 'deki farklı spektral çözünürlüklerdir. Paydaki değişimler $\Delta f \Delta \theta$ doğrudan etkileşim faz-alan elemanını göstermektedir. Yukarıda Δf 'ye bağlı olan olası bir frekansa izin verilmesine karşın, θ_1 , θ_2 , θ_3 'deki açısal değişimler $\Delta \theta$ aynı alınmaktadır, örneğin $\Delta f_+ \neq \Delta f_- \neq \Delta f$. Denklem (4.54) net kaynak fonksiyonunun S_{nl} elde edilmesi için tüm frekansları, yönleri ve etkileşim yapılandırmalarını içermektedir.

Yukarıdaki analiz derin su için yapılmıştır. Rasgele su derinliği için tüm Bolzmann integralinin sayısal hesaplamaları, sonlu su derinliğinde ve derin sudaki transfer oranlarıyla ilişkili bir yaklaşımın olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşımda verilen bir frekans-yön spekturumu ve sonlu derinlik için transfer, sonlu olmayan bir derinlik için verilen transferle bir ölçeklendirme faktörü R haricinde benzerdir.

$$S_{nl}(sonlu\ derinlik) = R(\bar{k}h)S_{nl}(sonsuz\ derinlik)$$
(4.56)

Denklemde, \overline{k} ortalama dalga sayısını ifade etmektedir. Bu ölçeklendirme ilişkisi, $\overline{k}h > 1$ koşulu için geçerlidir. Ölçeklendirme faktörü kullanılarak yeniden yapılan kesin hesaplamalar gerçek değere yakın olarak elde edilebilmektedir.

$$R(x) = 1 + \frac{5.5}{x} \left(1 - \frac{5x}{6} \right) \exp\left(-\frac{5x}{4} \right)$$
(4.57)

 $x = (3/4) \bar{k}$ h'dır. Bu yaklaşım WAM modelinde kullanılmaktadır.

Sabit frekans aralığı için denklem (4.54) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \\ (1+\lambda) \\ (1-\lambda) \end{cases} \emptyset (f, E, E_+, E_-)$$
(4.58)

Logaritmik frekans aralığı için ise denklem (4.54) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \\ 1 \\ 1 \end{cases} \emptyset (f, E, E_+, E_-)$$

$$(4.59)$$

Etkileşim dalga sayısındaki gradyan terimleri $\partial S_{nl}/\partial E$ 'ye olan katkılar aşağıdaki ifadeden elde edilmektedir.

$$\begin{cases} \delta\left(\frac{\partial S_{nl}}{\partial E}\right) \\ \delta\left(\frac{\partial S_{nl}}{\partial E_{+}}\right) \\ \delta\left(\frac{\partial S_{nl}}{\partial E_{-}}\right) \end{cases} = \begin{cases} -2\frac{\Delta f\Delta\theta}{\Delta f\Delta\theta}\frac{\partial\phi}{\partial E} \\ (1+\lambda)\frac{\Delta f\Delta\theta}{\Delta f_{+}\Delta\theta}\frac{\partial\phi}{\partial E_{+}} \\ (1-\lambda)\frac{\Delta f\Delta\theta}{\Delta f_{-}\Delta\theta}\frac{\partial\phi}{\partial E_{-}} \end{cases}$$
(4.60)

Denklem (4.54)'de olduğu gibi verilen bir frekans f ve yön θ için $\partial S_{nl}/\partial E$ 'ye verilen toplam katkı, tüm yönler, frekanslar ve iki yapılandırmadan gelen katkıların toplanması ile bulunmaktadır.

Yukarıda verilen Denklemler (4.54) ve (4.60)'ün hesaplanmasından önce ilave varsayımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni, doğrusal olmayan etkileşimler için frekans-yön alanında $(f, \theta), (f_+, \theta \pm \theta_3 \text{ ve } (f_-, \theta \pm \theta_4)$ olarak tanımlanan etkileşim dalga sayısı ile enerji transferinin daima dikkate alınmasıdır. Frekanslar f_+ ve f_- ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadırlar.

$$f_+ = (1+\lambda)f \tag{4.61}$$

$$f_{-} = (1 - \lambda)f$$
 (4.62)

Burada λ =0.25 değerini almaktadır. Frekans alanındaki ayrıklaştırmanın ise sonlu olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıklaştırılmış frekans alanının iki sınırındaki Denklemler (4.54) ve (4.60)'ün değerlendirilmesiyle bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu durumda $f_+ > f_{maks}$ ya da $f_- < f_1$ olması durumunda ne yapılmalıdır sorusuna cevap aranmıştır.

Sorun 1: $f_+ > f_{maks}$

İlk olarak $f > f_{maks}$ olduğu bölgede enerji spekturumu f^{-5} kuyruk frekansına sahiptir, çünkü bu bölge tanımlayıcı bölgedir. İkinci olarak, f_{maks} civarında, modeldeki ayrıklaştırılmış maksimum frekanstan daha yüksek olan frekanslarda S_{nl} 'ye katkılar mevcuttur. Ayrıklaştırılmış frekans alanına enerji katkısı yapan maksimum frekans f_{maks} aşağıda verilen denklemin çözümüyle elde edilmektedir.

$$f_{-} = (1 - \lambda) f_{\text{üst}} = f_{maks}$$
 (4.63)

ya da

$$f_{alt} = f_{maks} / (1 - \lambda) \tag{4.64}$$

Böylece, f_{maks} civarında S_{nl} 'ye olan katkıların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için ayrıklaştırılmış frekans alanı, $f_{üst}$ 'e genişletilmektedir.

<u>Sorun 2 : $f_{-} < f_{1}$ </u>

 $f_{-} < f_1$ 'den küçük olduğu bölgede $E(f, \theta)$ kabulü yapılmaktadır. Eğer ayrıklaştırılmış frekans alanı tüm frekansları içermek için dikkatli bir şekilde seçilmiş ise bu makul bir kabul olmaktadır.

Ayrıca $f_{-} < f_{1}$ 'den küçük olduğu bölgede E = 0 kabul edildiğinden, ayrıklaştırılmış frekans alanına bu bölgeden gelen katkılar sıfır olmaktadır. Doğrusal olmayan kaynak teriminin çözümü aşamasında tekrarlanan hesaplamaları azaltmak amacıyla bir yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemin oluşturduğu beş adım sırasıyla aşağıda tanımlanmaktadır.

1. Her bir farklı yön için, θ yön dizisindeki indisler $\theta \pm \theta_3$, $\theta \pm \theta_4$ 'ün sağına ve soluna doğru hesaplanmaktadır.
2. Her bir farklı frekans için f genişletilmiş frekans alanındaki $f_+[(1 + \lambda)f]$ ve $f_-[(1 - \lambda)f]$ sağına ve soluna doğru hesaplanmaktadır.

3. Her bir farklı frekans, yön ve yapılandırma için spektral enerji değerleri $F(f_+, \theta \pm \theta_3), F(f_-, \theta \pm \theta_4)$ çift doğrusal interpolasyon kullanılarak belirlenmektedir. $f - \theta$ ağının dört köşesindeki değerler yukarıda tanımlanan adım (1) ve (2)'den elde edilmiş indislerden yararlanılarak belirlenir.

4. $F(f_+, \theta \pm \theta_3)$, $F(f_-, \theta \pm \theta_4)$ 'de S_{nl} ve $\partial S_{nl}/\partial E$ 'ye verilen hesaplanmış katkılar f ağının dört köşesinde farklı frekans-yön ağ noktalarına dağıtılmaktadır.

5. Yukarıda tanımlanan adım (3) ve (4)'de hesaplanmış olan $\mathcal{Z}_{nl}(f,\theta)$, ve $(\mathcal{Z}_{nl}/\mathcal{E})_{f,\theta}$ 'e verilen katkılar, her bir $f - \theta$ ağ noktasında $S_{nl}(f,\theta)$, ve $(\mathcal{Z}_{nl}/\mathcal{F})_{f,\theta}$ 'yı elde etmek için tüm yapılandırma, yön ve frekanslarda toplanmaktadır.

4.2.3.3.3 Köpüklenme

Bir köpüklenme modelinin matematiksel gelişimi Hasselmann (1974) yılında yapmış olduğu çalışmaya uzanmaktadır. Köpüklenme enerji kaybı için geliştirilen mekanizmanın basınç nedenli sönümlenmeden kaynaklandığı kabul edilmektedir. Hasselmann (1974) spektral yoğunluk ve frekansın her ikisinde de doğrusal olan bir enerji kaybı kaynak fonksiyonu elde etmiştir.

$$S_{ds} \approx -\omega E$$
 (4.65)

Ancak, daha sonra diğer mekanizmaların önemli olduğunun farkına varılmıştır. Bu mekanizmalar, köpüklenmenin boyutu ve büyük köpüklenme geçişleri tarafından kısa dalgaların dalga genliğindeki azalmadır. Bu süreçlerin bir araya getirilmesiyle, Komen vd. (1984) ortalama frekans terimlerinin formülleştirildiği bir enerji kaybı fonksiyonunu ileri sürmüştür. Bu ifade WAMDI Grup (1988) tarafından dalga sayısına göre sonlu su derinliğinde uygulanabilmesi için yeniden gözden geçirilmiştir.

$$S_{ds} = -C'_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}}\right)^m \frac{k}{\bar{k}} \bar{\sigma} E$$
(4.66)

Denklemde yer alan; C'_{ds} , ve m uyum parametreleri, $\bar{\sigma}$ ortalama göreceli açısal frekans, \bar{k} ortalama dalga sayısı, $\hat{\alpha}$ dalga alanının toplam dikliği, $\hat{\alpha}_{PM}$ ise Pierson-Moskowitz spekturumu için $\hat{\alpha}$ değeridir. Toplam diklik ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\hat{\alpha} = \bar{k} \sqrt{E_{tot}} \tag{4.67}$$

 E_{tot} ,enerji spekturumunun toplam enerjisidir ve $\hat{\alpha}_{PM} = (3.02 * 10^{-3})^{0.5}$ 'dir. WAMC3'te m=4 ve $C'_{ds} = 2.36 * 10^{-5}$ olarak alınmaktadır (Komen vd., 1994; WAMDI Grup, 1988).

Rüzgar girdisi için Janssen'in tanımının dikkate alınmasıyla birlikte yüksek frekanslardaki enerji kaybı ve rüzgar girdisi ile uygun bir denge yakalamak için enerji kaybı kaynak fonksiyonunun düzenlenmesine ihtiyaç duyulduğu ortaya konmuştur. Böylece Denklem (4.66) aşağıdaki gibi değiştirilmiştir (Komen vd., 1994):

$$S_{ds}(f,\theta) = -C_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}}\right)^m \left\{ (1-\delta) \frac{k}{\bar{k}} + \delta \left(\frac{k}{\bar{k}}\right)^2 \right\} \bar{\sigma} E(f,\theta)$$
(4.68)

 C_{ds} , δ , ve m sabit değerlerdir. WAMC4'te C_{ds} , δ ve m değerleri sırasıyla 4.5 ve 0.5'dir. Mevcut uygulamalarda m=4 iken ayarlanabilen sabitler $C_{ds}^* = C_{ds}/(\alpha_{PM})^4$ ve δ 'dir. C_{ds}^* ve δ için önceden tanımlanmış değerler sırasıyla 4.5 ve 0.5'dir.

4.2.3.3.4 Taban sürtünmesi

Taban sürtünmesi nedeniyle meydana gelen enerji kaybı oranı aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir.

$$S_{bot}(f,\theta) = -(C_f + f_c(\bar{u}\ \bar{k})/k\frac{k}{\sinh 2kd}E(f,\theta)$$
(4.69)

Yukarıdaki denklemde yer alan; (C_f sürtünme katsayısını, k dalga sayısını, d su derinliğini f_c , akıntı için sürtünme katsayısını u ise akıntı hızını tanımlamaktadır. C_f katsayısı genellikle akım koşulları ve tabana bağlı olarak

0.001–0.01 m/s olarak değişmektedir (Komen vd., 1994). f_c katsayısı için ise taban sürtünmesi üzerindeki akıntı etkisi haricinde sıfır değeri uygundur.

Enerji kaybı katsayısı için olasılıkların belirlenmesi amacıyla oluşturulan dört model aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

1. Sürtünme katsayısı C_f , WAM modelinin yerel sürümleri ile test edilmektedir (Komen vd., 1994). Bu durum, $C_f = 2 * \frac{0.038}{g} = 0.0077 \text{ m/s}$ değerinin C_f 'nin ortalama JONSWAP değeriyle orta ölçekli fırtınalar için uygun olduğunu göstermektedir. C_f için önceden tanımlanmış değer 0.0077 m/s'dir.

2. Sürtünme katsayısındaki sabit sürtünme faktörü f_w aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$C_f = f_w u_b \tag{4.70}$$

Denklemdeki u_b ifadesi, tabandaki rms dalganın yörüngesel hızıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$u_b = \left[2 \int_{f_1}^{f_{maks}} \int \frac{\bar{\sigma}^2}{\sinh^2(kh)} E(f,\theta) d\theta \, df \right]^{0.5}$$
(4.71)

 f_w için tanımlanmış değer 0.015^{*20.}5=0.021'dir.

3. Sabit geometrik pürüzlülük büyüklüğü k_N Weber (1991) tarafından önerildiği gibi Denklem (4.70)'den hesaplanan sürtünme katsayısı yardımıyla belirlenmektedir. Sürtünme faktörü, Jonsson ve Carlsen (1966) ifadesi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_w = e^{-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{k_N}\right)^{-0.194}} \qquad a_b / k_N \ge 2.016389$$

$$f_w = 0.24 \qquad \qquad a_b / k_N < 2.016389$$
(4.72)

Burada a_b tabandaki yörüngesel yer değiştirmeyi ifade etmekte ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$a_b = \left[2\int_{f_1}^{f_{maks}}\int_{\theta} \frac{1}{\sinh^2(kh)}E(f,\theta)d\theta \ df\right]^{0.5}$$
(4.73)

 k_N için önceden tanımlanmış değer 0.04m'dir.

4. Hareketli bir taban için tabandaki sabit bir ortalama tane çapı D_{50} kullanılmaktadır. Bu yaklaşım ilk olarak Tolman (1966) tarafından geliştirilen üçüncü nesil rüzgar-dalga modelinde kullanılmıştır. Bununla birlikte, günümüz uygulamaları Tolman (1966)'nın formülasyonundan çok farklıdır. Dalgacık boyutlarının belirlenmesi için kullanılan Grant ve Madsen modeli yerine saha ölçümlerine dayanan Nielsen (1979) ampirik ifadesi kullanılmaktadır. Sonra taban pürüzlülüğü Swart (1976) tarafından ifade edilen kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra, taban yörüngesel hızı ve dalga sürtünme faktörünün bir sonucu olarak sürtünme katsayısına ulaşılmaktadır (Jonsson ve Carlsen, 1966) ifadesi kullanılarak). D₅₀ için kullanılan tanımlanmış değer ise 0.00025m'dir.

Taban sürtünmesi formülasyonunun detayları Johnson ve Kofoed-Hansen (2000)'de bulunabilir.

4.2.3.3.5 Dalga kırıması

Derinlik kaynaklı kırılma (surf kırılması) dalgaların çok sığ bölgelere ilerlemesi ile meydana gelmektedir ve dalga yüksekliği artık su derinliği tarafından desteklenmemektedir. Battjes ve Janssen (1978) tarafından elde edilen dalga kırılma formülasyonu kullanılmaktadır. Kaynak terim ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Eldeberky and Battjes, 1966).

$$S_{bot}(f,\theta) = -(C_f + f_c(\bar{u}\ \bar{k})/k\frac{k}{\sinh 2kd}E(f,\theta)$$
(4.74)

Burada $\alpha_{BJ} \approx 1$ 'dir ve kalibrasyon sabitidir, Q_b kırılan dalgaların sınıf aralığı, \overline{f} ortalama frekans ve *X* ise rasgele bir dalga katarındaki toplam enerjinin, maksimum olası dalga yüksekliğine sahip bir dalga katarındaki enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. Aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X = \frac{E_{tot}}{H_m^2/8} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)^2 \tag{4.75}$$

Burada; E_{tot} toplam dalga enerjisini, H_m maksimum dalga yüksekliğini ve $H_{rms} = \sqrt{8E_{tot}}$ göstermektedir. Sığ suda yerel su derinliği d yardımıyla maksimum dalga yüksekliği $H_m = \gamma d$ ifadesi kullanılarak belirlenmektedir. Buradaki γ kırılma parametresidir. Kırılma parametresi değeri, dalga parametreleri ve kıyı eğimine bağlı olarak 0.5 ile 1.0 arasında değişmektedir. α_{BJ} ve γ için önceden tanımlanmış değerler sırasıyla 1.0 ve 0.55'dir.

Dalga yüksekliğinin, kesikli Rayleigh dağılımına uyduğu rastgele bir dalga katarında kırılan dalgaların sınıf aralığı Q_b aşağıdaki ifade yardımıyla elde edilmektedir.

$$\frac{Q_b - 1}{lnQ_b} = X = \left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)^2 \quad \Leftrightarrow \quad Q_b = \exp\left(\frac{-(1 - Q_b)}{\left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)^2}\right) \tag{4.76}$$

 Q_b , Newton-Raphson iterasyonu kullanılarak doğrusal olmayan Denklem (4.76)'nın çözülmesiyle ulaşılmaktadır. Doğrusal olmayan iterasyon için ilk tahmin olarak Q_b için aşağıdaki yaklaşım kullanılmaktadır.

$$Q_b = \begin{array}{ccc} (1+2x^2) \exp(-1/x) & x < 0.5\\ 1-(2.04z)(1-0.44z); & z = 1-x & 0.5 \le x < 1\\ 1 & x \ge 1 \end{array}$$
(4.77)

Laboratuvar ve saha verilerine dayanarak kırılma parametresi γ 'nın belirgin bir şekilde dalga koşulları ve batimetreye bağlı olduğu gösterilmiştir. Kmainsky ve Kraus (1993) γ değerinin 00.6 ve 1.59 aralığında değiştiğini, ortalamasının 0.79 olduğunu bulmuştur. γ kırılma parametresini belirlemek için bir çok ifade önerilmiştir. Battjes ve Stive (1985) *g*'nin derin su dalga dikliği üzerinde etkisinin az olduğunu bulmuştur.

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh (33s_0) \tag{4.78}$$

Burada $s_0 = H_0/L_0$ derin su dalga dikliği, H_0 ve L_0 sırasıyla derin sudaki dalga yüksekliği ve dalga boyudur. γ 'nın değeri yerel parametrelere bağlı olmadığı için bu formülasyon bu spektral dalga modeli için kullanılamazdır. Nelson (1987 ve 1994) γ 'yı ortalama dalga yönündeki yerel dalga eğiminin, $\partial d/\partial s$ bir fonksiyonu olarak bulmuştur. Nelson aşağıdaki ifadeyi önermiştir.

$$\gamma = 0.55 + 0.88 \exp\left(-0.012 \cot an\left(\frac{\partial d}{\partial s}\right)\right) \qquad d \le 100 \qquad (4.79)$$
$$\gamma = 0.55 \qquad d > 100$$

Ruessink (2003) γ için yenir bir ifade vermiştir, burada γ yerel dalga sayısı *k* ve su derinliği *d*'nin bir fonksiyonudur.

$$\gamma = 0.76kd + 0.2 \tag{4.80}$$

4.2.3.4 Dönme

Dönme, Holthuijsen (2003) tarafından verilen faz ayrışmış sapma-dönme yaklaşımı kullanılarak modellenmektedir. Bu yaklaşım sapma ve dönme içi küçük eğim denklemini temel almaktadır. Dalga sayısı, k, (bir harmonik dalganın faz fonksiyonunnun gradyanı) büyüklüğünde dönmenin varlığı aşağıdaki ifade ile verilmiştir.

$$k^2 = \kappa^2 (1 + \delta_a) \tag{4.81}$$

Burada κ doğrusal dalga teorisinden belirlenen ayırma parametresi ve δ_a dönme parametresidir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\delta_a = \frac{\nabla (cc_g \, \nabla a)}{\kappa^2 \, cc_g \, \nabla a} \tag{4.82}$$

Burada *c* ve c_g sırasıyla dönme olmaksızın faz hızı ve grup hızı, *a* ise genliktir. Dönme varlığına faz hızı *C* ve grup hızı C_g ise:

$$C = \frac{\sigma}{k} = \frac{\sigma}{\kappa k} = \frac{c}{\sqrt{1 + \delta_a}}$$
(4.83)

$$C_g = c_g \frac{k}{\kappa} = c_g \sqrt{1 + \delta_a} \tag{4.84}$$

Yavaş değişen su derinliğinde ve akıntılarda ilerleyen dalgalar için bir dalga grubunun düzeltilmiş-dönme hızları (C_x , C_y , C_σ , C_θ) dört boyutla faz alanında \vec{x} , σ ve θ aşağıda tanımlanmıştır.

$$(C_x, C_y) = \vec{C}_g + \vec{U} = \vec{c}_g (1 + \delta_a) + \vec{U}$$
 (4.85)

$$C_{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \,\nabla_{\vec{x}} d \right] - C_g \vec{\kappa} \,\frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \tag{4.86}$$

$$C_{\theta} = -\left[\left(\left(\frac{\sqrt{1+\delta_a}}{\kappa} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} \right) - \frac{C_g}{2(1+\delta_a)} \frac{\partial \delta_a}{\partial m} \right) + \frac{\vec{\kappa}}{\kappa} \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$
(4.87)

Holthuijsen (2003) tarafından dalga genliği, yönsel dalga enerji yoğunluğunun integralinin karekökü ile değiştirilmiştir.

$$A(o) = \sqrt{\int_{0}^{2\pi} E(\sigma, \theta) d\theta}$$
(4.88)

4.1.4 Sayısal uygulama

4.1.4.1 Alan ayrıklaştırma

Coğrafi ya da spektral alanda ki ayrıklaştırma, hücre merkezli sonlu hacim metodu kullanılarak yerine getirilmektedir. Coğrafi alanda yapılandırılmamış bir ağ kullanılmaktadır. Uzamsal alan ise sürekli örtüşmeyen elemanlara ayrıklaştırılmaktadır. Elemanlar isteğe bağlı olarak şekillendirilmiş poligonlar olabilirler. Ancak burada, sadece üçgen şeklindeki poligonlar dikkate alınmıştır. Hareket yoğunluğu $N(\vec{x}, \sigma, \theta)$, elemanlar üzerinde bir sabit olarak tanımlanmaktadır. Frekans alanında ise bir logaritmik ağ kullanılmaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma_{min} \quad \sigma_1 = f_\sigma \sigma_{l-1} \quad \Delta \sigma_1 = \sigma_{l+1} - \sigma_{l-1} \quad l = 2, N_\sigma \tag{4.89}$$

Burada; f_{σ} , tanımlanmış bir faktörü, σ_{min} minimum ayrıklaşmış açısal frekansı ve N_{σ} ise ayrıklaşmış frekansların sayısını göstermektedir.

Yönsel alanda, eşit ayrıklaştırma kullanılmaktadır.

$$\theta_m = (m-1)\Delta\theta \quad \Delta\theta_m = 2\pi/N_\theta \quad m = 1, N_\theta$$
 (4.90)

 N_{θ} , farklı yönlerin sayısıdır. Hareket yoğunluğu, frekans ve yönsel alanda $\Delta \theta_m$, $\Delta \sigma_1$ ve farklı aralıklar üzerinde sabit olarak ifade edilmektedir. i. elemanın A_i alanı üzerinde denklem (4.7)'nin integre edilmesiyle, frekans artışı $\Delta \sigma_1$ ve yönsel artış $\Delta \theta_m$ ile aşağıdaki ifadeye ulaşılmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta\theta_{m}}^{\cdot} \int_{\Delta\sigma_{1}}^{\cdot} \int_{A_{i}}^{\cdot} Nd\Omega \, d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_{m}}^{\cdot} \int_{\Delta\sigma_{1}}^{\cdot} \int_{A_{i}}^{\cdot} \frac{S}{\sigma} d\Omega \, d\sigma d\theta$$

$$= \int_{\Delta\theta_{m}}^{\cdot} \int_{\Delta\sigma_{1}}^{\cdot} \int_{A_{i}}^{\cdot} \nabla \cdot (\bar{F}) d\Omega \, d\sigma d\theta$$
(4.91)

 Ω , A_i alanı üzerinde tanımlanan integrasyon değişkenidir.

 $\overline{F} = (F_x, F_y, F_\sigma, F_\theta) = \overline{v}N$ taşımsal akıdır. Denklem (4.91)'nin sol tarafındaki hacim integralleri, tek nokta alan hesabı kuralı ile yakınlaşmaktadır. Diverjans teoremi kullanılarak, denklemin sağ tarafındaki hacimsel integrasyon $\overline{x}, \sigma, \theta$ alanındaki hacimsel sınır üzerinde integre edilerek kullanılabilmektedir. Bu integraller bir orta nokta alan hesabı kuralı kullanılarak değerlendirilmektedir. Böylece denklem (4.91) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} = -\frac{1}{A} \left[\sum_{p=1}^{NE} (F_n)_{p,i,m} \Delta l_p \right] - \frac{1}{\Delta \sigma_i} \left[(F_\sigma)_{i,l+\frac{1}{2}\cdot m} - (F_\sigma)_{i,l-\frac{1}{2}\cdot m} \right] - \frac{1}{\Delta \theta_m} \left[(F_\theta)_{i,l,m+1/2} - (F_\sigma)_{i,l,m-1/2} \right] + \frac{S_{i,l,m}}{\sigma_l}$$
(4.92)

Denklemdeki NE, hücredeki toplam kenar sayısını (üçgen için NE=3) göstermektedir.

 $(F_n)_{p,l,m} = (F_x n_x + F_y n_y)_{p,l,m}$ uzunluğundaki coğrafi alanın p kenarı boyunca tanımlı normal akıdır. Burada, $\Delta l_p \cdot \vec{n} = (n_x, n_y)$ coğrafi alandaki sınırın yüzeyden dışarı doğru olan birim normal vektörüdür. $(F_\sigma)_{i,l+1/2,m} ve (F_\theta)_{i,l,m+1/2}$ sırasıyla frekans ve yönsel alandaki ön yüz boyunca tanımlanan akılardır.

Taşımsal akı, birinci mertebe upwind şema kullanılarak türetilmektedir. Coğrafi alanda, eleman i ve j ile kenardaki normal enerji akısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$F_n = c_n N_{face} = c_n \left(\frac{1}{2} \left(N_i + N_j \right) - \frac{1}{2} \frac{c_n}{|c_n|} \left(N_i - N_j \right) \right)$$
(4.93)

Burada, *Cn* hücre ön yüzüne olan ilerleme hızı normalidir ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$c_n = \frac{1}{2} \left(\vec{c}_i + \vec{c}_j \right) . n \tag{4.94}$$

Birinci mertebe upwind şema kullanılarak ortaya çıkan sayısal difüzyon önem arz etmektedir (Tolman, 1991 ve 1992a). Küçük ölçekli kıyı uygulamalarında ve yerel rüzgarların hakim olduğu uygulamalarda doğruluk, bu şemaların kullanımıyla sağlanmaktadır. Bununla birlikte, uzun mesafeler boyunca ilerleyen soluğan dalgaları için yüksek mertebe upwind şemaları kullanılmalıdır.

4.1.4.2 Zaman integrasyonu

Zamanda integrasyon, bir sınıfsal adım yaklaşımına dayanmaktadır. İlk olarak, ilerleme adımı, kaynak terimleri olmaksızın Denklem (4.7)' nin çözülüp yeni zaman seviyesi (n+1)'de yaklaşık bir çözüm N'in hesaplanmasıyla yerine getirilir. İkinci olarak, bir kaynak terimleri adımı, sadece kaynak terimlerinin etkisi hesaba katılarak elde edilen tahmini çözümden N^{n+1} yeni çözümünün hesaplanmasıyla tamamlanmaktadır.

İlerleme Adımı

İlerleme adımı, açık bir Euler şeması ile tamamlanmaktadır.

$$N_{i,l,m}^* = N_{i,l,m}^n + \Delta t \left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t}\right)^n$$
(4.95)

 $\left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t}\right)^n$ ifadesi, $S_{i,l,m} = 0$ alınarak Denklem (4.92)'den elde edilmektedir. Δt ise küresel zaman adımıdır. Zorlu stabilite sınırlamalarını aşmak için çoklu dizi integrasyon şeması kullanılmaktadır (Vilsmeier ve Hanel, 1995). Maksimum zaman adımı ise yerel olarak kullanılan integrasyon adımları dizisi ile arttırılmaktadır. Ancak buradaki adım sayıları, elemandan elemana değişiklik gösterebilmektedir.

Açık Euler şeması kullanılarak, zaman adımı, CFL koşulu tarafından aşağıda belirtildiği gibi sınırlandırılmaktadır.

$$Cr_{i,l,m} = \left| c_x \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \right| + \left| c_y \frac{\Delta t}{\Delta y_i} \right| + \left| c_\sigma \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_l} \right| + \left| c_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \theta_m} \right| < 1$$
(4.96)

 $Cr_{i,l,m}$, Courant sayısı Δx_i ve Δy_i ise i eleman için x ve y doğrultularındaki karakteristik uzunluk ölçekleridir. Maksimum yerel Courant sayısı, $Cr_{maks,i}$, coğrafi alandaki her bir eleman için belirlenmektedir. Ayrıca, maksimum yerel zaman adımı, $\Delta t_{maks,i}$, i. eleman için aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\Delta t_{maks,i} = \Delta t / C r_{maks,i} \tag{4.97}$$

Zamandaki doğruluğu kesinleştirmek için orta seviyeler eş zamanlı olmalıdır. Bu yüzden, yerel zaman adımının, küresel zaman adımına oranı ¹/2'nin üssü olarak seçilmektedir.

$$f_g = \left(\frac{1}{2}\right)^{g-1}, \qquad g = 1,2,3$$
 (4.98)

Yerel zaman adımı Δt_i , seviye indeksi g'nin maksimum değerine sahip zaman adımı olarak belirlenmektedir.

$$\Delta t_i f_g < \Delta t_{maks,i} \tag{4.99}$$

İki komşu elemanın birden daha büyük bir indeks farkına sahip olmasına izin verilmemektedir. Bu durumda kenarlar, iki eleman sahip olduğu daha düşük indeks değerini alırlar.

Hesaplama, bir grup kavramı kullanılarak yapılmaktadır. Elemanların bu grupları, kendi indeks değerleri tarafından tanımlanmaktadır. Standart Euler metoduna kıyasla çoklu integrasyon dizisi kullanılması durumunda hesaplama hızı, artan grup sayısı ile artmaktadır. Bununla birlikte, zamandaki doğru sonuçları almak için maksimum grup sayısı sınırlandırılmaktadır.

Kaynak Terimi Adımı

Kaynak terimi adımı, kapalı bir yöntem kullanılarak yerine getirilmektedir.

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m}^* + \Delta t \left[\frac{(1-\alpha)S_{i,l,m}^* + \alpha S_{i,l,m}^{n+1}}{\sigma_l} \right]$$
(4.100)

Burada α , şemanın tipini belirleyen ağırlık katsayısıdır. S^{n+1} yaklaşımı için Taylor serisi kullanılarak ve $\partial S/\partial E$ sınıfsal diferansiyelin diyagonal dışındaki terimleri ihmal edilebilecektir. Diyagonalde ise $\partial S_{i,l,m}/\partial E_{i,l,m}$ 'dir ve Denklem (4.100) aşağıdaki gibi basitleştirilebilmektedir.

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m}^{n} + \frac{(S_{i,l,m}^*/\sigma_1)\Delta t}{(1 - \alpha\gamma\Delta t)}$$
(4.101)

Gelişen dalgalar (γ >0) için açık ileri fark kullanılmaktadır (α =0). Sönümlenen dalgalar (γ >0) için ise kapalı geri fark uygulanmaktadır (α =1).

Özellikle kısa feç uzunlukları için stabilite problemleri meydana gelebilir. Bu durumda, iki ardışık zaman adımı ile maksimum spektral enerji artışında bir sınırlayıcı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Hersbach ve Janssen (1999) tarafından ortaya atılan sınırlayıcı uygulanmaktadır.

$$\Delta N_{maks} = \frac{3x10^{-7}}{(2\pi)^3} g \tilde{u}_* \sigma_1^{-4} \sigma_{maks} \Delta t$$
(4.102)

Yukarıdaki ifade de, σ_{maks} , maksimum ayrıklaştırma frekansını tanımlanmakta ve \tilde{u}_* ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\tilde{u}_* = maks(u_*, (\sigma_{PM}/\sigma)) \tag{4.103}$$

Burada \tilde{u}_* , rüzgar kayma hızını belirtmektedir.

4.1.4.3 Sınır koşulları

Coğrafi alandaki kara sınırlarında, tam gelişmiş sönümlendiricili sınır koşulu uygulanmaktadır. Giren enerji akısı bileşenleri sıfırdır. Çıkan enerji akısı bileşenleri için ise sınır koşullarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Açık bir sınırda ise giren enerji akısı gereklidir. Bundan dolayı enerji spekturumu, açık bir sınırda belirtilmek zorundadır. Frekans alanında ise sınırlar tam sönümlendiricilidir. Yönsel alan söz konusu olduğunda ise sınır koşullarına ihtiyaç duyulmamaktadır.

4.2 SWAN

Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilmiş olan SWAN (Yakın Kıyı Simülasyonu), son zamanlarda tüm dünyada ilgi odağı olmuş, en gelişmiş üçüncü nesil dalga tahmin modellerinden birisidir. Neredeyse tüm yakın kıyı dalga dönüşümlerini ve etkileşimlerini içermektedir (SWAN Team, 2017b).

SWAN, verilen rüzgar, derinlik ve akıntı şartları için dalga parametrelerinin gerçekçi tahminlerini elde etmek için kullanılan yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu olan sayısal bir rüzgar dalga tahmin modelidir. Model, açık deniz ve yakın kıyı bölgelerinde rüzgar kaynaklı ile soluğan gelişimini, transformasyonunu ve enerji kaybederek değişimini benzeştirmektedir (SWAN Team, 2017b).

4.2.1 SWAN modeli genel formülasyon

SWAN modeli, dalgaları tanımlamak için iki boyutlu hareket yoğunluğu denge denklemini kullanmaktadır. Hareket yoğunluğu, enerji yoğunluğunun rölatif frekansa bölünmesi ile elde edilmektedir (Booij vd., 1999).

$$E(\sigma, \theta)/\sigma = N(\sigma, \theta)$$
(4.104)

Buradaki iki bağımsız değişken ise rölatif dalga frekansı (σ) ve dalga yönüdür (θ). Enerji yoğunluğu yerine hareket yoğunluğunun kullanılması, akıntı varlığında dalga etkisinin enerji aksine korunuyor olmasıdır. SWAN modelinde kullanılan hareket yoğunluğu denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_{x}N + \frac{\partial}{\partial y}c_{y}N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_{\sigma}N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_{\theta}N = \frac{S}{\sigma}$$
(4.105)

Burada N hareket yoğunluğu, c_x , c_y , c_σ ve c_θ sırasıyla x, y, σ ve θ yönlerindeki dalga yayılma hızları, θ dalga yönü, σ ise rölatif dalga frekans, x, y ve t alan ve zamanın boyutlarıdır. Eşitliğin sol tarafındaki ilk terim dalga hareket yoğunluğunun zamansal değişimini, ikinci, üçüncü terimler (x, y) coğrafik alanındaki hareket yoğunluğu değişimini temsil etmektedir. Eşitliğin sol tarafındaki dördüncü ve beşinci terimler ise sırasıyla derinlik ve akıntı kaynaklı frekans değişimini ve sapmayı (sapma nedeniyle oluşan yön değişimi) ifade etmektedir.

SWAN modelinde kullanılan tüm bu ifadeler Euler yaklaşımına dayanmaktadır. Euler yaklaşımında alan sayısal ağ sistemine bölünerek (ağ alanı) her bir hücredeki enerji dengesi dikkate alınmaktadır. Δt zaman aralığında $\Delta x \Delta y$ alanlı bir hücredeki enerji dengesi aşağıdaki gibidir (SWAN Team, 2017b).

Enerji değişimi = Net enerji girdisi (net birikim) + yerel enerji üretimi (4.106)

Bu prensibin uygulanması derin sular için enerji dengesi olarak bilinen aşağıdaki denklemle sonuçlanmaktadır.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} E}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} E}{\partial y} = S(\sigma, \theta; x, y, t)$$
(4.107)

Enerji denkleminin sığ su bölgelerine uygulanması durumunda üç farklı şartın yukarıda verilen denkleme ilave edilmesi gerekmektedir.

- 1. Taban veya akıntıdan dolayı sapma nedeniyle dalga yönü değişmekte $\frac{\partial c_{\theta} E}{\partial \theta}$ ile
- 2. Derinlik ve akıntı değişimleri nedeniyle rölatif frekans değişiminin etkisi $\frac{\partial c_{\sigma} E}{\partial \sigma}$ ile
- 3. Sonuncusu ise hareket yoğunluğuna geçiştir N(σ , θ ; x,y,t) = E(σ , θ ; x, y, t)/ σ .

Bu ilavelerin yapılması ile sığ sular için spektral hareket denge denklemi, Denklem (4.107)'ye dönüşmektedir (Van der Westhuysen, 2002).

Denklemin sağ tarafındaki terim ise dalganın ilerlemesi ve üretimi aşamalarındaki tüm etkileri içeren kaynak terimi ifadesidir. Bu kaynak terimi, rüzgar etkisiyle dalga üretimini, doğrusal olmayan etkileşimleri (üçlü ve dörtlü dalga-dalga etkileşimleri) ve enerji kayıplarının (köpüklenme, taban sürtünmesi ve derinlik etkisiyle kırılma) toplamı olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$S(\sigma,\theta) = S_{in}(\sigma,\theta) + S_{nl}(\sigma,\theta) + S_{ds}(\sigma,\theta)$$
(4.108)

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl3}(\sigma, \theta) + S_{nl4}(\sigma, \theta) + S_{ds,w}(\sigma, \theta) + S_{ds,b}(\sigma, \theta) + S_{ds,br}(\sigma, \theta)$$
(4.109)

Burada S_{in} rüzgar girdisi nedeniyle dalga üretimini, S_{nl3} doğrusal olmayan üçlü dalga-dalga etkileşimleri ile enerji transferini, S_{nl4} doğrusal olmayan dörtlü dalga-dalga etkileşimleri ile enerji transferini, S_{ds, w} köpüklenme nedeniyle enerji kaybını, S_{ds, b} taban sürtünmesi nedeniyle enerji kaybını ve S_{ds, br} derinlik kaynaklı dalga kırılması sonucu enerji kaybını temsil etmektedir.

4.2.2 SWAN kapsadığı süreçler

SWAN'da dalga ilerlemesi aşağıdaki süreçleri kapsamaktadır.

- Coğrafik alanda dalga ilerlemesi
- Taban ve akıntı etkisindeki uzamsal değişimlerden dolayı sapma
- Taban ve akıntı etkisindeki uzamsal değişimlerden dolayı sığlaşma
- Dönme
- Akıntılara karşı yansımalar ve engellemeler
- İletim yoluyla engellere karşı yansıma

SWAN'da dalga üremesi ve sönümlenmesi aşağıdaki süreçleri içermektedir.

- Rüzgar enerjisi ile dalga üretimi
- Köpüklenme ile enerji kaybı
- Derinlik kaynaklı dalga kırılması ile enerji kaybı
- Taban sürtünmesi nedeni ile enerji kaybı
- Sığ su ve derin sudaki üçlü ve dörtlü dalga-dalga etkileşimleri

Enerji ya da hareket dengesi denklemi ve kaynak teriminin açılım SWAN modelinin kapsadığı süreçleri de açıklamaktadır.

4.2.3 Rüzgar Nedeniyle dalga üremesi

Kıyı duvarları ve sedde gibi kıyı yapıların üzerinde dalga tırmanması, yapıların yüksekliğinin belirlenmesi için önemli bir faktördür. Bundan dolayı dik şevler

üzerinde Rüzgar alanının sahip olduğu kinetik enerjinin, dalga enerjisine dönüştürülmesi S_{in} kaynak terimi ile modellenmektedir. SWAN dalga enerji üretimi; doğrusal (Phillips, 1957) ve üstel (Miles, 1957) artış mekanizmalarını içermektedir. Rüzgar nedeniyle oluşan bir dalganın büyümesi doğrusal ve üstel fonksiyonlarının toplanmasıyla elde edilebilmektedir. Doğrusal artış mekanizmasının dalga üremesinin ilk safhalarında etkin iken, fırtınanın şiddetlenmesi ile daha sonra üstel artış mekanizmasının etkin olduğu bilinmektedir (Van der Westhuysen, 2002).

$$S_{in}(\sigma,\theta) = A + B E(\sigma,\theta) \tag{4.110}$$

Burada A ve B dalga frekansı ve doğrultusu ile rüzgar hızı ve yönüne bağlıdır. Akıntıların etkileri, yerel rüzgar hızı kullanılarak dikkate alınmıştır. A katsayısı doğrusal büyümeyi tanımlarken, B katsayısı üstel büyümeyi ifade etmektedir. A ifadesi için kullanılan formülasyon Cavaleri ve Malanotte-Rizzoli (1981) ve Tolman (1992a) ile tanımlanmaktadır. B katsayısı için ise SWAN'da iki seçenek bulunmaktadır, isteğe bağlı olarak iki ifadeden biri kullanılmaktadır. Birincisi WAM Cycle 3 (WAMDI Grup, 1988) modelinin ilk sürümünden alınmış Snyder vd. [43]'ün ifadesidir. Bu ifade 10m rüzgar hızını (u₁₀) kayma hızına (u_{*}) göre yeniden ölçeklendirmektedir (Komen vd., 1984). Bu ölçeklendirmede kullanılan sürüklenme katsayısı Wu (1982)'den alınmıştır. İkinci ifade ise WAM Cycle 4 (WAMDI Grup, 1988) modelinden alınmış rüzgar ile dalga arasındaki karşılıklı etkileşimi atmosfer sınır koşulu ve deniz yüzeyi pürüzlülüğü ile birlikte hesaba alan Janssen (1991)'in ifadesidir.

4.2.4 Enerji kaybı

4.3.4.1 Köpüklenme nedeniyle enerji kaybı

SWAN'da dalga üremesi ve sönümlenmesi aşağıdaki süreçleri içermektedir.

Köpüklenme olayı, maksimum dalga dikliğinin ($H_{maks}/L=0.14$) aşılması durumunda meydana gelmektedir. Üçüncü nesil dalga üretim modellerinde, köpüklenme formülleri Hasselmann (1974) modeline dayanmaktadır.

$$S_{wc}(\sigma,\theta) = -r\,\overline{\sigma}\,\frac{k}{\overline{k}}\,E(\sigma,\theta) \tag{4.111}$$

Burada r bağımlı diklik katsayısı, k dalga sayısı, $\overline{\sigma}$ ortalama frekans ve \overline{k} ortalama dalga sayısıdır (WAMDI Grup, 1988). Komen vd. (1984) tam gelişmiş deniz durumu için bağımlı diklik katsayısını hesaplamıştır. Bu katsayının kullanılan rüzgar girdi formülasyonuna bağımlı olduğu anlaşılmıştır. SWAN'da rüzgar girdisi olarak iki farklı ifade kullanıldığı için bağımlı diklik katsayısı için de iki değer kullanılmaktadır. Bunlardan ilki WAM Cycle 3'te yer alan Komen vd. (1984), ikincisi ise WAM Cycle 4'te yer alan Janssen (1991)'e dayanan ifadenin uyarlamasıdır.

SWAN'ın doğruluğunu geliştirmek için birçok alternatif köpüklenme ifadesi önerilmiştir. Alves ve Banner (2003)'ün köpüklenme denklemine dayanan Van der Westhuysen (2007) ve Van der Westhuysen vd. (2007) seçeneği SWAN'da yer almaktadır. Bu denklem dalga gruplarındaki doğrusal olmayan hidrodinamiklerle ilişkili deneysel bulgulara dayalı köpüklenme dağılımıdır. Spektral ortalama dalga sayısı ve dikliğine dayanan Alves ve Banner (2003) ifadesinin yakın kıyı ile karşılaşan bileşik deniz ve soluğan dalga durumlarında sorunlu olması nedeniyle Van der Westhuysen (2007) seçeneğinde söz konusu ortalama spektral bağımlılıklar yoktur. Bu uyarlanmış köpüklenme ifadesi Yan (1987)'ye dayanan rüzgar girdi terimi ile birlikte kullanılmaktadır.

4.3.4.2 Taban sürtünmesi nedeniyle enerji kaybı

SWAN'da taban sürtünmesi nedeniyle enerji kaybı üç farklı ifade ile tanımlanmıştır. Hasselmann vd. (1973) ampirik JONSWAP modeli, Collins (1972) sürükleme kanun modeli ve Madsen (1988) eddy-viskozite modeli, isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından seçilmektedir. SWAN'da taban sürtünmesi nedeniyle enerji dağılımına ortalama bir akıntının etkisi dikkate alınmamıştır. Bu ifadeler aşağıdaki gibidir:

$$S_{bfr} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta)$$
(4.112)

burada C_b taban sürtünme katsayısıdır.

4.3.4.3 Derinlik kaynaklı dalga kırılması nedeniyle enerji kaybı

Dalgalar kıyıya doğru yaklaştıkça azalan derinliğin etkisiyle tabanı hissetmeye başlarlar. Dalga periyodunun değişmeden kalmasına rağmen; dalga boyları kısalır, dalga yayılma hızları azalır, dalga tepeleri sıklaşmaya başlar, tabana yakın su partiküllerinin hareketleri yüzeydekilere nazaran gecikir ve dalga yükseklikleri artmaya başlar. Dalga tepelerindeki su partiküllerinin hızları, dalga yayılma hızına hemen hemen eşit olur ve dalga maksimum yüksekliğe ulaşır ve dalga maksimum yüksekliğe ulaştığında stabilitesi bozulur. Böylece kırılma olayı meydana gelir (Yüksel ve Çevik, 2006).

Çok sığ suda bu süreç diğer bütün süreçlerden daha baskın hale gelmektedir. Derinlik etkisiyle dalga kırılmasının oluşum süreci tam anlamıyla anlaşılamamış ve spektral modellemesiyle ilgili çok az şey bilinmektedir. Bu tip dalga kırılması nedeniyle enerji dağılımı ise, bu durumun tersine iyi bir şekilde modellenmektedir. SWAN'da Battjes ve Janssen (1978)'in kırılma modelinin derinlik sınırlı bölümünün spektral versiyonu kullanılmaktadır (Akpinar, 2012).

$$S_{surf}(\sigma,\theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma,\theta)$$
(4.113)

Burada E_{tot} toplam dalga enerjisini, sıfırıdan küçük değer bir olan D_{tot} Battjes ve Janssen (1978)'e göre dalga kırılması nedeniyle toplam enerjinin sönümlenme oranıdır. D_{tot} ifadesinin değeri kırılma indeksine ($\gamma = H_{maks}/h$) ciddi bir biçimde bağımlıdır. SWAN'da bu indeks sabit ve değişen bir değer olarak mevcuttur. Değişen kırılma indeksi için Nelson (1987) ve Ruessink vd. (2003) verilirken, sabit değer için Battjes ve Stive (1985)'in veri setindeki ortalama değer olan $\gamma =$ 0.73 verilmiştir.

4.3.4.4 Doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimleri

Derin ve geçiş sularda dörtlü (quadruplet, S_{nl4}) dalga-dalga etkileşimi önemli iken, sığ sularda üçlü (triads, S_{nl3}) dalga-dalga etkileşimi önemli olmaktadır.

Dörtlü dalga-dalga etkileşimleri spektrumun gelişiminde etkin rol oynamaktadır. Bu kaynak ifadesi hem artı hem de eksi işarete sahiptir. Dalga enerjisini spektral pik değerinden daha düşük frekanslara aktarmasıyla pozitif işaretli, köpüklenme olayı ile daha yüksek frekanslara transfer edilmesiyle negatif işaretli kabul edilir. Dalga spektrumunun gelişiminde kritik rol üstlenen doğrusal olmayan dörtlü dalga-dalga etkileşimlerinin formülasyonu Bolzmann integrali ile tanımlanmaktadır. Ancak bu integrali çözmek yoğun hesaplamalar ve zaman gerektirdiğinden uygulanamamaktadır. Bu sebeple Hasselmann vd. (1985) Doğrudan Etkileşim Yaklaşımı (DIA) SWAN'da uygulanmaktadır.

Çok sığ su koşullarında üçlü dalga-dalga etkileşimleri derin suda olduğundan daha önemli olmaktadır ve enerjiyi daha yüksek frekanslara aktarmaktadır (Beji ve Battjes, 1993). Aniden tek pikli spektrumdan çok pikli spektruma üçlü dalgadalga etkileşimiyle geçilmektedir. Çok sığ bölgelerde Eldeberky ve Battjes (1995) yaklaşımı SWAN'da yer almaktadır.

4.2.5 SWAN ile gerçekleştirilecek çalışmalar için öneriler

SWAN modeli fiziksel süreçleri ve model kurguları bakımından kullanıcı için çok çeşitli seçeneklere sahip olup kullanıcıyı modelin sayısal içeriğine ilişkin seçenekler bakımından oldukça özgür bırakmaktadır. Aynı zamanda modelin uygulanması ve yapılandırılması üzerine çok sayıda tavsiyeler içermekte olup bunlar sayısal ve fiziksel süreçler için olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

SWAN'da sayısal aşamalar ile analizlerde hesaplama yapılacak alanın ayrıklaştırma (ağ oluşu) süreci ifade edilmektedir. Hareket dengesi hesabı, ayrı ayrı coğrafik (x,y) alanda, yönsel (θ) alanda, frekans (σ) ve zaman (t) alanında ayrıklaştırmaya sahip bir hücre için gerçekleştirilmektedir. Model sonuçlarının doğruluğu için bu ayrıklaştırma çalışmasının iyi yapılmış olması gerekmektedir. Bunun için SWAN tavsiyeleri **Tablo 4.1**'de verilmiştir. Burada verilen alansal çözünürlük batimetrik detaylar, yönsel çözünürlük dalga bileşenlerinin ilerlemesi, frekans çözünürlüğü ise ilgili spektral detaylar için gereklidir. Ayrıca tavsiye edilen alt ve üst frekans sınırları dalga bileşenler arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlere izin verebilmelidir.

Tablo 4.1 SWAN'da sayısal ayrıklaştırma için önerilen seçenekler (SWAN Team,
2017a)

	Önerilen
Rüzgar dalgası için yönsel çözünürlük ($\Delta \theta$)	15°-10°
Soluğan dalgası için yönsel çözünürlük (Δθ)	5°-2°
Frekans aralığı (f)	0.04≤f≤1.00 Hz
Alansal çözünürlük (Δx , Δy)	50-1000m

SWAN içerisinde kaynak ifadelerinin çözümüne yönelik çeşitli süreçler yer almaktadır. Söz konusu süreçler, süreçlerin yazarları ve hangi nesilde kullanılabileceği **Tablo 4.2**'de özetlenmiştir (SWAN Team, 2017a).

Tablo 4.2Modelin uygulanması için SWAN önerilen fiziksel süreçler (SWAN
Team, 2017a)

Süraalar	Yazarlar		Nesiller		
Sureçier			2.	3.	
	Cavaleri ve Malanotte-Rizzoli	v	v		
Doğrusal Dalga Artısı	(1981) (değiştirilmiş)	Λ	Λ		
Dogi usar Darga Arrisi	Cavaleri ve Malanotte-Rizzoli			x	
	(1981)				
	Snyder vd. (1981) (değiştirilmiş)		Х		
Üstel Dalga Artisi	Snyder vd. (1981)			Х	
Oster Darga Artişi	Janssen (1989, 1991)			Х	
	Yan (1987) (değiştirilmiş)			Х	
	Holthuijsen ve De Boer (1988)	Х	Х		
Könüklonmo	Komen vd. (1984)			Х	
кориктепше	Janssen (1991)			Х	
	Alves ve Banner (2003)			Х	
4'lü Dalga Etkileşimi	Hasselmann vd. (1985)			Х	
3'ü Dalga Etkileşimi	Eldeberky (1996)	Х	Х	Х	
Derinlik Etkisiyle Kırılma	Battjes ve Janssen (1978)	Х	Х	Х	
	JONSWAP (1973)	Х	Х	Х	
Taban Sürtünmesi	Collins (1972)	Х	Х	Х	
	Madsen vd. (1988)	Х	Х	Х	
Engol Cogici	Seelig (1979),	v	v	Х	
Eligei Geçişi	d'Angremond (1996)	Λ	л		
Dalga Kaynaklı Su Baskını		Х	Х	Х	
Bitki Örtüsü	Dalrymple (1984)	Х	Х	Х	
Çamur Sönümlenmesi		Х	Х	Х	
Türbülans Sönümlenmesi		Х	Х	Х	

5.1 MIKE 21 SW Sayısal Modelinin Kalibrasyonu

Karadeniz dalga ikliminin belirlenmesi amacıyla gerekli olan dalga parametreleri için MIKE 21 SW yazılımı kullanılmıştır. MIKE 21 SW sayısal modelinin kalibrasyonu için kullanılan ölçüm istasyonları, koordinatları, derinlik, ölçüm tarihleri ve ölçülen dalga parametreleri Tablo 5.1'de verilmiş ve istasyonların konumları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. 1994 yılından 2018 yılına kadar kesintilerle birlikte kalibrasyon için yeteri kadar ölçüm bulunmaktadır. İstasyonların konumları ve süreleri dikkate alındığında Karadeniz dalga ikliminin yeteri doğrulukta belirlenebilmesi için kıyı alanlarında (özellikle güney Karadeniz'de) yeteri aralıklarda istasyonlar mevcuttur. İstasyonlarda, şamandıra ve tabana yerleştirilen basınç tipi dalga ölçerler kullanılmıştır. Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, İstanbul Boğazı ve Samsun istasyonlarında ölçümler yönsel olarak yapılmıştır. Gelendzhik, Hopa, Sinop, Karaburun ve Samsun istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve ortalama dalga periyodu (T_m) ölçümleri mevcutken, Filyos ve İstanbul Boğazı istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve pik dalga periyodu (T_p) ölçümleri mevcuttur. Model sonuçları, ölçüm parametreleri yardımıyla kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Dolayısıyla kalibrasyon, Filyos ve İstanbul Boğazı istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu ölçümleri dikkate alınırken, Gelendzhik, Hopa, Sinop, Karaburun ve Samsun istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ölçümleri dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 5.1 Çalışma alanı, dalga ölçüm istasyonları ve dalga parametrelerinin detaylı analizleri için seçilen üç referans nokta

Tablo 5.1	Ölçüm	istasyonları,	koordinat,	derinlik,	ölçüm	tarihi	ve ölçülen	dalga
			parame	treleri				

İstasyon Adı	Koordinat (°)	Derinlik (m)	Veri Seti Tarih Aralıkları	Ölçülen Dalga Parametreleri	
GELENDHZIK	44°30'27"N	85 m	01.07.1996-10.12.2003	Hs, Tm	
	37°58′42″E				
нора	41°25'24"N	100 m	21 12 1004 20 04 1000	Hs, T _m	
HOFA	41°23'00"E	100 III	21.12.1994-30.04.1999		
SINOD	42°07'24"N	100 m	01 11 1004 20 06 1006	и т	
SINOP	35°05'12"E	100 111	01.11.1994–20.06.1996	Π_s , I_m	
FILVOS	41°36'00"N	100 m 21 12 1004 26 12 1006		υт	
TILIOS	32°1'12"E	100 III	21.12.1994-20.12.1990	11 _s , 1 _m	
	41°21'00"N	16 m	20 08 2002 17 12 2004	Hs, T _m	
KARADURUN	28°41'00"E	10 111	30.08.2003-17.12.2004		
CAMELIN	41°26'13.92"N	280 m		υт	
SAMOUN	36°28'29.64"E	200 III	09.03.2013-20.03.2010	$\Pi_{\rm s}$, $\Pi_{\rm m}$	
İSTANBUL	41°17'31.92"N	2"N 05 m 11.02.2015 10.11.2018			υт
BOĞAZI	29°09'56.16"E	95 III	11.03.2013-19.11.2010	Пs, Iр	

Dalga modellemesi için kullanılan MIKE 21 SW yazılımına girdi olarak model parametreleri dışında tüm Karadeniz'in batimetresi ve atmosferik basınç ile rüzgar alanı girilmiştir. Batimetri için Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığının Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) başkanlığının ürettiği haritalar sayısallaştırılarak kullanılmıştır. Rüzgar ve atmosferik basınç alanına ait veriler için ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR veri tabanları kullanılmıştır. Bu çalışmada MIKE 21 SW yazılımına rüzgar girdisi olarak kullanılacak olan ERA-Interim rüzgar verileri uzamsal olarak 0.25°x0.25°, zamansal olarak 6 saat çözünürlükte iken CFSR rüzgar verileri uzamsal olarak 0.5°x0.5°, zamansal olarak 1 saatlık çözünürlüktedir. Bu iki veri kaynağı için 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık rüzgar ve atmosferik basınç verileri girdi olarak MIKE 21 SW yazılımına tanıtılmış ve modelden elde edilen dalga parametreleri irdelenmiştir.

Modelde dikkate alınan ağ yapısı Karadeniz batimetrisi ile **Şekil 5.2**'de, ağa ait özellikler **Tablo 5.2** 'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Karadeniz çalışma alanı için model hesap ağı

	Düğüm Noktası Sayısı	Üçgen Eleman Sayısı
Karadeniz Model Hesap Ağı	4755	8213

Tablo 5.2 Karadeniz çalışma alanına ait model hesap ağının özellikleri

Sayısal modelin kalibrasyonu aşamasında, modelin girdi parametrelerinden olan taban sürtünmesi, kırılma ve köpüklenmeyi tanımlayan 6 parametre dikkate alınmıştır. Ancak yapılan çalışmalar modelin köpüklenme parametresine daha hassas olduğunu göstermiştir.

MIKE 21 SW yazılımına bulunan kalibrasyon parametreleri;

<u>Taban sürtünmesi</u>

Sığ su koşullarında taban sürtünme katsayısındaki artma, enerji kaybına ve bununla beraber dalga yüksekliğinin azalmasına ayrıca periyodun artmasına sebep olmaktadır. Bunun tam tersi bir durum taban sürtünme katsayısının azaltılmasıyla oluşturulabilmektedir. Derin suda ise taban sürtünme katsayısının etkisi dalga tabanı hissetmeyeceği için ihmal edilmektedir.

Kırılma parametreleri

Bazı durumlarda kırılma parametreleri kalibrasyon parametreleri olarak kullanılmaktadır. Fakat bu parametrelerin seçiminde oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Sayısal modelde tanımlanan α parametresi, kırılmadan sonra enerji kaybı oranını kontrol ederken γ parametresi, derinlikle ilgili kırılma miktarını kontrol etmektedir. α parametresindeki yükselme enerji kaybı miktarını artırırken, γ parametresindeki yükselme ise derinliğe bağlı dalga kırılma miktarını azaltmaktadır.

<u>Köpüklenme</u>

Köpüklenme için sayısal modelde parametreler C_{ds} ve δ ile tanımlanmış ve bu parametrelerin (C_{ds} =0.5, 1.0, 1.5 ve δ =0.5) değerleri için denemeler yapılmıştır. Yapılan kalibrasyon çalışmaları sonucunda tanımlanan bu değerlerin, CFSR rüzgar girdilerinde C_{ds} =1.5 ve δ =0.5, ERA-Interim rüzgar girdilerinde C_{ds} =0.5 ve δ =0.5 değerleri için oldukça iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Taban sürtünmesi, kırılma parametreleri ve köpüklenme parametreleri için kalibre edilmiş model parametreleri ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için **Tablo 5.3**'te verilmiştir.

Veri		ERA-Interim	CFSR	
Kalibrasyon Tarihi ve		01.01.2003–17.12.2004	01.01.2003-17.12.2004	
İstasyonu		Karaburun	Karaburun	
Model Çalıştırma Mertebesi		Düşük Mertebe	Düşük Mertebe	
Taban Sürtünmesi	Model	Nikuradse Pürüzlülüğü	Nikuradse Pürüzlülüğü	
	Değer	0.04	0.04	
Kırılma	α	1	1	
Parametreleri	γ	0.8	0.8	
Köpüklenme	Cds	0.5	1.5	
Parametreleri	δ	0.5	0.5	

Tablo 5.3 Kalibre edilmiş model parametreleri

Kalibrasyon sonuçlarının nicel olarak değerlendirilmesi için BIAS, ortalama karekök hatası (RMSE), dağılım indeksi (SI) ve korelasyon katsayısı (R) aşağıda verilen ifadeleri ile hesaplanmıştır.

$$BIAS = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N} (M_i - O_i)$$
(5.1)
$$PMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (M_i - O_i)^2}$$
(5.2)

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (M_i - O_i)^2}$$
 (5.2)

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (M_i - O_i)^2}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} O_i}$$
(5.3)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{i} - \overline{M})(O_{i} - \overline{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (M_{i} - \overline{M})^{2} \sum_{i=1}^{N} (O_{i} - \overline{O})^{2}}}$$
(5.4)

burada M modellenen değer, \overline{M} modellenen verinin ortalama değeri, O ölçülen değer, \overline{O} ölçülen verinin ortalama değeri, N ise veri sayısını temsil etmektedir.

MIKE 21 SW yazılımı **Tablo 5.3**'te tanımlanan parametreler için 1979–2018 yılları arasındaki ölçüm istasyonlarındaki tarihler boyunca koşturulmuş, elde

edilen belirgin dalga yükseklikleri ve dalga periyotlarına ait zamansal değişimleri, ölçüm değerleri ile değerlendirilmiştir. Kalibrasyon, Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonlarından Karaburun istasyonu için yapılmış, diğer 6 istasyon (Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Samsun ve İstanbul Boğazı) doğrulama için kullanılmıştır. Kalibre edilen modelden hesaplanan ve istasyonlarda ve doğrulanan ölçülen dalga parametreleri arasındaki saçılım grafikleri belirgin dalga yüksekliği için Şekil 5.3'te, dalga periyodu için Şekil 5.4'te, tarihçe karşılaştırması belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu için sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.4, MIKE 21 SW yazılımı yardımıyla hesaplanan ve tüm istasyonlarda ölçülen belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametrelerine ait istatistiksel hata parametrelerinin (BIAS, SI, RMSE ve R) sonuçlarını göstermektedir.

Kalibrasyon ve doğrulama süreci için yapılan değerlendirmeler, her iki rüzgar girdisiyle MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin ölçümlerler ile tatmin edici derecede uyumlu olduğunu göstermiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen sonuçların birbirine çok yakın çıkması her iki rüzgar girdisiyle modelden elde edilen dalga verilerinin Karadeniz dalga ikliminin yeteri doğrulukta tahmin edilebileceği sonucuna ulaştırmıştır. Bu analizlerden sonra, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli ortalamaları ve uzun dönemli değişim eğilimleri araştırılmış, seçilen referans noktalar için detaylı yerel analizler ve belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem analizi incelenmiştir.



Şekil 5.3 Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonunda ölçülen belirgin dalga yüksekliğine karşılık MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği



Şekil 5.4 Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonunda ölçülen dalga periyoduna karşılık MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga periyodu



Şekil 5.5 Belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik, (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Filyos, (e) Karaburun, (f) Samsun, (g) İstanbul Boğazı



Şekil 5.5 Belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik, (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Filyos, (e) Karaburun, (f) Samsun, (g) İstanbul Boğazı (devamı)



Şekil 5.6 Dalga periyodunun tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik, (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Fiyos, (e) Karaburun, (f) Samsun, (g) İstanbul Boğazı



Şekil 5.6 Belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik, (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Filyos, (e) Karaburun, (f) Samsun, (g) İstanbul Boğazı (devamı)

		ERA-Interim	CFSR	ERA-Interim	CFSR	
		$C_{ds}=0.5$	$C_{ds} = 1.5$	$C_{ds} = 0.5$	$C_{ds} = 1.5$	
		T _m	Tm	Hs	Hs	
7	Karaburun İstasyonu					
IOX:	BIAS	-0.1866	0.0545	0.0652	0.0354	
RAS	SI	0.1475	0.1508	0.3132	0.3257	
ALİB	RMSE	0.5437	0.5561	0.2454	0.2553	
K	R	0.8515	0.8210	0.9324	0.9244	
		Ge	<u>lendzhik İsta</u>	syonu		
	BIAS	-0.2842	-0.0569	-0.0116	0.1111	
	SI	0.1961	0.1893	0.4867	0.5700	
	RMSE	0.6884	0.6645	0.3520	0.4122	
	R	0.7974	0.7956	0.8536	0.8625	
			Hopa İstasyo	nu		
	BIAS	-0.1450	-0.1322	0.0169	0.0425	
	SI	0.2365	0.2137	0.5473	0.4949	
	RMSE	0.9214	0.8327	0.3062	0.2769	
	R	0.6032	0.6987	0.7964	0.8440	
			Sinop İstasyo	nu		
	BIAS	-0.2129	0.0447	-0.0022	0.0620	
	SI	0.1584	0.1519	0.3755	0.3432	
<	RMSE	0.6263	0.6007	0.3448	0.3152	
N N	R	0.7745	0.7862	0.8541	0.8842	
Г		S	Samsun İstasy	onu		
LIK	BIAS	-0.7672	-0.4124	0.1708	0.1626	
ŏ	SI	0.2326	0.1792	0.5614	0.5032	
	RMSE	1.0097	0.7782	0.3394	0.3042	
	R	0.7634	0.7818	0.8371	0.8818	
		Tp	T_{p}	Hs	Hs	
			Filyos İstasyo	nu		
	BIAS	-0.1501	0.0642	0.2069	0.1956	
	SI	0.1924	0.1922	0.6290	0.5729	
	RMSE	1.0567	1.0551	0.3899	0.3551	
	R	0.6542	0.6585	0.8316	0.8624	
	İstanbul Boğazı İstasyonu					
	BIAS	0.4506	0.6651	0.2448	0.1926	
	SI	0.2443	0.2672	0.5203	0.4648	
	RMSE	1.1918	1.3038	0.4107	0.3669	
	R	0.7099	0.7367	0.9060	0.9203	

Tablo 5.4 MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan ve Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonlarında ölçülen dalga parametrelerinin istatistiksel değerlendirmesi.

5.1.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli araştırması

1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga sonuç dosyalarından; belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), maksimum dalga yüksekliği (H_{maks}), pik dalga periyodu (T_p) ve ortalama dalga periyodu (T_m) parametrelerinin istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuç dosyası saatlik olduğundan her bir parametre, bir yıl için 8760 zaman adımına sahip olmuştur. MIKE 21 SW yazılımı kendi içinde istatistiksel hesaplama yapabilmekte ve minimum, ortalama ve maksimumu içeren üç adet sonuç dosyası oluşturabilmektedir. Bu çalışmada dikkate alınan parametrelerin istatistiksel değerlendirilmesinde ortalama ve maksimum değerleri irdelenmiştir.

Öncelikle ECMWF ERA-Interim rüzgar girdisi ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için yıllık ortalama ve yıllık maksimum değerleri tüm Karadeniz çalışma alanı (26–42° E; 47–40° N) için hesaplanmıştır. Daha sonra dalga parametrelerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli araştırmaları için 40 yıllık ortalamaları (**Şekil 5.7** ve **Şekil 5.8**) ve 40 yıllık değişim eğilimleri (**Şekil 5.9** ve **Şekil 5.10**) analiz edilmiştir. Aynı analizler NCEP/CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen dalga parametreleri için de yapılmıştır (**Şekil 5.7–Şekil 5.10**). CFSR rüzgar girdileri için Karadeniz çalışma alanı, ERA-Interim rüzgar girdilerinden olduğu gibi, 26–42° E; 47–40° N sınırlarını kapsamaktadır. Dalga parametrelerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli değişim eğiliminin saptanması için bu bölümde dalga parametrelerinin yalnızca 40 yıllık ortalamaları ve 40 yıllık değişim eğilimleri irdelenmiştir.

5.1.1.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları

<u>Yıllık maksimumların uzun dönemli ortalamaları</u>

Dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, bu bölümde yıllık maksimumların 40 yıllık ortalamaları, MIKE 21 SW yazılımı yardımıyla yapılan istatistiksel hesaplamayla belirlenmiştir. Uzamsal dağılım grafiklerinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel maksimum hesaplaması her yıl için ayrı ayrı yapılmış ve sonuç olarak 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için 40 adet dosya oluşturulmuştur. Her biri 40 çıktıdan oluşan H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m dalga parametreleri hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar gidileri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Elde edilen 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak, yıllık maksimumların 40 yıllık ortalaması hesaplanmış ve her bir dalga parametresini (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) temsil eden tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.

Şekil 5.7'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimum değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.7 (a1 ve a2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımıyla hesaplanan $H_{mo, maks}$ değerlerinin 1.11 m ile 7.22 m arasında değişirken, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin çok yakın olmakla beraber 1.21 m ile 7.92 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $H_{mo, maks}$ parametresinin yüksek değerlerinin güneybatı Karadeniz'de olduğu tespit edilmiştir. Doğu Karadeniz'e doğru her iki veri kaynağı için de değerlerin 4.5 m mertebelerine düşmektedir. $H_{mo, maks}$ parametresinin en düşük değerlerinin her iki veri kaynağı için de kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.7 (b1 ve b2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $H_{maks, maks}$ dalga parametresi değerlerinin 2.19 m ile 13.68 m arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin 2.29 m ile 14.94 m arasında olduğu belirlenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen, $H_{mo, maks}$ dalga parametresinde olduğu gibi, $H_{mo, maks}$ parametresinin yüksek değerlerinin güneybatı Karadeniz'de olduğu saptanmıştır. Özellikle doğu Karadeniz'de her iki veri kaynağı için değerler 7 m–8 m mertebelerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. $H_{mo, maks}$ parametresinin en düşük değerleri, $H_{mo, maks}$ dalga parametresinde olduğu gibi, her iki veri kaynağı için de kuzeybatı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.7 (a2 ve b2)'den, modelden elde edilen belirgin ve maksimum dalga yüksekliği parametrelerinin düşük değerlerinin her iki veri kaynağı için de doğu

Karadeniz'de, yüksek değerlerin ise güneybatı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Dalga yüksekliğinin uzun dönemli ortalamalarından CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen sonuçların biraz daha yüksek olduğu ve doğu Karadeniz'e doğru biraz daha fazla dağılım gösterdiği saptanmıştır. CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga yüksekliklerinin biraz daha yüksek çıkması rüzgar verilerinden, doğuya doğru biraz daha fazla dağılım göstermesi ise CFSR rüzgar verilerinin ERA-Interim rüzgar verilerine göre daha kaba uzamsal çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklanmıştır. Bu sonuç hem $H_{m0, ort}$ hem de $H_{maks, ort}$ sonuçlarında da bulunmuştur.

Şekil 5.7 (c1 ve c2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{p,maks}$ değerlerinin 8.47 s ile 12.33 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin ise biraz daha yüksek olarak 9.27 s ile 13.44 s arasında değiştiği bulunmuştur. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden hesaplanan $T_{p,maks}$ değerinin güneybatı Karadeniz'de daha büyük olduğu belirlenmiştir. Kuzeybatı Karadeniz'de ise her iki veri tabanı için de değerler 9.5 s mertebesine düşmektedir.

Şekil 5.7 (d1 ve d2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{m, maks}$ değerlerinin 4.54 s ile 9.12 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin ise biraz daha yüksek olarak 5.17 s ile 10.31 s arasında değiştiği belirlenmiştir. Her iki veri kaynağı için de güneybatı Karadeniz'de daha uzun ortalama dalga periyoduna sahip dalgaların hakim olduğu belirlenmiştir. ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{m, maks}$ değerlerinin kuzeybatı Karadeniz'de sırasıyla 4.8 ve 6 s mertebelerine düştüğü belirlenmiştir.

Şekil 5.7 (c1 ve d2), ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen T_{m, maks} ve T_{p, maks} değerlerinin havzanın diğer bölgelerine kıyasla güneybatı Karadeniz'de daha yüksek, kuzeybatı Karadeniz'de ise daha düşük olduğunu göstermektedir. CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen T_{m, maks} ve T_{p, maks} parametrelerinin uzun dönemli ortalamalarının, ERAInterim rüzgar girdileri ile elde edilen ortalamalardan biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.7 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimumlarının Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımları

<u>Yıllık ortalamaların uzun dönemli ortalamaları</u>

Dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, maksimumlarda olduğu gibi, MIKE 21 SW yazılımı yardımıyla yapılan istatistiksel hesaplamayla belirlenmiştir. Uzamsal dağılım grafiklerinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel ortalama hesaplaması her yıl için ayrı ayrı yapılmış ve sonuç olarak 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için 40 adet dosya oluşturulmuştur. Her biri 40 çıktıdan oluşan H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m dalga parametreleri hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Elde edilen 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak yıllık ortalamaların 40 yıllık ortalaması hesaplanmış ve her bir dalga parametresini (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) temsil eden tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.
Şekil 5.8'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.8 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $H_{mo, ort}$ değerlerinin 0.23 m ile 1.30 m arasında değiştiği, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilenlerin çok yakın olmakla beraber biraz daha yüksek olarak 0.24 m ile 1.32 m arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.8 (b1 ve b2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $H_{maks, ort}$ değerlerinin 0.45 m ile 2.56 m arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin ise 0.48 m ile 2.60 m arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Şekil 5.8 (a1–b2)'den, modelden elde edilen $H_{mo, ort}$ ve $H_{maks, ort}$ parametrelerinin düşük değerlerinin her iki veri kaynağı için de doğu Karadeniz'de, yüksek değerlerin güneybatı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Dalga yüksekliğinin uzun dönemli maksimumlarında olduğu gibi, uzun dönemli ortalamalarında da CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $H_{mo, ort}$ ve $H_{maks, ort}$ sonuçlarının, ERA-Interim rüzgar girdileri ile elde edilen sonuçlardan biraz daha yüksek olduğu ve doğu Karadeniz'e doğru biraz daha fazla dağılım gösterdiği belirlenmiştir. CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen elde edilen dalga yüksekliklerinin biraz daha yüksek çıkması rüzgar verilerinden, doğuya doğru biraz daha fazla dağılım göstermesi ise CFSR rüzgar verilerinin ERA-Interim rüzgar verilerine göre daha kaba uzamsal çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklanmıştır.

Şekil 5.8 (c1 ve c2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{p,ort}$ değerlerinin 3.61 s ile 5.61 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin hemen hemen benzer olarak 3.61 s ile 5.95 s arasında değiştiği bulunmuştur.

Şekil 5.8 (d1 ve d2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{m, ort}$ değerlerinin 2.68 s ile 4.30 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden

elde edilen değerlerin hemen hemen benzer olarak 2.70 s ile 4.51 s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.8 (c1 ve d2)'den, modelden elde edilen $T_{p, ort}$ ve $T_{m, ort}$ parametrelerinin her iki veri kaynağı için de özellikle güneybatı Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dalga periyodunun uzun dönemli maksimumlarda olduğu gibi, uzun dönemli ortalamalarında da CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen $T_{p, ort}$ ve $T_{m, ort}$ sonuçlarının ERA-Interim ile elde edilen sonuçlardan biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.8 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

5.1.1.2 Dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi

Bölüm 5.1.1.1'de verilen 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık dalga parametrelerinin ortalama değişim eğilimi, en iyi uyum çizgisi kullanılarak doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu yöntemde saçılmış veri noktaları arasındaki ilişkiyi en iyi ifade eden doğrunun denklemi belirlenmektedir. Bu hesaplama için öncelikle dalga parametrelerinin (H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m) 1979 yılından 2018 yılına kadar olan 40 yıl için yıllık ortalama ve yıllık maksimum değerleri belirlenmiştir (40 yıl için 40 değer). 1979 yılından 2018 yılına doğru değişim eğilimini ifaden doğrunun denklemi bir MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirlenen doğrunun denklemi kullanılarak her bir dalga parametresi için 2018 yılı için hesaplanan değerden 1979 yılı için hesaplanan değer çıkarılmış ve 40 yıldaki toplam değişim hesaplanmıştır. Bu işlem tüm Karadeniz çalışma alanı için bir MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmış ve 40 yıllık değişimi gösteren tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.

Uzun dönemli değişim eğilimi, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Uzun dönemli ortalamalarda olduğu gibi 1979–2018 yıllarına ait dalga parametrelerinin hem maksimum hem de ortalama değerlerinin değişim eğilimi araştırılmıştır. **Şekil 5.9** ve **Şekil 5.10**, dalga parametrelerinin (ΔH_{m0} , ΔH_{max} , ΔT_p ve ΔT_m) sırasıyla maksimum ve ortalama değerlerinin 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanındaki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Maksimum dalga parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi

Şekil 5.9'da sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) maksimum değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.9 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için en yüksek pozitif değişim eğilminin 1.44 m, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin 1.76 m değeri ile kuzeydoğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Belirgin dalga yüksekliğinin kuzeybatı Karadeniz'de azalan eğilimde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan Karadeniz'in doğusunun, özellikle kuzeydoğusunun, 1979 yılından 2018 yılına doğru belirgin dalga yüksekliğinde artma eğiliminde iken kuzeybatısının negatif değerle azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.9 (b1 ve b2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen maksimum dalga yüksekliği için en büyük pozitif değişim eğilimi değerinin 2.65 m, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin biraz daha yüksek olarak 3.22 m olarak kuzeydoğu Karadeniz'de olduğu saptanmıştır.

Şekil 5.9 (a1 ve b1)'deki ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga sonuçlarından belirgin ve maksimum dalga yüksekliklerinin değişim eğilimleri, **Şekil 5.9** (a2 ve b2)'deki CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga yüksekliği değişim eğilimi sonuçlarıyla oldukça uyumlu çıktığı belirlenmiştir.

Şekil 5.9 (c1 ve c2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen pik dalga periyodunun en büyük pozitif değişim eğilimi değerinin 1.27 s iken, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin 1.73 s ile Karadeniz'in kuzeydoğu kıyılarında olduğu belirlenmiştir. Her iki veri kaynağı için modelden elde edilen pik dalga periyodunun uzun dönemli değişim eğiliminin batı Karadeniz'de azalma eğiliminde olduğu ve bu değerlerin 0.22 s ve 0.07 s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.9 (d1 ve d2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun en yüksek pozitif değişim eğilimi değerinin 1.37 s iken, CFSR rüzgar gidileriyle modelden elde edilen değerin biraz daha yüksek olarak 1.66 s ile doğu Karadeniz'de olduğu tespit edilmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW modelinden elde edilen ortalama dalga periyodunun değişim eğiliminin, batı Karadeniz'de 0 s ile -0.15 s değerleri arasında değişmesiyle oldukça küçük azalma eğiliminde olduğu bulunmuştur.

Şekil 5.9 (a–d)'de, Karadeniz'in 1979 yılından 2018 yılına doğru H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m dalga parametrelerinin maksimum değerlerinin Karadeniz üzerindeki değişim eğilimi gösterilmişitr. Özellikle kuzeydoğu Karadeniz'de dalga parametrelerinin

maksimum değerlerinin artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Uzun dönemli değişim eğiliminin uzamsal garafiklerinden, maksimum dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim etkilerinin Karadeniz'in doğusunda, batısına kıyasla daha belirgin olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.



Şekil 5.9 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin maksimum değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

Ortalama dalga parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi

Şekil 5.10'da sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} , H_{maks} , T_p ve T_m) 1979–2018 yılları için ortalama değerlerinin 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. **Şekil 5.10** (a1 ve a2)'den ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğiliminin ERA-Interim rüzgar girdilerinde 0.13 m, CFSR rüzgar girdilerinde 0.06 m ile kuzeydoğu Karadeniz'de hafif artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin dalga yükseklikleri 40 yılda %15 ve üzerinde artış gösterirken, güneybatı Karadeniz'de belirgin dalga

Şekil 5.10 (b1 ve b2)'den ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan maksimum dalga yüksekliğinin ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğiliminin, belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli değişim eğiliminde bulunan ile benzer uzamsal dağılım gösterdiği belirlenmiştir. ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen maksimum dalga yüksekliğinin uzun dönemli en yüksek pozitif değişim eğilimi 0.25 m iken, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilenin 0.12 m değeri ile ERA-Interim rüzgar girdileri göre göreceli olarak daha düşük pozitif eğilim gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 5.10 (c1 ve c2)'den ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen pik dalga periyodunun ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğiliminin kuzeydoğu Karadeniz'de pozitif eğilimde olduğu belirlenmiştir. Bu artış eğilimlerinin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 0.23 s ve 0.21 s değerleri ile birbirlerine oldukça yakın çıktığı tespit edilmiştir.

Benzer sonuçlar, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimini gösteren **Şekil 5.10** (d1 ve d2)'de de belirlenmiştir. En yüksek pozitif değişim eğiliminin kuzeydoğu Karadeniz'de olduğu ve bu artış eğilimlerinin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 0.18 s ve 0.20 s olduğu saptanmıştır. Her iki veri kaynağı için hem pik hem de ortalama dalga periyodu açısından batı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha az değişim eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Genel olarak dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamalarının değişim eğilimlerinin ERA-Interim rüzgar girdileriyle modelden elde edilen dalga daha belirgin olarak görüldüğü belirlenmiştir parametrelerinde (Şekil **5.10**a1–d1). Buna ERA-Interim rüzgar verilerinin, CFSR rüzgar verilerine göre dört kat daha ince çözünürlükte rüzgar verisine sahip olmasının bir sonucu olduğu düşünülmüştür. Diğer bir ifadeyle daha ince uzamsal çözünürlüğe sahip olan ERA-Interim rüzgar verileri, uzamsal olarak daha fazla ayrıntı vermeyi sağlamıştır. ERA-Interim rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0} , H_{maks} , T_{p} , T_{m}) uzun dönemli değişim eğilimi Karadeniz'in doğu ve batı bölgelerinde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Doğu Karadeniz daha fazla artış eğilimi ile daha fazla değişime maruz kalırken, batı Karadeniz doğuya kıyasla göreceli olarak daha az değişime maruz kalmıştır. Her iki rüzgar girdisiyle modelden elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0}, H_{maks}, T_p, T_m) uzun dönemli değişim eğilimlerinden, ERA-Interim verileriyle elde edilen sonuçlarda daha belirgin olarak, doğu Karadeniz'in 1979 yılından 2018 yılına periyotlarında dalga yüksekliği artışın daha yüksek doğru olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.10 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen H_{m0}, H_{maks}, T_p ve T_m dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

5.1.2 Yerel dalga iklimi

5.1.2.1 Yerel analizler

1979–2018 yılları için koşturulan MIKE 21 SW yazılımı ile elde edilen sonuçlar, ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR veri kaynakları için ayrı ayrı irdelenmiştir. Karadeniz dalga ikliminin belirlenmesi ve istatistiksel analizleri için ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri üç referans noktasında detaylı olarak irdelenmiştir (**Şekil 5.1**). Seçilen üç referans nokta, Karadeniz üzerindeki dalga ikliminde üç kritik durumu temsil etmektedir. Bunlar, güneybatı Karadeniz'de stabil ve enerjik dalga özelliklerini temsil eden N1 (30°E; 41.6°N), dalga ikliminin sakin ama uzun dönemli değişimin yüksek olduğu kuzeydoğu ve doğu Karadeniz'de yer alan sırasıyla N2 (37.6°E; 44.4°N) ve N3 (P3, 39.2°E; 42.3°N) olmuştur. Doğu Karadeniz'de belirlenen her iki konumda da dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğiliminin yüksek olmasına karşın, kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğiliminin artma, doğu Karadeniz'de (N3) ise azalma eğiliminde olduğu iki kritik durumu temsil etmektedir (**Şekil 5.7–Şekil 5.10**).

Seçilen üç referans noktası için dalga gülü **Şekil 5.11**'de, derin deniz belirgin dalga yüksekliğinin eklenik aşılma olasılığı dağılımı **Şekil 5.12**'de, belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu dağılımı **Şekil 5.13**'te, belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF ve CDF grafikleri **Şekil 5.14**'te her iki veri kaynağı için ayrı verilmiştir.

Şekil 5.11'de verilen dalga gülü incelendiğinde, her iki veri kaynağı için modelden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu ve hakim dalga yönünün; güneybatı Karadeniz'de (N1) NE, kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) WSW ve doğu Karadeniz'de (N3) NW olduğu belirlenmiştir. Kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) ERA-Interim verileri için ikincil hakim dalga yönünün NE iken, CFSR verileri için NNW ardından NE olduğu belirlenmiştir. İkincil hakim yönünün ERA-Interim verilerinden farklı olduğu benzer sonuç, CFSR verileri ile elde edilen rüzgar gülünde de belirlenmiştir (Bakınız Bölüm 3).

Karadeniz'e ait uzun dönem dalga istatistiğinin belirlenmesi amacıyla **Şekil 5.12**'de verilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak çizilmiştir. **Şekil 5.12**'de verilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı grafiklerinin hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçların benzer olduğu ve etkin dalga yönünün dalga gülünde belirlendiği gibi güneybatı Karadeniz'de (N1) NE olduğu ve bu yönü NNE ve N yönlerinin takip ettiği, kuzeydoğu Karadeniz'de etkin dalga yönünün WSW ve bu yönü NE ve NNW yönlerinin takip ettiği, doğu Karadeniz'de (N3) etkin dalga yönünün WNW olduğu bu yönü W ve NW yönlerinin takip ettiği belirlenmiştir.

Şekil 5.13, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğine karşılık çizilen ortalama dalga periyodu grafiğini göstermektedir. Seçilen üç konumda da CFSR verileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu sonuçlarının, ERA-Interim için elde edilen değerlerden biraz daha yüksek olduğu ve grafiklerin biraz daha fazla dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Batı Karadeniz'den (N1) doğu Karadeniz'e (N2 ve N3) doğru gidildikçe belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu parametrelerinin sınır değerlerinin azaldığı belirgin şekilde gözlenmektedir. Diğer bir ifadeyle batı Karadeniz, doğusun kıyasla daha büyük belirgin dalga yüksekliği ve daha uzun periyotlu dalgalar ile daha enerjik dalgalara maruz kalmaktadır.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF ve CDF grafikleri Şekil 5.14'te ve H_{m0} parametresinin temel istatistiksel parametreleri Tablo 5.5'te verilmiştir. Belirlenen üç konumdaki maksimum belirgin dalga yüksekliği değerleri farklı renk ve işaretleyiciler ile PDF ve CDF grafiklerinin üstünde gösterilmiştir. Şekil 5.14'te verilen belirgin dalga yüksekliği PDF ve CDF grafiklerinden, her iki veri kaynağı için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Batı-doğu değişkenliğin bir sonucu olarak batı Karadeniz'in (N1), doğu Karadeniz'e (N2 ve N3) kıyasla daha yüksek ortalama, mod ve maksimum belirgin dalga yüksekliğine sahip olduğu ve bu değerlerin CFSR verileri ile elde edilenlerin, ERA-Interim verileriyle edilenlerden biraz daha büyük olduğu saptanmıştır. Güneybatı Karadeniz'de yer alan N1'e ait PDF grafiğinin, güneydoğu Karadeniz'e yer alan N2 ve doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait PDF grafiklerinden daha geniş ve daha uzun kuyruklu olduğu, diğer bir ifadeyle güneydoğu Karadeniz'e yer alan N2 ve doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait CDF grafiğinin, güneybatı Karadeniz'de yer alan N1'e ait CDF grafiğinden daha dik ve kısa kuyruklu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, güneybatı Karadeniz'in, doğusuna kıyasla daha büyük dalga yüksekliğine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.11 Seçilen üç nokta için dalga gülü; (a) ERA-Interim, (b) CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.12 Seçilen üç nokta için derin deniz belirgin dalga yüksekliğin eklenik aşılma olasılığı. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.13 Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu dağılımı. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.14 Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç nokta için maksimum belirgin dalga yüksekliği değerini göstermektedir.

		nterim		CFSR				
H _{m0}	Min.	Ort.	Mod	Maks.	Min.	Ort.	Mod	Maks.
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
N1	0.03	1.15	0.80	11.20	0.04	1.19	0.70	11.67
N2	0.01	0.85	0.60	8.25	0.01	0.95	0.50	10.46
N3	0.01	0.84	0.60	8.20	0.02	1.00	0.60	10.91

Tablo 5.5 Seçilen üç nokta için H_{m0} parametresinin istatistiksel parametreleri

5.1.2.2 1979–2018 yılları için dalga parametreleri

Seçilen üç referans noktasında dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi ile araştırılmıştır. 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için yıllık ortalama; belirgin dalga yüksekliği ($H_{m0, ort}$), dalga yönü (θ), yıllık toplam fırtına süresi (t) ve yıllık maksimum belirgin dalga yüksekliği ($H_{m0, maks}$) parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi **Şekil 5.15**'te, 40 yıllık değişim eğilimi değerleri **Tablo 5.6**'da verilmiştir.

Bu çalışmada, dalga yüksekliğinin fırtına başlangıcı için eşik değer Beaufort rüzgar ölçeğine göre belirlenmiştir. Bu ölçeğe göre fırtına başlangıcı olarak eşik rüzgar hızının (13.9 m/s) aşılması durumunda dalga yüksekliği için eşik değer 4 m olmaktadır (Bakınız Bölüm 3). Dolayısıyla bu çalışmada 4 m'ye eşit ve büyük olan belirgin dalga yüksekliği, fırtına süresi için eşik değer olarak alınmıştır.

Seçilen üç referans noktasında da fırtına süresi (t) dışındaki dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimleri iki veri seti için de tutarlıdır. Fırtına süresinin (t) uzun dönemli değişim eğilimleri için iki veri seti arasındaki bu tutarsızlığa, modele girilen rüzgar girdileri arasındaki (6 saat zamansal çözünürlüğe sahip olan ERA-Interim ve 1saat zamansal çözünürlüğe sahip CFSR) farklı zamansal çözünürlüğün neden olduğu düşünülmüştür.

Doğu Karadeniz'de yer alan N3'te, CFSR verileri için ortalama dalga yönünün 40 yılda 16° değişimi oldukça dikkat çekicidir. Bu sonuç, 1979 yılından 2018 yılına doğru doğu Karadeniz'de ortalama dalga yönünün hafifçe kuzeye döndüğünü göstermektedir. Kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan N2'te, hem ERA-Interim hem de CFSR verileri için H_{mo, maks} değerlerinin 40 yılda %25 arttığını göstermektedir. Batı Karadeniz'de yer alan N1'de her iki veri seti için de ortalama dalga parametrelerinin 40 yılda çarpıcı bir değişime sahip olmadığı tespit edilmiştir (**Şekil 5.15, Tablo 5.6**).

Dalga parametrelerinin 1979–2018 yıllarındaki uzun dönemli değişim eğilimi sonuçlarından, batı Karadeniz'in doğusuna kıyasla daha stabil ve enerjik dalga koşullarına sahip olduğu, doğu ve kuzeydoğu Karadeniz'in batısına kıyasla daha fazla değişim eğilimine sahip dalgalara maruz kaldığı söylenebilmektedir.



Şekil 5.15 ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için değişim eğilimi; (a) $H_{mo, ort}$, (b) $H_{maks, ort}$, (c) $T_{m, ort}$, (d) θ (e) t. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

Tablo 5.6 ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen	dalga
parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri	

	H _{m0, ort}		H _{m0, maks}		T _{m, ort} (s)		θ	1	t
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	(°)	(m)	(%)
	ERA-Interim (1979–2018)								
N1	-0.031	-2.84	0.593	9.33	0.0078	0.213	-0.13	-5.24	-4.58
N2	0.094	12.42	1.240	24.91	0.0936	3.055	-5.71	23.44	86.26
N3	0.105	13.72	0.351	6.95	0.0780	2.272	-2.06	3.92	15.08
	CFSR (1979–2018)								
N1	-0.101	-8.73	0.636	8.83	-0.082	-2.124	-1.40	-18.91	-12.40
N2	0.031	3.04	1.455	23.39	0.098	2.951	1.93	16.35	18.16
N3	0.016	1.63	1.026	17.80	0.012	0.326	16.01	-0.73	-1.32

5.1.2.3 Ekstrem dalga iklimi

Ekstrem (en büyük) değer analizi her yılın en yüksek belirgin dalga yüksekliğinin dikkate alınmasıyla yapılmıştır. 1979–2018 yılları arasında 40 yıl olduğundan, ekstrem değer analizinde olay sayısı 40'tır. 1979–2018 yıllarını kapsayan iki farklı rüzgar girdisi ile MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer analizi, Bölüm 4'te rüzgar verilerinde olduğu gibi, GEV dağılımı kullanılarak irdelenmiştir. Seçilen üç referans noktası için belirgin dalga yüksekliğinin GEV dağılımları **Şekil 5.16**'da, farklı yineleme dönemlerine (10, 50, 100 yıl) karşılık gelen belirgin dalga yüksekliği değerleri ve CFSR verilerine göre hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ERA-Interim verilerine göre hesaplananlardan yüzde cinsinde değişim (RD, Rölatif Değişim) değerleri **Tablo 5.7**'de verilmiştir.

Güneybatı Karadeniz'de (N1), CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar girdisi ile modelde elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 11 m'ye ulaşırken, CFSR rüzgar girdilerinde 11 m'yi aştığı belirlenmiştir. CFSR verileri için modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ile hesaplanan ekstrem değerlerin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için sırasıyla %12, %9 ve %7 daha yüksek tahmin ettiği saptanmıştır (**Şekil 5.16, Tablo 5.7**).

Kuzeydoğu Karadeniz'de (N2), CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar girdisi ile elde edilen eğrinin biraz daha üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 8 m'yi, CFSR verilerinde ise 10 m'yi aştığı tespit edilmiştir. CFSR verileri ile 10, 50 ve 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin, ERA-Interim verilerine göre hesaplanandan %20 daha yüksek olduğu saptanmıştır (**Şekil 5.16, Tablo 5.7**).

Doğu Karadeniz'de (N3), ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrilerinin küçük yineleme dönemlerinde birbirine çok yakın olduğu, büyük yineleme dönemlerinde ise CFSR için elde edilen eğrinin ERA-Interim için elde edilen eğrinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 8 m'yi, CFSR verilerinde ise 11 m'yi aştığı belirlenmiştir. CFSR verileri ile 10, 50 ve 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin, ERA-Interim verilerine göre hesaplanandan sırasıyla %17, %27 ve %34 daha yüksek olduğu saptanmıştır (**Şekil 5.16, Tablo 5.7**).

Tablo 5.7 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerinekarşılık gelen ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri

		H _{m0}	(m)	RD (%)
	Yineleme Dönemi (Yıl)	ERA-Interim CFSR		$\left(\frac{H_{m0,CFSR} - H_{m0,ERA-Interim}}{H_{m0,ERA-Interim}}\right) * 100$
	10	8.45±0.42	9.45±0.40	11.89
N1	50	10.13 ± 1.00	10.99±0.85	8.50
	100	10.86±1.40	11.61±1.15	6.93
	10	7.13±0.28	8.77±0.35	22.95
N2	50	8.10±0.45	10.02±0.62	23.72
	100	8.43±0.56	10.47±0.80	24.25
	10	6.67±0.31	7.79±0.50	16.75
N3	50	7.87±0.69	10.02±1.63	27.22
	100	8.37±0.95	11.22±2.60	33.93



Şekil 5.16 Seçilen üç noktada; (a) N1, (b) N2, (c) N3, yıllık oluşma olasılıklarına göre belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer dağılımı

5.2 SWAN Sayısal Modelinin Kalibrasyonu

Karadeniz dalga ikliminin belirlenmesi amacıyla bu bölümde gerekli olan dalga parametreleri için SWAN yazılımı (versiyon 41.20) kullanılmıştır. SWAN sayısal modelinin kalibrasyonu için MIKE 21 SW sayısal modelinin kalibrasyonunda dikkate alınan istasyonlar kullanılmıştır (Bakınız Bölüm 5.1, **Tablo 5.1**). İstasyonlardaki dalga ölçümleri 1994 yılından 2018 yılına kadar kesintilerle uzanmakta ve kalibrasyon ve doğrulama için yeteri kadar ölçüm bulunmaktadır. Model kalibrasyonu için kullanılan ölçüm istasyonları, koordinatları, derinlik, ölçüm tarihleri ve ölçülen dalga parametreleri **Tablo 5.1**'de verilmiş ve istasyonların konumları **Şekil 5.1**'de gösterilmiştir. Kalibrasyon MIKE 21 SW yazılımında olduğu gibi ölçüm parametrelerine göre yapılmıştır. Gelendzhik, Hopa, Sinop, Karaburun ve Samsun istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve ortalama dalga periyodu (T_m) ölçümleri, Filyos ve İstanbul Boğazı istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve pik dalga periyodu (T_p) ölçümleri mevcut olduğundan, model sonuçları mevcut olan ölçüm parametreleri yardımıyla kalibre edilmiştir.

SWAN yazılımında öncelikle çalışma alanı tanımlanmalıdır. Çalışma alanı, düzenli ve dikdörtgen biçiminde bir hesaplamalı ağ alanı olarak tanımlanmıştır. Hesaplama alanı tüm Karadeniz çalışma alanını içerecek şekilde 26–42° E boylamlarını ve 40–47° N enlemlerini kapsamakta ve 0.05°x0.05° çözünürlüğe sahip olacak şekilde SWAN yazılımına tanıtılmıştır.

Çalışma alanı tanımlandıktan sonra, her SWAN dalga benzeşiminde girdi olarak kullanılacak batimetri ve rüzgar alanı tanımlanmalıdır. Karadeniz'e ait batimetri verileri, Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığının Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi başkanlığının ürettiği haritalar sayısallaştırılmış ve ölçeği 0.05°x0.05° çözünürlüğüne doğrusal entegrasyon yöntemi ile enterpole edilmiştir. Enlem ve boylamda 0.05° çözünürlüğe sahip olan batimetri verileri, Karadeniz çalışma alanında x ve y yönünde sırasıyla 360 ve 140 noktayı belirtmektedir. SWAN sayısal modelinde dikkate alınan Karadeniz batimetrisi **Şekil 5.17**'de ve batimetri ağının özellikleri **Tablo 5.8**'de verilmiştir. SWAN yazılımına girdi olarak tanımlanacak rüzgar verilerinden ECMWF ERA-Interim uzamsal olarak 0.25°x0.25°, zamansal olarak 6 saat çözünürlüktedir. Her iki veri tabanı için de 10 m yükseklikteki u ve v hız bileşenleri kullanılmıştır. Bu iki veri kaynağı için

1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık rüzgar verileri analiz edilerek, SWAN yazılımından elde edilen dalga parametreleri irdelenmiştir.



Şekil 5.17 Karadeniz çalışma alanı için batimetri ağı

	Çözünürlük	Eleman Sayısı
Karadeniz Batimetri Ağı	0.05°x0.05°	64800

SWAN yazılımında ayrıklaştırma için en düşük ve en yüksek frekans, SWAN (2017a ve 2017b)'de logaritmik ölçekte sırasıyla 1 ve 0.04 Hz. olarak önerilmektedir. Bu, benzeştirilen dalga periyodunun 1 ila 25 s arasında olduğu anlamına gelmektedir. SWAN yazılımı 3.4 GHz işlemcili ve 8 çekirdekli özelliklere sahip masaüstü bilgisayarına kurulmuştur.

Öncelikle, SWAN yazılımından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu verileri, ölçüm istasyonlarındaki belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile karşılaştırılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Daha sonra kalibre edilen ve doğrulanan SWAN yazılımı, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için 1 Ocak 1979 ve 31 Aralık 2018 (40 yıllık) arasındaki süre boyunca tüm Karadeniz'i kapsayacak şekilde koşturulmuştur. SWAN modeli çıktı verileri, tüm Karadeniz'i kapsayan bir saatlik çıktılara dayanan dalga parametreleri dizisini içermiştir. Son olarak, SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri kullanılarak 1979–2018 yılları için Karadeniz dalga iklimi belirlenmiştir.

Dalga modelinin doğruluğunda, kaynak terimlerinin belirlenmesi esastır. Bu çalışmada rüzgar girdisi, üçlü ve dörtlü dalga-dalga etkileşimi, köpüklenme, derinlik kaynaklı kırılma ve taban sürtünmesi olmak üzere 6 parametre dikkate alınmıştır. Girdi parametrelerinin fiziksel süreçleri için belirlenen seçimler aşağıda özetlenmiştir;

Rüzgar girdisi için hem doğrusal hem de üstel büyümeyi dikkate alınarak modele dahil edilmiştir. SWAN yazılımında doğrusal büyüme (Cavaleri ve Malanotte Rizzoli, 1981)'in ifadesi, üstel büyüme için (Komen vd., 1984)'ün ifadesi dikkate alınmıştır. Komen vd., (1984) ifadesi, Snyder vd., (1981) ifadesinin kayma hızı (u_{*}) cinsinden yeniden ölçeklendirilmiş halidir.

Lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi üçlü dalga-dalga etkileşimi (Eldeberky, 1996) Toplu Üçlü Yaklaşımı (LTA, Lumped Triad Approximation) ile dörtlü dalga-dalga etkileşimi (Hasselmann vd., 1985)'in Doğrudan Etkileşim Yaklaşımı (DIA, Discrete Interaction Approximation) ile model benzeşimlerinde aktif edilmiştir.

Enerji kaybı ifadeleri, köpüklenme için Jansen (1991) ifadesi, taban sürtünmesi için taban sürtünme katsayısını kullanan Hasselmann vd., (1973)'ün Jonswap ifadesi, derinlik kaynaklı kırılma için Battjes ve Janssen (1978)'in spektral ifadesi dikkate alınmıştır.

Diğer fiziksel süreçler için SWAN yazılımındaki ayarlar ve bunlarla ilgili tanımlı katsayılar kullanılmıştır. Modelin uygulanması için modele dahil olan mevcut fiziksel işlemlerin ifadeleri ve bunlarla ilişkili katsayıları: Jansen (1991)'in köpüklenme ifadesi için C_{ds} =4.5, Zijlema vd., (2012)'ye göre Jonswap taban sürtünmesi C_{JON} = 0.038 m²s⁻³, Battjes ve Janssen (1978)'e göre derinlik kaynaklı dalga kırılması α_{BJ} =1, γ_{BJ} =0.73, üçlü dalga-dalga etkileşimi için LTA yaklaşımı (Eldeberky, 1996), dörtlü dalga etkileşimi için DIA yaklaşımı (Hasselmann vd., 1985) λ =0.25, $C_{n/4}$ = 3x10⁷, C_{sh1} = 5.5, C_{sh2} =0.833, C_{sh3} =-1.25'dir. Yapılan çalışmalar modelin köpüklenme parametresine (C_{ds}) oldukça hassas olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kalibrasyon yukarıda seçilen ayarlar (taban sürtünmesi, derinlik kaynaklı dalga kırılması, üçlü ve dörtlü dalga-dalga etkileşimlerinin tanımlı değerleri) dikkate alınarak en uygun ayarlanabilir parametre (C_{ds}) değerinin bulunması amacıyla ERA-Interim ve CFSR verileri için ayrı araştırılmıştır (SWAN, 2017b).

SWAN yazılımı yardımıyla hesaplanan dalga parametreleri, Janssen (1991)'in köpüklenme ifadesi için delta=1 (Rogers, 2003) alınarak, ERA-Interim ve CFSR verileri için test edilmiştir. En iyi dalga parametre (belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu) tahminlerini elde edebilmek için (Janssen, 1991)'in köpüklenme formüldeki değiştirilebilir parametre C_{ds} için çeşitli değerler denenmiştir. Sonuçları, nicel olarak değerlendirmek amacıyla BIAS, ortalama karekök hatası (RMSE), dağılım indeksi (SI) ve korelasyon katsayısı (R) gibi istatistiksel hata ölçütleri kullanılmıştır. Benzeşimlerin doğruluğu ve SWAN sayısal modelinin performansı bu istatistiksel parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel parametrelere ait ifadeler Bölüm 5.1'de (Denklem 5.1–5.4) verilmiştir.

Kalibrasyon sürecinde, en iyi model ayarı (en düşük RMSE ve SI, en yüksek R, zaman serileri karşılaştırmasından dalga parametrelerinin en iyi tahmini) kalibre edilmiş SWAN ayarı olarak atanmıştır. Kalibrasyon, Gelendzhik ve Karaburun istasyonları için yapılmıştır. Gelendzhik istasyonu, kesintilerle beraber 2489 ölçüm verisini içermekte ve 01.01.2003-10.04.2003 (951 veri) ve 26.06.2003–06.12.2003 (1538 veri) tarihlerini kapsamaktadır. Karaburun istasyonu, kesintilerle 2954 dalga beraber verisini içermekte ve 29.12.2003-22.01.2004, 30.08.2003-10.10.2003, 27.03.2004-24.06.2004, 16.09.2004-17.12.2004 tarihlerini kapsamaktadır. Modelden elde edilen ve ölçülen dalga parametrelerinin saçılım diyagramları Gelendzhik ve Karaburun istasyonları için sırasıyla Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da, tarihçe karşılaştırmaları ise Gelendzhik ve Karaburun istasyonları için sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir. Tablo 5.9, SWAN yazılımından köpüklenme parametresi (C_{ds})'nin 1.0, 1.5 ve 2.0 olması için hesaplanan dalga parametreleri (H_s, T_m) ile Gelendzhik ve Karaburun istasyonlarında ölçülen dalga parametreleri (H_s, T_m) arasında yapılan istatistiksel hata parametrelerinin (BIAS, RMSE, SI ve R) sonuçlarını göstermektedir.

ERA-Interim rüzgar girdileri için modelden elde edilen ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu arasındaki en iyi uyum, köpüklenme parametresinin (C_{ds}) 0.5'e eşit olması durumu için elde edilmiştir. Gelendzhik ve Karaburun istasyonlarında ölçülen ve ERA-Interim rüzgar girdisi ile köpüklenme parametresinin 0.5'e eşit olması için modelden elde edilen dalga parametreleri arasında en düşük RMSE ve SI, en yüksek R değerleri ile birbirlerine çok yakın çıktığı tespit edilmiştir (**Şekil 5.18**, **Şekil 5.19** ve **Tablo 5.9**).

CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu arasındaki en iyi uyum, köpüklenme parametresinin (C_{ds}) 1.0'a eşit olması durumu için elde edilmiştir. Köpüklenme parametresinin (C_{ds}) 1.0'a eşit olması durumunda SWAN yazılımından elde edilen belirgin dalga yüksekliği, Gelendzhik ve Karaburun istasyonlarında ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerine, en düşük RMSE, oldukça düşük SI değerleri ve yüksek R değerleri ile birbirlerine çok yakın çıktığı belirlenmiştir.

Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması tatmin edici derecede iyi bulunmuştur (**Şekil 5.20**a, b ve **Şekil 5.21**a, b). Dalga periyodu için ise SWAN yazılımından elde edilen dalga periyodunun, ölçülen dalga periyodu değerlerinden biraz daha düşük olduğu, negatif BIAS değerlerinden anlaşılacağı gibi, belirlenmiştir (**Şekil 5.20**c, d ve **Şekil 5.21**c, d).



Şekil 5.18 Gelendzhik istasyonunda ölçülen ve SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodunun farklı C_{ds} parametreleri için karşılaştırması



Şekil 5.19 Karaburun istasyonunda ölçülen ve SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodunun farklı C_{ds} parametreleri için karşılaştırması



Şekil 5.20 Gelendzhik istasyonunda ölçülen ve (a, c) ERA-Interim, (b, d) CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodunun farklı C_{ds} parametreleri için tarihçe karşılaştırması



Şekil 5.21 Karaburun istasyonda ölçülen ve (a, c) ERA-Interim (b, d) CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodunun farklı C_{ds} parametreleri için tarihçe karşılaştırması

			Hs		T _m		
		ERA-Interim			ERA-Interim		
		$C_{ds}=0.5$	$C_{ds}=1.0$	$C_{ds}=1.5$	$C_{ds}=0.5$	$C_{ds}=1.0$	$C_{ds}=1.5$
	Ort.	0.6356	0.5284	0.4756	2.6273	2.5443	2.4932
Colondahik	BIAS	-0.0775	-0.1847	-0.2374	-0.8476	-0.9306	-0.9817
2003	SI	0.4528	0.5282	0.5879	0.2991	0.3250	0.3401
2003	RMSE	0.3229	0.3766	0.4192	1.0393	1.1294	1.1816
	R	0.8874	0.8920	0.8930	0.8442	0.8296	0.8239
	Ort.	0.8186	0.6911	0.6252	3.0893	3.0466	3.0014
Voroburun	BIAS	0.0349	-0.0926	-0.1584	-0.5979	-0.6405	-0.6857
	SI	0.3347	0.3617	0.4125	0.2144	0.2309	0.2442
2003-2004	RMSE	0.2623	0.2834	0.3233	0.7907	0.8514	0.9005
	R	0.9176	0.9161	0.9137	0.8463	0.8293	0.8215
			Hs			Tm	
			H _s CSFR			T _m CSFR	
		C _{ds} =0.5	H _s CSFR C _{ds} =1.0	C _{ds} =1.5	C _{ds} =0.5	T _m CSFR C _{ds} =1.0	C _{ds} =1.5
	Ort.	C_{ds}=0.5 0.8507	H _s CSFR C _{ds} =1.0 0.7133	C _{ds} =1.5 0.6441	C _{ds} =0.5 3.0046	T _m CSFR C _{ds} =1.0 2.9285	C _{ds} =1.5 2.8809
Gelendzhik	Ort. BIAS	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377	H _s CSFR Cds=1.0 0.7133 0.0002	C _{ds} =1.5 0.6441 -0.0689	C _{ds} =0.5 3.0046 -0.4703	Tm CSFR Cds=1.0 2.9285 -0.5464	Cds=1.5 2.8809 -0.5940
Gelendzhik 20003	Ort. BIAS SI	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377 0.5877	H _s CSFR Cds=1.0 0.7133 0.0002 0.5193	C _{ds} =1.5 0.6441 -0.0689 0.5188	C _{ds} =0.5 3.0046 -0.4703 0.2174	Tm CSFR Cds=1.0 2.9285 -0.5464 0.2392	C _{ds} =1.5 2.8809 -0.5940 0.2534
Gelendzhik 20003	Ort. BIAS SI RMSE	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191	H _s CSFR C _{ds} =1.0 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703	C _{ds} =1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699	Cds=0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554	Tm CSFR Cds=1.0 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310	C _{ds} =1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804
Gelendzhik 20003	Ort. BIAS SI RMSE R	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191 0.8540	H _s CSFR 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703 0.8484	Cds=1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699 0.8451	Cds=0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554 0.8559	Tm CSFR Cds=1.0 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310 0.8545	Cds=1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804 0.8514
Gelendzhik 20003	Ort. BIAS SI RMSE R Ort.	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191 0.8540 0.9667	H _s CSFR 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703 0.8484 0.8134	C _{ds} =1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699 0.8451 0.7325	C _{ds} =0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554 0.8559 3.5397	Tm CSFR 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310 0.8545 3.4956	C _{ds} =1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804 0.8514 3.4642
Gelendzhik 20003	Ort. BIAS SI RMSE R Ort. BIAS	Cds=0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191 0.8540 0.9667 0.1830	H _s CSFR 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703 0.8484 0.8134 0.0297	Cds=1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699 0.8451 0.7325 -0.0511	Cds=0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554 0.8559 3.5397 -0.1474	Tm CSFR 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310 0.8545 3.4956 -0.1915	C _{ds} =1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804 0.8514 3.4642 -0.2229
Gelendzhik 20003 Karaburun 2003-2004	Ort. BIAS SI RMSE R Ort. BIAS SI	C _{ds} =0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191 0.8540 0.9667 0.1830 0.3984	H _s CSFR 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703 0.8484 0.8134 0.0297 0.3262	Cds=1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699 0.8451 0.7325 -0.0511 0.3434	Cds=0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554 0.8559 3.5397 -0.1474 0.1428	Tm CSFR 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310 0.8545 3.4956 -0.1915 0.1593	Cds=1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804 0.8514 3.4642 -0.2229 0.1723
Gelendzhik 20003 Karaburun 2003-2004	Ort. BIAS SI RMSE R Ort. BIAS SI RMSE	Cds=0.5 0.8507 0.1377 0.5877 0.4191 0.8540 0.9667 0.1830 0.3984 0.3122	H _s CSFR 0.7133 0.0002 0.5193 0.3703 0.8484 0.8134 0.0297 0.3262 0.2556	Cds=1.5 0.6441 -0.0689 0.5188 0.3699 0.8451 0.7325 -0.0511 0.3434 0.2691	Cds=0.5 3.0046 -0.4703 0.2174 0.7554 0.8559 3.5397 -0.1474 0.1428 0.5266	Tm CSFR 2.9285 -0.5464 0.2392 0.8310 0.8545 3.4956 -0.1915 0.1593 0.5872	C _{ds} =1.5 2.8809 -0.5940 0.2534 0.8804 0.8514 3.4642 -0.2229 0.1723 0.6351

Tablo 5.9 SWAN yazılımıyla hesaplanan ve Gelendzhik ile Karaburun istasyonlarında ölçülen dalga parametrelerinin (H_s, T_m) farklı C_{ds} parametreleri için istatistiksel değerlendirmesi

Kalibre edilen SWAN ayarları, Gelendzhik (1996–2002), Hopa, Sinop, Filyos, Samsun, İstanbul Boğazı istasyonları için istasyonların ölçüm tarihleri boyunca çalıştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Kalibrasyon aşamasından en iyi dalga tahminleri, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için köpüklenme parametresinin (C_{ds}) sırasıyla 0.5 ve 1.0 değerleri için elde edildiğinden, SWAN sayısal modelinin doğrulanmasında bu köpüklenme parametre değerleri dikkate alınmıştır. Model performansını nicel olarak değerlendirmek için BIAS, RMSE, SI ve R istatistiksel parametreleri kullanılmış ve sonuçları **Tablo 5.10**'da verilmiştir.

SWAN yazılımı yardımıyla hesaplanan ve istasyonlarda (Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Samsun ve İstanbal Boğazı) ölçülen dalga parametreleri arasındaki saçılım grafikleri belirgin dalga yüksekliği için **Şekil 5.22**'de, dalga periyodu için

Şekil 5.23'te, tarihçe karşılaştırması belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu için sırasıyla **Şekil 5.24** ve **Şekil 5.25**'te verilmiştir.

Şekil 5.22 ve **Şekil 5.24**'ten, her iki ver kaynağı için modelden elde edilen ve tüm istasyonlarda ölçülen belirgin dalga yükseklerinin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.23 ve **Şekil 5.25**'ten, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga periyotlarının, ölçülen dalga periyotlarına göre biraz daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Ancak, belirgin dalga yüksekliği tüm ölçüm istasyonlarında oldukça iyi bir uyum içindedir. Daha önceki çalışmalarda, SWAN yazılımından elde edilen dalga periyotlarının ölçülenlere göre düşük tahmin ettiği sonucu belirlenmiştir (Lin ve diğ., 2002; Moeini ve Etemad-Shahidi, 2007, 2009). Lin vd., (2002) Chesapeake Körfezi'ndeki dalga benzeşimi için SWAN yazılımını kullanmış ve SWAN yazılımının, belirgin dalga yüksekliğini biraz daha yüksek, dalga periyodunu ise düşük tahmin ettiğini belirtmiştir. Ayrıca Moeini ve Shaidi (2007 ve 2009), SWAN modelinin belirgin dalga yüksekliği tahminindeki performansının, dalga periyodu tahminindeki performansından daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Değerlendirmeler, her iki rüzgar girdisiyle SWAN yazılımından tahmin edilen dalga parametrelerinin ölçümlerler ile tatmin edici derecede uyumlu olduğunu göstermiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen sonuçların birbirine çok yakın çıkması her iki rüzgar girdisiyle modelden elde edilen dalga verilerinin Karadeniz dalga ikliminin yeteri doğrulukta tahmin edilebileceği sonucuna ulaştırmıştır. Ayrıca SWAN sayısal modeli için yapılan kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarından, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri ile yapılan sonuçlarla da (Bakınız Bölüm 5.1) oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu analizlerden sonra, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleriyle yapıldığı gibi, SWAN yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli ortalamaları ve uzun dönemli değişim eğilimleri araştırılmış, seçilen referans noktalar için detaylı yerel analizler yapılmış ve belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem analizi incelenmiştir.



Şekil 5.22 Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonunda ölçülen belirgin dalga yüksekliğine karşılık SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği



Şekil 5.23 Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Samsun ve İstanbul Boğazı istasyonunda ölçülen dalga periyoduna karşılık SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga periyodu



Şekil 5.24 Belirgin dalga yüksekliğinin tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik,(b) Hopa, (c) Sinop, (d) Filyos, (e) Samsun, (f) İstanbul Boğazı



Şekil 5.25 Dalga periyodunun tarihçe karşılaştırması; (a) Gelendzhik, (b) Hopa, (c) Sinop, (d) Samsun, (e) Filyos, (f) İstanbul Boğazı

Tablo 5.10 SWAN yazılımıyla hesaplanan ve Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos, Samsun, İstanbul Boğazı istasyonlarında ölçülen dalga parametrelerinin istatistiksel değerlendirmesi

	ERA-Interim	CFSR	ERA Interim	CFSR					
	$C_{ds}=0.5$	$C_{ds}=1$	$C_{ds}=0.5$	$C_{ds}=1$					
	T _m	T _m	Hs	Hs					
	Gelendzhik İstasyonu (1996-2002)								
Ortalama	3.0391	3.3318	0.6372	0.6946					
BIAS	-0.4715	-0.1788	-0.0860	-0.0285					
SI	0.2301	0.2068	0.4646	0.4881					
RMSE	0.8079	0.7260	0.3360	0.3530					
R	0.8013	0.8123	0.8680	0.8471					
		Hopa İstasyonu							
Ortalama	3.7274	3.8074	0.4803	0.5088					
BIAS	-0.1686	-0.0886	-0.0792	-0.0508					
SI	0.2500	0.2230	0.6369	0.5349					
RMSE	0.9741	0.8688	0.3564	0.2993					
R	0.6217	0.7237	0.7322	0.8188					
		Sinop İstasyonu							
Ortalama	3.7298	4.0859	0.7841	0.8620					
BIAS	-0.2248	0.1313	-0.1343	-0.0563					
SI	0.1873	0.1841	0.4282	0.3409					
RMSE	0.7406	0.7282	0.3932	0.3131					
R	0.7549	0.7776	0.8206	0.8794					
		Samsun İstasyonu							
Ortalama	3.3293	3.7891	0.6362	0.6326					
BIAS	-1.0124	-0.5526	0.0317	0.0281					
SI	0.2822	0.2004	0.4475	0.3706					
RMSE	1.2252	0.8701	0.2705	0.2240					
R	0.7622	0.8077	0.8252	0.8844					
	Tp	Tp	Hs	Hs					
		Filyos İstasyonu							
Ortalama	5.1042	5.0796	0.5661	0.5548					
BIAS	-0.3597	-0.3843	-0.0537	-0.0650					
SI	0.1846	0.1823	0.5824	0.5331					
RMSE	1.0087	0.9963	0.3610	0.3304					
R	0.7046	0.7358	0.8026	0.8605					
İstanbul Boğazı İstasyonu									
Ortalama	4.9169	5.2248	0.8901	0.8462					
BIAS	0.0376	0.3456	0.1007	0.0569					
SI	0.2337	0.2547	0.3860	0.3464					
RMSE	1.1403	1.2428	0.3047	0.2734					
R	0.6780	0.6875	0.8974	0.9154					

5.2.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli araştırması

1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımından elde edilen dalga sonuç dosyalarından; belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), ortalama dalga periyotları (T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) parametrelerinin istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuç dosyası saatlik olduğundan her bir parametre, bir yıl için 8760 zaman adımına sahip olmuştur. MIKE 21 SW yazılımında olduğu gibi SWAN yazılımından elde edilen dalga parametreleri için de dalga parametrelerinin istatistiksel değerlendirilmesinde ortalama ve maksimum değerleri incelenmiştir.

Öncelikle ECMWF ERA-Interim rüzgar girdisi ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için yıllık ortalama ve yıllık maksimum değerleri tüm Karadeniz çalışma alanı (26–42° E; 47–40° N) için hesaplanmıştır. Daha sonra dalga parametrelerinin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli araştırmaları için 40 yıllık ortalamaları (**Şekil 5.26** ve **Şekil 5.27**) ve 40 yıllık değişim eğilimleri (**Şekil 5.28** ve **Şekil 5.29**) analiz edilmiştir. Aynı analizler NCEP/CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametreleri için de yapılmıştır (**Şekil 5.26–Şekil 5.29**). CFSR rüzgar girdileri için Karadeniz çalışma alanı, ERA-Interim rüzgar girdilerinden olduğu gibi, 26–42° E; 47–40° N sınırlarını kapsamaktadır. Dalga parametrelerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzun dönemli değişim eğiliminin saptanması için bu bölümde dalga parametrelerinin yalnızca 40 yıllık ortalamalar ve 40 yıllık değişim eğilimleri irdelenmiştir.

5.2.1.1 Dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları

<u>Yıllık maksimumların uzun dönemli ortalamaları</u>

SWAN yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, MATLAB yardımıyla hesaplanmıştır. Uzamsal dağılım grafiklerinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel maksimum hesaplaması her yıl için ayrı ayrı yapılmış ve sonuç olarak 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için 40 adet dosya oluşturulmuştur. Her biri 40 çıktıdan oluşan dalga parametreleri (H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0}) hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için ayrı ayrı
oluşturulmuştur. Elde edilen 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak, yıllık maksimumların 40 yıllık ortalaması hesaplanmış ve her bir dalga parametresini temsil eden tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.

Şekil 5.26'da sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimum değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.26 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin 0.64 m ile 5.77 m arasında değişirken, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin çok yakın olmakla beraber 0.64 m ile 6.30 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen maksimum belirgin dalga yüksekliğinin yüksek değerlerinin güney batı Karadeniz'de olduğu saptanmıştır. Değerlerin MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplananlara göre (ERA-Interim verilerinde 1.11 ile 7.22 m arasında değişirken CFSR verilerinde 1.21 ile 7.92 m arasında değişmesi ile) biraz daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.26 (b1 ve b2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu (T_{m01}) değerlerinin 3.13 s ile 8.15 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin biraz daha yüksek olarak 3.45 s ile 8.89 s arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama dalga periyodu değerlerinin MIKE 21 SW yazılımı yardımıyla hesaplanan değerlere göre (ERA-Interim verileri için 4.54 ile 9.32 s arasında değişirken CFSR verilerinde 5.17 ile 10.31 arasında değişmesi ile) biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.26 (c1 ve c2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu (T_{m02}) değerlerinin 2.55 s ile 7.41 s arasında iken CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin biraz daha yüksek olarak 2.87 s ile 8.30 s arasında değiştiği bulunmuştur.

Şekil 5.26 (d1 ve d2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga periyodu ($T_{m-1,0}$) değerlerinin 4.59 s ile 9.09 s arasında iken CFSR rüzgar

girdileri ile modelden elde edilen değerlerin biraz daha yüksek olarak 4.82 s ile 9.72 s arasında olduğu saptanmıştır.

Şekil 5.26 (b1–d1)'den, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga periyotların (T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) 40 yıllık ortalama maksimumlarının en yüksek değerleri güneybatı Karadeniz kıyılarında, düşük değerlerinin ise kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu belirlenmiştir. Karadeniz'in güneyinin, kuzeyine kıyasla daha uzun periyotlu dalgalara maruz kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.26 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0}
1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama maksimumlarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları

Yıllık ortalamaların uzun dönemli ortalamaları

Dalga parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, 40 yıllık ortalama maksimumlarda olduğu gibi, MATLAB yardımıyla hesaplanmıştır. Uzamsal dağılım grafiklerinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel ortalama hesaplaması her yıl için ayrı ayrı yapılmış ve sonuç olarak 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için 40 adet dosya oluşturulmuştur. Her biri 40 çıktıdan oluşan (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) dalga parametreleri hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Elde edilen 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak yıllık ortalamaların 40 yıllık ortalaması hesaplanmış ve her bir dalga parametresini temsil eden tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.

Şekil 5.27'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalama değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.27 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin 0.24 m ile 1.11 m arasında iken CFSR rüzgar girdileri modelden elde edilen değerlerin çok yakın olmakla beraber 0.24 m ile 1.14 m arasında değiştiği belirlenmiştir. **Şekil 5.27** (a1 ve a2)'den hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin batı Karadeniz'de, özellikle güneybatı Karadeniz'de, doğu Karadeniz'e kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Her iki veri kaynağı için SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin 40 yıllık ortalama değerlerinin, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan değerlere (ERA-Interim için 0.23 m ile 1.30 m arasında, CFSR verilerinde 0.24 ile 1.32 m arasında değişmesi ile) oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin yüksek değerlerinin, ERA-Interim verilerine göre doğu Karadeniz'e doğru biraz daha fazla dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan sonuçlarda da tespit edilmiş ve bu sonuca CFSR rüzgar verilerinin (0.5°x0.5°), ERA-Interim rüzgar verilerine (0.25°x0.5°) göre 4 kat daha kaba olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Bakınız Bölüm 5.1.1).

Şekil 5.27 (b1 ve b2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu (T_{m01}) değerlerinin 1.88 s ile 3.84 s arasında iken CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin biraz daha yüksek olarak 1.92 s ile 4.07 s arasında değiştiği belirlenmiştir. SWAN yazılımı ile hesaplanan ortalama dalga periyodu (T_{m01}) değerlerinin, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplananlara göre (ERA-Interim verileri için 2.68 ile 4.30 s arasında, CFSR verileri için 2.70 ile 4.51 s arasında değişmesi ile) biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir

Şekil 5.27 (c1 ve c2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu (T_{m02}) değerlerinin 1.65 s ile 3.43 s arasında, CFSR verileri ile modelden elde edilen değerlerin hemen hemen çok yakın olarak 1.68 s ile 3.64 s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.27 (d1 ve d2)'den ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin 2.34 s ile 4.40 s arasında değişirken CFSR rüzgar girdileri ile modelden edilen değerlerin biraz daha yüksek olarak 2.41 s ile 4.69 s arasında değiştiği saptanmıştır.

Şekil 5.27 (b1–d2)'den SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga periyodu (T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) değerlerinin uzamsal dağılım grafiklerinden CFSR ile elde edilen dalga periyotlarının, ERA-Interim ile elde edilenlerden biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir. CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga periyotlarının yüksek değerlerinin doğu Karadeniz'e doğru daha fazla dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyotlarının yüksek değerlerinin güneybatı Karadeniz'de olduğu, özellikle Karadeniz'in güneyinin kuzeyine kıyasla daha uzun periyotlu dalgalara maruz kaldığı, Kuzeybatı Karadeniz'in ise havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha düşük periyotlu dalgalara sahip olduğu belirlenmiştir. Dolaysıyla güneybatı Karadeniz, doğusuna kıyasla daha büyük

dalga yüksekli ve daha uzun periyotlu dalgalara maruz kaldığı söylenebilmektedir.



Şekil 5.27 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0} 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

5.2.1.2 Dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi

Bölüm 5.2.1.1'de verilen 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık dalga parametrelerinin ortalama değişim eğilimi, en iyi uyum çizgisi kullanılarak doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu yöntemde saçılmış veri noktaları arasındaki ilişkiyi en iyi ifade eden doğrunun denklemi belirlenmektedir. Bu hesaplama için öncelikle dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) 1979 yılından 2018 yılına kadar olan 40 yıl için yıllık ortalama ve yıllık maksimum değerleri belirlenmiştir (40 yıl için 40 değer). Dalga parametrelerinin 1979

yılından 2018 yılına doğru değişim eğilimini ifade eden doğrunun denklemi MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirlenen doğrunun denklemi kullanılarak her bir dalga parametresi için 2018 yılı için hesaplanan değerden, 1979 yılı için hesaplanan değer çıkarılmış ve 40 yıldaki toplam değişim belirlenmiştir. Bu işlem tüm Karadeniz çalışma alanı için bir MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmış ve 40 yıllık değişimi gösteren tek bir uzamsal dağılım elde edilmiştir.

Uzun dönemli değişim eğilimi ERA-Interim ve CFSR verileri için SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Uzun dönemli ortalamalarda olduğu gibi 1979–2018 yıllarına ait dalga parametrelerinin hem maksimum hem de ortalama değerlerinin değişim eğilimi araştırılmıştır. **Şekil 5.28** ve **Şekil 5.29**, dalga parametrelerinin (ΔH_{m0} , ΔT_{m01} , ΔT_{m02} ve $\Delta T_{m-1,0}$) sırasıyla maksimum ve ortalama değerlerinin 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanındaki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Maksimum dalga parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi

Şekil 5.28'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR verileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) maksimum değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.28 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için en büyük pozitif değişim eğiliminin her iki veri kaynağı için de yaklaşık olarak 0.65 m değeri ile kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.28 (b1 ve b2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun (T_{m01}) en yüksek pozitif değişim eğilimi değerinin 0.73 s, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin ise 0.56 s ile kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu tespit edilmiştir. Ortalama dalga periyodunun batı Karadeniz'de azalma eğiliminde olduğu ve bu değişimin CFSR verilerinde, ERA-Interim verilerine göre daha yüksek negatif değişim eğiliminde olduğu belirlenmiştir. **Şekil 5.28** (c1 ve c2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun (T_{m02}) en yüksek pozitif değişim eğilimi değerinin 0.68 s, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin çok yakın olmakla beraber 0.64 s ile kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu belirlenmiştir. Ortalama dalga periyodunun batı Karadeniz'de azalma eğiliminde olduğu ve bu negatif değişim eğilimi değerlerinin CFSR verilerinde, ERA-Interim verilerinden daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.28 (d1 ve d2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun en yüksek pozitif değişim eğilimi değerinin 0.76 s, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin ise 0.58 s ile kuzeybatı Karadeniz kıyılarında olduğu saptanmıştır. Ortalama dalga periyodunun batı Karadeniz'de azalma eğiliminde olduğu ve bu değişimin CFSR verilerinde, ERA-Interim verilerine göre daha yüksek negatif değişim eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.28 (a1 ve d2)'den ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) maksimum değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimi değerlerinin, her iki veri tabanı için de birbirlerine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, SWAN yazılımının her iki veri kaynağı için de dalga parametrelerinin maksimum değerlerini tahmin etme performansının birbirine yakın olduğunu göstermiştir.

Hem ERA-Interim ve hem de CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} ve T_m) maksimum değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimi değerlerinin, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan değerlerden biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.28 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0}, T_{m01}, T_{m02} ve T_{m-1,0} maksimum değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

Ortalama dalga parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi

Şekil 5.29'da sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) ortalama değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.29 (a1 ve a2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin en yüksek pozitif değişim eğilimi değerinin 0.11 m, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerin ise 0.05 m ile kuzeydoğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Özellikle ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değişim eğiliminin Karadeniz'i batı ve doğu olmak üzere ikiye böldüğü açıkça görülmektedir (**Şekil 5.29**a). Benzer sonuç ERA-Interim rüzgar verileri kullanılarak yapılan rüzgar iklim analizlerinde de belirlenmiştir (Bakınız Bölüm 3). Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin doğu Karadeniz'de, batı Karadeniz'e kıyasla daha fazla değişme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli değişim eğilimi değerinin (ERA-Interim verilerinde 0.13 m, CFSR verilerinde 0.06 m), SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli değişim eğilimi değerine çok yakın ve benzer eğilimde olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.29 (b1 ve b2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodu (T_{m01}) için değişim eğilimi değerlerinin 0.16 s ile -0.06 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden edilen değerlerin çok yakın olmakla beraber 0.19 s ile -0.20 s arasında değiştiği saptanmıştır. MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan ortalama dalga periyodunun uzun dönemli değişim eğilimi değerinin (ERA-Interim verilerinde 0.13 s ile -0.07 s, CFSR verilerinde 0.21 s ile -0.15 s), SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga periyodunun uzun dönemli değişim eğilimi değerine çok benzer olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.29 (c1 ve c2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun (T_{m02}) uzun dönemli değişim eğilimi değerlerinin 0.15 s ile -0.05 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin 0.18 s ile -0.22 s arasında değiştiği bulunmuştur.

Şekil 5.29 (d1 ve d2)'den, ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga periyodunun ($T_{m-1,0}$) uzun dönemli değişim eğilimi değerlerinin 0.18 s ile -0.07 s arasında, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen değerlerin 0.16 ile -0.16 s arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Şekil 5.29 (b1–d2)'den, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga periyotlarının (T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$) ortalama değerlerinin uzun dönemli değişiminin uzamsal dağılım grafiklerinden her iki veri tabanı için de batı Karadeniz'in, doğu Karadeniz'e kıyasla daha az değişim eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Her iki veri tabanı için de dalga periyotlarının kuzeybatı Karadeniz kıyılarında artan eğilime sahip olduğu tespit edilmiştir. ERA-Interim rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimi (**Şekil 5.29**a1–d1) Karadeniz'i doğu ve batı olarak ikiye böldüğü açıkça gözlenmiştir. Doğu Karadeniz, batı Karadeniz'e kıyasla daha fazla değişime maruz kalırken, batı Karadeniz doğu Karadeniz'e göre daha az değişime maruz kalınştır. CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametreleri sonuçlarında kuzeybatı Karadeniz kıyılarında dalga periyotlarının azalma eğiliminde olduğu belirlenirken, ERA-Interim verilerinde değişim eğiliminin sıfıra oldukça yakın olarak stabil kaldığı belirlenmiştir. Bu farklı sonucun, iki rüzgar veri kaynağı arasındaki uzamsal ve zamansal çözünürlük farkının bir sonucu olabileceği düşünülmüştür.

Hem ERA-Interim ve hem de CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} ve T_m) ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimlerinin, MIKE 21 SW yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin (H_{m0} ve T_m) değişim eğilimlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için iki farklı üçüncü nesil spektral dalga (MIKE 21 SW ve SWAN) modelleri ile elde edilen H_{m0} ve T_m dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin uzun dönemli değişim eğilimlerini çok benzer olması sonuçların güvenirliliğini de artırmıştır. İki farklı rüzgar girdi kaynakları ile MIKE 21 SW ve SWAN yazılımları ile hesaplanan dalga parametrelerinin uzamsal dağılımında bazı küçük uyumsuzlukları olsa da genel eğilim, her iki modelden elde edilen dalga parametreleri için benzer çıkmıştır.

Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri kullanılarak MIKE 21 SW ve SWAN yazılımları ile hesaplanan dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimlerine bağlı olarak batı Karadeniz'in, doğu Karadeniz'e kıyasla daha az değişim eğiliminde olduğu söylenebilmektedir. ERA-Interim rüzgar girdileri ile hem SWAN hem de MIKE 21 SW yazılımları ile hesaplanan dalga parametreleri doğu ve batı Karadeniz arasındaki farklılıkları belirgin olarak ortaya çıkarmıştır. Uzamsal olarak daha kaba çözünürlükte rüzgar girdisine sahip olan CFSR verileri ile modellerden elde edilen dalga parametreleri, ERA-Interim'in sonuçlarındaki kadar ayrıntı verememiştir. Bu sonuç modele girdi olarak tanımlanan rüzgar veri kaynaklarının uzamsal çözünürlüğünün önemini ortaya koymuştur.



Şekil 5.29 (a1–d1) ERA-Interim ve (a2–d2) CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametrelerinin H_{m0} , T_{m01} , T_{m02} ve $T_{m-1,0}$ ortalama değerlerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık değişim eğiliminin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı

5.2.2 Yerel dalga iklimi

5.2.2.1 Yerel analizler

Deprem esnasında dolgu malzemesinin serildiği kabul edilmiştir. 1979–2018 yılları için ECMWF ERA-Interim ve NCEP/CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı ile hesaplanan sonuçlar iki veri kaynağı için ayrı ayrı irdelenmiştir. Karadeniz dalga ikliminin belirlenmesi ve dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimlerinin tespit edilmesi için üç referans noktası seçilmiştir (**Şekil 5.1**). Seçilen üç referans nokta, Karadeniz üzerindeki dalga ikliminde üç kritik durumu temsil etmektedir. Bunlar, güneybatı Karadeniz'de stabil ve enerjik dalga özelliklerini temsil eden N1 (30°E; 41.6°N), dalga iklimimin sakin ama uzun dönemli değişimin yüksek olduğu kuzeydoğu ve doğu Karadeniz'de yer alan sırasıyla N2 (37.6°E; 44.4°N) ve N3 (P3, 39.2°E; 42.3°N) olmuştur. Doğu Karadeniz'de belirlenen her iki konumda da dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğiliminin yüksek olmasına karşın, kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğiliminin artma, doğu Karadeniz'de (N3) ise azalma eğiliminde olduğu iki kritik durumu temsil etmektedir (**Şekil 5.26–Şekil 5.29**).

Seçilen üç referans noktası için dalga gülü **Şekil 5.30**'da, derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı dağılımı **Şekil 5.31**'de, belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu dağılımı **Şekil 5.32**'de, belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF ve CDF grafikleri **Şekil 5.33**'te her iki veri kaynağı için ayrı ayrı verilmiştir.

Şekil 5.30'da verilen dalga gülü incelendiğinde, her iki veri kaynağı için modelden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu ve hakim dalga yönünün; güneybatı Karadeniz'de (N1) NE, kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) SSW ve doğu Karadeniz'de (N3) NW olduğu belirlenmiştir. Kuzeydoğu Karadeniz'de (N2) ERA-Interim verileri için ikincil hakim dalga yönünün NE iken, CFSR verileri için WSW ardından NE olduğu belirlenmiştir. İkincil hakim yönünün ERA-Interim ve CFSR verilerinden farklı olduğu sonucu, iki veri kaynağı için elde edilen rüzgar gülünde de belirlenmiştir (Bakınız Bölüm 3).

Karadeniz'e ait uzun dönem dalga istatistiğinin belirlenmesi amacıyla **Şekil 5.31**'de verilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak çizilmiştir. **Şekil 5.31**'de verilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı grafiklerinin hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçların benzer olduğu ve hakim dalga yönünün dalga gülünde belirlendiği gibi güneybatı Karadeniz'de (N1) NE olduğu ve bu yönü ENE ve N yönlerinin takip ettiği, kuzeydoğu Karadeniz'de hakim dalga yönünün SSW ve bu yönü NE ve WNW yönlerinin

takip ettiği, doğu Karadeniz'de (N3) hakim dalga yönünün NNW olduğu bu yönü N yönünün takip ettiği belirlenmiştir.

Şekil 5.32, belirgin dalga yüksekliğine karşılık çizilen ortalama dalga periyodunun ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle elde edilen sonuçlarını göstermektedir. **Şekil 5.32**'den, belirgin dalga yüksekliğine karşılık çizilen ortalama dalga periyodunun seçilen üç konum için de CFSR verileri ile elde edilen belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu sonuçlarının, ERA-Interim verileri ile elde edilen sonuçlardan biraz daha yüksek olduğu ve CFSR verileri için elde edilen grafiklerin daha fazla dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Batı Karadeniz'den (N1) doğu Karadeniz'e (N2 ve N3) doğru gidildikçe belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu parametrelerinin sınır değerlerinin azaldığı açıkça gözlenmektedir. Diğer bir ifadeyle güneybatı Karadeniz, daha büyük belirgin dalga yüksekliğine ve daha uzun periyotlu dalgaları ile daha enerjik dalgalara maruz kalırken, doğu Karadeniz daha küçük dalga yüksekliğine ve daha kısa periyotlu dalgaları ile daha az enerjik dalgalara maruz kalınktadır.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF ve CDF grafikleri **Şekil 5.33**'te ve H_{m0} parametresinin temel istatistiksel parametreleri **Tablo 5.11**'de verilmiştir. Belirlenen üç konum için belirgin dalga yüksekliğinin maksimum değerleri farklı renk ve işaretleyiciler ile PDF ve CDF grafiklerinin üzerinde gösterilmiştir. **Şekil 5.33**'te üç referans konum için verilen belirgin dalga yüksekliğine ait PDF ve CDF grafiklerinin, her iki veri kaynağı için de benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Batı-doğu değişkenliğin bir sonucu olarak batı Karadeniz'in (N1), doğu Karadeniz'e (N2 ve N3) kıyasla daha yüksek ortalama, mod ve maksimum belirgin dalga yüksekliğine sahip olduğu ve bu değerlerin CFSR verileri ile için ERA-Interim verileriyle edilenlerden biraz daha büyük olduğu saptanmıştır. Güneybatı Karadeniz'de yer alan N1'e ait PDF grafiğinin, kuzeydoğu Karadeniz'e yer alan N2 ve doğu Karadeniz'de yer alan N3'e ait PDF grafiklerinden daha geniş ve daha uzun kuyruklu olması güneybatı Karadeniz'in, doğusuna kıyasla daha büyük dalga yüksekliğine sahip olduğunu göstermektedir (**Tablo 5.11**).



Şekil 5.30 Seçilen üç nokta için dalga gülü; (a) ERA-Interim, (b) CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.31 Seçilen üç noktada için derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.32 Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodu dağılımı. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 5.33 Seçilen üç nokta için belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli (a, b) PDF, (c, d) CDF grafikleri. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen sonuçları göstermektedir. Üçgen, elmas ve yıldız işaretçileri sırasıyla seçilen üç nokta için maksimum belirgin dalga yüksekliği değerini göstermektedir.

		ERA-l	Interim		CFSR			
ч	Min.	Ort.	Mod	Maks.	Min.	Ort.	Mod	Maks.
11m0	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
N1	0.027	1.07	0.7	10.56	0.061	1.11	0.7	11.50
N2	0.015	0.81	0.6	8.29	0.016	0.89	0.4	9.88
N3	0.014	0.79	0.5	7.92	0.021	0.92	0.5	9.73

Tablo 5.11 Seçilen üç nokta için H_{m0} parametresinin istatistiksel parametreleri

5.2.2.2 1979–2018 yılları için dalga parametreleri

Seçilen üç referans noktasında dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon ile araştırılmıştır. 1979–2018 yılları arasındaki her yıl için yıllık ortalama; belirgin dalga yüksekliği ($H_{m0, ort}$), dalga yönü (θ), yıllık toplam fırtına süresi (t) ve yıllık maksimum belirgin dalga yüksekliği ($H_{m0, maks}$) parametrelerinin 40 yıllık değişim eğilimi **Şekil 5.34**'te, 40 yıllık değişim eğilimi değerleri **Tablo 5.12**'de verilmiştir.

Bu çalışmada, dalga yüksekliğinin fırtına başlangıcı için eşik değer Beaufort rüzgar ölçeğine göre belirlenmiştir. Bu ölçeğe göre fırtına başlangıcı olarak eşik rüzgar hızının (13.9 m/s) aşılması durumunda dalga yüksekliği için eşik değer 4 m olmaktadır (Bakınız Bölüm 3). Dolayısıyla bu çalışmada 4 m'ye eşit ve büyük olan belirgin dalga yüksekliği, fırtına süresi için eşik değer olarak alınmıştır.

Seçilen üç referans noktasında da $H_{m0, ort}$, $H_{m0, maks}$ ve $T_{m0, ort}$ parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimleri iki veri seti için de tutarlıdır. Ancak fırtına süresinin (t) uzun dönemli değişim eğilimleri için iki veri seti arasında bazı uyumsuzluklar bulunmuştur. İki veri seti arasındaki bu tutarsızlığa, modele girilen ERA-Interim (6 saat zamansal çözünürlüklü) ve CFSR (1 saat zamansal çözünürlüklü) rüzgar verileri arasındaki farklı zamansal çözünürlüğün neden olduğu düşünülmüştür (**Tablo 5.12**).

Doğu ve kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan N3 ve N2 için dalga yönünün 40 yıldaki değişimi oldukça dikkat çekicidir. Kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan N2'de, CFSR verileri için ortalama dalga yönünün 40 yılda 29.63°, ERA-Interim verileri için 3.37° değiştiği saptanmıştır. Bu sonuç kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan N2'deki dalga yönünün batıya doğru kaydığını göstermektedir. Doğu Karadeniz'de yer alan N3'te, dalga yönü ERA-Interim ve CFSR verileri için sırasıyla 3.63° ve 13.03° değiştiği belirlenmiştir. Kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan N3'teki bu değişimin, her iki veri seti için dalga yönünün hafifçe kuzeye döndüğünü göstermektedir. Güneybatı Karadeniz'de yer alan N1'de, her iki veri seti için de dalga yönünün 40 yılda nerdeyse hiç değişmediği, stabil kaldığı belirlenmiştir (**Tablo 5.12**).



Şekil 5.34 ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için değişim eğilimi; (a) $H_{mo, ort}$, (b) $H_{maks, ort}$, (c) $T_{m, ort}$, (d) θ (e) t. 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir

Tablo 5.12	ERA-Interim ve	CFSR rüzga	r girdileri ile	modelden	elde edilen	dalga
	parametrelerini	n uzun döne	emli değişim	eğilim değ	erleri	

	H _{m0, ort}		H_{m0}	I _{m0, maks} T _{m,}		_t (s)	θ		t
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	ൗ	(m)	(%)
	ERA-Interim (1979–2018)								
N1	-0.026	-2.37	0.38	5.62	-0.0003	-0.01	0.74	8.86	19.28
N2	0.101	13.11	0.75	14.76	0.180	5.8	3.37	10.79	29.10
N3	0.123	16.15	-0.33	-5.54	0.158	4.78	3.63	-5.32	-48.10
	CFSR (1979–2018)								
N1	-0.107	-8.89	0.49	6.47	-0.115	-3.05	1.70	-7.69	-9.41
N2	0.021	2.31	0.58	9.38	0.131	3.95	29.63	1.61	4.70
N3	0.016	1.80	0.06	0.79	0.037	1.02	13.03	-8.64	-39.79

5.2.2.3 Ekstrem dalga iklimi

Ekstrem (en büyük) değer analizi her yılın en yüksek belirgin dalga yüksekliğinin dikkate alınmasıyla yapılmıştır. 1979–2018 yılları arasında 40 yıl olduğundan, ekstrem değer analizinde olay sayısı 40 olmuştur. 1979–2018 yıllarını kapsayan iki farklı rüzgar girdisi ile SWAN yazılımı ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer analizi Bölüm 4'te ve Bölüm 5.1.2.3'te olduğu gibi GEV dağılımı kullanılarak irdelenmiştir. Seçilen üç referans noktası için belirgin dalga yüksekliğinin GEV dağılımları **Şekil 5.35**'te farklı yineleme dönemlerine (10, 50, 100 yıl) karşılık gelen belirgin dalga yüksekliği değerleri ve bu belirgin dalga yüksekliklerinin ERA-Interim verilerine göre CFSR verilerinden yüzde cinsinde değişim RD değerleri **Tablo 5.13**'te verilmiştir.

Güneybatı Karadeniz'de (N1), CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin, tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar girdisi ile modelde elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 10 m'yi, CFSR verilerinde ise 11 m'yi aştığı saptanmıştır. CFSR verileriyle modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ile 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için hesaplanan ekstrem değerlerin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan sırasıyla %14, %15 ve %16 daha yüksek tahmin ettiği tespit edilmiştir (**Tablo 5.13, Şekil 5.35**a).

Kuzeydoğu Karadeniz'de (N2), CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin, tüm yineleme dönemleri için ERA-Interim rüzgar girdisi ile elde edilen eğrinin biraz daha üzerinde olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 8 m'yi aştığı, CFSR verilerinde ise 9.6 m'ye ulaştığı tespit edilmiştir. CFSR verileri ile 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin, ERA-Interim verilerine göre hesaplanandan %16 daha yüksek olduğu saptanmıştır (**Tablo 5.13, Şekil 5.35**b). Doğu Karadeniz'de (N3), CFSR rüzgar girdisiyle modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin küçük yineleme dönemlerinde ERA-Interim için elde edilen eğrinin üzerinde olduğu bulunurken, büyük yineleme dönemlerinde birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğinin ERA-Interim verilerinde 8.2 m'ye CFSR verilerinde 10.5 m'ye ulaştığı tespit edilmiştir. CFSR verileriyle modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ile 10, 50 ve 100 yıl yineleme dönemleri için hesaplanan ekstrem değerlerin, ERA-Interim verileri ile hesaplananlardan sırasıyla %24, %27 ve %28 daha yüksek tahmin ettiği saptanmıştır (**Tablo 5.13, Şekil 5.35**c).

Tablo 5.13 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemlerinekarşılık gelen ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri

		H _{m0}	(m)	RD (%)		
	Yineleme			$\left(\frac{H_{m0,CFSR} - H_{m0,ERA-Interim}}{100}\right) * 100$		
	Dönemi	ERA-Interim	CFSR	$(H_{m0,ERA-Interim})^{+100}$		
	(Yıl)					
	10	8.55±0.33	9.72±0.0.39	13.76		
N1	50	9.75±0.62	11.22 ± 0.82	15.09		
	100	10.20 ± 0.81	11.82±0.99	15.80		
	10	7.04±0.26	8.17±0.30	16.08		
N2	50	7.96±0.44	9.24±0.53	16.12		
	100	8.28±0.56	9.62±0.67	16.23		
N3	10	7.02±0.23	8.76±0.33	24.93		
	50	7.86±0.41	9.99±0.65	27.12		
	100	8.17±0.53	10.47±0.86	28.22		



Şekil 5.35 Seçilen üç noktada; (a) N1, (b) N2, (c) N3, yıllık oluşma olasılıklarına göre belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer dağılımı

5.3 Dalga Gücü Değerlendirmesi

MIKE 21 SW ve SWAN yazılımları ile hesaplanan dalga parametrelerin Karadeniz çalışma alanı üzerinde hem uzamsal dağılımları hem de dalga parametrelerinin değerleri birbirine yakın sonuçlar verdiği için bu bölümde yapılan dalga gücü araştırmalarında SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri (H_{m0}, T_{m-1,0}) kullanılmıştır. Değerlendirmeler, hem ERA-Inerim hem de CFSR rüzgar girdileri için 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için gerçekleştirilmiştir. Dalga gücü aşağıda verilen ifadeye göre hesaplanmıştır (Rusu ve Onea, 2016; Islek ve Yuksel, 2021):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\Pi} H_s^2 T_e \tag{5.5}$$

burada P dalga gücü, H_s (H_{m0}) belirgin dalga yüksekliği, T_e ($T_{m-1,0}$) enerji periyodu, ρ Karadeniz'in özgül kütlesini ($\approx 1015 \text{ kg/m}^3$) ve *g* yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Denklem (5.6), sadeleştirilirse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$P = 0.486H_s^2 T_e (5.6)$$

Denklem (5.6)'dan dalga gücünün, dalga enerji periyoduna ve belirgin dalga yüksekliğine bağlı olduğu ve belirgin dalga yüksekliğinin karesi ile ilişikli olduğundan belirgin dalga yüksekliğindeki değişimlere daha hassas olduğu görülmektedir.

5.3.1 Dalga gücünün uzun dönemli ortalamaları

Dalga gücü hesaplamasında gerekli olan dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği H_{m0} , ve enerji periyodu $T_{m-1,0}$) kalibre edilen ve doğrulanan SWAN yazılımı yardımıyla üretilmiş ve uzun dönemli ortalamalar MATLAB yardımıyla hesaplanmıştır. Dalga gücüne ait uzamsal dağılım grafiklerinin belirlenmesinde yapılan istatistiksel maksimum ve ortalama hesaplaması için öncelikle her yılın dalga gücü Denklem (5.6) ifadesi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıl için tüm zaman serisinden oluşan 40 adet dosya oluşturulmuştur.

<u>Yıllık maksimumların 40 yıllık ortalamaları</u> için 1979–2018 yılları arasındaki her bir yılın önce yıllık maksimumu belirlenmiş ve daha sonra 40 yılı temsil eden 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak dalga gücünün yıllık maksimumların 40 yıllık ortalaması (P_{maks}) hesaplanmıştır. <u>Uzun dönemli ortalamalar</u> için yıllık maksimumların 40 yıllık ortalamalarında olduğu gibi, 1979–2018 yılları arasındaki her bir yılın önce yıllık ortalaması hesaplanmış ve daha sonra 40 yılı temsil eden 40 dosyanın aritmetik ortalaması alınarak dalga gücünün uzun dönemli ortalaması (P_m) hesaplanmıştır.

Şekil 5.36'da sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan dalga gücünün 40 yıllık ortalama maksimum ve 40 yıllık ortalama değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.36 (a ve b)'den, batı Karadeniz'in doğusuna kıyasla daha yüksek dalga gücüne sahip olduğu açıkça gözlenmektedir. Güneybatı Karadeniz'de, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan ortalama dalga gücü değerlerinin sırasıyla 5.17 kW/m ve 5.64 kW/m değerlerine ulaştığı, doğu Karadeniz'de bu değerlerin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 1.05 kW/m ve 1.33 kW/m'ye düştüğü belirlenmiştir. Genel olarak, batı Karadeniz'in, özellikle güneybatı Karadeniz'in, havzanın diğer kısımlarıyla karşılaştırıldığına daha yüksek dalga gücü potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.36 (c ve d), 40 yıllık ortalama maksimum dalga gücü değerlerinin batı Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğunu ve yüksek değerlerin özellikle güneybatı Karadeniz'de yoğunlaştığını göstermektedir. Maksimum dalga gücü değerlerinin güneybatı Karadeniz'de ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 146.16 kW/m ve 185.08 kW/m değerlerine ulaştığı, doğu Karadeniz'de ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 40 kW/m ve 52 kW/m değerlerine düştüğü belirlenmiştir.

ERA-Interim rüzgar girdileri için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücünün hem ortalama hem de maksimumların uzamsal dağılımlarının CFSR rüzgar girdileri ile elde edilenlere benzer olmasına karşın, değerlerin CFSR rüzgar girdileri ile elde edilenlerden biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar hem MIKE 21 SW hem de SWAN yazılımları ile hesaplanan dalga parametreleri için de belirlenmiş ve bu sonuca rüzgar girdileri arasındaki farklı uzamsal ve zamansal çözünürlüğün etkisi olabileceği belirtilmiştir (Bakınız Bölüm 5.1.1 ve 5.2.1).



Şekil 5.36 1979–2018 yılları için hesaplanan (a, b) ortalama ve (c, d) maksimum dalga gücünün Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı. Sol ve sağ paneller sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle SWAN yazılımı ile hesaplanan sonuçları göstermektedir.

5.3.2 Dalga gücünün uzun dönemli değişim eğilimi

Zemin 1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık ortalama dalga gücünün değişim eğilimi, dalga parametrelerinin ortalama değişim eğiliminin belirlenmesinde olduğu gibi (Bölüm 5.1.1.2 ve 5.2.1.2), regresyon analizi ile incelenmiştir. Bu hesaplama için öncelikle 1979 yılından 2018 yılına kadar olan 40 yıl için dalga gücü Denklem (5.6) kullanılarak hesaplanmış ve yıllık ortalama dalga gücü belirlenmiştir. Ortalama dalga gücünün 1979 yılından 2018 yılına doğru değişim eğilimini ifade eden doğrunun denklemi MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirlenen doğrunun denklemi kullanılarak ortalama dalga gücünün 2018 yılı için hesaplanan değer inden, 1979 yılı için hesaplanan değer çıkarılmış ve 40 yıldaki toplam değişim belirlenmiştir. Bu işlem tüm Karadeniz çalışma alanı için bir MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmış ve 40 yıllık

Uzun dönemli değişim eğilimi, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücü için

ayrı ayrı incelenmiştir. **Şekil 5.37**, dalga gücünün uzun dönemli değişim eğiliminin (ΔP) Karadeniz çalışma alanındaki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.37 (a ve b)'den SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile hesaplanan ortalama dalga gücünün uzun dönemli değişim eğiliminin genel olarak doğu Karadeniz'de hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. 1979 yılından 2018 yılına doğru dalga gücünün özellikle kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin artan eğilimlere sahip olduğu ve 40 yıldaki ortalama değişim değerlerinin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla %34.37 ve % 17.71 değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Güneybatı Karadeniz'de ise dalga gücü değişim eğiliminin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle SWAN yazılımı ile hesaplanan dalga parametreleri için sırasıyla % 7.41 ve % 16.27 değerlerle azalan eğilimde olduğu belirlenmiştir. Hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücünün 40 yıllık değişim eğilimlerinin uyumlu olduğu, değişim eğilim değerlerinin yüzde cinsinden mertebelerinin biraz farklı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca, rüzgar girdileri arasındaki uzamsal ve zamansal farklılığın neden olduğu düşünülmektedir.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri kullanılarak SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile Denklem (5.6) yardımıyla hesaplanan dalga gücünün değerlerinin hem uzamsal dağılımlarının hem de dalga gücü şiddetlerinin birbirine çok benzer olduğu belirlenmiştir. İki farklı rüzgar girdisiyle SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücü değerlendirmelerinde batı Karadeniz'in, özellikle güneybatı Karadeniz'in, havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek dalga gücü potansiyeline ve daha az değişim eğilimine sahip olduğu belirlenmiştir. Güneybatı Karadeniz'deki stabil ve enerjik dalga koşulları, bu bölgenin havzanın diğer bölgeleriyle karşılaştırıldığında dalga çiftlikleri için daha uygun bir konum olduğunu göstermektedir.

204



Şekil 5.37 1979–2018 yılları için hesaplanan ortalama dalga gücünün değişim eğilimi; (a) ERA-Interim, (b) CFSR rüzgar girdileriyle SWAN yazılımı ile hesaplanan sonuçları göstermektedir.

5.3.3 Dalga gücünün değişkenliği

Zemin Dalga gücündeki uzun dönemli değişkenlik, değişim katsayısı (DK_P), çarpıklık katsayısı (γ_P) ve basıklık katsayısı (δ_P) kullanılarak değerlendirilmiş ve Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 5.38**'de verilmiştir. Bu bölümde dikkate alınan katsayılar ile ilgili tanımlar ve ifadeler Bölüm 3'te detaylı olarak açıklanmıştır.

Dalga gücündeki değişkenliğin uzamsal dağılımlarından, doğu Karadeniz'in her iki rüzgar girdisi için de en büyük DK_P değerlerine sahip olduğu açıkça gözlenmektedir (Şekil 5.38a ve b). Bu sonuç, 1979–2018 yıllarında doğu Karadeniz'deki dalga gücünün batı Karadeniz'e kıyasla fazla değişkenliğe sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle kuzeybatı ve doğu Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerinden daha yüksek çarpıklık ($\gamma_P > 0$) ve basıklık ($\delta_P > 3$) değerlerine ulaşması (Şekil 5.38c-f), dalga gücünün homojen olmayan bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir, bu sonuç CFSR rüzgar girdisi ile elde edilen uzamsal dağılımlardan daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, doğu Karadeniz'de belirlenen yüksek çarpıklık ($\gamma_P > 0$) ve basıklık $(\delta_P > 3)$ değerleri dalga gücü kaynaklarının kararsız bir davranışa sahip olduğunu göstermektedir. Doğusuna kıyasla daha düşük çarpıklık (O'a daha yakın) ve basıklık (3'e daha yakın) değerlerinin bulunduğu güneybatı Karadeniz'deki dalga gücünün, denizin doğu tarafına kıyasla daha kararlı özelliklere sahip olduğu yani daha az değişken olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.38c-f).



Şekil 5.38 1979–2018 yılları için hesaplanan dalga gücünün uzun dönemli değişkenliği (a, b) değişim katsayısı (DK_P); (c, d) çarpıklık (γ_P); (e, f) basıklık (δ_P). Sol ve sağ panel sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar gidileri ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

5.3.4 Dalga gücünün mevsimsel ortalaması

Zemin Karadeniz'in dalga gücünün mevsimsel ölçekte değerlendirmesi, 1979–2018 yılları için iki farklı rüzgar girdisiyle SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücü için araştırılmıştır. Dalga gücü hesaplamasında kullanılan dalga parametrelerinin (H_{m0} ve $T_{m-1,0}$) ve dalga gücünün (P) uzun dönemli mevsimsel ortalamalarına ait uzamsal dağılımlar ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla **Şekil 5.39** ve **Şekil 5.40**'ta verilmiştir. Bu şekillerde, her mevsim için olağan mevsimsel aylar dikkate alınmıştır: kış–AOŞ (Ara–Oca–Şub), ilkbahar–MNM (Mar–Nis–May), yaz–HTA (Haz–Tem–Ağu) ve sonbahar–EEK (Eyl–Eki–Kas).

Beklenildiği üzere belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodunun en yüksek değerlerinin kış mevsiminde olduğu tespit edilmiştir. Kış mevsiminde, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin güneybatı Karadeniz'de 1.5 m'yi aştığı, dalga periyodunun ise 5.3 s'ye ulaştığı belirlenmiştir. İlkbahar mevsiminde, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin 1 m'ye ve dalga periyodunun 4.5 s'ye ulaşması ile kış mevsimine göre dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. İki rüzgar girdisi için de modelden elde edilen dalga parametrelerin ortalamalarının en düşük değerlerine yaz mevsiminde olduğu ve bu değerlerin belirgin dalga yüksekliği için 0.85 m'ye dalga periyodu için 4 s'ye ulaştığı belirlenmiştir. Sonbahar mevsiminde, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin 1.2 m'yi dalga periyodunun 4.6 s'yi aşması, dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin yeniden artmaya başladığını göstermektedir (**Şekil 5.39** ve **Şekil 5.40**).

ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan ortalama dalga gücünün en yüksek değerlerine güneybatı Karadeniz'de sırasıyla 9.36 kW/m ve 10.44 kW/m değerleri ile kış mevsiminde ulaştığı tespit edilmiştir. İlkbahar mevsiminde bu değerlerin, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 3.64 kW/m'ye ve 4.38 kW/m'ye düştüğü saptanmıştır. Yaz mevsiminde, her iki rüzgar girdisi için dalga gücünün ortalama değeri 2.36 kW/m değeri ile en düşük ortalama dalga gücü değerine ulaştığı belirlenmiştir. Dalga gücünün ortalama değerlerinin sonbahar mevsiminde tekrar yükselmeye başladığı, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için ortalama dalga gücünün 6.0 kW/m değerini aştığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen ortalama dalga gücü değerlerinin, tüm mevsimlerde ERA-Interim rüzgar girdileri ile elde edilenlerden biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur (**Şekil 5.39** ve **Şekil 5.40**).

40 yıllık ortalama dalga gücü değerlerinin (ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla 5.17 kW/m ve 5.64 kW/m), kış mevsimi için hesaplanan ortalama dalga gücü değerlerinden (ERA-Interim ve CFSR için sırasıyla 5.62 kW/m ve 6.63 kW/m) biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, 40 yıllık ortalama dalga gücü değerlerinin diğer üç mevsim (ilkbahar, yaz ve sonbahar) için hesaplanan ortalama değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mevsimsel ortalama dalga gücünün uzamsal dağılımlarının (**Şekil 5.39**c ve **Şekil** **5.40**c), 40 yıllık ortalama dalga gücünün uzamsal dağılımlarına benzer (**Şekil 5.36**a ve b) olduğu, ancak ortalama değerlerin mertebelerinin biraz farklı olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.39 ERA-Interim rüzgar girdileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan mevsimsel ortalama dalga gücünün uzamsal dağılımları; (a) H_{m0}; (b) T_{m-1,0}; (c) P. Grafiklerdeki 1, 2, 3 ve 4 numaralandırmaları sırasıyla kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerini göstermektedir.



Şekil 5.40 CFSR rüzgar girdileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan mevsimsel ortalama dalga gücünün uzamsal dağılımları; (a) H_{m0}; (b) T_{m-1,0}; (c) P. Grafiklerdeki 1, 2, 3 ve 4 numaralandırmaları sırasıyla kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerini göstermektedir.

5.3.5 Mevsimsel dalga gücünün değişim eğilimi

1979–2018 yıllarını kapsayan 40 yıllık mevsimsel ortalama dalga gücünün değişim eğilimi, ortalama dalga gücünün değişim eğiliminde olduğu gibi (Bakınız Bölüm 5.3.2), regresyon analizi ile incelenmiş ve MATLAB yardımıyla hesaplanmıştır. **Şekil 5.41**'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri için SWAN yazılımı yardımıyla belirlenen dalga parametreleriyle hesaplanan dalga gücünün mevsimsel değişim eğiliminin (Δ P) Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Her iki rüzgar girdisi için, mevsimsel ortalama dalga gücünün değişim eğiliminin, kış mevsiminde (**Şekil 5.41**a ve b) diğer mevsimlere kıyasla nispeten küçük olduğu belirlenmiştir. İlkbahar mevsiminde, ortalama dalga gücünün doğu Karadeniz'de artan eğilim, batı Karadeniz'de ise azalan eğilim göstermesi ile iki farklı eğilim tespit edilmiştir (**Şekil 5.41**c ve d). Her iki rüzgar girdisi için yaz mevsiminde, ortalama dalga gücünün batı Karadeniz'de nispeten yüksek artan eğilimler gösterdiği belirlenmiştir. Bu artan eğilim değerlerinin ERA- Interim rüzgar girdisi için, CFSR rüzgar girdisi ile bulunanların neredeyse iki katı olduğu saptanmıştır (**Şekil 5.41**e ve f). Sonbahar mevsiminde, doğu Karadeniz'de ERA-Interim rüzgar girdisi ile elde edilen mevsimsel ortalama dalga gücünün değişim eğiliminin, CFSR rüzgar girdisi ile elde edilenlerden daha belirgin artış eğilimleri gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 5.41**g ve h).



Şekil 5.41 Mevsimsel ortalama dalga gücü değişim eğilimi. Sol ve sağ panel sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileriyle SWAN yazılımı ile hesaplanan sonuçları göstermektedir.

5.3.6 Yerel dalga gücü analizleri

1979–2018 yıllarındaki dalga gücünün Karadeniz üzerindeki en uygun konum/konumları araştırmak için tüm çalışma alanını kapsayan 12 referans noktasında detaylı analizler yapılmıştır. Tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayacak şekilde seçilen bu referans noktaları, dalga gücünün uzun dönemli değişim eğiliminin düşük ve dalga gücü potansiyelinin yüksek olduğu batı Karadeniz'de yoğunlaştırılmıştır. Referans noktalarının yerleri **Şekil 5.42**'de ve özellikleri **Tablo 5.14**'te verilmiştir.



Şekil 5.42 Dalga gücünün detaylı analizleri için Karadeniz çalışma alanı üzerinde seçilen 12 referans nokta

Tablo 5.14'te verilen istatistiksel sonuçlardan hem maksimum hem de ortalama dalga gücü için en büyük değerlerin, her iki veri seti için güneybatı Karadeniz'de yer alan N6'da, ardından kuzeybatı Karadeniz'de yer alan N9 ve güneybatı Karadeniz'de yer alan N7'de olduğu belirlenmiştir. Doğu (N2), orta (N3) ve kuzeybatı (N10 ve N11) Karadeniz'de hesaplanan dalga gücünün ortalama ve maksimum değerlerinin özellikle güneybatı Karadeniz'de (N4–N7) hesaplanan dalga gücü değerlerine kıyasla daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Maksimum dalga gücünün en yüksek değerine her iki veri kaynağı için de İstanbul Boğazı yakınında yer alan N6'da olduğu saptanmıştır. Tablo 5.14, seçilen noktalara karşılık gelen dalga gücünün ortalama ve maksimum değerlerinin güneybatı Karadeniz'de, havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük olduğunu göstermektedir (P5, P6, P7). Bu sonuç güneybatı Karadeniz'in dalga gücü potansiyelinin diğer bölgelerinden daha yüksek olduğunu havzanın göstermektedir.

Uzun dönemli ortalama ve değişim eğiliminin uzamsal dağılımları batı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerinden daha yüksek dalga gücü potansiyeline sahip olduğunu, detaylı yerel dalga gücü analizleri ise batı Karadeniz bölgesinden güneybatı Karadeniz'in dalga çiftliği için daha uygun konum olduğunu göstermiştir.

Noltto	Vori kornoğı	Boylam	Enlem	Dalga Gücü (kW/m)			
INOKIA	ven kaynagi	(°)	(ൗ	Ort.	Maks.	95 th	
N1	ERA-Interim	22.0	44.0	3.127	187.142	4.016	
INI	CFSR	55.9	44.2	2.990	184.713	4.076	
N2	ERA-Interim	28.6	11 1	1.836	135.034	2.581	
INZ	CFSR	50.0	44.1	3.078	177.089	4.377	
N2	ERA-Interim	25.0	12 1	2.661	128.472	3.233	
IND	CFSR	55.0	42.1	3.104	185.117	3.666	
NA	ERA-Interim	22.1	41 7	2.988	158.552	3.545	
114	CFSR	52.1	41.7	3.286	218.545	4.246	
NE	ERA-Interim	20.7	41.4	3.394	246.070	4.05	
INJ	CFSR	30.7		4.031	375.823	5.052	
NG	ERA-Interim	20.1	41.4	4.475	294.114	5.590	
INO	CFSR	29.1		4.602	373.575	5.798	
N7	ERA-Interim	28.1	42.3	3.651	221.531	4.785	
117	CFSR	20.1		4.104	233.784	5.383	
NR	ERA-Interim	28.6	43.3	3.395	191.482	4.439	
INO	CFSR	20.0	73.5	3.600	218.991	4.746	
NO	ERA-Interim	20.7	115	3.714	204.619	4.937	
119	CFSR	29.1	5	3.868	225.209	5.286	
N10	ERA-Interim	30.3	45.4	2.537	119.221	3.307	
NIU	CFSR	50.5		2.754	121.843	3.633	
N11	ERA-Interim	31.1	46.0	1.896	59.452	2.413	
1111	CFSR	51.1		2.106	71.673	2.691	
N12	ERA-Interim	20 /	45.2	3.050	133.453	3.825	
N12	CFSR	32.4	43.4	2.888	117.613	3.444	

Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktasında 1979–2018 yılları için yıllık ortalama dalga gücünün değişim eğilimi regresyon analizi ile araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan yıllık ortalama dalga gücünün değişim eğiliminin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için elde edilen sonuçları **Şekil 5.43**'te ve uzun dönemli değişim eğilim değerleri **Tablo 5.15**'te verilmiştir. İki rüzgar girdisi ile 12 referans noktasında hesaplanan değişim eğilimi değerleri arasında özellikle doğu Karadeniz'de bazı farklılıklar olmasına rağmen, batı Karadeniz'de yer alan N5, N6, N7 ve N9'daki değişim eğilimlerinin her iki rüzgar girdisi için de benzer olduğu saptanmıştır. Diğer bir ifadeyle, her iki rüzgar girdisi ile hesaplanan dalga gücünün güneybatı Karadeniz'de (N5–N7) azalan eğilim, kuzeybatı Karadeniz'de artan eğilim göstermesi, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. İki rüzgar girdisi için doğu Karadeniz'de yer alan N2'deki yıllık ortalama dalga gücünün artan eğilimde olmasına karşın, CFSR rüzgar girdisi ile hesaplanan yıllık ortalama değerlerinin ERA-Interim rüzgar girdisi için hesaplananlardan nerdeyse 1.5 kW/m büyük olduğu belirlenmiştir. İki rüzgar girdisi için hesaplanan yıllık ortalama dalga gücü değerlerinin mertebeleri arasındaki bu tutarsızlığa, doğu Karadeniz dalga ikliminin havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek değişkenliğe sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (**Tablo 5.15**).

Tablo 5.15 Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktası için hesaplanan dalgagücünün uzun dönemli değişim eğilim değerleri

	Veri	N1		N2		N3		N4		
	kaynağı	%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	
Dalga Gücü	ERA- Interim CFSR	+11.96 -8.68	+0.353 -0.271	+29.57 +11.13	+0.474 +0.325	+11.79 -6.20	+0.296 -0.198	+0.51 - 18.70	+0.015 -0.676	
		N5		N	N6		N7		N8	
		%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	
Dalga Gücü	ERA- Interim CFSR	-3.42 -15.12	-0.118 -0.658	-8.24 -10.74	-0.384 -0.522	-3.68 -7.77	-0.137 -0.331	+3.53 -1.69	+0.118 -0.061	
		N	19	N	N10		N11		N12	
		%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	%	kW/m	
Dalga Gücü	ERA- Interim CFSR	+2.37 +8.12	+0.087 +0.302	-2.87 +3.64	-0.074 +0.098	-9.11 +1.43	-0.180 +0.030	-4.04 +2.57	-0.126 +0.073	



Şekil 5.43 Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktasında 1979–2018 yılları için yıllık ortalama dalga gücünün değişim eğilimi. Mavi ve siyah çizgiler sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdisi için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktasında 1979–2018 yılları için mevsimsel ortalama dalga gücü her iki rüzgar girdisi için hesaplanmış ve mevsimsel değişimi **Şekil 5.44**'te verilmiştir. Mevsimsel dalga gücünün 40 yıllık ortalama değerleri **Tablo 5.16**'da özetlenmiştir. Dalga gücünün 40 yıllık
mevsimsel ortalamalarına dayanan yerel analizler, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile elde edilen sonuçlar arasındaki uyumun iyi olduğunu göstermektedir. Genel olarak, CFSR rüzgar girdisi için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücünün mevsimsel ortalamaları, ERA-Interim rüzgar girdisiyle elde edilenlerden daha büyük olmasına karşın, kuzeybatı Karadeniz'de yer alan N12'de ERA-Interim rüzgar girdisi ile hesaplanan dalga gücünün mevsimsel ortalamasının CFSR rüzgar girdisi ile hesaplanandan biraz daha büyük olduğu belirlenmiştir. İki rüzgar girdisi ile hesaplanan mevsimsel ortalama dalga gücü arasındaki en büyük tutarsızlık, dalga gücünün yıllık ortalamaları için gözlemlendiği gibi doğu Karadeniz'de yer alan N2'de olduğu belirlenmiştir.

Maleta	Vori larmaŭ	Mevsimsel ortalama dalga gücü (kW/m)						
Nokta	veri kaynagi	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar			
N1	ERA-Interim	5.773	2.496	1.105	3.193			
	CFSR	5.836	2.498	0.800	2.892			
NO	ERA-Interim	4.739	1.547	0.540	1.548			
INZ	CFSR	6.710	2.487	0.643	2.545			
N/2	ERA-Interim	4.638	1.916	1.333	2.802			
IND	CFSR	5.633	2.318	1.389	3.133			
N/A	ERA-Interim	5.149	2.015	1.525	3.314			
IN4	CFSR	5.617	2.448	1.524	3.610			
N5	ERA-Interim	5.732	2.294	1.837	3.766			
	CFSR	6.848	2.990	1.916	4.429			
NG	ERA-Interim	7.754	2.962	2.305	4.955			
INO	CFSR	8.196	3.279	2.009	4.995			
N7	ERA-Interim	6.436	2.562	1.623	4.058			
	CFSR	7.513	3.035	1.462	4.490			
NO	ERA-Interim	5.990	2.575	1.356	3.732			
INO	CFSR	6.501	2.919	1.193	3.858			
NO	ERA-Interim	6.660	2.964	1.281	4.027			
N9	CFSR	6.896	3.332	1.202	4.113			
N10	ERA-Interim	4.403	2.167	0.863	2.764			
	CFSR	4.708	2.439	0.897	3.016			
N11	ERA-Interim	3.218	1.687	0.662	2.052			
	CFSR	3.566	1.867	0.730	2.294			
N10	ERA-Interim	5.565	2.429	1.071	3.180			
N12	CFSR	5.352	2.368	0.987	2.892			

Tablo 5.16 Karadeniz üzerinde seçilen 12 noktada mevsimsel ortalama dalgagücü değerleri



Şekil 5.44 Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktasında mevsimsel ortalama dalga gücü. Mavi ve siyah çizgiler sırasıyla ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdisi için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Karadeniz üzerinde seçilen 12 referans noktasında 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile tüm zaman serilerinden hesaplanan dalga gücü değerlerinin dağılımı **Şekil 5.45**'te verilmiştir. Bu dağılım grafikleri, 1 saatlik zaman çıktılarıyla SWAN yazılımından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu sonuçları kullanılarak Denklem (5.6) ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır.

Şekil 5.45, hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileri için 12 referans noktasında hesaplanan dalga gücü sonuçlarının birbirine benzer olduğunu göstermektedir. 1979–2018 yılları için 40 yıllık dönemdeki dalga gücünün en yüksek değerleri güneybatı Karadeniz'de yer alan N5–N7'de olduğu belirlenmiştir. Bu şekillerden, güneybatı Karadeniz'in (N5–N7) daha büyük dalga yüksekliklerine, daha uzun dalga periyotlarına ve dolayısıyla daha büyük dalga gücüne sahip olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar, 40 yıllık (1979-2018) dönem için güneybatı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha enerjik dalgalara maruz kaldığı ve daha büyük dalga gücü potansiyeline sahip olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 5.45 Seçilen 12 referans noktasında ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için elde edilen dalga gücünün 40 yıllık (1979–2018) dağılım grafiği. Her grafik 40 yıldaki toplam süre için oluşturulmuş ve grafik içindeki renkler dalga gücünü göstermektedir.

6.1 Giriş

İklim modelleri hava tahminlerinin bir uzantısıdır. Ancak hava modelleri belirli alanlar ve kısa zaman dilimleri üzerinde tahminlerde bulunurken, iklim modelleri daha geniş ve uzun zaman aralıklarını analiz etmektedir. İkilim modelleri ile önümüzdeki on yıllarda bir bölgedeki ortalama koşulların nasıl değişeceği tahmin edilebilmektedir (Harper, 2018).

İklim modelleri, okyanus sirkülasyonu ve eriyen buzullar gibi hava modellerinden daha fazla atmosferik, okyanus ve kara süreçlerini de içermektedir. Bu modeller tipik olarak iklim sistemlerinde gerçekleşen enerji ve su transferini benzeştirmek için binlerce veri noktasını kullanan matematiksel denklemlerden üretilmektedir (Harper, 2018).

Bilim insanları, karmaşık dünya sistemlerini anlamak için iklim modellerini kullanmaktadırlar. Bu modeller, hipotezleri test etmelerine ve geçmiş ve gelecekteki iklim sistemleri hakkında sonuçlar çıkarmalarına izin vermektedir. Bu, olağandışı hava olaylarının veya fırtınaların iklimdeki değişikliklerden mi yoksa rutin iklim varyasyonunun sadece bir parçası mı olduğunu belirlemelerine yardımcı olabilmektedir (Harper, 2018).

İklim modelleri için üç yaygın basit iklim modellerinden biri kullanılmaktadır: enerji dengesi modelleri (energy balance models), ara karmaşıklık modelleri (intermediate complexity models) ve genel sirkülasyon modelleri (general circulation models) (Harper, 2018).

Enerji dengesi modelleri, Dünya'nın enerji bütçesinin (giren enerji kazançlarını ve çıkan enerji kayıplarını içeren bir enerji bütçesi) bir sonucu olarak iklim değişikliklerinin tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu model, güneş enerjisi, albedo veya yansıtma ile yüzey sıcaklıklarını ve uzaya geri ısı yayan dünyadan gelen doğal soğutmayı dikkate almaktadır. Bilim insanları iklimi tahminlerinde, ısı depolamadaki değişiklikleri anlamak için, çıkana karşılık gelen enerji miktarını temsil eden bir denklem kullanmaktadırlar. Daha sonra bu denklemi üç boyutlu bir ağ içinde bir kare alanı temsil eden modele girerek bir bölgedeki veya bir kıtadaki iklimi ifade etmeye çalışmaktadırlar.

Ara karmaşıklık modelleri enerji dengesi modellerine benzemekte ancak Dünya'nın coğrafi yapılarının birçoğunu (örneğin kara, okyanuslar ve buz özellikleri) içermekte ve birleştirmektedir. Bu coğrafi özellikler, ara karmaşıklık modellerinin buzul değişimleri, okyanus akıntısı değişimleri ve atmosferik kompozisyon değişiklikleri gibi uzun zaman dilimleri boyunca büyük ölçekli iklim senaryolarını benzeştirmesine izin vermektedir. Ara karmaşıklık modelleri, iklimi daha az uzamsal ve zamansal ayrıntılarla tanımladığından, Dünya iklim sistemindeki büyük ölçekli ve düşük frekanslı varyasyonlar için en iyi şekilde kullanılmaktadırlar (Harper, 2018).

Genel sirkülasyon modelleri, iklim sistemlerini anlamak ve iklim değişikliğini tahmin etmek için en karmaşık ve hassas modellerdir. Bu modeller, ayrılmış alanın atmosferik kimyası, arazi tipi, karbon döngüsü, okyanus dolaşımı ve buzul yapısı ile ilgili birçok bilgileri içermektedir. Bu model, enerji dengesi ve ara karmaşıklık modellerinden daha gelişmiş bir modeldir, ancak her benzeştirme için daha fazla bilgi işleme süresi gerektirmektedir (Harper, 2018).

Bu çalışmada iklim sistemini anlamak, iklim değişikliğini küresel ölçekte incelemek için kullanılan Genel Sirkülasyon Modeli (General Circulation Model) detaylı araştırılmıştır.

6.2 Genel Sirkülasyon Modeli (GCM)

Genel Sirkülasyon Modeli (küresel iklim modeli olarak da bilinen, Global Climate Model, GCM), bir tür iklim modelidir. Küresel bir atmosfer veya okyanusun genel dolaşımının matematiksel bir modelini kullanmaktadır. GCM'ler, hava tahmini, iklim sistemini anlamak ve iklim değişikliğini tahmin etmek için kullanılmaktadır. IPCC'nin üç değerlendirme raporunda temel oluşturan GCM benzeşimlerinde iki emisyon senaryosu kullanılmıştır (IPCC 2001; IPCC 2007, IPCC 2013). Bunlar SRES (Special Report on Emissions AR3 & AR4, Nakicenovic vd., 2000) ve RCP (Representative Concentration Pathways, AR5, Moss vd., 2008) senaryolarıdır. Bu çalışma RCP senaryoları dikkate alınmıştır ve SRES senaryoları hakkında daha fazla bilgi EEA (European Environment Agency, 2016) (http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-andvulnerability-2016) verilmiştir (EURO-CORDEX, 2017).

RCP'ler için başlangıçta dört temel senaryo seti oluşturulmuştur, bunlar: RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 ve RCP2.6. RCP8.5, 2100'den sonra bile yükselmeye devam eden 8.5 W/m² radyasyon kuvvetine yol açan çok yüksek sera gazı emisyonunu temsil etmektedir; RCP4.5 ve RCP6.0 stabilizasyon senaryolarıdır, yani artışlar yüzyılın sonunda verilen değerlerde stabil olmaktadır ve RCP2.6, gelecekteki önemli negatif bir emisyon ile agresif bir azalma senaryosunu temsil etmektedir. AR5 raporunda, 21. yüzyılın sonundaki küresel yüzey sıcaklığı değişikliğinin RCP2.6 ve RCP4.5 için 1850–1900 dönemine göre 2°C'nin altında kalmasının muhtemel olduğu, ancak RCP6.0 ve RCP8.5 için bu eşiği aşılmasının muhtemel olduğu belirtilmiştir (EURO-CORDEX, 2017).

GCM'lerin cok sayıda veri noktası içermesi ve yüksek karmaşıklığı nedeniyle, onların bir araya getirilerek birleştirilmesi büyük miktarda hesaplama kaynağı gerektirmektedir. Uzamsal ağlarının çözünürlüğü 100–500 km arasında değişmekte ve 6 saat zamansal çözünürlük ile çıktı sağlamaktadır. Bu nispeten kaba uzamsal ve zamansal ölçek nedeniyle, GCM'ler iklim değişkenliği ve değişimi ile ilgili bölgesel ve yerel ölçek tahminlerinin pek çok yönü için yetersiz kaldığı belirtilmektedir. Bu durum, küresel değişimin yerel sonuçlarını tanımlamak için GCM'lerin ölçek küçültülmesini zorunlu hale getirmektedir. Dolaysıyla ampirik-istatistiksel ölcek kücültme (Empirical-Statistical Downscaling, ESD) veya dinamik ölçek küçültme kullanılarak yapılabilen LAMs (Limited Area Models) olarak da adlandırılan bölgesel iklim modellerine (Regional Circulation Models, RCMs) ihtiyaç duyulmaktadır (EURO-CORDEX, 2017).

CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), WCRP (Word Climate Research Program) Programi'nin WGCM (Working Group on Coupled Modelling) Grubu tarafından yılında Projenin 1995 kurulmuştur. 2010-2014 yıllarında tamamlanan CMIP'in (CMIP5) beşinci aşaması (2010-2014), IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change Assessment Report5) Raporu'nda yaygın olarak kullanılmıştır. CMIP5'in temel amacı, iklim değişimini ve değişkenliği dahil olmak üzere iklim sistemini anlamak, iklim anlayışını iyileştirmek, gelecekteki iklim değişikliği ve ilgili belirsizlikler hakkında tahminler sağlamak olmuştur. CMIP5 veri arşivi, birçok ulusal merkez için Dünya Ağ Sistemi Federasyonu (Earth System Grid Federation, ESGF) aracılığıyla yayınlanmaktadır. CMIP5 kapsamında GCM'lerden bazıları Tablo 6.1'de verilmiştir.

No	Enstitü	Model	Çözünürlük	
1	NOAA, NOAA Geophysical Fluid	GFDL-CM3		
2	Dynamics Laboratory, United State	GFDL-ESM2G	2.5°x2.0°	
3	(GFDL)	GFDL-ESM2M		
4	Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM5A-LR	3.75°×1.875°	
5	(IPSL)	IPSL-CM5A-MR	2.5°×1.268°	
6	Centre National de Recherches Meteorologiques, France (CNRM)	CNRM-CERFACS	1.4x1.4	
7	Commonwealth Scientific and	ACCESS1.0	1.875°×1.24°	
	Industrial Research Organization	CSIRO-BOM		
8	Australia (CSIDO)	ACCESS1.3		
	Australia (CSIRO)	CSIRO-BOM		
9	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italy (CMCC)	CMCC-CM	0.75°×0.75°	
10	Met Office Hadley Centre, United	HadGEM2CC	0.9375°×1.25°	
11	Kingdom (MOHC)	HadGEM2ES		
12	Institute for Numerical Mathematics, Russia (INM)	INMCM4	2.0°×1.5°	

Tablo 6.1 CMIP5 projesindeki GCM'lerden bazıları

6.3 Bölgesel Sirkülasyon Modeli (RCM)

LAM'lar 1970'lerden bu yana hava tahminlerinde yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. İklim amaçlı uygulamaları 1990'larda başlamıştır. GCM çıktı verilerini yanal sınır koşulları olarak kullanan RCM'ler, GCM benzeşimlerinin ölçek küçültmesi ile elde edilen çıktılarıdır ve genellikle belirli bir alan üzerinde (örneğin EURO-CORDEX olması durumunda Avrupa üzerinde) 0-50 km uzamsal çözünürlükte çalıştırılmaktadır. Daha yüksek çözünürlüklere ayarlanmış önemli süreçlerin (örneğin dağ sirkülasyonları (mountain circulation), kara-okyanus zıtlıkları (land-ocean contrast)) ve parametreleştirme şemalarının açıkça çözülmesi ile RCM'ler, bölgesel ve yerel iklimin daha ayrıntılı karakteristiklerini sağlayabilmektedirler (EURO-CORDEX, 2017).

Bölgesel bir iklim değişikliği senaryosunun kalitesi ve doğruluğu hem RCM hem de kullanılan GCM tarafından belirlenmektedir. Sadece bir RCM-GCM kombinasyonunu dikkate almak, çok sayıda beklenen sonuçlardan yalnızca birini temsil etmektedir. CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) çerçevesinde yapıldığı gibi, farklı RCM'leri farklı GCM'lerle birleştiren topluluk benzeşimlerinin sağlanması gerekmektedir. CORDEX bölgesel iklim modeli (RCM) benzeşimleri, Avrupa alanı (EURO-CORDEX) için iki farklı uzamsal çözünürlükte (0.44°x0.44° [EUR-44, ~ 50 km] ve 0.11°x0.11° [EUR-11, ~ 12.5km]) gerçekleştirilmiştir. EUR-44 ve EUR-11 benzeşimleri "CORDEX" projesi adı altında ESGF aracılığıyla yayınlanmaktadır.

SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tarafından geliştirilen RCA (Rossby Centre Regional Climate Model) dördüncü versiyonu, RCA4, CMIP5 GCM'leri sınır koşulları olarak kullanan dinamik olarak ölçek küçültmüş çıktılarıdır (Strandberg VD., 2014). **Tablo 6.2**, RCA4 tarafından dinamik olarak ölçek küçültme için kullanılan on farklı GCM'yi göstermektedir. Ancak günümüzde EUR-11'de hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarının sadece beşi (CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) mevcuttur ve bu çalışmada, 0.11°x0.11° uzamsal 6 saat zamansal çözünürlüklü bu beş RCA4 bölgesel iklim verileri dikkate alınmıştır (**Tablo 6.2**).

Tablo 6.2 EURO-CORDEX kapsamında RCA4 tarafından dinamik olarak ölçeklendirilmiş CMIP5 GCM'lerin listesi (Strandberg vd., 2014). En sağdaki sütun bu çalışmada dikkate alınan verileri göstermektedir.

	GCM Adı	Kısaltma	EUR-0.44	EUR-0.11	Bu çalışmada seçilen
1	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	CanESM2	4.5, 8.5	_	
2	Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM-CM5	4.5, 8.5	4.5, 8.5	*
3	Consortium of European Research Institution and Researchers, Europe	EC-EARTH	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5	*
4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL- ESM2M	4.5, 8.5	_	
5	Met Office Hadley Centre, UK	HadGEM2-ES	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5	*
6	Institut Pierre-Simon Laplace, France	IPSL-CM5A- MR	4.5, 8.5	4.5, 8.5	*
7	National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC), Japan	MIROC5	2.6, 4.5, 8.5	-	
8	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM-LR	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5	*
9	Norwegian Climate Centre, Norway	NorESM1-M	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 8.5,-	
10	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	CSIRO-Mk3- 6.0	4.5, 8.5	-	

Bu bölümde, gelecek (2021–2100) yıllardaki Karadeniz rüzgar ve dalga iklim sistemini anlamak, küresel iklim değişim ve değişikliğinin rüzgar ve dalga iklimi üzerindeki olası etki/etkilerini araştırmak, yenilenebilir (rüzgar ve dalga) enerji açısından en uygun konum/konumları belirleyebilmek için bölgesel iklim modellerinden biri olan RCA4 modelinin EURO-CORDEX alanı için 2021–2100 yıllarını kapsayan EUR-11 çıktıları kullanılmıştır. EUR-11 çıktıları 27°N–72°N, ~22°W–45°E koordinatları ile Karadeniz çalışma alanını (40–47°N, 26–42°E) kapsamaktadır.

2021–2100 yılları için RCA4 tarafından sağlanan iklim verilerinin güvenirliği, üç yeniden analiz verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler 1979–2005 yılları için yapılmıştır. 1979–2018 yıllarını kapsayan ERA-Interim, ERA5 ve CFSR yeniden analiz verilerinin doğruluğu ve güvenirliği dünya üzerinde birçok çalışma alanı için sayısız araştırmacı tarafından defalarca kanıtlanmıştır (Karadeniz (Islek vd., 2020a), Akdeniz (Yuksel vd., 2020), Marmara (Yuksel vd., 2021), İber Yarımadası Bölgesi (Carvalho vd., 2012), Antarktika Kıtası (Bromwich vd., 2011), Güney Atlantik Avrupa ve Akdeniz (Menendez vd., 2011), İskandinavya (Jimenez vd., 2011), Endonezya (Tabata vd., 2011). Bu çalışmada, Bölüm 3'te irdelenen yeniden analiz verileri 40 yıllık (1979–2018) zaman aralığını kapsadığından, geleceğe yönelik iklim verileri için de her biri 40 yılı kapsayan iki zaman periyodu belirlenmiştir. Bunlar 2021–2060 yıllarını kapsayan yakın gelecek ve 2061–2100 yıllarını kapsayan orta gelecektir. Gelecek yıllara ait rüzgar ve dalga iklimi ile ilgili yapılan araştırmalar hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

2021–2100 yılları için RCA4 tarafından sağlanan iklim verilerinin değişimlerinin projeksiyonlarını belirlemek için 1970–2005 yıllarına ait tarihsel RCA4 verileri kullanılmıştır. Ayrıca tarihsel RCA4 verilerinin yerinde yapılan ölçümler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

2021–2100 yılları için RCA4 tarafından sağlanan iklim verilerinin gelecekteki değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi kullanılarak değerlendirilmiş ve tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde istatiksel olarak anlamlı eğilimler irdelenmiştir. Bu araştırmalar hem rüzgar hem de dalga parametreleri için tüm Karadeniz çalışma alanında ayrı ayrı yapılmıştır.

6.4 Rüzgar İklim Analizleri

Karadeniz rüzgar iklim analizleri, tarihsel ve gelecek dönemeler için iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hem yerel hem de alansal karşılaştırmalar yapılmıştır: (i) Karaburun ölçüm istasyonunda ölçülen rüzgar hızı ile **Tablo 6.2**'de verilen beş RCA4 tarihsel rüzgar hızı karşılaştırılmış, (ii) tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde, beş RCA4 tarihsel ve üç yeniden analiz rüzgar verilerinin 1979–2005 yılları için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Karadeniz üzerinde farklı rüzgar özellikleri gösteren beş bölgede incelenmiştir (**Şekil 6.1**), (iii) Gelecek yıllardaki (2021–2100) Karadeniz rüzgar iklimin araştırmak için yerinde yapılan ölçümler ve yeniden analiz verileri ile en iyi uyuma sahip bir RCA4 tarihsel rüzgar verisi belirlenmiştir. Rüzgar hız verilerinin iki gelecek periyodu (2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek) için uzun dönemli ortalamaları, uzun dönemli değişkenliği, değişim projeksiyonu ve uzun dönemli değişim eğilimleri hem RCP4.5 hem de **RCP8.5** senaryoları için değerlendirilmiştir. Gelecek yıllardaki Karadeniz'e ait rüzgar gücünün hem uzun dönemli ortalamaları hem de mevsimsel ortalamaları ve bunların değişim projeksiyonları incelenmiştir. Enerjinin en etkili ve verimli kullanılabilmesi için tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde en uygun konum/konumlar tartışılmıştır.



Şekil 6.1 Çalışma alanı, detaylı RB analizleri için seçilen beş bölge, detaylı yerel analizler için seçilen üç konum

6.4.1 Tarihsel rüzgar verileri

6.4.1.1 Ölçülen rüzgar verileri ile karşılaştırma

RCA4 bölgesel iklim modeli tarafından sağlanan beş tarihsel rüzgar verilerinin (bu çalışma için CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) doğruluğu, kuzeybatı Karadeniz'de 41°21'05" N ve 28°41'01" E koordinatlarında yer alan Karaburun'da 23/06/2004–12/04/2005 tarihlerinde yapılan rüzgar hızı ölçümleri (Ari Guner vd., 2013) ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (**Şekil 6.1**). Bu çalışmada, RCA4 iklim modelleri ile ölçülen rüzgar hız verilerinin karşılaştırması, modellenen ve ölçülen veriler arsındaki performansı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan, histogram ve Quantile-Quantile (Q-Q) grafikleri ile irdelenmiştir (Aarnes vd., 2017; Christakos vd., 2019). Genel olarak, 10 m/s'ye kadar olan rüzgar hızları için beş RCA4 tarihsel ve ölçülen rüzgar hız verileri arasında iyi bir uyum gözlenmektedir. Ancak beş RCA4 iklim modelleri, çok yüksek rüzgar hız sınıfı için (≥10 m/s) rüzgar hızını ölçülen rüzgar hızından daha düşük tahmin ettiği belirlenmiştir (**Şekil 6.2**b). EC-EARTH ve MPI-ESM-LR rüzgar hız verilerinin diğer üç RCA4 tarihsel rüzgar hız verilerine kıyasla, yüksek rüzgar hızı sınıflarını tahmin etmede daha iyi bir performans gösterdiği **Şekil 6.2**'den gözlenmektedir. Ölçülen ve modellenen histogramlar arasındaki göreceli hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %8.40, %9.05, %9.76, %10.52 ve %9.22 olarak hesaplanmıştır. Hem histogram hem de Q-Q grafikleri, EC-EARTH rüzgar verilerinin, özellikle daha yüksek yüzdelik hız sınıflarında, dört RCA4 tarihsel rüzgar hız verilerine kıyasla biraz daha iyi bir uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.2 2004–2005 dönemi Karaburun istasyonu için beş RCA4 ve ölçülen rüzgar verilerinin karşılaştırılması. (a) Histogram, (b) Q-Q grafikleri

6.4.1.2 Yeniden analiz rüzgar verileri ile karşılaştırma

Tablo 6.2'de listelenen RCA4 bölgesel iklim modeli, 1970'ten 2005'e kadar olan yıllar için tarihsel iklim verilerini ve 2006'dan 2100'e kadar olan yıllar için projeksiyon iklim verilerini sağlamaktadır. Bu çalışmada iklim verilerinden deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki u ve v rüzgar hız bileşenleri dikkate alınmıştır. İklim verilerini, çalışma alanı için daha önce başarıyla uygulanmış ve güvenirliği sayısız çalışma tarafından ispatlanmış referans verileri ile değerlendirmek oldukça önemli bir iş yüküdür. Bu nedenle, tarihsel dönem boyunca rüzgar

alanlarının doğruluğunu kontrol etmek için beş RCA4 tarihsel rüzgar alanı, yaygın olarak kullanılan üç yeniden analiz rüzgar verisiyle karşılaştırılmıştır. Üç referans yeniden analiz verisi, 0.25°x0.25° uzamsal ve 6 saat zamansal çözünürlük ile ECMWF tarafından üretilen ERA-Interim, 0.25°x0.25° uzamsal ve 1 saat zamansal çözünürlük ile ECMWF tarafından üretilen en güncel yeniden analiz verisi olan ERA5 ve 0.5°x0.5° uzamsal ve 1 saat zamansal çözünürlük ile NCEP'ten elde edilen CFSR rüzgar verileridir. Karadeniz çalışma alanı üzerindeki alansal karşılaştırmalar hem RCA4 tarihsel hem de üç yeniden analiz rüzgar alanı için mevcut olan 1979–2005 (27 yıllık) dönemini kapsamaktadır.

Şekil 6.3 ve **Şekil 6.4** sırasıyla üç yeniden analiz ve beş RCA4 tarihsel rüzgar hız verilerinin 1979–2005 yılları için 27 yıllık ortalamasının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 6.3'ten, ERA-Interim rüzgar verilerine göre hesaplanan ortalama rüzgar hızının ERA5 rüzgar verileri ile hesaplanan ortalamalardan biraz daha düşük olduğu, CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ortalama rüzgar hızının ise diğer iki yeniden analiz verisi ile hesaplanan ortalamalardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Karadeniz üzerinde belirlenen beş bölge için 1979–2005 yıllarına ait ortalama rüzgar hızının istatistiksel değerleri **Tablo 6.3**'te verilmiştir. Üç yeniden analiz verisi ile hesaplanan ortalama rüzgar hızı, en yüksek değerlerine Karadeniz'in kuzeybatı ve güneybatı bölgelerinde, en düşük değerlerine ise Karadeniz'in güneydoğu bölgesinde ulaşmaktadır. Ortalama rüzgar hızı Karadeniz'in batısından doğusuna doğru belirgin bir şekilde azalmaktadır.

Genel olarak, üç yeniden analiz rüzgar verisi, ortalama rüzgar hızı değerleri ve Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları açısından uyumludur, ancak özellikle doğu Karadeniz'de bazı küçük yerel farklılıklar vardır. Bu muhtemelen Karadeniz'in rüzgar iklimini kontrol eden orografik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Karadeniz havzasının güney (Kuzey Anadolu Dağları) ve doğu (Kafkas Dağları) sınırlarını çevreleyen yüksek dağlar, rüzgar hızlarını azaltan bariyer etkisine neden olmaktadır (Islek vd., 2020a). Bu bölgedeki karmaşık atmosferik sirkülasyon nedeniyle, doğu Karadeniz'deki rüzgar hızı üç yeniden analiz rüzgar alanı ile küçük farklılıklarla tahmin edebilmektedir.



Şekil 6.3 1979–2005 yılları için ortalama rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı, (a) ERA-Interim, (b) ERA5, (c) CFSR yeniden analiz verileri

Beş RCA4 tarihsel rüzgar verilerinin 1979–2005 yılları için hesaplanan 27 yıllık ortalamasının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı **Şekil 6.4**'te, Karadeniz üzerinde belirlenen beş bölge için 27 yıllık ortalama rüzgar hızlarının istatistiksel özellikleri **Tablo 6.3**'te verilmiştir. Genel olarak, beş RCA4 tarihsel rüzgar verisinin Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları, üç yeniden analiz rüzgar verileriyle uyumludur (**Şekil 6.3** ve **Şekil 6.4**). Yeniden analiz verilerinde olduğu gibi, batı ve kuzeydoğu Karadeniz daha yüksek rüzgar hızlarına, doğu Karadeniz ise daha düşük rüzgar hızlarına maruz kalmaktadır. IPSL-CM5A-MR'nin diğer dört RCA4 tarihsel rüzgar verilerine kıyasla tüm Karadeniz'de daha yüksek ortalama rüzgar hızı değerleri tahmin ettiği **Şekil 6.4**'ten açıkça gözlenmektedir (**Tablo 6.3**).

Yeniden analiz ve beş RCA4 tarihsel rüzgar hız verileri arasındaki farklılığın tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımını irdelemek için ortalama rüzgar hız değerleri arasındaki göreceli fark, rölatif BIAS (RB) hesaplanarak araştırılmıştır.



Şekil 6.4 1979–2005 yılları için ortalama rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımı, RCA4 tarihsel rüzgar hız verileri; (a) EC-EARTH, (b) CNRM-CM5, (c) IPSL-CM5A-MR, (d) HadGEM2-ES, (e) MPI-ESM-LR

	Rüzgar Hızı (m/s)								
	ERA-	EDAE	CECD	EC-	CNRM	IPSL-	HadGE	MPI-	
	Interim	ENAS	CLOK	EARTH	-CM5	CM5A-MR	M2-ES	ESM-LR	
	Kuzeybatı Karadeniz								
Min.	3.481	3.580	3.943	3.302	3.292	3.456	3.276	3.322	
Ort.	5.239	5.436	5.686	5.818	5.775	6.173	5.675	5.825	
Maks.	5.728	5.758	6.173	6.124	6.037	6.477	5.934	6.083	
			G	üneybatı Ka	aradeniz				
Min.	2.488	2.183	2.986	3.068	3.125	3.411	3.049	3.136	
Ort.	4.928	5.055	5.317	5.657	5.721	5.990	5.696	5.769	
Maks.	5.503	5.652	6.048	6.025	6.122	6.370	6.167	6.195	
				Orta Kara	deniz				
Min.	2.225	2.124	2.083	3.583	3.609	3.771	3.609	3.545	
Ort.	4.719	4.933	5.120	5.568	5.575	5.925	5.389	5.563	
Maks.	5.501	5.604	5.618	6.104	6.005	6.360	6.081	6.109	
	Kuzeydoğu Karadeniz								
Min.	2.427	1.840	3.509	3.219	3.571	3.490	3.294	3.420	
Ort.	3.987	4.413	4.970	5.276	5.418	5.632	5.226	5.474	
Maks.	4.993	5.459	5.755	5.928	5.961	6.334	6.023	6.085	
	Güneydoğu Karadeniz								
Min.	1.867	1.491	1.955	2.323	2.552	2.786	2.364	2.351	
Ort.	3.399	3.674	4.139	4.215	4.409	4.671	4.183	4.331	
Maks.	4.161	4.458	4.910	5.140	5.252	5.591	4.965	5.229	
	Karadeniz								
Min.	1.867	1.491	1.955	2.323	2.552	2.786	2.364	2.351	
Ort.	4.346	4.546	4.861	5.131	5.205	5.487	5.054	5.206	
Maks.	5.728	6.064	6.173	6.154	6.122	6.477	6.181	6.209	

Tablo 6.3 Karadeniz çalışma alanında ortala rüzgar hızının 1979–2005 yıllarıiçin istatistiksel parametreleri

Bu çalışmada, RCA4 tarihsel verileri ile yeniden analiz rüzgar verileri arasındaki göreceli farkı araştırmak için RB hesaplanmıştır. Bu çalışmada RB aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır:

$$RB = \frac{V_{TarihselRCA4} - V_{YenidenAnaliz}}{V_{YenidenAnaliz}}$$
(6.1)

Şekil 6.5(a-c), beş RCA4 tarihsel rüzgar verileri için ERA-Interim, ERA5 ve CFSR yeniden analiz rüzgar verilerine göre hesaplanan RB değerlerinin uzamsal dağılımlarını göstermektedir. **Tablo 6.4**'te verilen istatistiksel değerlendirmede, karşılaştırılan veri setleri arasındaki gerçek farkı araştırmak amacıyla RB değerlerinin mutlak değeri dikkate alınmıştır.

Şekil 6.5 (a ve b), RCA4 tarihsel rüzgar verilerinin, ERA-Interim ve ERA5 yeniden analiz rüzgar verilerinden biraz daha yüksek ortalama rüzgar hızlarını öngördüğünü göstermektedir. Değerlendirilen RCA4 tarihsel rüzgar verileri arasından IPSL-CM5A-MR verileri, ERA-Interim ve ERA5 yeniden analiz rüzgar verileri ile en çok sapma gösteren veri olmuştur. Beş RCA4 tarihsel rüzgar verileri ile ERA-Interim ve ERA5 yeniden analiz verileri arasındaki en büyük farklılıklar, kara ve deniz arasındaki geçişin atmosferik dolaşımı etkilediği Karadeniz'in kuzeydoğu ve güneydoğu kıyılarında belirlenmiştir. Tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde, genel olarak, RCA4 tarihsel rüzgar verilerinin, ERA5 yeniden analiz rüzgar verileriyle ERA-Interim yeniden analiz verilerine kıyasla daha uyumlu olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.5, Tablo 6.4**).

Şekil 6.5 (c)'den, RCA4 tarihsel ve CFSR yeniden analiz rüzgar verileri arasındaki ortalama sapma %20'den az olduğu, yani diğer iki yeniden analiz verilerinden daha az sapma gösterdiği, belirlenmiştir (**Tablo 6.4**). RCA4 tarihsel ve CFSR yeniden analiz rüzgar verileri arasındaki en büyük farklılıklar, ERA-Interim ve ERA5 yeniden analiz rüzgar verileriyle yapılan karşılaştırmalara benzer şekilde Karadeniz'in güney kıyılarında belirlenmiştir.

Karşılaştırmalarda kullanılan veri setlerinin farklı uzamsal ve zamansal çözünürlükleri, muhtemelen, kara-deniz sınırları yakınındaki atmosferik dolaşımın keskin değişimini çözmeyi zorlaştırmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısyla, RCA4 tarihsel ve yeniden analiz rüzgar verileri arasında kara-deniz birleşimlerinde yüksek farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

Karadeniz üzerinde belirlenen beş bölge için de CFSR yeniden analiz rüzgar verileri ile RCA4 tarihsel rüzgar verileri, özellikle EC-EARTH ve HadGEM2-ES, arasında ERA-Interim ve ERA5 yeniden analiz rüzgar verilerine kıyasla daha düşük RB değerleri ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.5**c, **Tablo 6.4**).

Hem yerel hem de alansal olarak yapılan karşılaştırmalar sonucunda, EC-EARTH rüzgar verilerinin; (i) Karaburun ölçüm istasyonunda ölçülen rüzgar verileri daha iyi uyum sağladığı, (ii) Karadeniz üzerinde belirlenen beş bölgede de üç yeniden analiz verisinin ile daha az sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı beş RCA4 tarihsel veriler arasından EC-EARTH rüzgar verileri kullanılarak 2021–2100 yıllarındaki rüzgar iklim projeksiyonu araştırılmıştır.

			EC-	CNRM-	IPSL-	HadGEM2	MPI-ESM-
			EARTH	CM5	CM5A-MR	-ES	LR
	Verathate	Min.	0.608	0.445	0.050	0.117	0.116
	Kuzeybali	Ort.	11.779	10.987	18.331	9.113	11.881
	Karaueniz	Maks.	37.027	36.445	49.901	35.744	38.415
	Cünarhatı	Min.	0.302	0.005	0.027	0.573	0.049
	Guneyban	Ort.	15.839	17.031	22.346	16.585	17.870
	Karaueniz	Maks.	60.654	65.678	76.989	64.625	62.100
EDA	Orte	Min.	0.116	0.077	0.140	0.076	0.058
ERA- Intorim	Vorodoniz	Ort.	20.137	20.515	27.743	16.485	20.105
mermi	Karaueiliz	Maks.	99.151	104.759	117.994	92.827	97.959
	Kuroudoču	Min.	0.510	0.256	1.416	1.434	1.320
	Kuzeyuogu	Ort.	33.821	38.010	42.736	32.646	39.128
	Karaueiliz	Maks.	71.079	85.950	84.049	72.834	80.832
	Cünavdoğu	Min.	0.001	1.071	6.564	0.423	0.597
	Karadeniz	Ort.	24.404	30.236	37.819	23.726	27.793
	Karaueniz	Maks.	59.627	71.214	80.557	69.747	71.257
	Vurorbet	Min.	0.185	0.004	0.208	0.008	0.180
	Kuzeybau Karadeniz	Ort.	7.518	6.769	13.780	5.045	7.624
	Karaueniz	Maks.	27.857	27.315	36.560	26.660	29.153
	Güneybatı Karadeniz	Min.	0.185	0.137	0.048	0.170	0.034
ERA5		Ort.	13.183	14.474	19.798	14.019	15.251
		Maks.	48.278	52.555	65.176	51.566	47.978
	Orta Karadeniz	Min.	0.2510	0.282	0.261	0.2507	0.196
		Ort.	13.969	14.192	21.262	10.359	13.817
	Karaueniz	Maks.	71.900	79.045	84.675	71.144	74.167
	Kurovdoğu	Min.	1.307	0.548	1.404	0.621	0.568
	Karadeniz	Ort.	22.148	26.185	30.208	21.146	27.068
	Karauciliz	Maks.	88.318	99.856	89.633	96.531	94.094
	Günevdoğu	Min.	0.030	0.727	7.614	0.044	0.024
	Karadeniz	Ort.	17.658	23.200	30.189	17.177	20.823
		Maks.	81.473	94.705	81.915	94.681	89.320
	Kuzevbatı	Min.	0.001	0.003	0.165	0.001	0.001
	Karadeniz	Ort.	3.956	3.697	9.273	3.730	4.011
		Maks.	29.946	29.213	41.945	26.875	31.634
	Günevhatı	Min.	0.001	0.073	0.680	0.004	0.201
	Karadeniz	Ort.	7.835	9.075	14.065	8.875	9.838
CFSR		Maks.	38.311	41.097	50.619	43.436	39.204
	Orta	Min.	0.002	0.007	0.155	0.001	0.035
	Karadeniz	Ort.	11.131	11.387	18.029	8.736	10.937
	Imindellin	Maks.	79.963	85.863	95.665	77.639	75.754
	Kuzevdoğu	Min.	0.029	0.316	0.240	0.0384	0.039
	Karadeniz	Ort.	7.107	9.839	13.688	6.387	10.857
		Maks.	26.958	33.519	31.114	28.284	30.209
	Günevdoğu	Min.	0.008	0.001	0.007	0.004	0.0142
	Karadeniz	Ort.	11.647	12.465	16.567	12.900	11.129
		Maks.	55.016	60.039	70.924	59.178	53.090



Şekil 6.5 RCA4 tarihsel verileri ve üç yeniden analiz rüzgar verisi arasındaki RB değerleri (1979–2005). (a1, b1, c1) EC-EARTH; (a2, b2, c2) CNRM-CM5; (a3, b3, c3) IPSL-CM5A-MR; (a4, b4, c4) HadGEM2-ES; (a5, b5, c5) MPI-ESM-LR. Sol, orta ve sağ sütunlar sırasıyla ERA-Interim, ERA5 ve CFSR'ye göre RB değerleri göstermektedir.

6.4.2 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için rüzgar hız projeksiyonları

İklim değişikliğinin, gelecekteki rüzgar iklimi üzerindeki etkisi RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre bir RCA4 iklim verisi kullanılarak incelenmiş ve her biri 40 yıllık zaman dilimini kapsayan yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için araştırılmıştır.

6.4.2.1 Rüzgar hız projeksiyonlarının uzun dönemli ortalamaları

Şekil 6.6, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için EC-EARTH verilerine dayanan 40 yıllık ortalama rüzgar hızının (V_m) uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Karadeniz

çalışma alanı üzerindeki 40 yıllık ortalama rüzgar hız verilerinin bazı istatistiksel parametreleri **Tablo 6.5**'te verilmiştir.

Yeniden analiz ve beş RCA4 tarihsel rüzgar hız verilerinde olduğu gibi, geleceğe yönelik ortalama rüzgar hızlarının da Karadeniz çalışma alanı üzerinde benzer uzamsal dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir. Ortalama rüzgar hızının en yüksek değerlerinin batı ve kuzeydoğu Karadeniz'de, en küçük değerlerin ise doğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç yakın gelecek ve orta gelecekte her iki RCP senaryosuna göre batı Karadeniz'in doğusuna kıyasla daha yüksek ortalama hızlara sahip rüzgarlara maruz kalacağını göstermektedir.



Şekil 6.6 Ortalama rüzgar hızının Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı (a-b) yakın gelecek (a) RCP4.5, (b) RCP8.5; (c-d) orta gelecek (c) RCP4.5, (d) RCP8.5

Tablo 6.5Ortala rüzgar hızının iki iklimi senaryona göre yakın gelecek ve orta
gelecek için istatistiksel parametreleri

	RCP4.5			RCP8.5		
V (m/s)	Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.
Yakın Gelecek (2021–2060)	2.310	5.160	6.184	2.309	5.118	6.123
Orta Gelecek (2061–2100)	2.347	5.151	6.147	2.238	5.085	6.129

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre ortalama rüzgar hızı projeksiyonları arasındaki farkları belirleyebilmek için RCP4.5 senaryosu için hesaplanan ortalama rüzgar hızı, RCP8.5 senaryosu için hesaplananlardan çıkarılmıştır

 $(V_{RCP8.5} - V_{RCP4.5})$ ve bu farkın uzamsal dağılımları **Şekil 6.7** (a ve b)'de gösterilmektedir. Farkların istatistiksel anlamlılığı Student's t-testi ile değerlendirilmiş (Scheer, 1986) ve istatiksel anlamlılığı %75 ve üzerindeki güven aralığı dikkate alınarak uzamsal dağılımı **Şekil 6.7** (c ve d)'de verilmiştir.

Yakın gelecek (2021–2060) RCP8.5 senaryosuna göre ortalama rüzgar hızı, RCP4.5 senaryosuna göre hesaplanan ortalamadan, batı ve kuzeybatı Karadeniz'de biraz daha düşük (-0.12 m/s'ye kadar) ve doğu Karadeniz'de biraz daha yüksek (+0.10 m/s'ye kadar) olduğu belirlenmiştir. Havzanın geri kalanında, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre belirlenen ortalama rüzgar hızları arasında belirgin bir farkın olmadığı, yani birbirlerine benzer ortalama hız değerleri tahmin ettiği belirlenmiştir (**Şekil 6.7**a ve c).

Orta gelecekte (2061–2100), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre belirlenen ortalama rüzgar hız değerleri arasındaki farkların sadece kuzeydoğu ve güneybatı Karadeniz'de belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu bölgelerde belirlenen negatif farklar, RCP4.5 senaryosunun orta gelecekte RCP8.5 senaryosuna göre biraz daha yüksek rüzgar hızı tahmin ettiğini göstermektedir (**Şekil 6.7**b ve d).



Şekil 6.7 Gelecek dönemler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre belirlenen ortalama rüzgar hızı arasındaki farklar (a) yakın gelecek, (b) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (c) yakın gelecek, (b) orta gelecek

6.4.2.2 Rüzgar hız projeksiyonlarının uzun dönemli değişkenliği

Rüzgar hızının uzun dönemli değişkenliği tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde, standart sapmanın (σ) ortalama değere (x_m) oranı olan, değişim katsayısı (DK) ile değerlendirilmiştir (DK ile ilgili detaylar için Bakınız Bölüm 3).

Sekil 6.7, tarihsel (1970–2005), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için Karadeniz üzerindeki rüzgar hızının uzun dönemli değişkenliğinin uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Rüzgar ikliminin uzun dönemli değişkenliği, farklı emisyon senaryolarına göre iki gelecek dönemde de tarihsel dönem için elde edilenlere benzer davranışlar göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, batıdan doğuya doğru rüzgar hızının değişkenliği belirgin bir şekilde artmaktadır. İki RCP senaryosuna göre yakın gelecek ve orta gelecek dönemlerinde rüzgarların daha güçlü olduğu batı Karadeniz'de rüzgar hızı değişkenliği nispeten daha düşük olduğu (DK≈0.45) ve havzanın daha sakin rüzgar iklimi ile karakterize edilen doğu kısmı daha fazla değişkenliğe sahip olduğu (DK ≈0.72) belirlenmiştir (Şekil 6.7). Bu sonuç, doğu Karadeniz'de, tarihsel rüzgar hız verilerinde olduğu gibi, yakın gelecek ve orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre de rüzgar hızı değişkenliğinin, batı Karadeniz'e kıyasla daha fazla olacağını göstermektedir.



Şekil 6.8 Rüzgar hızındaki uzun dönemli değişkenlik (a) tarihsel; (b–c) yakın gelecek, (b) RCP4.5, (c) RCP8.5; (d–e) orta gelecek, (d) RCP4.5, (e) RCP8.5

6.4.2.3 Rüzgar hız projeksiyonlarının değişimi

2021–2100 yıllarındaki rüzgar hız projeksiyonlarının tarihsel verilere göre nasıl değiştiğini araştırmak için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre iki gelecek zaman periyodu için hesaplanan ortalama rüzgar hızının tarihsel zaman periyodu için hesaplanan ortalamalardan ($V_{RCP} - V_{Tarih}$) çıkarılmıştır. Student's t-testine göre değerlendirilen (Scheer, 1986) istatistiksel anlamlılık seviyeleri ile uzamsal dağılımları **Şekil 6.9**'da verilmiştir.

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre, ortalama rüzgar hızı, kuzeydoğu ve güneybatı Karadeniz hariç, neredeyse tüm havzada tarihsel dönemdeki ortalama rüzgar hızdan daha yüksektir (**Şekil 6.9** a ve e). Ortalama rüzgar hızındaki bu artış, RCP8.5 senaryosu için havzanın sadece doğu kısmında meydana gelmekte ve RCP4.5 senaryosuna kıyasla güneydoğu Karadeniz'de çok daha belirgin artışlar tahmin etmektedir (**Şekil 6.9**b ve f).

Orta gelecekte tarihsel döneme göre öngörülen değişiklikler, RCP4.5 senaryosu kapsamında, doğu Karadeniz'in bazı kıyı alanları hariç, neredeyse tüm havza için

belirgin değildir (**Şekil 6.9**c ve g). Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, kuzeydoğu Karadeniz'de gelecekteki rüzgar hızında oldukça önemli bir düşüş olacağını öngörülmektedir. Ancak güney ve güneydoğu Karadeniz'de, tarihsel döneme kıyasla daha yüksek ortalama rüzgar hızlarına sahip küçük bölgeler yer almaktadır. Bu bölgelerde RCP8.5 senaryosu için öngörülen artışlar, RCP4.5 için öngörülenlerden biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.9**d ve h).



Şekil 6.9 Gelecek dönemler için iki RCP senaryosuna göre belirlenen ortalama rüzgar hızında öngörülen değişimler, (a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının sonuçlarını göstermektedir.

6.4.2.4 Rüzgar hız projeksiyonlarının değişim eğilimi

Bu çalışmada rüzgar hız projeksiyonlarının yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemlerindeki değişim eğilimi doğrusal regresyon analizi ile araştırılmıştır. Bunun için Karadeniz üzerinde her bir noktayı temsil eden

toplamda 11431 noktanın denklemi elde edilmiş ve yıllık değişim eğilimi bir Matlab yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Her biri 40 yılı kapsayan yakın gelecek ve orta gelecek için 40 yıllık değişim ise yıllık değişimin 40 ile çarpılmasıyla elde edilmiştir.

Şekil 6.10–Şekil 6.13, sırasıyla ortalama rüzgar hızının, rüzgar hızının 95. ve 99. persantillerinin ve maksimum rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğiliminin tüm Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. ΔV_m , ΔV_{95} , ΔV_{99} ve ΔV_{maks} parametreleri 40 yıllık zaman periyodundaki uzun dönemli değişimi (%) göstermektedir. Elde edilen değişim eğilimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student's t-testi ile değerlendirilmiştir (Santer vd., 2000). Rüzgar hızı değişim eğilimlerinin Karadeniz üzerinde hafif, orta ve belirgin olduğu yerleri belirlemek amacıyla ortalama rüzgar hızı için %75 ve üzeri, ekstrem (95. ve 99. persantil ve maksimum) rüzgar hızı için %90 ve üzeri güven aralığına karşılık gelen istatiksel olarak anlamlı eğilimler değerlendirilmiştir. İki RCP senaryosuna göre yakın ve orta gelecekte, büyük ölçüde benzer uzun dönemli ortalama rüzgar hızları elde edilmesine rağmen, rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğilimlerinin biraz daha farklı uzamsal dağılımlar gösterdiği belirlenmiştir.

<u>RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama rüzgar hızının uzun dönemli değişim</u> <u>eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama rüzgar hızındaki değişim, güneybatı, orta ve kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin artan eğilimler gösterirken, kuzeybatı ve doğu Karadeniz'de belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir (**Şekil 6.10**a ve e). Yakın gelecekte artan eğilim gösteren güneybatı ve orta Karadeniz, orta gelecekte belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir. Yakın gelecekte belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir. Yakın gelecekte belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir. Yakın gelecekte belirgin bir değişim eğilimi göstermeyen kuzeybatı ve doğu Karadeniz ise orta gelecekte, ortalama rüzgar hızında hafif bir azalma eğilimi göstermektedir (**Şekil 6.10**c ve g).

Bu sonuçlar, RCP4.5 senaryosuna göre ortalama rüzgar hız projeksiyonlarının 21.yy. sonuna doğru istikrarlı bir şekilde azalma eğiliminde olacağını göstermektedir.

<u>RCP8.5 senaryosuna göre yıllık ortalama rüzgar hızının uzun dönemli değişim</u> <u>eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, yakın gelecek RCP4.5 senaryosunda belirgin değişim eğilimlerinin görüldüğü, güneybatı ve kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin değişim eğilimi bu senaryoda görülmemektedir. Kuzeybatı ve doğu Karadeniz'de, ortalama rüzgar hızında çok küçük azalma eğilimi göstermektedir (**Şekil 6.10**b ve f). Orta gelecek RCP8.5 senaryosu, doğu ve kuzeybatı Karadeniz'de çok daha belirgin olmak üzere, hemen hemen tüm havzada, ortalama rüzgar hızında belirgin azalan eğilimleri öngörmektedir (**Şekil 6.10**d ve h).

21.yy. sonuna doğru, RCP8.5 senaryosu ortalama rüzgar hız projeksiyonları için RCP4.5 senaryosunun öngördüğünden daha belirgin azalan eğilimler öngörmektedir. Bu azalan eğilimler doğu Karadeniz'de, batı Karadeniz'e kıyasla daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.10 Yıllık ortalama rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğilimleri; (a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller, sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sonuçları göstermektedir.

<u>RCP4.5 senaryosuna göre yıllık 95. persantil rüzgar hızının uzun dönemli</u> <u>değişim eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık 95. persantil rüzgar hızı, güneybatı, orta ve kuzeydoğu Karadeniz'de, yıllık ortalama değerlere benzer ancak daha belirgin artan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.11**a ve e). Orta gelecek RCP4.5 senaryosunda, yakın gelecekte artan eğilim gösteren güneybatı, orta ve kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin bir eğilimin olmadığı belirlenmiştir. Güneydoğu ve kuzeybatı Karadeniz'de, yıllık 95. persantil rüzgar hızı belirgin azalan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.11**c ve g).

<u>RCP8.5 senaryosuna göre yıllık 95. persantil rüzgar hızının uzun dönemli</u> <u>değişim eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre yıllık 95. persantil rüzgar hızı, batı Karadeniz'de yıllık ortalama rüzgar hızından görülmeyen belirgin azalan eğilimler göstermektedir. Havzanın diğer bölgeleri belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir (**Şekil 6.11**b ve f). Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre batı Karadeniz'de azalan eğilimler neredeyse tüm Karadeniz'e yayıldığı ve bu azalma eğilimlerin doğu Karadeniz'de daha belirgin olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.11**d ve h).

RCP8.5 senaryosu, yıllık 95. persantil rüzgar hız projeksiyonlarının 21.yy. sonuna doğru belirgin azalma eğiliminde olacağını ve bu azalan eğilimlerin Karadeniz'in doğusunda, batısına kısayla daha etkili olacağını öngörmektedir.



Şekil 6.11 Yıllık 95. persantil rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğilimleri;
(a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's ttestine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller, sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sonuçları göstermektedir.

<u>RCP4.5 senaryosuna göre yıllık 99. persantil rüzgar hızının uzun dönemli</u> <u>değişim eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık 99. persantil rüzgar hızı, güneybatı, orta ve kuzeydoğu Karadeniz'de, yıllık ortalama değerlere benzer ancak daha yüksek oranlarda (%+8'e ulaşan) artan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.12**a ve e). Artan eğilim gösteren bu bölgeler, orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre belirgin bir eğilim göstermemektedir. Güneydoğu ve kuzeybatı Karadeniz, yıllık 99. persantil rüzgar hızında %-7'ye ulaşan oranlarda, belirgin azalma eğilimi göstermektedir (**Şekil 6.12**c ve g).

<u>RCP8.5 senaryosuna göre yıllık 99. persantil rüzgar hızının uzun dönemli</u> <u>değişim eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP8.5 senaryona göre, yıllık ortalama rüzgar hızlarının aksine, batı Karadeniz'de yıllık 99. persantil rüzgar hızı belirgin azalan eğilimler göstermektedir. Havzanın diğer bölgeleri, belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir (**Şekil 6.12**b ve f). Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, yakın gelecekte batı Karadeniz'de yıllık 99. persantil rüzgar hızındaki belirlenen azalan eğilimler ortadan kalkarken, kuzeybatı Karadeniz'de azalma eğilimi belirgin bir şekilde artarak %-8'e ulaşmaktadır (**Şekil 6.12**d ve h).



Şekil 6.12 Yıllık 99. persantil rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğilimleri;
(a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's ttestine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller, sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sonuçları göstermektedir.

<u>RCP4.5 senaryosuna göre yıllık maksimum rüzgar hızının uzun dönemli değişim</u> <u>eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık maksimum rüzgar hızı, güneybatı, batı ve doğu Karadeniz'de bazı küçük bölgelerde belirgin artan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.13**a ve e). Artan eğilim gösteren bu bölgeler orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre belirgin bir eğilim göstermediği belirlenmiştir. Orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık maksimum rüzgar hızı güneybatı ve orta Karadeniz'de azalan eğilim gösterirken, havzanın güneydoğu kıyılarının bazı küçük bölgelerinde belirgin artma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 6.13**c ve g).

<u>RCP8.5 senaryosuna göre maksimum rüzgar hızının uzun dönemli değişim</u> <u>eğilimi</u>

Yakın gelecek RCP8.5 senaryona göre, yıllık maksimum rüzgar hızı batı Karadeniz'de belirgin azalan eğilimler gösterirken, doğu Karadeniz'de bazı küçük bölgelerde belirgin artan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.13**b ve f). Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre yıllık maksimum rüzgar hızı, kuzey Karadeniz'de azalan eğilimler göstermektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre yıllık maksimum rüzgar hızı doğu Karadeniz'de, yakın gelecek RCP8.5 senaryosundan daha belirgin olan, artan eğilimler göstermektedir (**Şekil 6.13**d ve h).



Şekil 6.13 Yıllık maksimum rüzgar hızının uzun dönemli eğilimleri; (a–b) yakın gelecek, (c–d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e–f) yakın gelecek, (g–h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller, sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sonuçları göstermektedir.

Ekstrem (95. ve 99. persantil, ve maksimum) rüzgar hızları, ortalama rüzgar hızları ile uzamsal olarak benzer dağılımlar göstermesine karşın, ekstrem rüzgar hızlarındaki uzun dönemli değişim eğilimleri, yıllık ortalama rüzgar hızının uzun dönemli değişim eğilimlerinden nerdeyse 2 kat daha büyük olduğu ve istatistiksel olarak daha belirgin değişim eğilimleri gösterdiği belirlenmiştir.

6.4.3 Yerel rüzgar iklim projeksiyonları

Yakın ve orta gelecekteki rüzgar karakteristiklerinin batı-doğu değişkenliğini daha detaylı araştırmak için aynı meridyen üzerinde üç referans noktası seçilmiştir (**Şekil 6.1**). Seçilen üç nokta, genel olarak, batı, orta ve doğu Karadeniz'deki rüzgar özelliklerini temsil etmektedir (Islek vd., 2020a). Bölüm 3'te belirtildiği gibi Karadeniz'in batısında yer alan N1 (29.0°E; 42.5°N), kuvvetli ve stabil rüzgar özelliklerini temsil etmekte, Karadeniz'in doğusunda yer alan N3 (40.5E; 42.5°N) ise zayıf ve yüksek değişkenlikte rüzgar özelliklerini temsil etmektedir. Orta Karadeniz'de yer alan N2 (35.5°E; 42.5°N), orta rüzgar hızı ve orta değişkenliğe sahip rüzgar özellikleri ile N1'den N3'e geçişi temsil etmektedir.

İlk olarak, bu üç referans noktasında, rüzgar iklimindeki uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi ile araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan yıllık rüzgar ve fırtına özellikleri, yani ortalama rüzgar hızı (V_m), yıllık 99. persantil rüzgar hızı (V₉₉), yıllık fırtına süresi (t) ve yıllık fırtına sayısı (N), %90 güven sınırı ile **Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16**'da ve uzun dönemli değişim eğilim değerleri **Tablo 6.6**'da verilmiştir. Bu çalışmada, rüzgar hız verilerindeki (zaman serilerindeki) bağımsız fırtınaları belirlemek için, rüzgar hızı ve aralarındaki süre için iki eşik değer göz önünde bulundurulmuştur (Bakınız Bölüm 3). Bunun için rüzgar hızının 13.9 m/s'ye eşit veya büyük olan ve birbirini izleyen iki eşik değer (\geq 13.9 m/s) arasında en az 48 saat olan olaylar 'fırtına' olarak dikkate alınmıştır (Islek vd., 2020a).

İkinci olarak, uzun dönemli PDF grafikleri (Probability Density Function, Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) (**Şekil 6.17**) ve rüzgar hızının dönemsel değişkenliği (**Şekil 6.18** ve **Şekil 6.19**) araştırılmıştır. Üçüncü adımda ise tarihsel ve projeksiyon rüzgar hızlarının yönlü davranışını araştırmak için seçilen üç noktada rüzgar gülleri incelenmiştir (**Şekil 6.21**). Rüzgar güllerinin yönlü istatistikleri için 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak rüzgar hızının mod, medyan, ortalama değerleri irdelenmiştir (**Tablo 6.8**). Bu çalışmada detaylı araştırması yapılan yerel analizler, hem tarihsel (1970–2005), hem de gelecek (2021–2100) dönemler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre seçilen üç noktada incelenmiştir.

6.4.3.1 Tarihsel dönem için rüzgar ve fırtına özellikleri

Tarihsel dönemde (1970–2005), batı Karadeniz'de (N1) yıllık ortalama rüzgar hızı orta ve doğu Karadeniz'deki ortalamalardan önemli ölçüde daha yüksektir (**Şekil 6.15**a). Yıllık ortalama rüzgar hızındaki batı-doğu değişkenliği tarihsel dönemde belirgin şekilde görülmektedir, yani ortalama rüzgar hızı batıdan doğuya doğru belirgin şekilde azalmaktadır (**Şekil 6.15**a, **Tablo 6.6**). Seçilen üç noktadaki ekstrem rüzgar ve fırtına özellikleri (99. persantil rüzgar hızı, fırtına sayısı ve fırtına süresi) birbirlerine daha yakındır, yani ekstrem rüzgar ve fırtına özelliklerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliği belirlenememiştir. Doğu ve batı Karadeniz'de (N1 ve N3) rüzgar ve fırtına özellikleri hafifçe azalma eğilimi gösterirken, orta Karadeniz'de (N2) artan eğilimler görülmektedir. Bu artan eğilimler, fırtına özelliklerinde, yani fırtına sayısı ve fırtına süresinde, daha belirgindir (**Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16, Tablo 6.6**).

1970–2005 yılları için tarihsel EC-EARTH rüzgar veriler ile 1979–2018 yılları için ERA-Interim, ERA5 ve CFSR verilerinin seçilen üç noktada karşılaştırması **Şekil 6.14**'te verilmiştir. Hem RCA4 tarihsel hem de yeniden analiz rüzgar verileri ile elde edilen ortalama rüzgar hızında batıdan doğuya doğru azalan rüzgar hızı belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Ortalama rüzgar hızı ve 99. persantil rüzgar hızı hem RCA4 tarihsel hem de üç yeniden analiz verisi ile batı Karadeniz'de birbirlerine çok benzer rüzgar hız değerleri tahmin ederken, değişkenliğin daha fazla olduğu doğu Karadeniz'de yeniden analiz verileri, RCA4 tarihsel rüzgar verilerinden daha küçük tahmin etmektedir. Üç yeniden analiz verileri arasından CFSR verileri ile elde edilen rüzgar ve fırtına karakteristikleri üç noktada da RCA4 tarihsel verileri ile benzer eğilim göstermektedir. RCA4 tarihsel rüzgar verilerinde olduğu gibi yeniden analiz verilerinde de batı ve doğu Karadeniz'de farklı değişim eğilimleri belirlenmiştir.

Karadeniz rüzgar ve fırtına özelliklerinde belirlenen farklı eğilimlerin birçok nedeni olabilir, Bölüm 3'te belirlendiği gibi Karadeniz üzerindeki rüzgar iklimi, büyük ölçüde atmosferik sirkülasyon koşullarının etkisi altındadır. Örneğin, batı Karadeniz (N1) kuvvetli NE rüzgarlarının etkisi altındayken, orta ve doğu Karadeniz'de (N2 ve N3) NW rüzgarları hakimdir. Doğu Karadeniz'de hakim rüzgar yönünde saat yönünün tersine bir dönüş gözlenmekte ve muhtemelen bu dönüş, batısına kıyasla daha düşük rüzgar hızlarıyla sonuçlanmaktadır (Islek vd., 2020a). Belirlenen farklı eğilimlerin bir başka olası nedeni, havzanın batısının ve doğusunun farklı ortalama deniz seviyesi basınçlarına maruz kalmasından kaynaklanabilir (Bakınız Bölüm 3), çünkü batı Karadeniz, havzanın doğusuna kıyasla daha yüksek ortalama deniz seviyesi basıncına maruz kalmaktadır (Islek vd., 2020b). Ayrıca, batı Karadeniz'de antisiklonik sirkülasyon koşulları doğu Karadeniz'de siklonik sirkülasyon hakimken, koşulları hakimdir (Garmashov vd., 2016).



Şekil 6.14 Karadeniz üzerinde seçilen üç referans noktasında 1970–2005 yılları için EC-EARTH, 1979–2018 yılları için ERA-Interim, ERA5 ve CFSR verileri için rüzgar ve fırtına özelliklerinin uzun dönemli değişim eğilimi

6.4.3.2 Yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için rüzgar ve fırtına özellikleri

Yakın gelecek (2021–2060) RCP4.5 senaryosuna göre, batı ve doğu Karadeniz'de tarihsel dönemde belirlenen rüzgar ve fırtına özelliklerindeki azalan eğilimler, artan eğilimlere dönüşmektedir. Orta Karadeniz'de tarihsel dönemde belirlenen rüzgar ve fırtına özelliklerindeki artan eğilimler ortadan kalkmakta ve yakın gelecekte nerdeyse stabil hale gelmektedir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre rüzgar ikliminin davranışı, RCP4.5 senaryosuna göre belirlenen rüzgar ikliminden önemli ölçüde farklıdır, yani yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre rüzgar ve fırtına özelliklerindeki artan eğilimler, RCP8.5 senaryosuna göre rüzgar ve fırtına özelliklerindeki artan eğilimler, RCP8.5 senaryosuna göre rüzgar ve fırtına özelliklerindeki artan eğilimler, RCP8.5 senaryosunda azalan eğilimlere dönüşmektedir (**Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16, Tablo 6.6**).

Doğu Karadeniz (N3), yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre rüzgar ve fırtına özelliklerindeki farklı değişim eğilimleri ile oldukça dikkat çekici bir bölge olmaktadır. Bu bölgede ortalama ve 99. persantil rüzgar hızlarında belirgin bir eğilim belirlenmemiş ancak yıllık fırtına süresinde önemli ölçüde (%-20'ye ulaşan) azalma eğilimi, fırtına sayısında ise (%+7yi aşan) artma eğilimi belirlenmiştir. Bu sonuç, doğu Karadeniz'in, RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte daha fazla kısa süreli enerjik fırtınalara maruz kalacağını göstermektedir (**Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16, Tablo 6.6**).

Bu çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için rüzgar ve fırtına özelliklerinde bulunan farklı değişim eğilimleri, dikkate alınan dönemlerle ilgili olabilir, çünkü bir geçiş senaryosu olan RCP4.5 senaryosu, radyasyon kuvvetinin 2040 yılı civarında pike ulaşacağını ve 4.5 W/m²'de stabil olacağını varsaymaktadır. RCP8.5 senaryosu ise 2100 yılına kadar 8.5 W/m²'ye kadar yükselen bir radyasyon kuvvetini varsaymaktadır (Moss vd., 2010; Van Vuuren vd., 2011). Dolayısıyla bu iki senaryonun 2040 yılından sonra farklı değişim eğilimleri önermesi beklenen bir sonuç olmaktadır.
6.4.3.3 Orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için rüzgar ve fırtına özellikleri

Orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 senaryosuna göre, batı Karadeniz'de (N1) rüzgar özellikleri, tarihsel döneme benzer oranlarda azalma eğilimleri göstermektedir. Orta Karadeniz'de (N2), firtına özellikleri, yakın geleceğe kıyasla belirgin şekilde azalma eğilimindedir. Doğu Karadeniz'de (N3) firtına sayısı dışında yakın gelecekte belirlenen değişim eğilimlerin devam ettiği gözlenmektedir. Orta gelecekte belirlenen azalan firtına sayısı ve artan fırtına süreleri, RCP4.5 senaryosuna göre doğu Karadeniz'de, yakın geleceğe kıyasla daha uzun tekil fırtınaların meydana geleceğini işaret etmektedir (**Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16, Tablo 6.6**).

RCP8.5 senaryosuna göre havzanın batı (N1) ve orta kesimlerinde (N2) yakın gelecekte gözlenen azalan eğilimler, orta gelecekte de devam etmektedir. Doğu Karadeniz'de (N3), ortalama rüzgar hızındaki azalma eğilimi benzer oranda devam etmekte ve ekstrem rüzgar hızındaki artış eğilimi orta gelecekte daha da belirginleşmektedir. Daha da önemlisi, 17 m/s'yi aşan yıllık 99. persantil rüzgar hızının, yani tüm verilerde gözlemlenen ekstrem değerlerin, RCP8.5 senaryosu orta gelecekte daha fazla gerçekleşmesinin muhtemel olmasıdır. Orta gelecekteki fırtına süresinin nerdeyse stabil ancak fırtına sayısının azalan eğilimde olması, orta gelecekteki tekil fırtına süresinin yakın geleceğe kıyasla artacağının göstergesidir (**Şekil 6.15** ve **Şekil 6.16, Tablo 6.6**).

Bu sonuçlar, iklim değişikliğinin rüzgar iklimi üzerindeki (özellikle ekstrem koşullardaki) olası etkisinin, muhtemelen doğu Karadeniz üzerinde daha etkili olabileceğini göstermektedir. Bu bölge, havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha karmaşık atmosferik sirkülasyon koşullarının etkisi altında olduğu da belirlenmiştir, çünkü bu bölge (doğu Karadeniz); çevresindeki yüksek dağların yarattığı bariyer etkisiyle batısından farklı rüzgar ve fırtına özelliklerine (ortalama rüzgar hızı, rüzgar yönü, fırtına süresi), batısına kıyasla daha düşük ortalama deniz seviyesi basıncına, daha yüksek deniz seviyesi sıcaklığına ve dolaysıyla daha yüksek deniz seviyesi değişimine sahip olan bir bölgedir (Islek vd., 2020b).



Şekil 6.15 Karadeniz üzerinde seçilen üç referans noktasında tarihsel (1970–2005), yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) için rüzgar özelliklerinin uzun dönemli değişim eğilimi. Yıllık ortalama rüzgar hızı (V_m); (a1–a3) RCP4.5, (a4–a6) RCP8.5. Yıllık 99. persantil rüzgar hızı (V₉₉); (b1–b3) RCP4.5, (b4–b6) RCP8.5. Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir.



Şekil 6.16 Karadeniz üzerinde seçilen üç referans noktasında tarihsel (1970–2005), yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) için fırtına özelliklerinin uzun dönemli değişim eğilimi. Yıllık fırtına süresi (t); (a1–a3) RCP4.5, (a4–a6) RCP8.5. Yıllık fırtına sayısı (N); (b1–b3) RCP4.5, (b4–b6) RCP8.5. Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir.

	Nokta 1					Nokta 2				Nokta 3			
	Vm	V99	t	N	Vm	V99	t	Ν	Vm	V99	t	N	
	(m/s)	(m/s)	(h)		(m/s)	(m/s)	(h)		(m/s)	(m/s)	(h)		
	Tarihsel (1970–2005)												
maks.	7.26	16.35	354.00	18.00	6.41	15.14	210.0	17.00	5.00	16.35	228.00	15.00	
ort	6.56	14.90	181.67	11.33	5.85	14.34	120.5	9.08	4.67	14.58	129.17	8.56	
ort.	±0.52	±1.10	±115.0	±5.01	±0.41	±1.07	±70.7	± 5.10	±0.35	±1.51	±92.00	±4.69	
eğilim	-0.11	-0.16	-23.03	-0.88	0.28	0.19	17.86	1.03	-0.04	-0.47	-30.84	-1.32	
%	-1.64	-1.08	-11.92	-7.47	4.90	1.30	16.02	11.98	-0.82	-3.15	-21.34	-14.24	
	Yakın Gelecek (2021–2060) RCP4.5												
maks.	7.13	16.41	342.00	17.00	6.29	15.98	228.0	17.00	5.10	16.39	204.00	17.00	
ont	6.61	15.11	195.00	12.25	5.94	14.54	134.3	10.08	4.64	14.25	103.95	7.55	
ort.	±0.32	±1.09	±100.0	±4.07	±0.30	±1.06	±74.0	±5.37	±0.35	±1.79	±85.20	±4.78	
eğilim	0.16	0.25	13.26	2.29	0.10	0.07	6.96	0.57	0.04	0.16	17.28	1.79	
%	2.50	1.70	7.04	20.71	1.70	0.46	5.32	5.89	0.94	1.16	18.11	26.66	
	Yakın Gelecek (2021–2060) RCP8.5												
maks.	6.99	17.33	342.00	18.00	6.46	15.85	258.0	18.00	5.17	16.92	234.00	16.00	
ont	6.54	15.27	197.25	11.68	5.96	14.60	137.7	9.70	4.68	14.68	125.55	8.73	
ort.	±0.41	±1.32	±108.0	±4.86	±0.39	±1.30	±97.0	±4.73	±0.43	±1.85	±94.0	±5.11	
eğilim	-0.06	-1.05	-76.32	-3.51	-0.14	-0.45	-21.73	-1.24	-0.18	-0.32	-26.58	0.60	
%	-0.95	-6.66	-32.41	-26.29	-2.26	-3.01	-14.62	-11.96	-3.63	-2.12	-19.14	7.07	
		1	1		Orta G	elecek (20	61–2100)	RCP4.5		1			
maks.	7.06	17.01	330.00	18.00	6.30	15.71	282.0	17.00	5.01	16.99	204.00	12.00	
ont	6.56	15.09	186.60	11.28	5.88	14.30	123.9	9.35	4.57	14.17	102.45	6.90	
ort.	±0.39	±1.25	±114.0	±4.76	±0.35	±1.19	±84.1	± 5.50	±0.36	±1.54	±74.30	±3.81	
eğilim	-0.11	-0.19	-25.51	0.40	-0.06	-1.00	-65.77	-2.52	-0.07	0.38	14.58	-1.46	
%	-1.72	-0.78	-12.79	3.61	-0.99	-6.76	-41.93	-23.64	-1.44	2.75	17.65	-18.89	
		1	1		Orta G	elecek (20	61–2100)	RCP8.5		1			
maks.	7.07	17.09	354.00	16.00	6.21	16.37	276.0	18.00	5.13	17.14	330.0	14.0	
ort	6.49	14.98	178.95	10.58	5.90	14.40	129.6	9.63	4.54	14.56	125.55	7.80	
oft.	±0.44	±1.31	±109.0	±4.10	±0.33	±1.35	±95.3	±5.60	±0.37	±1.99	±110.0	±4.40	
eğilim	-0.21	-0.36	-51.30	-3.96	-0.25	-0.25	-28.67	-1.76	-0.29	0.56	3.88	-2.75	
%	-3.09	-2.40	-25.08	-31.59	-4.28	-1.73	-19.93	-16.67	-6.09	3.91	3.14	-30.22	

Tablo 6.6 Seçilen üç noktada rüzgar ve fırtına karakteristiklerinin tarihsel, yakın
gelecek ve orta gelecek dönemleri için uzun dönemli değişim eğilimleri ve
bunların %90 güven sınırı

6.4.3.4 Rüzgar hızının uzun dönemli ve dönemsel değişkenliği

Uzun dönemli PDF grafikleri, tarihsel (1970–2005) ve gelecek dönemler (2021– 2100) için iki RCP senaryosuna göre seçilen üç noktada incelenmiştir. Analiz edilen üç noktada 50. ve 99. persantil ve maksimum rüzgar hızları farklı işaretleyiciler ile PDF grafiklerinin üstünde gösterilmiştir (**Şekil 6.17**).

Coğrafi farklılığın bir sonucu olarak, Karadeniz üzerinde batıdan (N1) doğuya (N3) doğru, PDF mod değerleri, yüksek hız değerlerinden daha düşük rüzgar hız değerlerine doğru yer değiştirmektedir. Hem tarihsel hem de gelecek dönemler için rüzgar hızlarının mod değerleri batı, orta ve doğu Karadeniz'de sırasıyla yaklaşık 6.5 m/s, 5 m/s ve 3 m/s'dir. Batıdan doğuya doğru azalan rüzgar hız değerleri, ortalama, mod, 50. ve 99. persantil rüzgar hız değerlerinde hem tarihsel hem de gelecek dönemlerde tespit edilmesine karşın, maksimum hız değerlerinde biraz farklılık göstermektedir (**Şekil 6.17**). Ekstrem rüzgar hızındaki bu farklı davranış, Bölüm 6.4.3'te detaylı olarak incelenmiştir.

Tarihsel dönemde (1970–2005), batı Karadeniz'de (N1) ortalama ve maksimum rüzgar hızı değerleri sırasıyla 6.56 m/s ve 23.05 m/s'dir. Ortalama ve maksimum rüzgar hızları doğu Karadeniz'de bulunan N3'te, batı Karadeniz'de bulunan N1'deki değerlerden daha düşük olarak ortalama rüzgar hızı 4.67 m/s ve maksimum rüzgar hızı 21.02 m/s'dir. Tarihsel dönemde batı Karadeniz, yüksek rüzgar hızlarının daha yüksek olasılıklara sahip olduğu geniş bir PDF dağılımı ve daha düz kuyrukları ile sonuçlanan, güçlü bir rüzgar iklimi ile karakterize edilirken, doğu Karadeniz, düşük rüzgar hızlarının daha yüksek olasılıklara sahip olduğu dar ve dik bir PDF dağılımı ile sonuçlanan, daha zayıf rüzgar hızı ile karakterize edilmektedir (**Şekil 6.17**a).

Şekil 6.17b–e, gelecek dönemlerde (2021–2100) doğu Karadeniz'in, batı Karadeniz'den daha düşük ortalama rüzgar hızına sahip olmasına rağmen batı Karadeniz'de tespit edilen maksimum rüzgar hız değerlerinden daha yüksek rüzgar hızlarına maruz kalacağını göstermektedir. Orta Karadeniz'de (N2), tarihsel ve yakın gelecek RCP4.5 senaryosu için havzanın diğer kısımlarından daha yüksek maksimum rüzgar hızları oluşmaktadır. Ancak, yakın gelecek RCP8.5 senaryosunda en kuvvetli rüzgarlar doğu Karadeniz'de ortaya çıkmaktadır. Orta gelecek RCP8.5 senaryosu, maksimum rüzgar hızlarını RCP4.5 senaryosunun öngördüğünden biraz daha yüksek tahmin etmektedir. Bu nedenle, doğu Karadeniz'in RCP8.5 senaryosunda varsayılan yüksek radyasyon kuvvetinden daha fazla etkileneceği söylenebilir.



Şekil 6.17 Rüzgar hızının uzun dönemli PDF grafikleri; (a) tarihsel dönem, (b–c) RCP4.5 senaryosu (b) yakın gelecek, (c) orta gelecek; (d–e) RCP8.5 senaryosu (d) yakın gelecek, (e) orta gelecek. Kare, pentagram ve yıldız sırasıyla 50. ve 99. persantil ve maksimum rüzgar hız değerlerini göstermektedir.

Farklı iklim senaryoları için rüzgar hızlarının dönemsel değişkenliğini incelemek için rüzgar hızının normalleştirilmiş PDF'nin yıllar arası değişkenliği, seçilen üç noktada, incelenmiştir. Her yıl için normalleştirilmiş PDF, her yıl için elde edilen PDF'nin (**Şekil 6.17**) uzun dönemli tarihsel rüzgar hız ortalamaları için hesaplanan PDF'ye bölünmesiyle hesaplanmıştır. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için seçilen üç noktada rüzgar hızlarının normalleştirilmiş PDF'nin dönemsel değişkenliği sırasıyla **Şekil 6.18** ve **Şekil 6.19**'da verilmiştir.

Şekil 6.18 ve **Şekil 6.19**, PDF dağılımlarının genişliğinin, tarihsel dönemden yakın ve orta gelecek dönemlerine (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları) doğru kademeli olarak arttığını göstermektedir. Her iki RCP senaryosu için de gelecek dönemlerde (**Şekil 6.18**a ve b, **Şekil 6.19**a ve b), yüksek rüzgar hızı değerlerinin meydana gelme olasılığı, tarihsel dönemde oluşma olasılıklarından önemli ölçüde daha yüksektir (**Şekil 6.18**c ve **Şekil 6.19**c). Gelecek dönemlerdeki (2021–2100) ekstrem rüzgar hızlarının meydana gelmesindeki bu artış, doğu Karadeniz'de daha belirgindir. Bu bölgede RCP8.5 senaryosuna göre PDF dağılımının genişliği, RCP4.5 senaryosundaki dağılımın genişliğinden daha fazladır, yani doğu Karadeniz batı Karadeniz'den, daha yüksek ekstrem rüzgar hızlarına maruz kalmaktadır.

Ortalama rüzgar hızı değişkenliğini daha detaylı araştırmak için, iklim değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılan ortalama yıllık değişkenlik (MAV, Mean Annual Variability) endeksi değerlendirilmiştir. MAV endeksi aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$MAV = \left(\frac{\sigma}{x}\right) \tag{6.2}$$

burada *x* yıllık ortalama rüzgar hızını, σ standart sapmayı ve üst çubuk incelenen zaman dilimi için ortalamayı belirtmektedir. Denklem (6.2)'ye göre hesaplanan MAV endeksinin uzun dönemli değişim eğilimi **Şekil 6.20**'de ortalama değerleri ise **Tablo 6.7**'de verilmiştir.

Doğu Karadeniz'de yer alan N3'ün MAV endeksinin hem tarihsel hem de gelecek dönemlerde, batı Karadeniz'de yer alan N1 ve orta Karadeniz'de yer alan N2'nin MAV endeksinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Doğu Karadeniz'deki rüzgar hızının yıldan yıla, değişkenliği, havzanın diğer bölgelerine göre belirgin şekilde daha fazladır (**Şekil 6.20, Tablo 6.7**).

Batıdan doğuya doğru azalan ortalama rüzgar hızlarına, artan MAV endeksi eşlik etmektedir. Daha da önemlisi, doğu Karadeniz'deki yüksek değişkenlik, özellikle RCP8.5 senaryosu altında daha yüksek MAV endeks değerleri ile de vurgulanmaktadır (**Tablo 6.7**). Bu sonuçlar, gelecek yıllarda iki iklim senaryosuna göre rüzgar hızındaki değişkenliğin doğu Karadeniz'de daha fazla olacağını göstermektedir.



Şekil 6.18 Seçilen üç noktada rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. RCP4.5 senaryosuna göre (a) orta gelecek, (b) yakın gelecek, (c) tarihsel. Grafikler üzerindeki 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 6.19 Seçilen üç noktada rüzgar hızının normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. RCP8.5 senaryosuna göre (a) orta gelecek, (b) yakın gelecek, (c) tarihsel. Grafikler üzerindeki 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.



Şekil 6.20 MAV endeksinin uzun dönemli değişim eğilimi. Sol, orta ve sağ sütunlar sırasıyla MAV değerlerinin tarihsel, yakın gelecek ve orta gelecek için uzun dönemli değişim eğilimini göstermektedir.

		Tarihsel	Yakın ((2021-	Gelecek -2060)	Orta Gelecek (2061–2100)		
2		(1970–2003)	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	
	N1	0.4877	0.4925	0.4950	0.4900	0.4966	
	N2	0.5251	0.5230	0.5217	0.5233	0.5169	
	N3	0.6945	0.6859	0.6942	0.6886	0.7090	

Tablo 6.7 Tarihsel ve gelecek dönemler için seçilen üç noktada MAV endeksi

6.4.3.5 Rüzgar gülü

Tarihsel ve projeksiyon rüzgar hızlarının yönlü davranışını belirlemek için, rüzgar gülleri 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak 7 rüzgar hız sınıfında incelenmiştir (**Şekil 6.21**).

Hem tarihsel hem de gelecek dönemler için batı Karadeniz'de (N1) hakim rüzgar yönünün NE, ikincil hakim yönün ise SW olduğu (**Şekil 6.21**a1–e1), orta ve doğu Karadeniz'de (N2 ve N3) hakim rüzgar yönünün NW, ikincil hakim yönün ise SE olduğu (**Şekil 6.21**a2–e2, **Şekil 6.21**a3–e3) belirlenmiştir. Tarihsel ve gelecek dönemlerde, aynı noktada hakim ve ikincil hakim rüzgar yönlerinin benzer olduğu ancak sakin rüzgarların oluşma yüzdelerinin farklı olduğu belirlenmiştir.

Batı-doğu rüzgar değişkenliği, rüzgar güllerinin sakin rüzgar oluşum yüzdeleriyle belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Doğu Karadeniz'deki (N3) sakin rüzgar oluşum yüzdesinin, havzanın diğer bölümlerindeki sakin rüzgar oluşum yüzdelerinden önemli ölçüde daha yüksektir. Ancak bu bölge ile ilgili unutulmaması gereken önemli bir husus, doğu Karadeniz'deki rüzgar koşulları genellikle daha az enerjik rüzgar hızları ile karakterize edilmesine rağmen bu bölgede diğer bölgelerle karşılaştırılabilir ölçüde yüksek rüzgar hızları (ekstrem rüzgar hızları) ortaya çıkmasıdır (**Şekil 6.21**).

Rüzgar güllerinin yönlü istatistikleri (ortalama, mod ve medyan değerleri)**Tablo 6.8**'de verilmiştir. **Şekil 6.21** ve **Tablo 6.8**, batı Karadeniz'de (N1) tarihsel dönemde NNE ve ardından SW sektörlerinden esen rüzgarların daha yüksek rüzgar hızına sahip olduğunu, gelecek dönemlerde ise SW sektöründen esen rüzgar hızının NNE sektöründen esen rüzgar hızından biraz daha yüksek olacağını göstermektedir. Orta Karadeniz'de (N2) hakim rüzgar yönü WNW olmasına rağmen, W sektöründen esen rüzgarların hem tarihsel hem de gelecek dönemlerde daha yüksek ortalama rüzgar hızına sahip olduğu belirlenmiştir. Doğu Karadeniz'de (N3), hem hakim rüzgar yönünün hem de en yüksek ortala rüzgar hızının WNW sektöründen esen rüzgarları olduğu belirlenmiştir (**Tablo 6.8**).



Şekil 6.21 Rüzgar gülleri; (a) tarihsel; (b-c) RCP4.5 senaryosu (b) yakın gelecek, (c) orta gelecek; (d-e) RCP8.5 senaryosu (d) yakın gelecek (e) orta gelecek. Grafiklerin üzerindeki 1–3 numaralandırması N1–N3'ü temsil etmektedir.

Tablo 6.8 Tarihsel ve gelecek dönemler için üç referans noktasında 16 yönlü ve 1 yönden bağımsız olarak rüzgar hızının ortalama, medyan ve mod değerleri

Ort. 6.18 6.58 6.39 7.03 7.25 7.50 7.16 6.43 5.28 4.87 5.01 5.13 5.79 6.88 7.41 Medyan 6.05 6.37 6.22 6.85 6.89 7.32 7.01 6.09 4.93 4.58 4.90 5.01 5.13 5.79 6.88 7.41 Mod 6.00 6.00 6.00 7.00 6.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 4.0	5.94 5.71 5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 6.55 9.2	6.56 6.25 6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Ort. 6.18 6.58 6.39 7.03 7.25 7.50 7.16 6.43 5.28 4.87 5.01 5.13 5.79 6.88 7.41 Medyan 6.05 6.37 6.22 6.85 6.89 7.32 7.01 6.09 4.93 4.58 4.90 5.01 5.49 6.54 7.16 Mod 6.00 6.00 6.00 7.30 6.02 5.43 5.70 7.60 6.00 4.0	5.94 5.71 5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	6.56 6.25 6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Medyan 6.05 6.37 6.22 6.85 6.89 7.32 7.01 6.09 4.93 4.58 4.90 5.01 5.49 6.54 7.16 Mod 6.00 6.00 6.00 6.00 7.00 7.00 6.00 4.00 4.00 4.00 5.01 5.01 5.49 6.54 7.16 N2 Medyan 7.14 6.75 5.68 5.06 5.45 5.50 4.75 4.01 4.45 5.77 5.79 4.75 4.28 4.16 4.40 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 <th>5.71 5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92</th> <th>6.25 6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00</th>	5.71 5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	6.25 6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Mod 6.00 6.00 7.00 7.00 6.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 5.00 4.00 <th< th=""><th>5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92</th><th>6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00</th></th<>	5.00 6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	6.00 5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Ort. 7.47 7.03 6.02 5.43 5.70 5.69 5.00 4.27 4.59 5.52 5.84 5.03 4.80 4.69 4.84 Medyan 7.14 6.75 5.68 5.06 5.45 5.50 4.01 4.45 5.47 5.79 4.75 4.28 4.16 4.40 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 4.00 5.00 5.00 4.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.0	6.28 5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	5.85 5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
N2 Medyan 7.14 6.75 5.68 5.06 5.50 4.75 4.01 4.45 5.47 5.79 4.75 4.28 4.16 4.40 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 2.	5.79 3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	5.48 5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 5.00 4.00 2.00	3.00 3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	5.00 4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Ort. 5.92 7.19 4.08 3.05 2.90 3.06 3.63 3.98 4.24 5.29 5.18 3.30 2.59 2.37 2.59 Medyan 5.19 7.24 3.53 2.59 2.42 2.46 2.81 3.14 3.60 4.56 4.53 2.92 2.34 2.07 2.37 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 3.00 2.00	3.10 2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	4.67 3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
N3 Medyan 5.19 7.24 3.53 2.59 2.42 2.46 2.81 3.14 3.60 4.56 4.53 2.92 2.34 2.07 2.37 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00 3.00 4.0	2.82 2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	3.77 3.00 6.61 6.28 6.00								
Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 3.00 2.00 <th< th=""><th>2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92</th><th>3.00 6.61 6.28 6.00</th></th<>	2.00 6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	3.00 6.61 6.28 6.00								
Ort. 6.30 6.79 6.56 7.13 7.31 7.53 7.10 6.20 5.14 4.77 4.88 5.11 5.95 7.18 7.46 Medyan 6.16 6.73 6.40 6.82 7.05 7.03 6.94 4.73 4.42 4.73 4.96 5.09 6.81 7.31 Medyan 6.16 6.73 6.40 6.80 7.05 7.33 6.91 5.94 4.73 4.42 4.73 4.96 5.09 6.81 7.31 Mod 6.00 6.00 7.00 7.00 7.03 6.91 5.94 4.73 4.42 4.73 4.88 4.85 5.02 Medyan 7.18 6.89 5.74 5.35 5.62 5.37 4.63 3.87 4.40 5.23 5.72 4.88 4.35 4.51 4.68 Mod 7.00 5.00 5.00 5.00 4.00 3.00 5.00 4.34 5.22 5.18	6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	6.61 6.28								
Ort. 6.30 6.79 6.56 7.13 7.13 7.53 7.10 6.20 5.14 4.77 4.88 5.11 5.95 7.18 7.46 Medyan 6.16 6.73 6.40 6.82 7.05 7.33 6.91 5.94 4.73 4.42 4.73 4.96 5.69 6.81 7.31 Mod 6.00 6.00 6.00 6.00 7.00 7.00 6.00 4.0	6.01 5.85 6.00 6.55 5.92	6.61 6.28								
N1 Medyan 6.16 6.73 6.40 6.82 7.05 7.33 6.91 5.94 4.73 4.42 4.73 4.96 5.69 6.81 7.31 Mod 6.00 6.00 6.00 7.00 7.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00 Ort. 7.50 7.13 6.05 5.64 5.80 5.62 4.90 4.24 4.62 5.39 5.87 5.14 4.88 4.85 5.02 N2 Medyan 7.18 6.89 5.74 5.35 5.62 5.37 4.63 3.87 4.40 5.23 5.72 4.88 4.35 4.51 4.68 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00	5.85 6.00 6.55 5.92	6.28								
Mod 6.00 6.00 6.00 7.00 7.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00 Ort. 7.50 7.13 6.05 5.64 5.80 5.62 4.90 4.24 4.62 5.39 5.87 5.14 4.88 4.85 5.02 Medyan 7.18 6.89 5.74 5.35 5.62 5.37 4.63 3.87 4.40 5.23 5.72 4.88 4.35 4.51 4.68 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 <th>6.00 6.55 5.92</th> <th>6.00</th>	6.00 6.55 5.92	6.00								
Ort. 7.50 7.13 6.05 5.64 5.80 5.62 4.90 4.24 4.62 5.39 5.87 5.14 4.88 4.85 5.02 Medyan 7.18 6.89 5.74 5.35 5.62 5.37 4.63 3.87 4.40 5.23 5.72 4.88 4.35 4.61 4.60 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 5.00 4.00	6.55 5.92	0.00								
N2 Medyan 7.18 6.89 5.74 5.35 5.62 5.37 4.63 3.87 4.40 5.23 5.72 4.88 4.35 4.51 4.68 Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 4.00 3.00 4.00 5.00 5.00 4.00 5.00 4.00 2.34 2.58 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.23 1.24 2.34 2.25 1.3	5.92	5.94								
Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 4.00 3.00 4.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 4.00 4.00 4.00 5.00 4.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 4.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00	0.00	5.57								
Ort. 5.76 7.14 4.08 3.10 2.99 3.11 3.52 3.99 4.34 5.22 5.18 3.43 2.69 2.34 2.58 Medyan 5.07 7.19 3.54 2.56 2.39 2.50 2.74 3.12 3.68 4.52 4.64 3.06 2.42 2.09 2.27 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 Value Gelecek 2021-2060 RCPs. V <	5.00	5.00								
N3 Medyan 5.07 7.19 3.54 2.56 2.39 2.50 2.74 3.12 3.68 4.52 4.64 3.06 2.42 2.09 2.27 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 Value Value Celecek (2021–2060) RCP8.5 Value Celecek (2021–2060) RCP8.5 N1 Medyan 6.30 6.65 6.23 6.89 7.02 7.00 6.84 5.82 4.80 4.91 5.08 5.76 7.01 7.42 Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 6.68 7.19 Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00	3.22	4.64								
Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 4.00 4.00 3.00 2.00 <th2< th=""><th>2.95</th><th>3.77</th></th2<>	2.95	3.77								
Ort. 6.50 6.65 6.60 6.00 7.00 7.01 7.02 7.03 6.16 5.24 4.83 4.91 5.08 5.76 7.01 7.42 Medyan 6.30 6.65 6.23 6.89 7.02 7.00 6.84 5.82 4.80 4.60 4.70 4.89 5.49 6.68 7.19 Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.18 5.10 4.89 4.47 4.40 4.70 Medyan 7.29 7.20 4.05 5.13 5.35 5.46 4.45<	2.00	3.00								
Ort. 6.51 6.80 6.45 7.15 7.37 7.22 7.03 6.16 5.24 4.83 4.91 5.08 5.76 7.01 7.42 Medyan 6.30 6.65 6.23 6.89 7.02 7.00 6.84 5.82 4.80 4.60 4.70 4.89 5.49 6.68 7.19 Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00 Medyan 7.29 7.17 6.08 5.50 5.61 5.57 4.86 4.28 4.63 5.54 5.81 5.10 4.94 4.80 5.18 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.45 4.02 4.46 5.48 5.79 4.89 4.47 4.40 4.70 Mod 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 4.00 4.00 5.00	Yakın Gelecek (2021–2060) RCP8.5									
Medyan 6.30 6.65 6.23 6.89 7.02 7.00 6.84 5.82 4.80 4.60 4.70 4.89 5.49 6.68 7.19 Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00 Ort. 7.59 7.17 6.08 5.50 5.61 5.57 4.86 4.28 4.63 5.54 5.81 5.10 4.94 4.80 5.18 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.42 4.63 5.50 5.81 5.10 4.94 4.80 5.18 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.42 4.40 5.48 5.79 4.89 4.47 4.40 4.70 Mod 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 3.01 4.00 5.00 5.00 4.00 4.00	6.18	6.54								
Mod 5.00 6.00 6.00 6.00 6.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00 Ort. 7.59 7.17 6.08 5.50 5.61 5.57 4.86 4.28 4.63 5.54 5.81 5.10 4.94 4.80 5.18 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.42 4.46 5.48 5.79 4.89 4.47 4.40 4.70 Mod 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 3.00 4.00 4.00 5.00 4.00 <th>5.96</th> <th>6.22</th>	5.96	6.22								
Ort. 7.59 7.17 6.08 5.50 5.61 5.57 4.86 4.28 4.63 5.54 5.81 5.10 4.94 4.80 5.18 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.45 4.02 4.46 5.48 5.79 4.89 4.47 4.40 4.70 Mod 6.00 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 4.00 4.00 4.00 5.00 3.00 4.00	5.00	6.00								
N2 Medyan 7.29 6.95 5.70 5.13 5.35 5.46 4.45 4.02 4.46 5.48 5.79 4.89 4.47 4.40 4.70 Mod 6.00 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 4.00 4.00 5.00 5.00 4.0	6.76	5.96								
Mod 6.00 6.00 5.00 5.00 5.00 3.00 4.00 4.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 4.00	6.15	5.59								
Ort. 5.90 7.20 4.05 3.13 3.07 3.23 3.71 4.07 4.29 5.40 5.07 3.29 2.59 2.40 2.52 Madyan 5.22 7.22 3.52 2.59 2.49 2.59 2.92 3.20 3.65 4.67 4.38 2.88 2.32 2.17 2.25 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00	4.00	5.00								
N3 Medyan 5.22 7.22 3.52 2.59 2.49 2.59 2.92 3.20 3.65 4.67 4.38 2.88 2.32 2.17 2.25 Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 Orta Gelecek (2061–2100) RCP4.5 Option Optio	3.16	4.68								
Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 0.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 0.00 0.00 2.00 2.00 2.00 2.00 0.00 0.00 2.00	2.91	3.79								
Orta Geleček (2061–2100) RCP4.5	2.00	3.00								
	(21	656								
Ort. 0.39 0.90 0.43 7.04 7.18 7.29 7.09 0.19 3.03 4.09 4.89 3.03 5.74 7.06 7.00	5.07	6.36								
N1 Medyan 0.25 0.79 0.30 0.73 0.73 7.12 0.99 3.95 4.73 4.43 4.76 4.84 3.47 0.70 7.42 Medyan 0.25 0.79 0.50 0.73 0.73 7.12 0.99 3.95 4.73 4.45 4.76 4.84 3.47 0.70 7.42	5.00	6.23								
Mod 0.00 5.00 5.00 5.00 5.00 7.00 5.00 4.00 4.00 4.00 5.00 5.00 7.00 0.00 5.00 7.00 0.00 5.00 7.00 5.00 5	5.00	5.00								
OTE 7.36 7.06 5.57 5.44 5.55 5.55 4.67 4.20 4.57 5.42 5.75 4.60 4.74 4.61 5.15 N2 Median 7.27 6.01 5.65 5.12 5.26 5.26 4.50 2.07 4.1 5.22 5.65 4.63 4.24 4.24 4.72	6.09	5.50								
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4.00	5.00								
Mulu 0.00 0.00 5.00 5.00 5.00 5.00 4.00 5.00 4.00 5.00 4.00 4	3.25	1.57								
Off. 5.60 0.50 4.11 5.10 2.51 5.05 5.30 5.15 5.15 5.14 5.50 2.55 2.50 2.50 2.50 2.50 2.50 2.50	2.89	3.71								
Mod 500 600 300 200 200 200 300 300 400 300 200 200 200 200	2.00	3.00								
And 5.00 5.00 5.00 2.00 2.00 2.00 5.00 5.00	2.00	5.00								
Ort. 620 663 646 7.06 7.15 7.35 692 619 5.00 462 481 5.06 5.61 6.91 7.45	5.92	6 4 9								
NI Medvan 601 648 633 670 687 72 679 589 467 435 452 494 540 658 718	5.75	618								
Mod 6.00 6.00 6.00 6.00 7.00 6.00 7.00 6.00 4.00 4.00 5.00 6.00 7.00	5.00	6.00								
Ort. 7.52 7.10 6.00 5.42 5.70 5.56 4.81 4.36 4.51 5.53 5.84 4.78 4.59 4.65 4.80	6.41	5.90								
N2 Medvan 7.22 6.91 5.65 5.09 5.54 5.40 4.52 3.97 4.36 5.50 5.79 4.52 4.20 4.17 4.43	5.71	5.56								
Mod 7.00 6.00 5.00 5.00 5.00 5.00 4.00 3.00 4.00 5.00 5.00 4.00 4.00 4.00 4.00	4.00	5.00								
Ort. 5.98 7.05 3.83 2.95 2.88 2.93 3.45 3.95 4.27 5.30 4.98 3.28 2.58 2.47 2.55	3.20	4.54								
N3 Medvan 5.27 7.05 3.22 2.48 2.36 2.43 2.66 3.06 3.56 4.54 4.40 2.82 2.29 2.11 2.28	2.93	3.62								
Mod 5.00 7.00 3.00 2.00 2.00 2.00 3.00 3.00 4.00 3.00 2.00 2.00 2.00 2.00	2.00	3.00								

6.4.3.6 Ekstrem rüzgar iklimi

GEV dağılımı, ekstrem değer analizinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, yapılan diğer analizlerde olduğu gibi seçilen üç noktanın ekstrem değer dağılımları hem tarihsel (1970–2005) hem de gelecek dönemler (2021–2100, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları) için GEV dağılımı kullanılarak araştırılmıştır. Rüzgar hızlarının GEV dağılımları **Şekil 6.22**'de, farklı yineleme dönemlerine (10 50 100 yıl) karşılık gelen rüzgar hızları ve bu rüzgar

hızlarının tarihsel döneme göre yüzde cinsinden değişim (RD, Rölatif Değişim) değerleri **Tablo 6.9**'da verilmiştir.

Batı Karadeniz'de (N1), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre gelecek dönemlerdeki ekstrem rüzgar hızları, tüm yineleme dönemleri için tarihsel döneme göre hesaplanan ekstrem rüzgar hızlarından daha yüksektir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisi, yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre hesaplanan eğrinin belirgin bir şekilde tüm yineleme dönemleri için üzerindedir. Ancak orta gelecekte her iki senaryo için hesaplanan eğriler benzer ekstrem rüzgar hızlarıyla birbirine yakındır. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hızını, tarihsel dönemle karşılaştırıldığında, yaklaşık %7 daha yüksek tahmin etmektedir (**Şekil 6.22**a ve b, **Tablo 6.9**).

Orta Karadeniz'de (N2), yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrilerinin küçük yineleme dönemleri için birbirine oldukça yakın bulunurken, büyük yineleme dönemlerinde RCP4.5 senaryosu için hesaplana eğrinin, RCP8.5 senaryosu için hesaplanan eğrinin üzerinde olduğu bulunmuştur. Orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan eğrilerin, tüm yineleme dönemleri için birbirine oldukça yakın ekstrem rüzgar hız değerleri ile sonuçlandığı belirlenmiştir. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre gelecek dönemler için hesaplanan ekstrem rüzgar hızlarının, tüm yineleme dönemleri için tarihsel döneme göre hesaplanan ekstrem rüzgar hızlarından daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna ve orta gelecek iki RCP senaryosuna göre, 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem rüzgar hızındaki artış %12'ye ulaşmaktadır (**Şekil 6.22**c ve d, **Tablo 6.9**).

Farklı iklim senaryolarının rüzgar iklimi üzerindeki etkisi doğu Karadeniz'de (N3) daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bölgede, gelecek senaryoları için elde edilen ekstrem dağılım eğrisinin eğimi, tarihsel veriler için elde edilen eğrinin eğiminden belirgin bir şekilde daha diktir, özellikle RCP8.5 senaryosu için elde edilen eğri tarihsel ve RCP4.5 senaryosu için elde edilen eğrinin üzerindedir. Diğer bir ifadeyle iki RCP senaryosuna göre gelecek dönemler için hesaplanan ekstrem rüzgar hızları, tarihsel dönem için hesaplanan ekstrem rüzgar hızlarından önemli ölçüde daha yüksektir. Doğu Karadeniz'de, yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre ekstrem rüzgar hız değerleri, orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre, özellikle büyük yineleme dönemlerinde, önemli ölçüde daha yüksektir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu 100 yıllık yineleme dönemi için ekstren rüzgar hızını, tarihsel dönemden yaklaşık %27 daha yüksek tahmin etmektedir (**Şekil 6.22**c ve d, **Tablo 6.9**).

		V (m/s)							
Yineleme			Yakın (Gelecek	Orta Gelecek				
Nokta	Dönemi (Yıl)	Tarihsel	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5			
	10	20.84±0.50	21.48±0.48	22.42±0.54	21.62±0.49	21.38±0.49			
N1	50	22.62±0.88	23.25±0.81	24.37±0.89	23.44±0.85	23.17±0.83			
	100	23.33±1.10	23.91±1.00	25.09±1.09	24.16±1.06	23.85±1.02			
	10	20.74±0.56	22.72±0.70	22.32±0.59	22.83±0.70	22.43±0.73			
N2	50	22.81±1.08	25.43±1.29	24.55±1.04	25.52±1.28	25.24±1.34			
	100	23.73±1.39	26.55±1.64	25.43±1.31	26.61±1.61	26.40±1.70			
	10	20.49±0.32	21.78±0.51	23.19±0.83	21.39±0.40	21.89±0.62			
N3	50	21.47±0.42	23.54±0.79	26.40±1.54	22.71±0.57	24.24±1.11			
	100	21.76±0.49	24.14±0.95	27.74±1.95	23.12±0.68	25.19±1.40			
		1	$RD = [(V_{Gelecek} - V_{Tarihsel})/V_{Tarihsel}] * 100$						
	10		3.07	7.58	3.74	2.59			
N1	50		2.79	7.74	3.63	2.43			
	100		2.49	7.54	3.56	2.23			
	10		9.55	7.62	10.08	8.15			
N2	50		11.49	7.63	11.88	10.65			
	100		11.88	7.16	12.14	11.25			
	10		6.30	13.18	4.39	6.83			
N3	50		9.64	22.96	5.78	12.90			
	100		10.94	27.48	6.25	15.76			

Tablo 6.9 Seçilen üç noktada güven aralıkları ile farklı yineleme dönemleri içinekstrem rüzgar hızları ve RD değerleri



Şekil 6.22 Seçilen üç noktada yıllık oluşma olasılıklarına göre rüzgar hızının ekstrem değer dağılımı; (a–f) tarihsel, (a, b, c) yakın gelecek, (d, e, f) orta gelecek

6.5 Rüzgar Gücü Projeksiyonlarının Değerlendirmesi

Karadeniz'in rüzgar gücü projeksiyonları, iki RCP (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için araştırılmıştır. Rüzgar gücünde öngörülen değişimleri belirlemek için tarihsel (1970–2005) ve yakın gelecek ile tarihsel ve orta gelecek dönemler arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. İlk olarak türbinin motor göbek yüksekliği belirlenmiştir. Letcher (2017) ve Ganea vd. (2018) açık deniz rüzgar

türbinlerinde, tipik motor göbek yüksekliğinin yaklaşık 100 m olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, 100 m yükseklikteki rüzgar gücü potansiyeli dikkate alınmış ve deniz seviyesinden 10 m yükseklikte rüzgar hızları, motor göbek yüksekliği (100 m) seviyesine logaritmik rüzgar profili formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşıma göre rüzgar hızı yükseklikle birlikte kabaca logaritmik olarak arttığı kabul edilmektedir ve aşağıda verildiği gibi dikkate alınmaktadır (Ganea vd., 2018; Yamada ve Mellor 1975; Kubik vd., 2011; Koletsis vd., 2014; Rusu 2019a):

$$U_{100} = U_{10} \left[\frac{\ln(z_{100}/z_0)}{\ln(z_{10}/z_0)} \right]$$
(6.3)

burada U_{100} ve U_{10} sırasıyla 100 m ve 10 m yükseklikteki rüzgar hızını, z_0 ise 0.0002 m olarak dikkate alınan (Ganea vd., 2018; Rusu 2019a) yüzey pürüzlülüğü uzunluğunu göstermektedir. 100 m yükseklikteki rüzgar gücü yoğunluğu WPD (Wind Power Density, W/m²), ρ havanın özgül kütlesini (1.225 kg/m³) ve 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızını (V_m) kullanarak aşağıda verilen ifade yardımıyla hesaplanmıştır (Bakınız Bölüm 3):

$$WPD = \frac{1}{2}\rho V_{\rm m}^3 \tag{6.4}$$

6.5.1 Rüzgar gücü projeksiyonlarının uzun dönemli ortalamaları

Şekil 6.23(a–e), tarihsel (1970–2005), yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için ortalama WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımını göstermektedir. Hem tarihsel hem de gelecek dönemler için Karadeniz üzerinde benzer ortalama WPD uzamsal dağılımları belirlenmiştir, yani batı Karadeniz havzanın diğer kısımlarına kıyasla daha yüksek ortalama WPD'ye sahiptir.

Batı Karadeniz'in daha yüksek rüzgar gücü potansiyeline sahip olması, batı-doğu rüzgar değişkenliğinin bir sonucu olarak havzanın batısının daha yüksek rüzgar hızlarına maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar yeniden analiz rüzgar verileri ile yapılan önceki çalışmalarda da belirlenmiş (Islek vd., 2020a; Rusu 2019a) ve rüzgar hızındaki küçük bir değişimin rüzgar hızının üçüncü kuvvetiyle orantılı olan WPD'de (Denklem 6.4) belirgin bir değişime neden olduğu belirtilmiştir (Islek vd., 2020a). Karadeniz üzerindeki rüzgar koşulları, havzanın coğrafi özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Havzanın doğusundaki Kafkas Dağları ve güney sınırlarındaki Kuzey Anadolu Dağları, doğu, güney ve güneydoğudan gelen rüzgarlara engel teşkil etmekte ve Karadeniz rüzgar özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bunun bir sonucu olarak batı Karadeniz'deki hakim rüzgar yönü NE iken, doğu Karadeniz'de hakim rüzgar yönü, saat akrebinin tersi yönünde bir dönüş ile, NW olarak değişmektedir (Islek vd., 2020a; Islek vd., 2021a). Doğu Karadeniz'de hakim rüzgar yönündeki bu dönüş, azalan ortalama rüzgar hızları ile zayıf rüzgar koşullarını oluşturmakta ve denizin diğer bölgelerine göre daha az enerjik rüzgar gücü potansiyeli ile sonuçlanmaktadır.

215 W/m² ve 213 W/m² ortalama WPD değerleri ile yakın gelecek (2021–2060) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları, 209 W/m² ve 205 W/m² ortalama WPD değerleri ile orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre biraz daha yüksek ortalama WPD değerlerini öngörmektedir. Yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ortalama WPD, 210 W/m² ortalama değer ile tarihsel döneme (1970–2005) göre hesaplanandan biraz daha yüksekken, orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ortalama değerler tarihsel dönemde elde edilenlerden biraz daha düşüktür.

Yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ortalama WPD'nin maksimum değerleri sırasıyla 330 W/m²'yi aşarken, orta gelecek her iki RCP senaryosuna göre ortalama WPD'nin maksimum değerleri, tarihsel dönemde elde edilenden (327 W/m²) biraz daha düşük olarak 326 W/m²'ye ulaşmaktadır.



Şekil 6.23 Ortalama WPD'nin uzamsal dağılımı, (a) tarihsel; (b–c) yakın gelecek (b) RCP4.5, (c) RCP8.5; (d–e) yakın gelecek (d) RCP4.5, (e) RCP8.5

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ortalama WPD projeksiyonları arasındaki farkları daha detaylı araştırmak için RCP4.5 senaryosu için hesaplanan ortalama WPD değerleri, RCP8.5 senaryosu ile hesaplananlardan çıkarılmıştır ($WPD_{RCP8.5} - WPD_{RCP4.5}$) ve bu farkın uzamsal dağılımları **Şekil 6.24** (a ve b)'de gösterilmiştir. Rüzgar hız projeksiyonlarında olduğu gibi (Bölüm 6.4.2) farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre (Scheer, 1986) istatistiksel olarak anlamlı ortalama WPD değerlerinin uzamsal dağılımları **Şekil 6.24** (c ve d)'de verilmiştir.

Yakın gelecek (2021-2060) RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna göre hesaplanan ortalama WPD değerlerini kuzey ve kuzeybatı Karadeniz bölgelerinde (-16 W/m²'ye ulaşan) biraz daha düşük ve doğu Karadeniz'de (+5 W/m²'ye ulaşan) biraz daha yüksek ortalama WPD değerleri öngörmektedir. Havzanın geri kalanında, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre belirlenen ortalama WPD değerleri arasında belirgin bir farkın olmadığı, yani birbirlerine benzer ortalama WPD değerleri tahmin ettiği belirlenmiştir (**Şekil 6.24**a ve c). Orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplanan ortalama WPD değerleri arasındaki farkların sadece kuzeybatı ve güneybatı Karadeniz'de belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu bölgelerde belirlenen negatif farklar, RCP4.5 senaryosunun RCP8.5 senaryosuna göre daha yüksek rüzgar hızı dolayısıyla daha yüksek WPD değerleri tahmin ettiğini göstermektedir (**Şekil 6.24**b ve d).



Şekil 6.24 Gelecek dönemeler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hesaplana ortalama WPD değerleri arasındaki farklar (a) yakın gelecek, (b) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı

6.5.2 Rüzgar gücü projeksiyonlarının değişimi

2021–2100 yıllarındaki WPD projeksiyonlarının tarihsel verilere göre nasıl değiştiğini araştırmak için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre iki gelecek zaman periyodu için hesaplanan ortalama WPD değerleri tarihsel zaman periyodu için hesaplanan ortalamalardan çıkarılmış ve aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır:

$$GD = WPD_{RCP} - WPD_{Tarihsel}$$
(6.5)

Şekil 6.25 (a–d), her iki iklim senaryosuna göre yakın gelecekte (2021–2060) ve orta gelecekte (2061-2100) tarihsel döneme göre ortalama WPD'de öngörülen değişikliklerin Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımını göstermektedir.

Hesaplanan GD'nin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student's t-testine göre değerlendirilmiş (Scheer, 1986) ve Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 6.25** (e–h)'da verilmiştir.

Yakın gelecekte yıllık ortalama WPD'de öngörülen değişimler (GD):

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre, ortalama WPD, kuzeydoğu ve güneybatı Karadeniz hariç, neredeyse tüm Karadeniz'de tarihsel dönemdeki ortalama WPD değerlerinden daha yüksektir (**Şekil 6.25**a ve e). Bu öngörülen artışlar, güneydoğu Karadeniz'de, özellikle güneydoğu kıyı bölgelerinde, en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Aynı dönem için RCP8.5 senaryosu ortalama WPD'de sadece doğu Karadeniz'de, özellikle güneydoğu bölgesinde, belirgin artışlar öngörmekte ve RCP4.5 senaryosuna kıyasla güneydoğu Karadeniz'de daha belirgin artışlar tahmin etmektedir (**Şekil 6.25**b ve f).

Orta gelecekte yıllık ortalama WPD'de öngörülen değişiklikler (GD):

Orta gelecek RCP4.5 senaryosu, güneydoğu Karadeniz'de, özellikle güneydoğu kıyı bölgelerinde, ortalama WPD'de belirgin bir artışı öngörmektedir. Havzanın geri kalan bölgelerinde ise neredeyse stabil olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.25**c ve g). Aynı dönem için, RCP8.5 senaryosu ortalama WPD'de kuzeydoğu Karadeniz'de belirgin bir azalmayı öngörmesine karşın güneydoğu Karadeniz'de belirgin artış gösteren bazı küçük bölgelerin olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.25**d ve h).



Şekil 6.25 Gelecek dönemler için iki RCP senaryosuna göre ortalama WPD'de öngörülen değişimler, (a, b) yakın gelecek, (c, d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) yakın gelecek, (g, h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının sonuçlarını göstermektedir.

6.5.3 Rüzgar gücü projeksiyonlarının mevsimsel ortalamaları

Karadeniz'in rüzgar gücü projeksiyonlarının mevsimsel ölçekte değerlendirmesi, iki RCP (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryosuna göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için araştırılmıştır. Mevsimsel ortalama rüzgar gücünde öngörülen değişimler, rüzgar gücü projeksiyonlarında olduğu gibi (Bakınız Bölüm 6.5), iki gelecek dönem ve tarihsel dönem (1970–2005) için hesaplanan mevsimsel ortalama WPD değerlerinin karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. Tarihsel ve gelecek dönemler için mevsimsel ortalama WPD'nin uzamsal dağılımı sırasıyla **Şekil 6.26** ve **Şekil 6.27**'de verilmiştir ve bazı istatistiksel parametreler **Tablo 6.10**'da özetlenmiştir. Bu şekillerde, her mevsim için ortalama WPD, olağan mevsimsel aylara göre hesaplanmıştır: kış–AOŞ (Ara–Oca–Şub), ilkbahar–MNM (Mar–Nis–May), yaz–HTA (Haz–Tem–Ağu) ve sonbahar–EEK (Eyl–Eki–Kas).

Tarihsel dönemde en enerjik rüzgar koşullarına kış mevsiminin sahip olduğu ve bunu sırasıyla sonbahar, ilkbahar ve yaz mevsimlerinin izlediği tespit edilmiştir. Kış mevsiminde, en yüksek ortalama WPD kuzeydoğu (624 W/m²) ve güneybatı (530 W/m²) Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir (**Şekil 6.26**a, **Tablo 6.10**). Sonbahar (360 W/m²) ve ilkbahar (313 W/m²) mevsimlerinde de en yüksek ortalama WPD, kış mevsiminde olduğu gibi aynı bölgelerde ancak kış mevsiminde hesaplanan ortalama WPD'nin neredeyse yarısı olduğu tespit edilmiştir (**Şekil 6.26**b ve d, **Tablo 6.10**). Beklendiği gibi, en az enerjik rüzgar koşullarına sahip olan mevsimin yaz olduğu ve en yüksek ortalama WPD'nin 199 W/m²'ye ulaştığı belirlenmiştir (**Şekil 6.26**c, **Tablo 6.10**). Batı Karadeniz'den doğu Karadeniz'e doğru kademeli olarak azalan ortalama WPD değerleri ile mevsimsel ortalama WPD'nin uzamsal dağılımları, ortalama WPD'nin uzamsal dağılımlarına (**Şekil 6.23**) benzer bulunmuştur.



Şekil 6.26 Tarihsel dönem için mevsimsel ortalama WPD'nin uzamsal dağılımı,(a) kış, (b) ilkbahar, (c) yaz, (d) sonbahar

Kış aylarında mevsimsel ortalama WPD (**Şekil 6.27**a), yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sırasıyla 668 W/m² ve 629 W/m² ile maksimum değerine ulaşmaktadır. Orta gelecekte iki RCP senaryosu için elde edilen ortalama

değerler, yakın gelecek iki RCP senaryosu için elde edilen değerlerden biraz daha düşüktür. Yıllık ortalama WPD'ye en büyük katkıyı sağlayan mevsimin kış olduğu **Tablo 6.10**'dan açık bir şekilde görülmektedir.

İlkbahar mevsiminde ortalama WPD (**Şekil 6.27**b), yakın gelecek her iki RCP senaryosu için de yaklaşık 198 W/m²'ye kadar düşmektedir. RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla 196 W/m² ve 191 W/m² ortalama değerler ile orta gelecek, her iki iklim senaryosuna göre yakın gelecek için olanlardan biraz daha düşüktür. (**Tablo 6.10**).

Yaz mevsimi için ortalama WPD (**Şekil 6.27**c), iki gelecek dönem ve iki RCP senaryosuna göre diğer mevsimlerden oldukça daha düşük ortalama değerlere sahiptir (**Tablo 6.10**).

Sonbahar mevsiminde ortalama WPD (**Şekil 6.27**d) artmaya başlamakta ve en yüksek ortalama değerine yakın gelecek RCP4.5 senaryosunda ulaşmaktadır. Orta gelecekte mevsimsel ortalama WPD, yakın gelecek RCP4.5 senaryosu için elde edilen ortalamadan biraz daha düşük, ancak yakın gelecek RCP8.5 senaryosu için elde edilen ortalamadan biraz daha yüksektir (**Tablo 6.10**).

			RCI	24.5	RCP8.5		
			Yakın	Orta	Yakın	Orta	
			Gelecek	Gelecek	Gelecek	Gelecek	
	Min.	37.3987	38.6601	38.7953	42.4957	36.7878	
KIŞ	Ort.	368.3203	395.8821	378.6535	389.1097	374.9181	
	Maks.	624.0905	667.7930	616.6318	628.6219	592.4859	
	Min.	18.5093	19.9195	19.3644	20.4765	18.1038	
İLKBAHAR	Ort.	192.4267	197.0799	195.7714	198.6795	191.1108	
	Maks.	313.4404	309.4103	312.8608	317.6212	299.3468	
	Min.	7.1225	6.8619	6.9617	7.0411	6.0792	
YAZ	Ort.	115.0684	113.3020	112.4537	113.2568	106.8649	
	Maks.	199.4147	207.7012	210.8964	213.1223	239.3721	
	Min.	17.4800	15.5418	15.1307	15.3752	14.2040	
SONBAHAR	Ort.	220.3995	218.6556	206.7682	210.9503	211.7379	
	Maks.	360.1596	370.3463	346.8888	353.5035	351.5212	

Tablo 6.10Mevsimsel ortalama WPD'nin tarihsel ve gelecek dönemler için
istatistiksel parametreleri



Şekil 6.27 Gelecek dönemler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre mevsimsel ortalama WPD'nin uzamsal dağılımı. Satırlar mevsimleri, sütunlar iki RCP senaryosuyla ilgili gelecek dönemleri temsil etmektedir.

6.5.4 Rüzgar gücü projeksiyonlarının mevsimsel değişimi

Mevsimsel ortalama WPD'de öngörülen değişimler, ortalama WPD'de olduğu gibi GD (Gelecek Değişim) (Bölüm 6.5.2, Denklem 6.5) kullanılarak değerlendirilmiştir. Student's t testine (Scheer, 1986) göre değerlendirilen istatistiksel anlamlılık düzeyleri ile mevsimsel ölçekte GD'nin uzamsal dağılımları yakın gelecek ve orta gelecek için sırasıyla **Şekil 6.28** ve **Şekil 6.29**'da verilmiştir.

<u>Kış mevsimi için ortalama WPD öngörülen değişimler:</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosu (**Şekil 6.28**a1 ve a2), neredeyse tüm Karadeniz üzerinde mevsimsel ortalama WPD'de belirgin artışlar öngörmektedir ve bu değişimlerinin kuzeybatı Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.28**a3 ve a4) mevsimsel ortalama WPD'deki değişimler doğu Karadeniz'de RCP4.5 senaryosu ile elde edilenlerden biraz daha yüksek değerlerle önemli ölçüde artmaya devam etmektedir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre mevsimsel ortalama WPD'deki en yüksek artışın doğu Karadeniz'de, RCP4.5 senaryosuna göre ise kuzeybatı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, doğu Karadeniz'in RCP8.5 senaryosunda varsayılan yüksek radyasyon kuvvetinden daha fazla etkilendiğini göstermektedir.

Orta gelecek RCP4.5 senaryosu (**Şekil 6.29**a1 ve a2), yalnızca batı ve güneydoğu Karadeniz'de mevsimsel ortalama WPD'de hafif bir artışı tahmin etmektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.29**a3 ve a4), kuzeybatı Karadeniz'deki ortalama WPD'deki artışlar, RCP4.5 senaryosu ile elde edilenlerden biraz daha yüksek değerlerle devam etmektedir. Orta gelecekte her iki RCP senaryosuna göre mevsimsel ortalama WPD'deki en yüksek artışın batı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir.

İlkbahar mevsimi için ortalama WPD'de öngörülen değişimler:

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosu (**Şekil 6.28**b1 ve b2), mevsimsel ortalama WPD'de güneydoğu Karadeniz'de belirgin artışları öngörürken, batı Karadeniz'de belirgin bir değişimin olmayacağını öngörmektedir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu (**Şekil 6.28**b3 ve b4) mevsimsel ortalama WPD'de sadece orta ve güneydoğu Karadeniz'de belirgin artışları tahmin etmektedir. Yakın gelecek RCP4.5 senaryosunda olduğu gibi RCP8.5 senaryosunda da mevsimsel ortalama WPD batı Karadeniz'de stabil kalmaktadır. Yakın gelecekte her iki RCP senaryosuna göre mevsimsel ortalama WPD'deki en yüksek artışın güneydoğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir.

Orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.29**b1 ve b2) mevsimsel ortalama WPD, güneydoğu Karadeniz'de belirgin artışlar göstermeye devam etmektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosu (**Şekil 6.29**b3 ve b4) güneydoğu Karadeniz'de RCP4.5 senaryosunun öngördüğünden daha yüksek artışlar tahmin etmektedir. Orta gelecekte, RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna göre belirgin bir değişim olmadığı, batı Karadeniz'de hafif bir azalmayı tahmin etmektedir.

Yaz mevsimi için WPD'de öngörülen değişimler:

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.28**c1 ve c2) Karadeniz havzası, mevsimsel ortalama WPD'de belirgin bir değişim göstermemektedir. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu (**Şekil 6.28**c3 ve c4), mevsimsel ortalama WPD'de güneydoğu Karadeniz kıyı bölgelerinde hafif bir artışı ve batı Karadeniz'de, güneybatı Karadeniz hariç, hafif bir azalmayı öngörmektedir. Yakın gelecekte RCP8.5 senaryosuna göre mevsimsel ortalama WPD'de öngörülen değişimler, RCP4.5 senaryosuna göre öngörülenlerden biraz daha yüksektir.

Orta gelecek RCP4.5 senaryosu (**Şekil 6.29**c1 ve c2), denizin güneydoğu kıyı bölgelerinde mevsimsel ortalama WPD'de artışları öngörürken, batı Karadeniz'de, güneybatı kıyı bölgesi hariç, azalmaları öngörmektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.29**c3 ve c4), mevsimsel ortalama WPD'deki değişimler denizin güneydoğu kıyı bölgesinde belirgin artışlarla, batı ve kuzeydoğu Karadeniz'de ise belirgin azalmalarla devam etmektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosu mevsimsel ortalama WPD'de, RCP4.5 senaryosuna kıyasla daha yüksek değişimler tahmin etmektedir.

Sonbahar mevsimi için WPD'de öngörülen değişimler:

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.28**d1 ve d2), mevsimsel ortalama WPD neredeyse tüm havzada stabil kalmaktadır yani tarihsel döneme kıyasla belirgin bir değişim yoktur. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu (**Şekil 6.28**d3 ve d4), mevsimsel ortalama WPD'de tüm Karadeniz'de hafif azalmaları öngörmektedir ve bu değişimler güneybatı Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha belirgindir.

Orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.29**d1 ve d2) mevsimsel ortalama WPD doğu Karadeniz'de daha belirgin düşüşlerle birlikte tüm Karadeniz'de azalmaktadır. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre (**Şekil 6.29**d3 ve d4) mevsimsel ortalama WPD'deki değişimler, doğu Karadeniz'de belirgin bir düşüş sergilemeye devam etmektedir.



Şekil 6.28 Mevsimsel ortalama WPD'de yakın gelecek için öngörülen değişimler ve bunların farklı güven seviyeleri için Student t-testine göre istatistiksel anlamlılığı. Satırlar mevsimleri, sütunlar yakın gelecek iki RCP senaryosuna göre elde edilen sonuçları temsil etmektedir.



Şekil 6.29 Mevsimsel ortalama WPD'de orta gelecek için öngörülen değişimler ve bunların farklı güven seviyeleri için Student t-testine göre istatistiksel anlamlılığı. Satırlar mevsimleri, sütunlar orta gelecek iki RCP senaryosuna göre elde edilen sonuçları temsil etmektedir.

6.5.5 Rüzgar gücü projeksiyonlarının değişkenliği

Projelenen rüzgar gücünün zamansal değişkenliği; değişim katsayısı (DK), aylık değişkenlik indeksi (AD) ve mevsimsel değişkenlik indeksi (MD) kullanılarak üç zamansal değişkenlik katsayısı ile araştırılmıştır. Değişim katsayısı (DK), ortalama ile ilgili değişkenlik miktarını belirler ve standart sapmanın (σ) ortalamaya (x_m) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Rüzgar gücünün zamansal değişkenliğini hesaplamak için mevsimsel ve aylık değişkenlik endeksleri kullanılmıştır ve aşağıda verildiği gibi dikkate alınmıştır (Cornet, 2008; Gonçalves, 2018):

$$DK = \frac{\sigma}{x_m}$$
(6.6)

$$AD = \frac{P_{A1} - P_{A2}}{P_{y1l}}$$
(6.7)

$$MD = \frac{P_{M1} - P_{M2}}{P_{y1l}}$$
(6.8)

burada P_{A1} ve P_{A2} , sırasıyla en çok ve en az enerjik aylar için ortalama WPD'yi; P_{M1} ve P_{M2} , sırasıyla en çok ve en az enerjik mevsimler için ortalama WPD'yi; ve P_{vll} ise ortalama WPD'yi temsil etmektedir.

Şekil 6.30, projelenen rüzgar gücünün değişkenliğini değerlendirmek için 80 yıllık dönem (2021–2100) dikkate alınarak hesaplanan DK, AD ve MD indekslerinin Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Üç indeks boyutsuz olduğundan, homojen bir karşılaştırma yapabilmek için uzamsal dağılımların gösteriminde aynı ölçek kullanılmıştır. Her iki RCP senaryosu için maksimum DK değerleri, önceki çalışmalarda da olduğu gibi doğu Karadeniz'de belirlenmiştir (Islek vd., 2020a; 2020b; 2021a; Islek ve Yuksel 2021). RCP4.5 senaryosuna göre hesaplanan DK değerlerin RCP8.5 senaryosuna göre hesaplananlardan biraz daha düşük olduğu tespit edilmiştir (**Şekil 6.30**a ve b). AD değerleri MV değerlerinden biraz daha yüksektir, yani Karadeniz üzerinde rüzgar gücünün aylık değişimleri mevsimsel değişimlerden daha fazladır. Bu üç zamansal değişkenlik indekslerinin maksimum değerleri, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sırasıyla AD için 2.81 ve 2.88 ve MD için aylık değişimlerden biraz daha yüksek olarak sırasıyla 2.52 ve 2.56 olarak hesaplanmıştır. Aylık ve mevsimsel değişkenlik indekslerinin maksimum değerlerinin, DK'da olduğu gibi, doğu Karadeniz'de olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, doğu Karadeniz'in rüzgar gücünün zamansal değişkenliğinin havzanın diğer bölgelerine göre daha fazla değişken olduğunu göstermektedir. Gelecek yıllar için RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosunun öngördüğünden daha yüksek zamansal değişkenlik indeksi değerleri öngörmektedir. Bu sonuç, daha yüksek radyasyon kuvvetini varsayan RCP8.5 senaryosunun doğu Karadeniz'deki rüzgar gücünde daha fazla değişikliğe yol açacağını göstermektedir.



Şekil 6.30 Rüzgar gücü zamansal değişkenlik indekslerinin uzamsal dağılımları. Sol ve sağ paneller sırasıyla gelecek dönem (2021–2100) için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları ile elde edilen sonuçları göstermektedir.

6.5.6 Yerel rüzgar gücü projeksiyonları

Projelenen rüzgar gücünün aylık değişkenliği, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 2021–2100 yılları arasındaki her yılın her ayı için ortalama WPD değerleri kullanılarak 15 referans noktasında ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Tüm Karadeniz çalışma alanını kapsayacak şekilde seçilen 15 nokta, rüzgar gücünün zamansal değişkenliğinin düşük ve rüzgar gücü potansiyelinin yüksek olduğu batı Karadeniz'de yoğunlaştırılmıştır (Islek ve Yuksel 2021). Referans noktalarının yerleri **Şekil 6.31**'de gösterilmiş ve özellikleri **Tablo 6.11**'de verilmiştir.



Şekil 6.31 Yerel rüzgar gücü projeksiyonunun detaylı analizleri için seçilen 15 referans nokta

	Enlem	Boylam	Derinlik	2020–2100 için değişkenlik indeksleri						
Nokta					RCP4.5		RCP8.5			
	U U	U U	(III)	DK	AD	MD	DK	AD	MD	
P1	44.2	33.9	-90	1.50	1.38	1.21	1.51	1.30	1.23	
P2	44.1	38.6	-270	1.65	2.04	1.92	1.67	2.01	1.87	
P3	43.0	40.1	-1035	2.01	2.37	2.18	2.15	2.39	2.19	
P4	41.8	41.2	-1100	2.54	1.76	1.45	2.54	1.62	1.48	
P5	41.2	38.0	-1180	1.76	1.45	1.28	1.77	1.38	1.25	
P6	42.1	35.0	-2000	1.79	0.53	0.33	1.79	0.51	0.29	
P7	41.7	32.1	-1150	1.74	1.29	1.10	1.76	1.36	1.15	
P8	41.4	30.7	-1300	1.49	1.38	1.23	1.51	1.47	1.27	
P9	41.4	29.1	-100	1.48	1.17	1.13	1.51	1.25	1.12	
P10	42.3	28.1	-65	1.59	1.08	1.14	1.61	1.19	1.17	
P11	43.3	28.6	-50	1.44	1.15	1.20	1.46	1.26	1.21	
P12	44.5	29.7	-48	1.35	1.28	1.21	1.38	1.31	1.24	
P13	45.4	30.3	-21	1.34	1.23	1.17	1.36	1.23	1.21	
P14	46.0	31.1	-20	1.34	1.25	1.20	1.36	1.25	1.24	
P15	45.2	32.4	-45	1.31	1.17	1.09	1.32	1.15	1.09	

 Tablo 6.11
 Detaylı analizler için seçilen 15 referans noktasının özellikleri

80 yıllık dönem (2021–2100) dikkate alındığında seçilen 15 noktada aylık ortalama WPD'deki değişimler **Şekil 6.32**'de gösterilmektedir. Beklendiği gibi

aylık ortalama WPD değerleri kış aylarında (AOŞ), yaz aylarında (HTA) olduğundan çok daha yüksektir. Ortalama WPD'ye en büyük katkının her iki RCP senaryosu için kış aylarından geldiği açık bir şekilde gözlenmektedir (**Şekil 6.32**).

Kuzey-orta Karadeniz'de yer alan P1, her iki RCP senaryosu için kasımdan şubata kadar nispeten yüksek bir ortalama WPD'ye, ancak hazirandan ağustosa kadar nispeten düşük bir ortalama WPD'ye sahiptir. Kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan P2, her iki RCP senaryosu için kasımdan şubata kadar en yüksek ortalama WPD'ye, ancak hazirandan ağustosa kadar en düşük ortalama WPD'ye sahiptir. Bu sonuç, aylık ortalama WPD değerleri arasında büyük bir değişkenliğin olduğunu göstermektedir. Doğu Karadeniz'de yer alan P3, her iki RCP senaryosu için kasımdan subata kadar nispeten yüksek bir ortalama WPD'ye sahiptir. Bu dalgalanmanın bir sonucu olarak P3 de aylık ortalama WPD değerleri arasında büyük değişkenlik göstermektedir. Doğu Karadeniz'de yer alan P4 ve güneydoğu Karadeniz'de yer alan P4 ve güneydoğu Karadeniz'de yer alan P4 ve güneydoğu Karadeniz'de yer alan P4 ve güneydoğu Karadeniz'de yer alan P5, her iki RCP senaryosu için tüm aylar boyunca nispeten düşük ortalama WPD'ye sahiptir. Güney-orta Karadeniz'de yer alan P6, her iki RCP senaryosu için oldukça düşük değişkenlikle nispeten düşük ortalama WPD'ye sahiptir (**Şekil 6.32, Tablo 6.11**).

Batı Karadeniz'de yer alan noktalar (P7–P15), iki RCP senaryosu için havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek ortalama WPD'ye sahiptir. Güneybatı Karadeniz'de yer alan (P7–P10), P7 her iki RCP senaryosu için mayıs–ağustos ayları arasında neredeyse en düşük ortalama WPD'ye eşit olan nispeten düşük bir ortalama WPD'ye sahiptir, ancak kasımdan şubata kadar nispeten yüksek bir ortalama WPD'ye sahiptir. Aylar arasındaki bu dalgalanma, zamansal değişkenlik endekslerinde de yüksek değerler ile sonuçlanmıştır. Her iki RCP senaryosu için P8; kasımdan şubata kadar, P9; ekimden nisana ve P10, ekimden şubata kadar nispeten yüksek bir ortalama WPD'ye sahiptir. Batı Karadeniz'de yer alan P11, her iki RCP senaryosu için eylülden marta kadar nispeten yüksek bir ortalama WPD'ye sahiptir. Kuzeybatı Karadeniz'de yer alan noktalardan P12, P13 ve P14, her iki RCP senaryosu için şubattan kasıma kadar nispeten yüksek ortalama WPD'ye sahiptir. Kuzeybatı Karadeniz'de yer alan P15, her iki RCP senaryosu için tüm aylar boyunca genellikle nispeten yüksek ortalama WPD'ye sahiptir.



Şekil 6.32 Seçilen 15 noktada 2021–2100 yılları arasındaki 80 yıllık dönem için ortalama WPD'nin aylık değişkenliği; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5

80 yıllık dönem (2021–2100) için projelenen rüzgar gücünün dönemsel değişkenliği yönlü olarak 15 referans noktasında ayrıntılı olarak

değerlendirilmiştir. **Şekil 6.33**, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre her yıl için 16 yöndeki ortalama WPD'nin değişkenliğini göstermektedir.

2021–2100 gelecek dönemi için her iki RCP senaryosuna göre seçilen 15 noktada hesaplanan ortalama WPD'nin yönlü davranışı için bulunan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

• Kuzey-orta Karadeniz'de yer alan P1 için ENE yönünden esen rüzgarlar en büyük ortalama WPD'ye sahiptir.

• Kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan P2'ye ortalama WPD'deki en büyük katkıyı NE ve SSE yönlerinden esen rüzgarlar sağlamaktadır.

• Doğu Karadeniz'de yer alan P3'e ortalama WPD'deki en büyük katkıyı ESE yönünden esen rüzgarlar sağlamaktadır.

• Doğu Karadeniz'de yer alan P4, seçilen 15 nokta arasında en düşük ortalama WPD'ye sahiptir ve bu noktada güneydoğudan (SSE, SE ve ESE) esen rüzgarlar diğer yönlere kıyasla daha büyük ortalama WPD'ye sahiptir.

 Güneydoğu Karadeniz'de yer alan P5, nispeten düşük bir ortalama WPD'ye sahiptir ve bu noktada ortalama WPD'ye en büyük katkıyı güneybatıdan (W, WSW ve SW) esen rüzgarlar sağlamaktadır.

• Güney-orta Karadeniz'de yer alan P6, nispeten düşük bir ortalama WPD'ye sahiptir ve bu noktada W ve WNW yönlerinden esen rüzgarlar en büyük ortalama WPD'ye sahiptir.

• Güneybatı Karadeniz'de yer alan P7 için ortalama WPD'ye en büyük katkıyı SW ve ardından NE yönlerinden esen rüzgarlar sağlamaktadır.

• Güneybatı Karadeniz'de yer alan P8 ve P9, P7'ye benzer şekilde, SSW ve SW yönlerinden esen rüzgarlar en büyük ortalama WPD'ye sahiptir ve NE yönünden esen rüzgarlar ikincil yüksek rüzgar gücü potansiyeline sahiptir.

• Güneybatı Karadeniz'de yer alan P10 için N ve NNE yönlerinden esen rüzgarlar en büyük ortalama WPD'ye sahiptir. • Batı Karadeniz'de yer alan P11 ve kuzeybatı Karadeniz'de yer alan P12–P15, ortalama WPD'ye en büyük katkı sağlayan birincil yön için P10'a benzer yönlü davranış sergilemesine karşın P12–P15'e güneybatı (S, SSW ve SW) yönlerinden esen rüzgarlar ortalama WPD'ye oldukça büyük katkı sağlamaktadır.

Ortalama WPD'nin yönlü davranışı güneybatıdan (P7–P10) kuzeybatı (P12–P15) Karadeniz'e doğru biraz değişmektedir. Güneybatı ve batı Karadeniz'de en büyük ortalama WPD güneybatı (SW) ve kuzeydoğu (NE) yönlerinden, kuzeybatı Karadeniz'de (P12–P15), güneydoğu (ESE ve SE) yömleri dışında neredeyse tüm yönlerden esen rüzgarlar nispeten yüksek rüzgar gücü potansiyeline sahiptir. Diğer bir ifadeyle, kuzeybatı Karadeniz'de yer alan bu noktalar (P12–P15) oldukça büyük yönlü saçılma davranışı gösterirler (**Şekil 6.33**).

Açık deniz rüzgar enerjisi üretiminin gelecekteki gelişimi için en uygun yerin seçilmesi hususunda, yalnızca yüksek rüzgar gücü potansiyeli değil, aynı zamanda rüzgar gücündeki düşük değişkenlik de dikkate alınmalıdır. Çoğu zaman, en büyük rüzgar gücü potansiyeline sahip olan yer/yerler, daha değişken rüzgar koşulları nedeniyle, düşük değişken rüzgar koşullarına sahip orta düzeyde bir rüzgar gücü potansiyeline sahip olan yer/yerden daha az verimli olabilmektedir. Bu çalışmada, kuzeydoğu Karadeniz'de yer alan P2, aylık ve yıllık nispeten yüksek ortalama WPD'ye sahip olmasına karşın bu bölge, yüksek değişkenliğe sahip rüzgar koşullarına maruz kalmaktadır (**Şekil 6.33**a1 ve b1). Dolaysıyla bu durum, üretilen elektrik gücünde de büyük dalgalanmalara neden olacaktır. Sonuç olarak, batı Karadeniz, özellikle güneybatı Karadeniz, yüksek rüzgar gücü potansiyeli ve düşük değişkenliğe sahip rüzgar koşulları ile havzanın diğer bölgelerinden daha iyi bir seçim olacaktır.


Şekil 6.33 Seçilen 15 noktada 2021–2100 yılları arasındaki 80 yıllık dönem için aylık ortalama WPD'nin yönlü değişkenliği; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5



Şekil 6.33 Seçilen 15 noktada 2021–2100 yılları arasındaki 80 yıllık dönem için aylık ortalama WPD'nin yönlü değişkenliği; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5 (devamı)

7.1 Giriş

Bu bölümde geleceğe yönelik dalga parametreleri, Bölüm 5'te yeniden analiz verilerinde yapıldığı gibi, MIKE 21 SW dalga modelinden üretilmiştir. Modelden elde edilen dalga parametreleri bir tarihsel ve iki gelecek dönem olmak üzere üç farklı zaman aralığında değerlendirilmiştir. 1970–2005 tarihsel, 2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek için yapılan araştırmalarda belirgin dalga yüksekliği (H_s), maksimum dalga yüksekliği (H_{maks}), ortalama dalga periyodu (T_m) ve pik dalga periyodu (T_p) parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, değişim projeksiyonu ve uzun dönemli değişim eğilimleri araştırılmıştır. İki gelecek dönemi için yapılan tüm araştırmalar hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

7.2 Model Kurulumu

Dalga modelinde kullanılacak RCA4 iklim veri setinin belirlenmesi amacıyla iklim verilerine ait tarihsel veriler ile modellenen dalga parametrelerinin doğruluğu hem yerel hem de alansal olarak yapılan istatistiksel analizler ile irdelenmiştir. Yerel olarak; beş RCA4 tarihsel (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR) verisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği beş dalga ölçüm istasyonunda (Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos ve Karaburun) ölçülen belirgin dalga yüksekliği ile karşılaştırılmıştır. Alansal olarak; beş RCA4 ve CFSR rüzgar verileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin tüm Karadeniz çalışma alanı boyunca rölatif fark hesaplanarak değerlendirilmiştir. Tarihsel değerlendirmelerde referans veri olarak CFSR verilerinden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin dikkate alınmasının sebebi tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde beş RCA4 tarihsel rüzgar verisi ile diğer iki yeniden analiz (ERA-Interim ve ERA5) rüzgar verilerinden biraz daha iyi uyum göstermiş olmasıdır (Bakınız Bölüm 6).

CFSR yeniden analiz verileri ile MIKE 21 SW modelinden elde edilen dalga verilerinin kalibrasyonu ve doğrulaması Bölüm 5'te detaylı olarak yapılmıştır. Bu bölümde CFSR verileri ile kalibre edilmiş MIKE 21 SW modelinden elde edilen dalga verileri referans veri olarak kullanılmıştır. En iyi uyumu sağlayan bir RCA4 iklim verisini belirlemek için beş RCA4 tarihsel verisi ile modelden elde edilen dalga verileri, referans verisi ile modelden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır

7.2.1 Ölçülen dalga verileri ile karşılaştırma

Beş tarihsel RCA4 rüzgar verileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yükseklikleri, Sinop, Filyos, Hopa, Gelendzhik ve Karaburun istasyonlarında ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile karşılaştırılarak kalibrasyonu yapılmış ve doğrulanmıştır (**Şekil 7.1**). Karşılaştırmalar, Bölüm 3'te anlatıldığı gibi Karadeniz üzerinde farklı özellik gösteren üç bölgede yapılmıştır (**Şekil 7.1**). RCA4 verileri tarihsel olarak 1970–2005 yılları için iklim verileri sağladığından ölçüm verileri ile yapılan karşılaştırmaların veri seti aralığı **Tablo 7.1**'de özetlenmiştir.



Şekil 7.1 Çalışma alanı, dalga ölçüm istasyonları ve detaylı Rölatif Değişim (RD) için seçilen üç bölge

İstasyon	Veri seti aralığı	Vori correr	
adı	(gg/aa/yyyy)	veii sayisi	
Sinop	4/11/1994–11/6/1996	1629	
Filyos	21/12/1994-25/12/1996	6087	
Нора	1/1/1995-25/4/1999	9939	
Gelendzhik	9/7/1996-6/12/2003	12527	
Karaburun	30/08/2003-17/12/2004	2920	

Tablo 7.1 Model doğrulamasında kullanılan ölçüm dalga istasyonlarınınözellikleri

Bu çalışmada, beş RCA4 tarihsel verileri için modelden elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile ölçülen belirgin dalga yükseklikleri arasındaki performans değerlendirmesi Bölüm 6'da rüzgar verilerinde olduğu gibi histogram ve Quantile-Quantile (Q-Q) grafikleri ile irdelenmiştir. **Şekil 7.2**, modellenen ve ölçülen belirgin dalga yükseklikleri arasında genel olarak 3 m'ye kadar olan dalga yüksekliğinde iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ancak 3 m'yi aşan dalga yüksekliklerinde RCA4 tarihsel verileri bazı istasyonlarda daha yüksek bazılarında ise daha düşük dalga yükseklikleri tahmin etmektedir. Bu sonuçlar aşağıda verildiği gibi özetlenebilmektedir:

- Sinop istasyonunda (Şekil 7.2 ve b), EC-EARTH verisi nerdeyse tüm dalga yüksekliği sınıfları için en iyi tahmin sonucunu verirken, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR verileri ölçülenlerden daha yüksek tahmin etmektedir. Ölçülen ve modellenen belirgin dalga yüksekliğinden elde edilen histogramlar arasındaki rölatif hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %7.80, %12.50, %27.39, %8.58 ve %15.74 olarak hesaplanmıştır.
- Filyos istasyonunda (Şekil 7.2c ve d), EC-EARTH verisi tüm dalga yüksekliği sınıfları için ölçümlerle oldukça iyi uyuşmaktadır. Ancak özellikle 3 m'yi aşan dalga yüksekliği sınıflarında CNRM-CM5 ve HadGEM2-ES verileri ölçülen dalga yüksekliklerinden daha yüksek, IPSL-CM5A-MR ve MPI-ESM-LR verileri ise ölçülenlerden daha düşük tahmin etmektedir. Ölçülen ve modellenen belirgin dalga yüksekliğinden elde edilen histogramlar arasındaki rölatif

hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %8.24, %9.01, %9.41, %11.13 ve %8.93 olarak hesaplanmıştır.

- Hopa istasyonunda (Şekil 7.2e ve f), EC-EARTH ve HadGEM2-ES verileri tüm dalga yüksekliği sınıflarında oldukça iyi tahminler verirken, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR ve MPI-ESM-LR verileri ölçülenlerden daha yüksek tahmin etmektedir. Ölçülen ve modellenen belirgin dalga yüksekliğinden elde edilen histogramlar arasındaki rölatif hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %4.69 %8.59, %36.99, %6.76 ve %19.55 olarak hesaplanmıştır.
- Gelendzhik istasyonunda (Şekil 7.2g ve h), EC-EARTH verileri neredeyse tüm dalga yüksekliği sınıflarında en iyi tahmin sonuçlarını verirken diğer dört RCA4 verileri ölçülenlerden daha yüksek tahmin etmektedir. Ölçülen ve modellenen belirgin dalga yüksekliğinden elde edilen histogramlar arasındaki rölatif hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %9.67 %21.08, %26.11, %12.21 ve %16.99 olarak hesaplanmıştır.
- Karaburun istasyonunda (Şekil 7.2i ve j), EC-EARTH verileri en iyi dalga yüksekliği tahminlerini sağlarken, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR verileri ölçülen dalga yüksekliğini biraz daha düşük tahmin etmektedir. Ölçülen ve modellenen belirgin dalga yüksekliğinden elde edilen histogramlar arasındaki rölatif hatalar EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2ES ve MPI-ESM-LR için sırasıyla %9.36 %12.47, %11.37, %10.82 ve %9.51 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 7.2, EC-EARTH verilerinin beş dalga ölçüm istasyonunda da tüm dalga yüksekliği sınıflarında dalga yüksekliğini diğer dört RCA4 verilerine kıyasla daha iyi tahmin ettiğini göstermektedir. Özellikle 3 m'yi aşan dalga yüksekliği sınıflarında CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR verileri dalga yüksekliğini tahmin etmede iyi bir performans gösteremezken EC-EARTH verileri belirgin şekilde iyi bir performans göstermektedir.



Şekil 7.2 Beş RCA4 ve ölçülen rüzgar verilerinin karşılaştırılması. (a, b) Sinop, (c, d) Filyos, (e, f) Hopa, (g, h) Gelendzhik, (i, j) Karaburun. Sol ve sağ paneller sırasıyla histogram ve Q-Q grafiklerin sonuçlarını göstermektedir.





7.2.2 Yeniden analiz verileri ile karşılaştırma

Beş RCA4 tarihsel verileri 1970–2005 yılları için rüzgar verileri sağlarken CFSR yeniden analiz verileri 1979 yılından günümüze kadar rüzgar verileri sağlamaktadır. Her iki veri setinde de mevcut olması sebebiyle modelden elde edilen tarihsel dalga verilerin alansal karşılaştırması, 1979–2005 yıllarını kapsayan 27 yıl için gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalar Karadeniz üzerinde farklı dalga özellikleri gösteren üç bölgede incelenmiştir (**Şekil 7.1**). Karadeniz üzerinde seçilen üç bölge **Şekil 7.1**'de ve belirgin dalga yüksekliğinin istatistiksel özellikleri **Tablo 7.2**'de verilmiştir. **Şekil 7.3**, CFSR ve beş RCA4 rüzgar verisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin 27 yıllık (1979–2005) ortalamasını göstermektedir.

Şekil 7.3, CFSR rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin 27 yıllık ortalamasının uzamsal dağılımını göstermektedir. Batı Karadeniz'in, havzanın geri kalan yerlerinden daha büyük dalga yüksekliğine maruz kaldığı açıkça gözlenmektedir. Ortalama belirgin dalga yüksekliği (H_{m0, ort}) en yüksek değerine 1.34 m ile batı Karadeniz'de ulaşırken, doğu Karadeniz'de, batı Karadeniz'den %20 daha küçük olarak, 1.15 m değerine ulaşmaktadır. Ortalama belirgin dalga yüksekliğinin batıdan doğuya doğru belirgin bir azalışı **Şekil 7.3**'ten gözlenmektedir.

Şekil 7.3b-f, beş RCA4 tarihsel rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin 27 yıllık ortalamasının uzamsal dağılımını göstermektedir. Beş RCA4 tarihsel verileri için modelden elde edilen ortalama belirgin dalga yüksekliğinin uzamsal dağılımı batı ve orta Karadeniz'de daha büyük dalga yüksekliklerine, doğu Karadeniz'de daha düşük dalga yüksekliklerine sahip olmasıyla birbirlerine benzerdir. Beş RCA4 tarihsel veriler arasından IPSL-CM5A-MR verilerinin, tüm Karadeniz çalışma alanı üzerinde diğer veri kaynaklarıyla elde edilenlerden daha büyük belirgin dalga yüksekliği tahmin ettiği **Şekil 7.3**d'den açıkça gözlenmektedir.

	H _{m0} CESP		EC-	CNRM-	IPSL-	HadGEM2-	MPI-
	(m)	Cror	EARTH	CM5	CM5A-MR	ES	ESM-LR
Batı Karadeniz	Min.	0.3354	0.3143	0.3158	0.2840	0.3186	0.3143
	Ort.	0.9850	0.9615	0.9562	0.9634	0.9793	0.9711
	Maks.	1.3364	1.3444	1.3639	1.4453	1.3169	1.3554
Orta Karadeniz	Min.	0.2466	0.2517	0.2641	0.2376	0.2419	0.2673
	Ort.	0.8967	0.9891	0.9970	1.0873	0.9503	0.9911
	Maks.	1.3172	1.3468	1.3648	1.4651	1.2987	1.3549
Doğu Karadeniz	Min.	0.3515	0.3808	0.4148	0.4512	0.3636	0.4137
	Ort.	0.7556	0.8249	0.8493	0.9676	0.7995	0.8453
	Maks.	1.1448	1.2387	1.2622	1.3841	1.1980	1.2773
Karadeniz	Min.	0.2466	0.2517	0.2641	0.2376	0.2419	0.2673
	Ort.	0.8758	0.9237	0.9332	1.0070	0.9074	0.9345
	Maks.	1.3364	1.3468	1.3648	1.4651	1.3169	1.3554

Tablo 7.2 Modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin istatistikselparametreleri



Şekil 7.3 (a) CFSR, (b) EC-EARTH, (c) CNRM-CM5, (d) IPSL-CM5A-MR, (e) HadGEM2-ES, (f) MPI-ESM-LR rüzgar alanları ile 1979–2005 yılları için modelden elde edilen H_{m0, ort} parametresinin uzamsal dağılımları

Referans verisi (bu çalışmada CFSR verileri) ve beş RCA4 tarihsel verileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yükseklikleri arasındaki farkı, tüm çalışma alanı boyunca araştırmak ve referans verisi ile en iyi uyumu sağlayan bir RCA4 verisini belirlemek için rölatif fark hesaplanmıştır. Rölatif fark, Bölüm 6'da rüzgar verilerinde olduğu gibi, rölatif BIAS (RB) kullanılarak araştırılmış ve aşağıda verildiği gibi dikkate alınmıştır:

$$RB = \left(\frac{H_{mo, TarihselRCA4} - H_{mo, YenidenAnaliz}}{H_{mo, YenidenAnaliz}} x100\right)$$
(7.1)

Şekil 7.4, beş RCA4 tarihsel veriler ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin CFSR rüzgar verileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğine göre normalize edilmesiyle belirlenen RB'nin uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Beş RCA4 tarihsel rüzgar verileri kullanılarak modelden elde edilen ortalama belirgin dalga yükseklikleri arasında en büyük fark, IPSL-CM5A-LR verileri için elde edilmiş ve özellikle doğu Karadeniz'de oldukça yüksek RB değerleri belirlenmiştir (**Şekil 7.4**c). **Şekil 7.4**d'den HadGEM2-ES'nin neredeyse tüm Karadeniz çalışma alanında negatif RB değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç HadGEM2-ES ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin, CFSR rüzgar verileri ile modelden elde edilenlerden daha küçük olduğunu göstermektedir (**Tablo 7.2**). Batı ve orta Karadeniz'de EC-EARTH (**Şekil 7.4**a), CNRM-CM5 (**Şekil 7.4**b) ve MPI-ESM-LR (**Şekil 7.4**e) verileri için benzer uzamsal dağılımlar ve RB değerleri bulunmasına rağmen, EC-EARTH verileri doğu ve kuzeydoğu Karadeniz'de daha belirgin olmak üzere, nerdeyse tüm Karadeniz'de nispeten daha düşük RB değerleri ile sonuçlanmıştır. Beş RCA4 rüzgar verileri arasından hem uzamsal dağılım hem de ortalama değerler açısından CSFR rüzgar verileri kullanılarak modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliğinin EC-EARTH verilerinden elde edilenlerle biraz daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Yerel ve alansal karşılaştırmalar sonucunda, EC-EARTH verilerinin; (i) beş dalga ölçüm istasyonunda ölçülen belirgin dalga yüksekliği verileri ile daha iyi uyum sağladığı, (ii) Karadeniz üzerinde diğer dört RCA4 verisine kıyasla CFSR verisi (referans verisi) ile elde edilen belirgin dalga yüksekliğini tahmin etmede daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebepler dikkate alındığında beş RCA4 tarihsel verileri arasından EC-EARTH rüzgar verileri ile modelden elde edilen dalga parametreleri kullanılarak Karadeniz'in 2021–2100 yıllarındaki dalga iklim projeksiyonu araştırılmıştır.



Şekil 7.4 Beş RCA4 tarihsel ve CFSR rüzgar verileri ile 1979–2005 yılları için modelden elde edilen H_{m0, ort} arasındaki RB değerleri; (a) EC-EARTH, (b) CNRM-CM5, (c) IPSL-CM5A-MR, (d) HadGEM2-ES, (e) MPI-ESM-LR

7.3 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için dalga parametre projeksiyonları

İklim değişikliğinin, gelecekteki dalga iklimi üzerindeki etkisi RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre EC-EARTH iklim verisi kullanılarak modelden elde edilen dalga verileri incelenmiş ve her biri 40 yıllık zaman dilimini kapsayan yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için araştırılmıştır. Bu bölümde, belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), maksimum dalga yüksekliği (H_{maks}), ortalama dalga periyodu (T_m) ve pik dalga periyodu (T_p) parametrelerinin uzun dönemli ortalamaları, değişim projeksiyonu ve uzun dönemli değişim eğilimleri irdelenmiştir.

7.3.1 Dalga parametre projeksiyonlarının uzun dönemli ortalamaları

Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 sırasıyla belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), maksimum dalga yüksekliği (H_{maks}), ortalama dalga periyodu (T_m) ve pik dalga periyodu (T_p) parametrelerinin uzun dönemli ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Bu parametrelere ait istatistiksel parametreleri **Tablo 7.3**'te verilmiştir. Bu bölümde tarihsel olarak dikkate alınan zaman aralığı, EC-EARTH tarihsel veri setinin 1970–2005 yıllarını kapsaması sebebiyle 36 yıllık veri setinden oluşmaktadır.

Belirgin dalga yüksekliği ile maksimum dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ile pik dalga periyodu parametrelerinin uzun dönemli ortalamalarının benzer uzamsal dağılımlar göstermesi sebebiyle, bu bölümde birlikte değerlendirilmiştir. Ancak uzamsal olarak benzer dağılımlar gösterseler de mertebelerinin (şiddetlerinin) farklı olduğu anlaşılmaktadır.

Hem yakın gelecek hem de orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için ortalama dalga yükseklikleri ($H_{m0, ort}$ ve $H_{maks, ort}$) batı ve orta Karadeniz'de en yüksek değerlerine ulaşırken, en düşük değerleri doğu Karadeniz'de ulaştığı belirlenmiştir. Tarihsel dönemde olduğu gibi (**Şekil 7.5**a ve **Şekil 7.6**a), gelecek dönemler için de (**Şekil 7.5**b–e ve **Şekil 7.6**b–e) ortalama dalga yüksekliğinin ($H_{m0, ort}$ ve $H_{maks, ort}$) uzamsal dağılımları benzerdir ve ortalama değerler

Karadeniz'in batısından doğusuna doğru kademeli olarak azalmaktadır. Karadeniz'in batı-doğu değişkenliği dalga yüksekliği parametrelerinin uzamsal dağılımlarından belirgin şekilde gözlenmektedir. Bu sonuç, 2021–2100 yılları için dalga yüksekliği projeksiyonlarının, tarihsel dönemde olduğu gibi, Karadeniz'in batısında, doğusuna kıyasla daha büyük olacağını göstermektedir.



Şekil 7.5 H_{m0, ort} parametresinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı (a) tarihsel, (b, d) yakın gelecek (b) RCP4.5, (d) RCP8.5; (c, e) orta gelecek (c) RCP4.5, (e) RCP8.5



Şekil 7.6 H_{maks, ort} parametresinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı (a) tarihsel, (b, d) yakın gelecek (b) RCP4.5, (d) RCP8.5; (c, e) orta gelecek (c) RCP4.5, (e) RCP8.5

Ortalama dalga periyodunun ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) uzamsal dağılımlarının, batıdan doğuya doğru azalan ortalama dalga yüksekliğinin ($H_{m0, ort}$ ve $H_{maks, ort}$) uzamsal dağılımından farklı olduğu belirlenmiştir. Tarihsel dönem için elde edilen dalga periyotlarında olduğu gibi (**Şekil 7.7**a ve **Şekil 7.8**a) hem yakın gelecek hem de orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre (**Şekil 7.7**b–e ve **Şekil 7.8**b–e) ortalama dalga periyodu ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) parametreleri kuzeyden güneye doğru artmaktadır. Özellikle güneybatı ve orta Karadeniz, havzanın diğer kısımlarına kıyasla daha uzun periyotlu ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) dalgalara maruz kalmaktadır. Yakın gelecekte her iki senaryoya göre orta gelecekten daha uzun periyotlu dalgaların ortaya çıkacağı belirlenmiştir. Bu sonuç, 2021–2100 yıllarında güney Karadeniz'in, kuzeyine kıyasla daha uzun ortalama ve pik dalga periyodu projeksiyonlarına sahip dalgalara maruz kalacağını göstermektedir.



Şekil 7.7 T_{m, ort} parametresinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı (a) tarihsel, (b, d) yakın gelecek (b) RCP4.5, (d) RCP8.5; (c, e) orta gelecek (c) RCP4.5, (e) RCP8.5



Şekil 7.8 T_{p, ort} parametresinin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı (a) tarihsel, (b, d) yakın gelecek (b) RCP4.5, (d) RCP8.5; (c, e) orta gelecek (c) RCP4.5, (e) RCP8.5

	Tarihsel			Yakın Gelecek			Orta Gelecek			
	(1970–2005)			(2021–2060)			(2061–2100)			
	Min.	Ort.	Maks.		Min.	Ort.	Maks.	Min.	Ort.	Maks.
H _{m0,ort}	0.252	0.924	1.345	RCP4.5	0.244	0.937	1.363	0.238	0.923	1.335
(m)	0.252			RCP8.5	0.243	0.936	1.357	0.233	0.924	1.326
T _{m,ort}	T _{m,ort} (s) 2.455	455 3.726	4.199	RCP4.5	2.459	3.742	4.236	2.450	3.721	4.223
(s)				RCP8.5	2.456	3.741	4.244	2.431	3.728	4.245
H _{maks, ort}	0.502 1.81	1 8 1 0	1 810 2 641	RCP4.5	0.486	1.844	2.676	0.475	1.818	2.621
(m) 0.302	1.019	2.041	RCP8.5	0.484	1.843	2.663	0.465	1.818	2.605	
T _{p, ort}	2 467	5 402	5 860	RCP4.5	3.478	5.525	5.914	3.460	5.487	5.877
(s) 3.407	5.775	5.009	RCP8.5	3.482	5.521	5.912	3.411	5.487	5.881	

Tablo 7.3 Ortalama dalga parametrelerinin istatistik değerleri

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre ortalama dalga parametre ($H_{m0, ort}$, $T_{m, ort}$, $H_{maks, ort}$ ve $T_{p, ort}$) projeksiyonları arasındaki farkların alansal olarak nasıl değiştiğini araştırmak için RCP4.5 senaryosu için elde edilen ortalama dalga parametreleri, RCP8.5 senaryosu için elde edilenlerden çıkarılmıştır ($X_{RCP8.5} - X_{RCP4.5}$, X dalga parametresini göstermektedir). Student's t-testine göre değerlendirilen (Scheer, 1986) istatistiksel anlamlılık seviyeleri ile uzamsal dağılımları **Şekil 7.9** ve **Şekil 7.10**'da verilmiştir.

Yakın gelecek (2021–2060) dönemi için ortalama dalga parametreleri arasındaki farkların uzamsal dağılımları birbirine benzer bulunmuştur (**Şekil 7.9** ve **Şekil 7.10**; a, c, e ve g). RCP8.5 senaryosuna göre elde edilen ortalama dalga parametreleri, RCP4.5 senaryosuna göre elde edilenlerden batıda, özellikle kuzeybatı Karadeniz'de, biraz daha düşük, orta Karadeniz'de belirgin bir farkın olmadığı ve doğu Karadeniz'de biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.9** ve **Şekil 7.10**; a, c, e ve g).

Orta gelecek (2061–2100) dönemi için ortalama dalga parametreleri arasındaki farkların uzamsal dağılımının yakın gelecek için elde edilenlerden farklı uzamsal dağılım gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 7.9** ve **Şekil 7.10**; b, d, f ve h). RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna kıyasla ortalama dalga parametrelerini güney Karadeniz'de biraz daha büyük, kuzey Karadeniz'de ise biraz daha düşük tahmin ettiği tespit edilmiştir (**Şekil 7.9** ve **Şekil 7.10**; b, d, f ve h).



Şekil 7.9 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre modelden elde edilen ortalama dalga parametreleri arasındaki farklar; (a, b) $H_{m0, ort}$, (e, f) $T_{m, ort}$. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (c, d) $H_{m0, ort}$, (g, h) $T_{m, ort}$



Şekil 7.10 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre modelden elde edilen ortalama dalga parametreleri arasındaki farklar; (a, b) H_{maks, ort}, (e, f) T_{p, ort}. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (c, d) H_{maks, ort}, (g, h) T_{p, ort}

7.3.2 Dalga parametre projeksiyonlarının değişimi

2021–2100 yıllarındaki dalga parametre projeksiyonlarının tarihsel dönemdeki (1970–2005) verilere göre nasıl değiştiğini araştırmak için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre iki gelecek zaman periyodu için modelden elde edilen ortalama dalga parametreleri, tarihsel zaman periyodu için elde edilenlerden çıkarılarak gelecekteki değişim ($GD = X_{RCP} - X_{Tarihsel}$) araştırılmıştır. Student's t-testine göre değerlendirilen (Scheer, 1986) istatistiksel anlamlılık seviyeleri ile uzamsal dağılımları **Şekil 7.11–Şekil 7.14**'te verilmiştir.

Şekil 7.11, **Şekil 7.12**, **Şekil 7.13** ve **Şekil 7.14** sırasıyla belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), maksimum dalga yüksekliği (H_{maks}), ortalama dalga periyodu (T_m) ve pik dalga periyodu (T_p) parametrelerinin değişim projeksiyonlarının Karadeniz

çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Uzun dönemli ortalamalarda olduğu gibi değişim projeksiyonlarında da belirgin dalga yüksekliği ile maksimum dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ile pik dalga periyodu birlikte değerlendirilmiştir.

<u>Yakın gelecekte (2021–2060) dalga yüksekliği (H_{m0, ort} ve H_{maks, ort})</u> parametresinin değişim projeksiyonu:

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosu, dalga yüksekliğinin neredeyse tüm Karadeniz'de artacağını ve bu artış oranlarının doğu Karadeniz'de daha belirgin olacağını öngörmektedir (**Şekil 7.11**a ve e, **Şekil 7.12**a ve e). Aynı döneme ait RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna benzer ancak daha belirgin oranlarda ortalama dalga yüksekliğinin doğu Karadeniz'de artacağını öngörmektedir (**Şekil 7.11**c ve g, **Şekil 7.12**c ve g). Ortalama dalga yüksekliği (H_{m0, ort} ve H_{maks, ort}) parametrelerinin değişim projeksiyonu hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarında en yüksek değerlerine doğu Karadeniz'de ulaşmaktadır. Bu sonuç, yakın gelecekte ortalama dalga yüksekliğinin doğu Karadeniz'de, havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha değişken dalgalara maruz kalacağını ve bu değişimlerin RCP8.5 senaryosunda daha fazla olacağını göstermektedir.

<u>Orta gelecekte (2061–2100) dalga yüksekliği (H_{m0, ort} ve H_{maks, ort}) parametresinin</u> <u>değişim projeksiyonu:</u>

Orta gelecek RCP4.5 senaryosu, dalga yüksekliğinin doğu ve orta Karadeniz'de belirgin bir değişimin olmayacağını ve batı Karadeniz'de özellikle kıyı bölgelerine doğru hafif azalacağını öngörmektedir (**Şekil 7.11**b ve f, **Şekil 7.12**b ve f). Aynı döneme ait RCP8.5 senaryosu, dalga yüksekliği parametresinin değişim projeksiyonunun güney Karadeniz'de, özellikle kıyı alanlarına doğru belirgin bir şekilde artacağını, kuzey Karadeniz'de ise, özellikle kıyı alanlarına doğru, belirgin bir şekilde azalacağını öngörmektedir (**Şekil 7.11**d ve h, **Şekil 7.12**d ve h). Burada önemli olan bir sonuç ise bu değişim projeksiyonlarının RCP8.5 senaryosu ile daha büyük değerlere ulaşmasıdır. Orta gelecekte, ortalama dalga yüksekliğinin özellikle doğu Karadeniz'de daha fazla değişim içinde olacağını ve

bu değişim projeksiyonunun RCP8.5 senaryosu ile daha da şiddetleneceği belirlenmiştir.



Şekil 7.11 H_{m0, ort} parametresi için GD (%) değerlerinin uzamsal dağılımı, (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için sonuçları göstermektedir.



Şekil 7.12 H_{maks, ort} parametresi için GD (%) değerlerinin uzamsal dağılımı, (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için sonuçları göstermektedir.

<u>Yakın gelecekte (2021–2060) dalga periyodu ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) parametresinin değişim projeksiyonu:</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosu, dalga periyodunun, batı Karadeniz'in kıyı bölgeleri hariç, nerdeyse tüm Karadeniz'de artacağını ve bu artışların doğuya doğru daha fazla olacağını öngörmektedir (Şekil 7.13a ve e, Şekil 7.14a ve e). Aynı döneme ait RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna benzer ancak daha yüksek oranlarda artışlar öngörmektedir (Şekil 7.13c ve g, Şekil 7.14c ve g). Yakın gelecekte, ortalama dalga periyodu (T_{m, ort} ve T_{p, ort}) parametresinin değişim projeksiyonu hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarında en yüksek değerlerine doğu Karadeniz'de ulaşmaktadır. Dolayasıyla doğu Karadeniz'in yakın gelecekte daha ortalama dalga periyotlu dalgalara kalacağı uzun maruz

söylenebilmektedir. Ayrıca değişim projeksiyonunun bu bölgede havzanın diğer kısımlarına kıyasla daha fazla olduğu ve RCP8.5 senaryosu ile daha da şiddetlendiği belirlenmiştir.

<u>Orta gelecekte (2061–2100) dalga periyodu ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) parametresinin</u> <u>değişim projeksiyonu:</u>

Orta gelecek RCP4.5 senaryosu, dalga periyodu parametresinin değişim projeksiyonunun batı ve kuzeydoğu Karadeniz'de azalacağın, doğu Karadeniz'de yalnız küçük bir bölgede hafif artacağını öngörmektedir (**Şekil 7.13**b, f ve **Şekil 7.14**b, f). Aynı döneme ait RCP8.5 senaryosu, dalga periyodu parametresinin değişim projeksiyonunun güney, özellikle güneydoğu, Karadeniz'de belirgin bir şekilde artacağını, kuzey Karadeniz'de ise belirgin bir şekilde azalacağını tahmin etmektedir (**Şekil 7.13**d ve h, **Şekil 7.14**d ve h). Orta gelecekte özellikle RCP8.5 senaryosu ortalama dalga periyodu parametresinin değişim projeksiyonu için daha yüksek değişimler öngörmektedir. Bu öngörülen değişimler, doğu Karadeniz'de havzanın diğer kısmalarına kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür.



Şekil 7.13 T_{m, ort} parametresi için GD (%) değerlerinin uzamsal dağılımı, (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için sonuçları göstermektedir.





7.3.3 Dalga parametre projeksiyonlarının değişim eğilimi

Bu çalışmada, dalga iklim projeksiyonunun yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2021 - 2060)dönemleri için modelden elde edilen dalga parametrelerinin gelecekteki değişim eğilimi doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Her biri 40 yılı kapsayan yakın gelecek ve orta gelecek için 40 yıl içindeki değişim eğilimi MATLAB yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Bu analizler hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için bu çalışmada dikkate alınan dalga parametrelerinin T_m T_p) irdelenmesiyle (H_{m0}, H_{maks}) ve gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.15, **Şekil 7.16**, **Şekil 7.17** ve **Şekil 7.18** sırasıyla ortalama H_{m0} , H_{maks} , T_m ve T_p parametrelerinin uzun dönemli değişim eğiliminin tüm Karadeniz çalışma

alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Elde edilen değişim eğilimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student's t-testi (Scheer, 1986) ile değerlendirilmiştir (**Şekil 7.15**e-h, **Şekil 7.16**e-h, **Şekil 7.17**e-h ve **Şekil 7.18**e-h).

<u>Yakın gelecekte yıllık ortalama dalga yüksekliğinin (H_{m0} veya H_{maks}) uzun dönemli değişim eğilimi:</u>

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga yüksekliğindeki ortalama değişim, güneybatı ve orta Karadeniz'de belirgin artan eğilimler gösterirken, kuzeybatı Karadeniz'de belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir Doğu Karadeniz'de yıllık ortalama dalga yüksekliğinin artma eğiliminde olduğu ancak bu değişim eğiliminin batısına kıyasla biraz daha küçük oranlarda olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.15**a ve e, **Şekil 7.16**a ve e).

Yakın gelecek RCP8.5 senaryosunda, RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga yüksekliğinde artan eğilim gösteren bölgelerin (güneybatı ve orta Karadeniz) belirgin bir değişim eğilimi göstermediği belirlenmiştir. Yıllık ortalama dalga yüksekliği, kuzeybatı Karadeniz'de ve havzanın kuzeydoğu kıyı bölgelerinde hafif azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.15**c ve g, **Şekil 7.16**c ve g).

<u>Orta gelecekte yıllık ortalama dalga yüksekliğinin (H_{m0} veya H_{maks}) uzun dönemli değişim eğilimi:</u>

Orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre, neredeyse tüm havzada yıllık ortalama dalga yüksekliğinde azalma eğilimi gözlenmektedir. Karadeniz'in kuzeyindeki bazı kıyı bölgelerinde, yıllık ortalama dalga yüksekliğinde neredeyse belirgin bir değişim eğilimi olmadığı belirlenmiştir (**Şekil 7.15**b ve f, **Şekil 7.16**b ve f).

Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, tüm Karadeniz üzerinde belirgin azalan eğilimler belirlenmiştir ve bu azalan eğilimler RCP4.5 senaryosuna kıyasla çok daha şiddetlidir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga yüksekliğindeki en belirgin azalan eğilimlilerin, RCP4.5 senaryosunda azalan eğilimlerin hafif olduğu, kuzeybatı ve doğu Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.15**d ve h, **Şekil 7.16**d ve h).



Şekil 7.15 Yıllık ortalama H_{m0} parametresinin uzun dönemli değişim eğilimleri;
(a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller, sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 7.16 Yıllık ortalama H_{maks} parametresinin uzun dönemli değişim eğilimleri;
(a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller, sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için elde edilen sonuçları göstermektedir.

<u>Yakın gelecekte yıllık ortalama dalga periyodunun (T_m veya T_p) uzun dönemli değişim eğilimi:</u>

RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga periyodundaki ortalama değişim, özellikle güney Karadeniz'de belirgin artış eğilimleri gösterirken, kuzeybatı Karadeniz ve havzanın kuzeydoğu kıyı bölgelerinde belirgin bir değişim eğilimi göstermediği belirlenmiştir (**Şekil 7.17**a ve e, **Şekil 7.18**a ve e).

Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, RCP4.5 senaryosunda belirgin artış eğilimlerinin olduğu güney Karadeniz'de, kıyı alanlarına doğru, belirgin bir değişim eğilimi olmadığı tespit edilmiştir. Yıllık ortalama dalga periyodunda RCP4.5 senaryosuna göre belirgin değişim eğilimin bulunmadığı kuzeybatı ve kuzeydoğu Karadeniz'de RCP8.5 senaryosuna göre hafif azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.17**c ve g, **Şekil 7.18**c ve g).

<u>Orta gelecekte yıllık ortalama dalga periyodunun (T_m veya T_p) uzun dönemli değişim eğilimi:</u>

RCP4.5 senaryosuna göre güney Karadeniz'de yıllık ortalama dalga periyodunda değişim, azalan eğilimler göstermektedir ve bu değişim eğilimleri havzanın güney kıyılarına doğru daha da belirginleşmektedir. Kuzey Karadeniz'de ise belirgin bir değişim eğilimin olmadığı bulunmuştur (**Şekil 7.17**b ve f, **Şekil 7.18**b ve f).

Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, yıllık ortalama dalga periyodundaki azalan eğilimler tüm havzada RCP4.5 senaryosuna kıyasla çok daha yüksek oranlarda gözlenmektedir. Bu artan eğilimler kuzeybatı ve kuzeydoğu Karadeniz'de daha da şiddetli bir şekilde ortaya çıkmaktadır (**Şekil 7.17**d ve h, **Şekil 7.18**d ve h).



Şekil 7.17 Yıllık ortalama T_m parametresinin uzun dönemli değişim eğilimleri; (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller, sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 7.18 Yıllık ortalama T_p parametresinin uzun dönemli değişim eğilimleri; (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre istatistiksel olarak anlamlı uzun dönemli eğilimler; (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller, sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için elde edilen sonuçları göstermektedir.

7.3.4 Yerel dalga iklimi projeksiyonların

Dalga parametrelerinin yıllar içindeki değişim eğilimi tarihsel (1970–2005), yakın gelecek (2021–2060), orta gelecek (2061–2100) dönemleri için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre beş referans noktasında ayrıntılı olarak incelenmiştir (**Şekil 7.1**) ve bu noktaların tarihsel dönemdeki ortalama dalga parametrelerine göre özellikleri **Tablo 7.4**'te özetlenmiştir.

N1, N2, N3, N4 ve N5 olarak belirtilen beş referans noktası sırasıyla kuzeybatı, güneybatı, orta, güneydoğu ve kuzeydoğu Karadeniz'deki dalga özelliklerini temsil etmektedir (**Şekil 7.1**). N1; büyük dalga yüksekliği ve orta dalga periyodu ile karakterize edilmekte, N2; yüksek ve uzun dalgalar ile karakterize edilmekte,

N3; orta dalga yüksekliği ve uzun dalga periyoduna sahip dalgalar ile karakterize edilmekte, N4; uzun periyotlu küçük dalgalar ile karakterize edilmekte ve N5; orta periyotlu küçük dalgalarla karakterize edilmektedir.

	Boylam	Enlem	Derinlik	Dalga Koşulları		
	(°)	(°)	(m)	H _{m0}	T _m	
N1	29.8	44.4	-55	Yüksek	Orta	
N2	31.0	41.6	-1600	Yüksek	Uzun	
N3	34.6	42.0	-86	Orta	Uzun	
N4	41.0	41.6	-1335	Düşük	Uzun	
N5	40.0	43.0	-1170	Düşük	Orta	

Tablo 7.4 Detaylı analiz için seçilen beş noktanın özellikleri

İlk olarak, bu beş referans noktasında dalga iklimindeki uzun dönemli değişim eğilimleri doğrusal regresyon analizi ile araştırılmıştır. Üç döneme ait yıllık ortalama dalga parametrelerinin değişim eğilimi %90 güven sınırı ile RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla **Şekil 7.19** ve **Şekil 7.20**'de verilmiştir. Bu ortalama dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilim değerleri **Tablo 7.5**'te özetlenmiştir.

Daha sonra seçilen beş noktada belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF (Probability Density Function, Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) grafikleri incelenmiş (**Şekil 7.21**) ve bunların dönemsel değişkenliği ayrıntılı olarak irdelenmiştir (**Şekil 7.22**).

Bu bölümde detaylı araştırması yapılan yerel analizler, hem tarihsel (1970– 2005), hem de gelecek (2021–2100) dönemler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre seçilen beş noktada incelenmiştir.

7.3.4.1 Tarihsel dönem için yıllık ortalama dalga karakteristikleri

Tarihsel dönemde (1970–2005), batıdan (N1 ve N2) doğuya (N4 ve N5) doğru yıllık ortalama dalga yüksekliği ($H_{m0, ort}$ ve $H_{m0, maks}$) değerlerinde, $H_{m0, ort}$ parametresinde daha belirgin olarak, kademeli bir azalma belirlenmiştir (**Şekil 7.19**a, b ve **Şekil 7.20**a, b). Ancak yıllık ortalama periyodu (T_m ve T_p) değerlerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliği belirlenememiş yani Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasındaki ortalama dalga periyodu değerleri birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir (**Şekil 7.19**c, d ve **Şekil 7.20**c, d). Genel olarak, ortalama dalga özellikleri batı Karadeniz'de (N1 ve N2) hafif azalma eğilimleri gösterirken, doğu Karadeniz'de (N4 ve N5) hafif artış eğilimleri görülmektedir (**Şekil 7.19**).

7.3.4.2 RCP4.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga karakteristikleri

Yakın gelecek (2021-2060) RCP4.5 senaryosuna göre ortalama dalga yüksekliği ($H_{m0, ort}$ ve $H_{maks, ort}$), batı Karadeniz'de (N1 ve N2) daha belirgin bir artış eğilimi ile seçilen beş noktada artan eğilimler göstermektedir. Orta gelecekte (2061-2100), yakın gelecek için ortalama dalga yüksekliğinde bulunan artış eğilimleri seçilen beş noktada hafif azalan eğilimlere dönüşmekte ve bu azalan eğilimler orta Karadeniz'de (N3) daha belirgindir (**Şekil 7.19**a, b, **Tablo 7.5**).

Yakın gelecek (2021-2060) RCP4.5 senaryosuna göre ortalama dalga periyodunun ($T_{m, ort}$ ve $T_{p, ort}$) seçilen beş noktada artan eğilimler gösterdiği ve bu artan eğilimlerin güneybatı Karadeniz (N2) ve orta Karadeniz'de daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Orta gelecekte (2061-2100), orta Karadeniz (N3) ve güneydoğu Karadeniz'de (N4) daha belirgin bir düşüş eğilimi ile seçilen beş noktada ortalama dalga periyodunda hafif azalan eğilimler belirlenmiştir (**Şekil 7.19**c, d ve**Tablo 7.5**).



Şekil 7.19 Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasında tarihsel ve RCP4.5 senaryosuna göre gelecek dönemler için ortalama dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi; (a) H_{mo, ort}, (b) H_{maks, ort}, (c) T_{m, ort}, (d) T_{p, ort} Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir.

7.3.4.3 RCP8.5 senaryosuna göre yıllık ortalama dalga karakteristikleri

Yakın gelecek (2021–2060) RCP8.5 senaryosuna göre, H_{mo, ort} Karadeniz'in kuzeybatısı (N1) ve kuzeydoğusunda (N5) hafif azalan eğilimler gösterirken, diğer noktalarda (N2, N3 ve N4) belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir. Yakın gelecek için H_{m0, maks} güneydoğu Karadeniz'de (P4) güçlü bir artış eğilimi göstermektedir. H_{m0, ort} parametresinde azalan ve H_{m0 maks} parametresinde artan eğilimlerin belirlenmesi, güneydoğu Karadeniz'in oldukça değişken dalga yüksekliğine maruz kalacağını göstermektedir. Orta gelecekte (2061–2100), seçilen beş noktada $H_{mo, ort}$ parametresinde azalan eğilimler belirlenmiş ve bu azalan eğilimlerin doğu Karadeniz (N4 ve N5) daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Orta gelecek için, H_{m0, maks} kuzeydoğu Karadeniz'de (N5) artan bir eğilim göstermektedir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, H_{m0, ort} parametresinde azalan ve $H_{m0 maks}$ parametresinde artan eğilimlerin olmasıyla, kuzeydoğu Karadeniz'de de oldukça değişken bir dalga ikliminin olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, RCP8.5 senaryosuna göre iki gelecek dönem için de doğu Karadeniz'deki dalga ikliminin denizin diğer bölgelerine kıyasla daha değişken dalga koşullarına sahip olduğu söylenebilmektedir (Şekil 7.20a, b, Tablo 7.5).

Yakın gelecek (2021–2060) RCP8.5 senaryosuna göre, ortalama dalga periyodu kuzeybatı (N1) ve doğu (N4 ve N5) Karadeniz'de hafif azalan eğilimler gösterirken, güneybatı (N2) ve orta (N3) Karadeniz'de belirgin bir değişim eğilimi göstermemektedir. Orta gelecekte (2061–2100) seçilen beş noktada, kuzeybatı (N1) ve kuzeydoğu (N5) Karadeniz'de daha belirgin olarak, ortalama dalga periyodunda azalan eğilimler gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 7.20**c, d, **Tablo 7.5**).



Şekil 7.20 Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasında tarihsel ve RCP8.5 senaryosuna göre gelecek dönemler için ortalama dalga parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimi; (a) H_{mo, ort}, (b) H_{maks, ort}, (c) T_{m, ort}, (d) T_{p, ort} Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir.
	H _{m0, ort}		${ m H}_{ m m0,\ maks}$		T _{m, ort}	
	(m) (%)		(m)	(%)	(s)	(%)
	Tarihsel (1970–2005)					
Nokta 1	-0.032	-2.490	-0.473	-8.073	-0.028	-0.763
Nokta 2	-0.049	-3.914	-0.959	-14.799	-0.046	-1.170
Nokta 3	0.021	2.079	-0.084	-1.570	-0.003	-0.063
Nokta 4	0.018	2.282	0.781	14.699	0.004	0.094
Nokta 5	-0.001	-0.035	-0.231	-3.809	0.043	1.131
		Yakın Ge	elecek (20)21–2060)	RCP4.5	
Nokta 1	0.012	1.545	0.359	6.381	0.027	0.747
Nokta 2	0.066	5.217	0.121	1.947	0.070	1.863
Nokta 3	0.035	3.113	0.016	0.276	0.062	1.617
Nokta 4	0.020	2.209	-0.129	-2.120	0.023	0.627
Nokta 5	0.195	1.936	0.062	0.986	0.002	0.072
		Orta Ge	lecek (20	61–2100)	RCP4.5	
Nokta 1	-0.031	-2.832	-0.003	-0.055	-0.012	-0.317
Nokta 2	-0.027	-2.065	-0.916	-14.002	-0.043	-1.137
Nokta 3	-0.043	-4.291	-1.197	-19.398	-0.055	-1.354
Nokta 4	-0.047	-5.474	0.058	1.046	-0.051	-1.339
Nokta 5	-0.023	-2.502	-0.523	-8.270	-0.020	-0.529
	Yakın Gelecek (2021–2060) RCP8.5					
Nokta 1	-0.047	-4.285	-1.447	-21.635	-0.043	-1.151
Nokta 2	0.008	0.658	-0.098	-1.472	0.008	0.191
Nokta 3	-0.008	-0.673	-0.047	-0.851	0.012	0.303
Nokta 4	-0.003	-0.376	1.018	19.260	-0.035	-0.906
Nokta 5	-0.031	-3.123	-0.172	-2.697	-0.043	-1.180
	Orta Gelecek (2061–2100) RCP8.5					
Nokta 1	-0.074	-6.482	-0.324	-5.497	-0.082	-2.232
Nokta 2	-0.035	-2.770	0.293	4.904	-0.051	-1.344
Nokta 3	-0.059	-5.118	-0.285	-4.820	-0.062	-1.578
Nokta 4	-0.059	-6.812	-0.250	-4.178	-0.043	-1.134
Nokta 5	-0.062	-5.902	0.433	7.189	-0.070	-1.881

Tablo 7.5 Ortalama dalga parametrelerinin tarihsel ve gelecek dönemlerdekiuzun dönemli değişim eğilimleri

7.3.4.4 Dalga yüksekliğinin uzun dönemli ve dönemsel değişkenliği

Belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli PDF grafikleri, tarihsel (1970–2005) ve gelecek dönemler (2021–2100) için iki RCP senaryosuna göre seçilen beş noktada incelenmiştir. Analiz edilen beş noktada maksimum belirgin dalga yüksekliği değerleri farklı işaretleyiciler ile PDF grafiklerinin üstünde gösterilmiş (**Şekil 7.21**) ve H_{m0} parametresinin temel istatistiksel parametreleri **Tablo 7.6**'da verilmiştir.

Tarihsel dönemde (1970-2005), $H_{m0, ort}$ ve $H_{m0, maks}$ parametreleri için en büyük değerler sırasıyla 1.21 m ve 9.51 m ile güneybatı Karadeniz'de (N2) belirlenmiştir. Güneydoğu Karadeniz'de (N4), $H_{m0, ort}$ değeri 0.80 m ile havzanın diğer bölgelerine kıyasla düşük olmasına rağmen, $H_{m0, maks}$ değeri 8.66 m ile nispeten yüksektir. Bu, güneybatı Karadeniz'in daha geniş bir PDF dağılımı ve daha düz kuyruklar ile sonuçlanan güçlü bir dalga iklimi ile karakterize edildiğini, doğu Karadeniz'in ise (N4 ve N5) nispeten yüksek $H_{m0, maks}$ ve daha düşük $H_{m0, ort}$ ile oldukça değişken dalga koşullarıyla karakterize edildiğini göstermektedir (**Şekil 7.21**a, **Tablo 7.6**).

İki gelecek dönemde, doğu Karadeniz'deki (N4 ve N5) belirgin dalga yüksekliğinin PDF grafikleri, batı Karadeniz (N1 ve N2) için elde edilenlerden daha diktir. Doğu Karadeniz'de (N4 ve N5) $H_{m0, ort}$ değerleri batı Karadeniz'deki (N1 ve N2) değerlerin neredeyse yarısı olmasına karşın, $H_{m0, maks}$ değerleri batı Karadeniz'deki değerlerle karşılaştırılabilir ölçüde yüksektir. Bu, doğu Karadeniz'de oldukça değişken bir dalga iklimine işaret etmektedir. Orta Karadeniz'deki (N3) belirgin dalga yüksekliğinin PDF grafiği, batı Karadeniz'dekilerden (N1 ve N2) daha dik, ancak doğu Karadeniz'dekilerden (N4 ve N5) daha düzdür (**Şekil 7.21**b–e ve **Tablo 7.6**).

RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte belirgin dalga yüksekliği, aynı senaryoya göre orta gelecekte elde edilenlerden biraz daha yüksektir. Ancak, RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte belirgin dalga yüksekliği, orta gelecekte elde edilenlerden batı Karadeniz'de daha yüksek, doğu Karadeniz'de ise daha düşüktür. Bu sonuç, iki farklı iklim senaryosunun tanımıyla ilgili olabilir, çünkü RCP4.5 senaryosu, radyasyon kuvvetinin 2040 yılı civarında pike ulaşacağını ve 4.5 W/m²'de stabil olacağını varsayarken, RCP8.5 senaryosu 2100 yılına 8.5 W/m²'ye kadar yükselen bir radyasyon kuvvetini varsaymaktadır (Moss vd., 2010; Van Vuuren vd., 2011).



Şekil 7.21 H_{m0} dalga parametresinin uzun dönemli PDF grafikleri; (a) tarihsel dönem, (b–c) yakın gelecek (b) RCP4.5 (c) RCP8.5; (d–e) orta gelecek (d) RCP4.5, (e) RCP8.5. Kare, daire, yıldız, pentagram ve üçgen işaretçileri sırasıyla N1–N5'i temsil etmektedir.

H _{m0}	N1	N2	N3	N4	N5	
	Tarihsel (1970–2005)					
Min. (m)	0.0214	0.0327	0.0573	0.0089	0.0182	
Ort. (m)	1.1750	1.2097	1.0395	0.79933	0.9840	
Maks. (m)	7.8268	9.5104	6.6039	8.6603	7.2206	
Mod (m)	1.0218	1.0063	1.0028	1.0396	1.0138	
		Yakın Gelece	ek (2021–20	60) RCP4.5		
Min. (m)	0.0258	0.0402	0.0559	0.0118	0.0145	
Ort. (m)	1.1898	1.2227	1.0638	0.8204	0.9932	
Maks. (m)	8.1726	10.4031	9.7400	8.5963	9.8427	
Mod (m)	1.0245	1.0623	1.0044	1.0607	1.0370	
	Orta Gelecek (2061–2100) RCP4.5					
Min. (m)	0.0386	0.0402	0.0584	0.0064	0.0096	
Ort. (m)	1.1594	1.2072	1.0424	0.8127	0.9705	
Maks. (m)	9.0145	9.1039	8.9554	8.4568	8.0281	
Mod (m)	1.0091	1.0784	1.5098	1.1256	1.1573	
	Yakın Gelecek (2021–2060) RCP8.5					
Min. (m)	0.0461	0.0463	0.0485	0.0082	0.0081	
Ort. (m)	1.1664	1.2219	1.0616	0.8312	0.9999	
Maks. (m)	8.3282	10.1208	8.0840	8.6389	8.2140	
Mod (m)	1.0402	1.2276	1.0042	1.0167	1.0083	
	Orta Gelecek (2061–2100) RCP8.5					
Min. (m)	0.0353	0.0385	0.0584	0.0031	0.0186	
Ort. (m)	1.1451	1.2012	1.0445	0.8182	0.9594	
Maks. (m)	8.0284	8.8632	8.0608	9.2029	10.3827	
Mod (m)	1.0071	1.16743	1.0198	1.0094	1.0083	

Tablo 7.6Tarihsel ve gelecek dönemler için seçilen beş noktada H_{m0}parametresinin istatistiksel parametreleri

Farklı iklim senaryolarına göre belirgin dalga yüksekliğinin dönemsel değişkenliğini incelemek için belirgin dalga yüksekliğinin normalleştirilmiş PDF'nin yıllar arası değişkenliği, tarihsel ve gelecek dönemler için seçilen beş noktada irdelenmiştir. Her yıl için normalleştirilmiş PDF; her yıl için elde edilen PDF'nin, **Şekil 7.21**'de verilen belirgin dalga yüksekliğinin uzun dönemli tarihsel ortalamaları için hesaplanan PDF'ye bölünmesiyle hesaplanmıştır. Seçilen beş noktada belirgin dalga yüksekliğinin normalleştirilmiş PDF'nin dönemsel değişkenliği RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için sırasıyla **Şekil 7.22** ve **Şekil 7.23**'te verilmiştir.

Hem tarihsel hem de gelecek dönemler için, belirgin dalga yüksekliğinin dağılım genişliği kuzeydoğu Karadeniz'de (N5), diğer dört nokta için elde edilenlerden

daha geniştir. Bu sonuç, kuzeydoğu Karadeniz'de daha büyük ekstrem belirgin dalga yüksekliği oluşma olasılığının havzanın diğer bölgelerinde oluşma olasılıklarına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Genel olarak, RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte beş referans noktası için elde edilen belirgin dalga yüksekliği dağılım genişliği, orta gelecek dönemine göre elde edilenlerden daha geniştir. Diğer bir ifadeyle RCP4.5 senaryosu yakın gelecekte, orta gelecekten daha büyük ekstrem belirgin dalga yükseklikleri öngörmektedir (**Şekil 7.22**).

Benzer sonuçlar RCP8.5 senaryosu için de belirlenmiştir; kuzeydoğu Karadeniz'de (N5) belirgin dalga yüksekliği dağılımının genişliği hem tarihsel hem de gelecek dönemler için diğer dört nokta için elde edilenlerden daha geniştir. Gelecek dönemlerde doğu Karadeniz'de (N4 ve N5), tarihsel döneme kıyasla daha büyük ekstrem belirgin dalga yükseklikleri ortaya çıkmaktadır. RCP8.5 senaryosuna göre doğu Karadeniz'de (N4 ve N5) belirgin dalga yüksekliği dağılımının genişliği, RCP4.5 senaryosu için elde edilenlerden daha geniş olduğu, yani RCP8.5 senaryosu doğu Karadeniz'de, RCP4.5 senaryosu için elde edilenlerden daha büyük ekstrem belirgin dalga yüksekliği öngörmektedir (**Şekil 7.23**).

Bu sonuçlar, iklim değişikliğinin dalga iklimi üzerindeki (özellikle ekstrem koşullardaki) olası etkisinin, muhtemelen doğu Karadeniz'de daha etkili olacağını göstermektedir. Karadeniz üzerindeki ekstrem dalga ikliminin ayrıntılı analizi Bölüm 7.4'te değerlendirilmiştir.

327



Şekil 7.22 Seçilen beş noktada, belirgin dalga yüksekliğinin normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. RCP4.5 senaryosuna göre (a) orta gelecek, (b) yakın gelecek, (c) tarihsel. Grafikler üzerindeki 1–5 numaralandırması N1–N5'i temsil etmektedir.



Şekil 7.23 Seçilen beş noktada, belirgin dalga yüksekliğinin normalize edilen PDF'nin dönemsel değişkenliği. RCP8.5 senaryosuna göre (a) orta gelecek, (b) yakın gelecek, (c) tarihsel. Grafikler üzerindeki 1–5 numaralandırması N1–N5'i temsil etmektedir.

7.4 Fırtına Analizi ve Ekstrem Dalga İklimi

7.4.1 Fırtına analizi

Bu çalışmada, dalga yüksekliğinin fırtına başlangıcı için eşik değer Beaufort rüzgar ölçeğine göre belirlenmiştir (Bakınız Bölüm 3 ve Bölüm 6). Bu ölçeğe göre fırtına başlangıcı olarak eşik rüzgar hızının (13.9 m/s) aşılması durumunda dalga yüksekliği için eşik değer 4 m olmaktadır (Bakınız Bölüm 3 ve Bölüm 6). Dolayısıyla bu çalışmada 4 m'ye eşit ve büyük olan belirgin dalga yüksekliği, fırtına süresi için eşik değer olarak dikkate alınmıştır.

Şekil 7.24, yıllık ortalama fırtına süresinin (t_m) tarihsel ve iki gelecek dönem için uzamsal dağılımlarının göstermektedir. Bu dağılımların **Şekil 7.11**'de verilen $H_{m0,}$

ort dağılımlarından uzamsal olarak farklı olduğu, yani, batı ve orta Karadeniz'de daha büyük $H_{m0, ort}$ değerleri ortaya çıkarken, t_m 'de daha büyük değerlerin belirgin bir şekilde orta Karadeniz'de yoğunlaştığı belirlenmiştir (**Şekil 7.24**). Genel olarak, orta Karadeniz'deki t_m değerlerinin hem tarihsel hem de gelecek dönemler için havzanın diğer bölgelerine göre daha büyük olduğu tespit dilmiştir. İki gelecek dönem için RCP4.5 senaryosuna göre t_m , tarihsel dönem için elde edilenlerden biraz daha yüksek ortalama fırtına süreleri ile yaklaşık 169 saati aşmaktadır (**Şekil 7.24**a). Yakın gelecek RCP8.5 senaryosuna göre t_m (195 sa., **Şekil 7.24**d), yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre elde edilen ortalamadan daha yüksektir (182 sa., **Şekil 7.24**b). Orta gelecekte ise RCP8.5 senaryosuna göre elde edilen t_m (143 sa., **Şekil 7.24**e), RCP4.5 senaryosuna (169 sa., **Şekil 7.24**c) göre elde edilen ortalamadan daha düşüktür. Genel olarak, iki gelecek dönem için elde edilen t_m parametresinin uzamsal dağılımlarının, tarihsel döneme benzer olduğu belirlenmiştir (**Şekil 7.24**).



Şekil 7.24 t_m (H_{m0}≥4 m) Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımı; (a) tarihsel, (b, d) yakın gelecek (b) RCP4.5, (d) RCP8.5; (c, e) orta gelecek (c) RCP4.5, (e) RCP8.5

2021–2100 yıllarındaki t_m parametresinin, tarihsel döneme göre (1970–2005) nasıl değiştiği GD kullanılarak değerlendirilmiştir (Bakınız Bölüm 7.3.2). Student t-testine göre değerlendirilen istatistiksel anlamlılık seviyeleri ve GD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları **Şekil 7.25**'te verilmiştir.

Yakın gelecekte (2021–2060) t_m parametresinin değişim projeksiyonu:

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosuna göre orta ve güneydoğu Karadeniz'de fırtına olaylarında önemli bir artış gözlenmektedir. Batı Karadeniz'in neredeyse tamamında ortalama fırtına süresinde belirgin bir değişimin olmayacağı belirlenmiştir (**Şekil 7.25**a). Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu, ortalama fırtına süresinin tüm havza üzerinde belirgin şekilde daha artacağını öngörmektedir. RCP8.5 senaryosuna göre öngörülen bu artışların, RCP4.5 senaryosunun öngördüğü artışlardan çok daha belirgin olacağı belirlenmiştir (**Şekil 7.25**c).

Orta gelecekte (2061–2100) t_m parametresinin değişim projeksiyonu:

Orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre neredeyse tüm Karadeniz üzerinde ortalama fırtına süresinde belirgin bir değişimin olmayacağı belirlenmiştir (**Şekil 7.25**b). Orta gelecek RCP8.5 senaryosu, ortalama fırtına süresinin doğu Karadeniz'de oldukça belirgin bir şekilde artacağını, kuzeydoğu Karadeniz'de ise belirgin bir şekilde azalacağını öngörmektedir (**Şekil 7.25**d).



Şekil 7.25 t_m parametresi için GD (%) değerlerinin uzamsal dağılımı, (a, b) RCP4.5, (c, d) RCP8.5. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5. Sol ve sağ paneller sırasıyla yakın gelecek ve orta gelecek için sonuçları göstermektedir.

Fırtına süresinin (t) dönemsel değişimi, tarihsel (1970–2005) ve gelecek dönemler (2021–2100) için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre seçilen beş noktada incelenmiştir (**Şekil 7.26**). Doğrusal regresyon analizi ile hesaplanan uzun dönemli değişim eğilim değerleri **Tablo 7.7**'de verilmiştir. Hem tarihsel hem de gelecek dönemler için beş referans noktasında farklı eğilimler belirlenmiş olmasına karşın, her iki RCP senaryosuna göre gelecek dönemlerde, tarihsel dönemde meydana gelmeyen daha yüksek fırtına süresine sahip dalgalar ortaya çıkmaktadır. Fırtına süresi güven sınırının iki gelecek dönemde, tarihsel döneme kıyasla daha geniş olduğu, yani fırtına süresindeki değişkenliğin iki gelecek dönemde, tarihsel dönemde daha fazla değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir (**Şekil 7.26, Tablo 7.7**).



Şekil 7.26 t_m parametresi Karadeniz üzerinde seçilen beş referans noktasında tarihsel ve gelecek dönemler için t ($H_{m0} \ge 4$ m) parametresinin uzun dönemli değişim eğilimi; (a) RCP4.5, (b) RCP8.5. Kesikli çizgi %90 güven sınırını göstermektedir.

Tablo 7.7	t_m ($H_{m0} \ge 4$ m) parametresinin tarihsel ve gelecek dönemlerdeki
	değişim eğilimleri

	Tarihsel (1970–2005)		Yakın Gelecek (2021–2060) RCP4.5		Orta Gelecek (2061–2100) RCP4.5		
	(m)	(%)	(m)	(%)	(m)	(%)	
N1	-9.433	-11.584	-13.822	-12.821	-26.506	-16.269	
N2	9.265	9.597	26.177	53.571	-8.841	-6.878	
N3	2.629	5.270	17.560	59.445	-39.484	-21.785	
N4	-6.486	-13.359	1.544	2.628	-45.164	-23.632	
N5	-29.281	-32.391	17.427	41.030	-16.321	-12.842	
			Yakın Gelecek (2021–2060)		Orta Gelecek (2061–2100)		
			RCP8.5		RCP8.5		
			(m)	(%)	(m)	(%)	
N1			-34.836	-21.832	-14.963	-12.192	
N2			-38.371	-19.034	-19.478	-12.665	
N3			-20.678	-19.897	-18.228	-14.556	
N4			-18.732	-19.603	-24.892	-17.501	
N5			-13.139	-11.497	5.009	7.480	

7.4.2 Ekstrem dalga iklimi

Karadeniz gibi yarı kapalı bir deniz genellikle okyanus ölçeğinden çok daha sakin dalga koşullarına sahiptir, ancak göreceli olarak oldukça yüksek dalgaların (maksimum dalgalar olarak adlandırılır) kaydedildiği belirlenmiştir (Divinsky vd., 2004, Rusu vd., 2006; Islek vd., 2020a. Ekstrem rüzgar ve dalga olaylarının tahmin edilmesi, kıyı ve açık deniz yapılarının tasarımında, bu yapıların ömürlerinin belirlenmesinde ve bu yapıların bakımında her zaman çok önemli rol oynamıştır.

Diğer önemli bir husus ise iklim değişikliğinin Dünya'nın hava sistemi üzerindeki olası etkileridir çünkü küresel iklim değişikliğinin rüzgar ve dalga ikliminde (şiddet, frekans, yön, firtına süresi ve ekstrem olaylar) uzun dönemli değişikliklere neden olması beklenmektedir (Hdidouan ve Staffell, 2017). Bu durum, kıyı ve açık deniz yapılarına beklenenden daha fazla zararlara neden olmaktadır (Yuksel vd., 2020). Bu nedenle, tasarım dalga parametreleri, en az 10 ila 30 yıllık yeterince uzun veri setlerine sahip uzun dönemli dalga verileri dikkate alınarak belirlenmelidir (Swain, 1997; Islek vd., 2021a, Islek ve Yuksel, 2021; Yuksel vd., 2021). Bu çalışmada, güvenilir tasarım dalga yüksekliğini belirlemek için EC-EARTH rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği sadece tarihsel (1970-2005) dönem için değil iki gelecek dönem (2021–2060, 2061–2100 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları) için de irdelenmiştir.

Belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer analizi, rüzgar hızının ekstren değer analizinde olduğu gibi (Bölüm 6.4.3), GEV dağılımı ile incelenmiştir. Seçilen beş noktada belirgin dalga yüksekliğinin GEV dağılımları **Şekil 7.27**'de, farklı yineleme dönemlerine (10 50 100 yıl) karşılık gelen belirgin dalga yüksekliği ve bu dalga yüksekliklerinin tarihsel döneme göre yüzde cinsinden değişim (RD, Rölatif Değişim) değerleri **Tablo 7.8**'de verilmiştir. RD aşağıda verildiği gibi dikkate alınmıştır:

$$RD = \left(\frac{H_{m0,Gelecek} - H_{m0,Tarihsel}}{H_{m0,Tarihsel}}\right) x100$$
(7.2)

Kuzeybatı Karadeniz'de (N1), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrileri, tüm yineleme dönemleri için tarihsel döneme göre hesaplanan eğrinin üzerindedir. Orta gelecek RCP4.5 senaryosu için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliği, orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre hesaplananlardan biraz daha büyüktür. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu ve orta gelecek RCP4.5 senaryosu, 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliğini, tarihsel dönemle karşılaştırıldığında, sırasıyla yaklaşık %4 ve %6 daha yüksek tahmin etmektedir (**Şekil 7.27**a1 ve b1, **Tablo 7.8**).

Güneybatı Karadeniz'de (N2), iki RCP senaryosuna göre yakın gelecek için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrileri, tüm yineleme dönemleri için tarihsel döneme göre hesaplanan eğrinin üzerindedir, yani gelecek dönemlerde öngörülen ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri tarihsel dönemde öngörülenlerden daha büyüktür. Ancak, orta gelecek RCP4.5 senaryosu, orta gelecek RCP8.5 senaryosuna ve tarihsel döneme kıyasla daha düşük ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri öngörmektedir. 100 yıllık yineleme dönemi için ekstrem belirgin dalga yüksekliği, yakın gelecekte iki RCP senaryona göre yaklaşık %5 artmasına karşın, orta gelecek RCP4.5 senaryosuna göre yaklaşık %4 azalmakta ve orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre ise neredeyse sabit kalmaktadır (**Şekil 7.27**a2 ve b2, **Tablo 7.8**).

Orta Karadeniz'de (N3), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre hem yakın gelecek hem de orta gelecek dönemleri için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrileri, özellikle büyük yineleme dönemlerinde, tarihsel dönem için hesaplanan eğrinin belirgin bir şekilde üzerindedir, yani iki iklim senaryosu gelecek dönemlerde orta Karadeniz'de daha büyük ekstrem dalga yüksekliği değerleri öngörmektedir. Yakın gelecekte 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliği, seçilen noktalar arasından en yüksek artış oranına %35 değeri ile orta Karadeniz'de ulaşmaktadır. Orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve her iki RCP senaryosu için hesaplanan eğrilerin, tarihsel dönem için hesaplanan eğrinin oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. Orta

gelecek her iki RCP senaryosuna göre 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliği, tarihsel dönemde hesaplanandan yaklaşık %28 daha büyüktür (**Şekil 7.27**a3 ve b3, **Tablo 7.8**).

Doğu Karadeniz'de (güneydoğu Karadeniz, N4 ve kuzeydoğu Karadeniz, N5), her iki iklim senaryosuna göre yakın gelecek için hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrileri, tüm yineleme dönemlerinde, tarihsel dönem için hesaplanan eğrinin üzerindedir (**Şekil 7.27**a4 ve a5, **Tablo 7.8**). Doğu Karadeniz'de (N4 ve N5), orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre hesaplanan ekstrem değer dağılım eğrisinin eğimi, orta gelecek RCP4.5 senaryosu ve tarihsel döneme göre hesaplanan eğrilerin eğiminden önemli ölçüde daha diktir. Diğer bir ifadeyle, orta gelecek RCP8.5 senaryosu doğu Karadeniz'de, diğer dönemlerden (orta gelecek RCP4.5 senaryosu ve tarihsel dönemde) çok daha büyük ekstrem belirgin dalga yüksekliği değerleri öngörmektedir (**Şekil 7.27**b4 ve b5, **Tablo 7.8**). Orta gelecek RCP8.5 senaryosu, 100 yıllık yineleme dönemi için hesaplanan ekstrem belirgin dalga yüksekliğini güneydoğu (N4) ve kuzeydoğu (N5) Karadeniz'de, tarihsel döneme kıyasla sırasıyla %12 ve %24 daha yüksek tahmin etmektedir.



Şekil 7.27 Seçilen beş noktada yıllık oluşma olasılıklarına göre belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değer dağılımı; (a, b) tarihsel, (a) yakın gelecek, (b) orta gelecek

	Yineleme	H _{m0} (m)(RD,%)				
	Dönemi	Touthool	Yakın Gelecek (2021–2060)		Orta Gelecek (2061–2100)	
	(Yıl)	Tarinsei	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
N1	10	6.76	7.05	7.18	6.89	6.93
			(+4.23%)	(+6.22%)	(+1.84%)	(+2.49%)
	50	7.68	7.92	8.07	8.05	7.87
			(+3.21%)	(+5.11%)	(+4.81%)	(+2.51%)
	100	8.04	8.25	8.40	8.54	8.22
			(+2.57%)	(+4.45%)	(+6.28%)	(+2.29%)
NO	10	7.54	7.78	7.99	7.50	7.78
	10		(+3.15%)	(+6.01%)	(-0.51%)	(+3.13%)
	50	8.92	9.25	9.36	8.65	9.04
INZ	- 50		(+3.70%)	(+5.02%)	(-2.99%)	(+1.40%)
	100	9.51	9.89	9.95	9.12	9.54
	100		(+3.99%)	(+4.65%)	(-4.07%)	(+0.32%)
N3	10	6.20	7.20	6.87	6.95	7.20
			(+16.00%)	(+10.68%)	(+12.09%)	(+15.98%)
	50	6.67	8.60	7.99	8.22	8.28
			(+28.87%)	(+19.72%)	(+23.16%)	(+24.17%)
	100	6.82	9.21	8.44	8.75	8.70
			(+35.12%)	(+23.72%)	(+28.29%)	(+27.60%)
	10	7.05	7.34	7.26	7.06	7.69
			(+4.03%)	(+2.86%)	(+0.12%)	(+9.01%)
N4	50	8.06	8.34	8.24	8.23	8.98
114			(+3.49%)	(+2.23%)	(+2.19%)	(+11.47%)
	100	8.43	8.72	8.61	8.70	9.47
			(+3.41%)	(+2.04%)	(+3.13%)	(+12.25%)
N5	10	7.00	7.89	7.74	7.22	7.88
	10		(+12.61%)	(+10.52%)	(+3.03%)	(+12.59%)
	50	7.65	8.98	8.38	7.87	9.25
			(+17.45%)	(+9.60%)	(+2.90%)	(+21.05%)
	100	7 86	9.38	8.57	8.08	9.81
		/.00	(+19.43%)	(+9.08%)	(+2.85%)	(+24.83%)

Tablo 7.8 Seçilen beş noktada farklı yineleme dönemlerine karşılık gelen ekstrembelirgin dalga yüksekliği ve RD değerleri.

Bu çalışma kapsamında Karadeniz rüzgar ve dalga iklimi ile ilgili elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sırasıyla verilmiştir:

- 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan 40 yıllık ortalama rüzgar karakteristiklerinin ve rüzgar gücünün Karadeniz üzerinde uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.
- 1.1. Havzanın batısının doğusuna kıyasla daha büyük ortalama rüzgar hızına (neredeyse 3 katına ulaşan), daha uzun fırtına süresine (yıllık ortalama 100 sa. daha fazla) ve daha düşük değişkenliğe sahip rüzgarlara maruz kaldığı belirlenmiştir. Havzanın bastında NE, doğusunda NW rüzgarların hakim olduğu, doğudaki rüzgar yönünün bölgenin orografik yapısının etkisiyle saat akrebinin tersi yönünde bir dönüş sergilediği tespit edilmiştir.
- 1.2. ERA-Interim ve CFSR verileri ile belirlenen rüzgar hızı arasındaki farkların havzanın batısında 0.65 m/s'ye, doğusunda, özellikle kuzeydoğusunda, 1.65 m/s'ye ulaştığı belirlenmiştir. 1979–2018 yılları için Karadeniz'de ERA-Interim verileri, CFSR verilerine kıyasla daha küçük rüzgar hız tahminleri sunmuştur.
- 1.3. Rüzgar gücünün, daha şiddetli, uzun ömürlü ve istikrarlı rüzgarlarla karakterize edilen havzanın batısında, doğusuna kıyasla daha kararlı ve sürdürülebilir bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. 40 yıllık dönem için batı Karadeniz'in ortalama rüzgar gücü potansiyeli, doğusunun neredeyse 8 katına ulaşmıştır.
- 1.4. ERA-Interim verileri ile hesaplanan rüzgar gücü potansiyelinin CFSR verileri ile hesaplananlardan havzanın batısında 50 W/m², doğusunda, özellikle kuzeydoğusunda, 130 W/m² daha küçük olduğu belirlenmiştir. 1979–2018 yılları için Karadeniz'de ERA-Interim verileri ile hesaplanan rüzgar gücü

potansiyelinin, CFSR verileri ile hesaplananlardan daha küçük olduğu saptanmıştır.

- 1.5. Mevsimsel rüzgar gücü analizleri, kış mevsiminin ortalama rüzgar gücünden
 %65 daha büyük ve en büyük katkıyı sağlayan mevsim olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- 1.6. ERA-Interim verileri ile hesaplanan 40 yıllık mevsimsel ortalama rüzgar gücünün tüm havza üzerinde, CFSR verileri ile hesaplananlardan kış mevsiminde 110 W/m², bahar mevsiminde 55 W/m², yaz mevsiminde 30 W/m² ve sonbahar mevsiminde 70 W/m² daha küçük olduğu belirlenmiştir. İki veri arasındaki en büyük uyuşmazlık kuzeydoğu Karadeniz'de meydana gelmiştir.
- 1.7. Havzanın batı-doğu değişkenliği için yapılan detaylı yerel analizler; ortalama rüzgar hızının havza üzerinde hafif değişme eğiliminde olduğunu ancak ekstrem rüzgar hızlarının, havza üzerinde, doğu tarafından daha belirgin olarak, artma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Batı ve doğu Karadeniz'de fırtına sayılarının yakın ancak fırtına süresinin belirgin şekilde batı tarafında daha uzun olduğu saptanmıştır. Bu sonuç, şiddetli fırtınaların tüm havza üzerinde ortaya çıktığını ancak batı Karadeniz fırtınalarının doğusuna kıyasla daha uzun ömürlü olduğunu göstermiştir.
- 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR verileri ile hesaplanan 40 yıllık ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz üzerinde uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.
- 2.1. Uzun dönemli (40 yıllık) ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin batı Karadeniz'de 1015.5–1017 hPa değerleri arasında değişirken doğu Karadeniz'de daha düşük olarak 1014.5–1016 hPa arasında değişmesi, havza üzerinde uzamsal (batı-doğu) değişkenliğin olduğunu göstermiştir.
- 2.2. On yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerlerin ilk on yıldan (1979–1988), son on yıla (2009–2018) doğru tüm havza üzerinde yaklaşık 1 hPa değeri ile azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuç, 1979

yılından 2018 yılına doğru azalma eğilimi, yıllık ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinde de bulunmuştur. Bu azalan eğilimlerin doğu Karadeniz'de batısına kıyasla daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

- 2.3. ERA-Interim ve CFSR verileri ile belirlenen ortalama deniz seviyesi basıncının yıllık, on yıllık ve 40 yıllık ortalamalarına ait uzamsal dağılımların ve değerlerin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Farklı veri kaynakları için ortalama deniz seviyesi basınç değerleri arasında belirgin bir farklılığın olmadığı saptanmıştır.
- 2.4. ERA-Interim ve CFSR verileri ile yapılan yerel analizler, ortalama deniz seviyesi basınç değerlerinin doğu Karadeniz'de (%-0.10, -1.1 hPa) havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha fazla değişme (azalma) eğiliminde olduğunu göstermiştir.
- 1993–2018 yılları için AVISO verileri ile belirlenen 26 yıllık ortala deniz seviyesi değişiminin Karadeniz üzerinde uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.
- 3.1. Uzun dönemli (26 yıllık) ortalama deniz seviyesinin tüm Karadeniz üzerinde-10 cm ile 15 cm arasında değiştiği saptanmıştır.
- 3.2. On yıllık ortalama deniz seviyesinin ilk on yıldan (1993–2002), son on yıla (2013–2018) doğru tüm havza üzerinde, doğu Karadeniz'de daha belirgin olarak, artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.
- 3.3. Ortalama deniz seviyesinin on yıllar arasındaki değişiminin batı
 Karadeniz'de +0.2 cm değerine, doğu Karadeniz'de, daha belirgin olarak,
 +6.14 cm değerine ulaştığı bulunmuştur.
- 1981–2018 yılları için NOAA/NCEI verileri ile belirlenen 38 yıllık ortalama deniz yüzeyi sıcaklığı değişimlerinin Karadeniz üzerinde uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.
- 4.1. Uzun dönemli (38 yıllık) ortalama deniz yüzeyi sıcaklığının tüm Karadeniz üzerinde -0.57 °C ile +1.07 °C arasında değiştiği, kuzeybatı Karadeniz'in kıyı

bölgeleri hariç, havza üzerinde belirgin şekilde artma eğiliminde olduğu saptanmıştır.

- 4.2. On yıllık ortalama deniz yüzeyi sıcaklığının ilk on yıldan (1981–1990), son on yıla (2011–2018) doğru tüm havza üzerinde belirgin şekilde artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.
- 4.3. Ortalama deniz yüzeyi sıcaklığının on yıllar arasındaki değişiminin batı Karadeniz'de +0.46 °C değerine ulaştığı, doğu Karadeniz'de, daha yüksek olarak, +1.64 °C değerini aştığı tespit edilmiştir.
- 4.4. Uzun dönemli ortalama, on yıllık ortalama ve on yıllar arasındaki değişim ile ilgili uzamsal dağılımlar, Karadeniz çalışma alanının, küresel ısınmanın etkisi aldatında olduğunu göstermiştir.
- ERA-Interim ve CFSR rüzgar verilerinin, MIKE ve SWAN yazılımlarına girdi olarak kullanılmasıyla 1979–2018 yılları için elde edilen dalga karakteristiklerinin Karadeniz üzerinde uzamsal ve zamansal değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.
- 5.1. Havzanın batısının doğusuna kıyasla daha büyük dalga yüksekliğine (H_{m0}, H_{maks}) (2.5 katını aşan), daha uzun dalga periyoduna (T_m, T_p) (1.5 katını aşan), ve daha düşük değişkenliğe sahip dalgalara maruz kaldığı belirlenmiştir. Hakim dalga yönünün havzanın batısında NE, doğusunda NW olduğu, rüzgar yönünde olduğu gibi, dalga yönünde de hakim dalga yönünün doğu Karadeniz'de saat akrebinin tersi yönünde bir dönüş sergilediği belirlenmiştir.
- 5.2. CFSR rüzgar girdileri ile sayısal modelden elde edilen dalga parametrelerinin ortalama değerlerinin ERA-Interim ile elde edilenlere kıyasla havzanın batısında birbirine çok yakın iken havzanın doğusunda, özellikle kuzeydoğusunda, belirgin dalga yüksekliğinde 1.25 katına, ortalama dalga periyodunda 1.15 katına ve fırtına süresinde 4 katına ulaştığı bulunmuştur. 1979–2018 yılları için Karadeniz'de ERA-I rüzgar girdileri, CFSR rüzgar girdilerine kıyasla daha küçük dalga tahminleri sunmuştur.

- 5.3. Ortalama dalga karakteristiklerinin uzun dönemli değişim eğilimlerine göre Karadeniz'in batısının, özellikle güneybatısının, havzanın geri kalanına kıyasla daha az değişim eğilimine sahip dalgalara, havzanın doğusunun batısına kıyasla daha belirgin değişim eğilimine sahip dalgalara maruz kaldığı tespit edilmiştir.
- 5.4 İki farklı rüzgar girdileri ile MIKE 21 SW ve SWAN yazılımından 1979–2018 yılları için ile elde edilen dalga parametrelerinin ortalama, mod, maksimum, persantil (90., 95., 99.) değerleri arasında belirgin bir farklılık olmadığı saptanmıştır. Dolayısıyla dalga gücü değerlendirmelerinde SWAN'dan elde edilen dalga sonuçları kullanılmıştır.
- 5.5. Hem uzun dönemli hem de mevsimsel dalga gücü değerlendirmeleri, batı Karadeniz'in, özellikle güneybatısının, daha yüksek dalga gücü potansiyeli ve daha düşük değişkenlik ile karakterize olduğunu, doğu Karadeniz'in ise daha düşük dalga gücü potansiyeli ve daha yüksek değişkenlikle karakterize olduğunu göstermiştir.
- 5.6. Havzanın batı-doğu değişkenliği için yapılan detaylı yerel analizler; ortalama dalga karakteristiklerinin havza üzerinde hafif değişme eğiliminde olduğunu ancak belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değerlerinin, havzanın doğusunda batısına kıyasla daha belirgin artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. ERA-Interim verileri ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değerlerinin, CFSR verileri ile tahmin edilenlerden daha küçük olduğu tespit edilmiştir.
- 6. Beş RCA4 tarihsel (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-LR) ve üç yeniden analiz (ERA-Interim, CFSR, ERA5) rüzgar verisi arasında en iyi uyum, EC-EARTH ile CFSR arasında belirlenmiştir. Dolayısıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek ve orta gelecek rüzgar iklim projeksiyonları araştırmalarında EC-EARTH verileri kullanılmıştır.
- 6.1. Yakın gelecek (2021–2060) RCP4.5 senaryosu, tarihsel döneme göre (1970–2005) ortalama rüzgar hızının nerdeyse tüm Karadeniz'de belirgin

şekilde artacağını (rüzgar hızında %+3'e, dalga parametrelerinde %+3.5'e ulaşan), RCP8.5 senaryosu ise bu belirgin artışların sadece doğu Karadeniz'de, özellikle güneydoğusunda, olacağını öngörmüştür.

- 6.2. Orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 senaryosu, tarihsel döneme göre ortalama rüzgar hızında belirgin bir farklılığın olmayacağını, RCP8.5 senaryosu ise gelecekte, doğu Karadeniz'de daha belirgin olarak, azalma eğilimlerinin (rüzgar hızında %-6'yı, dalga parametrelerinde %-5'i aşan) ortaya çıkacağını öngörmüştür.
- 6.3. Yakın gelecek RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna göre ortalama rüzgar hızını doğu Karadeniz'de biraz daha yüksek tahmin ederken, orta gelecek RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna kıyasla neredeyse tüm Karadeniz üzerinde daha düşük ortalama rüzgar hızı tahminlerini öngörmüştür.
- 6.4. Rüzgar hızının yıllık; ortalama, maksimum, 95. ve 99. persantil değerlerinin RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte güneybatı Karadeniz'de belirgin artma eğiliminde olacağını, RCP8.5 senaryosuna göre orta gelecekte belirgin azalma eğiliminde olacağını tahmin etmiştir.
- 6.5. Gelecekte 100 yıllık yineleme dönemi için rüzgar hızının tarihsel döneme göre batı Karadeniz'de %7, doğu Karadeniz'de %27 değerleriyle tüm havzada artma eğiliminde olacağı tespit edilmiştir. Bu sonuç, farklı iklim (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryolarının, ekstrem rüzgar karakteristikleri üzerinde daha belirgin etkisi olduğunu göstermiştir.
- 7. Beş RCA4 tarihsel (EC-EARTH, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-ES, ve MPI-ESM-LR) ve referans (CFSR5) rüzgar girdisi ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği tahmin performansı EC-EARTH için daha iyi olduğu bulunmuştur. Bu nedenle EC-EARTH rüzgar girdileri kullanılarak modelden elde edilen dalga verileri ile Karadeniz'in dalga iklim projeksiyonu 2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek için iki RCP senaryosu (RCP4.5 ve RCP8.5) için incelenmiştir.

- 7.1. Yakın gelecek (2021–2060) RCP4.5 senaryosu, tarihsel döneme göre (1970–2005) ortalama dalga parametrelerinin (H_{m0}, H_{maks}, T_m, T_p) nerdeyse tüm Karadeniz'de artacağını ve bu artışların doğu Karadeniz'de daha belirgin olacağını öngörmüştür. RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna benzer ancak daha belirgin oranlarda ortalama dalga parametrelerinin doğu Karadeniz'de artacağını tahmin etmiştir.
- 7.2. Orta gelecek (2061–2100) RCP4.5 senaryosu, tarihsel döneme göre ortalama dalga parametrelerinde belirgin bir farklılığın olmayacağını, RCP8.5 senaryosu ise gelecekte, dalga parametrelerinin özellikle kıyı alanlarına doğru belirgin bir şekilde değişeceğini (kuzey Karadeniz'de azalacağını, güneydoğu Karadeniz'de artacağını) öngörmüştür.
- 7.3. Yakın gelecekte RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre öngörülen dalga parametreleri arasında belirgin bir farklılığın olmadığı belirlenmiştir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosu, RCP4.5 senaryosuna kıyasla dalga parametrelerini güneydoğu Karadeniz'de, belirgin şekilde daha büyük tahmin ettiği saptanmıştır.
- 7.5. Dalga iklim projeksiyonu için yapılan yerel analizlerden batı Karadeniz'deki belirgin dalga yüksekliğinin PDF grafiklerinin hem tarihsel hem de gelecek dönemler için havzanın diğer bölgeleri için elde edilen PDF grafiğinden daha uzun kuyruklu ve daha geniş, daha büyük dalga yüksekliklerinde daha yüksek olasılıklar, olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, batı Karadeniz'in gelecek dönemlerde (2021–2100) doğu Karadeniz'den daha büyük belirgin dalga yüksekliklerine sahip olmaya devam edeceğini ortaya çıkarmıştır. Karadeniz'in farklı bölgelerinde gelecek dönemler için yapılan ekstrem değer analizi, belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değerlerinin gelecekte, tarihsel dönemdekilerden belirgin şekilde daha büyük olacağını göstermiştir. Belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değerlerinin tarihsel döneme göre artışları; batı Karadeniz'de orta düzeyde, orta Karadeniz'de belirgin şekilde, doğu Karadeniz'de belirgin şekilde, kuzeydoğu Karadeniz'de çarpıcı şekilde ortaya çıkmıştır. Doğu Karadeniz, havzanın diğer bölümlerine kıyasla en düşük

ortalama belirgin dalga yüksekliğine sahip olmasına karşın, ekstrem belirgin dalga yüksekliği ve artışları oldukça yüksektir. Örneğin 100 yıllık yineleme dönemi için belirgin dalga yüksekliğinin ekstrem değerleri tarihsel döneme göre batı, orta ve doğu Karadeniz'de sırasıyla %4, %27 ve %25 değerleriyle belirgin şekilde artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, farklı iklim (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryolarının, ekstrem dalga parametreleri üzerinde daha belirgin etkisi olduğunu göstermiştir.

Küresel iklim değişikliğinin Karadeniz rüzgar/dalga iklimi üzerinde olası etkilerini araştırmak için yapılan tüm alansal ve yerel olarak analizler, gelecekte Karadeniz rüzgar/dalga parametrelerinin değişme eğiliminde olacağını ve bu değişim eğilimlerinin (artma/azalma) RCP8.5 senaryosu ile doğu Karadeniz'de daha belirgin olarak ortaya çıkacağını göstermiştir. Dolayısıyla, doğu Karadeniz'in RCP8.5 senaryosunda varsayılan yüksek radyasyon kuvvetinden daha fazla etkileneceği saptanmıştır.

Batı Karadeniz'in, özellikle güneybatısının, havzanın diğer bölgelerine kıyasla kuvvetli, uzun ömürlü ve istikrarlı rüzgarlar/dalgalar ile, doğu Karadeniz'in ise batısına kıyasla nispeten zayıf, kısa ömürlü ve oldukça değişken rüzgarlar/dalgalar ile karakterize olmaya devam edeceği belirlenmiştir. Enerjik ve stabil rüzgar/dalga koşulları sebebiyle güneybatı Karadeniz, gelecek dönemlerde rüzgar/dalga gücü potansiyeli açısından önemli bir bölge olmaya devam edecektir. Diğer taraftan doğu Karadeniz'in ortalama rüzgar ve dalga karakteristiklerindeki yüksek değişkenlik nedeniyle oldukca değişken rüzgar/dalga iklimine maruz kalması beklenmektedir. 21. yüzyılın sonlarına doğru Karadeniz havzasının iklim değişikliğinin rüzgar/dalga iklimi üzerinde olası etkilerinde genel bir artış olacağı ve ortalama rüzgar/dalga özelliklerinde öngörülen bu değişikliklerin doğu Karadeniz'de daha belirgin olarak ortaya çıkacağı tespit edilmiştir.

- Aarnes, OJ., Reistad, M., vd. (2017). Projected changes in significant wave height toward the end of the 21st century: Northeast Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 3394–3303.
- Abdollahzadehmoradi, Y., Ozger, M., Altunkaynak, A. (2018). Long-term macroscale assessment of wave power of Black Sea. *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, 42, 391–414.
- Akpınar, A., Bingölbali, B., Van Vledder, G.Ph. (2017). Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations. *Ocean. Eng.*, 130, 482–497.
- Akpinar, A. (2012). Karadeniz'de Dalga Modellemesi ve Dalga Gücü Potansiyelinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ.
- Akpinar, A. ve Kömürcü, M.I. (2013). Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data. *Appl. Energy*, 101, 502–512.
- Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM) (2015).
- Alves, J.H.G.M. ve Banner, M.L. (2003). Performance of a Saturation-Based Dissipation-Rate Source Term in Modelling the Fetch-Limited Evolution of Wind Waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1274–1298.
- Anton, I.A., Rusu, L., Anton, C. (2019). Nearshore wave dynamics at Magalia beach simulated by spectral models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 206.
- Appendini, C.M., Urbano-Latorre, C.P., Figueroa, B., Dagua-Paz, C.J., Torres-Freyermuth, A., Salles, P. (2015). Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information. *Appl. Energy*, 137, 375–384.
- Arı Guner, H.A., Yuksel, Y. ve Ozkan Cevik, E. (2013). Estimation of wave parameters based on nearshore wind-wave correlations. *Ocean Engineering*, 63, 52–62.
- Arkhipkin, V.S., Gippius, F.N., Koltermann, K.P., Surkova, G.V. (2014). Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2883–2897.
- Bao, X. ve Zhang, F. (2012). Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau. *J. Clim.*, 26, 206–214.
- Baseer, A., Meyer, J.P., Rehman, S., Alam, M.M. (2017). Wind power characteristics of seven data collection sites in Jubail, Saudi Arabia using Weibull parameters. *Renew. Energy*, 102, 35–49.

- Battjes, J.A. ve Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking in random waves. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 569–587.
- Battjes, J.A. ve Stive, M.J.F. (1985). Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *J. Geophys. Res.*, 90, No. C5, 9159– 9167.
- Beji, S. ve Battjes, J.A. (1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Engineering*, 19, 151–162.
- Bondar C. (1989). The Study of the Meteorological and Hydrological Regime of the Black Sea in the Lebada Region. The National Institute of Meteorology and Hydrology, Bucharest, Technical Report.
- Booij, N., Ris, R.C. ve Holthuijsen L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part 1, Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, C4, 7649–7666.
- Bromwich, D.H., Nicolas, J.P. ve Monaghan, A.J. (2011). An assessment of precipitation changes over Antarctica and the Southern Ocean since 1989 in contemporary global reanalyses. *J. Clim.*, 24, 4189–4209.
- Caires, S. (2011), Extreme Value Analysis: Wave Data. JCOMM Technical Report No. 57.
- Cakmak, R.E., Akpinar, A., Van Vledder, G.Ph. (2019). Comparative performance analysis of different wind fields in the southern and north-western coastal areas of the Black Sea. *Mediterr. Mar. Sci.*, 20/2, 427–452.
- Carvalho, D., Rocha, A. ve Gomez-Gesteira, M. (2012). Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast. *Ocean Modelling*, 56, 31–42.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M., Silva Santos, C. (2014). WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Appl. Energy*, 117, 116–126.
- Cavaleri, L. ve Malanotte-Rizzoli, P. (1981). Wind wave prediction in shallow water. *Theory and Applications. J. Geophys., Res.*, 86(C11), 10,961–10,973.
- Cherneva, Z., Andreeva, N., Pilar, P., Valchev, N., Petrova, P., Soares, C.G. (2008). Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea. *Coast. Eng.*, 55(11), 881–893.
- Chowdhury, P., Behera, MR., ve Reeve, DE. (2019). Wave climate projections along the Indian coast. *International Journal of Climatology*, 1–12.
- Christakos, K., Furevik, B.R., Aarnes, O.J., Breivik, Q., Tuomi, L. ve Byrkjedal., Q. (2019). The importance of wind forcing in fjord wave modelling. *Ocean Dynamics*, 70, 57–75.

- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Berlin: Springer.
- Collins, J.I. (1972). Prediction of shallow water spectra. J. Geophys. Res., 77, No. 15, 2693–2707.
- Cornett, A.M. (2008). A global wave energy resource assessment. In: Proceedings of the eighteenth international offshore and polar engineering conference (ISOPE), International Society of Offshore and Polar Engineers, Vancouver, 6–11 July 2008, Paper No. ISOPE-2008-579.
- d'Angremond, K., Van der Meer J.W. ve de Jong, R.J. (1996). Wave transmission at low-crested structures, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., ASCE, Orlando, 2418–2427.
- Dalrymple, R.A., Kirby J.T. ve Hwang, P.A. (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterways, Ports, Harbours and Coastal Engineering*, 110, 67–79.
- Davy, R., Gnatiuk, N., Pettersson, L. ve Bobylev, L. (2018). Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1652–1659.
- DHI, (2007). MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Document, 42.
- Divinsky, B.V. ve Kosyan, R.D. (2015). Observed wave climate trends in the Offshore Black Sea from 1990 to 2014. *Mar. Phys.*, 55(6), 837–843.
- Divinsky, B.V. ve Kosyan, R.D. (2017). Spatiotemporal Variability of the Black Sea Wave Climate in the last 37 years. *Cont. Shelf Res.*, 136, 1–19.
- Divinsky, B.V. ve Kosyan, R.D. (2019). Climatic trends in the fluctuations of wind waves power in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235, 106577.
- Divinsky, B.V., Levin, B.V., Lopatukhin, L.I., Pelinovsky, E.N. ve Slyunyaev, A.V. (2004). A freak wave in the Black Sea: Observations and simulation. *Doklady Earth Sciences*, 395A, 438–443.
- Efimov, V.V., Anisimov, A.E. (2011). Climatic parameters of wind-field variability in the Black Sea region: numerical reanalysis of regional atmospheric circulation. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 47 (3), 350–361.
- Eldeberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Netherlands.
- Eldeberky, Y. ve Battjes, J.A. (1995). Parameterization of triad interactions in wave energy models. Paper Presented at Coastal Dynamics Conference, ASCE., Gdansk, Poland, 140–148.

- Eldeberky, Y. ve Battjes, J.A. (1996). Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *J. Geophys. Res.*, 101, No. C1, 1253–1264.
- EURO-CORDEX, (2017). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. 1–27.
- Galabov, V. (2013). On the wave energy potential of the Bulgarian Black Sea coast. *Marine and Ocean Ecosystems*, 831–838. In: Proceedings of 13th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2013, Bulgaria.
- Galabov, V. (2015). The Black Sea Wave Energy: The Present State and the Twentieth Century Changes. <u>https://arxiv.org/pdf/1507.01187.pdf</u>
- Galabov, V. (2020). The western Black Sea waves 1980-2020 study based on ERA5. Natural Hazards and Risks, 302–310. 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKs At: Sofia, Bulgaria.
- Galabov, V. ve Kortcheva, A. (2013). The influence of the meteorological forcing on the reconstructions of historical storms in the Black Sea. *Marine and Ocean Ecosystems*, 855–862. In: Proceedings of 13th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2013, Bulgaria.
- Ganea, D., Mereuta, E., Rusu, L. (2018) Estimation of the near future wind power potential in the Black Sea. *Energies*, 11(11), 3198.
- Garmashov, A.V., Kubryakov, A.A., Shokurov, M.V., Stanichny, S.V., Toloknov, A.I., Korovushkin, Yu.N. (2016). Comparing satellite and meteorological data on wind velocity over the Black Sea. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 52 (3), 309–316.
- Gonçalves, M., Martinho, P. ve Guedes Soares, C. (2018). A 33-year hindcast on wave energy assessment in the western French coast. *Energy*, 790–801.
- Harper, L. (2018) What Are Climate Models and How Accurate Are They?. <u>https://blogs.ei.columbia.edu/2018/05/18/climate-models-</u> <u>accuracy/#:~:text=When%20creating%20climate%20models%2C%20s</u> <u>cientists,models%2C%20and%20general%20circulation%20models.</u>
- Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part 1, General theory. *J. Fluid Mech.*, 12, 481–500.
- Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Boundary Layer Meteor.*, 6, 107–127.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., M["]uller, P., Olbers, M.J., Richter, K., Sell W. ve Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr.* Z. Suppl., 12(A8), 1-95.

- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H. ve Barnett, T.P. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum, part 2: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11), 1378–1391.
- Hdidouan, D. ve Staffell, I. (2017). The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. *Renewable Energy*, 101, 575–592.
- Hemer, M.A., ve Trenham, C.E. (2016). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble, *Ocean Modelling*, 103, 190–203.
- Hersbach, H. ve Janssen, P.A.E.M. (1999), Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM). *J. Atmos. Ocean Tech.*, 16, 884–892.
- Holthuijsen, L.H. ve De Boer, S. (1988). Wave forecasting for moving and stationary targets. *Computer modelling in Ocean Engineering*, Eds. B.Y. Schrefler and O.C. Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 231–234.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A. ve Booji, N. (2003). Phase-decoupled refractiondiffraction for spectral wave models. *Coastal Engineering*, 49, 291–305.
- IPCC 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- IPCC 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 996 pp.
- IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC 2014. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K. ve Meyer, L.A. (Ed.), Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- Islek, F. ve Yuksel, Y. (2021). Inter-comparison of long-term wave power potential in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with

two different wind fields. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93, 101192.

- Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin C. (2020a). Spatiotemporal long-term trends of extreme wind characteristics over the Black Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 90, 101132.
- Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin C. (2020b). Long-term variability of the mean sea level pressure field over the Black Sea. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(4), 453–464.
- Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C. ve Ari Guner, H.A. (2021a). Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea using two different wind fields. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 94, 101165.
- Islek, F., Yuksel, Y., ve Sahin C. (2021b). Evaluation of regional climate models and future wind characteristics in the Black Sea. *International Journal of Climatology*, 1–25.
- Islek, F., Yusek Y., and Sahin C. (2020c). Assessments of long-term wind and wave trends in the Black Sea. *Proceedings of virtual Conference on Coastal Engineering*. <u>https://doi.org/10.9753/icce.v36v.waves.5</u>
- Jahangir, MH. ve Mazinani, M. (2020). Evaluation of the convertible offshore wave energy capacity of the southern strip of the Caspian Sea. *Renewable Energy*, 152, 331–346.
- Janssen, P.A.E.M. (1989). Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 745–754.
- Janssen, P.A.E.M. (1991). Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.*, 21(11), 1631–1642.
- Janssen, P.A.E.M., Lionello, P. ve Zambresky, L. (1989). On the interaction of wind and waves, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A329, 89–301.
- Jimenez, B., Moennich, K., Rey, J. ve Durante, F. (2011). Use of different globally available long-term data sets and its influence on expected wind farm energy yields. *DEWI-Magazin*, 22, 14–18.
- Johnson, H.K. ve Kofoed-Hansen, H. (2000). Influence of bottom friction on sea roughness and its impact on shallow water wind wave modelling. J. Phys. Oceanogr., 30, 1743–1756.
- Jonsson I.G. ve Carlsen, N.A. (1966). Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer, *J. Hydraul. Res.*, 14, 45-60.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Celliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, E. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–472.

- Kaminsky, G.M. ve Kraus, N.C. (1993). Evaluation of depth-limited wave breaking criteria. Proc. Of 2nd Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, 180–193.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. (2002). NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1631–1643.
- Katz, R.W., Parlange, M.B. ve Naveau, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, 1287–1304.
- Koletsis, I., Kotroni, V., Lagouvardos, K. ve Soukissian, T. (2016). Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 234–245.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. ve Janssen P.A.E.M. (1994). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560pp.
- Komen, G.J., Hasselman, S. ve Hasselman, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271–1285.
- Kubik, M.L., Coker, P.J. ve Hunt, C. (2011). Using meteorological wind data to estimate turbine generation output: a sensitivity analysis, in: World Renewable Energy Congress-Sweden; Linköping; Sweden, 8-13 May 2011, vol. 057, Linköping University Electronic Press, 2011, pp. 4074–4081.
- Kubryakov, A., Stanichny, S., Shokurov, M., Garmashov, A. (2019). Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements. *Remote Sens. Environ.*, 224, 236–258.
- Lemos, G., Semedo, A., Dobrynin, M., Behrens, A., Staneva, J., Bidlot, JR., ve Miranda, P.M.A. (2019). Mid-Twenty-First Century Global Wave Climate Projections: Results from a Dynamic CMIP5 Based Ensemble. *Global and Planetary Change*, 172, 69–87.
- Letcher, T. (2017). Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines, 1st624 ed.; Academic Press/Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 622p, ISBN 9780128094518
- Lin, W., Sanford, L.P. ve Suttles S.E. (2002). Wave measurement and modeling in Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 22, 2673–2686.
- Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F., Fortes, C.J. (2017). Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. *Energy*, 121, 176–184.
- Liu, F., Sun, F., Liu, W., Wang, T., Wang, H., Wang, X., Lima, W.H. (2019). On wind speed pattern and energy potential in China. *Appl. Energy*, 236, 867–876.
- Lozano, I., Devoy, R.J.N., May, W., Andersen, U. (2004). Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm

records and of greenhouse gas induced climate scenario. *Mar. Geol.*, 210, 205–225.

- Luankaeo, S. ve Tirawanichakul, Y. (2017). Assessment of wind energy potential in Prince of Songkla University (South Part of Thailand): Hatyai campus. Sci. *Direct Energy Prodecia*, 138, 704–709.
- Madsen, O.S., Poon Y.-K. ve Graber, H.C. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492–504.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., and van Vuuren, D.P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change*, 109, 213–241.
- Menendez, M., Tomas, A., Camus, P., Garcia-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Méndez, F.J., Losada, I.J. (2011). A methodology to evaluate regionalscale offshore wind energy resources. In: OCEANS, 2011 IEEE. Spain, 6– 9 June 2011.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) (2021). "IPCC İklim Değişikliği Senaryoları ve Tarihsel Gelişimi".
- MIKE 21 SW (2014). User Manual.
- Miles, J.W. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *J. Fluid Mech.*, 3, 185–204.
- Moeini M.H. ve Etemad-Shahidi A. (2009). Wave parameter hindcasting in a lake using the SWAN model. *Scientia Iranica*, 16(2), 156–164.
- Moeini, M.H. ve Etemad-Shahidi A. (2007). Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29, 137– 145.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.F. vd. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, 132 pp.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K. vd. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463 (7282) 747–756.
- Myslenkov, S.A., Shestakova, A.A., Toropov, P.A. (2016). Numerical simulation of storm waves near the northeastern coast of the Black Sea. *Russ. Meteorol. Hydro.*, 41, 706–713.
- Myslenkov, S.A., Zelenko, A., Resnyanskii, Y., Arkhipkin, V. ve Silvestrova K. (2021). Quality of the wind wave forecast in the Black Sea including storm wave analysis. *Sustainability*, 13(23), 13099.

- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., vd. (2000). IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nedulcu, LI. ve Rusu, E. (2022). An analysis of the wind parameters in the western side of the Black Sea. *Inventions*, 7, 21.
- Nelson, R.C. (1987). Design wave heights on very mild slopes: an experimental study. *Civil. Eng, Trans., Inst. Eng.,* Aust., 29, 157–161.
- Nelson, R.C. (1994). Depth limited wave heights in very flat regions. *Coastal Eng.*, 23, 43–59.
- Nielsen, P. (1979). Some basic concepts of wave sediment transport. *Series paper* 20 institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering. Technical University of Denmark, 160pp.
- Onea, F. ve Rusu, E. (2012). Wind energy assessments along the Black Sea basin. *Meteorol. Appl.*, 21, 316–329.
- Onea, F. ve Rusu, L. (2019b). Long-term analysis of the black sea weather windows. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 303.
- Phillips, O.M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech.*, 2, 417–445.
- Pishgar-Komleh, S.H. ve Akram, A. (2017). Evaluation of wind energy potential for different turbine models based on the wind speed data of Zabol region, Iran. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 22, 34–40.
- Remya, P.G., Kumar, R., Basu, S., Sarkar, A. (2012). Wave hindcast experiments in the Indian Ocean using MIKE 21 SW model. *J. Earth Syst. Sci.*, 121(2), 385–392.
- Rogers, WE., Hwang, P.A. ve Wang D.W. (2003). Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: Three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2), 366–389.
- Ruessink, B.G., Walstra, D.J.R. ve Southgate, H.N. (2003). Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. *Coastal Engineering*, 48, 139–149.
- Ruggiero P., Komar, P.D. ve Allan, J.C. (2010). Increasing wave heights and extreme value projections: The wave climate of the U.S. Pacific Northwest. *Coastal Engineering*, 57, 539-532.
- Rusu, E. (2018). An analysis of the storm dynamics in the Black Sea. *Romanian Journal of Technical Sciences–Applied Mechanics*, 63(2), 127–142.
- Rusu, E. (2019b). A 30-year projection of the future wind energy resources in the coastal environment of the Black Sea. *Renewable Energy*, 139, 228– 234.

- Rusu, E. ve Onea, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. *Renewable Energy*, 85, 687–703.
- Rusu, E., Rusu, L. ve Soares, C.G. (2006). Prediction of extreme wave conditions in the Black Sea with numerical models. *In: 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting (9WW)*. Victoria, Canada, 24–29 September.
- Rusu, E., Rusu, L., Soares, C.G. (2000). Prediction of extreme wave conditions in the wave conditions in the Black Sea with numerical models. *Towar. Green Mar. Technol. Transp.*, 845–852.
- Rusu, L. (2015). Assessment of the wave energy in the black sea based on a 15year hindcast with data assimilation. *Energies*, 8(9), 10370–10388.
- Rusu, L. (2019a). The wave and wind power potential in the western Black Sea. *Renewable Energy*, 139, 1146–1158.
- Rusu, L. (2019c). Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios. *Renewable Energy*, 142, 137–146.
- Rusu, L. (2020). A projection of the expected wave power in the Black Sea until the end of the 21st century. *Renewable Energy*, 160, 136–147.
- Rusu, L., Bernardino, M., and Guedes Soares, C. (2009). Influence of wind resolution on the prediction of waves generated in an Estuary, *Journal of Coastal Research*, 56, 1419–1423.
- Rusu, L., Bernardino, M., Soares, C.G. (2014). Wind and wave modelling in the Black Sea. *J. Oper. Oceanogr.*, 7 (1), 5–20.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadigai, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, G. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91, 1015–1057.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou,
 Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M.P.,
 van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., Becker, E. (2014).
 The NCEP climate forecast system version 2. *J. Clim.*, 27, 2185–2208.
- Santer, B.D., Wigkey, T.M.L., Boyle, J.S., Gaffen, J.S., Hnilo, J.J., Nychka, D., Parker, D.E. ve Taylor, K.E. (2000). Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series, *Journal of Geophysical Research*, 105, D6. 7337–7356.

- Scheer, T.B. (1986). The significance of differences between means. An empirical study. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 83(3), 405–408.
- Seelig, W.N. (1979). Effects of breakwaters on waves: laboratory tests of wave transmission by overtopping. *Proc. Conf. Coastal Structures*, 79, 2, 941–961.
- Smith, S. D. ve Banke, E.G. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, 665–673.
- Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliott, J.A. ve Long, R.B. (1981). Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *J. Fluid Mech.*, 102, 1–59.
- Soukissian, T. ve Tsalis, C. (2015). The effect of the generalized extreme value distribution parameter estimation methods in extreme wind speed prediction. *Natural Hazards*, 78, 1777–1809.
- Stopa, J.E. ve Cheung, K.F. (2014). Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Model.*, 75, 65–83.
- Strandberg, G., Bärring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., Kolax, M., Kupiainen, M., Nikulin, G., Samuelsson, P., Ullestig, A. ve Wang S. (2014). CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. *Reports Meteorology and Climatology*, 116, 1-84. SMHI, SE-60176 Norrköping, Sverige.
- Swain, J. (1997). Simulation of Wave Climate for the Arabian Sea and Bay of Bengal. *Ph.D. Thesis. Naval Physical and Oceanographic Laboratory, Kochi.*
- SWAN team, (2017a). SWAN Cycle III version 41.20, User Manual.
- SWAN team, (2017b). SWAN Cycle III version 41.20, Scientific and Technical Documentation.
- Swart, D.H. (1976). Predictive equations regarding coastal transports. *Proc 15th Conf. Coastal Engng*, 2pp. 1113–1132.
- Tabata, Y., Hashiguchi, H., Yamamoto, M.K., Yamamoto, M., Yamanaka, M.D., Mori, S., Syamsudin, F. ve Manik, T. (2011). Lower tropospheric horizontal wind over Indonesia: A comparison of wind profiler network observations with global reanalyses. *J. Atmos. Sol. Phys.*, 73, 986–995.
- Tolman, H.L. (1991). A third generation model for wind waves on slowly varying unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 782–797.
- Tolman, H.L. (1992a). Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 22(10), 1095–1111.

- Tolman, H.L. (1992b). An evaluation of expressions for the wave energy dissipation due to bottom friction in the presence of currents. *Coastal Engineering*, 16, 165–179.
- Tolman, H.L. ve Chalikov, D. (1996) Source terms in a third-generation wind wave model. *J. Phys. Oceonagr.*, 26, 2497–2518.
- Trusca, C. (2006). Review of the Black Sea wave spectrum. *Romanian Journal of Meteorology*, 1–12(8).
- Valchev, N., Davidan, I., Belberov, Z., Palazov, A., Valcheva, N. (2010). Hindcasting and assessment of the western black sea wind and wave climate. *J. Environ. Prot. Ecol.*, 11, 1001–1012.
- Valchev, N.N., Andreeva, N.K., Valcheva, N.N. (2013). Assessment of off-shore wave energy in the Black Sea on the basis of long-term wave hindcast. Developments in Maritime *Transportation and Exploitation of Sea Resources*, 1021–1028.
- Valchev, N.N., Trifonova, E.V., Andreeva, N.K. (2012). Past and recent trends in the western Black Sea storminess. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 961–977.
- Van der Westhuysen, A.J. (2002). The application of the numerical wind-wave model SWAN to a selected field case on the south African coast, Master Thesis, The University of Stellenbosch, Civil Engineering Department, South Africa.
- Van der Westhuysen, A.J. (2007). Advances in the spectral modelling of wind waves in the nearshore. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- Van der Westhuysen, A.J., Zijlema, M. ve Battjes, J.A. (2007). Nonlinear saturation based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coast. Engng.*, 54, 151–170.
- Van Vledder, G.Ph. ve Akpinar, A. (2015). Wave model predictions in the Black Sea: sensitivity to wind fields. *Appl. Ocean. Res.*, 53, 161–178.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Volker, K., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, J.S., Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*. 109, 5–31.
- Velea, L., Bojariu, R., Cica, R. (2014). Occurrence of extreme winds over the black sea during January under present and near-future climate. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 14, 1–2.
- Vilsmeier R. ve Hanel, D. (1995). Adaptive solutions for unsteady laminar flows on unstructured grids. *Int J. Numer. Meth. Fluids.*, Vol. 22, 85–101.
- W.A.M.D.I. Group, Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionellp, P., Guillaume, A., Cardone,
V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L. ve Ewing, J.A. (1988). The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775–1810.

- Weber, S.L. (1991). Bottom friction for wind sea and swell in extreme depthlimited situations. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 149–172.
- Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A., Chang, H.-R. (2005). Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844–1846.
- Wieringa, J. (1993). Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 63, 323–363.
- Wu, J. (1982). Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *J. Geophys. Res.*, 87, C12, 9704–9706.
- Yamada, T. ve Mellor, G.A. (1975). A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(12), 2309–2329.
- Yan, L. (1987). An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling. Scientific report WR-No 87–8, De Bilt, The Netherlands.
- Young, I.R. (1999). Wind generated ocean waves. in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M. E. McCormick, Elsevier.
- Yuksel, Y., Yuksel, Z.T. ve Sahin, C. (2020). Effect of long-term wave climate variability on performance-based design of coastal structures. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(4), 407–416.
- Yuksel, Y., Yuksel, Z.T., Islek, F., Sahin, C. ve Ari Guner, H.A. (2021). Spatiotemporal long-term trends of wind and wave climate and extreme characteristics over the Sea of Marmara. *Ocean Engineering*, 228, 108946.
- Yüksel, Y. ve Çevik, E. (2016). Kıyı Mühendisliği, 2. Baskı, BETA Yayınevi, İstanbul.
- Zecchetto, S. ve De Bisasio, F. (2007). Sea Surface Winds over the Mediterranean Basin from Satellite Data (2000–04): Meso- and Local-Scale Features on Annual and Seasonal Time Scales. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 814–827.
- Zijlema, M., Van Vledder, G.P. ve Holthuijsen, L.H. (2012). Bottom friction and wind drag for wave models. *Coastal Engineering*, 65, 19–26.

Bu çalışmada, Karadeniz rüzgar iklimi ve fırtına analizleri için bu bölümde detaylı olarak açıklanan istatistiksel parametreler dikkate alınmıştır.

A.1 Ekstrem dalga iklimi

Rüzgar şiddeti, Beaufort rüzgar ölçeğinden faydalanılarak tanımlanmaktadır. Bu ölçekteki Beaufort sayısı ve ortalama rüzgar hızı uluslararası değerlerdir; ancak rüzgarların adı ve tanımlanan belirtileri ülkeden ülkeye değişebilmektedir. Ortalama rüzgar hızı, Beaufort ölçeğine göre ortalama su seviyesinin 10 m üzerinde ölçülerek tanımlanmıştır.

Bu çalışmada fırtına analizi, fırtına süresi ve sayısı (sıklığı) ile araştırılmıştır. Fırtına süresi için sınır değer, Tablo A.1'de verilen Beaufort rüzgar ölçeğinden faydalanılarak belirlenmiş ve rüzgar hızının 13.9 m/s'ye eşit veya büyük olması sınır değer olarak dikkate alınmıştır (Islek vd., 2020a). Rüzgar hız değerlerinin sayılabilmesi için fırtına olarak diğer bir ifadeyle firtina sayısının hesaplanabilmesi için iki kriter dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki sınır değer olarak seçilen rüzgar hızının 13.9 m/s'ye eşit veya büyük olmasıdır. Ancak bu sınır değeri aşan her rüzgar hızı, fırtına olarak değerlendirilemeyeceği için ikinci kriter olarak aralarındaki süre incelenmiştir ve aralarında en az 48 saat olanlar firtina olarak tanımlanmıştır (Caires, 2016). Bu çalışmada firtina sayısı için rüzgar hızının 13.9 m/s'ye eşit ve büyük olması ve aynı zamanda aralarındaki süre 48 sa'ya eşit ve büyük olması kriterleri kullanılmıştır

Beaufort	Rüzgar Adı	Rüzgar Hızı		Desufart		Rüzgar Hızı	
		m/s	knots	Beauroft	Kuzgar Adi	m/s	knots
0	Sakin	0.0–0.2	0. –0.5				
1	Esinti	0.3–1.5	1–3	7	Fırtınamsı Rüzgar	13.9–17.1	28–33
2	Hafif rüzgar	1.6–3.3	4–6	8	Fırtına	17.2–20.7	34–40
3	Tatlı Rüzgar	3.4–5.4	7–10	9	Kuvvetli Fırtına	20.8–24.4	41–47
4	Orta Rüzgar	5.5–7.9	11–16	10	Tam Firtina	24.5–28.4	48–55
5	Sert Rüzgar	8.0–10.7	17–21	11	Çok Şiddetli Fırtına	28.5–32.6	56–63
6	Kuvvetli Rüzgar	10.8–13.8	22–27	12	Kasırga	32.7–	64–

Tablo A.1 Beaufort rüzgar ölçeği

A.2 Rüzgar verilerinin istatistiksel analiz

Verilerin toplanması, düzenlenmesi, tablo grafiklerle özetlenmesi, ve karşılaştırılması ve yorumlanması için çeşitli istatistiksel parametreler kullanılmaktadır. Bu parametreler, analizlerden elde edilen sonuçların güvenirliliğini sayısal olarak ifade etmeyi sağlamaktadır (mod, medyan, ortalama, standart sapma (σ), varyans (σ^2), değişim katsayısı (DK), ortalama karesel hata (MSE), ortalama karekök hatası (RMSE), normalize edilmiş karelerinin ortalamasının karekökü (NRMSE), korelasyon katsayısı (R) vb.). Bu parametrelerden bazıları ile yapılan detaylı değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

A.2.1 Ortalama hız

Verilerin incelenmesi ve değerlendirilmesinde, verilerin ortalamasının hesaplanması gerekli olmasına karşın tek başına yeterli değildir. Ortalamaları aynı fakat değişkenlikleri birbirinden çok farklı veriler olabilmektedir (**Şekil A.1**). Bu durumda verilerin ortalama etrafındaki dağılımıyla ilgili olan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada önce ortalama, daha sonra ihtiyaç duyulan diğer parametreler irdelenmiştir.



Şekil A.1 Ortalamaları aynı fakat değişkenlikleri farklı olan iki serinin dağılımları Çalışma kapsamında dikkate alınan ECMWF ve NOAA/NCEP veri tabanlarından indirilen veriler matris olarak düşünülürse, sadece uzamsal çözünürlük 2 boyutlu bir matrisi, zamansal çözünürlük ile 3 boyutlu bir matrisi tanımlamaktadır. Ortalama hız değerlerine ulaşabilmek için önce her bir noktadaki u ve v hız bileşenlerinin mutlak değerce zamansal ortalaması alınmış ve bileşke hıza geçilmiştir. Böylece her bir noktada belirli bir zaman aralığı için ortalama hız elde edilmiştir. Yani 3 boyutlu olan matris, 2 boyuta dönüştürülmüştür. Bu adım zaman boyutunda yapıldığı için buna **zamansal ortalama rüzgar hızı** adı verilmiş ve aşağıda verildiği gibi dikkate alınmıştır.

$$V_m = \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{|u_i| + \dots + |u_N|}{N}\right)^2 + \left(\frac{|v_i| + \dots + |v_N|}{N}\right)^2}$$
(A.1)

burada u ve v hız bileşenlerini (m/s), N ise zaman adımını tanımlamaktadır.

A.2.2 Değişim katsayısı

Standart sapma, veriyi oluşturan değerlerin ortalamadan ne kadar farklı olduğunu gösteren bir parametredir. Ancak veriler farklı ölçü birimlerine göre ölçülmüşler ise standart sapma karşılaştırma hakkında yetersiz kalmaktadır. Bu durumda verilerin standart sapmaları, kendi ortalamalarına bölünüp yüz ile çarpılır yani yüzde olarak hesaplanırsa gözlem değerlerinin büyüklüklerinden ve birimlerinden kaynaklanan farklılıklardan arındırılmış olur. Bu parametre, değişim katsayısı (DK) olarak adlandırılmaktadır.

Değişim katsayısının küçük olması, verilerin ortalama etrafında daha yoğun dağıldığını, büyük olması ise ortalama etrafında daha fazla dağılım gösterdiği anlamına gelmektedir. Standart sapma ve değişim katsayısı aşağıda verilen ifadeler ile hesaplanmaktadır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - x_{ort})^2}{N}}$$
(A.2)

$$DK = \frac{\sigma}{x_m} \tag{A.3}$$

burada, σ standart sapma, x serideki değerler, N zaman adımı, DK değişim katsayısını göstermektedir.

A.2.3 Olasılık ve kümlatif yoğunluk fonksiyonları

Olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF, Probability Distribution Function), herhangi bir *x* değişkeninin aldığı farklı değerlerinin olasılığını veren fonksiyondur ve *f* ile ifade edilmektedir. Dikkate alınan verilerin sürekli rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu, aşağıdaki koşulları taşıması gerekmektedir [A3].

- *f*(*x*) ≥ 0 olmalıdır. Değişkenin tanım aralığındaki herhangi bir değeri alma olasılığı sıfırdan küçük olamaz.
- PDF'nin altında kalan alan $F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) d\xi = 1$ olmalıdır. Değişkene ait değerlerin olasılıkları toplamı 1 olmalıdır.
- $\lim_{x \to \pm \infty} f(x) = 0$

Bu koşulları sağlaması durumunda *x*'in a ve b değerleri arasındaki olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P(a < X \le b) = \int_{a}^{b} f(\xi) d\xi$$
(A.4)

Kümülatif yoğunluk fonksiyonu ise (CDF, Cumulative Distribution Function), x değişkeninin belli bir değere eşit ya da küçük olma olasılığını veren fonksiyonudur F(x) ile gösterilmektedir. *x* rastgele değişkenin kümülatif yoğunluk fonksiyonu (CDF) aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir [A3].

$$F_x(a) = P(\{x \le a\}), \qquad a \in R \tag{A.5}$$

X rastgele değişkenin kümülatif yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki özellikleri taşımaktadır.

- $F(-\infty) = 0$ ve $F(+\infty) = 1$.
- *F* azalmayan bir fonksiyondur. $s_1 < s_2$ için $F(s_1) \le F(s_2)$.
- Her $s \leq s_0$ için, eğer $F_X(s_0) = 0$ ise, $F_X(s) = 0$.
- $P(s_1 < X \le s_2) = \int_{s_1}^{s_2} f(x) dx = F(s_1) F(s_2)$
- $P({X > s}) = 1 F_X(s).$
- Eğer *F* sürekli ise $P({X = s}) = 0$
- Olasılık yoğunluk (*f*) ile kümülatif yoğunluk (**F**) arasındaki ilişki $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ 'dir.

Olasılık yoğunluk ve kümülatif yoğunluk fonksiyonu Şekil A.2'de verilmiştir.



Şekil A.2 (a) PDF, (b) CDF dağılımları

A.2.4 Basıklık ve çarpıklık katsayıları

Verilerin dağılım şekli ile ilgili bilgilere ulaşabilmek için verilerin simetriden ne kadar uzaklaştığını gösteren 'çarpıklık katsayısı' ve serinin yüksekliğinin normal serinin yüksekliğinden ne kadar uzaklaştığını gösteren 'basıklık katsayısı' kullanılmaktadır.

Çarpıklık, olasılık dağılımının simetrik olmayışının bir ölçüsüdür. PDF grafiğinin ne tarafa ne kadar yatık olduğunu ifade etmektedir. Çarpıklık katsayısı normal dağılımda değeri 0'dır. Negatif çarpıklık katsayısı sola çarpık dağılımı, pozitif çarpıklık katsayısı sağa çarpık dağılımı belirtmektedir (**Şekil A.3**).



Şekil A.3 Çarpıklık katsayısına göre dağılımlar

Basıklık ise bir dağılımın basıklığını (yayvanlığını) ya da sivriliğini açıklayan bir ifadedir. Basıklık katsayısı normal dağılımda değeri 3'tür. Bu katsayının değeri 3'ten büyük ise normal dağılıma göre daha sivri bir dağılımı, 3'ten küçük ise normal dağılıma göre daha basık bir dağılımı ifade etmektedir (**Şekil A.3**).



Şekil A.3 Basıklık katsayısına göre dağılımlar

Ortalama etrafındaki 3. ve 4. momentler yani sırasıyla çarpıklık ve basıklık katsayısı ile ilgili ifadeler aşağıda verilen ifadeler ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma = \frac{\{(x_i - \bar{x})^3\}_{ort}}{\sigma^3} \quad \delta = \frac{\{(x_i - \bar{x})^4\}_{ort}}{\sigma^4}$$
(A.5)

burada γ çarpıklık katsayısını, δ basıklık katsayısını, σ ise standart sapmayı göstermektedir.

B RÜZGAR İKLİMİNİN UZAMSAL DAĞILIMLARI





Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.1 ERA-Interim rüzgar verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.2 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan rüzgar karakteristiklerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.3 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları



Şekil B.3 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.3 ERA-Interim verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.4 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları



Şekil B.4 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)



Şekil B.4 CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için yıllık ölçekte hesaplanan ortalama deniz seviyesi basıncının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları (devamı)

Konferans Bildirisi

1. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2019). *Long-term variability of the mean sea level pressure field over the Black Sea*. 9th International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Bari, İtaly, 9-11 September 2019, (1) 1-3.

2. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2020). *Assessment of long-term wind and wave trends in the Black Sea*. Proceedings of Virtual Conference on Coastal Engineering, 6-9 October 2020, (36v) waves.5.

Makaleler

1. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2020). "Spatiotemporal long-term trends of extreme wind characteristics over the Black Sea," Dynamics of Atmospheres and Oceans, 90, 101132.

2. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2020). "Long-term variability of the mean sea level pressure field over the Black Sea," Aquatic Ecosystem Health & Management, 23:4, 453-464.

3. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. ve Ari Guner, H.A. (2021). "Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea," Dynamics of Atmospheres and Oceans, 94, 101165.

4. Islek, F., ve Yuksel, Y. (2021). "Inter-comparison of long-term wave power potential in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with two different wind fields," Dynamics of Atmospheres and Oceans, 93, 101192.

5. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2022). "Evaluation of regional climate models and future wind characteristics in the Black Sea," International Journal of Climatology, 1-25.

6. Islek, F., Yuksel, Y. ve Ozdemir, A. (2022). "Performance evaluation of spectral wave model forced by ERA-Interim, ERA5, and CFSR wind fields in the Black Sea," Seatific, 2(1), 15–35.

7. Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2022). "Evaluation of regional climate models and future wave characteristics in an enclosed sea: A case study of the Black Sea," in progress.

8. Islek, F. and Yuksel, Y. (2022). "Projected changes in the wind power potential toward the end of the 21st century: Black Sea," in progress.