İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN DALGA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Recep Emre ÇAKMAK

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN DALGA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Recep Emre ÇAKMAK
0000-0003-0700-8622

Prof. Dr. Adem AKPINAR
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN DALGA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Recep Emre ÇAKMAK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adem AKPINAR

Bu çalışmada, Karadeniz'in rüzgâr ve dalga iklimi üzerine iklim değişikliğinin etkisinin en kötümser senaryo (RCP8.5) dikkate alınarak, mevcut iklimi temsil edebilecek şekilde geliştirilen bir topluluk modeli ile irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için, öncelikle Karadeniz'i içeren yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüklü iklim modeli rüzgâr hızları sekiz farklı modelden (EURO-CORDEX) temin edilmiş ve bu rüzgarlar kullanılarak varsayılan ayarlamalı üçüncü nesil dalga tahmin modeli (SWAN) 1970-2005 tarihsel döneminde, 2006-2099 gelecek döneminde çalıştırılmıştır. Dalga iklimi simülasyonlarının performans analizi için tarihsel dönem kontrol veri setleri olarak ECMWF ERA5 yeniden analiz ve altimetre uydu gözlemleri kullanılmıştır. İlk olarak ERA5 yeniden analiz dalga tahminleri, Karadeniz'in farklı kıyılarındaki yerinde dalga ölçümlerine karşı doğrulanmıştır. Daha sonra, rüzgâr ve dalga iklimleri, ERA5 ile sunulurken, her bir topluluk üyesinin ERA5 verisine kıyasla normalleştirilmiş farkları hesaplanmıştır. Karadeniz'deki topluluk üyelerinin ortalama dalga parametrelerinin batı bölgesinde ERA5 ile uyumlu olduğu, doğu bölgesinde ise ortalama %25 oranında fazla tahmin edildiği görülmüştür. ERA5 belirgin dalga yükseklikleri, altimetre ve yerinde ölçümlere kıyasla düşük tahmin edildiğinden; özellikle doğu bölgesinde, topluluk üyelerinin ERA5 verilerine kıyasla doğruluğu makul bulunmuştur. Bu nedenle, sekiz topluluk üyelerinin tamamı ile topluluk modeli tanımlanmıştır. Bu topluluğun gelecek simülasyonları, başlıca dalga parametrelerinin (H_{m0}, T_{m02}, P_w) ve rüzgâr hızlarının (U_{10}) ortalamalarındaki değişimleri göstermek için kullanılmıştır. Ortalama dalga ve rüzgâr karakteristiklerinde öngörülen değişimler, tarihsel ortalamalara (1970-1999) göreceli olarak gelecekteki (2040-2069 ve 2070-2099) ortalamaların karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. Buna ek olarak, belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji akısının (P_w) gelecekteki (2006-2099) öngörülen eğilimleri de analiz edilmiştir. U_{10} ve H_{m0} ortalamaları havzanın doğu kesimlerinde -%10'a varan belirgin düşüşler göstermektedir. H_{m0}'ın 99. yüzdelik dilimdeki değerlerinin, ortalamalarından daha fazla değişeceği ve ağırlıklı olarak artış yönünde olacağı öngörülmektedir. Yıllık dalga enerji akısı ortalamalarındaki değişimler H_{m0} ortalamalarındaki değişimlere benzerken, mevsimsel değişimlerin (-%15 azalma ve %12 artış aralığında) daha yüksek olması beklenmektedir. Yıllık H_{m0} ortalamalarında -0,08 cm/yıl aşağı yönlü istatistiksel olarak anlamlı eğilimler öngörülmüş ve gelecek dönemde P_w'de -0,005 kWm^{-1}/yıl düzeyinde aşağı yönlü anlamlı eğilimler bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, topluluk modeli, EURO-CORDEX bölgesel model, RCP8.5, ERA5, Karadeniz
2022, xi + 144 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WAVE PARAMETERS

Recep Emre ÇAKMAK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adem AKPINAR

This study aims to investigate the impact of climate change on the wind and wave climate of the Black Sea by considering the high-emission scenario (RCP8.5) with an ensemble developed to represent the present climate. Initially, high spatial and temporal resolution climate model wind speeds containing the Black Sea were obtained from eight models (EURO-CORDEX) to achieve this goal. The third-generation wave prediction model (SWAN) with default settings was run using these winds for the historical period 1970-2005 and the future period 2006-2099. The performance analysis of the wave climate simulations was performed using ECMWF ERA5 reanalysis and altimeter satellite observations as historical period control datasets. First, the ERA5 reanalysis wave hindcasts are validated against in-situ wave measurements at different coasts of the Black Sea. Then, the normalized differences of each ensemble member against ERA5 data were computed to compare the wind and wave climates with ERA5. It was found that the mean wave parameters of the ensemble members in the Black Sea were in agreement with ERA5 in the western region. In contrast, they were overestimated by 25% on average in the eastern part. Since ERA5 significant wave heights are underestimated compared to the altimeter and in-situ measurements, the accuracy of ensemble members compared to ERA5 data was found to be reasonable, especially in the eastern region. Therefore, the ensemble model was defined with all eight ensemble members. The future simulations of this ensemble were used to show the changes in the averages of the main wave parameters (H_{m0}, T_{m02}, P_w) and wind speeds (U_{10}). The projected changes in the mean wave and wind characteristics are determined by comparing future (2040-2069 & 2070-2099) averages relative to historical averages (1970-1999). In addition, the projected trends of significant wave height and wave energy flux (P_w) are analyzed over the future (2006-2099). U_{10} and H_{m0} means show significant decreases up to -10% in the eastern parts of the basin. The 99^{th} percentiles of H_{m0} are projected to change more than their means and tend to increase. While the changes in the annual P_w means are similar to the changes in the H_{m0} means, the seasonal changes (in the range of -15% decrease and 12% increase) are expected to be higher. Downward significant trends in the annual H_{m0} means were projected with a slope of -0.08 cm/year, and downward trends in P_w were found at the level of -0.005 kWm^{-1}/year during the future period.

Keywords: Climate change, wave climate ensemble, EURO-CORDEX regional model, RCP8.5, ERA5, Black Sea
2022, xi + 144 pages.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca danışmanlığımı üstlenen, çalışma alanımızla ilgili beni güncel ve gelecek vadeden konulara yönlendiren, konu ile ilgili uzman ve tecrübeli bilim insanları ile bağlantı kurma imkânı oluşturan ve ayrıca kendi birikim ve tecrübelerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Adem AKPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitelerinde sunumlarımı sabırla dinleyen, görüşleri, önerileri ve düzeltmeleriyle tezimin gelişmesinde önemli katkıları olan hocalarım Sayın Prof. Dr. Feza KARAER'e ve Sayın Prof. Dr. N. Emre OTAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma konumda iş birliği yaptığım; tavsiye, yönlendirme ve yardımlarından çokça faydalandığım Emre ÇALIŞIR'a, Dr. Gil LEMOS'a ve Dr. Alvaro SEMEDO'ya,

Kendilerinden ders alarak, derslerine yardımcı olarak veya beraber araştırma/çalışma yaparak çok şey öğrendiğim hocalarım Sayın Prof. Dr. Emin ÖZSOY'a, Sayın Prof. Dr. V.Ş. Özgür KIRCA'ya, Sayın Prof. Dr. Serdar KORKMAZ'a, Sayın Doç. Dr. Murat KANKAL'a ve Sayın Dr. Gerbrant Van VLEDDER'e,

Birlikte çalıştığımız için sürekli bilgi paylaşımında bulunduğumuz, çalışkanlığı ve arkadaşlığı ile motive eden değerli çalışma arkadaşım Dr. Khalid AMAROUCHE'a,

Araştırma görevliliği ve lisansüstü eğitimimde beraber olduğumuz, çalışma arkadaşlığı, dostlukları ve destekleriyle yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ÖZEN'e, Dr. Ömer TİMURAĞAOĞLU'na, Arş. Gör. Cavit SERHATOĞLU'na, Arş. Gör. Mehmet RİZELİOĞLU'na ve diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma, doktoraya beraber başladığımız Dr. M. Melih KOŞUCU'ya ve Dr. Murat CAN'a, ve teknik personelimiz Eyüp TARHAN'a ayrıca şükranlarımı sunarım.

Maddi manevi desteklerini esirgemeden bana hayatım boyunca her türlü imkânı sağlayan, ahlaki ilkelerden taviz vermeden yaşamayı öğreten, dualarını esirgemeyen anneme ve merhum babama,

Hayatıma doktora tezimin başlangıç sürecinde dahil olan ve ömrümün sonuna kadar beraber olmayı dilediğim, mesai kavramı olmayan akademik çalışmalarıma sabırla tahammül eden değerli eşime ve ailesine bütün kalbimle teşekkür ederim.

Recep Emre ÇAKMAK
30/09/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ 5
2.1. İklim Sistemi 5
2.2. Atmosfer – Okyanus Etkileşimi 7
2.3. Genel Dolaşım Modelleri 8
2.4. Rüzgâr Dalgası Oluşumu 11
2.5. Spektral Dalga Modeli 13
2.5.1. Dalga spektrumu 13
2.5.2. Dalga parametrelerinin spektrumdan türetilmesi 15
2.6. Kaynak Özetleri 16
2.6.1. Küresel dalga iklimi çalışmaları 17
2.6.2. Bölgesel dalga iklimi çalışmaları 21
3. MATERYAL ve YÖNTEM 30
3.1. Çalışma Bölgesi 30
3.2. Veri Kaynakları 31
3.2.1. EURO-CORDEX iklim modelleri 31
3.2.2. Dalga simülasyonları 36
3.2.3. ECMWF ERA5 dalga veri seti 38
3.2.4. Uydu altimetre verileri 40
3.2.5. Karadeniz'deki yerinde ölçüm verileri 41
3.3. İklim Analiz Yöntemleri 42
3.3.1. Mevcut dalga iklimi değerlendirmeleri 42
3.3.2. Topluluk modeli kurulumu 48
3.3.3. Gelecek dalga iklimi tahminleri 49
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 52
4.1. Mevcut Dalga İklimi Değerlendirmesi 52
4.1.1. ERA5 verilerinin yerinde ölçüm verilerine karşı performansı 52
4.1.2. Altimetre ölçümlerine karşı ERA5 ve dalga iklim simülasyonlarının…….. performansları 54
4.1.3. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık H_{m0} ortalamalarına karşı performansları 55
4.1.4. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık H_{99} ortalamalarına karşı performansları 60
4.1.5. Topluluk üyelerinin ERA5 mevsimlik H_{m0} ortalamalarına karşı performansları 63
4.1.6. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık T_{m02} ortalamalarına karşı performansları 75
4.1.7. Topluluk üyeleri ve ERA5'in H_{m0} ortalama yıllık değişkenlikleri (MAV) 78
4.1.8. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık ortalama dalga yönüne karşı performansları 81
4.1.9. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık ortalama rüzgâr hız ve yönlerine karşı…….. performansları 84
4.1.10. Topluluk üyelerinin H_{m0} ve T_{m02} ortalamalarındaki anormallikleri 87
4.2. Topluluk modelin mevcut dalga iklimi değerlendirmesi 90

4.2.1. Topluluk modelin ERA5 ve altimetre verilerine karşı performansı 91
4.2.2. Topluluk modelin ERA5 yıllık H_{m0}, H_{99} ve T_{m02} ortalamalarına karşı……. performansı 92
4.2.3. Topluluk modelin ERA5 mevsimlik H_{m0} ve H_{99} ortalamalarına karşı performansı 93
4.2.4. Topluluk modelin ERA5 H_{m0} ortalamalarının yıllar arası değişkenliği (IAV) ile kıyası 95
4.2.5. Topluluk modelin ERA5 yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarına karşı…… performansı 96
4.3. Gelecek Rüzgâr ve Dalga İklimi Değerlendirmeleri 97
4.3.1. Yıllık ve mevsimlik ortalama rüzgâr hızlarının (U_{10}) gelecek değişimleri..... 98
4.3.2. Yıllık ve mevsimlik belirgin dalga yüksekliklerinin gelecek değişimleri 102
4.3.3. Yıllık ve mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin eğilimleri 108
4.3.4. Yıllık ve mevsimlik %99'luk dilimdeki H_{m0} değerlerinin gelecek değişimleri . 110
4.3.5. Yıllık ve mevsimlik %99'luk dilimdeki H_{m0} değerlerinin eğilimleri 113
4.3.6. Yıllık H_{m0} standart sapmalarının gelecek değişimleri 115
4.3.7. Yıllık H_{m0} ortalamalarının, standart sapmalarının ve %99'luk değerlerinin…... tarihsel ve gelecek dönem boyunca değişimi 116
4.3.8. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga periyodunun gelecek değişimleri..... 116
4.3.9. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga gücünün (P_w) gelecek değişimleri 121
4.3.10. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga gücünün (P_w) eğilimleri 126
4.3.11. Yıllık P_w ortalamalarının tarihsel ve gelecek dönem boyunca değişimi 127
5. SONUÇ 129
KAYNAKLAR 135
ÖZGEÇMİŞ 144

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Dalga genliği
c	Dalga grup hızı
CO_2	Karbondioksit
O_2	Oksijen
CH_4	Metan
E(f)	Dalga enerji spektrumu
f	Dalga frekansı (Hz)
g	Yer çekimi ivmesi
H_{m0}	Belirgin dalga yüksekliği
m_{-1}	Eksi birinci moment
m_0	Sıfırıncı moment
m_1	Birinci moment
m_2	İkinci moment
S(f)	Dalga varyans spektrumu
S_{frc}	Taban sürtünmesi nedeniyle oluşan dalga enerji kaybı
S_{inp}	Rüzgar girdisi ile oluşan dalga üretimi
$S_{n/3}$	Üçlü doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimi
$S_{n/4}$	Dörtlü doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimi
S_{wcp}	Denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga enerji kaybı
T_e	Dalga enerji periyodu
T_{m01}	Spektrum ortalama frekansına karşı gelen dalga periyodu
T_{m02}	Ortalama sıfırı keserken periyodu
T_{m-10}	Dalga enerji periyodu
P_w	Ortalama dalga gücü / Dalga enerji akısı
U_{10}	10 m yükseklikteki rüzgar hızı
u	Rüzgar hızının yatay bileşeni
v	Rüzgar hızının düşey bileşeni
w_0	Dalganın açısal frekansı
η	Su yüzeyi profili
Φ	Dalga fazı
ρ_w	Su yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklama
AODN	Avustralya Okyanus Veri Ağı
CDO	İklim Veri Operatörü
CDS	İklim Veri Sistemi
CNRM	Ulusal Meteoroloji Araştırma Merkezi (Fransa)
DMI	Danimarka Meteoroloji Enstitüsü
ECMWF	Avrupa Orta vadeli Hava Tahmin Merkezi
ERA5	ECMWF İklim modeli
ERA-Interim	ECMWF İklim modeli
ERA-40	ECMWF İklim modeli
ERA20-C	ECMWF İklim modeli
EURO-CORDEX	Eşgüdümlü Bölgesel İklim Ölçeği Küçültme Deneyi – Avrupa Etki Alanı
ESGF	Yeryüzü Sistemi Sayısal Ağ Federasyonu
F	Farklar
FAR	Birinci Değerlendirme Raporu
GERICS	İklim Servis Merkezi Almanya
GEBCO	Okyanusların Genel Batimetrik Tablosu
GD	Gelecek Değişimi
GP1	Gelecek Periyodu 1
GP2	Gelecek Periyodu 2
IAV	Yıllar arası değişkenlik
IFS	Entegre Tahmin Sistemi
IPSL	Pierre-Simon Laplace Enstitüsü
KNMI	Hollanda Kraliyet Meteoroloji Enstitüsü
MAV	Ortalama yıllık değişkenlik
mse	Ortalama karesel hata
NF	Normalleştirilmiş Farklar
NOAA	Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (USA)
NODC	National Oceanographic Data Center (USA)
RCA	Rossby Merkezi Bölgesel Atmosferik İklim Modeli
RCM	Bölgesel İklim Modeli
rmsd	Karesel ortalama farklar
ppmv	Milyon hacime düşen parça
SMHI	İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsü
SLP	Deniz seviyesi basıncı
SST	Deniz yüzeyi sıcaklığı
TP	Tarihsel periyot
WAM	Dalga modeli (Wave Modelling)
WEF	Dalga enerjisi akısı
WW3	Dalga modeli (Wavewatch 3)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. İklim sisteminin ana bileşenleri…….. 6
Şekil 2.2. İklim modellerinin üç boyutlu ızgarası ve fiziksel süreçler…… 10
Şekil 2.3. CMIP5 deneyleri kapsamında tanımlı en iyimser (RCP2.6) ve en kötümser (RCP8.5) senaryolara dayalı olarak yüzey sıcaklığının gelecek projeksiyonu……... 11
Şekil 2.4. Sinüs fonksiyonu biçimli dalga profili…… 12
Şekil 2.5. Bir istasyondan alınan örnek bir dalga kaydı…… 14
Şekil 2.6. Örnek bir frekans dalga spektrumu……..... 14
Şekil 3.1. Karadeniz'in konumu, batimetrisi ve kullanılan ölçüm lokasyonları…..... 31
Şekil 3.2. Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan verilerin hazırlanma süreci…….. 43
Şekil 4.1. Yerinde ölçümlere karşı ERA5 dalga yüksekliklerinin saçılım (a) ve kantil-kantil (Q-Q) (b) grafikleri……..... 53
Şekil 4.2. 1985-2005 döneminde, ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b - i) altimetre dalga ölçümlerine göre alansal NF (%) haritaları…… 56
Şekil 4.3. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık H_{m0} ortalamaları…… 58
Şekil 4.4. ERA5 yıllık H_{m0} ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları…… 59
Şekil 4.5. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamaları……..... 61
Şekil 4.6. ERA5 yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları……..... 62
Şekil 4.7. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} kış mevsimi ortalamaları…. 64
Şekil 4.8. ERA5 H_{m0} kış ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} kış ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları……..... 65
Şekil 4.9. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} ilkbahar mevsimi ortalamaları…….…… 67
Şekil 4.10. ERA5 H_{m0} ilkbahar ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} ilkbahar ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları…..…… 68
Şekil 4.11. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} yaz mevsimi ortalamaları…. 70
Şekil 4.12. ERA5 H_{m0} yaz ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} yaz ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları…….……... 71
Şekil 4.13. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} sonbahar mevsimi ortalamaları…….…… 73
Şekil 4.14. ERA5 H_{m0} sonbahar ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} sonbahar ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları……..……... 74
Şekil 4.15. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık T_{m02} ortalamaları…...…… 76
Şekil 4.16. ERA5 yıllık T_{m02} ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 Tm02 ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları…….……..…. 77
Şekil 4.17. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} ortalama yıllık değişkenlikleri (MAV)…… 79
Şekil 4.18. ERA5 H_{m0} ortalama yıllık değişkenliği (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} MAV değerine göre alansal fark haritaları……..…… 80
Şekil 4.19. ERA5'in yıllık ortalama dalga yönü (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) ERA5 Θ_m değerine göre alansal fark haritaları…….……. 82

Şekil 4.20. Topluluk üyelerinin ve ERA5'in ortalama rüzgar yönleri ve 1979-2005 dönemi U_{10} ortalamalarının farkı……..…….. 85
Şekil 4.21. Topluluk H_{m0} (m) ortalamaları (a) ve topluluk içi tutarsızlıklar (b - i)..… 88
Şekil 4.22. Topluluk T_{m02} (s) ortalamaları (a) ve topluluk içi tutarsızlıklar (b - i)….. 89
Şekil 4.23. 1985-2005 dönemi boyunca topluluk ortalaması H_{m0} (m) (a), topluluk ortalaması ile ERA5 ortalamaları arasındaki (b) ve altimetre gözlemlerinin ortalamaları arasındaki (c) NF haritaları……. 91
Şekil 4.24. Topluluk modelinin yıllık H_{m0} ortalamaları (a), H_{99} ortalamaları (c), T_{m02} ortalamaları (e) ve bu ortalamaların ERA5 ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları…….…… 93
Şekil 4.25. Topluluk modelinin mevsimlik H_{m0} ortalamalarının ERA5 mevsimlik H_{m0} ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları…….…….... 94
Şekil 4.26. Topluluk modelinin mevsimlik H_{99} ortalamalarının ERA5 mevsimlik H_{99} ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları…….……...… 95
Şekil 4.27. Topluluk modeli tarihsel dönem (1970-1999) H_{m0} yıllık ortalamalarının IAV değerlerinin ERA5 H_{m0} yıllık ortalamalarına kıyasla farkları (F; %)……... 96
Şekil 4.28. Topluluk modelinin yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarının ERA5 yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları……... 97
Şekil 4.29. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) U_{10} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….. 100
Şekil 4.30. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) U_{10} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….. 101
Şekil 4.31. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) H_{m0} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….. 104
Şekil 4.32. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) H_{m0} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….. 106
Şekil 4.33. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık H_{m0} ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)…..... 109
Şekil 4.34. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) %99'luk dilimdeki H_{m0} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….……... 111
Şekil 4.35. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) %99'luk dilimdeki H_{m0} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….…... 112
Şekil 4.36. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık H_{99} ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)…..… 114
Şekil 4.37. Şekil 4.37. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) Hm0 standart sapmaları ve gelecek dönemleri için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında) 115
Şekil 4.38. Şekil 4.38. Tarihsel ve gelecek dönem boyunca (1970-2099) topluluğun yıllık Hm0 ortalamaları, standart sapmaları ve H99'larının değişimi…… 117
Şekil 4.39. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) T_{m02} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….…….. 119
Şekil 4.40. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) T_{m02} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)…….…….. 120
Şekil 4.41. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) P_w ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)……..……. 123

Şekil 4.42. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) P_w ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)……..……. 125
Şekil 4.43. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık P_w ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)..…….. 127
Şekil 4.44. Şekil 4.44. Tarihsel ve gelecek dönemler boyunca (1970-2099)…. topluluğun yıllık Pw ortalamalarının değişimi……..….. 128

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. CMIP5 iklim modellerinin dayalı olduğu gelecek senaryoları…….. 33
Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan bölgesel rüzgar iklim modellerinin kaynakları…… 35
Çizelge 3.3. Modelde mevcut fiziksel süreçlerin formülasyonları ve bunlarla ilişkili katsayılar…….. 38
Çizelge 3.4. ECMWF CDS veri tabanından temin edilen rüzgar ve dalga parametreleri…… 39
Çizelge 3.5. Altimetreler, çalışma karakteristikleri, gözlem süreleri ve veri sayıları… 40
Çizelge 3.6. Şamandıra konumları, ölçüm bilgileri ve şamandıra lokasyonlarına en yakın ERA5 gridleri…… 44
Çizelge 4.1. Topluluk üyelerinin H_{m0} için M-puanları…..……... 57

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, atmosfer ve ona bağlı sistemlerde gözlenen uzun dönemli değişimleri ifade etmektedir. Doğal süreçlerle oluşan iklim değişikliği etkilerinin yanı sıra, son birkaç yüzyıldır, insan faaliyetleri sebebiyle atmosferin muhtevasında meydana gelen değişimler iklim değişikliğinin ana etkeni olarak gösterilmektedir (Karl & Trenberth, 2003). Sanayi devriminin başladığı 18. Yüzyıl ortaları ve özellikle dünya genelinde ivme kazanan sanayileşme ile birlikte fosil yakıtların kullanımının arttığı 19. Yüzyılın ikinci yarısından itibaren atmosfer kaldırabileceğinden fazla bir yüke maruz kalmıştır. 20. Yüzyıl sonlarında, atmosferde CO_2 yoğunluğunun artması (Ramanathan, 1988), yıllık ortalama sıcaklıkların yükselmesi (Loarie vd., 2009), deniz seviyesinin yükselmesi (Church vd., 2001) gibi iklim değişikliğinin insan kökenli (antropojenik) etkileri bariz bir şekilde gözlenmeye başlanmıştır. İklim değişikliğinin etkilerini araştırmak, yetkilileri tedbir almaya teşvik ederek ve gelecek etkilerini azaltmak, adaptasyonu ve finansmanı yönünde çalışmalar yapmak amacıyla Birleşmiş Milletler (UN) himayesinde İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında 1997 yılında Kyoto Protokolü, 2015 yılında ise Paris İklim Anlaşması imzalanmıştır.

İklim değişikliği ile ilgili bilimsel değerlendirmeler yapmak için Birleşmiş Milletler'in bir organı olarak Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) periyodik olarak gerçekleştirilmekte ve bilimsel bulgular değerlendirme raporu olarak yayınlanmaktadır. İlk Değerlendirme Raporu (First Assessment Report – FAR), 1990 yılında ve en güncel olarak 6. Değerlendirme Raporu (AR6) 2022 yılında olmak üzere altı ana panel düzenlenmiş ve altı sentez rapor yayınlanmıştır. IPCC bünyesinde dört ana çalışma grubu oluşturulmuştur. Çalışma Grubu I (Working Group I – WGI), mevcut ve gelecekteki iklim değişikliğinin fiziksel bilimini inceler. WGII, sosyoekonomik ve doğal sistemlerin iklim değişikliğine karşı hassasiyetini, iklim değişikliğinin olumsuz ve olumlu sonuçlarını ve buna uyum sağlama seçeneklerini değerlendirir. WGIII, sera gazı emisyonlarının düşürülerek iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik yöntemlerin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Dördüncü çalışma grubu olan TFI (The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories), ulusal sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve

raporlanması için uluslararası kabul görmüş bir metodoloji belirler ve bu metodolojinin uygulanmasını teşvik eder.

WGI tarafından değerlendirilen bilimsel konular şunları içermektedir: atmosferdeki sera gazları ve aerosoller; hava, kara ve okyanustaki sıcaklık değişimleri; hidrolojik döngü ve değişen yağış (yağmur ve kar) modelleri; aşırı hava olayları; buzullar ve buz tabakaları; okyanuslar ve deniz seviyesi; biyojeokimya ve karbon döngüsü; ve iklim duyarlılığı (IPCC, 2013). Dünyanın farklı enstitülerinden birçok araştırmacı gruplarının katılımıyla değerlendirilen bu konuların bilimsel modelleri oluşturulmaktadır. IPCC'nin birinci panelinden itibaren Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP) adı altında gerçekleştirilen bilimsel modeller belirli periyotlarda dönemin bilgi, teknoloji ve imkanlarına bağlı olarak güncellenmektedir. Bilimsel modeller öncelikle, Genel Dolaşım Modelleri (General Circulation Model – GCM) adıyla, düşük çözünürlüklü küresel modeller olarak üretilmektedir. Küresel ölçekte değerlendirme yapılan çalışmalarda GCM'ler doğrudan kullanılabilmektedir. Buna karşın, değerlendirilen konu için bölge odaklı bir çalışma gerçekleştirilecekse, Eşgüdümlü Bölgesel İklim Ölçeği Küçültme Deneyi (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – CORDEX) kapsamında GCM modellerden bölgesel ölçek indirgeme yapılarak üretilen ve küresel modellere göre daha yüksek çözünürlüklü Bölgesel İklim Modeli (Regional Climate Model – RCM) kullanılabilmektedir. CORDEX, Dünya İklim Araştırma Programı (World Climate Research Programme – WCRP) bünyesinde çalışan bir organizasyondur ve on dört farklı alan (domain) için bölgesel modeller sunmaktadır (CORDEX, 2021).

Küresel iklim değişikliğini anlamak, takip etmek ve etkilerini azaltmak amacıyla tedbirler alabilmek için katılımcı bilimsel ekiplerin ürettiği iklim modelleri büyük önem arz etmektedir. Mevcut iklim şeklinde tabir edilen, geçmişten günümüze gerçekleşen iklim koşulları, ilgili yerde konuşlu ölçüm istasyonlarında elde edilen veriler veya uzay teknolojisinin gelişmesi ile sahip olduğumuz uydu gözlemleri verileri ile değerlendirilebilmektedir. Yalnız ölçüm verilerindeki en çok karşılaşılan zorluk, mekânsal ve zamansal olarak homojen veri setine ulaşmakta yaşanmaktadır. Bu zorluk, ölçüm verileri ile iklim modellerinin kombinasyonu olan yeniden analiz (reanaliz) veri

setleri ve güncel iklim modelleme (hindcast) çalışmaları ile çözülse de bu veri setleri gelecek iklim için veri sağlamamaktadır. CMIP veri setleri mevcut iklim için ölçüm ve güncel modelleri kullanarak tarihsel (historical) iklim veri seti ve belirlenen gelecek senaryolarına bağlı olarak gelecek iklim veri seti sunmaktadır.

CMIP deneylerinde de yukarıda bahsedilen veri kaynaklarından temin edilebilen mevcut (historical) iklim veri setleri mevcuttur. Mevcut iklim verileri diğer kaynaklardan temin edilen verilerle kıyaslanarak çalışma bölgesi için uygun model seçme olanağı sağlamaktadır. Gelecek veri setleri ise, CMIP deneylerinin her bir fazında farklı gelecek senaryolarına sahiptir. Örnek olarak Beşinci Değerlendirme Raporu (The Core Writing Team IPCC, 2015; AR5) kapsamında sunulan CMIP5 (CMIP 5. Faz) deneylerinde Temsili Konsantrasyon Rotası (Representative Concentration Pathway – RCP) olarak adlandırılan dört senaryo tanımlanmıştır (Moss vd., 2010). En iyimser RCP2.6 senaryosuna göre ışınımsal zorlama değeri 2100 yılında en yüksek 3 W/m^2'ye ulaşarak düşüşe geçeceği tahmin edilmektedir. İki ılımlı senaryo olarak tanımlanan RCP4.5 ve RCP6.0 senaryolarında ışınımsal zorlama değerleri 2100 yılında sırasıyla 4,5 W/m^2 ve 6 W/m^2 seviyelerine ulaşarak sabit olarak devam edeceği öngörülmektedir. En kötümser senaryo olarak RCP8.5'da ise 2100 yılındaki ışınımsal zorlama değerinin 8,5 W/m^2'yi geçeceği tahminine göre belirlenmiştir. Tanımlanan bu senaryolara göre oluşturulan ilgili iklim veri seti temin edilerek gelecek iklim projeksiyonları sunmak mümkün olabilmektedir.

CMIP deneyleri ile farklı senaryolara göre üretilen gelecek veri setleri tahmini senaryolara dayandığı için belirsizlikler barındırsa da gelecek planlamaları için çok değerli veri sunmaktadır. Uzun dönemli planlama gerektiren su kaynaklarının yönetimi ve kuraklıkla mücadele, tarım stratejilerinin belirlenmesi, buzul kütlelerinin azalması ve beraberinde gelen deniz su seviyesi yükselmelerini öngörme, sıra dışı hava olaylarından korunma gibi insan hayatı için elzem konularda daha doğru tahminde bulunma ve daha doğru tedbirleri belirme yönünde gelecek iklim modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrili bir özelliğe sahip olması nedeniyle, deniz koşullarında meydana gelecek değişiklikler hem denizde yapılan faaliyetleri hem de kıyı alanlarını

etkileyecektir. Denizlerimiz ulaşım için yolcu veya ticari taşımacılık, turizm, balıkçılık gibi sosyal ve ekonomik faaliyetler için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, deniz altı içme suyu ve değerli kimyasal iletim hatları gibi ekonomik getirisi yüksek, refah düzeyini yükseltme potansiyeli olan uygulamaların muhtemel değişiklikler göz önüne alınarak planlanması gerekmektedir. Özellikle son zamanlarda gündem olan Karadeniz'de doğal gaz arama faaliyetleri ve kurulacak platform ve yapılar da uzun dönemli gelecek projeksiyonları dikkate alınarak daha güvenli bir şekilde tesis edilebilir.

Deniz ortamında ve kıyı bölgelerindeki faaliyetleri, mevcut yapıları, tasarım ve planlamaları etkileyecek en önemli olgulardan biri dalga koşullarıdır. Deniz ulaştırma alanında dalga koşullarının bilinmesi sayesinde uygun rotalar belirlenebilmektedir. Deniz üzerinde inşa edilecek her türlü yapı için yine dalga koşullarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Kıyı alanlarının yönetimi, kıyı bölgelerine yakın yerleşim alanlarının ve sahillerin korunması, sediment taşınımı sebebiyle gerçekleşen kıyı oyulması veya birikmesi gibi süreçlerde dalga koşulları etkilidir. Bunlara ek olarak, günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyacın artması sebebiyle dalgalardan elde edilebilecek temiz enerji araştırmacıların ve yatırımcıların ilgisini çekmektedir.

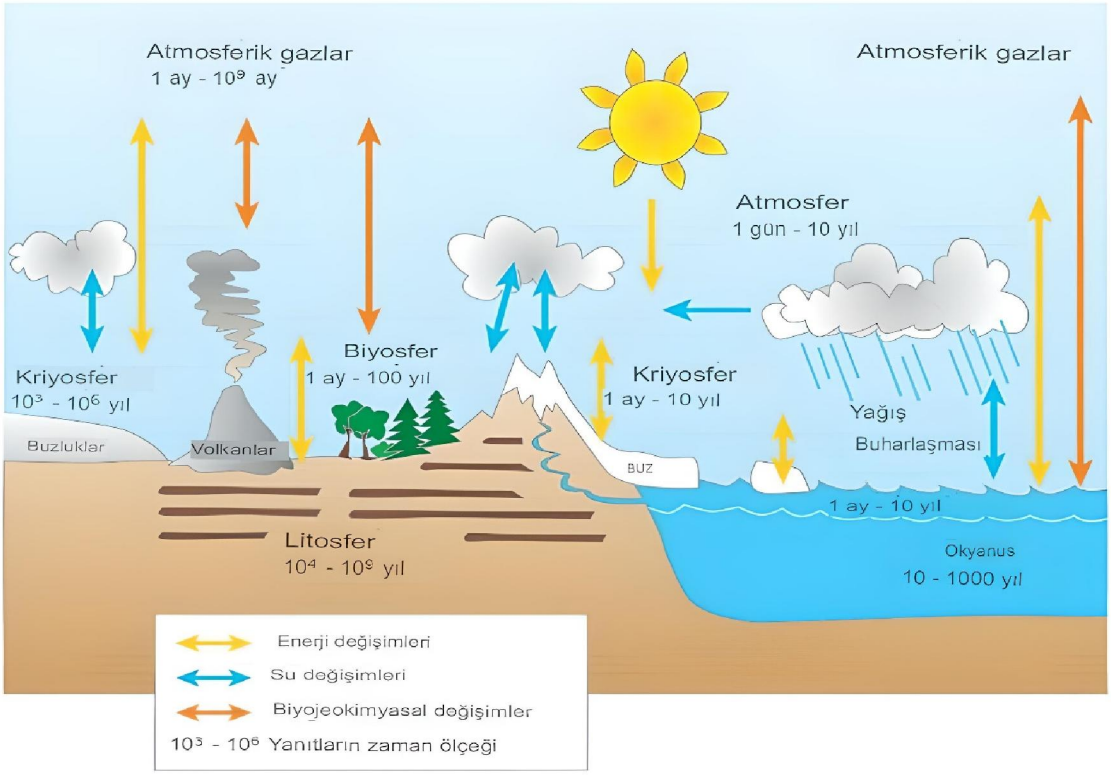
Yapılan tez çalışmasında, rüzgâr ve dalga parametrelerinin gelecek projeksiyonunda uzun dönemli muhtemel değişimleri çoklu model (topluluk) yaklaşımına ve en kötümser (yüksek emisyon) gelecek senaryosuna dayanarak araştırılmıştır. Okyanus veya deniz yüzeyinde görülen dalgaların büyük bir bölümü enerjilerini rüzgarlardan almaktadır. Bu nedenle, iklim değişikliğinin dalga iklimine etkisi incelenirken dalga üremesinde kaynak olan rüzgarlara etkisi de dikkate alınmıştır. Böylece, muhtemel iklim değişikliği senaryosuna bağlı olarak rüzgâr ve dalga ikliminde öngörülen değişimlere göre, karar vericilere gerekli tedbirleri alma konusunda yardımcı bir bilgi kaynağı sunulmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, iklim sistemi ile ilgili genel bilgiler, atmosfer – okyanus etkileşimi ve iklim değişikliği ile ilgili fiziksel süreçler açıklanmakta ve konu ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar özetlenmektedir.

2.1. İklim Sistemi

Genel anlamda iklim, hava olayının o bölge için günlük ortalamasını tarif eder ve iklim türlerinin veya bölgelerin ilgili küresel dağılımı ile temsil edilir (Gates, 1988). Hava olaylarının bağlı olduğu sıcaklık, basınç, nem, rüzgar, buharlaşma, bulutluluk gibi parametreler ise iklim elemanları olarak tanımlanmaktadır (Türkeş, 2000). İklim sistemi ise ana bileşenleri litosfer (yeryüzü), hidrosfer (okyanus), kriyosfer (buzullar), atmosfer ve biyosferden (canlı yüzey) oluşan, tüm ekosistemler ile etkileşimli karmaşık fiziğe sahip bir yapıdadır ve Şekil 2.1'de şematize edilmiştir. Sistemdeki enerji değişimleri, su kütlesinin ana bileşenler arasındaki değişimleri ve biyolojik, jeolojik ve kimyasal değişimlerin iklim sistemindeki döngüsü gösterilmektedir. İklim sisteminin dinamiklerini kontrol eden en önemli parametre gezegensel enerji bütçesidir. Sistemin enerji kaynağı güneş radyasyonudur. Atmosfere giriş yapan radyasyonun bir kısmı bulutlardan, su havzalarından, yerküreden ve buzullardan geri yansıtılmaktadır (albedo; yansıtma kapasitesi). Bir kısmı da sistem bileşenleri tarafından tutulmaktadır. Radyasyonun tutulması ve yansıtılması olaylarında en etkili mekanizma atmosfer bileşeninde bulunan bulutlardır. Su ise, buharlaşma, gizli ısınma, bulut oluşumu, sera gazlarının dengesi, yansıtma gibi birçok fenomende etkili olmaktadır. Atmosferdeki sera gazlarının artması da yine güneş radyasyonunun sistemde tutunmasını sağlayarak dengenin bozulmasına sebep olmaktadır. Buz örtüsü, bitki örtüsü ve arazi yüzeyinin albedosu da aynı şekilde sistemde biriken enerjide etkili olan özelliklerdir. Şekilde bulunmayan bir etken de insan faaliyetleridir ki, son yüzyılda belki de dengeyi bozan en büyük etkendir. Şekilde ayrıca, iklim sisteminde meydana gelen değişimlerin, sistem bileşenlerinde karşılığının görülmesi beklenen zaman ölçekleri de belirtilmiştir.



Şekil 2.1. İklim sisteminin ana bileşenleri (Joussaume, 2000)

İklim sisteminin merkezinde atmosfer bulunmakta ve atmosferin dayatılan bir değişikliğe iklim sisteminin diğer bileşenlerinden daha hızlı tepki vermesi beklenmektedir (Gates, 1988). Mevsimsel sıcaklık ve yağış rejimleri, rüzgâr, bulutluluk ve nem gibi atmosferik iklimin en önemli unsurları küresel iklimin sınıflandırılmasında ve enerji, su kaynakları yönetimi gibi faaliyetlerde büyük etkiye sahiptir. Atmosferik iklim sınıflarının ayrıntılı coğrafik dağılımı incelendiğinde, okyanusun mevsimsel sıcaklık değişiklikleri üzerindeki düzenleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Hidrosfer, iklim sistemindeki genel önemi açısından, atmosfer ile beraber, en etkili bileşenidir. Küresel hidrolojik buharlaşma, yoğunlaşma, yağış ve akış döngüsü için gerekli su potansiyelinin çok büyük bir kısmını ihtiva etmektedir. Buhar, sıvı veya katı formdaki su hem doğrudan güneşten gelen hem de karadan yansıyan radyasyonun soğurulması veya yansıtılması yoluyla iklim sisteminde önemli bir rol oynamaktadır. Suyun yüksek özgül ısısı nedeniyle soğurulan radyasyon karada meydana gelecek olana nispeten okyanus sıcaklığında küçük bir değişikliğe neden olur. Okyanuslar bu nedenle

bir ısı rezervuarı görevi görür ve ısılarını ekvator ve tropik bölgelerden okyanus akıntılarıyla kutup bölgelerine doğru taşırlar. Okyanustaki ısı taşınımı genellikle atmosferde gözlenen ısı taşınıma göre daha yavaştır.

Okyanusun yüzey suyunda depolanan ısının bir kısmı, okyanusun üzerindeki havadan daha sıcak olduğu bölgelerde atmosfere aktarılırken, daha büyük bir kısmı suyu atmosfere buharlaştırmaya sebep olur. Atmosferin gizli ısısı olarak adlandırılan bu ısı daha sonra su buharının yoğunlaşarak buluta ve yağışa dönüşmesiyle açığa çıkar ve hem küçük hem de büyük ölçekte atmosferik sirkülasyon için önemli bir kaynaktır.

Kriyosfer, deniz buzları formunda okyanus ile kar ve buz tabakaları formunda kara ile etkileşim halindedir. Kriyosfer tatlı su kaynağı olma özelliğinden çok, yüksek yansıtma ve düşük ısı iletkenliği özellikleriyle iklim sisteminde etki göstermektedir. Bu özellikleri nedeniyle kar veya buz kaplı yüzeylerin altındaki kara veya okyanusun ısınmasını büyük ölçüde azaltarak soğuk bir yerel ikim oluşmasına katkıda bulunur.

Atmosfer, hidrosfer ve kriyosfere kıyasla yüzey litosferi iklim sisteminin daha az etkili bileşeni olarak tanımlanmaktadır (Gates, 1988). Yüzey litosferinin sisteme belirgin etkileri: toprak nemi, yüzey buharlaşması, toprağın albedo ve termal iletkenliği ile yerel nem ve ısı dengesi üzerindedir.

İklim sisteminin biyolojik olarak aktif bileşeni olan yüzey biyosferi, Dünya'nın bitkisel örtüsünün yaşam döngülerinin karakteristiği diğer bileşenlerle etkileşim halindedir. En belirgin etkileşimi, güneş radyasyonu, sıcaklık ve yağışın mevsimsel değişimlerine yanıt olarak bitki büyümesinin mevsimsel döngüsüdür. Ağaçlar, bitkiler ve yer örtüsü yüzey radyasyon dengesini ve yüzey ısı akışını değiştirir ve yerel yüzey hidrolojisinin mevsimsel değişimlerinde önemli bir rol oynar.

2.2. Atmosfer – Okyanus Etkileşimi

Atmosfer ve okyanus sürekli etkileşim halindedir ve bu etkileşim en temelde enerji alışverişi şeklinde gerçekleşmektedir. Enerji transferi dışında yağış, buharlaşma gibi

olaylarla su kütlesi geçişleri ve bazı çözünebilir gazların (O_2, CO_2, CH_4 vb.) atmosfer ile okyanus arasında değişimi de etkileşim mekanizmasında gözlenmektedir. Kimyasal etkileşim mekanizmasının, ayrı bir uzmanlık ve çalışma konusu olması ve bu tez çalışması kapsamında değerlendirilen dalga iklimini ilgilendirilen birincil faktörlerden olmaması sebebiyle bu bölümde ayrıntılı olarak irdelenmemektedir. Daha çok dalga oluşumuna sebep olan enerji transferi mekanizmalarına değinilmektedir.

Atmosfer ile okyanus arasında enerji değişimi, ısı ve momentum transferi şeklinde gerçekleşmekte ve ayrıca nem geçişleri de gizli bir ısı transferi olarak değerlendirilmektedir (Misra, 2014). Enerji değişimi okyanus-atmosfer ara yüzünün birim yüzey alanı başına enerji değişim oranı olarak tanımlanan akılar ile temsil edilir. Atmosferin okyanus sınır tabakasına buharlaşma yoluyla salınan su buharı, troposfere kadar taşınarak ve yoğunlaşarak bulutları ve yağışları meydana getirmektedir. Bu olay atmosferik sirkülasyonu yönlendiren gizli ısı taşınımı ile ilişkilidir. Okyanus yüzeyindeki ısı transferinde etkisi olan buharlaşmayı artıran bir faktör de rüzgarlardır. Deniz yüzeyinden esen rüzgarlar, hem deniz yüzeyi sıcaklıklarının dengelenmesinde etkilidir hem de okyanus sirkülasyonu için birincil zorlama mekanizmasıdır (Chelton & Xie, 2010). Rüzgâr kuvveti okyanus yüzeyine momentum transferi ile enerji kazandırarak yüzey akıntılarını ve rüzgar dalgalarını meydana getirmektedir. Küresel olarak karakteristik atmosfer sirkülasyonları okyanus sirkülasyonlarını meydana getirmektedir ve bu sirkülasyonlar da yine karşılıklı olarak birbirinin değişiminden etkilenmektedir.

2.3. Genel Dolaşım Modelleri

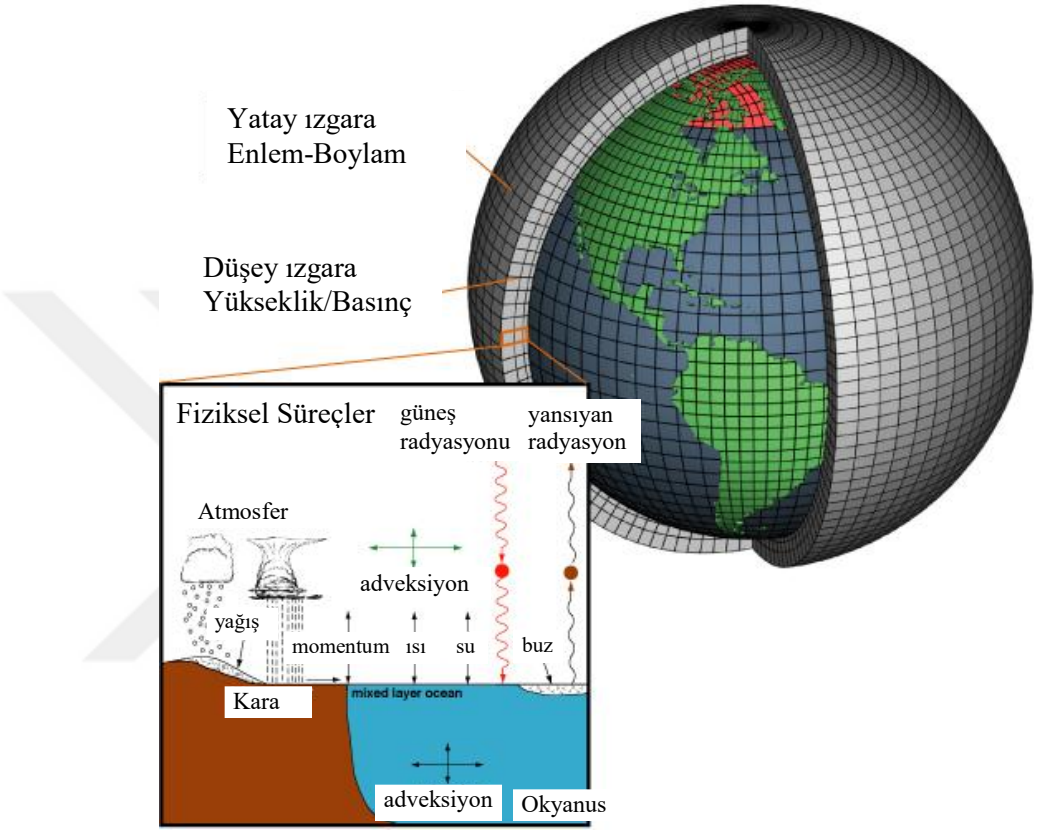
Atmosfer, okyanus, kriyosfer ve litosferdeki fiziksel süreçleri temsil eden sayısal modeller (Genel Dolaşım Modelleri veya GCM'ler), küresel iklim sisteminin artan sera gazı konsantrasyonlarına tepkisini benzeştirmek amacıyla üretilmiş bilgisayar tabanlı araçlardır. İklim tepkisini küresel veya bölgesel ortalamalar şeklinde tahmin eden basit modeller bulunsa da, coğrafik ve fiziksel uygunluk açısından GCM'ler daha tutarlı tahminler sağlamaktadır (IPCC, 2022). Fiziksel uygunluk, fizik yasalarını bütün bölgelerde sağlayacak şekilde yani, bir bölgedeki değişiklikler fiziksel olarak başka bir

bölgede ve küresel olarak birbirine bağlı (etkileşimli) olacak şekilde sağlanmış modelleri tarif etmektedir.

GCM'ler, iklimi dünya üzerinde üç boyutlu bir ızgara (Şekil 2.2) kullanarak gösterir, tipik olarak 250 ila 600 km arasında yatay çözünürlüğe, atmosferde 10 ila 20 dikey katmana ve bazen okyanuslarda 30'a kadar katmana sahiptir (IPCC, 2022). Mekânsal ve zamansal ölçekte, iklim etkisini yeterli sayıda değişkenle tanımlama yeteneğine sahip olacak şekilde üretilmektedir. Küresel iklim modellerinin çözünürlükleri değişken olup; en yüksek çözünürlüklü modeller 1,1° x 1,1° (enlem x boylam) ve en düşük çözünürlüklü olanlar ise 3,75° x 7,71° (enlem x boylam) şeklinde görülmektedir (Kamworapan & Surussavadee, 2019). Küresel olarak iklim etkilerini, saatlik veya günlük değerlerden, yıllık ortalamalara kadar değişen zamansal ölçeklerde güneş radyasyonu, sıcaklık, nem, yağış ve rüzgâr hızı gibi değişkenleri hem girdi olarak kullanmakta hem de çıktı olarak verebilmektedirler. İklim modelleri, fizik, akışkan hareketi ve kimyanın temel yasalarına dayanan diferansiyel denklem sistemleridir. Güneş radyasyonu, gizli ısı gibi enerji kaynaklarının atmosfer ve okyanus sistemlerindeki çevrimi, termodinamik ilkeleri doğrultusunda Navier-Stokes denklemleri (Marshall vd., 1997; Galdi, 2011) ile tanımlanmaktadır. Navier-Stokes denklemleri, Newton akışkanları için momentumun korunumunu ve kütlenin korunumunu matematiksel olarak ifade eder. Bu denklemler, Dünya'nın atmosferini veya okyanuslarını modellemek için kullanılan bilgisayar tabanlı programlarının yürütücü denklemleridir.

Atmosfer-okyanus iklim modellerinin kapsadığı fiziksel süreçlerin genel kavramı Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Atmosferik modeller, her bir ızgara içindeki radyasyonu, ısı transferini, momentum transferini (rüzgarlar), bağıl nemi ve yüzey hidrolojisini hesaplar ve komşu noktalarla etkileşimleri değerlendirir. Bunlarla beraber, atmosfer ve okyanustaki yatay akımlar (adveksiyonlar) da kendi sistemleri içerisinde çözümlenir. Her bir sayısal ağ hücresinden elde edilen sonuçlar komşu hücrelere iletilir ve denklemler tekrar çözülür. Bir zaman adımında birden fazla kez bu işlem tekrar edilebilir. Çözümün hassasiyeti yazılımın ve kullanılan bilgisayarın kapasitesi ile ilgilidir. İklim modelleri tipik olarak yaklaşık 30 dakikalık zaman adımlarıyla çalıştırılır; bu nedenle, modellenen dünyadaki atmosferik özellikler her yarım saatte bir hesaplanır. Tüm model parametreleri

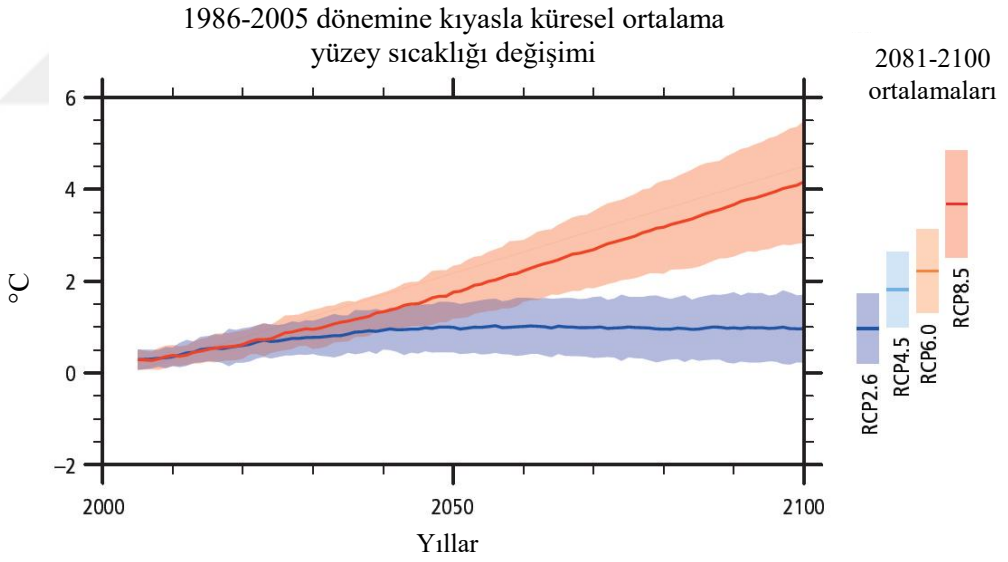
(sıcaklık, rüzgâr hızı, nem vb.), bu zaman adımlarının her birinde modeldeki ızgara noktasının her birinde hesaplanmaktadır. Modelin geçmişten geleceğe yüz yıldan fazla bir zaman periyodu için çalıştırıldığı düşünülürse, bu hesaplamalar için yüksek kapasiteli süper bilgisayarlara ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2. İklim modellerinin üç boyutlu ızgarası ve fiziksel süreçler (NOAA, 2022)

CMIP deneyleri kapsamında üretilen GCM'lerde mevcut modelleme temellerinin yanı sıra, gelecek iklim öngörüleri sağlayabilmek maksadıyla senaryolara dayalı ve modellenen periyot boyunca değişken parametreler de model fiziğine etki etmektedir. Örneğin ilk CMIP deneylerinde sera gazı salınımlarına bağlı farklı senaryolar ile gelecek iklim modelleri üretilmiştir. Model, sera gazlarından biri olan CO_2 döngüsü içeriyorsa sadece antropojenik CO_2 konsantrasyonları girdi olarak kullanılacak ve model süreç boyunca atmosferik konsantrasyonları tahmin edecektir. Eğer modelde tanımlı bir döngü yoksa, konsantrasyonlar modele girdi olarak sağlanacak şekilde çalıştırılmaktadır.

Bu tezde kullanılan CMIP5 modellerinin gelecek iklim projeksiyonlarının dayalı olduğu, sera gazı etkilerini de kapsayacak şekilde, radyasyon zorlaması şeklinde tabir edilen temsili rotalar (senaryolar), teknolojik gelişmeler ve bilgi birikimi neticesinde güncellenen model çalışmalarında değişim gösterebilmektedir. Örneğin, AR5 ile sunulan CMIP5 deneylerinde gelecek dönem simülasyonları olarak gerçekleştirilen, en iyimser ve en kötümser senaryolara dayalı olarak elde edilen yüzey sıcaklığının küresel ortalamasının yıllara göre değişimi Şekil 2.3'te (Pachauri vd., 2014) verilmektedir. Gelecek dönem sıcaklık ortalamaları mevcut iklim olarak tanımlanan 1986-2005 dönemi ortalamalarına kıyasla, göreceli artışı göstermektedir. En iyimser senaryoda sıcaklık ortalamaları 21. Yy ortalarında mevcut ortalamalara göre biraz artacağı öngörülse de yüzyıl boyunca sabit seyredeceği tahmin edilmektedir. Kötümser senaryoda ise, sıcaklık ortalamalarının yüzyıl sonuna kadar sürekli bir artış eğiliminde olacağı öngörülmektedir. Tezde kullanılan iklim modellerinin dayalı olduğu senaryolar Bölüm 3'te iklim modellerinin veri setlerinin tanıtıldığı başlık altında detaylı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 2.3. CMIP5 deneyleri kapsamında tanımlı en iyimser (RCP2.6) ve en kötümser (RCP8.5) senaryolara dayalı olarak yüzey sıcaklığının gelecek projeksiyonu

2.4. Rüzgâr Dalgası Oluşumu

Atmosfer-okyanus etkileşim bölgesinde rüzgârın kuvvetinin sürtünme etkisiyle su yüzeyine enerji ve momentum aktarması sonucunda dalgalar oluşmaktadır. Dalgaların

gözle görülür hale gelmesi için su yüzeyi üzerinde belli bir süre ve mesafe boyunca esmesi gerekmektedir. Büyüyen rüzgâr hızlarıyla doğru orantılı artan rüzgar kuvveti etkisinde su yüzeyine aktarılan enerji miktarı da artmakta ve dalga ilerleme doğrultusunda büyüyerek yayılmaktadır. Oluşan dalgaların yükseklik, uzunluk, periyot ve ayrıca hız gibi karakteristik özellikleri (Şekil 2.4) bulunmaktadır. Bu dalga karakteristiklerine ve çevresel etkilere bağlı olarak ilerlemeye devam edebilmekte veya deformasyonlara uğrayabilmektedir. Rüzgar esmeye yani dalga üremesine enerji transfer etmeye devam etse de, dalganın büyüyebileceği - dalga kabarması olarak da bilinmekte - bir limit değeri bulunmaktadır. Bu limit değere ulaştığında, dalganın yüksekliği ve uzunluğu oranına (dalga dikliği) bağlı olarak kırılma veya enerji yayılması şeklinde dalga büyüklüğü dengelenmektedir. Bu denge durumu 'tam gelişmiş deniz' olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.4. Sinüs fonksiyonu biçimli dalga profili

Dalganın herhangi bir engelle (kara vb.) karşılaşmadan ilerleyebileceği mesafe feç mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Feç mesafesinin yetersizliği nedeniyle dalga kabarmasının potansiyel limit değerine kadar ulaşamadığı durum gelişmekte olan deniz şeklinde tabir edilmektedir. Gelişmekte olan deniz durumu feç mesafesi ile sınırlı olabileceği gibi, rüzgârın esme süresi ile de sınırlı olabilmektedir.

2.5. Spektral Dalga Modeli

Tez kapsamında dalga simülasyonları üçüncü nesil spektral dalga modeli SWAN (Simulating Waves Nearshore; Booij vd., 1999) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, bu kısımda rüzgâr dalgalarının spektral karakteristikleri ile ilgili teorik bilgiler verilmektedir.

2.5.1. Dalga spektrumu

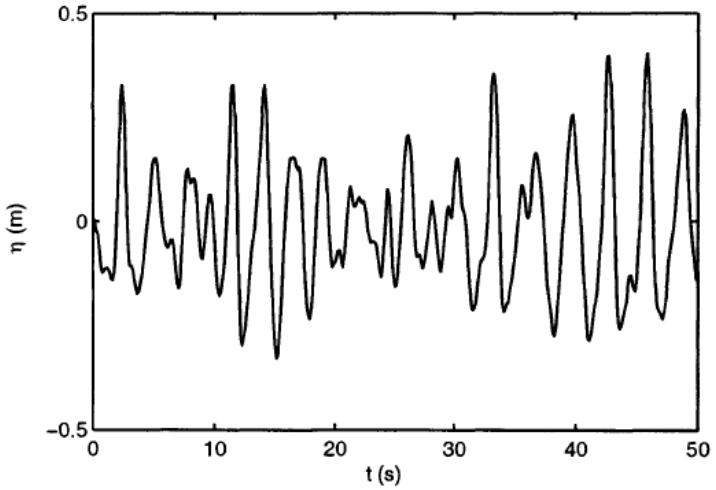
Doğal haliyle deniz yüzeyi, birçok dalganın birleşimi veya etkileşimi sebebiyle düzensiz bir formda bulunmaktadır. Bu düzensiz dalga durumu dalga spektrumu ile analiz edilebilmektedir. Dalga spektrumu, dalga enerjisinin frekans ve yön aralığındaki dağılımını ifade etmektedir (Goda, 2000). Spektral bir dalga ölçümünde her bir yön ve frekans için 'Fourier Dönüşümü' uygulanarak düzenli sinüs dalgaları elde edilebilmektedir. Zamana bağlı olarak bir yönde su yüzeyi denklemi Goda, (2000)'de aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n \sin(nw_0 t + \phi_n) \tag{2.1}$$

Denklemde $\eta(t)$, t anında sabit bir noktadaki su yüzeyinin düşey yer değiştirmesini, η_0 ortalama su yüzeyi kotunu, w_0 en uzun dalganın açısal frekansını, a_n n-inci dalganın genliğini, Φ_n n-inci dalganın faz açısını ifade etmektedir. Şekil 2.5'te bir istasyondan alınan dalga kaydında su yüzeyi yer değiştirmeleri zamana bağlı olarak görülmektedir.

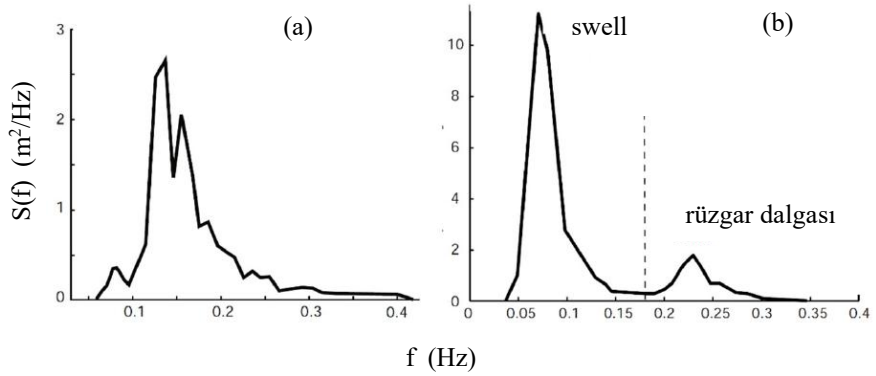
Spektral analiz ile sinüs dalgası formunda elde edilen rüzgâr dalgaları farklı frekans, yön ve yükseklik için sonsuz küçük genlik ve rastgele fazda çok sayıda sinüs dalgasının toplamı olarak çözümlenebilmektedir. Bu aslında zaman alanından frekans alanına yapılan bir dönüşümdür. Fourier analizi sonucunda bulunan genlik (a) ile, f frekansına sahip dalga bileşeninin enerji yoğunluğu (S) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$S(f_n)\Delta f_n = 1/2a_n^2 \tag{2.2}$$



Şekil 2.5. Bir istasyondan alınan örnek bir dalga kaydı (Young, 1999)

Denklem 2.2'de Δf frekans aralığını göstermektedir. f'e karşılık $S(f)$ grafiği dalga frekans spektrumunu ifade etmektedir. Şekil 2.6 a'da gösterilen örnek frekans spektrumuna göre, dalga enerjisi 0,05 – 0.4 Hz frekans aralığında seyretmekte ve yaklaşık 0,13 Hz değerinde yoğunlaşmaktadır. Şekil 2.6 b'de ise rüzgâr dalgası ve soluğan (swell) olarak tabir edilen dalgaları spektrumdan ayırt edilecek şekilde görmek mümkündür. Ölü deniz dalgaları, rüzgâr dalgalarının yayılarak uzun mesafeler katetmesi ile oluşum bölgesinden belli bir mesafe uzakta görülen daha uzun periyotlu dalgalardır.



Şekil 2.6. Örnek bir frekans dalga spektrumu (Micone, 2017)

Belli bir Δf_n frekans aralığında dalga enerji yoğunluğu o dalga bileşeninin dalga enerjisini vermektedir (Yilmaz, 2007). Dalga enerjisi,

$$E = \frac{1}{2}\rho_w g a^2 \tag{2.3}$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Burada ρ_w suyun yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Dalga yüksekliğinin, dalga genliğinin iki katı olması göz önünde bulundurularak denklem dalga yüksekliği ile de ifade edilebilmektedir. Dalga enerjisi spektrumu olarak da bilinen bu denklem, enerji-yoğunluk spektrumu veya a^2 terimi nedeniyle varyans spektrumu olarak da bilinmektedir. Yatay eksene frekansa (f) karşılık düşey eksenine $\rho_w g S(f)$ şeklinde dalga enerji spektrumu $E(f)$ olarak da gösterilebilmektedir.

2.5.2. Dalga parametrelerinin spektrumdan türetilmesi

Deniz durumunun karakteristiğini tanımlayan dalga parametreleri, dalga spektrumunun momentleri cinsinden tanımlanabilmektedir. Farklı frekans ve yön aralıkları için spektrumun herhangi bir momenti,

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \tag{2.4}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (Chakrabarti, 1987). Bu eşitlikte $S(f)df$, $f+df/2$ ile $f-df/2$ frekans aralığında dalganın sahip olduğu enerjiyi belirtmektedir. Eşitlikte tüm frekans aralığı ve her bir yön için hesap yapılarak toplam enerji bulunmaktadır. Sıfırıncı moment olarak ifade edilen m_0, spektral eğrinin altındaki toplam alanı vermekte ve dalga kaydındaki dalgaların toplam enerjisini temsil etmektedir. Basit bir dalga için birim alandaki dalga enerjisi Denklem 2.3'de verilmiştir.

Spektral dalga yüksekliği parametresi H_{m0}, sıfırıncı moment m_0'a bağlı olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \tag{2.5}$$

Spektral dalga yüksekliği H_{m0} ile belirgin dalga yüksekliği (H_s veya $H_{1/3}$ simgeleri de kullanılmakta) değerleri birbirine yakındır. Geniş bir spektrum aralığında $H_{m0} = 1{,}05\ H_s$ eşitliği ile dönüşüm yapılabilmektedir. Belirgin dalga yüksekliği, bir dalga kaydının en büyük üçte birlik dilimdeki dalga yüksekliklerinin ortalaması olarak tanımlanmaktadır (Sverdrup & Munk, 1947).

Ortalama dalga periyodu için iki farklı spektral dalga periyodu parametresi tanımlanmaktadır. Bunlardan birincisi,

$$T_{m01} = m_0 / m_1 \tag{2.6}$$

denklemiyle ve ikincisi,

$$T_{m02} = \sqrt{m_0 / m_2} \tag{2.7}$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Bu denklemlerde m_1 birinci spektral momenti, m_2 ise ikinci spektral momenti göstermektedir. Spektrumun tepe değerinin frekansı f_p, tepe periyoduna ($T_p = f_p^{-1}$) karşılık gelmektedir. T_{m-10} veya T_e terimleri ile ifade edilen dalga enerji periyodu,

$$T_{m-10} = m_{-1} / m_0 \tag{2.8}$$

denklemi ile hesaplanmaktadır.

2.6. Kaynak Özetleri

Bu alt bölümde tez çalışmasının literatür araştırması kapsamında, çalışma konusu ile alakalı görülen kaynakların özetleri sunulmaktadır. Küresel dalga iklimi çalışmaları ile bölgesel dalga iklimi çalışmaları ayrı başlıklarda özetlenmektedir.

2.6.1. Küresel dalga iklimi çalışmaları

Genel dolaşım modelleri kullanılarak, günümüz dalga iklimi ile gelecek dalga ikliminin kıyaslamasının yapıldığı çalışmada Mori vd. (2010) deniz üzeri rüzgarların ve dalgaların yıllık ortalama ve aşırı değerleri üzerine odaklanmıştır. Çalışmada, Japonya Meteoroloji Araştırma Enstitüsü ve Japonya Meteoroloji Dairesi (MRI-JMA) tarafından geliştirilen 20 km çözünürlüğe sahip genel dolaşım modelini taban alan iklim projeksiyonları kullanılmıştır. Deniz yüzeyi sıcaklığı (SST) ve diğer ilgili okyanus koşulları zorlayıcı dış kuvvet olacak şekilde, atmosfer-okyanus ikili (couple) modelleri kurularak gelecek projeksiyonu incelenmiştir. Ölçülen SST değerleri günümüz iklim hesaplamalarında kullanılırken; genel dolaşım modelleri gelecek iklim projeksiyonu için taban sınır koşulu olarak kullanılmıştır. 1979-2004 yılları arası günümüz iklimi, 2015-2031 yılları arası yakın gelecek, 2075-2100 yılları arası uzak gelecek iklimi olarak bölünerek ve deniz yüzeyinden 10 m yüksekteki rüzgâr hızları kullanılarak SWAN dalga modeli ile simüle edilmiştir. Uzun dönem dalga iklimi değişimi hem küresel ölçekte hem de bölgesel olarak analiz edilmiştir. Doğrulama için Pasifik Okyanusu'nda NOAA tarafından 25 yıldan fazla ölçülmüş dalga ve rüzgâr verisi kullanılmıştır. Sonuçta, orta enlemler ve Antarktik Okyanusunda ortalama dalga yüksekliklerinin arttığı, Ekvator etrafında ise azaldığı görülmüştür. Japonya deniz kıyılarında günümüz rüzgâr hızı ve dalga yüksekliği değerlerine gelecekte %5-10 civarında hafif bir azalış olacağı öngörülmüştür. Bunların yanında, tropikal hortum kaynaklı ekstrem dalgalarda artış görüleceği tespiti yapılmıştır. Özetle gelecek dalga iklimi, orta enlemlerde daha düşük ortalama değerler ve daha şiddetli ekstrem olaylar; uç enlemlerde ise daha yüksek ortalama değerler ve şiddetli aşırı olaylar olacak şekilde değişime uğrayacağı sonucuna varılmıştır.

CMIP5 deneylerinin rüzgar simülasyonlarını kullanarak, küresel ölçekte tarihsel ve gelecek dalga iklimi değerlendirmesinin yapıldığı çalışma Dobrynin vd., (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızları ve dalga yüksekliklerindeki eğilimlerin değerlendirildiği araştırmada EC-Earth rüzgarları kullanılmış ve dalga simülasyonları WAM dalga modeli ile yürütülmüştür. Gelecek dönem rüzgâr ve dalga iklimi RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayanmaktadır. Her iki senaryoya dayalı gelecek rüzgar hızları ve dalga yükseklikleri, Arktik Okyanusu ve Güney Okyanuslarında artış, Pasifik

Okyanusunda azalış göstermektedir. Araştırmacılar, rüzgâr hızları ve dalga yüksekliklerinin, Arktik ve Güney Okyanusları haricinde, doğal değişkenlik davranışı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, Güney Yarımkürede, Arktik Okyanusu ve Hint Okyanusu'nda rüzgâr hızları ve dalga yüksekliklerinin aşırı değerlerinin daha baskın olacağını beklemektedirler.

Mori vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, deniz seviyesi yükselmesi, deniz üzeri rüzgarların ve okyanus dalga yüksekliklerinin gelecekteki değişimi, IPCC (2007) ve Japonya Meteoroloji Araştırma Enstitüsü'nün yüksek çözünürlüklü en güncel atmosferik genel sirkülasyon model sonuçlarının iklim veri setleri birlikte kullanılarak analiz edilmiştir. Belirgin dalga yükseklikleri (H_{m0}), deniz yüzeyi rüzgarlarının fonksiyonu olan ampirik formüllere dayalı çoklu model uyum metotları yardımıyla istatistiksel olarak tahmin edilmiştir. 2000–2100 yılları arasındaki periyotta, grup ortalama ve standart sapma değerleri öngörülmüştür. Günümüzdeki dalga yüksekliği değerlerine göre gelecek projeksiyonundaki değişim oranının büyüklüğü en fazla +- %15 olmaktadır. Ekvator ve Antarktik Okyanusu etrafında, ön görülen H_{m0} değerlerinde büyük belirsizlikler gözlenmiştir.

Wang vd., (2014), çoklu model CMIP5 simülasyonlarını kullanarak, küresel okyanuslarda öngörülen dalga yüksekliği değişikliklerini sunmuştur. CMIP5 simülasyonlarından deniz seviyesi basıncı (SLP) verileri alınarak istatistiksel dalga modeli ile belirgin dalga yükseklikleri bulunmuştur. Yirmi CMIP5 küresel iklim modelinin topluluk ortalaması ile dalga iklimi analiz edilmiştir. 6 saat çözünürlüklü ERA-Interim (Dee vd., 2011) H_{m0} ve (SLP) verileri ile istatistiksel dalga modeli kalibre edilmiş ve değerlendirilmiştir. 1980-1999 döneminde CMIP5 topluluk H_{m0} ortalamaları ve en büyük değerleri ile ERA40 ve ERA-Interim verilerinin ortalama ve en büyük değerleri kıyaslanmıştır. Bu ortalama ve en büyük değerlere göre, RCP8.5 senaryosu ile elde edilmiş 2080-2099 dönemi ortalama ve en büyük değerlerinin öngörülen değişiklikleri irdelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, tropiklerde ve Güney Yarım Küre'nin yüksek enlemlerinde belirgin dalga yüksekliklerinde artış beklenmektedir. Ayrıca, aşırı değer dağılımları analizi sonuçlarına göre 10 yılda bir görülen aşırı dalga yüksekliklerinin görülme sıklığının bazı bölgelerde iki veya üç katına kadar çıkması olası görülmektedir.

Hemer ve Trenham (2016) küresel ölçekte sekiz CMIP5 ve iki CMIP3 üyesi modelleri farklı kombinasyonlarla çoklu model oluşturmak suretiyle kullanmıştır. ERA-40, ERA-Interim yeniden analiz verileri ve Saha vd. (2010) çalışmasında CFSR rüzgarları ile benzeştirilmiş dalga modeli sonuçları kıyaslama için değerlendirme veri setleri olarak kullanılmıştır. İki veri seti arasındaki uyumu gösteren Mielke ölçütü ve normalize edilmiş hata matrisi yöntemleri ile belirgin dalga yüksekliği, maksimum dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü incelenmiştir. Yıllık ve mevsimsel ortalamaların farkları ve ortalama mutlak hatalar irdelenmiştir. Küresel iklim modellerinde yüksek çözünürlüklü GCM kullanmanın fazla fayda sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

Mentaschi vd. (2017) 21. yüzyılda kıyı çizgileri boyunca, ekstrem dalga enerji akısının (WEF) küresel eğilim analizini çalışmıştır. Dalga projeksiyonları, 6 farklı CMIP5 modeli kullanılarak, spektral dalga modeli olan WaveWatch 3 (WW3; Tolman, 1999) yazılımı yardımıyla oluşturulmuştur. Simülasyonlar 1970 – 2100 yılları arasında olmak üzere 130 yıllık periyotta yürütülmüştür. Simülasyon sonuçları, dünya çapındaki kıyılarda toplamda 4986 lokasyonda elde edilmiş ve her lokasyonda bütün modeller için dalga enerji akısı hesaplanmıştır. Emisyon rotası olarak en şiddetli olan RCP8.5 senaryosu kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, bu yüzyılın sonunda güney iklim kuşağında 100 yıl yinelemeli WEF seviyesinde %30 artış görülürken; kuzey yarım kürede genişçe bir kıyı bölgesinde belirgin olarak negatif bir eğilim görülmüştür. En belirgin uzun süreli eğilimlerin, Antartik, güneyli El-Nino ve Kuzey Atlantik Salınımlarının şiddetlenmesiyle ilintili olduğu sonucuna varılmıştır.

Casas-Prat vd. (2018), su yüzeyi rüzgarları ve deniz buzu konsantrasyonlarını kullanarak beş CMIP5 iklim modeli ile, mevcut dönem (1979-2005) ve RCP8.5 senaryosuna dayalı gelecek dönem (2081-2100) küresel dalga simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Dalga simülasyonları WW3 programı kullanılarak elde edilmiştir. İklim modellerinin benzeştirdiği rüzgâr verisi ve WW3 ile benzeştirilen dalga verisi CFSR yeniden analiz rüzgar verisi ve CFSR rüzgarları ile elde edilmiş dalga modeli (hindcast) verisi ile değerlendirilmiştir. Mevcut ve gelecek dalga iklimi değerlendirmeleri beş iklim modeli

ile oluşturulmuş çoklu model ortalaması ile yapılmıştır. Küresel dalga iklimi dışında Kuzey Buz Denizi (Arktik Okyanus) bölgesinin dalga iklimine de ayrıca odaklanılmıştır. Kuzey Atlantik'te gelecek dönem için daha sıcak iklimde yüzey rüzgâr hızlarının azalmasına karşılık daha düşük dalgalar beklenmektedir. Seçilen CMIP5 modelleri güney yarımkürenin orta-yüksek enlemlerinde su yüzeyi rüzgâr hızlarında istikrarlı bir artış öngörmekte, bu da benzeştirilmiş dalga yüksekliklerinde benzer şekilde artış öngörüsüne sebep olmaktadır. Doğu Pasifik ve Hint Okyanusu'nda yüksek dalgalarla beraber pik dalga periyotları da artmakta ve ortalama dalga yönlerinde saat yönü tersinde dönüş beklenmektedir. Arktik kıyılarına yaklaşan yeni dalgalar, ağırlıklı olarak güneye doğru bir ortalama dalga yönü yansıtıldığından, buz geri çekildikçe daha az feç sınırlı olacağı sonucuna varılmıştır.

Literatürde global ölçekte mevcut dalga iklimi değerlendirmesi, yedi CMIP5 EC-Earth iklim modeli ile ağırlıksız ortalamalar alınarak kurulmuş çoklu model kullanılarak yapılmış çalışmalardan bir diğeri Semedo vd. (2018)'nin çalışmasıdır. Çoklu model sadece tek bir aileye mensup modeller ile, tek bir dalga tahmin modeli (WAM) kullanılarak ve tek bir gelecek iklim senaryosuna (RCP8.5) dayalı olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada çoklu modelin performansı CFSR ile çalıştırılmış dalga tahmin modeli ve ERA-Interim veri seti referans alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, tüm iklim simülasyonları ve referans veri setleri dünya genelindeki yerinde ölçümler ile kıyaslanmıştır. Sonuçta, çoklu modelin mevcut dönem dalga iklimini gerçekçi bir şekilde benzeştirebilme yeteneğine sahip olduğu kanaatine varılmıştır.

CMIP5 tabanlı çoklu model oluşturularak 21. Yüzyıl küresel dalga iklimi projeksiyonu sonuçlarının sunulduğu güncel çalışmalardan biri Lemos vd. (2019) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada 4 farklı EC-Earth ailesi üyesi model ile çoklu model kurularak, belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu, dalga enerji akısı ve deniz üzerinde 10 m yükseklikteki rüzgâr hızı parametreleriyle 2031-2060 yılları arasındaki dalga iklimi projeksiyonu çıkarılmıştır. İklim modellerini kıyaslamak için ERA-Interim yeniden analiz verisi ve Chawla vd. (2012) tarafından CFSR rüzgarlarıyla çalıştırılmış dalga tahmin modeli sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca dünya genelinde yetmiş iki farklı noktasal ölçüm istasyonundaki 10 yıl ile 38 yıl arasında değişen ölçüm verileri de doğrulamada

kullanılmıştır. ERA-Interim ve CFSR tahmin modeli sonuçlarıyla beraber çoklu modelin yıllık ortalama değerleri, ölçüm istasyonlarından alınan yıllık ortalama değerleri ile saçılım diyagramı ile kıyaslanmıştır. Ayrıca istasyon verilerinin günlük ortalama değerleri ile modellerin günlük ortalama değerleri zaman serisi ile kıyaslanmıştır. Her parametre için, ortalama değerlerin ve 95. yüzdelik dilim (95% percentile) değerlerinin normalize edilmiş fark haritaları değerlendirilmiştir. Yıllar arası değişkenlik değerlerinin fark grafikleri kıyaslanmıştır. Çoklu modelin geçmiş ve gelecek ortalama değerleri farkları incelenmiştir. Gelecek dönem trendleri incelenen parametreler için çıkarılmış ve geçmiş dönem ortalamaları ile karşılaştırılmıştır. Küresel ölçekte harita 13 alt bölgeye bölünerek 1979-2100 periyodunda yıllık ortalama değerlerin seyri gözlenmiştir.

Stopa vd. (2019), GCM tarihsel simülasyonlarının, zamansal ve alansal olarak seyrek veri seti sağlayan uydu gözlemleri ile kıyaslama yöntemi üzerine yaptıkları çalışmada küresel dalga iklimini sunmuştur. EC-Earth simülasyonlarından yedi rüzgâr verisi dalga simülasyonları için kullanılmış ve yedi üyeli rüzgâr ve dalga topluluk modeli oluşturulmuştur. Kıyaslama için, test edilen örnekleme yöntemlerinden sistematik örnekleme tekniğinin en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. EC-Earth rüzgâr hızı örneklerinden elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları ile uydu gözlemlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları karşılaştırılmıştır. EC-Earth rüzgâr hızlarını kararlı bir şekilde uydu gözlemlerinden düşük tahmin etmektedir. Dalga yüksekliklerinde, özellikle ekstra tropikal bölgelerde rüzgardakinin aksine, dalga iklimi topluluğu uydu gözlemlerine kıyasla daha yüksek tahmin sonuçları vermiştir. Genel olarak dalga topluluğunun, küresel dalga ikliminin önemli özelliklerini yakaladığı düşünülmektedir. Yalnızca, topluluk modeli ile elde edilen dalga yüksekliklerinin yıllar arası değişkenliği uydu verisinden farklı bulunmuş ve iklim simülasyonlarının uzun vadeli iklim değişkenliğini yakalama konusunda çok başarılı olamadığı görüşüne varılmıştır.

2.6.2. Bölgesel dalga iklimi çalışmaları

Benetazzo vd. (2012) Adriyatik Denizi'nde 2070-2099 dönemi için şiddetli rüzgâr dalgalarının değişimini incelemiştir. Bunun için IPCC-A1B senaryosuna dayalı GCM'den ölçek indirgeme ile üretilmiş yüksek çözünürlüklü COSMO-CLM bölgesel

rüzgarları kullanılmış ve SWAN dalga modeli çalıştırılmıştır. SWAN simülasyonlarının mevcut dalga iklimi sonuçları (1965-1994) temin edilen belirgin dalga yüksekliği yerinde ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Genelleştirilmiş Pareto dağılımı ile mevcut dönem ve gelecek senaryo simülasyonlarının fırtına anındaki zirve değerlerinin değişimi tahmin edilmiştir. Ayrıca, fırtına esnasında beklenen en büyük dalga yüksekliğinin alansal deseninin tahmini için Borgman'ın teorisi kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yerel olarak dalga şiddetinde artışlar meydana gelebilmesine rağmen, Adriyatik Denizi'nde gelecekteki dalga ikliminin mevcut iklimden daha ılıman olduğu sonucunu göstermiştir.

Kuzey Amerika batı kıyısı ve Hawai kıyıları boyunca tarihsel dönem ve 21. yüzyılın gelecekteki dalga koşullarını değerlendirmek için Erikson vd. (2015) tarafından Pasifik Okyanusu Havzasında küresel ve bölgesel ölçekli spektral rüzgar dalgası modelleri oluşturulmuştur. Çalışmada dört ayrı GCM tarafından benzeştirilen üç saatlik rüzgarlar, yakın bir tarihsel zaman periyodu (1976-2005) için bir dalga koşulları topluluğu ile 21. yüzyılın orta (2026-2046) ve son (2081-2100) dönemleri için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayalı olarak projeksiyonlar oluşturmak için kullanılmıştır. Dalga simülasyonları WW3 modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 80° Kuzey ve 80° Güney Enlemleri arasında 1° enlem, 1,25° boylam çözünürlüğü olan küresele yakın bir model ve 0,25° enlem, 0,25° boylam çözünürlüğünde Kuzey Pasifik'in doğusu için iki farklı dalga modeli üretilmiştir. Veri boyutunun büyük olması nedeniyle, alansal olarak değerlendirilen verilerde, belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu ve pik dalga yönü parametrelerinin günlük ortalamaları biriktirilmiştir. Aşırı dalga yüksekliği analizleri için ise, kıyı boyunca 33 noktada belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu ve ortalama dalga yönü saatlik olarak biriktirilmiştir. Dalga şamandırası ölçümleri ve ERA-Interim dalga yeniden analiz verileri ile tarihsel dönem simülasyonlardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması, dalga yüksekliklerinin, periyotlarının ve dalga yönlerinin kabul edilebilir model performansı göstererek, projeksiyon oluşturmaya elverişli olduğu kanaatini oluşturmuştur. Ortalama ve aşırı dalga yüksekliklerinin Kuzey Amerika'nın batı kıyılarının büyük bir bölümünde azalması bekleniyor. Aşırı dalga yüksekliklerinin ~50° Kuzey Enlemi'nin güneyinde azalması ve kuzeye doğru artması beklenirken, aşırı dalga periyotlarının çoğunlukla artacağı tahmin edilmektedir. Aşırı dalga yükseklikleriyle ilişkili dalgaların ilerleme yönlerinin, Aleut Adaları'nın doğu ucunda saat yönünde ve

Güney Kaliforniya açıklarında saat yönünün tersine döneceği tahmin edilmektedir. Değişen dalga ikliminin modelleri ve dağılımları, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarında benzerdir, ancak RCP 8.5'te daha güçlü değişim büyüklükleri öngörülmektedir. Bu çalışmanın bulguları, Doğu Kuzey Pasifik'te azalan ortalama ve aşırı dalga koşullarını öngören CMIP3 GCM'leri kullanan önceki çalışmalara benzerdir, ancak büyüklük ve yerel değişim öngörüleri açısından diğer çalışmalardan farklıdır.

Avrupa okyanus ve denizleri için gerçekleştirilen Perez vd., (2015) çalışmasında okyanus yüzeyi dalgalarının gelecek tahminleri sunulmuştur. Bu çalışma Karadeniz ve Marmara Denizi gibi iç denizleri kapsamamaktadır. CMIP5 GCM'lerinden kırk iki modelin rüzgâr alanları, Avrupa bölgesi için istatistiksel olarak ölçek indirgeme tekniği kullanılarak daha yüksek çözünürlüklü hale getirilmiştir. Dalga simülasyonları için WW3 dalga modeli (Tolman, 2014) kullanılmıştır. GCM'ler ile elde edilen dalga iklimi simülasyonlarının mevcut dalga iklimi değerlendirmesi için CFSR rüzgâr alanları ile çalıştırılan dalga simülasyonları kullanılmıştır. Performans değerlendirmesi yeterli görülen GCM'ler ile çoklu dalga iklimi modeli kurularak üç gelecek dönemi (2010-2039, 2040-2069 ve 2070-2099) için üç farklı senaryo (RCP2.6, RCP4.5 ve RCP8.5) ile dalga iklimi projeksiyonları sunulmuştur. Avrupa Atlantik bölgesinde 21. Yy sonunda dalga yüksekliği ve dalga periyodu için genel bir düşüş öngörülmüştür. Güney Avrupa kıyılarında 2070-2099 periyodu için RCP8.5 senaryosuna göre belirgin dalga yüksekliği ortalamalarında 10 cm civarında azalma olacağı tahmin edilmiştir.

Rüzgar ve dalga iklimi açısından çok enerjik olan İrlanda'nın gelecek dalga iklimi için ve Kuzey Atlantik Okyanusu yüzey rüzgarları için gelecek projeksiyonları sunan çalışma Gallagher vd. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. EC-Earth CMIP5 küresel iklim modellerinin rüzgarları ve bu rüzgarlarla çalıştırılmış WW3 dalga simülasyonları 1980-2009 periyodunda ve RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayalı olarak 2070-2099 gelecek dönemi için elde edilmiştir. ERA-Interim rüzgarları ile çalıştırılan dalga modeli şamandıra dalga ölçümleri ile doğrulaması yapılarak, aynı model EC-Earth rüzgâr alanları ile kullanılmıştır. Rüzgâr hızlarının ortalamaları ve dalga simülasyonları sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliklerinin ortalamaları belirlenen gelecek ve tarihsel dönem için rölatif farklar bulunarak öngörülen değişiklikler incelenmiştir.

Öngörülerin sonuçlarına göre, Kuzey Atlantik Okyanusu'nda rüzgâr hızları, RCP4.5 senaryosuna göre %2'lere ulaşan, RCP8.5 senaryosuna göre ise %3,5'lere ulaşan belirgin azalışlar göstermektedir. İrlanda genelinde yıllık ve mevsimlik dalga yüksekliği ortalamalarında, RCP8.5 senaryosuna göre belirgin azalışlar öngörülmekteyken; RCP4.5 senaryosuna göre öngörülen azalışların derecesinin nispeten daha az olması beklenmektedir.

Atlantik Okyanusu'nun Avrupa bölgesi için tarihsel ve gelecek dalga iklimi Bricheno & Wolf (2018) çalışmasında değerlendirilmiştir. RCP4.5 ve RCP8.5 gelecek emisyon senaryoları altında, Avrupa Atlantik kıyılarındaki 2100 yılına kadar dalga koşullarının projeksiyonları elde edilerek ayrıntılı analizi yapılmıştır. Bölgesel dalga iklimi hem küresel EC-Earth rüzgâr alanları hem de EUR-11 ICHEC-EC-Earth bölgesel rüzgar alanları ile yürütülmüş WW3 simülasyonları ile elde edilmiştir. Dalga modeli doğrulaması için, ERA-Interim rüzgarları ile 1979-2015 döneminde tarihsel dönem dalga simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçları yirmi üç yerinde ölçüm veri setleri (belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga yönü, pik periyot) ile kıyaslanmıştır. Bu doğrulama sonrasında 1970-2005 mevcut iklim dönemi ve 2006-2100 gelecek iklim simülasyonları değerlendirmesine geçilmiştir. Öncelikle mevcut dalga ikliminde EC-Earth iklim simülasyonlarının güvenilirliği, 1970-1999 döneminde mevcut olan ve dalga modeli doğrulamasında da kullanılan şamandıra veri setleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, ERA-Interim rüzgarları ile gerçekleştirilen dalga simülasyonlarının 1975-2004 dönemi ortalamaları ile EC-Earth dalga simülasyonlarının 1980-2009 ortalamaları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerden sonra, EC-Earth tarihsel iklim koşullarının, ERA-Interim simülasyonları kadar iyi olduğu kanaatine varılarak, gelecek projeksiyonlarının sunumuna geçilmiştir. Gelecek tahminlerini değerlendirmek için, yakın geçmişi (1970–1999), yüzyıl ortasını (2030–2059) ve yüzyılın sonunu (2070–2099) kapsayacak şekilde zaman dilimleri seçilmiştir. Yakın geçmişe kıyasla, yüzyıl ortası ve yüzyılın sonu yıllık ve mevsimlik ortalamaların farkları iki farklı senaryo ile alansal olarak elde edilmiştir. Avrupa kıyıları boyunca belirli aralıklarla noktasal olarak ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin ve yıllık en büyük dalga yüksekliklerinin değişimleri incelenmiştir. Tarihsel ortalamalarla gelecek projeksiyonların belirgin dalga yüksekliklerinin %99'luk dilimdeki değerleri saçılım diyagramları ile değerlendirilmiştir.

Yine tarihsel ve gelecek projeksiyonların aşırı dalga yüksekliklerinin tekerrür değerleri genelleştirilmiş aşırı değerler (GEV) olasılık yoğunluk fonksiyonları ile kıyaslanmıştır. Bu değerlendirmelerin sonuçlarına göre, Avrupa kıyılarının çoğunda belirgin dalga yüksekliği ortalamalarında 0,2 m düzeyinde bir azalma öngörülmektedir. Yıllık en büyük ve %99'luk dilimdeki dalga yüksekliğinde 0,5–1 m'ye varan artışlar beklenmektedir. Aşırı dalga yüksekliklerindeki olasılık yoğunluk fonksiyonunun genişlemesi gözlemlenmiştir, bu da gelecekte nadir görülen yüksek dalga olaylarının yoğunluğunun artabileceğini göstermektedir. Ortalama değerlerdeki azalış beklentilerinin güvenilirliği istatistiksel olarak yüksek bulunmuştur. Aşırı dalgalarda meydana gelebilecek değişikliklerin güven aralığı daha geniş yani belirsizlikler daha yüksek görülmüştür.

Bölgesel rüzgar ve dalga iklimi projeksiyonları sunan bir başka çalışmada (Kamranzad & Mori, 2019) Hindistan Okyanusu'nu kapsayan Japonya Meteoroloji Araştırma Enstitüsü'nün yüksek çözünürlüklü MRI-AGCM3.2S küresel iklim modeli kullanılmıştır. İklim modeli küresel ölçekte olmasına rağmen, 20 km yatay çözünürlüğe sahiptir ve zamansal çözünürlüğü 1 saattir. Dalgalar, SWAN sayısal modeli ile benzeştirilmiştir. Dalga modelinin doğrulaması için JRA-55 rüzgâr alanları ile elde edilen dalgalar, uydu ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Aynı uydu ölçümleri ile Mori vd. (2015) çalışmasında kullanılan WW3 dalga model sonuçlarının kıyaslaması da SWAN dalga modeli sonuçlarını irdelemek için kullanılmıştır. Dalga karakteristikleri, tarihsel süreçte ve gelecek için 25'er yıllık periyotlar halinde üretilmiştir ve gelecek simülasyonları RCP8.5 senaryosuna dayalı olarak üretilmiştir. Rüzgâr hızı, belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodunun yıllık ve mevsimlik ortalamalarının öngörülen gelecek değişimleri incelenmiştir. Güney Hindistan Okyanusu'ndan gelen soluğan dalgaların baskınlığı nedeniyle, rüzgâr hızlarındaki rölatif değişime göre dalga yüksekliklerindeki değişimin daha az olacağı beklenmektedir. Ortalama dalga periyotlarında önemli bir değişiklik öngörülmemiştir. Kuzey Hindistan Okyanusu'na göre Güney Hindistan Okyanusu'nda daha istikrarlı bir genel iklim karakteristiği beklenmektedir.

Karadeniz'deki dalga gücü kaynaklarının yakın gelecekte (2021-2050) iklim değişikliği etkisindeki değişimlerinin değerlendirildiği çalışma Rusu (2019b) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dalgalar, EURO-CORDEX veri tabanından İsveç Meteoroloji ve

Hidroloji Enstitüsü (SMHI) tarafından üretilmiş RCM rüzgâr alanları (ICHEC-EC-Earth) ile yürütülen SWAN spektral dalga modeli kullanılarak benzeştirilmiştir. Simülasyonların ilk seti tarihsel dönem (1976-2005) için gerçekleştirilmiştir. Diğer simülasyonlar 2012-2050 zaman dilimi için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayalı olan iki farklı set olarak yürütülmüştür. Tarihsel dönem dalga simülasyonları Karadeniz'in mevcut dalga iklimini temsil etme kabiliyeti değerlendirilmeksizin, gelecek dönemdeki değişimleri tespit etmek için kullanılmıştır. Öncelikle, iki senaryonun simülasyonlarının gelecek dönem dalga gücü ortalamaları yıllık ve mevsimlik olarak elde edilmiştir. Daha sonra bu gelecek dalga gücü ortalamalarının, tarihsel dönem ortalamalarına kıyasla farkları çıkartılmıştır. Sonuçlar, Karadeniz'in hemen hemen tüm batı kesiminde ve ayrıca kuzeybatı kesiminde, RCP4.5 senaryosu kapsamında, ortalama dalga gücü için, 0,05 ile 0,18 kW/m aralığında (%5-%16 oranında) bir artış beklentisi olduğunu göstermektedir. Kuzeydoğu bölgesinde artış öngörüsü RCP8.5 kapsamında RCP4.5 senaryosu için beklenen artışın iki katı olarak bulunmuştur.

21. Yüzyılın sonuna kadar olan dönem boyunca Karadeniz dalga gücü ortalamalarının gelecek tahminleri Rusu (2020) çalışmasında sunulmuştur. Dalga simülasyonları EC-Earth rüzgarları ile yürütülen SWAN dalga modeli ile gerçekleştirilmiştir. Dalga simülasyonlarının mevcut dönem dalga iklimi, altimetre gözlemleri ve ERA5 veri seti ile değerlendirilmiştir. ERA5 ve altimetre verilerinin ortak kapsadığı zaman diliminde (1992-2005), açık deniz üzerinde seçilen on noktadaki aylık H_{m0} ortalamaları ile tarihsel dalga simülasyonları kıyaslanmıştır. Aylık ortalamalar için dalga simülasyonlarının, altimetre dalga yüksekliklerine kıyasla düşük tahmini söz konusu olmuştur. İlk altı aylık dalga simülasyonlarının ortalamalarının, ERA5 ortalamalarına kıyasla daha yüksek olduğu gözlenirken, ikinci altı aylık ortalamalarda yüksek bir uyum gözlenmiştir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda, RCM rüzgarları ile yürütülen SWAN dalga simülasyonlarının Karadeniz'in mevcut dalga iklimini güvenilir bir şekilde temsil edebileceği sonucuna varılmıştır. Sonrasında ise, uzak gelecek olarak isimlendirilen 2071-2100 dönemi için, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayalı olarak dalga gücü ortalamaları ve rölatif değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, Rusu (2019b) çalışmasında elde edilen ve yakın gelecek olarak isimlendirilen 2021-2050 dönemi ortalamaları da gelecek projeksiyonlarının kıyaslanmasına dahil edilmiştir. Uzak gelecekte, Karadeniz'in güney

kesimlerinde RCP8.5 senaryosu ile elde edilen dalga gücü ortalamaları RCP4.5 ortalamalarından 0,3 kW/m civarında yüksek olacağı beklenmektedir. Karadeniz'in kuzey doğu kesimlerinde ise RCP4.5 simülasyonlarının ortalamalarının RCP8.5 simülasyonlarının ortalamalarından yaklaşık 0,4 kW/m kadar fazla olacağı öngörülmüştür. İki gelecek senaryosu simülasyonları için, her iki gelecek zaman dilimi için de mevsimlik ortalamaların mevcut iklim dönemine göre farklarının daha belirgin olacağı öngörülmüştür. Uzak gelecek için, ortalama dalga gücündeki değişimler, küçük bölgelerdeki artışların beklendiği kış ve ilkbahar hariç, her iki senaryo için de düşüşlerle karakterize edilmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde, gelecekte rüzgâr hızlarında siklonik formların beklendiği, ve bunun sonucu olarak belirgin dalga yüksekliklerinin (ve ayrıca dalga gücünün) gelecek tahminlerinin geçmişe göre daha düşük değerlere işaret ettiği bildirilmiştir. Buna sebep olarak, siklonik rüzgarların dalga gelişimini etkileyen feç mesafesini limitlemesi olarak gösterilmiştir.

Karadeniz'de dalga iklimi değerlendirmesinin yapıldığı Aydoğan vd. (2021) çalışmasında, 21. Yüzyıl'da olası dalga gücü değişimleri analiz edilmiştir. Çalışmada NOAA'nın Jeofizik Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı tarafından üretilen iki CMIP5 küresel iklim modelinin rüzgâr simülasyonları kullanılmıştır. Kaba çözünürlüklü olan küresel rüzgâr simülasyonları, ölçek indirgeme yöntemi ile enlem ve boylamda 0,25° çözünürlüğü olan bölgesel rüzgar alanları elde edilmiştir. Bu rüzgâr alanlarının girdi olarak verildiği SWAN spektral dalga modeli ile dalga simülasyonları yürütülmüştür. Gelecek dalga gücü tahminleri sunulmadan önce dalga simülasyonları Karadeniz'de mevcut dalga ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Sinop, Hopa ve Gelendzhik şamandıralarında kaydedilen dalga yüksekliği verilerinin ölçüm periyotları ile eşleşen zaman dilimindeki dalga simülasyonlarının dalga yükseklikleri histogramlar ve Q-Q diyagramları ile değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeye göre, dalga simülasyonları ve şamandıra ölçümleri arasında genel bir uyum olduğu kanaatine varılmıştır. Fark olarak, Sinop'ta dalga simülasyonlarından biri yüksek yüzdelik dilimlerde biraz yüksek tahmin vermiştir. Gelendzhik'te en yüksek yüzdelik dilimdeki düşük tahmin dışında, her iki dalga simülasyonu için ölçümlerle güzel bir uyum söz konusu olmuştur. Hopa'da ise yüksek yüzdelik dilimlere gidildikçe derecesi artan bir düşük tahmin eğilimi her iki dalga simülasyonu için de gözlenmiştir. Gelecek simülasyonlarında iki model için de RCP4.5

ve RCP8.5 senaryoları tercih edilmiştir. 2020 yılından 2100 yılına kadar, yirmişer yıllık periyotlarla, tarihsel dalga gücü ortalamalarına kıyasla gelecek dalga gücü ortalamalarının değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, havzadaki ortalama dalga gücü 4 kW/m civarında dalgalanmaktadır ve havzadaki maksimum dalga güçleri 20 kW/m'ye bile ulaşabilmektedir. Havzada farklı modeller ve RCP senaryoları için hem artan hem de azalan dalga gücü gösteren alanlar mevcut olmasına rağmen, geleceğe yönelik tahminler dalga gücünün mekânsal dağılımında belirgin bir değişiklik beklenmediğini göstermektedir. Yüzyılın sonunda, tarihsel dönem için havza ortalamalı farklar +0,14 kW/m ile 0,32 kW/m arasında değişmektedir. Mevsimsel değişkenliğin yüksek olduğu gösterilmiştir. Tüm model ve senaryolar göz önüne alındığında, havza ortalama dalga gücünde %20'ye varan düşüşle en büyük değişimi bahar mevsimi ortalamaları göstermiştir.

Karadeniz dalga iklimi projeksiyonları için en güncel yayınlanan çalışmada (Islek vd., 2022b), yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) olarak tanımlanan dönemler için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına dayalı gelecek dalga iklimi sunulmuştur. Çalışmada beş RCA4 RCM rüzgâr alanları kullanılmış ve öngörülen değişiklikler, tarihsel dönemde en iyi performansı gösteren dalga simülasyonu (EC-Earth) ile analiz edilmiştir. Dalga simülasyonları MIKE21 modeli ile gerçekleştirilmiştir. Tarihsel dönem dalga simülasyonları (1970-2005), Karadeniz'de bulunan beş yerinde ölçüm verisi ile histogramlar ve çeyreklik dilimlerdeki dağılımları incelenerek değerlendirilmiştir. Gelecek değişimleri, iki farklı gelecek dönem ortalama dalga karakteristiklerinin tarihsel dönem ortalamaları ile doğrudan farkları alınarak incelenmiştir. Farkların istatistiksel olarak belirginlikleri %75 ve üzeri güven aralıkları için standart t-testi ile belirlenmiştir. RCP8.5 senaryosu ile orta gelecek için öngörülen değişikliklerin RCP4.5 senaryosundaki değişikliklerden daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır. RCP8.5 senaryosuna dayalı olarak 2061-2100 dönemi için elde edilen ortalamalarda aşağı yönlü eğilimler tespit edilmiştir. Bu eğilimlerin, özellikle Karadeniz'in doğusunda RCP4.5 senaryosunda görülen azalış eğilimlerine kıyasla daha şiddetli olabileceği beklenmektedir. Buna ek olarak, aşırı dalga yükseklikleri (100 yıllık dönüş periyodu dalga yükseklikleri) değişikliklerin %25'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. Karadeniz'de gelecekteki dalga iklimi projeksiyonlarını sunmak için kullandıkları rüzgar alanlarının değişimi de bir başka çalışmada (Islek vd., 2022a) sunulmuştur. Araştırmacılar ilk olarak beş RCM rüzgâr

alanının tarihsel iklimini yerinde ölçüm veri seti, ERA5 ve CFSR yeniden analizleri ile değerlendirmiş ve daha sonra en iyi performans gösteren rüzgâr modeli ile gelecekteki rüzgar projeksiyonlarını sunmuşlardır. Ortalama rüzgâr hızlarının 2061-2100 yılları arasında havza genelinde azalmasının beklendiği, ancak RCP8.5 senaryosuna göre 100 yıllık dönüş döneminde %7 ila %20 oranında artacağı sonucuna varmışlardır.

Gelecek dalga iklimi değişimlerini konu edinen çalışmalar özet halinde verilmiştir. Kaba çözünürlüklü GCM'ler ile gerçekleştirilen küresel dalga iklimi çalışmalarında, Karadeniz gibi bölgesel karakteristikleri olan denizlerin gelecek dalga iklimi hakkında çıkarım yapılabilecek yeterli veri bulunmamaktadır. Karadeniz'i su havzası olarak gören küresel çalışmalarda çözünürlük yeterli olmadığı için, bütün havzayı birkaç sayısal ağ hücresi ile temsil eden model sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlardan tüm havzayı temsil eden sağlıklı veri almak mümkün olmamaktadır. Hatta çoğu çalışmada, Karadeniz karasal bölge olarak değerlendirilerek, dalga iklimi namına veri sunulmamaktadır. Karadeniz için yapılan sınırlı sayıdaki dalga iklimi çalışmalarında ise, birden fazla iklim modeli kullanılsa bile, tarihsel dönem dalga iklimi performansı daha iyi bulunan tek bir model ile gelecek dalga iklimi değişimleri sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında, sekiz farklı iklim modeli, kapsamlı bir mevcut dalga iklimi değerlendirmesine tabi tutulduktan sonra, kurulan topluluk modeli ile Karadeniz'in gelecek dalga iklimi tahminleri sunulmuştur. Farklı iklim modelleri ile çalıştırılan dalga simülasyonlarını içeren topluluk, daha geniş bir belirsizlik skalasını kapsamaktadır. Bu sayede, Karadeniz için güvenilir ve güçlü bir gelecek dalga iklimi tahmini sunma noktasında katkı sağlandığı düşünülmektedir.

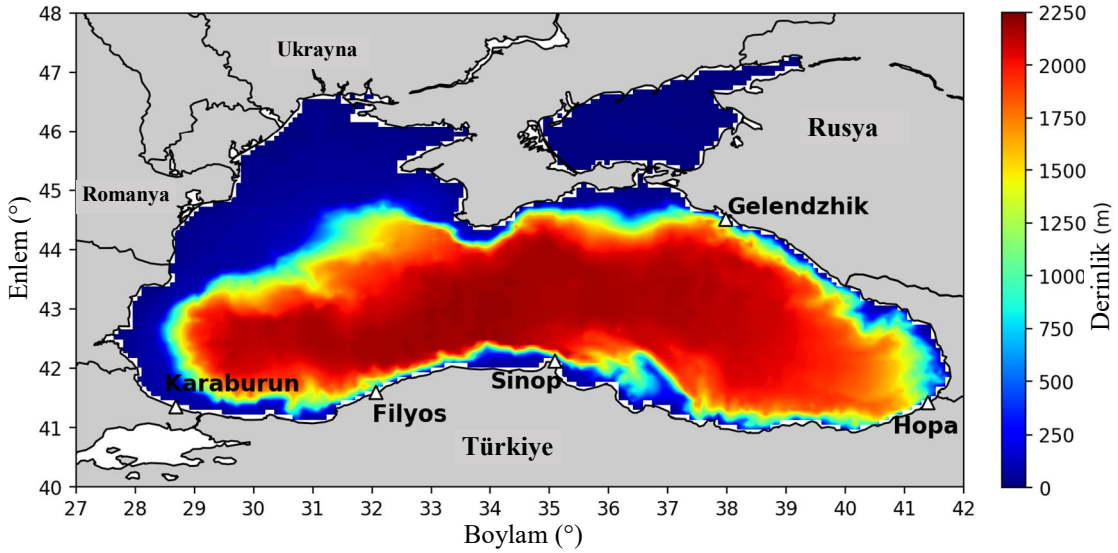
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma bölgesi, mevcut dönem rüzgâr ve dalga iklimi değerlendirmesi ve gelecek rüzgâr ve dalga iklimi tahmini için kullanılan bölgesel rüzgâr iklim model verileri ve bu veriler kullanılarak gerçekleştirilen dalga simülasyonları tanıtılmaktadır. Mevcut dönem dalga iklimi değerlendirmelerinde kıyaslama verisi olarak kullanılan Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) tarafından sunulan en güncel veri seti ERA5 hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca, Karadeniz'de mevcut bulunan ve iklim modellerinin mevcut dalga iklimi (historical) periyodunu kapsayan dönemdeki şamandıra ölçümleri izah edilmektedir. Mevcut dönem rüzgâr ve dalga iklimi değerlendirmeleri ve gelecek rüzgâr ve dalga iklimi tahminleri için kullanılan yöntemler açıklanmaktadır.

3.1. Çalışma Bölgesi

Karadeniz, kuzeyde Kerç Boğazı ile Azak Denizi ve güneybatıda İstanbul Boğazı ile Marmara Denizi ve devamında Ege Denizi ile bağlantılı, Atlantik Okyanusu'nun uzantısı olan, Avrupa ve Asya levhaları arasında yer alan yarı kapalı bir havzadır. 41°- 47° kuzey enlemleri ve 27.5°- 41.8° doğu boylamları arasında yer almaktadır. Azak Denizi ile birlikte yaklaşık 460 bin km^2'lik bir alan kaplamaktadır. Kıyı şeridinin uzunluğu toplamda 4900 km civarındadır. Merkezi bölgelerde derinlikler 2200 metreyi aşmakta, ancak batı ve kuzey batı bölgelerinde yaklaşık 200 m derinliğe sahip nispeten geniş bir kıta sahanlığı bulunmaktadır. Karadeniz'in harita üzerinde konumu, dalga modelinde kullanılan batimetri haritası ile birlikte, çalışmada kullanılan dalga ölçümlerinin alındığı lokasyonlar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Karadeniz'in özellikle doğu bölgelerindeki sarp topoğrafya nedeniyle yoğun orografik etkilere maruz kalan bir havzadır. Doğusunda Kafkas Dağları, güney doğusunda sıradağlar halinde Pontidler, kuzeyinde Kırım Dağları ve batısında daha ılımlı yapıya sahip Balkan Dağları bulunmaktadır. Bu karmaşık orografik yapısıyla Karadeniz havzası, doğuda Sibirya Antisiklonu ve batıda Azor Antisiklonu ile, değişken iklimsel ve atmosferik dolaşım koşullarına sahiptir (Islek vd., 2022a).



Şekil 3.1. Karadeniz'in konumu, batimetrisi ve kullanılan ölçüm lokasyonları

3.2. Veri Kaynakları

Bu alt başlıkta dalga simülasyonlarında girdi olarak kullanılan bölgesel rüzgâr modelleri, mevcut dönem dalga iklimini kıyaslamak ve değerlendirmek için kullanılan ERA5 veri seti ve Karadeniz'de farklı periyotlarda yerinde dalga yüksekliği ölçümü olan şamandıra verileri ve uydu altimetre dalga yüksekliği gözlemleri tanıtılmaktadır.

3.2.1. EURO-CORDEX iklim modelleri

Küresel ölçekte atmosferin ve/veya okyanusun genel dolaşımını (sirkülasyonu) ifade eden GCM'lerin dinamik ve ampirik-istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri (Frey-Buness vd., 1995) ile bölgesel ölçekte üretilmiş yüksek çözünürlüklü iklim modelleri, Bölgesel İklim Modelleri (Regional Climate Models – RCM) olarak bilinmektedir. Dünya İklim Araştırma Programı (WRCP) tarafından desteklenen CORDEX girişimi dünya çapındaki tüm kara bölgeleri için gelişmiş bölgesel iklim değişikliği projeksiyonları üreten ve bünyesinde uluslararası birçok enstitü ve çalışma grubunu barındıran bir koordinasyondur. Bu koordinasyonun Avrupa Bölgesi için iklim modelleri sunan kolu da EURO-CORDEX olarak isimlendirilmektedir. EURO-CORDEX RCM

deneylerine otuz altı çalışma grubu katkı sağlamaktadır. EURO-CORDEX RCM simülasyonları, CMIP5 küresel iklim modellerinden bölgesel dinamik ölçek indirgeme deneyleri ile elde edilen bölgesel iklim modelleridir. Dinamik ölçek indirgeme deneyi, kaba çözünürlüklü GCM'lerden alınan sınır koşulları ile, bölgesel modellerin, bütün coğrafik yapılarla beraber model alanındaki atmosferik süreçleri yüksek doğrulukla oluşturmasını gerektiren bir uygulamadır (Vautard vd., 2013). CORDEX girişiminin bölgesel iklim modellerini üretirken dinamik ölçek indirgeme için kullandığı yöntemler, teknik konular ve bölgesel iklim projeksiyonlarındaki belirsizlikler ile ilgili ayrıntılı bilgi Giorgi & Gutowski (2015) çalışmasında bulunmaktadır.

Mevcut dalga iklimi değerlendirmeleri ve gelecek dalga iklimi projeksiyonları için gerekli olan dalga simülasyonları, deniz üzerinde 10 metre yükseklikteki rüzgarlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, bölgesel iklim modellerinden sadece rüzgâr alanları temin edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan sekiz rüzgâr alanı da EURO-CORDEX ürünü olan RCM'lerdir. EURO-CORDEX bölgesel iklim modellerini 0,44° (~50 km) ve 0,11° (~12,5 km) olmak üzere iki farklı çözünürlükte sunmaktadır. Karadeniz, karasal alanlarla çevrili bir iç deniz olması sebebiyle, daha yüksek çözünürlüklü rüzgâr alanlarının kullanılmasının dalga simülasyonlarının doğruluğuna katkı sağlayacağı düşünülerek 0,11° çözünürlüğe sahip RCM'ler temin edilmiştir. EURO-CORDEX bu çözünürlükte bölgesel iklim modelleri için EUR-11 kısaltmasını kullanmaktadır. Rüzgâr alanlarının zamansal çözünürlükleri 6 saattir.

Bölgesel rüzgâr alanlarının türetildiği küresel iklim modelleri ile ilgili temel kavramlar Kuramsal Temeller başlığı altında bulunmaktadır. Bölgesel iklim modelleri de küresel iklim modellerine benzer iklim modelleme kuramlarını barındırmaktadır. Burada, o bölümde detayları verilmeyen, iklim modellerinin gelecek öngörülerinin dayalı olduğu senaryoları tanımlamıştır. CMIP5 deneyleri ile üretilmiş iklim modellerinin 2005 yılı ve öncesini kapsayan simülasyonları tarihsel (mevcut) iklimi (historical/present simulations) ve 2005 yılından sonraki dönem simülasyonları ise gelecek iklim öngörülerini (future/RCP simulations) temsil etmektedir. Tez çalışmasında dalga simülasyonları için rüzgâr alanları temin edildiği için rüzgâr verilerinden bahsedilirken, mevcut rüzgâr alanları, mevcut rüzgâr iklimi veya mevcut rüzgar simülasyonları tabirlerinin hepsi 2005

yılı ve öncesi rüzgar verilerini temsil etmektedir. Yine dalga verileri için, mevcut dalga simülasyonları, mevcut dalga iklimi tabirleri 2005 yılı ve öncesini ifade etmektedir. 2005 yılından sonraki veriler ise gelecek simülasyonları (veya iklimi), gelecek öngörüleri (projeksiyonları) veya RCP simülasyonları olarak ifade edilmektedir.

IPCC Beşinci Değerlendirme Raporu (AR5) ile tanıtılan CMIP5 deneylerinin gelecek simülasyonlarının dayalı olduğu RCP senaryoları Temsili Konsantrasyon senaryoları olarak tabir edilmektedir. AR5 ile sunulan CMIP5 iklim modellerinin gelecek iklim senaryoları Moss vd., (2010) çalışması ile tanıtılmıştır ve tanımlı bütün gelecek senaryoları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Çizelgede görüldüğü üzere, senaryolar hem ışınımsal zorlama hem de sera gazı konsantrasyonu etkisine dayalı olarak oluşturulmuştur ancak, ışınımsal zorlama değerlerine göre isimlendirilmiştir. RCP2.6 senaryosu, 2100 yılına kadar ışınımsal zorlamanın (radyasyon) yaklaşık 3 W/m^2 değerini göreceği, sonrasında azalışa geçeceği ve toplam sera gazı miktarının da yaklaşık 490 ppmv eşdeğer CO_2 seviyesini göreceği, sonrasında azalışa geçeceği öngörüsüne dayanmaktadır.

Çizelge 3.1. CMIP5 iklim modellerinin dayalı olduğu gelecek senaryoları (Moss vd., 2010)

senaryo	ışınımsal zorlama	konsantrasyon	rota
RCP8.5	2100'de >8,5 W/m^2	>1370 ppmv CO_2 eşdeğeri	yükselen
RCP6.0	2100'den sonra kararlı olarak ~6 W/m^2	2100'den sonra kararlı olarak ~850 ppmv CO_2 eşdeğeri	limit değerde kararlı
RCP4.5	2100'den sonra kararlı olarak ~4,5 W/m^2	2100'den sonra kararlı olarak ~650 ppmv CO_2 eşdeğeri	limit değerde kararlı
RCP2.6	2100'de en fazla ~3 W/m^2 sonra azalış	2100'de en fazla ~490 ppmv CO_2 eşdeğeri	tepe değer ve düşüş

İklim değişikliği etkisini daha ılımlı öngören RCP4.5 ve RCP6.0 senaryoları, ışınımsal zorlama ve sera gazı miktarları 2100 yılında belli bir limit değere ulaştıktan sonra kararlı bir şekilde seyredeceği öngörüsüne göre oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında kullanılan rüzgâr alanlarının gelecek simülasyonlarının dayalı olduğu RCP8.5 senaryosunda ise, ışınımsal zorlama değerinin 2100 yılına kadar sürekli artış göstererek 8,5 W/m^2 değerinin üzerini göreceği öngörülmektedir. Benzer şekilde toplam sera gazı miktarı da sürekli artış halinde 1370 ppmv eşdeğer CO_2 seviyesinin üzerine çıkacağı öngörüsüne dayanmaktadır.

RCP8.5, ışınımsal zorlama ve sera gazı miktarı bakımından sürekli artış gösteren bir senaryo olarak kurgulandığı için rota tanımı ‘yükselen (rising)’ şeklinde tabir edilmektedir.

EURO-CORDEX veri tabanından temin edilen bölgesel rüzgâr alanları ve kaynakları Çizelge 3.2’de sunulmaktadır. Çizelgede bölgesel iklim modelinin hangi GCM’den türetildiği, hangi bölgesel modelleme grubuna ait olduğu ve GCM modelini üreten enstitü gibi bilgiler özetlenmiştir. Çizelgede gösterildiği gibi, bölgesel rüzgâr alanlarından yedi tanesi Rossby Merkezi Bölgesel Atmosferik İklim Modeli (RCA versiyon 4), bir tanesi (TN-7) GERICS (İklim Servis Merkezi Almanya) bünyesindeki REMO bölgesel modeline aittir. İklim modellerinin mevcut iklim simülasyonlarının başlangıç yılları farklı olabilse de bütün modellerdeki ortak yılları kapsayacak şekilde 1970-2005 periyodunda verileri temin edilmiştir. Gelecek iklim simülasyonları 2006 yılından 2100 yılına kadar olan dönemi kapsamaktadır. Yalnızca HadGEM2-ES iklim modelinde 2100 yılı verisi bulunmadığı için 2099 yılı sonuna kadar ulaşılabilen veriler temin edilmiştir. İklim modelleri, zamana bağlı verilerini farklı takvim sistemlerini temel alarak sunmaktadırlar. Her iklim modelinin temel aldığı takvim sistemi Çizelge 3.2’de belirtilmektedir. Bütün modellerin gelecek simülasyonları iklim değişikliği en kötümser şekilde etkisi olacağını öngören RCP8.5 senaryosuna dayalıdır. EUR-11 etki alanı bölgesel iklim modelleri ile ilgili daha fazla ayrıntı ve veri temini için yönlendirmeler CORDEX web sitesinde (CORDEX, 2022) bulunmaktadır. EURO-CORDEX bölgesel iklim modellerinin tamamının ilgili GCM’lerden ölçek indirgemesi ile elde edilmesi süreci ile ilgili tüm teknik ve fiziksel detaylar Jacob vd., (2014) ve Kotlarski vd., (2014) çalışmalarında bahsedilmektedir.

Çizelge 3.2. Tez çalışmasında kullanılan bölgesel rüzgâr iklim modellerinin kaynakları

GCM simülasyonu	Topluluk üye numarası	RCM grubu	Tarihsel iklim simülasyonları	Gelecek iklim simülasyonları	Takvim sistemi	Gelecek senaryosu	GCM enstitüsü
IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	TN-1	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	365-gün	RCP8.5	IPSL
CNRM-CM5_r1i1p1	TN-2	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	standart	RCP8.5	CNRM
EC-EARTH_r3i1p1	TN-3	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	standart	RCP8.5	ICHEC
EC-EARTH_r12i1p1	TN-4	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	standart	RCP8.5	ICHEC
MPI-ESM-LR_r1i1p1	TN-5	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	proleptic-gregorian	RCP8.5	MPI-M
HadGEM2-ES_r1i1p1	TN-6	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2099	360-gün	RCP8.5	MOHC
NorESM1-M_r1i1p1	TN-7	GERICS-REMO2015	1950-2005	2006-2100	proleptic-gregorian	RCP8.5	NCC
NorESM1-M_r1i1p1	TN-8	SMHI-RCA4	1970-2005	2006-2100	365-gün	RCP8.5	NCC

3.2.2. Dalga simülasyonları

Dalga simülasyonları, üçüncü nesil SWAN (Simulating Waves Nearshore) spectral dalga tahmin modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SWAN, dalgaları, modele tanımlanan batimetri ve rüzgâr koşulları altında benzeştirebilen, en gelişmiş sayısal dalga tahmin modellerinden biridir. Mevcut literatürde, SWAN kullanarak dalga tahmini modelini, gerek dünyanın çeşitli deniz ve okyanusları için (Amarouche vd., 2019; Huang vd., 2013; Iglesias vd., 2009; Kutupoğlu vd., 2018; Liang vd., 2019; Lin vd., 2019; Pallares vd., 2014; Rusu & Guedes Soares, 2012), gerekse de bu tezin çalışma alanı olan Karadeniz için (Akpinar vd., 2012; Akpinar & Ponce de León, 2016; Akpınar vd., 2016, 2017; Akpınar & Bingölbali, 2016; Arkhipkin vd., 2014; Aydoğan & Ayat, 2021; Lin-Ye vd., 2018; Rusu, 2015, 2019a; Van Vledder & Akpinar, 2015) sunan çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada SWAN modelin 41.20AB versiyonu kullanılmıştır. Model, rüzgâr kaynaklı dalga ve soluğan (swell) oluşumunu, gelişimini ve dış etkiler altında değişimini, açık deniz ve yakın kıyı bölgeleri için benzeştirmektedir. SWAN modelde dalgalar, iki boyutlu dalga hareket yoğunluk spektrumu ile tanımlanmaktadır (Booij vd., 1999). Hareket yoğunluk spektrumu $N(\sigma, \Theta)$, enerji yoğunluk spektrumu $E(\sigma, \Theta)$ yerine dikkate alınmaktadır. Çünkü, çevresel akımların varlığında, enerji yoğunluğu korunmazken, hareket yoğunluğu korunmaktadır (Whitham, 1974). Bağımsız değişkenlerden σ, rölatif frekansı, Θ ise dalga yönünü göstermektedir. Dalga hareket yoğunluğu, enerji yoğunluğunun rölatif frekansa bölünmesi ile elde edilir ($N(\sigma, \Theta) = E(\sigma, \Theta)/\sigma$).

Model, dalga hareketi denge denklemine dayalı olarak, dalga parametrelerini gerçekçi bir şekilde tahmin edebilmektedir (SWAN, 2018). Dalga spektrumunun gelişimi, kartezyen koordinatlarda spektral hareket denge denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \tag{3.1}$$

ile tanımlanmaktadır (Hasselmann vd., 1973). Denklemin sol tarafındaki ilk terim, hareket yoğunluğunun zamanla değişimini, ikinci ve üçüncü terimler, hareketin coğrafik alanında (x,y) c_x ve c_y hızlarıyla yayılmasını, dördüncü terim, derinlik ve akıntılara bağlı olarak rölatif frekansındaki kaymayı (σ alanında c_σ hızıyla), beşinci terim ise, derinlik ve akıntı kaynaklı sapmayı (refraction; Θ alanında c_Θ yayılma hızıyla) temsil etmektedir (Ris vd., 1999). Denklemin sağ tarafındaki enerji yoğunluğu cinsinden S, rüzgar girdisi kaynaklı dalga üretimi (S_{inp}), derinlik etkisi kaynaklı dalga kırılması nedeniyle enerji dağılması (S_{brk}), taban sürtünmesi nedeniyle enerji kaybı (S_{frc}), köpüklenme kaynaklı enerji kaybı (S_{wcp}) ve lineer olmayan dalga-dalga etkileşimlerini (S_{nl3}, S_{nl4}) içeren kaynak terimini ifade etmektedir (Rogers vd., 2003). Bu süreçle ilgili formülasyonlar ve detaylı açıklamalar SWAN (2018)'de bulunmaktadır. SWAN dalga modelinin fiziği, tanımlı tüm formülasyonlar ve süreçlerin açıklamaları, dalga modellemesi üzerine odaklanılmış Van Der Westhuysen (2002) ve Akpınar (2012) tez çalışmalarında bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, SWAN dalga modeli CMIP5 RCM rüzgâr alanları ile, durağan olmayan modda, küresel koordinat sisteminde çalıştırılmıştır. 27°D ve 42°D ve 40,5°K ve 47,5°K koordinatları arasında, enlem ve boylamda 0,08° (~ 8 km) çözünürlükte düzenli bir sayısal ağ sistemi oluşturulmuştur. Bu sayısal ağ sistemi yaklaşık 17 bin düğüm noktası içermektedir. Dalga spektrumu frekans alanında 0,04 Hz ile 1 Hz arasında logaritmik olarak 30 aralığa, yön alanında ise, 36 eşit aralığa bölünmüştür. Hesaplama zaman adımı 30 dakika ve her adımda dört iterasyon olacak şekilde ayarlanmıştır. Dalga parametrelerinin çıktıları da saatlik çözünürlükte olacak şekilde biriktirilmiştir. Yukarıda genel olarak değinilen dalga üremesinin ve bazı fiziksel süreçler sonucunda dalga enerjisi dağılması yoluyla enerji kayıplarının SWAN modelinde tanımlı olan formülasyonlar ve katsayılar SWAN kullanıcı el kitabında önerildiği şekilde alınmıştır ve bunlar Çizelge 3.3'de özetlenmiştir. Dalga simülasyonları için gerekli 0,0083° çözünürlüklü batimetri verisi, Okyanusların Genel Batimetrik Tablosu (GEBCO; General Bathymetric Chart of the Oceans) sisteminden temin edilmiştir (*GEBCO*, 2014). Çalışma bölgesinin derinliklerini gösteren batimetri haritası Şekil 3.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.3. Modelde mevcut fiziksel süreçlerin formülasyonları ve bunlarla ilişkili katsayılar

Fizik	Formülasyon	Katsayılar
Dalga gelişimi (lineer)	(Cavaleri & Rizzoli, 1981)	-
Dalga gelişimi (üstel)	(Snyder vd., 1981)	-
Köpüklenme	(Komen vd., 1984)	$C_{ds}=2,36\times10^{-5}$ $S_{PM}=3,02\times10^{-5}$ $\delta=1$
Dörtlü dalga-dalga etkileşimleri	(S. Hasselmann vd., 1985)	$\lambda=0,25$ $C_{n/4}=3\times10^{7}$ $C_{sh1}=5,5$ $C_{sh2}=0,8333$ $C_{sh3}=-1,25$
Üçlü dalga-dalga etkileşimleri	(Eldeberky, 1996)	$\alpha_{EB}=0,1$
Derinlik kaynaklı dalga kırılması	(Battjes & Janssen, 1978)	$\alpha_{BJ}=1,0$ $\gamma_{BJ}=0,73$
Taban sürtünmesi	(K. Hasselmann vd., 1973)	$C_{f\,JON}=0,038\ m^2s^{-3}$

3.2.3. ECMWF ERA5 dalga veri seti

ECMWF, küresel olarak hava tahminleri sağlayan araştırma enstitüsü ve aynı zamanda operasyonel servistir. ERA-40, ERA-20C ve ERA-Interim yeniden analiz veri setleri gibi örnekleri olan birçok iklim modeli üretilmiştir. Bir önceki model olan ERA-Interim yeniden analizinin yerini alan ERA5 (Hersbach vd., 2020) 1979 yılından günümüze küresel iklim ve hava verisi sağlayan beşinci nesil ECMWF yeniden analizidir. ECMWF'in en güncel yeniden analizi ERA5, ERA-Interim'e kıyasla birçok gelişme ile yayına sürülmüştür ki bunlardan en dikkat çekeni daha iyi alansal ve zamansal çözünürlüktür (Hoffmann vd., 2019). Okyanus dalgası için yaklaşık 40 km uzaysal çözünürlük ve 1 saatlik zamansal çözünürlük ile ERA-Interim'den (79 km uzaysal ve 6 saat zamansal çözünürlük) daha yüksek çözünürlüklü veri sağlamaktadır. ERA5 veri asimülasyonu WAM model ile Integrated Forecast System (IFS)'ye dayalı olarak yapılmaktadır (ECMWF). Ayrıca on bağımsız düşük çözünürlüklü 4D-Var asimilasyonları içeren EDA (Ensemble of Data Assimilations) sistemi ile analiz belirsizliklerini nicelleştirerek orta vadeli tahminleri iyileştirmektedir (Isaksen vd., 2010). ERA5 yeniden analizinin data asimülasyonu, diğer bütün teknik detayları ile ilgili daha geniş bilgi (Hersbach vd., 2020)'de bulunabilir.

ERA5 dalga verisi, İklim Veri Deposu (Climate Data Store – CDS) sisteminden temin edilmiştir. ERA5 versiyonunda atmosfer için 0,25° x 0,25° yatay çözünürlüğünde; okyanus için ise 0,50° x 0,50° yatay çözünürlüğünde veri sunulmaktadır. Rüzgâr verileri bahsedilen çözünürlükte temin edilmiştir. Dalga verilerinin ham halde 0,36° x 0,36 yatay çözünürlükte üretildiği belirtilmektedir (Bidlot, 2020). Okyanus verilerinin atmosfer verileri ile aynı koordinatlarda örtüşmesi amacıyla CDS sisteminde atmosfer verilerinin çözünürlüğünün tam katı olacak şekilde veri sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında dalga parametrelerine odaklanıldığı için, okyanus verileri ham (doğal) çözünürlüğünde temin edilerek işlenmiştir.

Veri temini için CDS sisteminde tek seviye için saatlik ERA5 verisi (ERA5 hourly data on single levels) olarak sınıflandırılmış veri tabanından ürün türü olarak yeniden analiz verisi seçilebilmektedir. Değişkenler kısmında okyanus dalgaları bulunarak gerekli dalga parametreleri talep edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında CDS veri tabanından alınan ve SWAN dalga modeli çıktılarına karşılık gelen dalga parametreleri Çizelge 3.4'de açıklanmaktadır. Dalga parametrelerinin yanı sıra, deniz üzerinde 10 metre yükseklikteki rüzgâr hızları (u_{10} ve v_{10}) da temin edilmiştir. Rüzgâr hızları x ve y koordinatlarında vektör bileşenleri olarak sunulmaktadır. Bileşke rüzgâr hızları bu vektörel bileşenlerden bileşke vektör (U_{10}) olacak şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.4. ECMWF CDS veri tabanından temin edilen rüzgâr ve dalga parametreleri

Parametre	Açıklaması	CDS veritabanı	SWAN çıktısı
$\mathbf{H_{m0}}$	Belirgin dalga yüksekliği	Significant height of combined wind waves and swell	H_{sig}
$\mathbf{T_{m02}}$	Ortalama dalga periyodu	Mean zero-crossing wave period	T_{m02}
$\mathbf{T_{m-10}}$	Dalga enerji periyodu	Mean wave period	T_{m-10}
$\mathbf{\Theta_m}$	Dalga yönü	Mean wave direction	Dir
$\mathbf{u_{10}}$	Rüzgâr hızı x-ekseni bileşeni	10m u-component of wind	x-Windv
$\mathbf{v_{10}}$	Rüzgâr hızı y-ekseni bileşeni	10m v-component of wind	y-Windv

3.2.4. Uydu altimetre verileri

Yüzey dalgaları altimetre gözlemleri, Avustralya Okyanus Veri Ağın'dan (Australian Ocean Data Network; AODN) temin edilmiştir. Altimetre görevleri (mission) 1985-2018 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Toplamda 13 adet altimetre görevi gerçekleştirilmiştir. Altimetre verisi, dalga iklimi simülasyonlarının mevcut dönem performanslarının değerlendirmesinde kullanıldığı için 1985-2005 zaman aralığında, yedi altimetre görevi gözlemlerinin birleşiminden oluşmaktadır. 1990 yılı tamamında ve 1991 yılının ilk sekiz ayında aktif bir uydu görevi olmadığı için bu zaman diliminde veri bulunmamaktadır. Eksik bir yıl sekiz ay haricinde tüm altimetre verileri bütüncül olarak alındığında 19 yıldan fazla bir veri seti oluşmaktadır. Dalga yüksekliği gözlemleri temin edilen altimetreler ve bunların dalga yüksekliği gözlemleri ile ilgili bilgiler Çizelge 3.5'te verilmektedir.

Çizelge 3.5. Altimetreler, çalışma karakteristikleri, gözlem süreleri ve veri sayıları

Altimetre	İrtifa (km)	Kapsadığı enlem	Kullanılan görevlerin gözlem periyodu	Veri miktarı
GEOSAT	800	72K - 73G	31/03/1985 - 31/12/1989	68705
ERS-1	784	81,5K - 81,5G	01/08/1991 - 02/06/1996	536797
ERS-2	784	81,5K - 81,5G	29/04/1995 - 31/12/2005	1443821
ENVISAT	784	82K - 82G	14/05/2002 - 31/12/2005	312585
TOPEX	1336	66K - 66G	25/09/1992 - 08/10/2005	1754988
GFO	800	72K - 73G	07/06/2000 - 31/12/2005	118256
JASON-1	1336	66,15K -66,15G	15/01/2002 - 31/12/2005	550416

Farklı uydu görevleri ile elde edilmiş gözlemlerin tek bir veri seti olarak kullanılabilmesi için altimetre verileri, NOAA Ulusal Oşinografi Veri Merkezine kayıtlı şamandıralardan, yalnızca kıyıdan 50 km'den fazla açıkta konumlanmış olanlardan alınan veriler ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca altimetre veri setleri arasında çapraz doğrulama yapılarak kalibrasyonların kararlılık ve tutarlılıkları geliştirilmiştir. Altimetre görevleri, alınan gözlemler, kalibrasyon ve doğrulama için kullanılan şamandıra verileri ve yöntemler ile ilgili ayrıntılı açıklamalar Ribal & Young (2019) çalışmasında

bulunmaktadır. Altimetre verileri, ERA5 yeniden analizi ile birlikte, dalga simülasyonlarını alansal olarak değerlendirebilmek için ERA5 çözünürlüğü ile uyumlu hale getirilmiştir. Bunun için, tüm havzada, ERA5 ağ noktalarını merkeze alacak şekilde 0,36°'lik sayısal ağlar oluşturularak, her ağ hücresine denk gelen altimetre gözlemlerinin ortalamaları hesaplanmıştır.

3.2.5. Karadeniz'deki yerinde ölçüm verileri

Karadeniz'de farklı proje ve araştırmalar kapsamında alınan yerinde dalga ölçümleri bulunmaktadır. NATO TU-WAVES projesi (Özhan & Abdalla, 1998) özelinde Karadeniz'in güney kıyısı orta bölgesinde Sinop açıklarında, güneydoğu kıyısı Hopa açıklarında ve kuzeydoğu kıyısı Gelendzhik açıklarında olmak üzere üç dalga şamandırası ile dalga ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şamandıralar, 1 cm hassasiyetle, 1,6 s - 30 s aralığındaki periyotlara sahip dalgaları yüzeyden 40 m derinliğe kadar ölçebilme kabiliyetine sahiptirler (Özhan vd., 1995). Bir başka bilimsel araştırma projesi kapsamında (Çevik vd., 2006), Karadeniz'in güney batısında Karaburun kıyısında, deniz dibine konuşlandırılmış bir ölçüm aleti yardımıyla dalga ölçümleri biriktirilmiştir. Ölçüm cihazının gözlem zamanı 10 dakika, sürekli ölçüm aralığı 2 saat olarak ayarlanmıştır (Arı Güner vd., 2013). Bu tez çalışmasında kullanılan son yerinde dalga ölçümleri, Ulaştırma Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (eski adı DLH) tarafından, Karadeniz'in güneybatı kıyısının orta kesiminde bulunan Filyos'ta gerçekleştirilmiştir (DLH, 1999). Bu bölgede yapılması planlanan liman projesi için ölçüm alınmıştır.

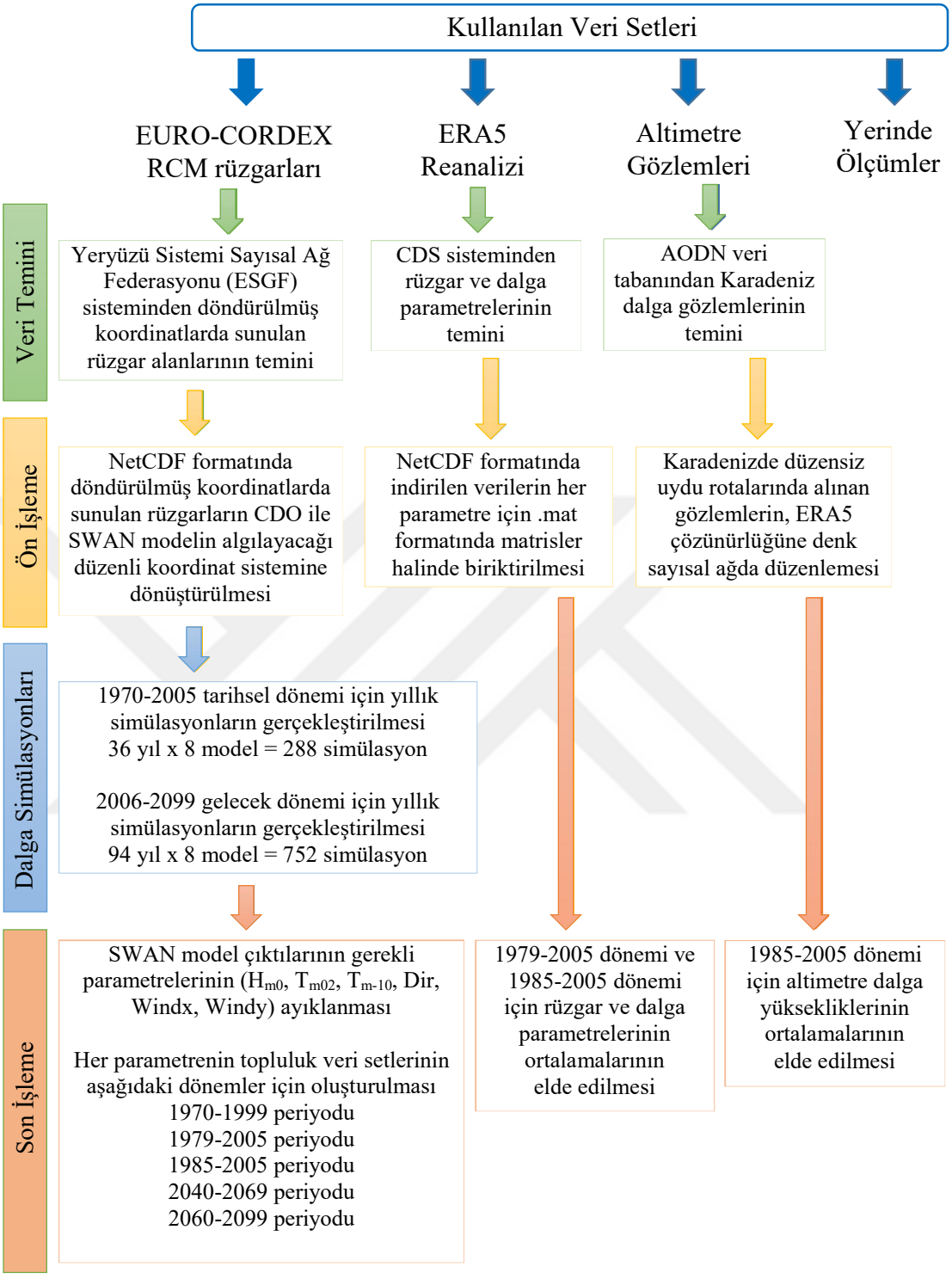
Yukarıda bahsedilen yerinde ölçümler bu tez çalışması kapsamında kullanılan ölçümlerdir. Karadeniz'de bahsedilen yerinde dalga ölçümleri dışında da ölçüm verileri bulunmaktadır (örnek olarak Gloria petrol platformunda). Ancak, bu ölçümler 2006 yılı ve sonrasında alınan kayıtlardır. Yerinde ölçümler bu çalışmada, bölgesel iklim modellerinin, mevcut dönem simülasyonlarını (1979-2005) değerlendirmede kullanılan bir referans olduğu için 2005 yılı sonrasındaki ölçümler kullanılamamıştır. 2005 ve öncesinde alınan ölçümlerde süreklilik açısından eksiklikler bulunmaktadır ve kısa periyotlarda alınmış kayıtlardır. Kullanılan ölçümlerin alındığı coğrafik konumları, karakteristik özellikleri ve veri sayıları Çizelge 3.6 ile özetlenmiştir.

3.3. İklim Analiz Yöntemleri

Bu başlık altında Karadeniz'de rüzgâr ve dalga iklimi analizleri için kullanılan istatistiksel yöntemler açıklanmaktadır. Mevcut iklim değerlendirmelerinde ve gelecek iklim projeksiyonlarında kullanılan istatistiksel analiz yöntemleri farklılık gösterdiği için, bu iki farklı dönem ayrı alt başlıklarda açıklanmaktadır. Ayrıca topluluk modeli kurulumu ve bu topluluk veri setinin, Karadeniz mevcut iklimini yeniden üretme kabiliyetini değerlendirmede kullanılan yöntemler ayrı başlıkta verilmektedir. Mevcut ve gelecek iklim değerlendirme yöntemlerinin izahına geçilmeden önce, tez çalışması kapsamında kullanılan verilerin temin edilmesinden, dalga simülasyonlarının çıktılarının istatistiksel değerlendirmelere hazır hale getirilmesi süreci Şekil 3.2'deki akış şeması ile özetlenmiştir.

3.3.1. Mevcut dalga iklimi değerlendirmeleri

EURO-CORDEX rüzgâr alanları ile çalıştırılmış SWAN dalga simülasyonlarının mevcut iklim dönemindeki performansı, ERA5 yeniden analiz dalga verileri, yerinde ölçümler (şamandıra ölçümleri) ve uydu altimetre dalga verileri ile karşılaştırılarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler için en geniş zaman aralığındaki (1979-2005) veriyi ERA5 sunmaktadır. Bu nedenle dalga iklimi simülasyonlarının, en geniş aralıkta 1979-2005 periyodunda Karadeniz'deki dalga iklimini temsil etme kabiliyetleri ölçülmüştür. Altimetre ölçümleri 1985-2005 dönemini kapsadığı için dalga iklimi simülasyonları bu periyotta ERA5 yeniden analiz verisi ile birlikte altimetre verileri de kullanılarak değerlendirilmiştir. ERA5 ve altimetre verileri gibi iklim değerlendirme verisi olarak kullanılabilecek şamandıra ölçümleri ise doğrudan dalga simülasyonlarının performansını ölçmede kullanılmamıştır. Şamandıra verileri zamansal ve mekânsal boyutta sürekli veriler olmadığı ve en fazla bir yıllık periyodu kapsayacak uzunlukta veriye sahip olduğu için şamandıra verileri ile doğrudan dalga simülasyonlarını kıyaslamak yerine, Karadeniz'in farklı noktalarındaki bu veriler ile ERA5 belirgin dalga yükseklikleri kıyaslanmıştır. Böylece, dalga iklimi değerlendirmesinde kıyas veri seti olarak kullanılan ERA5 veri setinin Karadeniz dalga iklimini temsil etmedeki doğruluğu da irdelenmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan verilerin hazırlanma süreci

Karadeniz'deki beş farklı konumda bulunan şamandıra lokasyonlarına en yakın ERA5 grid noktasındaki veriler, her bir şamandıranın ölçüm periyodu ile çakışan zaman aralığında kalacak şekilde ayıklanmıştır. Şamandıra konumları ve ölçümleri, veri boyutu

ile ilgili bilgiler ile birlikte en yakın ERA5 sayısal ağ istasyonunun şamandıralara uzaklıkları Çizelge 3.6'te verilmiştir. ERA5 ve şamandıra veri setlerinin dağılımları ve saçılımları incelenerek kıyaslanmıştır. Saçılım diyagramları zamansal olarak çakışan verilerin 45°'lik doğruya nispeten saçılımı ile irdelenmiş; dağılımları da aynı veri setleri kullanılarak elde edilen Q-Q diyagramları (Hieftje & Lodder, 1988; Quantile Plot;) yardımıyla kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.6. Şamandıra konumları, ölçüm bilgileri ve şamandıra lokasyonlarına en yakın ERA5 gridleri

Şamandıra	Konum	Kıyıya uzaklık (km)	Derinlik (m)	Ölçüm periyodu	Veri adeti	ERA5 konumu ve şamdıraya uzaklığı
Gelendzhik	44,5075° K 37,9783° D	7	85	Ock-Tem 1996	1649	44,64° N, 37,80° E uzaklık = 0,222°
Hopa	41,4233° K 41,3833° D	4,6	100	Ock-Ara 1996	3204	41,40° N, 41,40° E uzaklık = 0,029°
Sinop	42,1233° K 35,0867° D	11,6	100	Tem-Ara 1996	2523	42,12° N, 34,92° E uzaklık = 0,167°
Filyos	41,5946° K 32,0580° D	1,3	12.5	Ock-Ara 1996	4027	41,76° N, 32.04° E uzaklık = 0,166°
Karaburun	41,3550° K 28,6850° D	0,19	16	Eyl-Ekm 2003 Mar-Tem 2004	1450	41,40° N, 28,80° E uzaklık = 0,123°

Dalga simülasyonları, 1985-2005 periyodunda mevcut olan altimetre dalga yüksekliği gözlemleri ile Karadeniz ve Azak Denizi'nin tamamını kapsayacak şekilde alansal olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede her bir veri setinin bahsedilen dönemdeki dalga yüksekliği ortalamalarının farkları kıyaslanmıştır. Ortalamaların farkları değerlendirilirken altimetre ortalamalarına göreceli olarak normalleştirilmiş şekilde hesaplanmıştır. Bu değerlendirme için çalışmanın devamında normalleştirilmiş fark (NF) ifadesi kullanılmaktadır. Herhangi iki veri seti için bu farkın denklemi,

$$NF = \left(\frac{P_{model} - P_{referans}}{P_{referans}} \right) * 100 \qquad (3.2)$$

şeklindedir ve burada P_{model} değerlendirmeye tabi tutulan veri setini, $P_{referans}$ ise değerlendirmede referans olarak kullanılan veri setini temsil etmektedir. Sonuçta *NF* yüzdesel olarak ortalamaların farkını göstermektedir. Altimetre dalga yüksekliği

ortalamaları ile kıyasa ERA5 veri seti de dahil edilmiştir. Mevcut dönem dalga iklimi simülasyonlarının performansını değerlendirmede ağırlıklı olarak kullanılan ERA5 dalga veri seti bu sayede, hem şamandıra dalga yüksekliği ölçümleri ile hem de altimetre dalga yüksekliği gözlemleri ile test edilmiştir.

İklim simülasyonlarının gelecek dalga iklimini modellemedeki belirsizlikleri bilinen bir meseledir. Bu nedenle, çalışmanın ana hedefi olan Karadeniz'in gelecek dalga iklimini iklim değişikliği etkisinde doğru ve güvenilir bir şekilde ortaya koyabilmek için bu belirsizlikleri mümkün olduğunca azaltmak gerekmektedir. Tekil iklim simülasyonlarının belirsizliklerini, birden fazla dalga simülasyonu ile oluşturulan dinamik topluluk modeli ile azaltmak mümkün olabilmektedir. Yalnız burada da topluluk modeline dahil edilecek tekil simülasyonları iyi belirlemek gerekmektedir. Topluluğa dahil edilecek dalga simülasyonları altimetre ölçümleri ile ve daha kapsamlı olarak ERA5 dalga veri seti ile yapılan performans değerlendirme neticesinde belirlenmiştir. Tekil dalga simülasyonlarının mevcut dönem Karadeniz dalga iklimi performansları için altimetre dalga yüksekliği ortalamaları ile kıyaslanmasının ardından, ERA5 ortalamaları ile kapsamlı bir kıyas gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, dalga simülasyonlarının yıllık ve mevsimlik H_{m0} ortalamaları, ERA5 yıllık ve mevsimlik H_{m0} ortalamaları ile Denklem 3.2'de verilen NF (%) hesaplanarak, tüm havza boyunca alansal grafikler şeklinde elde edilmiştir. Mevsimler Aralık-Şubat (Kış), Mart-Mayıs (İlkbahar), Haziran-Ağustos (Yaz) ve Eylül-Kasım (Sonbahar) olacak şekilde sınıflandırılmıştır. ERA5 ortalamaları ile gerçekleştirilen kıyaslamalar ERA5 veri setinin kapsadığı zaman olan 1979-2005 periyodunda gerçekleştirilmiştir. Yüksek H_{m0} değerlerini kıyaslamak için, yıllık 99. yüzdelik H_{m0} değerlerinin ortalamaları benzer şekilde alansal grafikler ile değerlendirilmiştir. Ortalama dalga periyodu için dalga simülasyonlarının ve ERA5'in yıllık T_{m02} ortalamaları hesaplanarak alansal NF haritaları ile değerlendirme yapılmıştır.

ERA5 veri seti ile topluluk üyeleri arasındaki uyumun derecesini gösteren boyutsuz bir ölçüt olan M-puanı (M-score / Mielke puanı) H_{m0} ve T_{m02} parametreleri için hesaplanmıştır. M-puanı, alanın uzamsal varyansı ile boyutlandırılmamış ortalama kare hatasıdır ve iklim modellerinin becerisini ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır

(Hemer & Trenham, 2016; Meehl vd., 2007; Watterson vd., 2014). M-puanı hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$M = \left(\frac{2}{\Pi}\right)\arcsin\left(1 - \frac{mse}{V_x + V_y + (G_x - G_y)^2}\right) * 1000 \quad (3.3)$$

Burada, *x* indisli terimler simülasyonların, *y* indisli terimler referans veri setinin özellikleridir. *V* tanımlı alandaki alansal varyansı, *G* ise alansal ortalamayı temsil etmektedir ve *mse* ortalama karesel hatadır. M-puanı 0 ile 1000 arasında değişmektedir ve veri setleri arasında mükemmel uyum olduğunda ortalama karesel hata sıfır olurken M-puanı en yüksek değerini almaktadır.

Yönsel değerlendirme için ortalama dalga yönleri hesaplanarak model ve ERA5 ortalama dalga yönlerinin 1979-2005 periyodundaki ortalamaları arasındaki dar açının farkları alansal olarak tüm havza boyunca elde edilmiştir. ERA5 ve SWAN dalga simülasyonlarının çıktıları ortalama dalga yönlerini derece cinsinden saatlik olarak sırasıyla MWD (Mean Wave Direction) ve Dir (Direction) parametreleri ile vermektedir. Yalnız, bu saatlik ortalama dalga yönlerinden doğrudan ortalama alarak yıllık ortalama dalga yönlerini hesaplamak kuzey doğrultusunda doğru sonuç vermemektedir. Kuzey yönlü iki farklı dalganın birinin örnek olarak 359° diğerinin ise 1° olması durumunda, bu iki dalganın ortalama dalga yönü 180° olarak elde edilmektedir. Bu nedenle hem ERA5 hem de SWAN dalga simülasyonlarının saatlik ortalama dalga yönlerinin önce radyan karşılıkları sinüs ve kosinüs fonksiyonları ile bileşenlerine ayrılarak ortalamalar hesaplanmıştır. Sonrasında tekrar bileşke ortalama yön elde edilip derece türüne çevrilerek ortalama dalga yönlerini gösteren alansal haritalar oluşturulmuştur. Topluluk üyelerinin ortalama dalga yönlerindeki performanslarının analizini detaylandırmak için ayrıca tarihsel dönemdeki ortalama rüzgâr yönleri analiz edilmiştir. Rüzgâr alanlarının yatay düzlemdeki *u* ve *v* bileşenleri şeklinde sunduğu 6 saatlik zamansal çözünürlükteki rüzgâr verilerinden hesaplanan 27 yıllık ortalama rüzgâr yönleri elde edilmiştir. Benzer şekilde ERA5'in ortalama rüzgâr yönleri hesaplanmıştır. Arka planda topluluk üyelerinin U_{10} ortalamalarının ERA5 ile farkları ve üzerinde ortalama rüzgâr yönlerini gösteren oklar ile alansal haritalar elde edilerek değerlendirilmiştir. Bu işlemler saatlik veriler üzerinden ve uzun periyotlar için yapıldığından, hesaplamalar için açık kaynaklı Python

programı kullanılmıştır. Diğer bütün hesaplamalar ve grafikler yine Python komut dizileri yardımıyla elde edilmiştir.

Dalga simülasyonlarının performanslarının bir başka istatistiksel değerlendirmesi H_{m0} ortalamalarının yıllık değişkenliği irdelenerek yapılmıştır. Ortalama yıllık değişkenlik (Mean Annual Variability; MAV) indeksi ERA5 ve topluluk üyeleri için hesaplanmıştır. MAV değerleri yüzdelik olarak hesaplandığı için farklar doğrudan model değerinden ERA5 değeri çıkartılarak (doğrudan farkları temsil eden F kısaltması kullanılmaktadır) alansal haritalar oluşturulmuştur. MAV, H_{m0}'ın yıl içerisindeki ortalama değişkenliğini göstermektedir. Ayrıca, topluluk üyelerinin mevsimsel aşırılıkları benzeştirme yeteneklerini değerlendirmek için kullanılmaktadır ve bağıntısı aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \mathrm{MAV} &= \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(x_{jk}-\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_{jk}\right)\right)^2}\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_{jk}\right)^{-1}\times 100\% \\ &= \overline{\left(\frac{\sigma_j}{x_j}\right)}\times 100\% \end{aligned} \tag{3.4}$$

Bu denklemde j indisi yılı, k indisi ise yıl içindeki kaydı simgelemektedir. MAV indeksi kısaca, yıllık ortalama ile normalize edilen yıllık standart sapmanın ortalaması şeklinde tanımlanmaktadır (Stopa vd., 2013).

Topluluk üyelerinin mevcut dalga iklimi performanslarının tekil değerlendirmesi için kullanılan son yöntem olarak, H_{m0} ve T_{m02} parametreleri için topluluk içi tutarsızlıkları belirlenmiştir. Bunun için öncelikle, her parametre için topluluk ortalamaları elde edilmiştir. Daha sonra, her bir topluluk üyesinin ilgili parametre için ortalaması ile topluluk ortalaması arasındaki farklar hesaplanarak her üyenin tutarsızlıkları elde edilmiştir. Bu değerlendirme topluluk üyelerinin topluluk ortalamasına göre aykırılıklarını, bir başka deyişle anormalliklerini göstermektedir.

3.3.2. Topluluk modeli kurulumu

Dalga simülasyonlarının Karadeniz mevcut dalga iklimini yeniden üretme performansları tekil olarak değerlendirilmiş ve performansı yeterli görülen dalga simülasyonları kullanılarak dinamik bir topluluk modeli oluşturulmuştur. Tekil performansları değerlendirilen bütün dalga simülasyonları topluluk üyeleri) bu topluluk içerisine dahil edilmiştir. Bütün topluluk üyelerinin dahil edilmesinin gerekçeleri Bölüm 4'te açıklanmaktadır.

Topluluk modeli oluşturmak için literatürde iki farklı yöntem görülmüştür. Bu yöntemlerden ilkinde, Denklem 3.3'deki gibi bir istatistiksel hata ölçütü sonuçlarına göre topluluk üyeleri için bir etki faktörü belirlenmektedir. Bu etki faktörüne bağlı olarak, her bir üyenin değeri topluluk içerisinde bir ağırlığa sahip olmaktadır. Örnek olarak, Giorgi & Mearns (2002) çalışmasında karesel ortalama farklar (rmsd) ölçütüne göre topluluk üyelerinin ağırlıkları belirlenerek topluluk modeli oluşturulmuştur. Diğer bir yöntem ise, topluluk üyelerini ağırlıksız olarak topluluk içerisine dahil etmektir. Bu yöntem 'demokratik yaklaşım' olarak nitelendirilmekte (Knutti, 2010) ve çoğunlukla tercih edilmektedir (Hemer vd., 2013; Hemer & Trenham, 2016; Lemos vd., 2019; Mori vd., 2013; Morim vd., 2020; Semedo vd., 2018). Bu tez çalışmasında oluşturulan topluluk modeli, literatürde de daha fazla tercih edilen ağırlıksız ortalamalar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ağırlıksız ortalamalar yaklaşımının yanı sıra, Karadeniz doğu ve batı olarak iki bölgeye ve doğu, merkez ve batı olarak üç bölgeye bölündükten sonra topluluk üyelerinin M-puanı (Denklem 3.3) değerlerine göre ağırlıklandırılarak topluluk modelleri oluşturulmuştur. İki ve üç bölgeli topluluk model yaklaşımının, topluluğun Karadeniz'in dalga iklimini doğru bir şekilde temsil etme yeteneğine kayda değer bir katkısı olmadığı görüldüğü için gelecek değişimleri ağırlıksız ortalamalar ile oluşturulan topluluk kullanılarak irdelenmiştir.

Kurulan topluluk ile öncelikle, topluluk üyeleri için yapılan mevcut dönem iklim değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Topluluk modeli, hem uydu altimetre verisi dalga yüksekliği gözlemleri ile hem de ERA5 yeniden analizinin dalga (H_{m0}, T_{m02}, P_w) ve rüzgâr (U_{10}) parametreleri ile değerlendirilmiştir. Dalga enerji akısı olarak da bilinen ortalama

dalga gücü (P_w), dalga yayılımı yönünde iletilen enerjinin dalga ilerleme yönüne ve derinliğe yayılması oranı olarak tanımlanır ve aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$P_w = (\rho_w g^2 / 64\pi) T_e H_{m0}{}^2 \tag{3.5}$$

Denklemde g yerçekimi ivmesini, ρ_w suyun özgün ağırlığını ifade etmektedir ve Karadeniz için 1015 kg/m^3 olarak alınmıştır. T_e dalga enerji periyodunu temsil etmektedir. Spektral dalga parametresi tanımıyla T_{m-10} şeklinde tanımlanmaktadır.

Topluluk model ile mevcut iklim değerlendirmesinde farklı olarak irdelenen özellik H_{m0} ortalamalarının yıllık değişkenliğidir. Topluluk üyelerinin Karadeniz dalga iklimini temsil etme performansı değerlendirilirken MAV kullanılırken; topluluk modeli ile Karadeniz'in iklimini doğru yansıtma değerlendirmesi yıllar arası değişkenlik (Inter-annual variability; IAV) indeksi ile yapılmıştır. MAV, yıl içerisindeki ortalama değişkenliği, IAV ise parametrenin iklimindeki uzun dönemli değişkenliklerini göstermektedir. Topluluk modelinin H_{m0} yıllar arası değişkenliği,

$$IAV = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left[\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}X_{jk}\right)-\left(\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}X_{jk}\right)\right)\right]^2}\left(\frac{1}{nm}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}X_{jk}\right)^{-1} = \frac{\sigma_{\overline{X_y}}}{\overline{\overline{X_T}}} \tag{3.6}$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. IAV değerlendirilen tüm periyodun ortalaması ile normalleştirilen yıllık ortalamaların standart sapması olarak tanımlanmaktadır (Stopa vd., 2013).

3.3.3. Gelecek dalga iklimi tahminleri

Karadeniz ve Azak Denizi'ni içerisine alan havzada gelecek rüzgâr ve dalga iklimi tahminleri oluşturulan topluluk veri seti ile yürütülmüştür. Topluluk veri setleri ile sunulan gelecek tahminleri, tekil modellerin gelecek projeksiyonları gibi belirsizlikler

içermektedir. Kuramsallaşmamış olsa da, çoklu modellerin (topluluk) ürünü olan projeksiyonların, tekil model ürünü projeksiyonlara kıyasla daha güvenilir olduğu görüşü, hatta çoklu modelde kullanılan tekil modellerin belirsizlikleri aynı eksikliklerden kaynaklansa bile, bulunmaktadır (Knutti vd., 2010). Topluluk modeli ile gelecek dalga iklimi için daha güvenilir ve güçlü (robust) projeksiyonlar elde edilmektedir.

CMIP5 deneylerinin gelecek simülasyonları daha önce de bahsedildiği gibi 2005-2100 dönemini kapsamaktadır. Dalga iklimi projeksiyonları ve rüzgâr hızlarındaki değişimler, bu zaman aralığında farklı dönemler belirlenerek sunulmuştur. Mevcut iklimi veya tarihsel periyot (TP) ortalamaları 1979-2005 aralığında 27 yıllık bir dönem için değerlendirilmiştir. ERA5'in dalga verisi sağladığı 27 yıllık tarihsel dönemde, Karadeniz'in dalga iklimini temsil yeteneği görülen topluluğun gelecek projeksiyonları 30 yıllık dönemlerle incelenmiştir. İklim analizlerinde çoğunlukla 30 yıllık periyot ortalamaları değerlendirilmektedir. 27 yıllık dönemdeki ortalamalar ile 30 yıllık dönemdeki ortalamalar arasında fazla fark olmayacağı düşünülmektedir. Gelecek projeksiyonları (GP) olarak isimlendirilen bu dönemler: 2040-2069 aralığını kapsayan orta vadeli gelecek projeksiyonları (GP1), 2070-2099 aralığını kapsayan uzak dönem gelecek projeksiyonları (GP2) şeklinde belirlenmiştir. Çizelge 3.2'de TN-6 kısaltması ile nitelendirilmiş topluluk üyesi HadGEM2 için 2100 yılı simülasyonu bulunmadığından, 2099 yılı tüm üyeler için gelecek iklim döneminin son yılı olarak alınmıştır. Belirlenen periyotlarda, U_{10}, H_{m0}, T_{m02}, ve P_w ortalamaları yıllık ve mevsimlik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, GP1 ve GP2 ortalamaları bütün parametreler için TP ortalamalarına göreceli olarak farkları hesaplanarak havzanın tamamında alansal olarak sunulmuştur. Mevcut dalga iklimine göreceli olarak hesaplanan gelecek rüzgâr ve dalga iklimi değişimleri (GD kısaltması ile ifade edilmektedir),

$$GD = \left(\frac{P_{GP} - P_{TP}}{P_{TP}} \right) * 100 \tag{3.7}$$

formülü ile yüzdesel değişim olarak hesaplanmıştır. Formülde *P* gelecek projeksiyonu irdelenen rüzgâr veya dalga parametresinin ilgili dönemdeki ortalamasını ifade etmektedir. Gelecek dönemdeki ortalamalar ile tarihsel dönemdeki ortalamalar arasında Denklem 3.7 ile hesaplanan farkların istatistiksel olarak belirgin olup olmadığının

kontrolü için bağımsız örneklemler için standart t-Testi (Turanlı & Demirhan, 1997) kullanılmıştır. Hesaplamalar Python 'Scipy' kitaplığındaki 't-Test' aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farkların istatistiksel olarak belirginliği %95 güven aralığında test edilmiştir. Böylece, ilgili parametrenin ortalamalarının belirlenen gelecek periyodundaki istatistiksel olarak belirgin değişimleri öngörülmüştür.

Belirlenen dönemlerdeki iklim ortalamalarının gelecek değişimlerinin incelenmesinin ardından, CMIP5 deneylerinin 94 yıllık (2006-2099) gelecek simülasyon döneminin tamamını kapsayacak şekilde öngörülen belirgin eğilimleri (trendleri) incelenmiştir. Eğilimlerin hesaplanmasında, parametrik olmayan Theil-Sen Yöntemi (Sen, 1968; Theil, 1950) kullanılmıştır. Bu yöntem (Theil, 1950) yaklaşımının (Sen, 1968) tarafından iyileştirilmesi sonucunda kuramsallaşması sebebiyle, kaynaklarda çoğunlukla beraber isimlendirilmektedir. Matematiksel detayları verilen kaynaklarda bulunmakla beraber, temelde zamana (t_i) ve gözlem değerine (h_i) ait ardışık gözlem çiftlerinin (t_i, h_i ve t_{i+1}, h_{i+1}) eğim değerlerinin medyanı olarak özetlenmektedir (Fernandes & Leblanc, 2005).

Hesaplanan eğilimlerin istatistiksel olarak anlamlılık testi için, %95 güven aralığında Mann-Kendall Testi (Kendall, 1975; Mann, 1945) kullanılmıştır. Hidro-meteorolojik verilerin monotonik trendlerinin istatistiksel olarak belirginliğinin test edilmesinde kullanılan bu parametrik olmayan yöntem (Yue vd., 2002), verilerin herhangi bir dağılıma uyma zorunluluğu olmadığı için tercih edilmektedir (Yu vd., 1993). Theil-Sen trendleri ve bu trendlerin istatistiksel belirginliğinin ölçüldüğü Mann-Kendall testi, Python 'pymannkendall' kitaplığı (Hussain & Mahmud, 2019) kullanılarak bütün havza için alansal olarak elde edilmiştir. Alansal olarak sunulan bu haritalarda, trendlerin istatistiksel olarak belirgin olmadığı alanların üzeri taranarak gösterilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

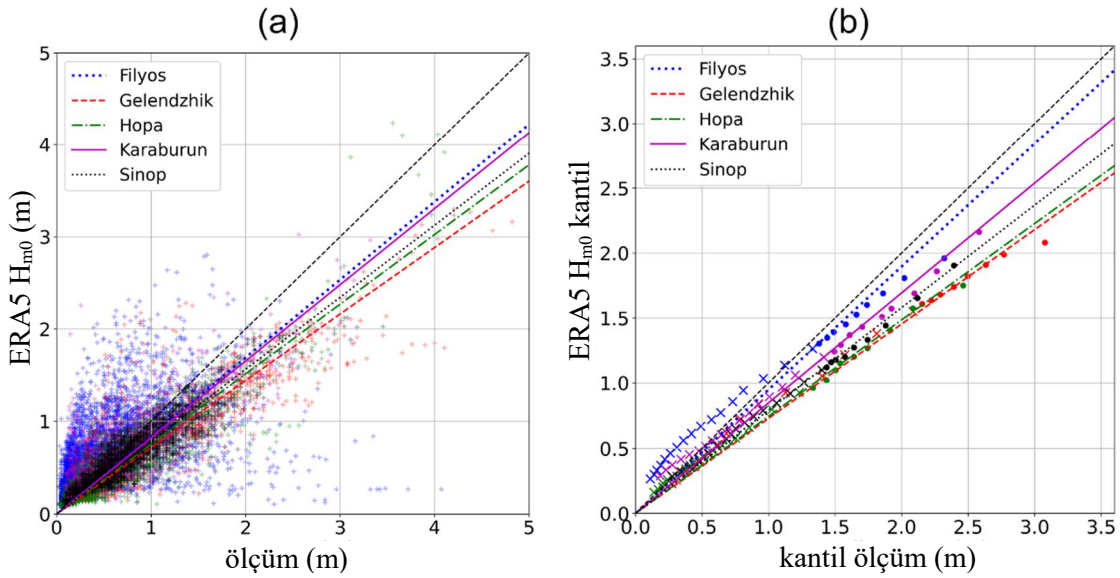
Tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular iki ana başlık altında sunulmaktadır. İlk ana başlıkta, EURO-CORDEX rüzgâr alanları ile yürütülen dalga simülasyonlarının, Karadeniz mevcut dalga iklimini temsil etme kabiliyetlerinin değerlendirme sonuçları verilmektedir. Tekil değerlendirmeler sonrasında, bu tekil dalga simülasyonları (topluluk üyeleri) ile teşkil edilen topluluk modelinin, Karadeniz mevcut dalga iklimi ile uyumu değerlendirilmektedir. İkinci ana başlıkta ise, Karadeniz mevcut rüzgâr ve dalga iklimi uyumu değerlendirilen topluluk dalga veri setinin RCP8.5 senaryosuna dayalı olarak gelecek rüzgâr ve dalga iklimi projeksiyonları sunulmaktadır.

4.1. Mevcut Dalga İklimi Değerlendirmesi

4.1.1. ERA5 verilerinin yerinde ölçüm verilerine karşı performansı

Bu çalışmada, dalga simülasyonlarının mevcut dalga iklimi değerlendirmesi için kullanılabilecek veri setleri; yerinde ölçümler, uydu altimetre gözlemleri ve ERA5 yeniden analizi, Bölüm 3'de tanıtılmıştır. Orada da bahsedildiği gibi, yerinde ölçüm verileri noktasal olduğu ve kısa zaman periyodunu kapsadığı için, doğrudan dalga simülasyonlarını alansal olarak değerlendirmek için kullanılamamıştır. Bunun yerine, çalışmada yapılan mevcut dalga iklimi değerlendirmelerinin büyük bir kısmında kullanılan ERA5 veri setlerini irdelemek için kullanılmıştır. Şekil 3.1'deki harita üzerinde konumları belirtilen ve Çizelge 3.6'da kesin koordinatları verilen yerinde ölçüm lokasyonlarına, yine aynı çizelgede gösterilen ölçüm lokasyonlarına en yakın ERA5 H_{m0} verileri, her bir lokasyondaki ölçüm periyodu ile aynı zaman diliminde dizinlenmiştir. ERA5 ve yerinde ölçümlerin dalga yüksekliklerinin kıyası Şekil 4.1'de verilmektedir. Şekil 4.1 a, her istasyon için ölçüm dalga yüksekliklerine karşılık gelen ERA5 dalga yüksekliklerinin saçılımını göstermektedir. Saçılıma uydurulan doğrusal regresyonlara göre, ERA5'in bütün ölçüm verilerine kıyasla dalga yüksekliklerini düşük tahmin ettiği görülmektedir. Karadeniz'in doğu bölgesindeki istasyonlarda (Hopa, Gelendzhik), batı bölgesindeki istasyonlara (Karaburun, Filyos) nazaran ERA5'in düşük tahmini daha kayda değer şekildedir. Aynı veri setleri dalga yükseklikleri için karşılıklı olarak kantil grafikleri (Q-Q; quantiles) Şekil 4.1 b'de gösterilmektedir. %10 ile %90 arasındaki

kantiller çarpı işaretleri ile, %90 üzeri kantiller nokta işaretleri ile gösterilmektedir. Q-Q grafiklerinde de saçılım diyagramlarındakine benzer şekilde ERA5'in tüm istasyonlarda düşük tahmini göze çarpmaktadır. Filyos istasyonunda, kantillerin doğrusal regresyon çizgisinin, tam uyumu gösteren 45°'lik çizgiye yaklaştığı görülmektedir. ERA5'in düşük kantil değerleri (%10 - %90) için, ölçümlere kıyasla yüksek tahminlerinin buna sebep olduğu görülmektedir. Dalga yüksekliklerinin %90 üzeri kantil değerleri için bütün istasyonlarda ERA5 tarafından, kararlı bir şekilde düşük tahmin edildiği tespit edilmiştir. Q-Q diyagramlarında da saçılım diyagramlarında gözlendiği gibi, ERA5'in dalga yüksekliklerini, Karadeniz'in doğusunda batısına göre daha düşük tahmin ettiği görülmektedir. Karadeniz'in genelinde ERA5 dalga yüksekliklerinin ölçülen dalga yüksekliklerine kıyasla düşük olması, çalışmanın devamında ERA5 ile tekil dalga simülasyonları veya topluluk modeli için yapılacak değerlendirmelerde göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 4.1. Yerinde ölçümlere karşı ERA5 dalga yüksekliklerinin saçılım (a) ve kantil-kantil (Q-Q) (b) grafikleri

4.1.2. Altimetre ölçümlerine karşı ERA5 ve dalga iklim simülasyonlarının performansları

Karadeniz'de yerinde dalga ölçümleri ile ERA5 dalga veri seti arasında yapılan değerlendirmenin ardından, bir başka ölçüm niteliği taşıyan altimetre dalga yüksekliği gözlemleri referans alınarak hem ERA5 veri seti hem de tekil dalga simülasyonları birlikte değerlendirilmiştir. Altimetre gözlemleri 1985-2005 periyodunda, CMIP5 tarihsel simülasyonlarının zaman periyodu ile denk düştüğü için, ERA5 ve dalga simülasyonlarının dalga yüksekliklerinin ortalamaları aynı dönem için elde edilmiştir. Denklem 3.2'de tanımlanan altimetre gözlemlerine kıyasla normalleştirilmiş farklar (NF), ERA5 ve dalga simülasyonları için alansal olarak Şekil 4.2'de sunulmuştur. Uydu gözlemleri, mekânsal ve zamansal olarak sürekli veri sağlamamaktadır. Ancak uydu dalga yüksekliği gözlem veri seti, yedi farklı altimetre görevinin birleştirilmesi ile teşkil edildiği için Karadeniz'de alansal olarak kıyaslama yapacak yeterliliğe ulaşmıştır.

Şekil 4.2'deki bütün grafiklerde ağırlıklı olarak görülen negatif farklar, ERA5 ve bütün topluluk üyelerinin, altimetrelerin Karadeniz dalga yüksekliği gözlemlerine kıyasla, dalga yüksekliklerini düşük tahmin etmeye eğilimli olduklarını göstermektedir. ERA5 dalga yükseklikleri ortalamaları (Şekil 4.2 a), Karadeniz'in batısında, altimetre gözlemlerin ortalamalarından %10 ile %15 oranında daha düşük kalmaktadır. Doğu bölgesinde, NF değerleri daha da artarak ortalama olarak -%30 seviyelerinde görülmektedir. Özellikle güney doğu kıyılarına yakın bölgelerde farklar -%50'lere ulaşmaktadır. Azak Denizi'nde, altimetre ve ERA5 ortalamalarının farklarının daha düşük olduğu hatta, yerel olarak ERA5'in yüksek tahmin ettiği bölgeler de görülmektedir.

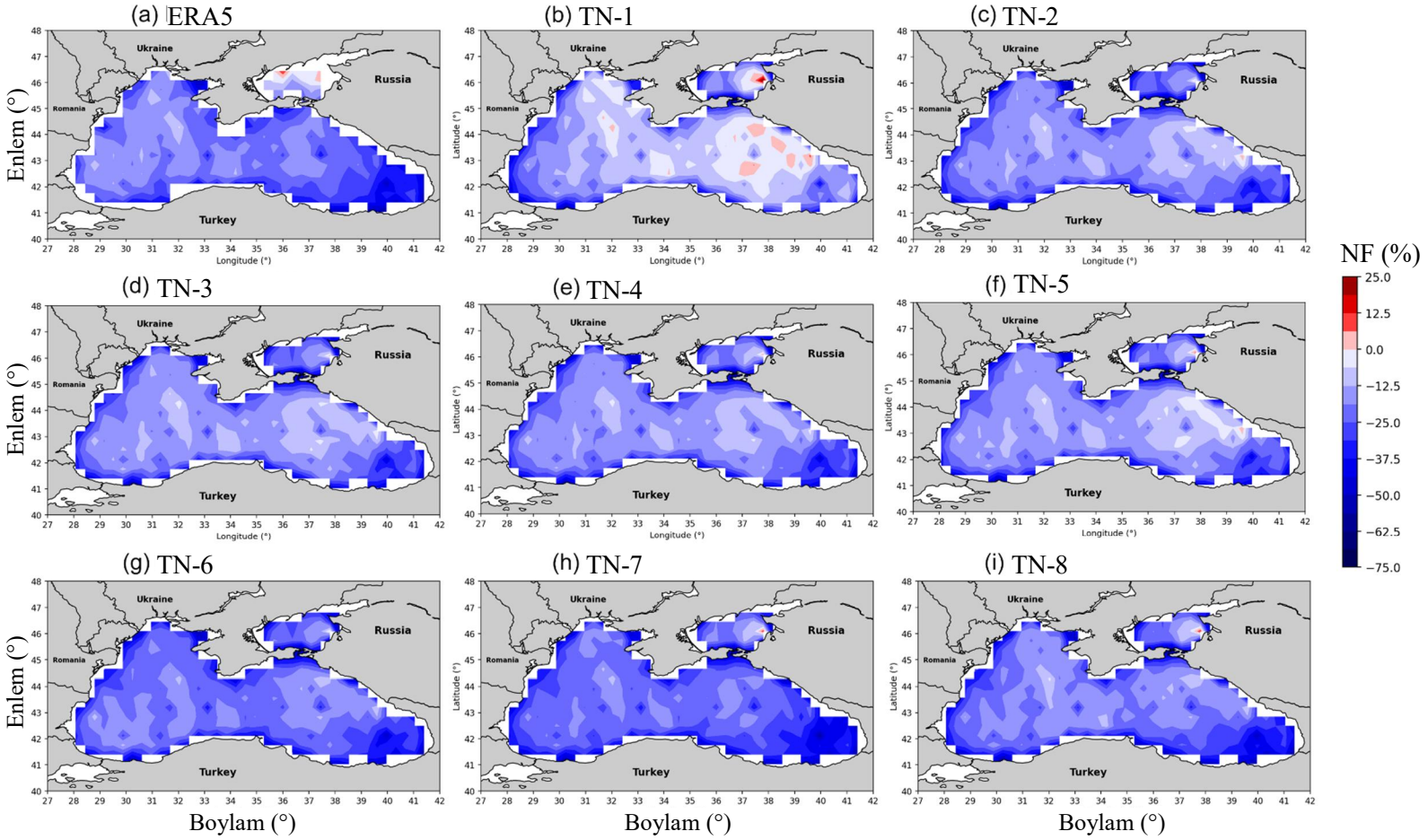
Topluluk üyeleri, yerel olarak küçük farklar olsa da Karadeniz'in batı bölgesinde, ERA5 ile benzer karakteristik göstermektedir. Doğu bölgesinde bazı topluluk üyeleri (TN-7, 8) ERA5'e çok yakın, bazı üyeler (TN-2, 3, 4, 5, 6) ise altimetre gözlemleri ile ERA5'e benzer karakteristikte ancak, biraz daha düşük farklara sahiptirler. Karadeniz'in doğusunda, ERA5 ve diğer topluluk üyelerinde en farklı karakteristiği gösteren dalga simülasyonu TN-1 olmuştur. TN-1 en düşük NF değerleri ile, altimetre gözlemlerinin Karadeniz'in doğusundaki ortalamalarına en yakın ortalamaları veren topluluk üyesi olarak göze çarpmaktadır. Altimetre gözlemlerinin dalga yüksekliği ortalamaları ile kıyasta, topluluk üyeleri arasında TN-7, ERA5 ortalamalarına en benzer karakteristiğe

sahip üye olmuştur. NF haritalarında %50 ve üzeri farklar kıyıya yakın bölgeler de gözlenmiştir. Bu bölgelere denk gelen altimetre ölçümlerinin azlığı ve ayrıca ERA5 ve dalga simülasyonlarının kıyıya yakın bölgelerdeki model performansı, batimetri hassasiyeti ve kıyı çizgisi doğruluğu ile ilgili eksikliklerden kaynaklanabilmektedir.

Karadeniz'de beş farklı yerinde dalga yüksekliği ölçümleri ve altimetre dalga yüksekliği gözlemleri ile ERA5 dalga veri setinin güvenilirliği test edilmiştir. Hem yerinde ölçümler, hem de altimetre gözlemlerine dayalı kıyaslamalarda, ERA5'in Karadeniz dalga iklimini doğru yansıtma kabiliyeti yeterli görülse de, dalga yüksekliklerini kıyas veri setlerine göre düşük tahmin etme eğiliminde olduğu gerçeği dikkate alınmalıdır. Özellikle doğu bölgesinde bu düşük tahmin derecesi biraz daha belirgin şekilde gözükmektedir. ERA5'in Karadeniz'de bölgesel olarak bu farklı davranışı da göz önünde bulundurularak, topluluk üyelerinin ve devamında teşkil edilen dalga iklimi topluluğunun, Karadeniz'in mevcut dalga iklimini temsil etme performansları değerlendirilmektedir.

4.1.3. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık H_{m0} ortalamalarına karşı performansları

ERA5 ve topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamalarının, Karadeniz ve Azak Denizi ile birlikte kapsayan havzada alansal dağılımları Şekil 4.3'te verilmektedir. Topluluk üyelerinin yıllık H_{m0} ortalamalarının, ERA5 ortalamaları ile karşılaştırılması ise Şekil 4.4'te gösterilmektedir. H_{m0} ve diğer parametrelerin ERA5 veri seti ile kıyaslamalarının sunuş yöntemi olarak öncelikle, ERA5 ve topluluk üyelerinin ilgili parametre için havzadaki ortalamaları (veya %99'luk dilim değerleri) alansal haritalar ile verilmekte ve hemen ardından ayrı bir şekilde, topluluk üyelerinin ERA5 veri setine göre NF haritaları sergilenmektedir. ERA5 yıllık H_{m0} ortalamalarının alansal iklim desenleri (Şekil 4.3a), dalgaların Karadeniz'in batı ve güneybatı kesimlerinde daha şiddetli olduğunu göstermektedir. Karadeniz'in doğu kesimlerinde görülen yıllık H_{m0} ortalamaları (0,65 m civarında), batı bölgesindeki H_{m0} ortalamalarından (1 metreye yakın) daha düşüktür.



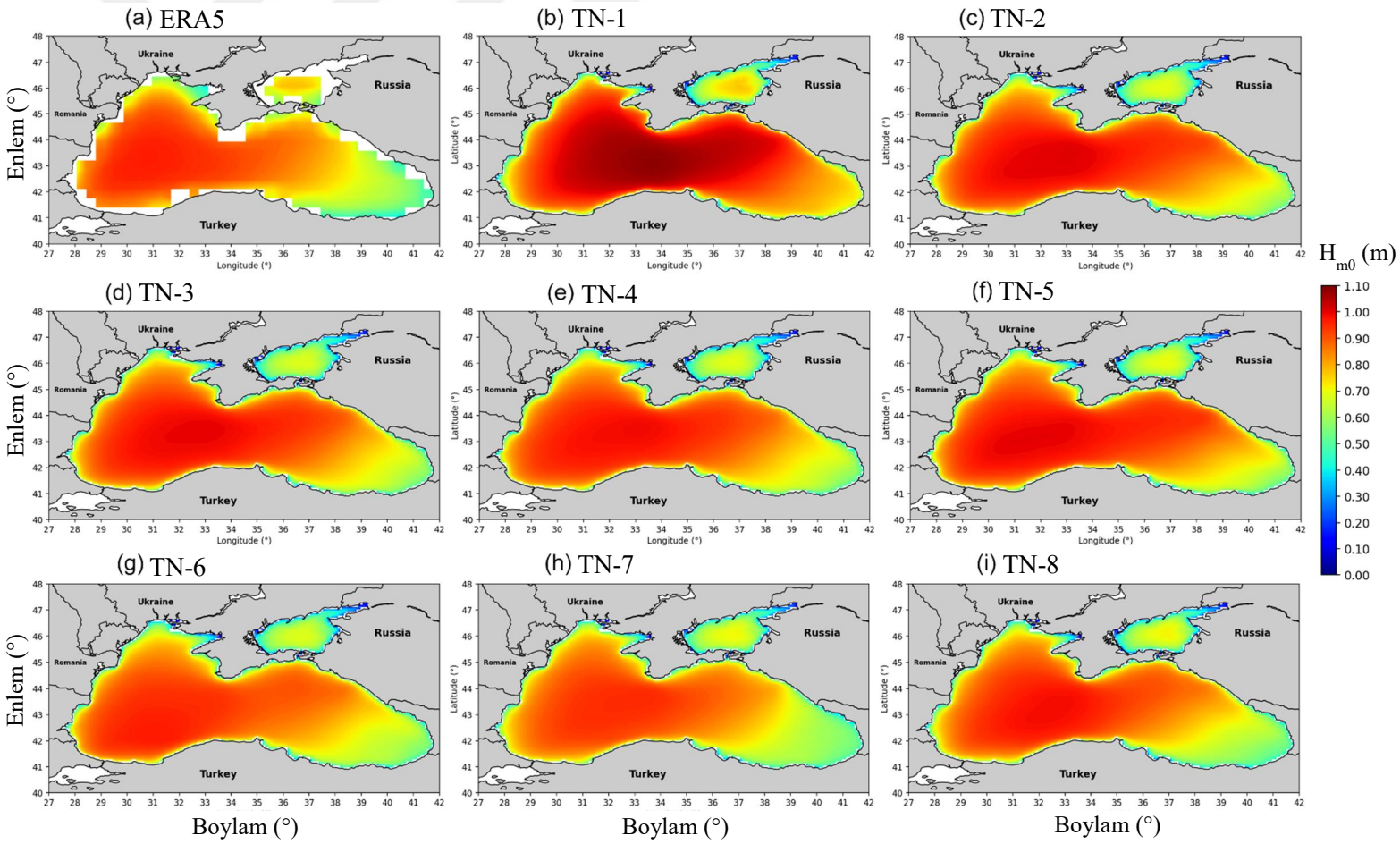
Şekil 4.2. 1985-2005 döneminde, ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b - i) altimetre dalga ölçümlerine göre alansal NF (%) haritaları

Neredeyse tüm topluluk üyelerinin 27 yıllık H_{m0} ortalamaları ERA5 ile benzerlik gösterse de TN-1 diğerlerinden ayrışmaktadır. Dikkat çekici bir şekilde, TN-1 (Şekil 4.4 b), Karadeniz'in doğu kesiminde ERA5'e kıyasla daha yüksek NF (yaklaşık %40-%50 yüksek tahmin) göstermektedir. TN-1, diğer topluluk üyelerine kıyasla merkezdeki en yüksek yıllık H_{m0} ortalamasına sahiptir ve bu yüksek değerler Karadeniz'in doğu kısımlarına doğru da yayılmış bir şekildedir (Şekil 4.3 b). Diğer topluluk üyeleri (Şekil 4.4 c-i), doğu bölgesinde H_{m0} ortalamalarını biraz yüksek tahmin etmelerine rağmen, Karadeniz havzası genelinde %10'dan az NF değerleri göstererek ERA5 ile daha iyi anlaşmaktadır. Havzanın tamamı dikkate alındığında, TN-7'nin ERA5 ile uyumunun diğer topluluk üyelerinden biraz daha iyi olduğu söylenebilir. Burada belirtilmesi gereken bir diğer husus da, neredeyse tüm topluluk üyelerinin Azak Denizi'ndeki yıllık H_{m0} ortalamalarını ERA5'e kıyasla düşük tahmin etmeleridir. Havzanın kıyı şeridine yakın bazı bölgelerinde ve Azak Denizi'nde yüksek NF gözlenmiştir. Bu yüksek farklar, ERA5 ve SWAN dalga modeli arasındaki çözünürlük farklılığından kaynaklanan daha sığ batimetriye sahip alanlardaki model hassasiyetleri ile ilgili olabilir.

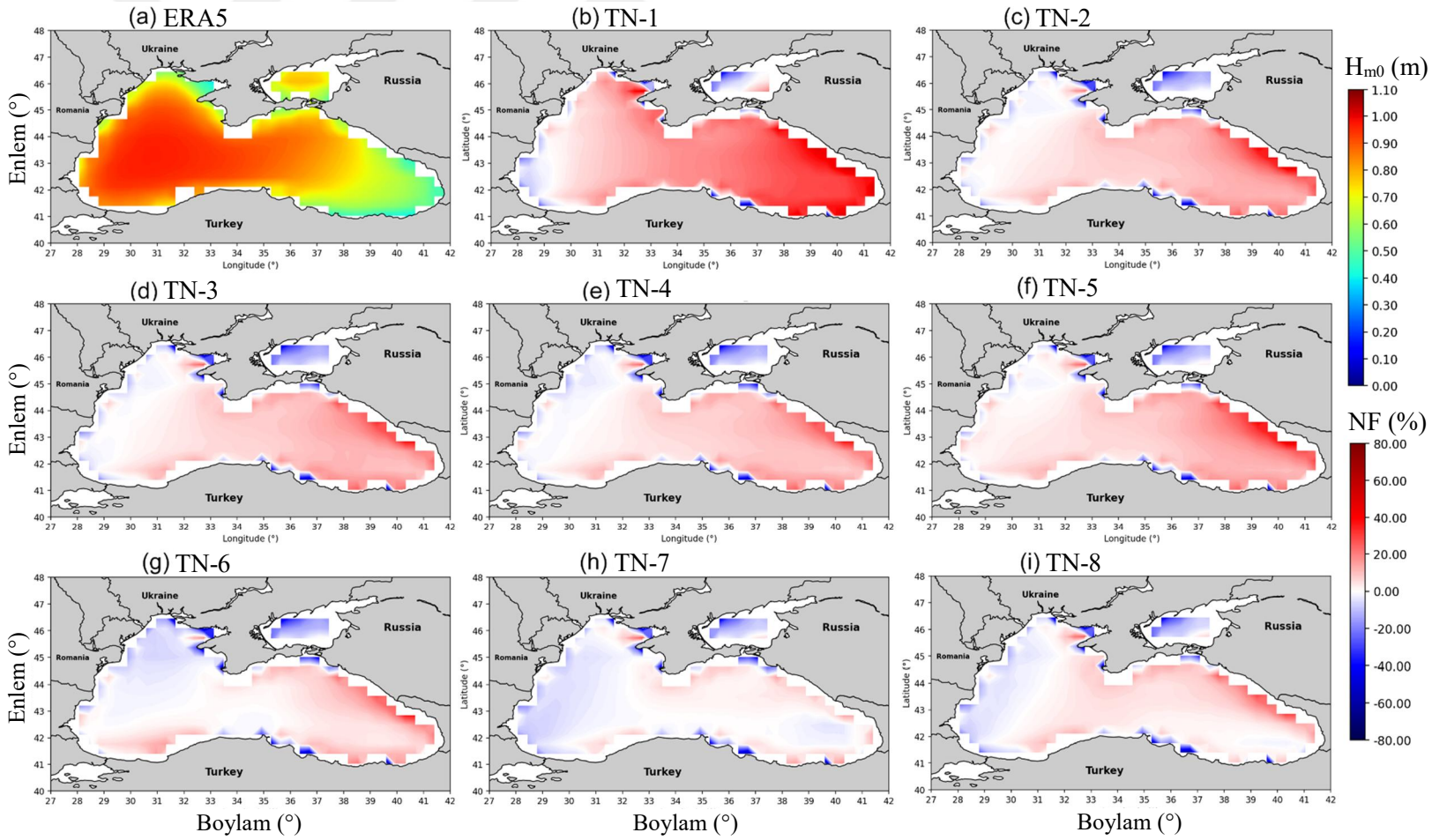
Topluluk üyelerinin mevcut dalga iklimini (H_{m0} ve T_{m02} için) temsil etme becerilerini havzanın genelinde ERA5'e kıyasla ölçen M-puan sonuçları, Çizelge 4.1'de verilmiştir. Her topluluk üyesi için yıllık H_{m0} ortalamaları ile hesaplanan M-puanları, Şekil 4.4'teki değerlendirmelerle aynı doğrultuda, havza genelinde ERA5 H_{m0} ortalamaları ile en düşük farklara sahip TN-7, en yüksek M-puanına (834,88) sahip üye olduğu görülmektedir. Şekil 4.4 b'de, ERA5 ile en yüksek NF sahip olduğu belirlenen TN-1, M-puanlarında da (712,79) en düşük sonucu vermiştir. Diğer topluluk üyeleri, 793 ile 822 arasında M-puanları alarak, ERA5 ile uyumda birbirine yakın performans göstermiştir.

Çizelge 4.1. Topluluk üyelerinin H_{m0} için M-puanları

Topluluk üyesi	**H_{m0}**
TN-1	712,79
TN-2	793,02
TN-3	802,30
TN-4	809,32
TN-5	793,79
TN-6	815,53
TN-7	834,88
TN-8	822,98



Şekil 4.3. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık H_{m0} ortalamaları

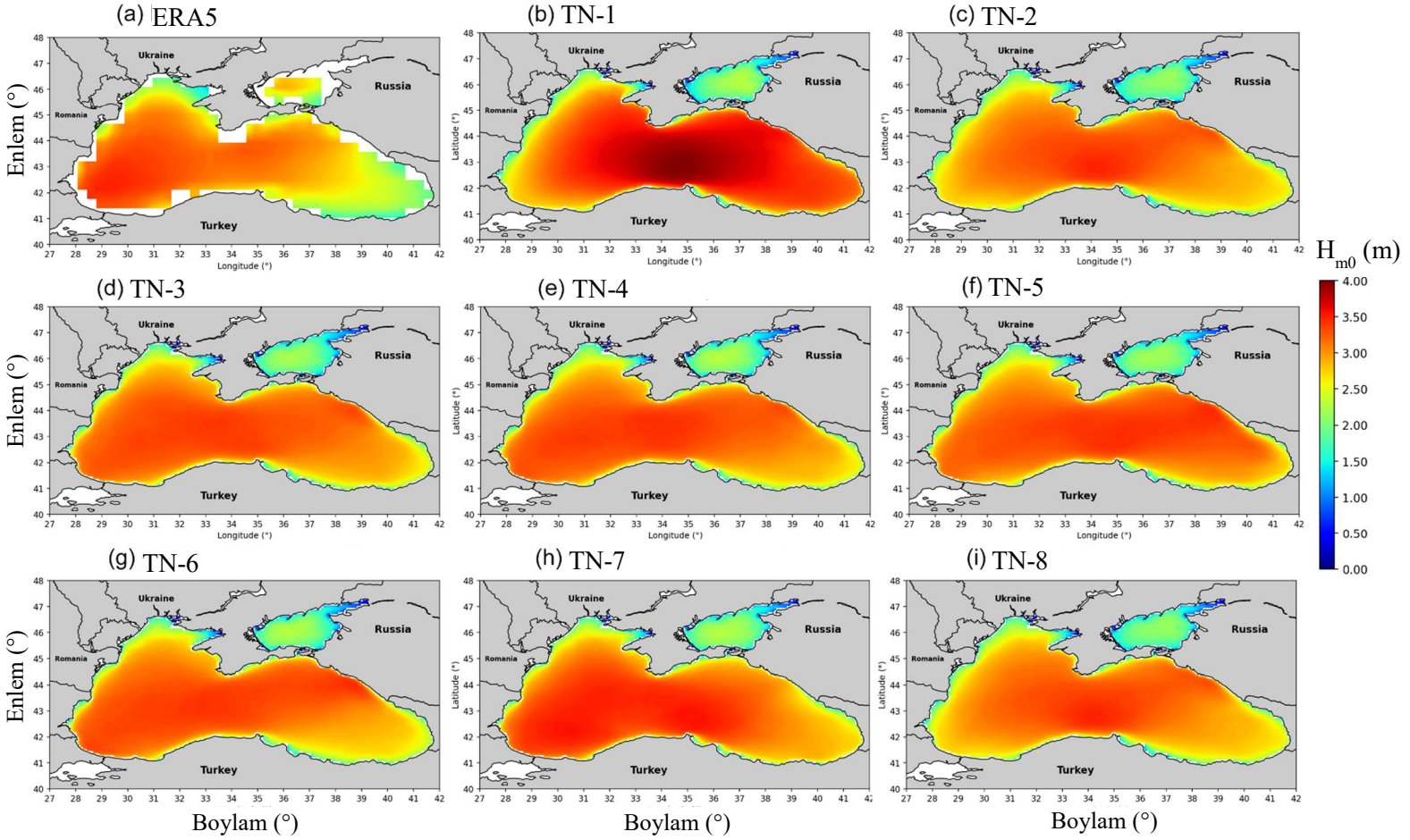


Şekil 4.4. ERA5 yıllık H_{m0} ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

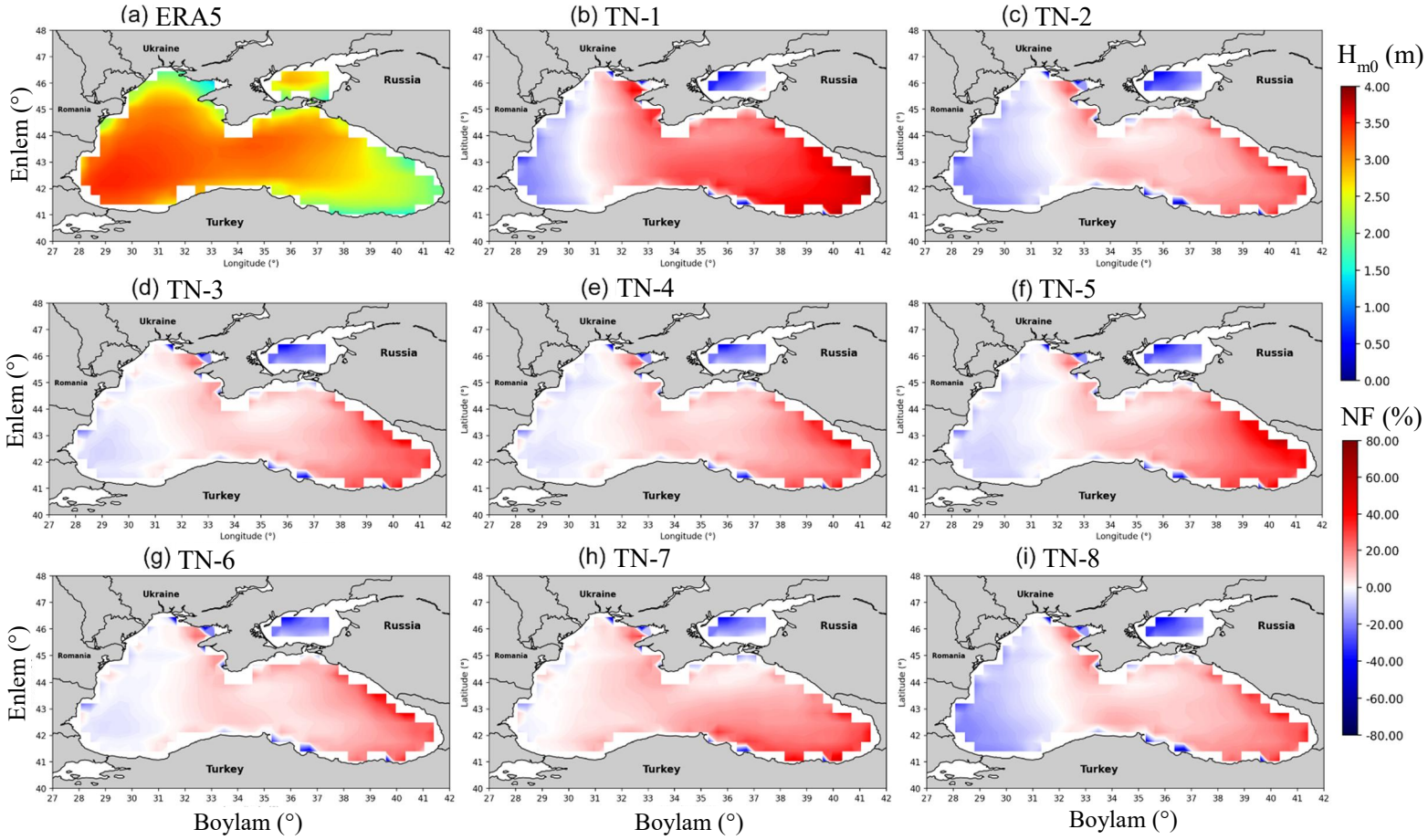
4.1.4. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık H_{99} ortalamalarına karşı performansları

Karadeniz'de yüksek H_{m0} değerlerinin dalga simülasyonları tarafından temsil kabiliyetlerini görmek için dalga yüksekliklerinin %99'luk dilimdeki değerleri değerlendirilmiştir. Yıllık en büyük H_{m0} değerleri yıldan yıla fazla değişkenlik gösterdiği için iklim değişikliği analizlerinde belli bir yüzdelik dilimdeki değerler irdelenmektedir. Küresel ölçekte gerçekleştirilen çalışmalarda çoğunlukla %90'lık veya %95'lik dilimdeki değerler incelenmiştir. Karadeniz'de bu değerler düşük kaldığı için, mümkün olduğunca en büyük değere yaklaşmak amacıyla yıllık %99'luk H_{m0} değerleri hesaplanarak ilgili periyot için bu değerlerin ortalamaları değerlendirilmiştir. Topluluk üyelerinin ve ERA5 yeniden analizinin yıllık %99'luk H_{m0} değerlerinin ortalamaları Şekil 4.5'te sunulmaktadır. ERA5'in %99'luk dilimdeki H_{m0} (kısaca H_{99} olarak isimlendirilmekte) ortalamaları (Şekil 4.5 a), yıllık H_{m0} ortalamalarına benzer bir alansal iklim deseni göstermektedir. ERA5 H_{99} ortalamaları Karadeniz'in batısında en fazla 3,4 metre civarında görülmüştür. Topluluk üyelerinin çoğunda, 3,5 metreye ulaşan H_{99} ortalamaları, havza genelinde ERA5'ten daha simetrik bir dağılım göstermektedir. Diğer topluluk üyelerinden aykırı olarak yine TN-1 (Şekil 4.5 b), 4 metreye varan H_{99} ortalamaları göstermekte ve Karadeniz'in doğu bölgesinde batı bölgesine göre daha yüksek H_{99} ortalamaları sunmaktadır.

ERA5 H_{99} ortalamalarına kıyasla topluluk üyelerinin H_{99} ortalamalarının NF değerleri Şekil 4.6'da alansal haritalarla sergilenmektedir. Sekiz topluluk üyesi Karadeniz'in doğusunda H_{99} ortalamalarını yüksek tahmin etmiş; batısında ya ERA5'e yakın ya da ERA5'te düşük tahminde bulunmuşlardır. Karadeniz'in doğu bölgesinde ERA5 H_{99} ortalamaları 2 m civarında değerler gösterirken, topluluk üyeleri bu değerleri %30 ila %40 arasında artırma eğilimindedir. TN-1 (Şekil 4.6 a), havzanın H_{99} ortalamalarının yüksek değerlerini ERA5'ten daha doğuya kaydırarak, havzanın doğusunda diğer topluluk üyelerine kıyasla doğuda daha belirgin bir yüksek tahmin, batı da daha belirgin bir düşük tahmin göstermektedir. Doğu Karadeniz bölgesinin tamamında %30'un üzerinde, batısında ise -%20'ye ulaşan NF değerleri vermektedir. TN-2 (Şekil4.6 c) ve TN-8 (Şekil4.6 i), Karadeniz'in güneybatı kesiminde TN-1'e yakın düşük tahmin gösteren (yaklaşık -%15) topluluk üyeleri olmuştur. ERA5 ile karşılaştırıldığında aşırı H_{m0} ortalamaları için daha iyi performansı gösteren üyeler: TN-3 (Şekil4.6 d), TN-4 (Şekil4.6



Şekil 4.5. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamaları



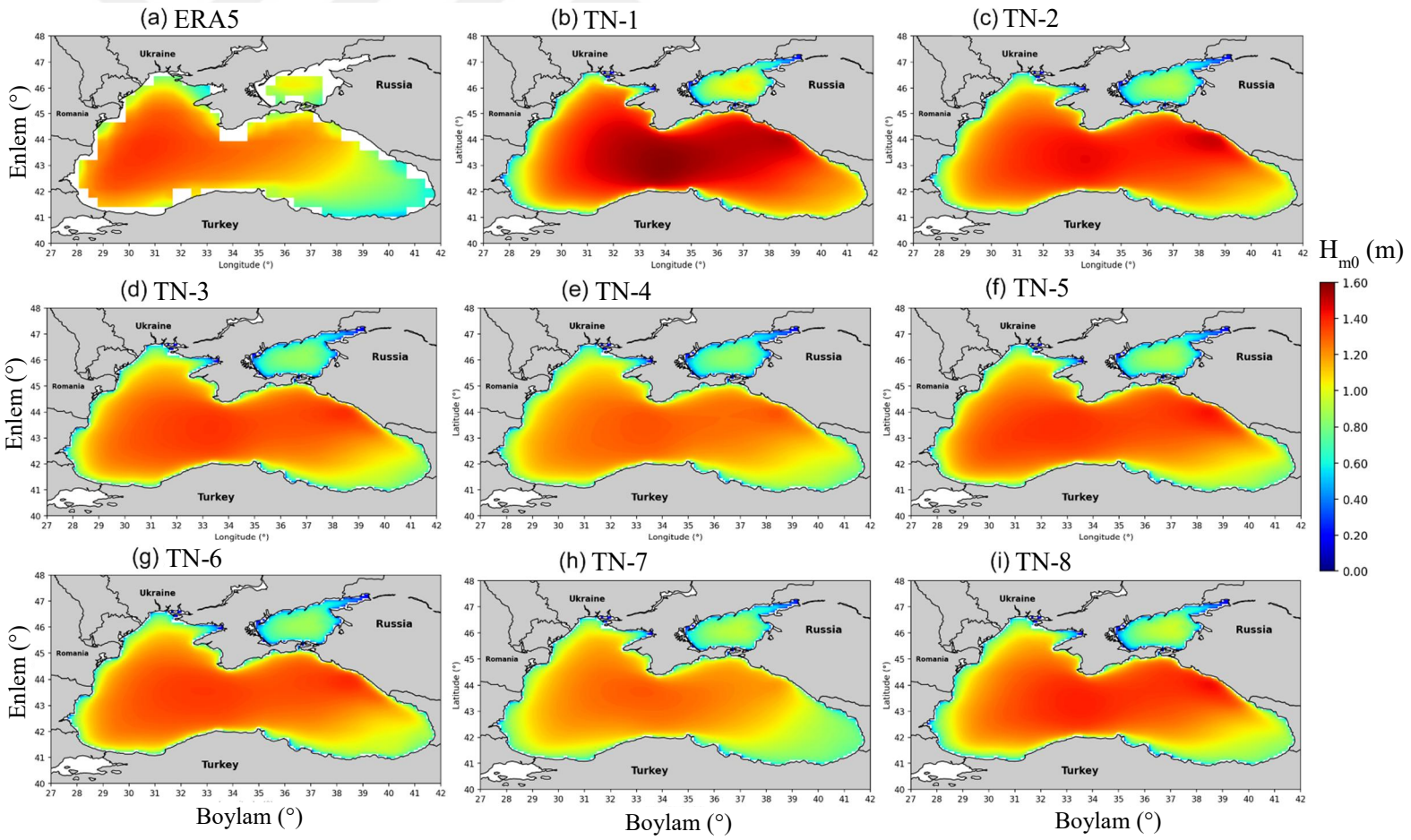
Şekil 4.6. ERA5 yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 yıllık H_{m0} %99'luk dilim değerlerinin ortalamalarına göre alansal NF (%) haritalar

e), TN-6 (Şekil4.6 g) ve TN-7 (Şekil4.6 h) olarak gözlenmiştir. Bu üyeler kıyı şeridine yakın bölgeler haricinde havzanın genelinde ERA5'e göre %15 altı NF değerlerine sahiptir. Özellikle, ERA5'in en yüksek H_{99} ortalamalarına sahip olduğu güneybatı bölgesinde sıfıra yakın NF göstermektedirler. ERA5'e kıyasla topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamalarındakine benzer şekilde, Azak Denizi'nde H_{99} ortalamalarını karalı bir şekilde düşük tahmin ettikleri gözlenmiştir.

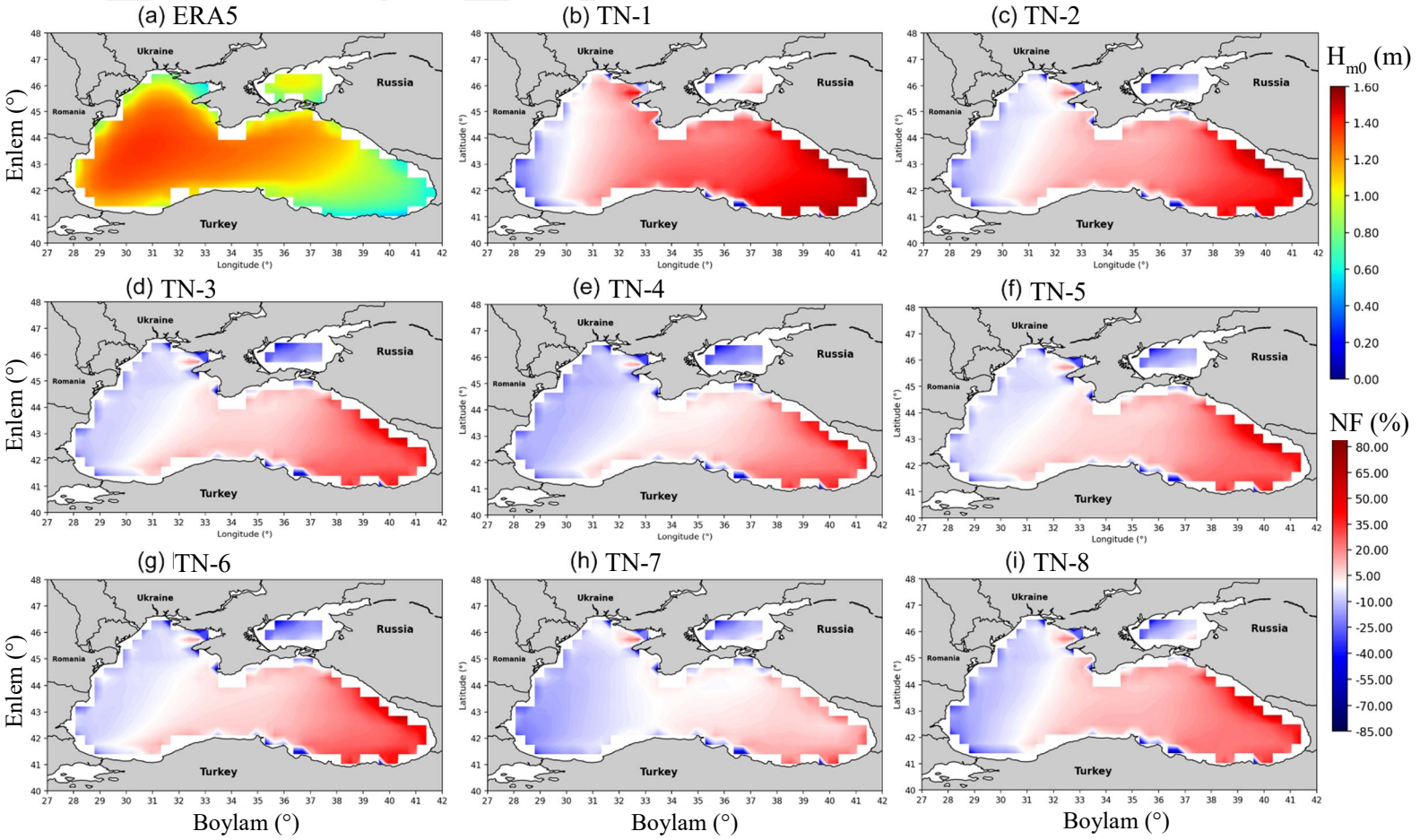
4.1.5. Topluluk üyelerinin ERA5 mevsimlik H_{m0} ortalamalarına karşı performansları

H_{m0} ortalamalarının yıllık değerlendirilmesinin yanı sıra mevsimlik H_{m0} ortalamaları da değerlendirilmiştir. ERA5 ve topluluk üyelerinin kış mevsimi H_{m0} ortalamaları alansal haritalar halinde Şekil 4.7'de sunulmaktadır. Kış mevsimi H_{m0} ortalamaları, ERA5 ve topluluk üyeleri için yıllık ortalamalardan ve diğer mevsimlerin ortalamalarından daha yüksek değerler göstermektedir. ERA5'in kış mevsimi için ortalamalarının (Şekil 4.7 a) yüksek olduğu bölge yine Karadeniz'in batısı olmuştur ve 1,35 m civarındadır. Topluluk üyelerinde, kış mevsimi H_{m0} ortalamaları için farklılık gösteren üyeler TN-1 ve TN-2 olmuştur. TN-1 (Şekil 4.7 b) en büyük ortalama değerlerini, Karadeniz'in merkezinde ve kuzey doğu bölgesinde 1.5 metreyi aşan dalgalar ile göstermektedir. TN-2 (Şekil 4.7 c) de benzer şekilde, merkez bölgesinde ve kuzey doğu kıyılarına yakın bir bölgede yerel olarak 1.5 m civarında H_{m0} ortalamaları vermektedir. Diğer topluluk üyeleri, ERA5'e daha yakın ortalama değerleri vermekte ancak, ortalamaların alansal dağılımı bakımından daha merkeze kaymış şekilde bir iklim deseni göstermektedir.

Şekil 4.8 topluluk üyelerinin kış mevsimi H_{m0} ortalamalarının ERA5 ortalamalarına göre alansal NF haritalarını göstermektedir. NF haritalarında da TN-2 (Şekil 4.8 c) ve özellikle TN-1 (Şekil 4.8 b) üyelerinin, diğer topluluk üyelerinden farklı karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Topluluk üyelerinin tamamının, ERA5'e kıyasla, Karadeniz'in doğusunda ortalamaları yüksek tahmin etme, batısında düşük tahmin etme eğiliminde olduğu görülmektedir. TN-1 ve TN-2 için, Karadeniz'in doğusunda tüm üyelerin ortalamaları yüksek tahmin etme eğiliminin (%15-%20 bandında) batıya doğru daha geniş alanlara yayıldığı görülmektedir. Doğu kıyılarına yakın bölgelerde TN-1'in ERA5



Şekil 4.7. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} kış mevsimi ortalamaları

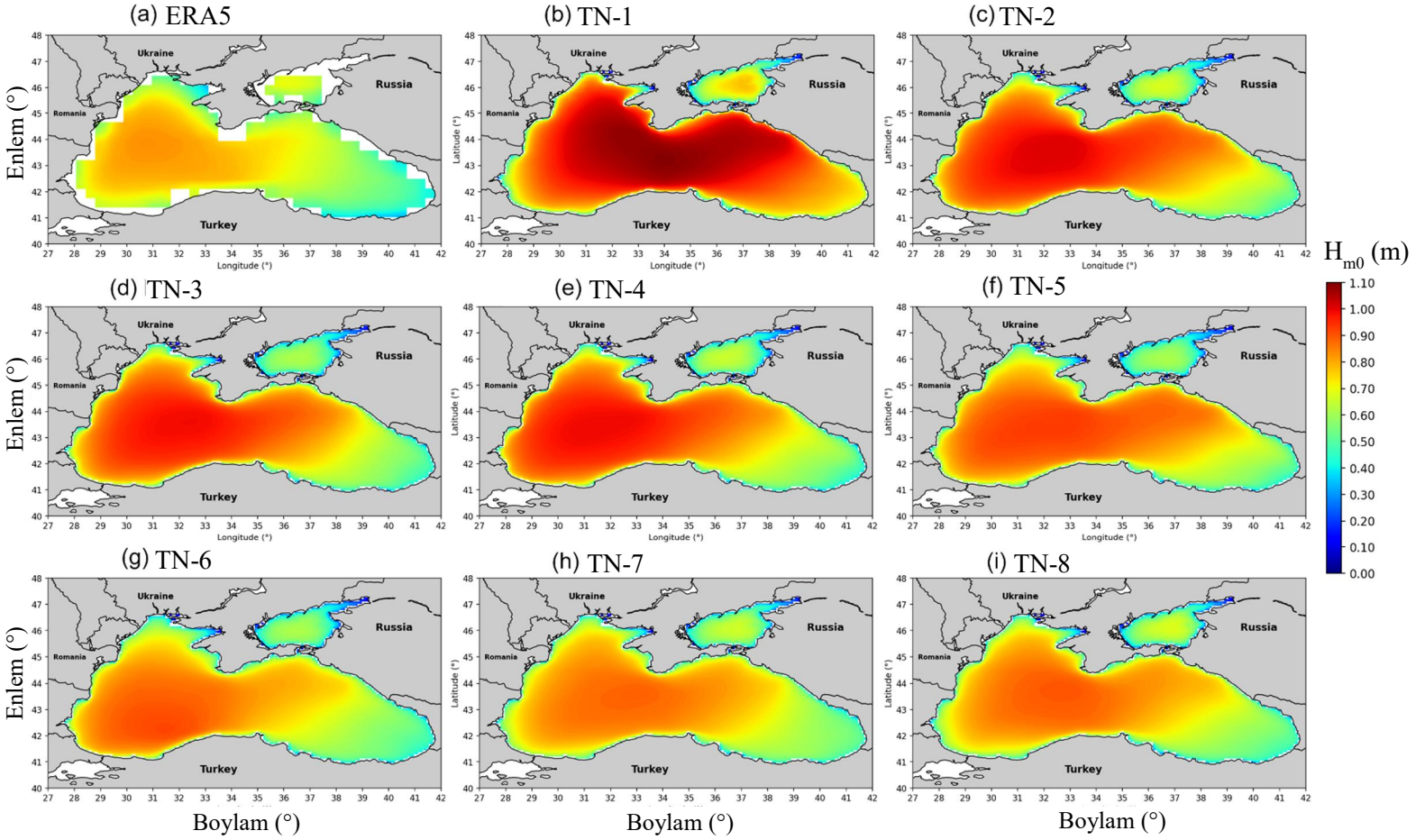


Şekil 4.8. ERA5 H_{m0} kış ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} kış ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

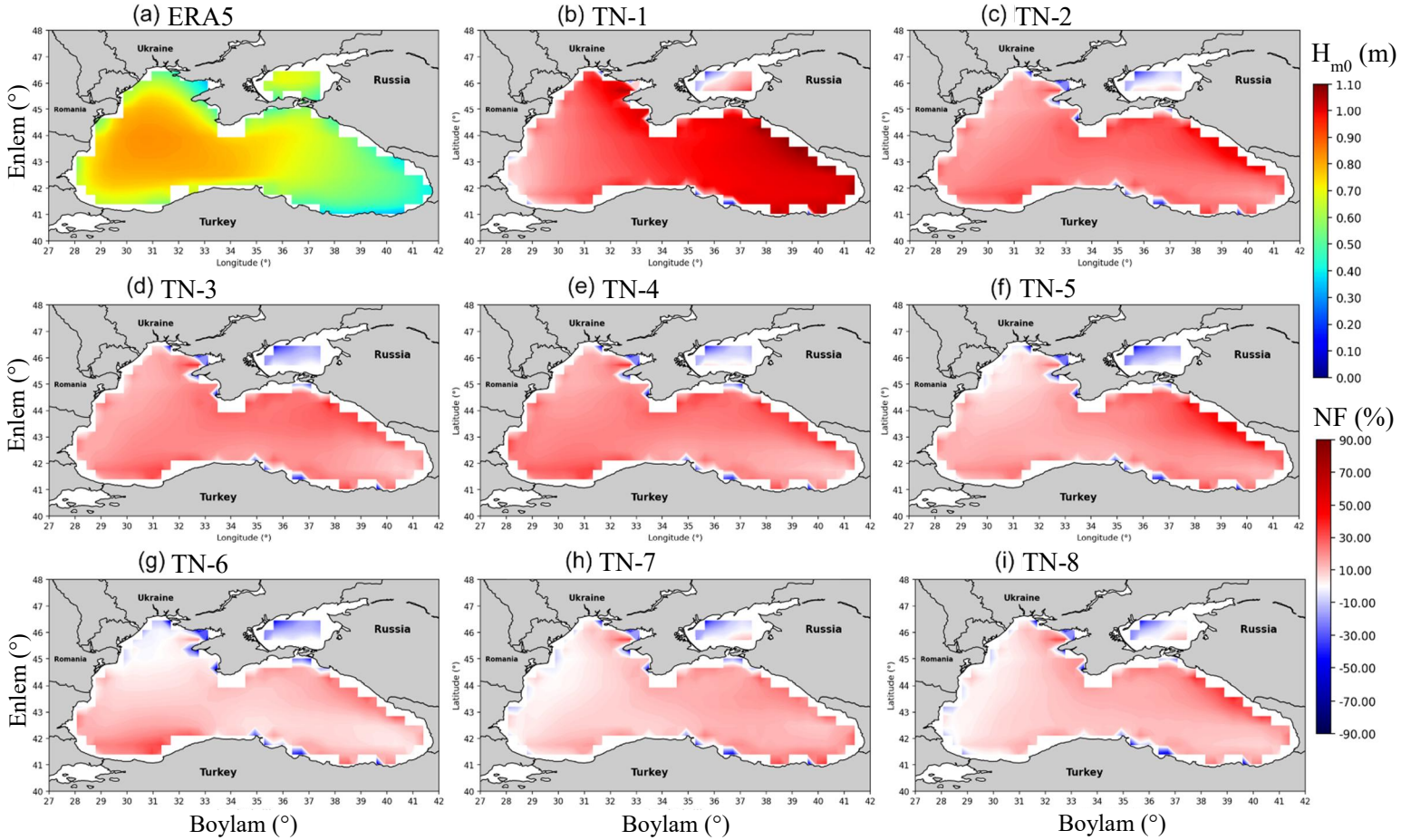
ile farklarının %50'yi geçtiği görülmektedir. Azak Denizi'nde TN-1 hariç, diğer topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamalarını ERA5'e göre düşük tahmin etme eğiliminde olduğu görülmektedir. TN-1, Karadeniz'de olduğu gibi, Azak Denizi'nin doğu bölgesinde yüksek tahmin, batı bölgesinde düşük tahmin eğiliminde olduğu görülmüştür.

ERA5 ve topluluk üyelerinin havzadaki H_{m0} ortalamalarının alansal haritaları Şekil 4.9'da sunulmaktadır. ERA5 H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.9 a) tüm havza boyunca yıllık ortalamalara ve kış mevsimi ortalamalarına göre daha düşüktür ve havzanın batısındaki en yüksek ortalama değer 0,83 metre olarak gözlenmiştir. Bütün topluluk üyelerinde ilkbahar mevsimi H_{m0} ortalamalarının alansal iklim desenleri kış mevsimindekine benzerdir. Yalnızca TN-2 (Şekil 4.9 c) üyesinin, kış mevsiminde kuzey doğu kıyılarına yakın bir bölgede yerel olarak gösterdiği yüksek ortalama değerleri aynı bölge için ilkbahar mevsiminde gözlenmemiştir. TN-1 (Şekil 4.9 b), yıllık ortalamalar ve kış mevsimi ortalamalarında gözlendiği gibi, ilkbahar mevsimi ortalamalarında da diğer topluluk üyelerinden ayrışan değerlere ve iklim desenine sahip üye olarak göze çarpmaktadır. TN-1 ilkbahar mevsimi için yüksek H_{m0} ortalamalarını, havzanın merkezinden doğru ve batı yönlerine genişlemiş şekilde ve yaklaşık 1,1 m ile vermektedir.

İlkbahar mevsimi için havzada, topluluk üyelerinin ERA5 H_{m0} ortalamalarına kıyasla NF değerlerini gösteren haritalar Şekil 4.10'da sunulmaktadır. Haritalar, topluluk üyelerinin ilkbaharda tüm Karadeniz'de (Azak Denizi hariç) dalga yüksekliklerini olduğundan fazla tahmin etme eğiliminde olduklarını göstermektedir. Azak Denizi'nde yerel yüksek tahminler görülse de H_{m0} ortalamaları üyeler tarafından ağırlıklı olarak düşük tahmin edilmiştir. Topluluk üyelerinin Karadeniz'de yüksek tahmininin, ERA5'in %20'sinden az olduğu görülürken; TN-2'de NF değerleri (Şekil 4.10 c) %30'lara ulaşmakta ve TN-1'de farklar (Şekil 4.10 b) %50 üzerinde çıkmaktadır. Karadeniz'in doğu kıyılarına yakın bölgelerde TN-1 için %80'lik yüksek tahmini gösteren NF değerleri gözlenmektedir. İlkbahar mevsimi için, ERA5'e en yakın uyumu, havzanın genelinde sıfır ile %10 arasındaki farklar gösteren TN-7 ve TN-8 topluluk üyeleri göstermiştir.



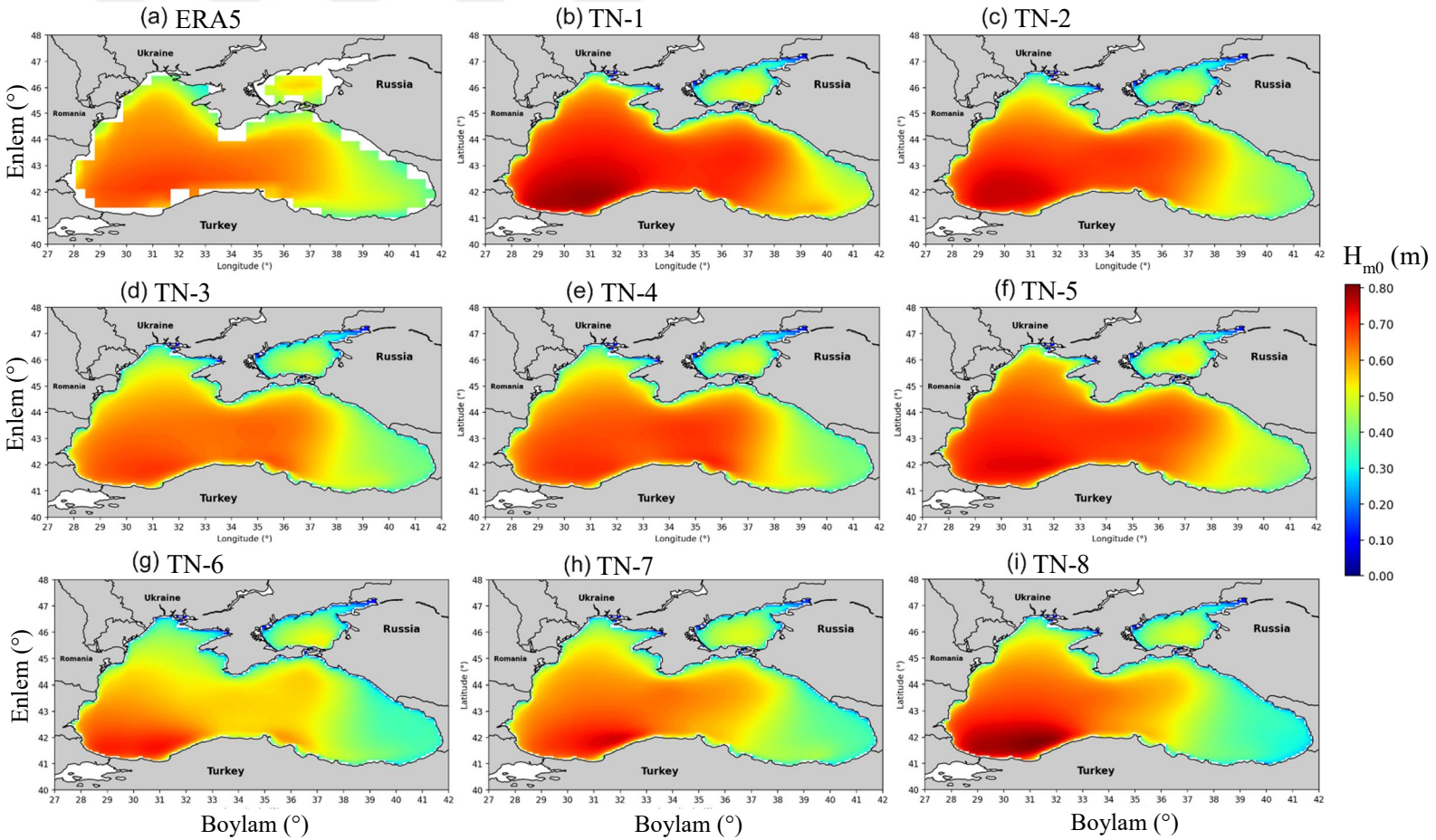
Şekil 4.9. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} ilkbahar mevsimi ortalamaları



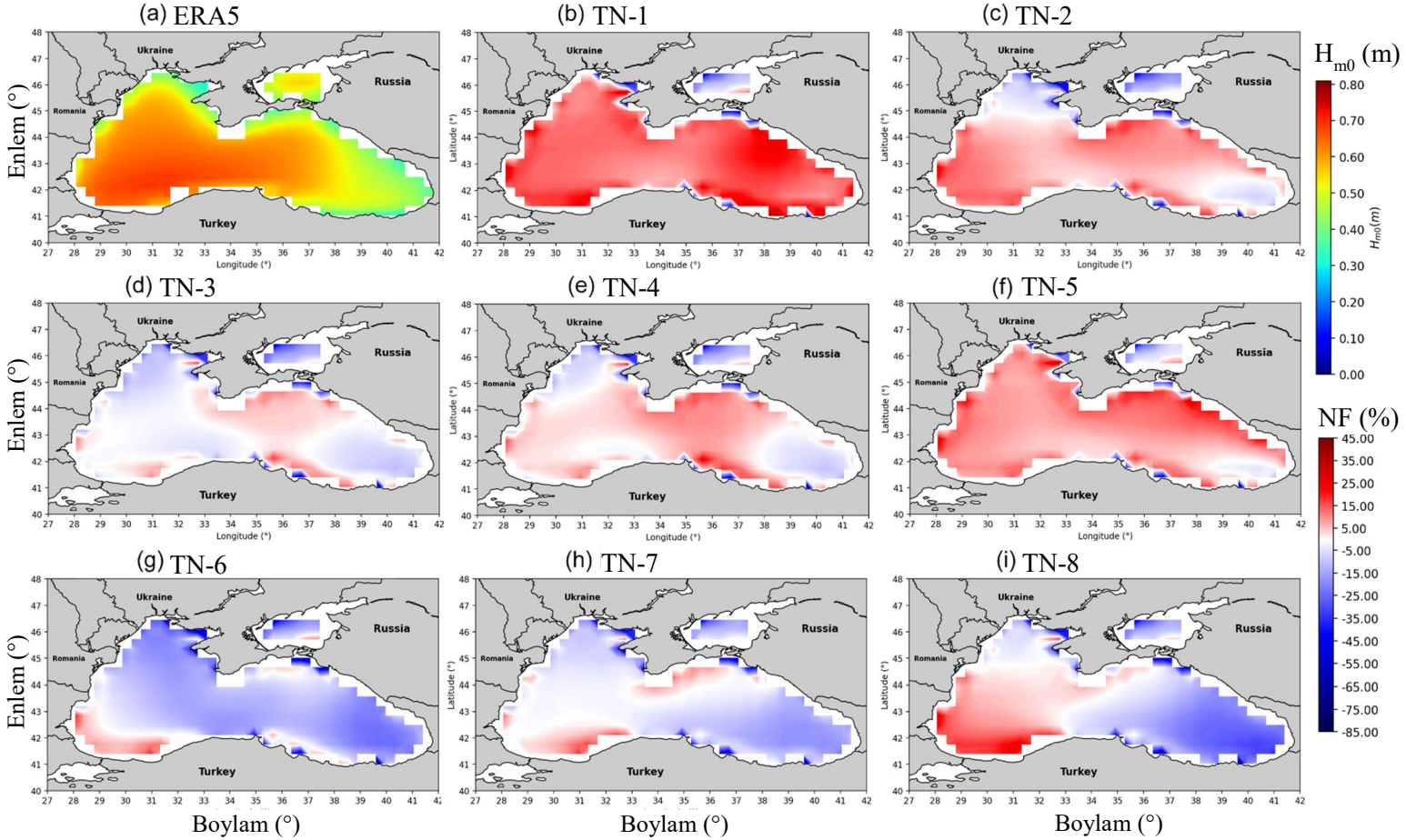
Şekil 4.10. ERA5 H_{m0} ilkbahar ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} ilkbahar ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

H_{m0} ortalamalarının en düşük olarak gözlendiği mevsim olan yaz için, ERA5 ve topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamaları Şekil 4.11'de sunulmaktadır. ERA5 yaz mevsimi H_{m0} ortalamaları havza genelinde 0,4 m ile 0,7 m arasında değişmektedir. Topluluk üyelerinin birbirinde en fazla ayrıştığı mevsim yaz olmuştur. Bazı üyelerde (TN-1, 2, 5, 6, 7, 8) en yüksek ortalamalar güneybatı bölgesinde görülmektedir. Ancak, bu üyeler arasında, gözlenen değerler ve alanın genişliği bakımında farklılıklar bulunmaktadır. TN-1, TN-2 ve TN-8 H_{m0} ortalamaları daha geniş bir alanda 0,8 m civarına ulaşmaktadır. Diğerlerinde, daha dar bir alanda daha düşük ortalamalar görülmüştür. Bazı üyelerde ise (TN-3, 4), en yüksek ortalamaları, Karadeniz'in güneybatı bölgesi ile birlikte merkez bölgesi daha homojen bir şekilde kapsamaktadır.

Topluluk üyelerinin yaz mevsimi H_{m0} ortalamalarındaki aykırılıklar, Şekil 4.12'de verilen NF haritalardan da anlaşılabilmektedir. TN-1 (Şekil 4.12 b), TN-2 (Şekil 4.12 c) ve TN-5 (Şekil 4.12 f), H_{m0} ortalamalarını Karadeniz havzasının genelinde yüksek tahmin etmiştir. TN-6 (Şekil 4.12 g) ve daha düşük NF değerleri ile TN-3 (Şekil 4.12 d) ve TN-7 (Şekil 4.12 h), havzanın daha büyük bir kısmında ERA5'e göre daha düşük tahminler vermektedir. TN-3 ve TN-6, %5 altı NF değerleri göstererek, yaz ortalamalarında ERA5 ile farkları en az olan üyeler olmuştur. TN-4 (Şekil 4.12 e), havza genelinde ağırlıklı olarak H_{m0} ortalamalarını yüksek tahmin etmesine rağmen, NF değerleri çoğunlukla %10'un altında kalmıştır. TN-8 (Şekil 4.12 i), Karadeniz'de genel H_{m0} ortalamalarının alansal iklim deseninin tersine, doğuda düşük tahmin ve batı bölgelerinde yüksek tahmin eğiliminde görülmüştür. Topluluk modelleri içerisinden Karadeniz havzasının tamamında H_{m0} ortalamalarını yüksek tahmin etme eğilimi gösteren üyeler olmasına rağmen, Azak Denizi özelinde bakıldığında, bütün topluluk üyelerinin buradaki ortalamaları ERA5'ten daha düşük verdiği görülmüştür.



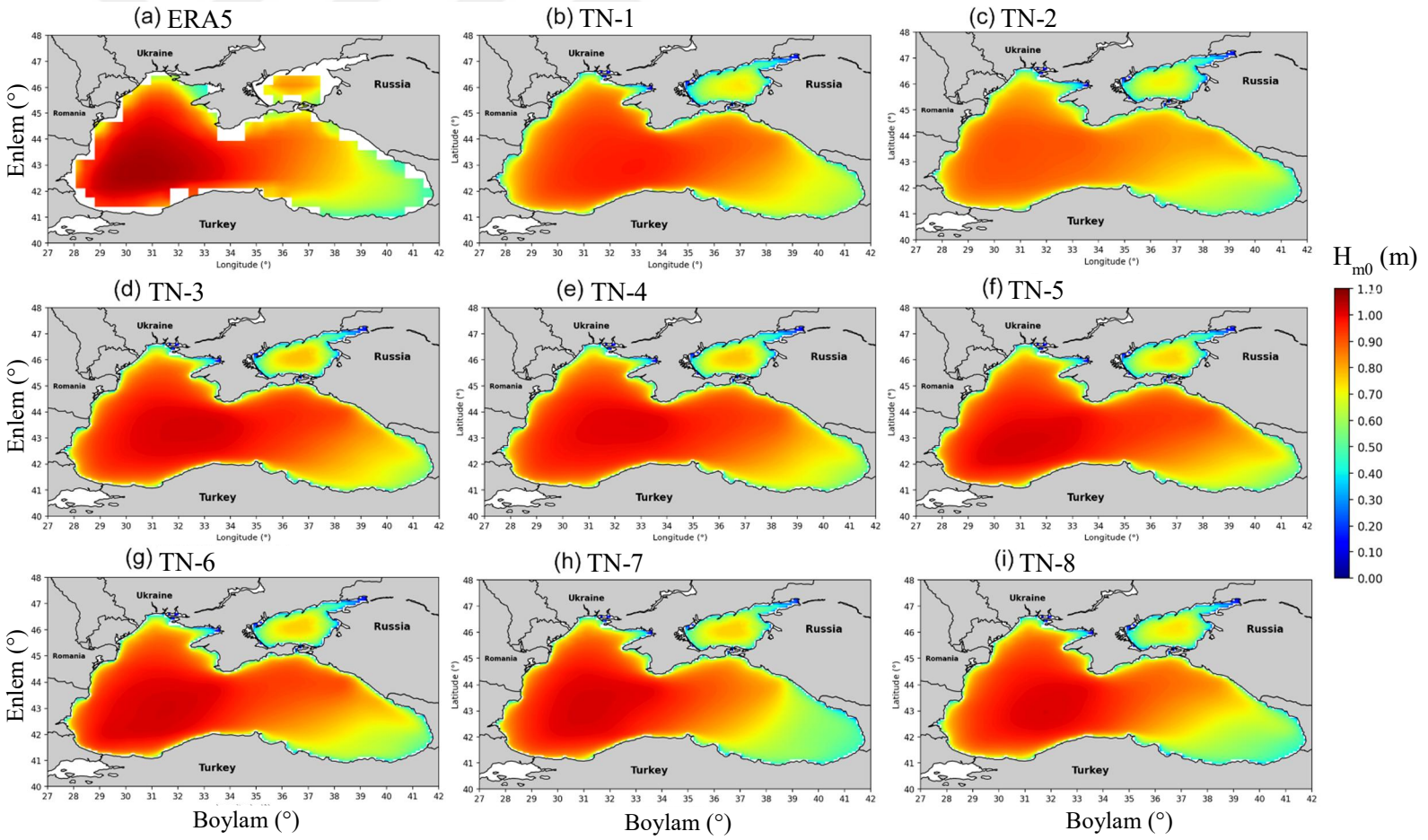
Şekil 4.11. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} yaz mevsimi ortalamaları



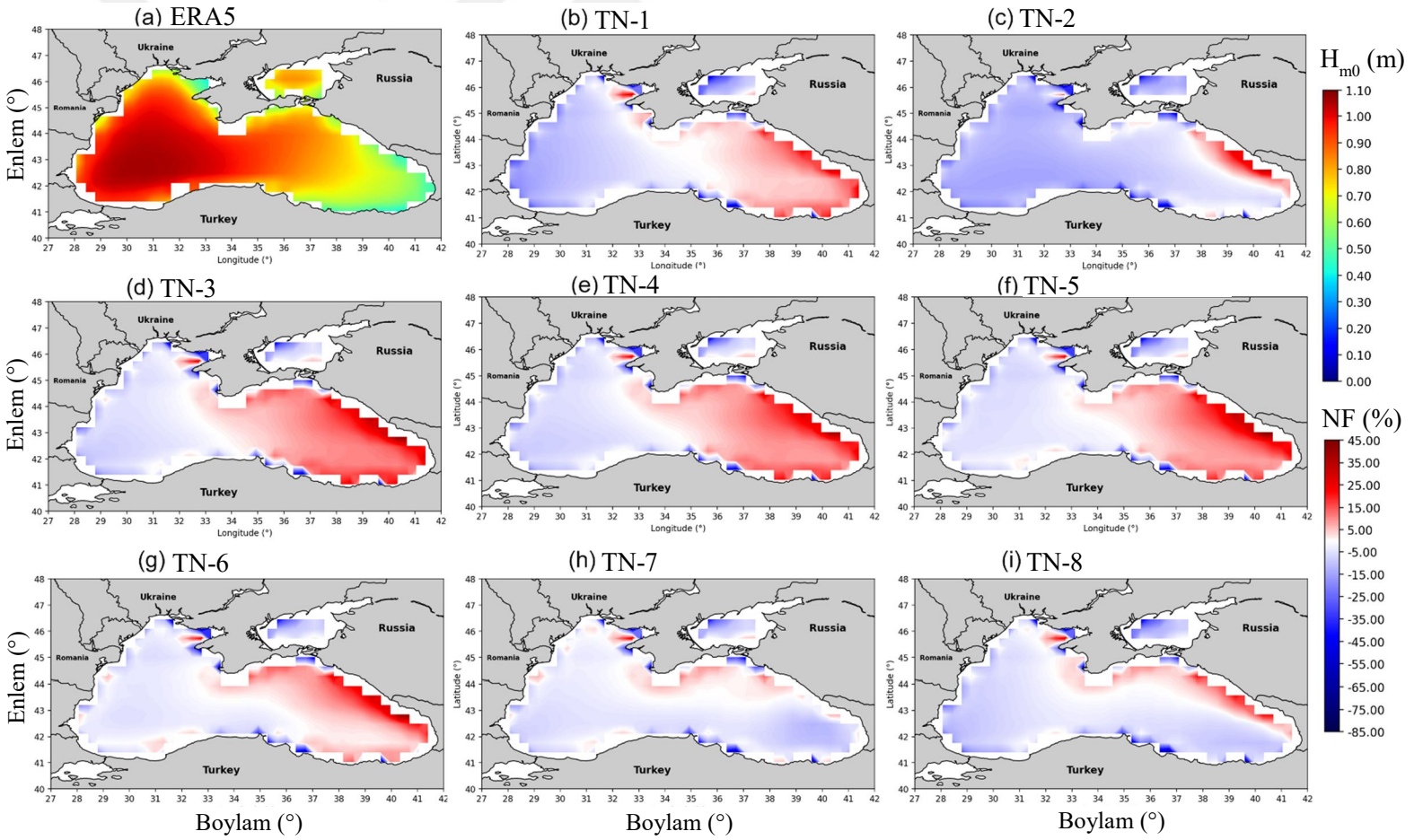
Şekil 4.12. ERA5 H_{m0} yaz ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} yaz ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

Topluluk üyelerinin mevsimlik H_{m0} ortalamaları son olarak sonbahar için Şekil 4.13'de verilen alansal haritalar ile değerlendirilmektedir. ERA5 (Şekil 4.13 a) ve topluluk üyelerinin (Şekil 4.13 b - i) sonbahar H_{m0} ortalamalarının alansal iklim desenleri yıllık ortalamaların deseni ile benzeşmektedir. ERA5 ve topluluk üyelerinin çoğunda, sonbahar H_{m0} ortalamaları yıllık ortalamalara göre biraz daha yüksek görülmüştür. Yalnızca, TN-1 (Şekil 4.13 b) ve TN-2 (Şekil 4.13 c) üyelerinde sonbahar H_{m0} ortalamaları, yıllık ortalamalara nazaran daha düşük değerler göstermektedir. ERA5 H_{m0} ortalamalarının en yüksek değerleri, batı bölgesinin merkezinde 1 m ile 1,1 m arasında değişmektedir. TN-1 ve TN-2 dışındaki topluluk üyelerinde en yüksek H_{m0} ortalamalarının, ERA5'in yüksek değerlerinin konumuna göre biraz daha merkeze kaymış konumda 0,9 m ile 1 m arasında değiştiği görülmektedir. TN-1 ve TN-2 üyelerinde ise H_{m0} ortalamalarının en yüksek değerleri 0,9 m civarında ve Karadeniz'in batısından merkezine kadar olan bölgelerde daha homojen bir karakteristikte olduğu gözlenmektedir.

Topluluk üyelerinin sonbahar H_{m0} ortalamalarının ERA5 ortalamalarına göre alansal NF haritaları Şekil 4.14'de verilmektedir. Topluluk üyelerinin tamamı, ERA5'in en yüksek ortalamalara sahip olduğu Karadeniz'in batı bölgesinde H_{m0} ortalamalarını düşük tahmin etme eğilimi göstermektedir. TN-1 (Şekil 4.14 b) ve TN-2 (Şekil 4.14 c) bu bölgede ERA5'e göre, -%15 civarında NF değerine sahipken; diğer topluluk üyeleri -%5 ve altı NF değerleri göstermektedir. TN-7 (Şekil 4.14 h) ve TN-8 (Şekil 4.14 i) Karadeniz'in doğu bölgesinde de batı bölgesinde olduğu gibi H_{m0} ortalamalarını sıfıra yakın olmak kaydıyla düşük tahmin etmektedir. Havza genelinde kıyıya yakın bölgeler haricinde, %5'in altında NF değerleri göstererek bu mevsim için ERA5 ile en iyi uyum içerisindedir. Doğu bölgesinin büyük bir kısmında H_{m0} ortalamalarını ERA5'e göre daha düşük tahmin eden diğer bir üye de TN-2 olmuştur. Yalnız, düşük tahmin oranı -%5'e ulaşmakta ve kuzeydoğu kıyılarında %20'yi bulan yüksek tahmin eğilimi göstermektedir. Geri kalan topluluk üyeleri Doğu Karadeniz'de dalga yüksekliklerini olduğundan fazla tahmin etmiştir. Yıllık ve diğer mevsimlik H_{m0} ortalamalarının kıyaslamasında olduğu gibi, topluluk üyeleri Azak Denizi'nde H_{m0} ortalamalarını ERA5 ortalamalarına göre daha düşük tahmin etme eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.13. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} sonbahar mevsimi ortalamaları

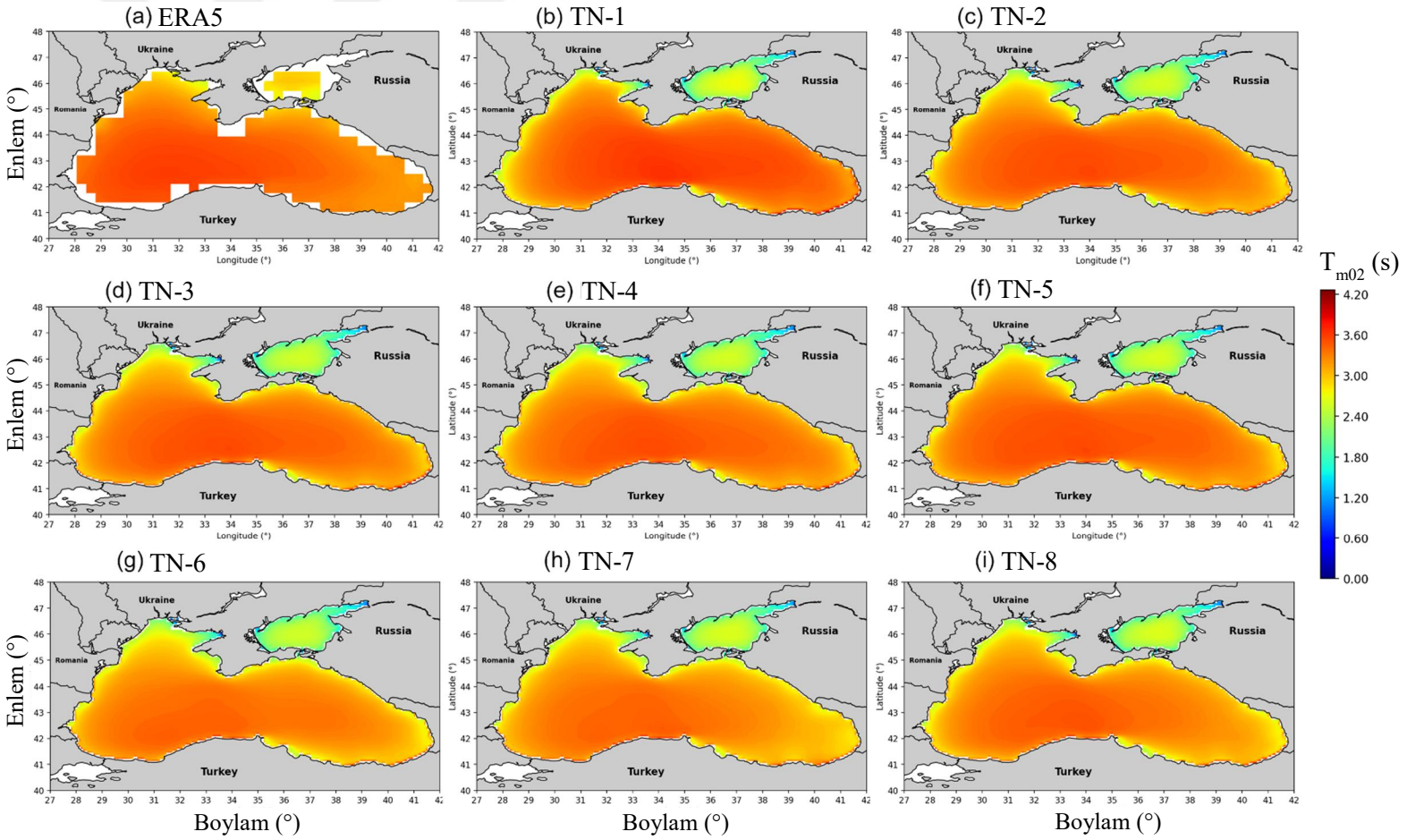


Şekil 4.14. ERA5 H_{m0} sonbahar ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} sonbahar ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

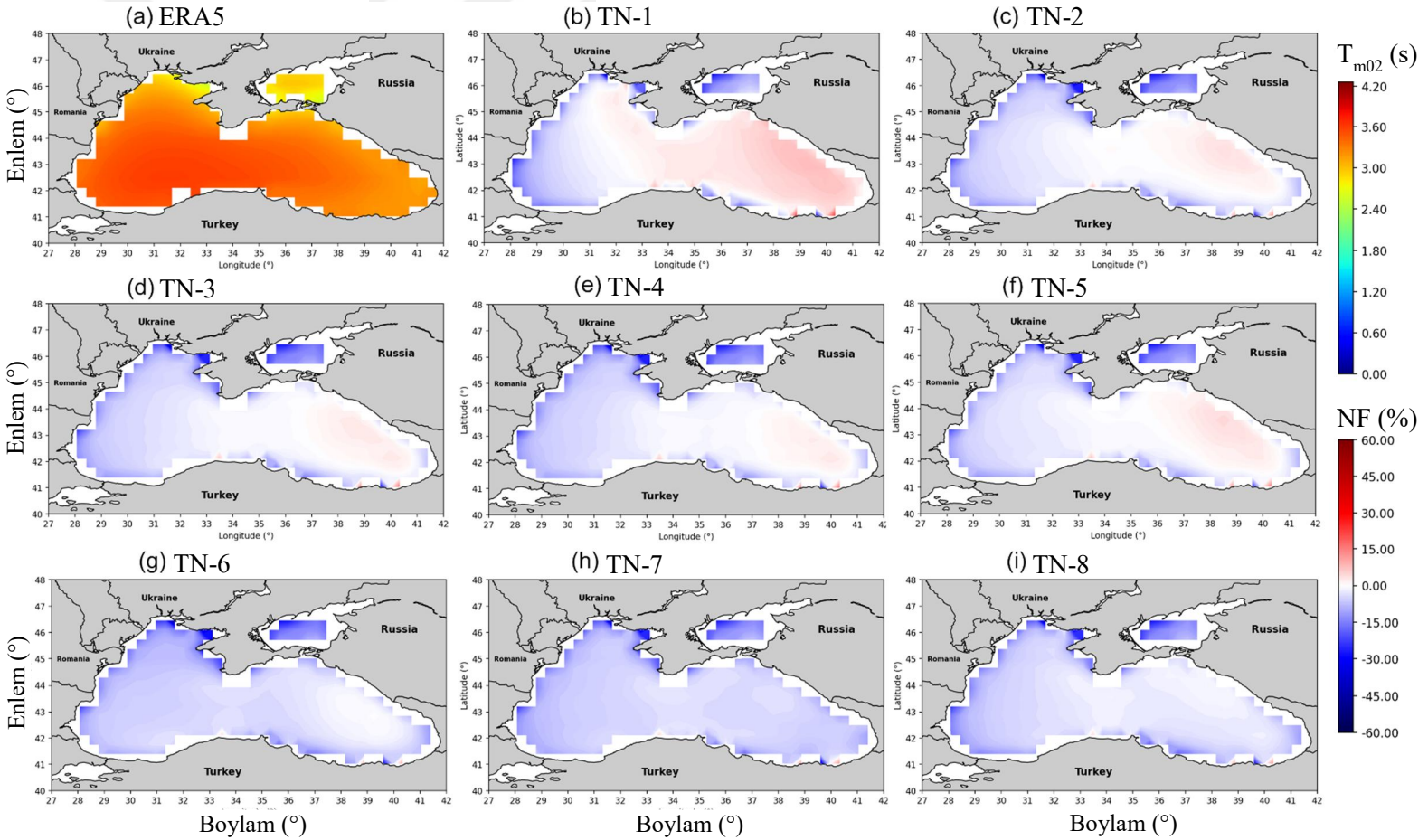
4.1.6. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık T_{m02} ortalamalarına karşı performansları

H_{m0} yıllık ve mevsimlik ortalamalarının değerlendirmesinin ardından, topluluk üyelerinin T_{m02} ortalamalarının ERA5 T_{m02} ortalamaları ile kıyaslanması Şekil 4.15'te verilmektedir. ERA5 T_{m02} ortalamalarının (Şekil 4.15 a) havza genelinde 2,5 s ile 3,6 s arasında değiştiği gözlenmiştir. Her ikisi de sığ su bölgesi olan Azak Denizi ve Karadeniz'in kuzeybatı kıyılarında 3 s'nin altında T_{m02} ortalamaları görülmektedir. ERA5, Karadeniz'in güney batısında 3,6 s, güney doğusunda 3 s civarında T_{m02} ortalamaları göstermektedir. Topluluk üyelerinin T_{m02} ortalamaları, Karadeniz havzası genelinde daha homojen ve simetrik dağılım göstermektedir. TN-1 (Şekil 4.15 b) ve TN-2 (Şekil 4.15 c), T_{m02} ortalamalarını havza genelinde 3,4 – 3,5 s civarında, diğer üyeler ise, havza genelinde 3,2 s civarında vermektedir. Topluluk üyeleri Azak Denizi'nde T_{m02} ortalamalarını en fazla 2,5 saniye olarak göstermektedir.

Topluluk üyelerinin T_{m02} ortalamalarını ERA5 T_{m02} ortalamalarına göre NF değerlerini gösteren haritalar Şekil 4.16'da sunulmaktadır. T_{m02} ortalamaları için topluluk üyelerinin ERA5'ten farkları H_{m0} ortalamalarındaki farklara kıyasla havza genelinde daha az olduğu gözlenmiştir. Tüm topluluk üyeleri, Karadeniz genelinde ERA5 T_{m02} ortalamalarına kıyasla %15'ten daha az farklılıklar göstermektedir. TN-6 (Şekil 4.16 g), TN-7 (Şekil 4.16 h) ve TN-8 (Şekil 4.16 i), havzanı tamamında ERA5'e kıyasla T_{m02} ortalamalarını düşük tahmin etme eğilimindedir. Topluluk üyelerinden dördü (TN-2, TN-3, TN-4, TN-5) Karadeniz'in kuzeydoğu bölgesinde T_{m02} ortalamalarını ERA5 ortalamalarından biraz yüksek tahmin etse de sıfıra yakın NF değerleri ile ERA5'e benzerlik göstermektedir. TN-1 için T_{m02} ortalamalarını yüksek tahmin etme eğilimi, Karadeniz'in doğu bölgesinde ERA5'in %15'i kadardır ve Karadeniz'in merkezine doğru azalan ve sıfıra yaklaşan NF değerleri ile uzanmaktadır. ERA5 ve topluluk üyelerinin yıllık T_{m02} ortalamaları arasındaki yüksek farklar (-%40'a kadar) Azak Denizi'nde ve kıyıya yakın bölgelerde görülmektedir. Tablo 2'de T_{m02} ortalamaları için verilen topluluk üyelerinin M-puanları en düşük 700 (TN-6) ve en yüksek 740 (TN-5) değerleri arasında değişmektedir. Topluluk üyelerinin M-puanları arasındaki düşük farklılıklar, NF haritalarındaki farklılıkların az olması ile örtüşmektedir. Bu da topluluk üyelerinin Karadeniz'de T_{m02} ortalamalarını temsil etme kabiliyetlerinin benzer olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.15. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) yıllık T_{m02} ortalamaları

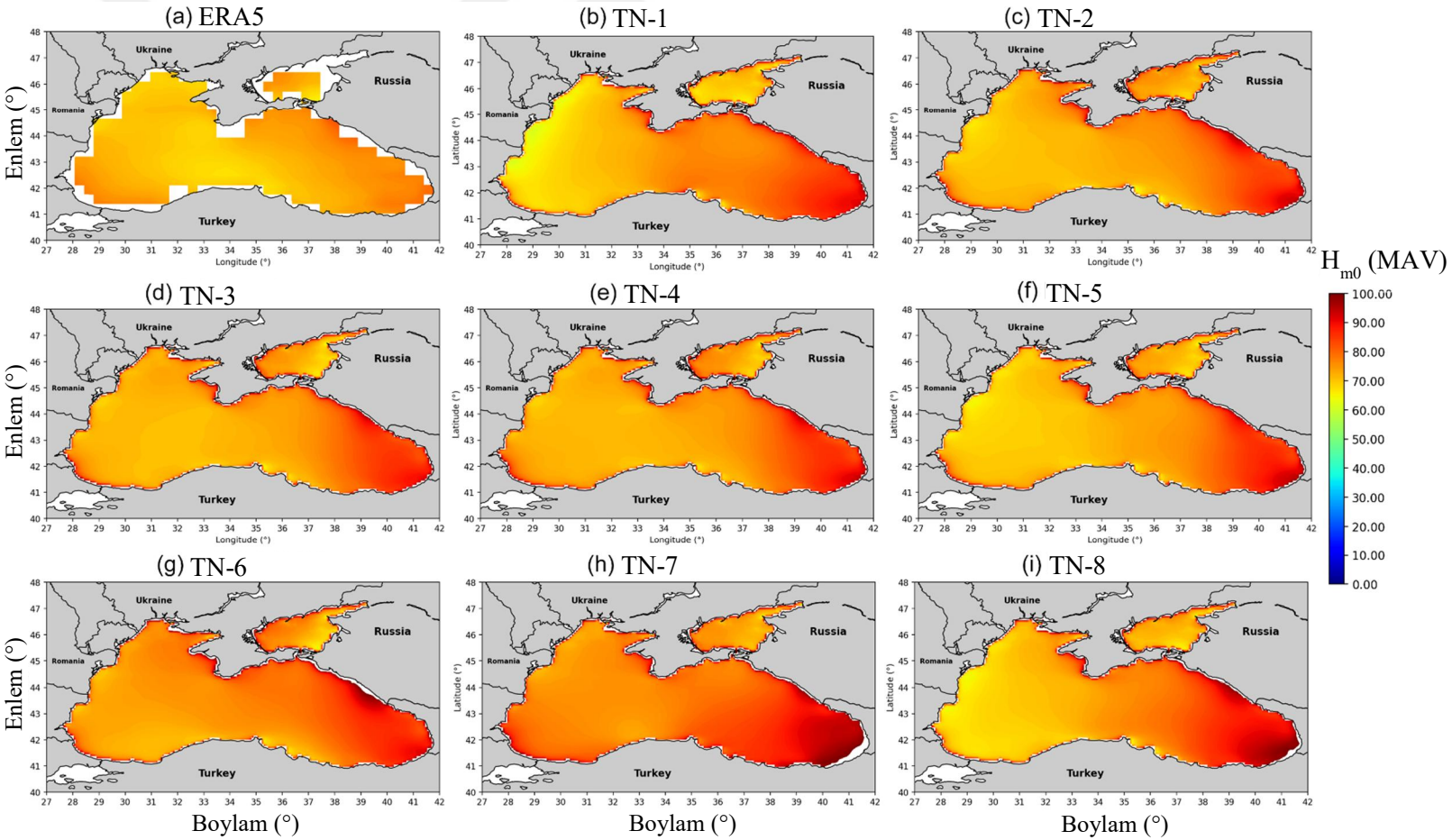


Şekil 4.16. ERA5 yıllık T_{m02} ortalamaları (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 T_{m02} ortalamalarına göre alansal NF (%) haritaları

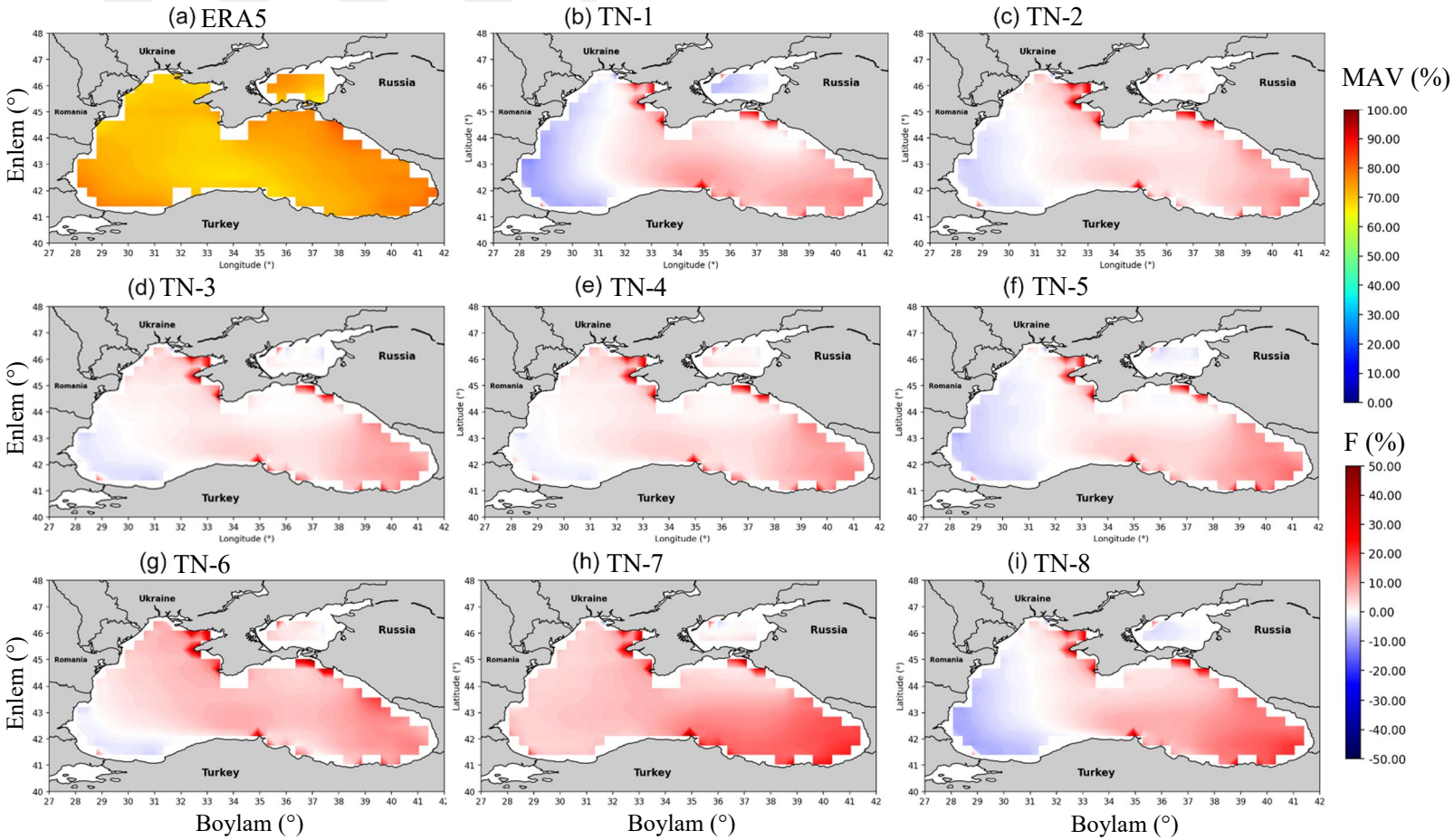
4.1.7. Topluluk üyeleri ve ERA5'in H_{m0} ortalama yıllık değişkenlikleri (MAV)

Topluluk üyelerinin yıllık H_{m0} ortalamaları ERA5 ile kıyaslanarak değerlendirilmesinin yanı sıra, 27 yıllık periyot boyunca yıl içerisindeki değişkenlikleri (MAV) Şekil 4.17'deki haritalar ile verilmektedir. ERA5 ve topluluk üyelerinin H_{m0} veri setlerinin MAV değerleri (%) Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır. H_{m0} verilerinin MAV değerleri ERA5 yeniden analizi (Şekil 4.17 a) ve topluluk üyeleri (Şekil 4.17 b - i) için Karadeniz genelinde %70'in üzerinde olduğu görülmektedir. ERA5 belirgin dalga yükseklikleri havzanın merkezinde %70-75 MAV aralığındayken; bu değerler havzanın güneybatı, doğu ve kuzeydoğu bölgelerinde biraz artmaktadır (%75-85). Topluluk üyelerinin H_{m0} verilerinin MAV değerleri havza boyunca ERA5'e kıyasla biraz daha fazla değişkenlik göstermektedir. Topluluk üyeleri belirgin dalga yüksekliği için, Karadeniz'in batı kıyılarından (%60 65) doğu kıyılarına doğru (%85-90) artan MAV değerleri sunmaktadır. Bu sonuçlar, ERA5'in belirgin dalga yüksekliklerinin havza genelinde benzer değişkenliğe sahip olduğunu, topluluk üyelerinin belirgin dalga yüksekliklerinin ise Karadeniz'in doğusunda daha yüksek değişkenlikte olduğunu göstermektedir.

Topluluk üyelerinin H_{m0} MAV değerleri (Şekil 4.18 b - i) yüzdelik olarak hesaplandığı için, ERA5 H_{m0} MAV değerleri (Şekil 4.18 a) ile doğrudan farkları (F) hesaplanarak Şekil 4.18'de alansal haritalar ile sunulmaktadır (Topluluk üyesi eksi ERA5). Topluluk üyeleri Karadeniz'in batısında çoğunlukla ERA5 H_{m0} MAV değerlerine göre biraz düşük veya ERA5'e yakın MAV değerleri göstermektedir. Şekil 4.18 b'de gösterildiği gibi, Karadeniz'in doğusu ve batısı arasında ERA5 H_{m0} MAV değerlerine en büyük farkları (batıda -%10 ve doğuda %10) gösteren topluluk üyesi TN-1 olmuştur. Diğer topluluk üyelerinin alansal fark desenleri havzanın doğusu ve batısı arasında daha yakın görünmektedir. Örneğin, TN-5 (Şekil 4.18 f), Karadeniz'in batısı (ortalama -%4) ile doğusu (yaklaşık %7) arasında yaklaşık %10'luk bir fark mevcuttur. Bernardino vd., (2021), Karadeniz'de 30 yıllık bir dalga tahmini ile değerlendirilen belirgin dalga yüksekliğinin havzada yüksek değişkenlik gösterdiğini ve MAV değerlerinin %70 ile %90 arasında olduğunu belirlemiştir. Bu çalışmada, Karadeniz'in güney batı kıyıları, kuzey doğu ve güney doğu kıyılarına yakın bölgelerde bulunan yüksek MAV değerleri topluluk üyelerinin H_{m0} MAV değerlerine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17. ERA5 (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) H_{m0} ortalama yıllık değişkenlikleri (MAV)

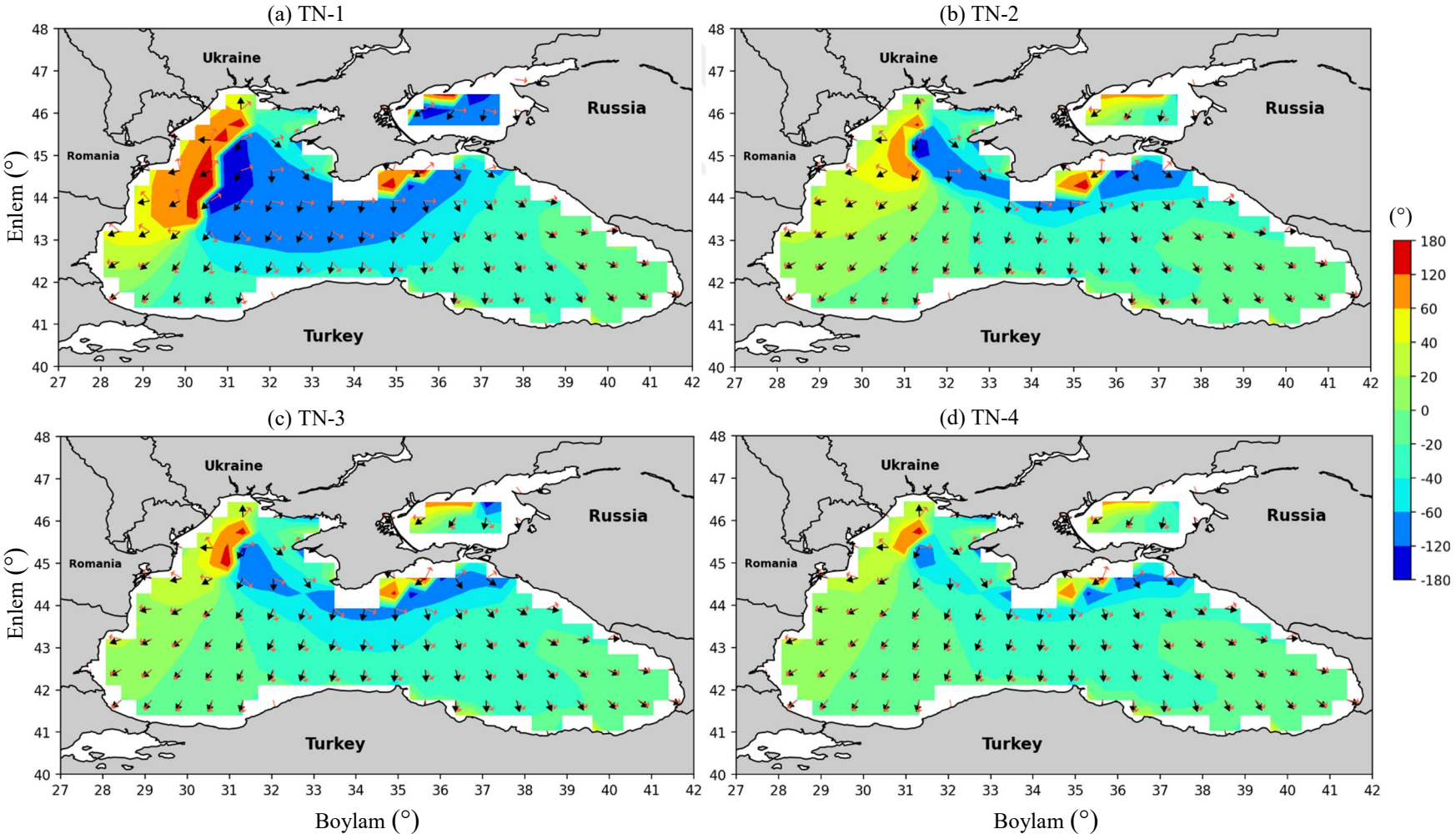


Şekil 4.18. ERA5 H_{m0} ortalama yıllık değişkenliği (a), topluluk üyelerinin (b - i) ERA5 H_{m0} MAV değerine göre alansal fark haritaları

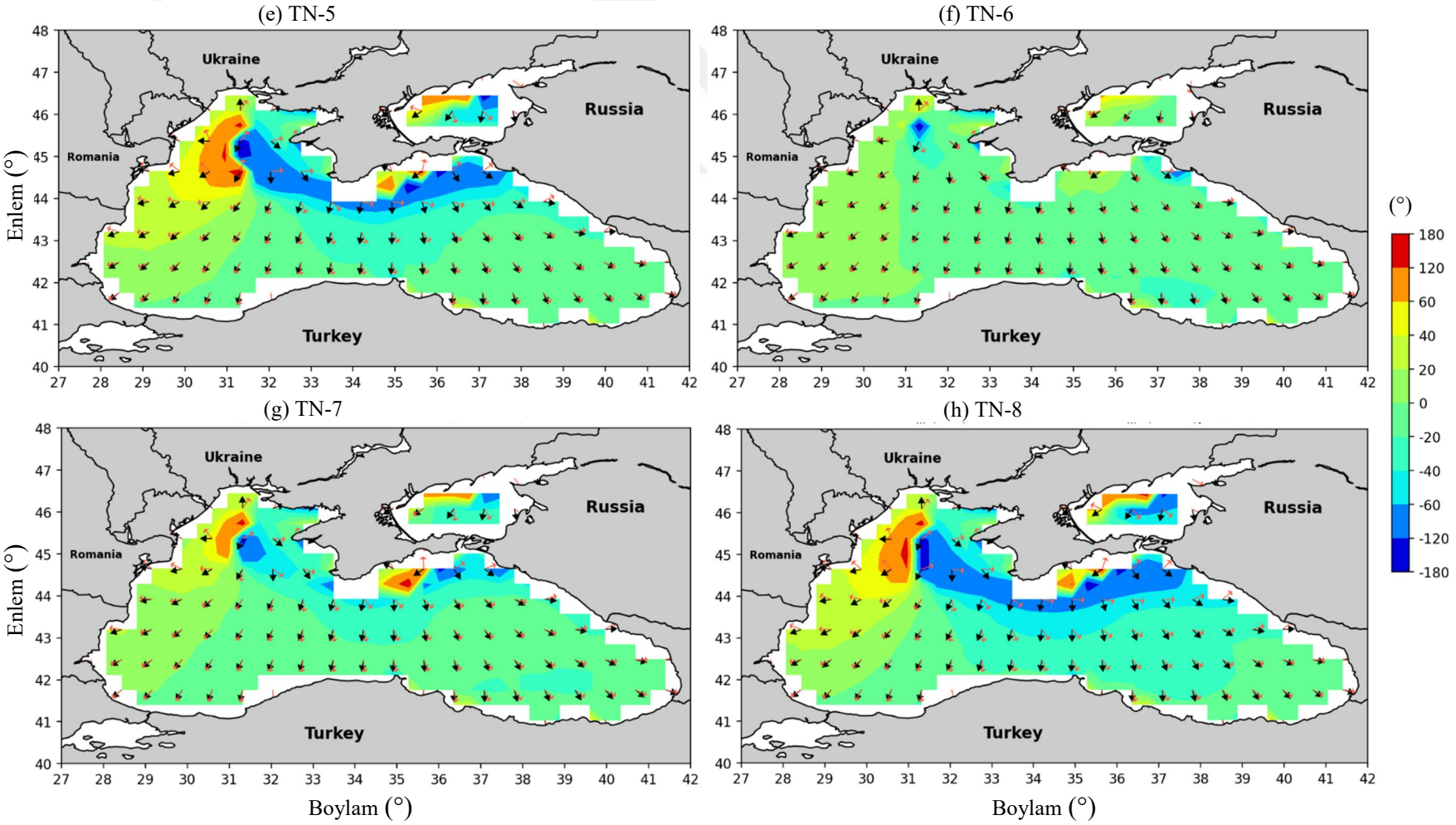
4.1.8. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık ortalama dalga yönüne karşı performansları

Mevcut dalga ikliminde, topluluk üyelerinin dalga yönlerinin değerlendirilmesi için, ERA5 ortalama dalga yönü (Θ_m) verileri ile topluluk üyelerinin SWAN dalga simülasyonlarından elde edilen ortalama dalga yönleri kıyaslanmıştır. Şekil 4.19'da ERA5'in Karadeniz havzasında 27 yıllık ortalama dalga yönleri ve topluluk üyelerinin aynı zaman diliminde ERA5 Θ_m ortalamalarına farkları (F; topluluk üyesi eksi ERA5 şeklinde) sunulmaktadır. Haritalardaki konturlar alansal olarak topluluk üyelerinin 27 yıllık Θ_m ortalamalarının ERA5'in 27 yıllık Θ_m ortalamaları ile en kısa açısal farklarını temsil etmektedir. Kontur haritalarında pozitif değerler saat yönünde, negatif değerler ise saat yönünün tersine olan farkları göstermektedir. Kontur haritalarının üzerinde, siyah oklar ERA5'in, kırmızı oklar ise ilgili topluluk üyesinin Θ_m ortalamalarının yönünü göstermektedir. Böylece alansal olarak farklar kontur haritasından ve görsel kolaylık sağlamak amacıyla seyrekleştirilmiş (özgün çözünürlükte oklar ayırt edilememektedir) oklar yardımıyla gözlemlenebilmektedir.

ERA5 ortalama dalga yönleri, Karadeniz'de kuzeyden gelen dalgaların hâkim olduğunu göstermektedir. Karadeniz'in batısında dalgalar ağırlıklı olarak kuzey ile kuzey doğu yönleri arasından gelecek şekilde ilerlemektedir. Karadeniz'in merkez bölgesinde, ortalama dalga yönlerinin güneye doğru olduğu ve doğu bölgesinde ise, kuzey ile kuzey batı arasından gelen dalgaların hâkim olduğu görülmektedir. Topluluk üyelerinin ERA5 ortalama dalga yönleri ile kıyaslandığı haritalar incelendiğinde, TN-6 (Şekil 4.19 g) neredeyse tüm Karadeniz'de sıfıra yakın Θ_m farklarıyla ERA5'e en iyi uyumu göstermektedir. TN-4 (Şekil 4.19 e) ve TN-7 (Şekil 4.19 h), ERA5 ortalama dalga yönlerine lokal farklar göstermesine rağmen havza genelinde benzerlik göstermektedir. TN-2, TN-3, TN-5 ve TN-8, Karadeniz'in güney kesimlerinde ERA5 ile Θ_m bakımından benzerlik gösterirken; kuzey kıyılarına doğru artan yönsel farklılıklar göstermektedir. TN-1 (Şekil 4.19 b), sadece Karadeniz'in güney batısı kıyıları ve güney doğu bölgesinde ERA5 ortalama dalga yönleri ile kabul edilebilir bir Θ_m vermektedir. Karadeniz'in diğer bölgeleri ve Azak Denizi'nin tamamında ERA5 Θ_m'leri ve TN-1 Θ_m'leri arasında ±60°'den daha büyük yönsel farklar göstermektedir.



Şekil 4.19. ERA5'in yıllık ortalama dalga yönü (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) ERA5 Θ_m değerine göre alansal fark haritaları

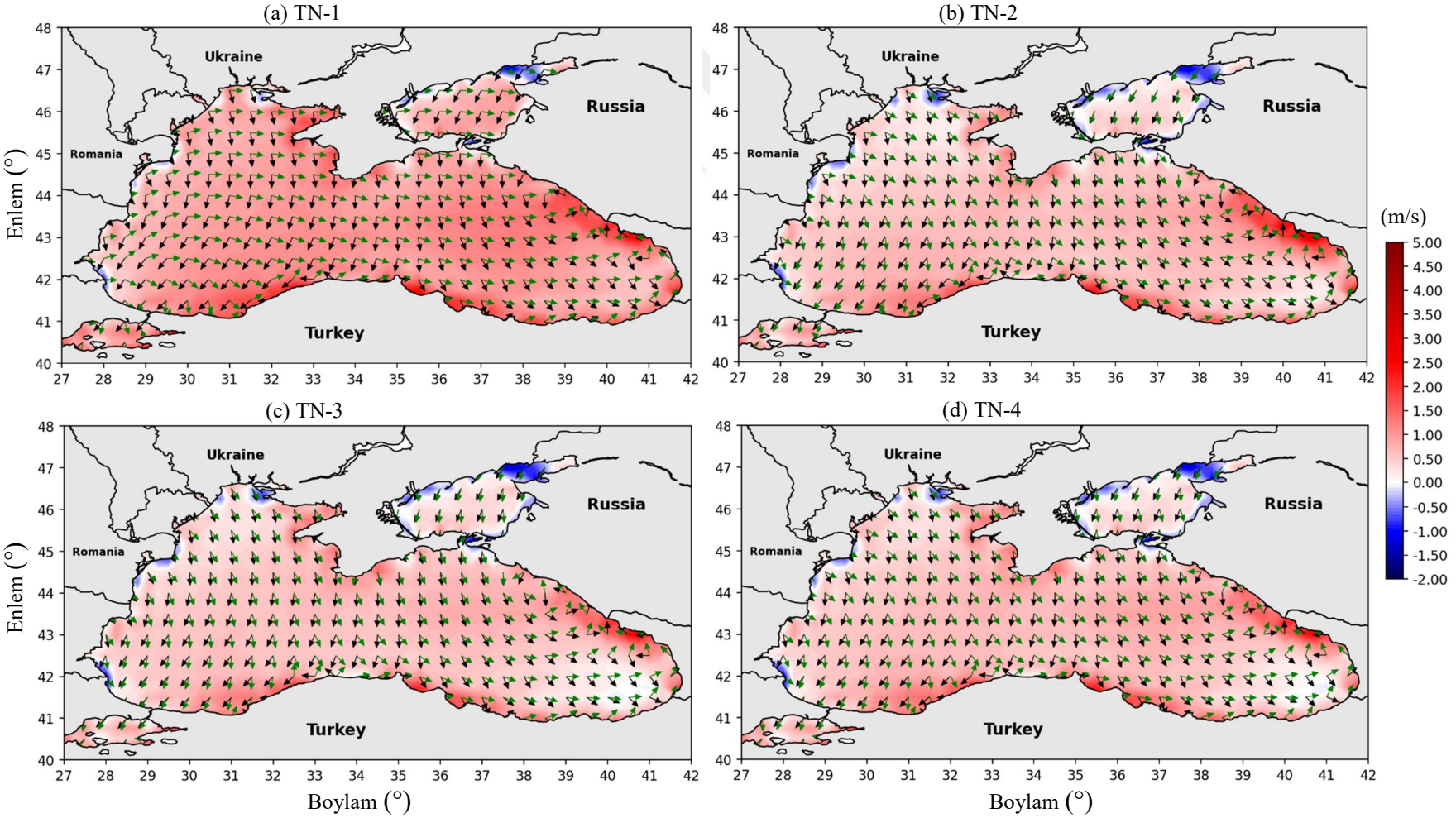


Şekil 4.19. ERA5'in yıllık ortalama dalga yönü (a) ve topluluk üyelerinin (b – i) ERA5 Θ_m değerine göre alansal fark haritaları (devam)

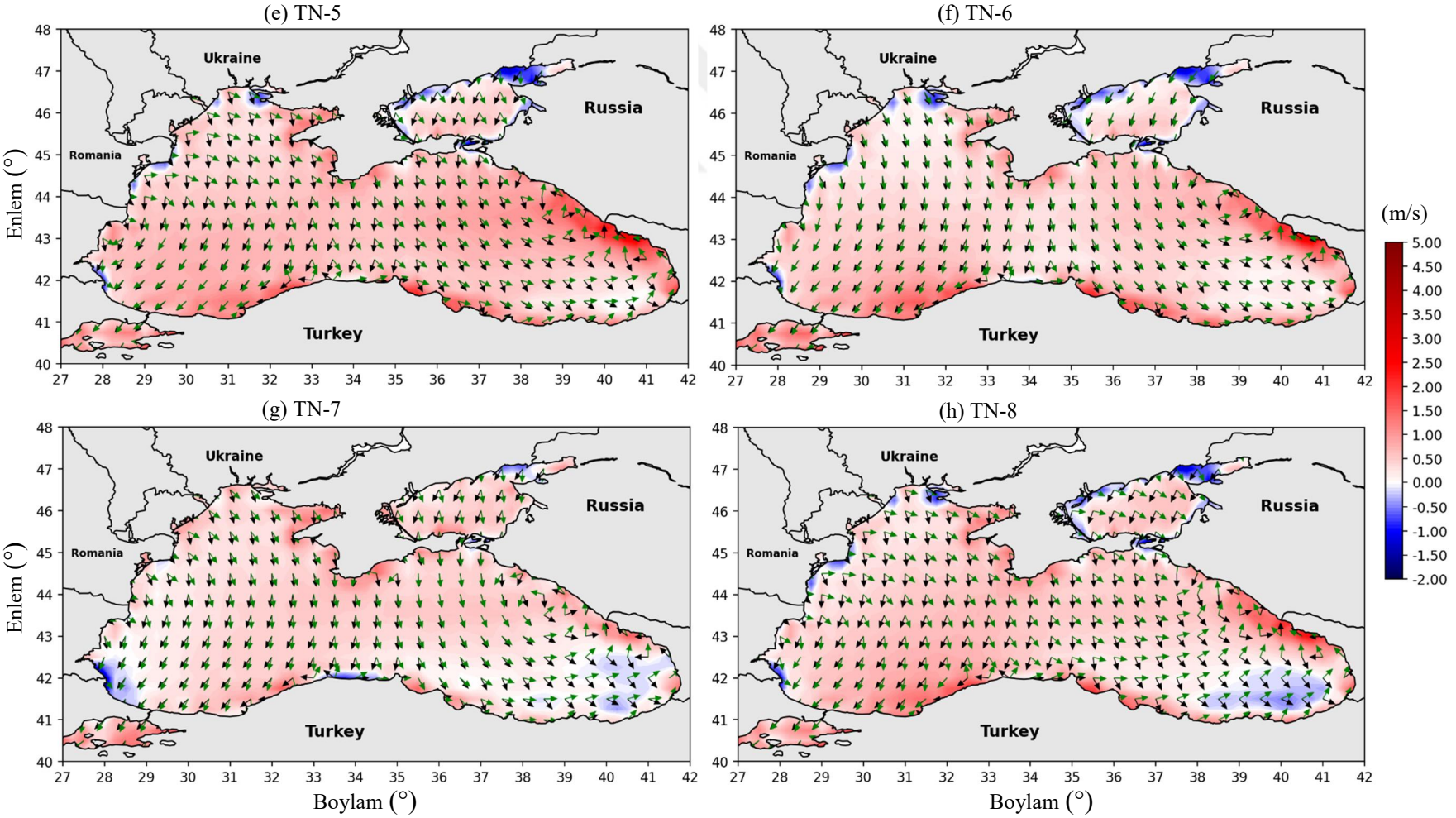
4.1.9. Topluluk üyelerinin ERA5 yıllık ortalama rüzgâr hız ve yönlerine karşı performansları

CMIP5 tabanlı EURO-CORDEX rüzgâr alanları ile çalıştırılmış dalga simülasyonlarının yönsel analizini ve topluluk üyelerinin havzadaki dalga karakteristiklerini daha açık bir şekilde anlayabilmek adına, rüzgâr alanlarının 1979-2005 periyodundaki rüzgâr hızları ve ortalama rüzgâr yönleri irdelenmiştir. Topluluk üyelerinin ortalama rüzgâr hızlarının ERA5 ortalama rüzgâr hızlarına farkları (F) ve ortalama rüzgâr yönlerini belirli aralıklarla (özgün çözünürlükten farklı) gösteren oklar Şekil 4.20'de sunulmaktadır. Haritalarda kontur değerleri rüzgâr hızlarının farklarını (topluluk üyesi eksi ERA5) göstermektedir. ERA5 ortalama rüzgâr yönleri, ortalama dalga yönlerinde gözlendiği şekilde, Karadeniz'in batısında kuzey doğulu rüzgârların, merkezinde kuzeyli rüzgârların ve doğusunda kuzey batılı rüzgârların hâkim olduğu bir karakteristik göstermektedir. Topluluk üyelerinin ERA5 rüzgârları ile en uyumlu görüneninde, Şekil 4.20 g) bile yönsel olarak bir miktar sapma olduğu gözlenmiştir. TN-6 (Şekil 4.20 f) ortalama rüzgâr yönlerinin ERA5 ile en iyi uyumu göstermesinin sonuçları Şekil 4.19 f'de görüldüğü ERA5 ile en uyumlu ortalama dalga yönlerine sahip olmasını açıklamaktadır. Ortalama rüzgâr yönlerindeki uyum, U_{10} ortalamalarında aynı ölçüde gözlenmemektedir. TN-7 (Şekil 4.20 g) U_{10} ortalamaları ERA5 ile kıyaslandığında daha düşük farklar vermektedir. Bu durumun sonuçları da H_{m0} ortalamalarının kıyasında (Şekil 4.4 g, h) etkisini göstermektedir. TN-6, ortalama yönler bakımından TN-7'ye göre ERA5 ile daha iyi uyum göstermesine rağmen, rüzgâr hızlarındaki farklarının biraz daha yüksek olması sonucunda Karadeniz'in batı bölgesinde TN-7'ye göre NF değerleri biraz daha yüksek bulunmuştur.

Daha fazla dikkate değer olan durum, TN-1 rüzgâr yönleri ile ilgilidir. Şekil 4.4 b'de ERA5 ile en uyumsuz üye olmasının nedeni, Şekil 4.20 a'da görüldüğü gibi hem yönsel olarak hem de şiddet olarak ERA5 rüzgârlarından en farklı karakteristik göstermesidir. TN-1 ortalama rüzgâr yönleri ERA5 ortalama yönlerine göre daha batı yönünden gelecek şekilde sapmaktadır. Yönsel sapma göstermesi sonucunda, Karadeniz'in güneybatı bölgesinde daha düşük H_{m0} ortalaması vermesine ve doğu bölgesinde çok daha yüksek ortalamalar göstermesine sebep olduğu düşünülmektedir. Diğer topluluk üyelerinin Şekil



Şekil 4.20. Topluluk üyelerinin ve ERA5'in ortalama rüzgâr yönleri ve 1979-2005 dönemi U_{10} ortalamalarının farkı



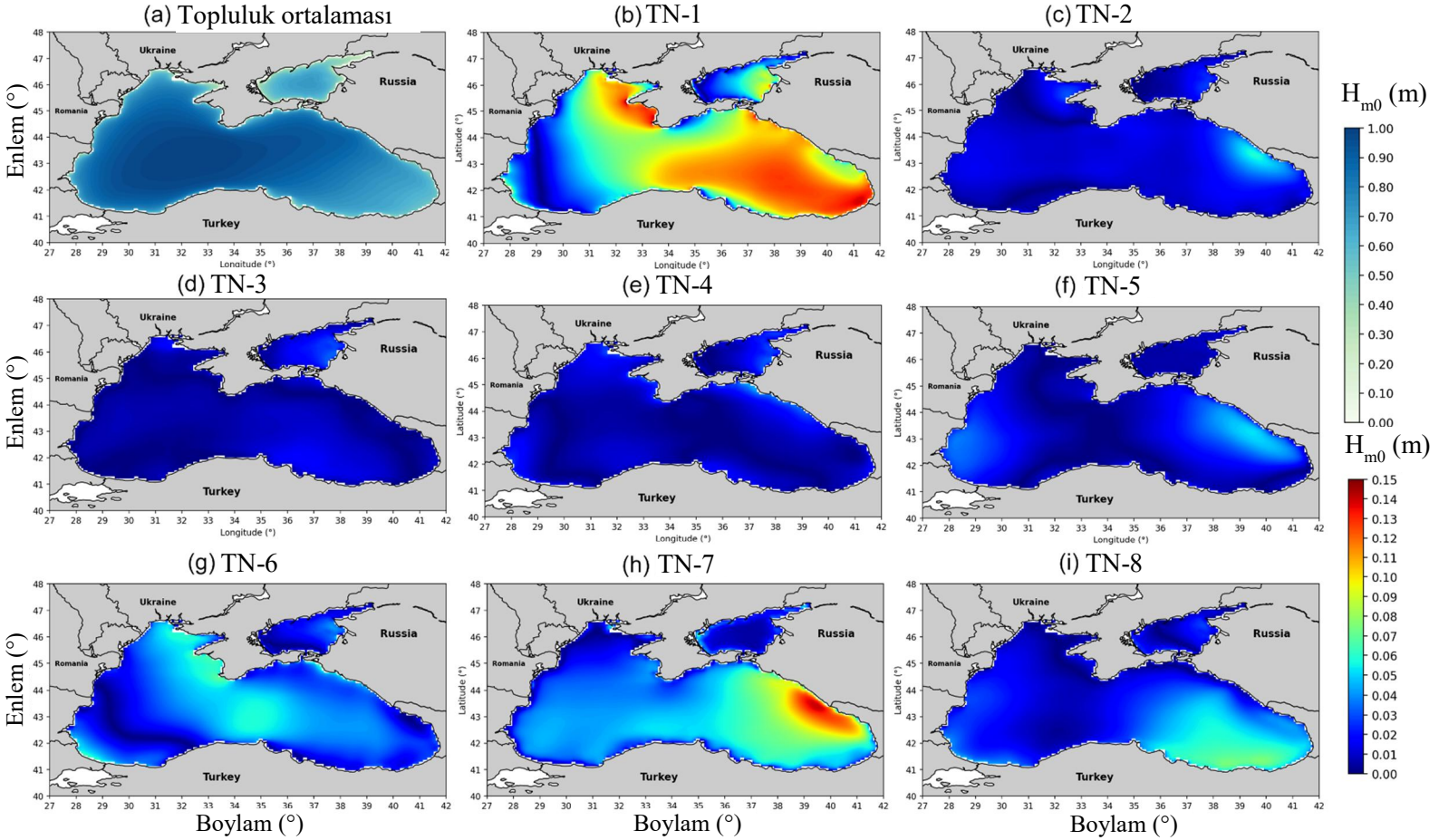
Şekil 4.20. Topluluk üyelerinin ve ERA5'in ortalama rüzgâr yönleri ve 1979-2005 dönemi U_{10} ortalamalarının farkı (devam)

4.20’deki ortalama rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı karakteristikleri aynı şekilde H_{m0} ortalamalarına yansıdığı görülmektedir.

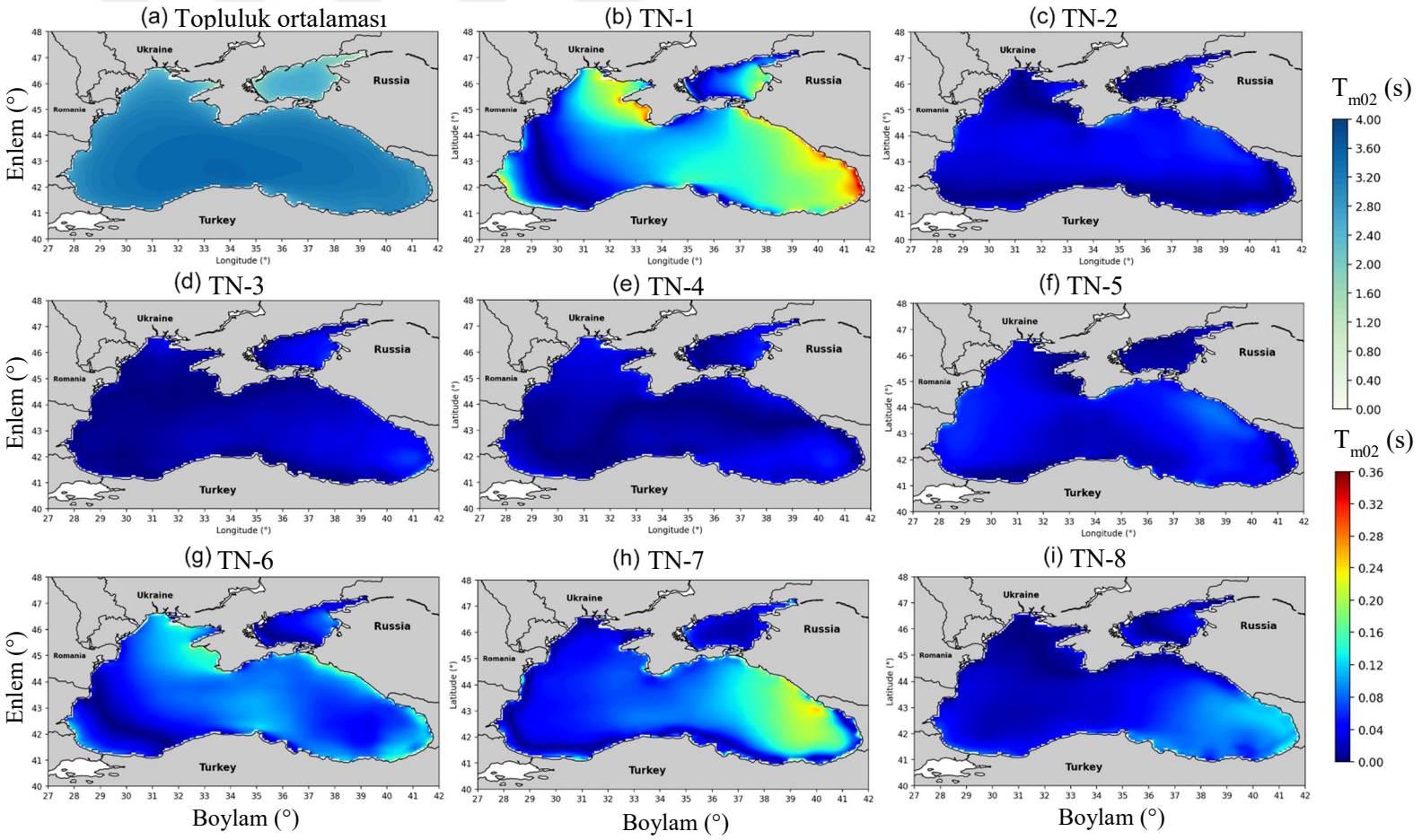
4.1.10. Topluluk üyelerinin H_{m0} ve T_{m02} ortalamalarındaki anormallikleri

Topluluk üyeleri arasındaki anormallikleri görmek için, topluluk ortalaması ile her bir üyenin ikili mutlak farkları hesaplanarak üyelerin tutarsızlık değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 4.21’de, topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamalarındaki anormallikleri sunulmaktadır. Şekil 4.21 a’da topluluk üyelerinin ağırlıksız ortalamaları ile elde edilen topluluk H_{m0} ortalamaları görülmektedir. Bu ortalama değere göre her bir üyenin farklılıkları değerlendirilmektedir. Topluluk üyelerinin çoğu için Karadeniz genelinde anormallikler 0,1 m'den azdır. H_{m0} anormallikleri TN-1 için havzanın kuzey ve doğu bölgelerinin tamamında, TN-7 için ise doğu bölgesinde 0,1 m'nin üzerindedir. TN-2, TN-3, TN-4 ve TN-5 üyelerinin, topluluk H_{m0} ortalamaları ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle TN-3 ve TN-4 üyeleri ile topluluk ortalamaları arasındaki farklar %5’in altında gözlenmektedir.

T_{m02} için tutarsızlık değerlendirmeleri Şekil 4.22’de sunulmaktadır. T_{m02} için topluluk ortalaması Şekil 4.22 a'da verilmiştir ve üyelerin bu ortalamaya göre anormallikleri sunulmuştur. T_{m02} için topluluk ortalaması ile en fazla 0,35 saniyeye kadar anormallikler gözlenmektedir. TN-7'de Karadeniz'in doğu kesiminde 0,1 saniyeyi aşan (0,25 saniyeye kadar) anormallikler görülmektedir. TN-1 için ise 0,2 s'yi aşan anormallikler Karadeniz’in güneybatısında, kuzey doğusunda ve ağırlıklı olarak doğu kesimlerinde gözlenmektedir. Diğer topluluk üyelerinde ise havzadaki anormallikler 0,1 s ve altındadır. H_{m0} ve T_{m02} ortalamaları için gerçekleştirilen tutarsızlık değerlendirmesi sonuçlarına göre, TN-7 ve TN-1 üyelerinin diğer topluluk üyelerinden anormallikler göstererek ayrıştıkları belirlenmiştir. Bu ayrışmanın olumlu ve olumsuz etkileri topluluk veri seti ile yapılan değerlendirmelerde irdelenmektedir.



Şekil 4.21. Topluluk H_{m0} (m) ortalamaları (a) ve topluluk içi tutarsızlıklar (b - i)



Şekil 4.22. Topluluk T_{m02} (s) ortalamaları (a) ve topluluk içi tutarsızlıklar (b - i)

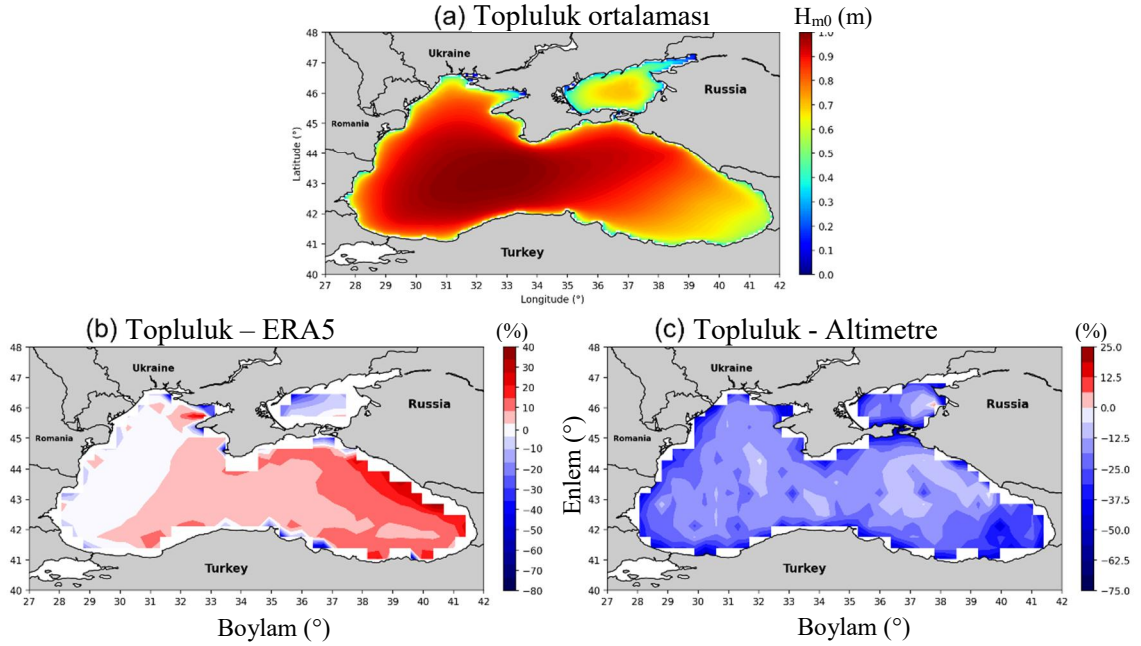
4.2. Topluluk modelin mevcut dalga iklimi değerlendirmesi

Mevcut dönem dalga iklimi için yapılan değerlendirmeler, topluluk üyelerinin Karadeniz dalga karakteristiklerini tekil olarak temsil etme kabiliyetlerinin yeterli olmadığını göstermektedir. Üyeler genel olarak, Karadeniz'in doğu ve batı bölgelerinde farklı performans göstermektedirler. Kimi topluluk üyeleri (örn. TN-1, TN-2) batı bölgesindeki dalga parametrelerinin ortalamalarını ERA5'e kıyasla düşük tahmin etmekteyken; bazı üyeler (örn. TN-7, TN-8) doğu bölgesindeki ortalamaları düşük tahmin etmektedir. Ayrıca iklim modellerinin her biri, model belirsizlikleri, başlangıç koşulları belirsizlikleri gibi farklı belirsizlikler içermektedir. Topluluk üyelerinin Karadeniz'de bölgesel olarak gösterdikleri farklı davranışları dengelemek ve belirsizlikleri mümkün olduğunca kapsayabilmek amacıyla, topluluk üyelerinden oluşan topluluk rüzgâr ve dalga iklimi modeli ile daha güvenilir bir veri seti oluşturmak hedeflenmiştir. TN-1, değerlendirmelerin çoğunda ERA5'e en az uyum gösteren üye olarak gözlenmektedir. Buna rağmen, topluluk üyelerinin Karadeniz'in doğusundaki düşük ortalamalarını ölçümlere yaklaştıracak şekilde yükseltmesi söz konusu olduğu için, topluluk modeline dahil edilmiştir. ERA5 dalga yüksekliği veri seti, yerinde dalga ölçümleri ve altimetre gözlemlerinin dalga yüksekliği ortalamalarını, özellikle Karadeniz'in doğu bölgesinde, düşük tahmin etmesi de TN-1'in topluluk içerisine dahil edilmesini elzem hale getirmektedir.

Topluluk modeli, bütün topluluk üyelerinin veri setlerinin ağırlıksız olarak ortalaması ile elde edilmiş veri seti şeklinde her parametre için oluşturulmuştur. Topluluk modeli, farklı modellerin belirsizliklerini de kapsayacak şekilde, özellikle gelecek iklimi güçlü ve güvenilir bir şekilde öngörmek maksadıyla tercih edilmektedir. Gelecek öngörüleri sunulmadan önce, topluluk dalga yüksekliği ortalamaları ERA5 ve altimetre ölçümleri ile karşılaştırılmış ve topluluk üyelerinin altimetre gözlemleri kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirmeleri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama için altimetre gözlemleri, ERA5 çözünürlüğünde olacak şekilde her hücreye düşen gözlemlerin ortalamaları alınarak alansal ortalamalar elde edilmiştir. Topluluk modeli de yine ERA5 çözünürlüğüne indirgenerek ortalamaları arasındaki farklar hesaplanmıştır.

4.2.1. Topluluk modelin ERA5 ve altimetre verilerine karşı performansı

Topluluk H_{m0} ortalamalarının (Şekil 4.23 a) ERA5 (Şekil 4.23 b) ve altimetre ölçümleri (Şekil 4.23 c) ile kıyaslandığı NF haritaları Şekil 4.23'de sunulmaktadır. Topluluk ortalaması, ERA5'e kıyasla Batı Karadeniz'de ihmal edilebilir farklılıklar göstermektedir. ERA5 H_{m0} ortalamalarını, havzanın merkezinde topluluk ortalamalarının %10'a kadar fazla tahmin ettiği görülürken, bu fazla tahmin doğu bölgesinde %30'a kadar çıkmaktadır. Azak Denizi'nde, topluluk H_{m0} ortalaması ERA5'e kıyasla düşük tahmin göstermektedir. Altimetre ölçümleriyle karşılaştırıldığında, topluluk ortalaması, daha önce topluluk üyelerinin çoğu için gösterildiği gibi, Karadeniz genelinde düşük bir tahmin göstermektedir. Topluluk ortalaması, sekiz üyenin ortalaması ile oluşturulduğu için ERA5 ve altimetre gözlemleri ile yapılan kıyaslamalarda topluluk üyelerinin bölgesel anomalilerini yumuşatmıştır. ERA5 ile karşılaştırıldığında, TN-7 ve TN-8 topluluk üyeleri Karadeniz'in batı kesiminde -%10'a kadar düşük tahmin gösterirken, topluluk modeli ile ERA5 H_{m0} ortalaması arasındaki fark sıfıra yakındır. Ayrıca, TN-1'in doğuda



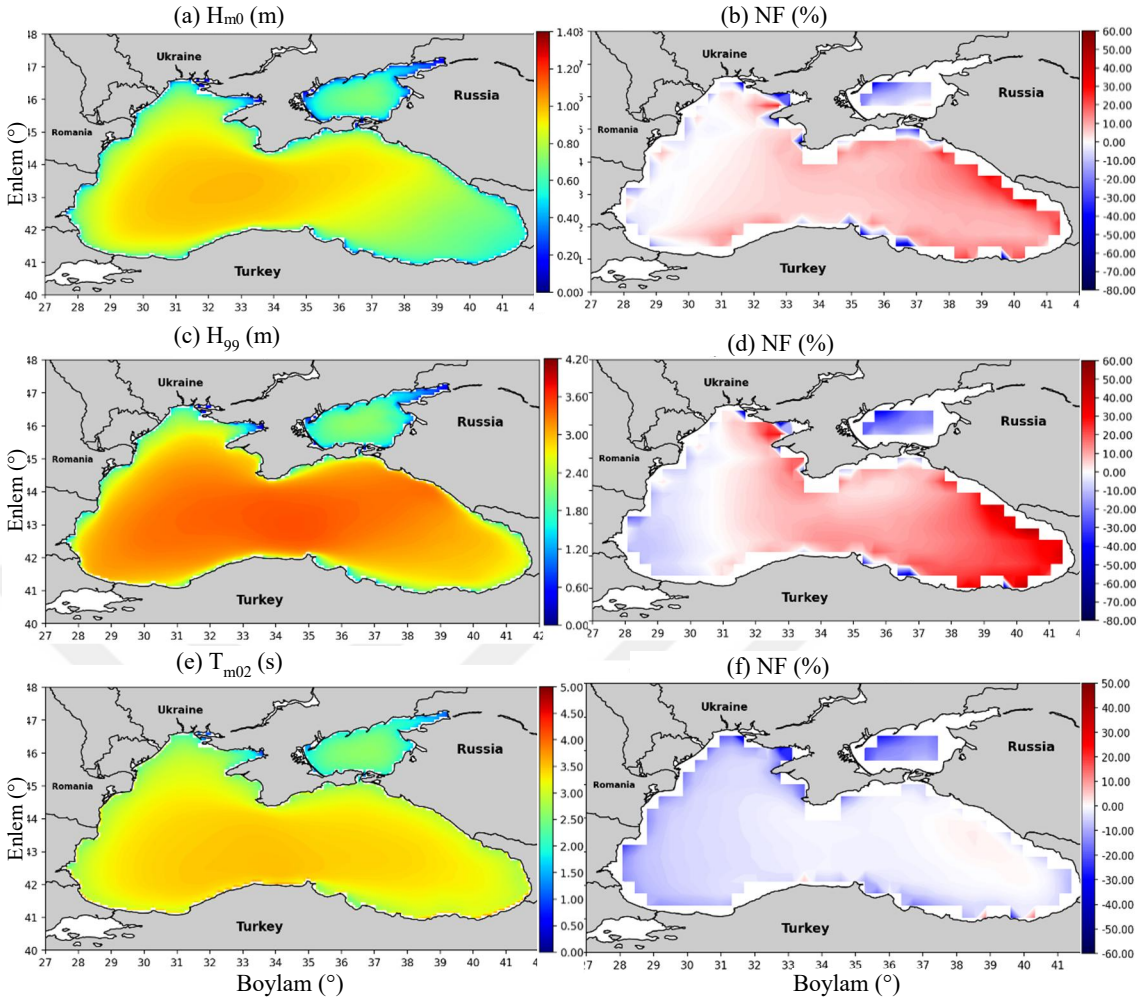
Şekil 4.23. 1985-2005 dönemi boyunca topluluk ortalaması H_{m0} (m) (a), topluluk ortalaması ile ERA5 ortalamaları arasındaki (b) ve altimetre gözlemlerinin ortalamaları arasındaki (c) NF haritaları

%50'ye varan yüksek tahminleri, topluluk veri setinin kullanılmasıyla %30 civarında kalmıştır. Altimetre ölçümleri ile karşılaştırıldığında, Karadeniz'in güneydoğusunda bazı üyeler için görülen yüksek farklar (-%40 civarında düşük tahmin), topluluk veri seti kullanıldığında %30'un altına düşmüştür. Açık denizde topluluk ortalaması ile altimetre ölçümleri arasındaki farkın genellikle %20'den az olduğu gözlenmiştir.

4.2.2. Topluluk modelin ERA5 yıllık H_{m0}, H_{99} ve T_{m02} ortalamalarına karşı performansı

Topluluk H_{m0} ortalamalarının altimetre gözlemlerini kapsadığı periyotta (1985-2005) değerlendirilmesinin ardından, ERA5 verileri ile daha geniş bir zaman diliminde (1979-2005) ve farklı parametreler üzerinden değerlendirilmektedir. Mevcut dalga iklimi döneminde topluluk veri setinin yıllık H_{m0}, H_{99} ve T_{m02} ortalamaları ve ERA5 ortalamalarına kıyasla NF haritaları Şekil 4.24'de verilmektedir. Karadeniz'in büyük bölümünde, topluluk simülasyonları ERA5'e kıyasla H_{m0}'ı biraz yüksek tahmin etmektedir (Şekil 4.24 b, d). Yıllık H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.24 b) ve yıllık H_{99} ortalamaları (Şekil 4.24 d) için farklar Karadeniz'de benzer alansal iklim modeli desenleri göstermektedir. Havzanın doğu kesiminde topluluğun yüksek tahminini gösteren pozitif farklar (%30 civarında) görülürken, Azak Denizi'nde topluluğun düşük tahminini gösteren negatif farklar görülmektedir. Yıllık H_{99} ortalamaları arasında doğu bölgesinde gözlenen farklar H_{m0} ortalamaları arasındaki farklardan daha yüksek olacak şekilde %40'lara kadar ulaşmaktadır. Topluluk ve ERA5 arasındaki farklar, H_{m0} ortalamalarının daha yüksek olduğu Karadeniz'in batı kesiminde daha düşüktür. Buradaki farklar %5'ten azdır ve düşük tahmin gösteren alanlar yıllık H_{m0} ortalamalarında, H_{99} ortalamalarının düşük tahmin gösterdiği alana göre daha sınırlıdır. Kıyı şeridine yakın farklı bölgelerde yüksek farklar görülmekte olup, bunun ERA5 ve dalga simülasyonlarının arasındaki çözünürlük farkı sebebiyle kıyı şeridi temsilinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Topluluk ve ERA5'in yıllık T_{m02} ortalamaları arasındaki normalleştirilmiş farklar Şekil 4.24 f'de sunulmaktadır. Karadeniz Bölgesi'nin neredeyse tamamında yıllık T_{m02} ortalamaları topluluk tarafından düşük tahmin eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Yıllık T_{m02} ortalamaları arasındaki farklar Karadeniz'in genelinde -%8 ile %1 arasında ve Azak Denizi'nde -%10 ile -%20 arasında değişmektedir.

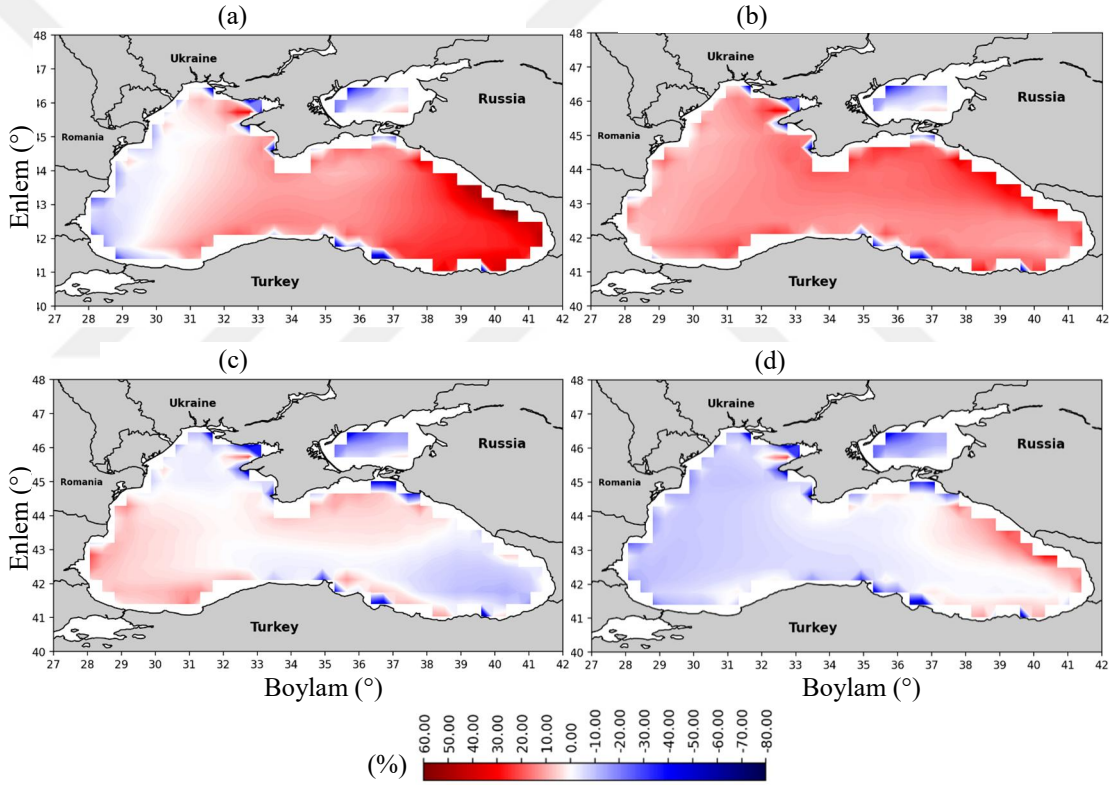


Şekil 4.24. Topluluk modelinin yıllık H_{m0} ortalamaları (a), H_{99} ortalamaları (c), T_{m02} ortalamaları (e) ve bu ortalamaların ERA5 ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları

4.2.3. Topluluk modelin ERA5 mevsimlik H_{m0} ve H_{99} ortalamalarına karşı performansı

Topluluk ve ERA5 arasındaki H_{m0} ortalamalarının ve H_{99} ortalamalarının mevsimsel NF haritaları sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Kış mevsimi farklarının alansal iklim desenleri (Şekil 4.25 a, Şekil 4.26 a) yıllık ortalamaların farklarının desenlerine (Şekil 4.24 b, Şekil 4.24 d) benzediği görülmüştür. Kış mevsimi topluluk H_{m0} ortalamalarının ve H_{99} ortalamalarının ERA5 ortalamalarına kıyasla farkları (%30'a kadar), Doğu Karadeniz bölgesinde topluluğun yüksek tahminini göstermektedir. İlkbahar mevsiminde topluluk, H_{m0} ortalamalarını (Şekil 4.25 b) ve yıllık H_{99} ortalamalarını (Şekil 4.26 b) Azak Denizi hariç tüm havzada fazla tahmin etmekte,

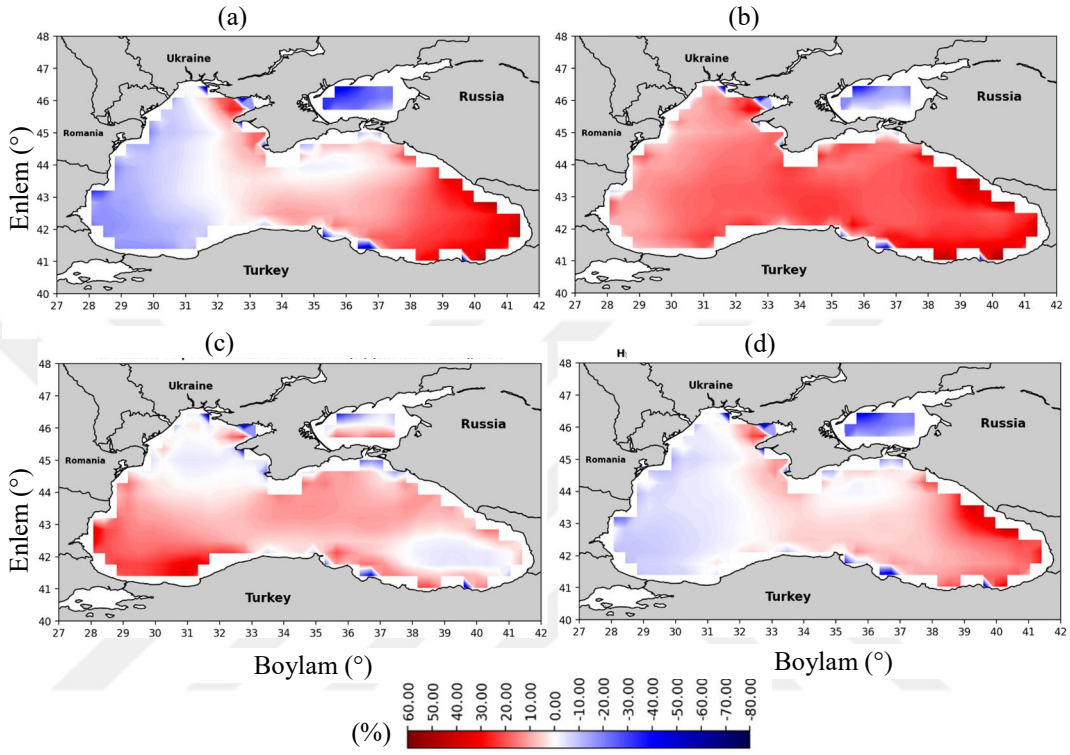
Karadeniz'in doğusunda ise daha yüksek farklar (%30'ları bulan) görülmektedir. Yaz mevsimi topluluk ortalamaları ile ERA5 ortalamaları arasındaki farkların (Şekil 4.25 c, Şekil 4.26 c) alansal iklim desenleri, yıllık ortalamaların farklarının (Şekil 4.24 b, Şekil 4.24 d) havzadaki alansal dağılımından tamamen farklı bir ilkim desenine sahiptir. Yazın topluluk veri seti, batı bölgesinde yüksek tahminler gösterirken, Karadeniz'in kuzeybatısında ve doğu kesiminde düşük tahminler göstermektedir. Bununla birlikte, yaz mevsiminde en büyük farklar yıllık H_{m0} ortalamaları için %10'a ve yıllık H_{99} ortalamaları için %25'e ulaşmaktadır ki bu farklar diğer mevsimlere kıyasla daha düşüktür. Topluluk veri setinin Karadeniz'in doğu bölgesinde, küçük bir alanda olmasına rağmen, yıllık H_{99} ortalamaları için düşük tahminde bulunduğu tek mevsimin yaz olduğu görülmektedir.



Şekil 4.25. Topluluk modelinin mevsimlik H_{m0} ortalamalarının ERA5 mevsimlik H_{m0} ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları

Sonbahar mevsiminde (Şekil 4.25 d, Şekil 4.26 d), topluluğun batı bölgesinde gösterdiği düşük tahmin alanı yıllık ortalamaların farklarındaki (Şekil 4.24 b, Şekil 4.24 d) düşük tahmin edilen alanlardan daha geniş olduğu gözlenmektedir. Sonbaharda en büyük farklar Doğu Karadeniz'de %20'lik yüksek tahmin ve Azak Denizi'nde -%30'luk düşük tahmin

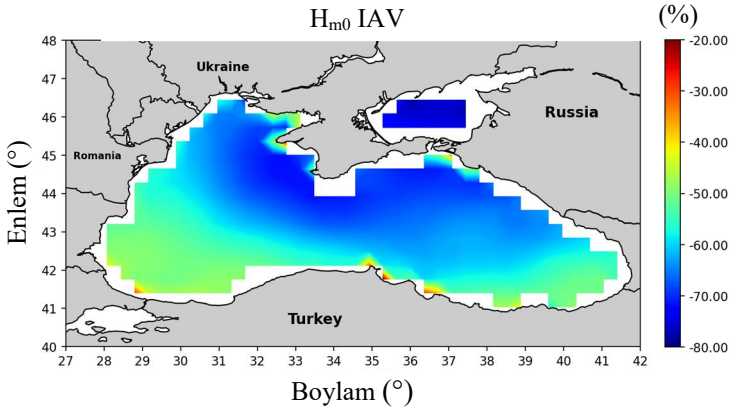
şeklindedir. Topluluk veri seti ve ERA5 veri seti H_{99} ortalamaları arasındaki yüksek tahmin olarak gözlenen farkların, H_{m0} ortalamalarında gözlenen yüksek tahmin farklarından daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yani genel olarak topluluk, mevsimsel aşırı dalga yüksekliklerini ERA5'e kıyasla daha yüksek tahmin etmektedir.



Şekil 4.26. Topluluk modelinin mevsimlik H_{99} ortalamalarının ERA5 mevsimlik H_{99} ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları

4.2.4. Topluluk modelin ERA5 H_{m0} ortalamalarının yıllar arası değişkenliği (IAV) ile kıyası

Şekil 4.27, topluluğun Karadeniz'de ERA5'e kıyasla, dalga yüksekliklerinin Denklem 3.6 ile hesaplanmış yıllar arası değişkenliklerinin (IAV) NF haritasını göstermektedir. Topluluk, havzanın tamamında tutarlı bir düşük IAV tahmini göstermektedir. Bu durum, ERA5'in dalga yüksekliklerinin yıllık değişkenliğinin Karadeniz genelinde topluluk dalga yüksekliklerine göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Azak Denizi'nde ve Karadeniz'in kuzey kesimi boyunca farkların -%70'leri aşacak şekilde daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Havzanın güney kıyılarına yakın alanlar boyunca NF değerlerinin -%30 ile -%40 arasında değiştiği görülmektedir.

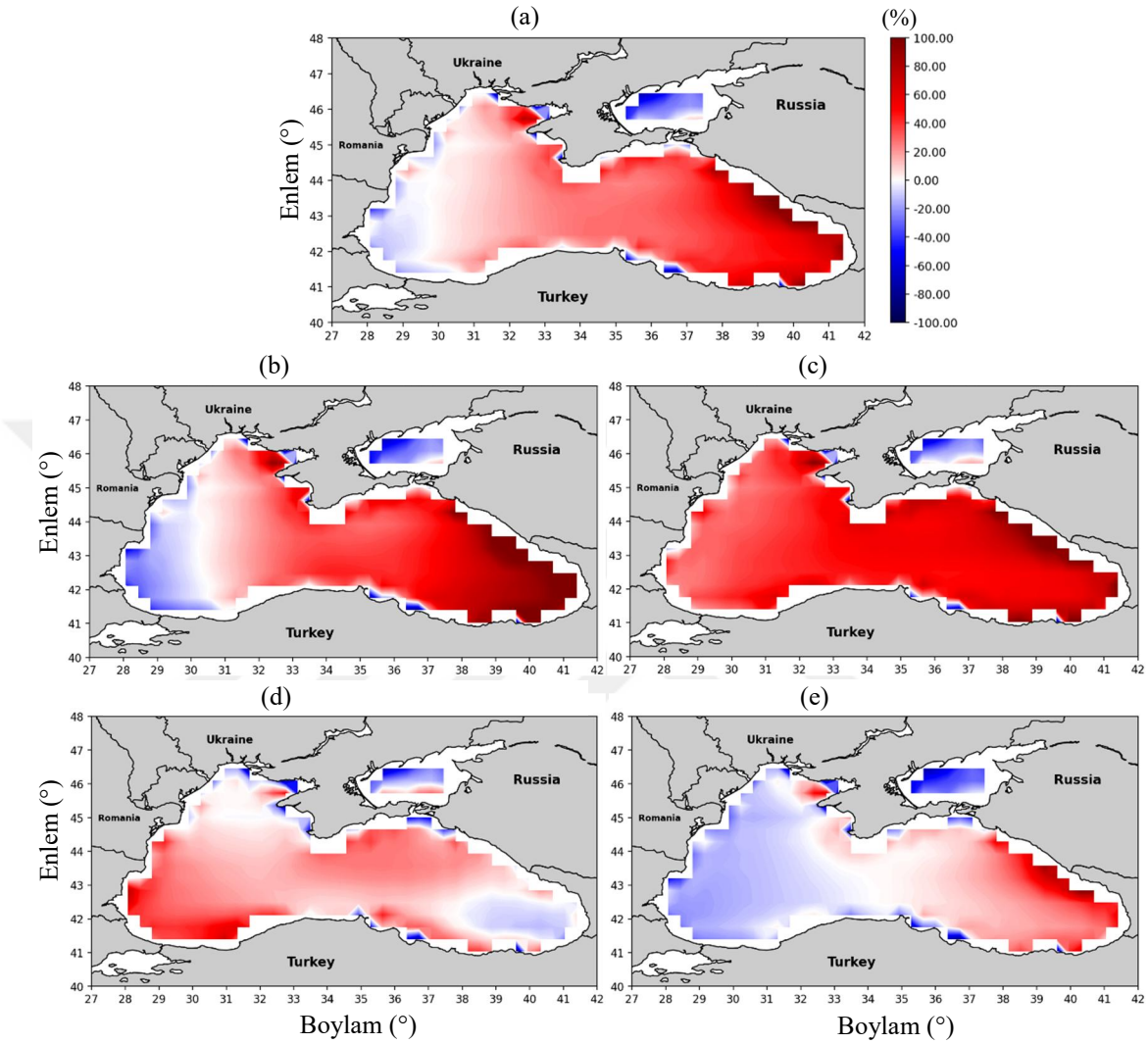


Şekil 4.27. Topluluk modeli tarihsel dönem (1970-1999) H_{m0} yıllık ortalamalarının IAV değerlerinin ERA5 H_{m0} yıllık ortalamalarına kıyasla farkları (F; %)

4.2.5. Topluluk modelin ERA5 yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarına karşı performansı

Topluluk ile ERA5 dalga enerjisi akısının (P_w; dalga gücü) farkları, yıllık ve mevsimsel olarak NF haritaları şeklinde Şekil 4.28'te sunulmaktadır. Yıllık P_w ortalamalarının farkları (Şekil 4.28 a), topluluğun Karadeniz'in batı kıyılarına yakın yerlerde düşük tahminini, orta ve doğu kesiminde ise yüksek tahminini göstermektedir. Buradaki alansal iklim deseni, yıllık H_{m0} ortalamaları arasındaki farkların alansal desenlerine (Şekil 4.24 a) benzer görülmüştür. Doğu bölgesinde kuzey kıyıları yakınlarında yıllık, kış (Şekil 4.28 b) ve ilkbahar (Şekil 4.28 c) ortalamalarında %70'e ulaşan oranlarda topluluğun P_w ortalamalarını yüksek tahmin ettiği görünmektedir. Kış mevsimindeki alansal NF dağılımı yıllık ortalamalardaki farkların dağılımına benzer bulunmuştur. Kış mevsiminde gözlenen farkların yıllık ölçekten biraz daha yüksek olduğu; batı bölgesinde -%30'a ve doğu kesiminde %70 civarında görülmektedir. İlkbaharda, topluluk Karadeniz genelinde P_w ortalamalarını yüksek tahmin etmekte, doğuda (%40-%60) batıya (%20-%40) göre daha yüksek farklılıklar göstermektedir. Topluluk ve ERA5 arasındaki NF değerleri, diğer mevsimlere ve yıllık farklara göre yaz mevsiminde (Şekil 4.28 d) ve sonbaharda (Şekil 4.28 e) hava genelinde daha düşüktür. Topluluk Azak Denizi'nde, yıllık ve mevsimsel ortalamaları -%20 ile -%50 arasında genel bir düşük tahmin etme eğilimi göstermektedir. PC20 ve ERA5 arasındaki yıllık ve mevsimsel P_w ortalamaları farkları, H_{m0} ortalamaları ve H_{99} ortalamalarında gözlenen farklardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Denklem 3.5'te görüldüğü gibi, P_w'nin dalga yüksekliğine ikinci dereceden

bağımlılığı sebebiyle, dalga yüksekliklerindeki farkların katlanarak gözlenmesi buna neden olarak gösterilebilir.



Şekil 4.28. Topluluk modelinin yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarının ERA5 yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarına kıyasla NF (%) haritaları

4.3. Gelecek Rüzgâr ve Dalga İklimi Değerlendirmeleri

Karadeniz'de, yerinde dalga ölçümleri, altimetre gözlemleri ve ERA5 veri setleri ile bütüncül bir kıyası neticesinde, mevcut dalga iklimi karakteristiklerini, topluluk modelin tekil modellere nazaran daha iyi temsil etme kabiliyeti olduğu görülmüştür. Bu sebeple, Karadeniz'de rüzgâr ve dalga ikliminin gelecek projeksiyonları topluluk veri setleri ile incelenmektedir. Havzanın tamamında, deniz seviyesi üzerinde 10 m yükseklikteki

rüzgâr hızlarının (U_{10}) ortalamaları, belirgin dalga yüksekliklerinin (H_{m0}) ortalamaları, belirgin dalga yüksekliklerinin yıllık %99'luk değerlerinin (H_{99}) ortalamaları, ortalama dalga periyodunun (T_{m02}) ortalamaları ve ortalama dalga gücünün (P_w) ortalamalarının gelecek dönemlerdeki RCP8.5 senaryosuna dayalı olarak öngörülen değişimleri irdelenmektedir. Ortalamaların öngörülen gelecek değişimleri (GD), 1970-1999 zaman dilimindeki 30 yıllık tarihsel periyota (TP) ait ortalamalar referans alınarak, gelecek 30 yıllık dönemlerdeki ortalamalarının göreceli olarak farkları (Denklem 3.7) ile hesaplanmıştır. Gelecek periyotları, orta vadeli gelecek dönem olarak belirlenen GP1 (2040-2069) ve uzak vadeli gelecek dönem olan GP2 (2070-2099) periyotları seçilmiştir.

Öngörülen değişiklikler sunulurken önce TP yıllık veya mevsimlik ortalamaları verilmekte, hemen yanında ilgili gelecek dönem için TP ortalamalarına göre değişim alansal haritalarla sunulmaktadır. Tarihsel ve gelecek dönem ortalamaları arasındaki farkların istatistiksel belirginliği t-Testi ile %95 güven aralığında hesaplanmıştır. Değişimleri gösteren haritalarda, istatistiksel olarak belirgin olmayan farklara sahip bölgeler taralı olarak gösterilmiştir. Gelecek projeksiyonları için seçilen dönemlerdeki ortalamaların öngörülen değişimlerinin incelenmesinin yanı sıra, CMIP5 deneylerinin gelecek simülasyon periyodu olan 2006-2099 döneminin tamamını kapsayacak şekilde bazı dalga parametrelerinin (H_{m0}, H_{99}, P_w) öngörülen eğilimleri de sunulmaktadır. Havzada eğilimleri gösteren haritalarda da istatistiksel olarak anlamlı olmayan eğilim gösteren bölgeler taralı olarak belirtilmiştir.

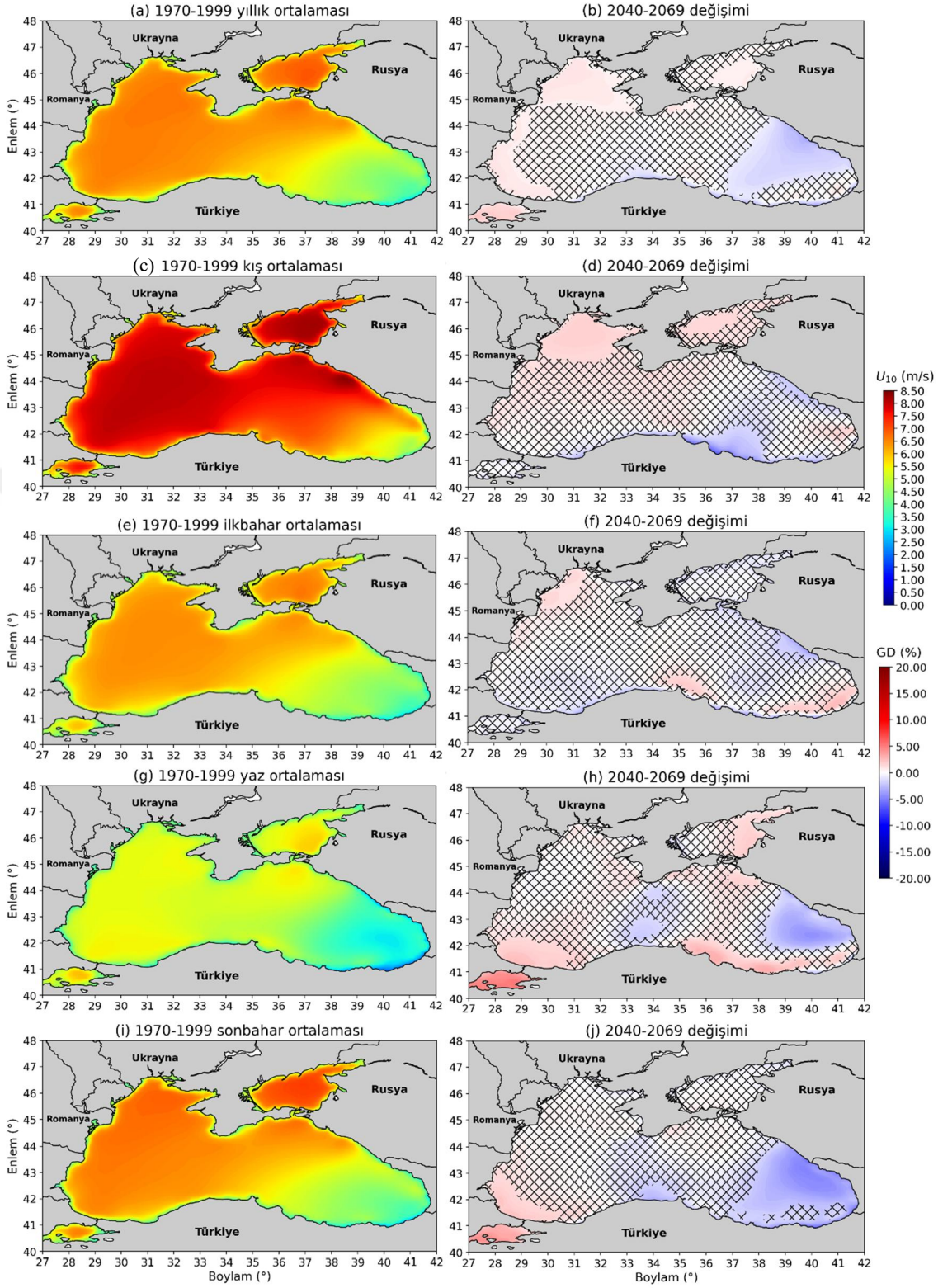
4.3.1. Yıllık ve mevsimlik ortalama rüzgâr hızlarının (U_{10}) gelecek değişimleri

İlk olarak bu çalışmanın odağındaki rüzgâr dalgalarının oluşum kaynağı olan rüzgârların gelecek değişimleri irdelenmektedir. Şekil 4.29, TP ortalama rüzgâr hızlarını ve bu ortalamalara göre GP1 dönemindeki U_{10} ortalamalarının öngörülen değişikliklerini göstermektedir. Batı Karadeniz ve Azak Denizi, sırasıyla 6,7 m/s ve 6,9 m/s U_{10} TP ortalamaları (Şekil 4.29 a) ile yıllık ölçekte en şiddetli rüzgârlara sahip bölgelerdir. Şekil 4.29 b' de görüldüğü gibi, GP1 döneminde Karadeniz'de şiddetli rüzgârların görüldüğü batı ve kuzey batı bölgelerinde karaya yakın yerlerde ve Azak Denizi'nde güney doğu bölgesinde istatistiksel olarak belirgin artışlar (%5'ten az) öngörülmektedir. Karadeniz'in biraz daha düşük U_{10} ortalamalarına (5-5,5 m/s) sahip doğu bölgesinde, kuzey doğu

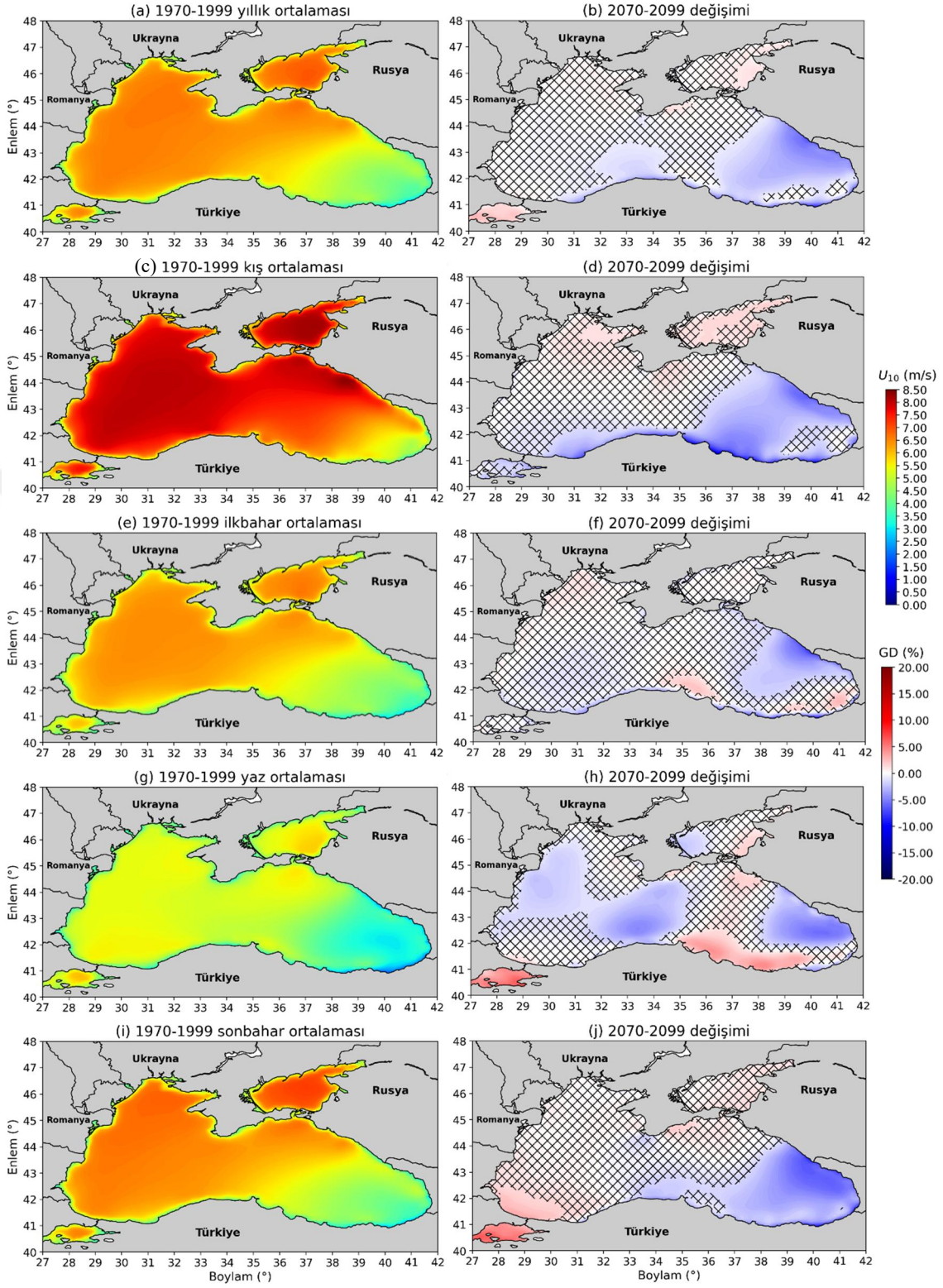
kıyılarına yakın yakın yerlerde -%6'ya varan belirgin azalışlar beklenmektedir. Kış mevsiminde U_{10} ortalamalarının (Şekil 4.29 c) havzanın genelinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Yıllık U_{10} ortalamalarına benzer şekilde Karadeniz'in batısında ve Azak Denizi'nde şiddetli rüzgârlar görülmektedir. Ayrıca Karadeniz'in kuzey doğu kıyıları yakınlarında da 8 m/s'yi geçen rüzgâr hızları gözlemlenmektedir. Şekil 4.29 c'de, kış mevsimi U_{10} ortalamaları (Şekil 4.29 d) için Azak Denizi kuzey batısı ve Karadeniz'in kuzey kıyılarının batı tarafında %5'den daha az belirgin artış öngörüsü bulunmaktadır. Karadeniz'in güney doğu kıyılarında bir bölgede ise, -%5 civarında belirgin azalış beklenmektedir.

İlkbahar (Şekil 4.29 e) ve sonbahar (Şekil 4.29 i) mevsimlerinin U_{10} ortalamaları, yıllık U_{10} ortalamalarının alansal iklim deseni ve büyüklüklerine benzer sonuçlar göstermektedir. İlkbahar mevsiminde, U_{10} ortalamaları (Şekil 4.29 f) için havzanın sınırlı bazı alanlarında %5'in altında değişim beklentisi olsa da, genelinde belirgin bir değişim göstermemektedir. Sonbahar U_{10} ortalamaları (Şekil 4.29 j) için, güneybatı Karadeniz kesimlerinde %3'ü geçmeyen artışlar öngörülmekte, doğu bölgesinde genişçe bir alanda -%4 civarında azalışlar beklenebilmektedir. En düşük TP U_{10} ortalamaları (Şekil 4.29 g) veren yaz mevsiminde, GP1 döneminde U_{10} ortalamaları (Şekil 4.29 h) Karadeniz'in güney kıyılarının batı ve doğu kesimlerinde ve Azak Denizi'nin doğusunda artış, Karadeniz'in merkezinde ve doğu kıyılarında azalış göstermektedir. Buradaki belirgin artış ve azalış değişimleri yine %5 mertebesinin altında kalmaktadır.

Şekil 4.30 U_{10} ortalamalarının GP2 dönemindeki değişimlerini göstermektedir. Şekil 4.30 b'de gösterildiği gibi, yıllık ortalamalarda GP2 dönemi boyunca istatistiksel olarak belirgin en büyük değişimin (-%6 civarında) öngörüldüğü alanlar Doğu Karadeniz'dedir. Burada en şiddetli TP U_{10} ortalamaları 5,5 m/s civarındadır ve GP2 döneminde 5,1 m/s'ye düşmesi beklenebilir. Karadeniz'in merkez bölgesinin güneyinde görülen belirgin azalışlar ve Azak Denizi'nin doğusunda görülen belirgin artışlar %2 ve altında gerçekleşmiştir. Kış mevsiminde (Şekil 4.30 d), Doğu Karadeniz ve güney kıyıları boyunca U_{10} ortalamaları için -%2 ila -%8 arasında belirgin bir düşüş öngörülmektedir. Kuzeydoğu kıyı bölgesinde yaklaşık 7,5 m/s olan rüzgâr hızlarının 7,0 m/s'ye düşmesi beklenebilir. Azak Denizi'nde ve Karadeniz'in kuzey kıyılarının batı bölgesindeki sığ deniz bölgesi üzerinde %2'ye yakın istatistiksel olarak belirgin artışlar öngörülmektedir.



Şekil 4.29. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) U_{10} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)



Şekil 4.30. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) U_{10} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

İlkbahar U_{10} ortalamaları (Şekil 4.30 f), tüm mevsimsel ve yıllık ölçekli U_{10} ortalamalarında görüldüğü gibi Karadeniz'in doğusunda belirgin bir düşüş (% -2 ila % -6 arasında) göstermektedir. Güney kıyılarına yakın yerlerde yerel olarak %2 civarında belirgin artışlar beklenebilir. Sonbahar mevsiminde (Şekil 4.30 j), U_{10} ortalamaları Doğu Karadeniz bölgesinde -%6'e varan (yerel olarak yaklaşık -0,4 m/s) belirgin bir düşüş ve güneybatı kıyı bölgesinde yaklaşık %3'lük (yerel olarak 0,25 m/s) belirgin bir artış göstermektedir. Diğer mevsimlik ortalamaların aksine Yaz mevsiminde (Şekil 4.30 h), U_{10} ortalamaları Karadeniz'in ve Azak Denizi'nin batısında -%1 ila -%3 arasında belirgin bir düşüş göstermektedir. Azak Denizi'nin güney doğusunda ve Karadeniz'in güney doğu kıyıları boyunca %4'e varan belirgin artışlar beklenmektedir.

Karadeniz havzasında rüzgâr ikliminin gelecek değişiminin incelendiği bir çalışmada (Islek vd., 2022a), sunulan ERA5 ve CFSR yeniden analizlerinin tarihsel ortalamaları Şekil 4.30 a'daki yıllık U_{10} ortalamaları ile benzerlik göstermektedir. Atıf verilen çalışmada %75 güven aralığından başlayarak değişimler sunulmuştur ve Karadeniz'in kuzeydoğu kıyıları yakınları için 2061-2100 periyodunda ve %95 üzeri güven aralığında bulunan belirgin azalış beklentisi, Şekil 4.30 b'deki belirgin azalış öngörüsü ile uyuşmaktadır. Aynı çalışmada güney kıyılarının biraz batısında beklenen azalışlar da benzer şekilde öngörülürken; güneydoğu kıyıları yakınında bulunan belirgin artış göstergesi, bu tez çalışmasındaki öngörülerde gözlenmemiştir. Buradaki farklılık, gelecek öngörülerinin bahsedilen çalışmada tekil iklim modeli ile sunulması ve incelenen zaman diliminin on yıl kadar farklı olması sebebiyle görülmüş olabilir.

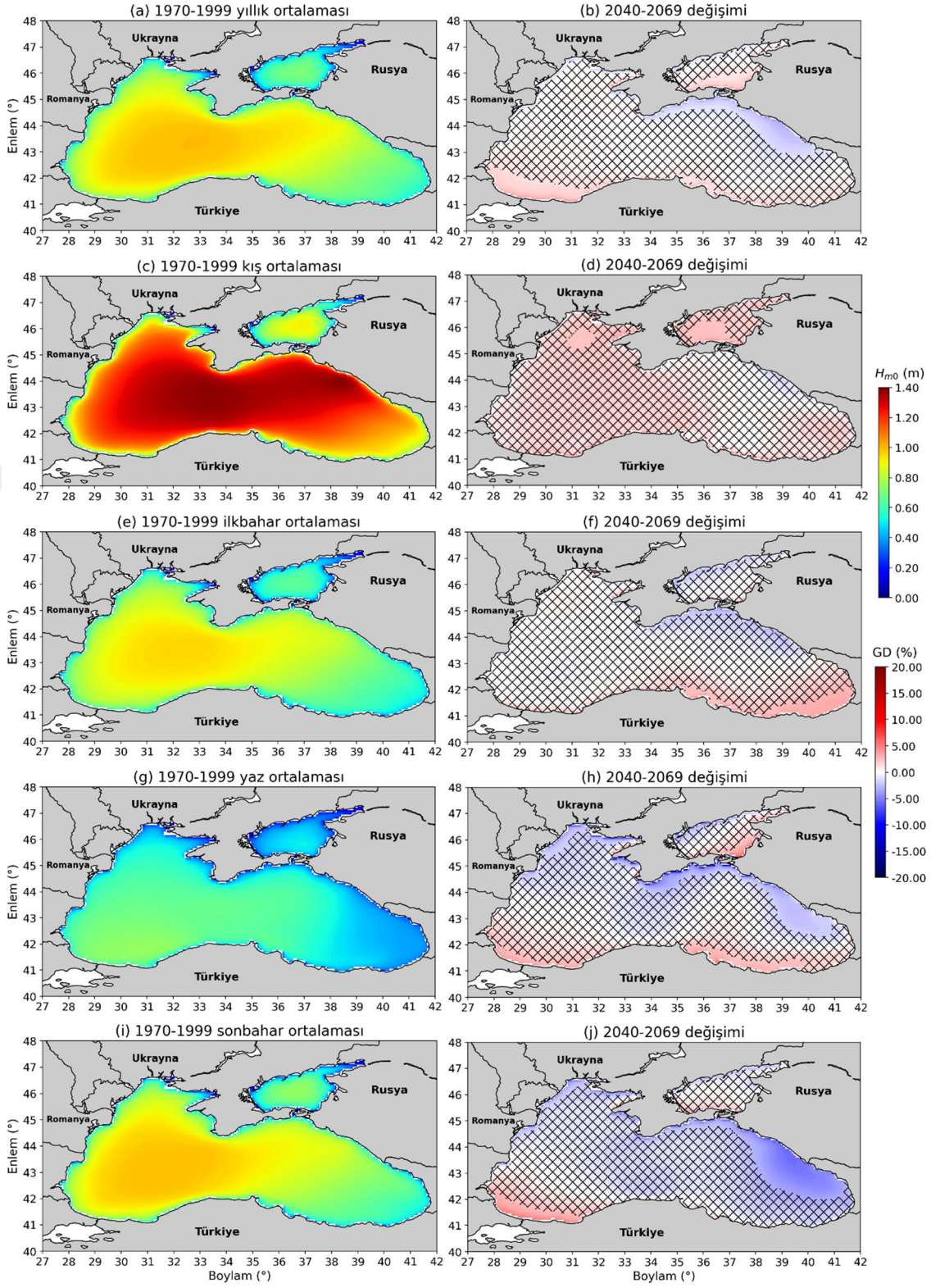
4.3.2. Yıllık ve mevsimlik belirgin dalga yüksekliklerinin gelecek değişimleri

Rüzgâr hızlarının GP1 ve GP2 projeksiyonlarının ardından, belirgin dalga yüksekliklerinin aynı gelecek periyotları için yıllık ve mevsimlik ortalamalarının değişimleri incelenmiştir. GP1 dönemindeki H_{m0} ortalamalarının değişimleri Şekil 4.31'te TP H_{m0} ortalamaları ile birlikte sunulmaktadır. TP yıllık (Şekil 4.31 a), ilkbahar (Şekil 4.31 e) ve sonbahar (Şekil 4.31 i) H_{m0} ortalamaları sırasıyla 0,95 m, 0,90 m ve 0,95 m ile Karadeniz'in merkezinin biraz batısında en yüksek değerlerini almaktadır. Kış mevsiminde (Şekil 4.31 c), en yüksek H_{m0} değerleri havzanın ortasından ve kuzey doğu kıyılarına uzanmış şekilde 1,4 m'ye yakın görünmektedir. En düşük H_{m0} ortalamalarına

sahip olan yaz mevsiminde (Şekil 4.31 g), en yüksek ortalamalar (0,75 m) Karadeniz'in güney batı kıyılarına yakın bir bölgede gözlenmektedir. Karadeniz'de yıllık ve mevsimsel H_{m0} ortalamalarının en düşük olduğu bölgeler Karadeniz'in güneydoğu kıyıları ve Azak Denizi'dir.

GP1 döneminde, H_{m0} ortalamaları havzanın büyük bir kısmında belirgin değişim göstermemektedir. Yıllık H_{m0} ortalamalarının orta vadeli gelecek dönemindeki değişimi Şekil 4.31 b'deki haritada gösterilmektedir. Karadeniz'in güney kıyılarının ağırlıklı olarak batı bölgelerinde ve Azak Denizi'nin güney doğusunda ortalama %3 artış, Karadeniz'in kuzey doğu kıyı bölgesinde ise ortalama -%2 azalış öngörüsü bulunmaktadır. Kış mevsiminde (Şekil 4.31 d), H_{m0} ortalamalarındaki belirgin değişimler sadece Karadeniz'in kuzeyinde ve Azak Denizi'nin güneybatı bölgesinde yerel olarak %4'lük bir artış şeklinde gözlenmektedir. İlkbahar'da (Şekil 4.31 f), H_{m0} ortalamaları Karadeniz'in güneydoğu kıyıları boyunca yaklaşık %4 belirgin artış göstermektedir. Yaz H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.31 h), Karadeniz'in güney kıyıları boyunca yaklaşık %3'lük belirgin artış, kuzey kıyıları boyunca ve doğusunda genişleyen bir alanda ortalama %3'lük belirgin azalış göstermektedir. Azak Denizi'nin güneydoğu kıyı bölgesinde ise, %4'e varan belirgin artışlar öngörülmektedir. Sonbahar mevsiminde (Şekil 4.31 j), H_{m0} ortalamaları yaz mevsimi değişimlerine benzer karakteristiğe sahiptir. Yalnızca, artış öngörüleri biraz daha batı bölgesine, azalış öngörüleri de daha doğu bölgesine kaymış şekilde dağılım göstermektedir.

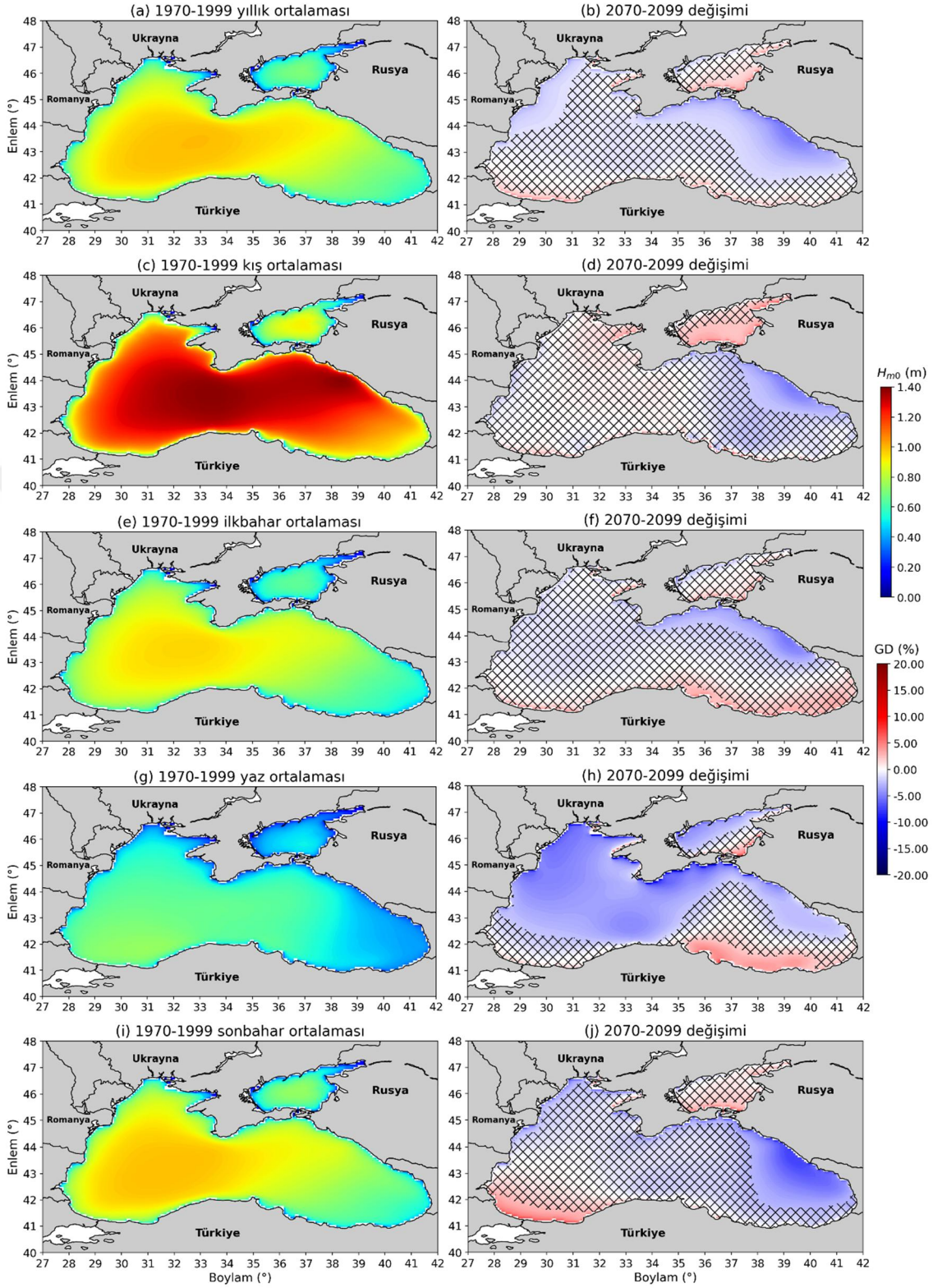
21. yüzyıl son 30 yıllık periyodu için öngörülen H_{m0} ortalamalarının değişimi Şekil 4.32'de verilmektedir. GP2 dönemi için öngörülen değişimler GP1 dönemine kıyasla, tüm mevsimlik ve yıllık ortalamalar için havzada daha geniş alanlarda istatistiksel olarak belirginlik göstermektedir. Yıllık ölçekte (Şekil 4.32 b), H_{m0} ortalamaları kuzey batıda -%2'lik bir azalış, kuzey kıyılarının doğu kesimi ve kuzeydoğu Karadeniz bölgesinde maksimum -%5'e ulaşan belirgin azalış göstermektedir. Yıllık ortalamalarda sadece Karadeniz'in güneybatı kıyı bölgesinde ince bir şerit boyunca ve Azak Denizi'nin güneydoğu kıyı bölgesinde belirgin artışlar (%4'e varan) gözlenmektedir. Yıllık H_{m0} ortalamaları Şekil 4.31 b'de verilen GP1 dönemine kıyasla GP2 döneminde daha ağırlıklı olarak Karadeniz'in kuzey ve doğu bölgelerinde belirgin azalışlar göstermektedir. Şekil 4.32 d'deki GD haritasında görüldüğü gibi, Karadeniz'in kuzeydoğusunda -%6'ya varan



Şekil 4.31. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) H_{m0} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

bir düşüş ve Azak Denizi'nin güneydoğusunda %2 ila %5 arasında bir artış ile H_{m0} ortalamaları öngörülmektedir. Şekil 4.31 d'de GP1 dönemi kış mevsimi ortalamalarında herhangi bir belirgin azalış öngörülmezken GP2 döneminde azalış olması göze çarpmaktadır. İlkbahar mevsimindeki belirgin değişimler (Şekil 4.32 f) yıllık ortalamalardaki belirgin azalış değişimlerine kıyasla daha dar bir bölgede gözlenmektedir. Karadeniz'in güneydoğu kıyısında ise ortalama %2'lik bir artış öngörülmektedir. Öngörülen belirgin düşüşler yaz için havzanın büyük bir kısmında -%8'e kadar istatistiksel olarak belirgin bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 4.32 h). İlkbahar mevsimindeki belirgin artışların gözlendiği kıyı bölgesinde daha genişçe bir alanda %3 'e varan belirgin artışlar yaz mevsimi için de beklenmektedir. Sonbaharda H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.32 j) için, Karadeniz'in doğu bölgesinde (-%8'e ulaşan) belirgin azalışlar ve güneybatı kıyılarında belirgin artışlar (%2-%4) öngörülmektedir. Mevsimlik H_{m0} ortalamaları genel olarak GP2 döneminde, GP1 dönemi ortalamalarına kıyasla havza genelinde daha geniş alanda belirgin azalış öngörüsüne sahiptir.

Islek vd., (2022b) tarafından Karadeniz'de yapılan çalışmada, 2061-2100 dönemi için RCP8.5 senaryosu ile sunulan H_{m0} ortalamalarının tarihsel döneme kıyasla değişimi Şekil 4.32 b'deki 2070-2099 dönemi değişimlerine, 10 yıllık bir zaman dilimi farkı olsa da benzemektedir. Islek vd., (2022b) çalışmasında sunulan tarihsel periyot (1970-2005) H_{m0} ortalamalarının alansal iklim desenleri benzer olsa da ortalama değerleri yüksek bulunmuştur. Bu tez çalışmasında 1970-1999 dönemi yıllık H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.32 a) en fazla 1,05 m iken, bahsedilen çalışmada 1,3 metreyi aşan ortalamalar görülmektedir. Atıf verilen çalışmada, gelecek dönem için belirgin değişimler %75 güven aralığından başlayarak daha yüksek güven aralıklarında sunulmaktadır. Özellikle mevcut tez çalışmasında değerlendirilen %95 üzeri güven aralığındaki değişimler daha fazla benzerlik göstermektedir. Islek vd., (2022b) çalışmasında, Karadeniz'in kuzey kıyılarına yakın bölgedeki %95 üzeri güven aralığında belirgin olan düşüş beklentileri bu tez çalışmasında benzer şekilde öngörülmektedir. Karadeniz'in güneydoğu kıyılarının batısında beklenen belirgin artışlar (%95 ve üzeri güven aralığındaki) yine benzer şekilde bulunmuştur. Bu tez çalışmasında, 2070-2099 döneminde Karadeniz'in güneybatı kıyı bölgesinde %5'e kadar öngörülen artışlar, Islek vd., (2022b) çalışmasında %75-90 güven aralığında belirgin olarak tahmin edilmiştir. Kıyaslama yapılan çalışmada incelenen diğer



Şekil 4.32. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) H_{m0} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

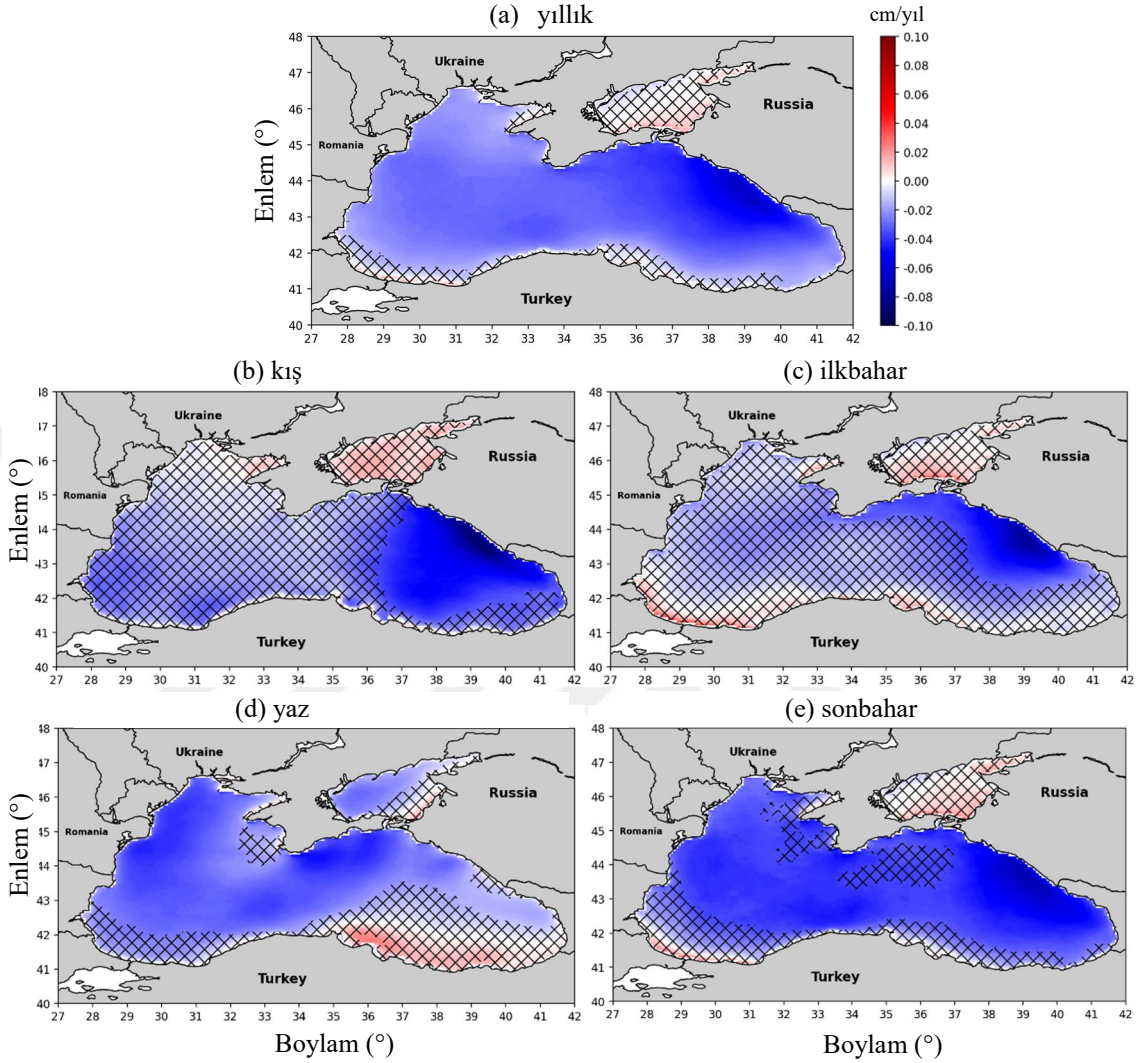
gelecek dönemi 2021-2060 olarak seçilmiştir. Bu periyottaki H_{m0} ortalamalarının değişimi, mevcut tez çalışmasında incelenen 2040-2069 dönem ortalamalarının değişiminden farklı bir karakteristiğe sahiptir. İki farklı çalışmada değerlendirilen yakın gelecek dönemlerindeki değişimin farklı bulunmasının sebebi, irdelenen zaman dilimleri arasında 20 yıllık bir kayma olması gösterilebilir. Ayrıca, diğer çalışmada sadece, Karadeniz'in tarihsel dönem ortalamalarını en iyi temsil eden dalga simülasyonu ile gelecek dönem ikliminin belirlenmesinin ve dalga simülasyonları için farklı model (MIKE21) kullanılmasının farklılıklara neden olabileceği düşünülmektedir.

Karadeniz'de rüzgâr hızlarının değişimleri ile dalga yüksekliklerinin değişimlerinin büyük oranda benzer olduğu görülmüştür. Yıllık ortalamaların değişiminde bazı farklılıklar tespit edilmiştir. Şekil 4.29 b'de rüzgâr hızları Karadeniz'in güney ve doğu kesimlerinde belirgin azalış göstermesine rağmen, H_{m0} ortalamalarında (Şekil 4.31 b) Karadeniz'in güney kesimlerinde, her yerde belirgin olmasa da artış şeklinde değişimler öngörülmektedir. Aynı haritalarda, Karadeniz'in kuzey bölgelerinde rüzgâr hızlarında belirgin olmayan artışlar gözlenmesine rağmen, dalga yüksekliklerinin aynı bölgeler de belirgin şekilde düştüğü görülmektedir. Rusu, (2019b)'da belirtildiği gibi Karadeniz'de hâkim rüzgârlar kuzey yönünden esmektedir. Karadeniz'in kuzeyindeki rüzgârların şiddetini artırması sonucunda, güney bölgelerinde doğrudan rüzgâr dalgaları veya soluğan dalgaları sebebiyle artış gözlenme olasılığı bulunmaktadır. Rüzgâr hızlarının görülme lokasyonu ile beraber ilerleme yönü de dalga üremesi ve gelişmesinde etkilidir. Değişim öngörülen rüzgâr hızları dalga gelişimi için yeterli feç uzunluğu olmadığı durumda dalga iklimi üzerinde etkisi de az olabilmektedir. Karadeniz'in güneyinde rüzgâr hızlarında meydana gelecek bir değişim yeterli feç mesafesi olmadığından o bölgelerde etkisiz kalabilmeleri mümkündür. U_{10} ortalamalarındaki ve H_{m0} ortalamalarındaki yerel farklılıkların oluşmasına bir sebep de rüzgâr esme süresi olabilir. Gelecek projeksiyonunda değişim öngörülen rüzgârların dalga iklimini etkileyecek yeterli sürekliliğe sahip olmaması sebebiyle H_{m0} ortalamaları belirgin değişim gösterememiş olabilir.

4.3.3. Yıllık ve mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin eğilimleri

Gelecek dalga iklimi projeksiyonunda, GP1 ve GP2 dönemleri için sunulan H_{m0} ortalamalarının öngörülen değişimlerinin ardından, 94 yıllık gelecek simülasyonları boyunca yıllık ortalamalar ile hesaplanan eğilimleri incelenmiştir. Bu şekilde, daha geniş bir zaman diliminde değerlendirilen ortalamaların belirgin eğilimleri irdelenmektedir. Eğilimler Theil-Sen Yöntemi ile hesaplanmış ve eğilimlerin istatistiksel anlamlılığı %95 güven aralığında Mann-Kendall Testi ile ölçülmüştür. H_{m0} ortalamalarının yıllık ve mevsimsel eğilimleri Şekil 4.33'de verilmiştir. Yıllık ve mevsimlik H_{m0} ortalamaları için bulunan istatistiksel olarak anlamlı eğilimler havza genelinde aşağı yönlü görünmektedir. Azak Denizi'nde ve Karadeniz'de bazı mevsimlerde yukarı yönlü eğilimler öngörülmektedir, ancak bunlar istatistiksel olarak anlamlı değildir. Karadeniz'de yıllık H_{m0} ortalamaları için öngörülen anlamlı düşüşler (Şekil 4.33 a) daha belirgin olup -0,01 cm/yıl ile -0,04 cm/yıl arasında değişmekte ve Rusya açıklarında -0,06 cm/yıl değerlerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla, 94 yıllık gelecek dönem için, Karadeniz'de yıllık H_{m0} ortalamasında öngörülen maksimum 5,7 cm'lik bir düşüş beklenebilir. Şekil 4.32 b'deki öngörülen değişimler haritasında kuzeydoğu kıyılarında yerel olarak en fazla -%5'lik belirgin düşüş beklentisi ile benzerlik göstermektedir. Mevsimlik H_{m0} ortalamalarının öngörülen ortak anlamlı eğilimler yıllık ortalamalardakine benzer şekilde, Karadeniz'in kuzey doğusundaki aşağı yönlü eğilimlerdir. Bu bölgede beklenebilecek yerel olarak maksimum düşüş eğilimleri kış (Şekil 4.33 b), ilkbahar (Şekil 4.33 c) ve sonbahar (Şekil 4.33 e) mevsimlerinde, yaz mevsimine (Şekil 4.33 d) kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Kış mevsimindeki anlamlı düşüş eğilimleri güneydoğu kıyılarında -0,03 cm/yıl ile başlamakta ve kuzeydoğu kıyılarında -0,09 cm/yıl eğimine ulaşmaktadır. Bu eğilim, 94 yıllık dönemde 8,5 cm'lik bir azalma öngörüldüğünü göstermektedir ki bu da Şekil 4.32 d'de aynı bölgede yüzyılın sonu için beklenen %5,5'lik azalışa (7,2 cm) yakındır. İlkbaharda, gelecek dönemin sonunda toplam 7 cm (-0,075 cm/yıl, Şekil 4.33 c) azalış beklenmektedir. Sonbaharda aynı bölge için (Şekil 4.33 d), yerel olarak gözlenen -0,07 cm/yıllık en büyük anlamlı düşüş eğilimi, H_{m0} ortalamalarında toplam 6,5 cm'lik bir düşüş anlamına gelmektedir. Şekil 4.32 j'de H_{m0} ortalamalarında öngörülen önemli değişikliğin Rusya açıklarında yerel olarak 7 cm'ye (-%9) ulaşmasının beklenebileceğini göstermektedir. H_{m0} yaz ortalamalarının, Azak Denizi'nin kuzey kıyısı boyunca benzer

şekilde öngörülen değişimlerde (Şekil 4.32 h) ve öngörülen eğilimlerde (Şekil 4.33 e), sırasıyla 2 cm (-%5) ve 2,8 cm (-0,03 cm/yıl) azalması beklenmektedir.



Şekil 4.33. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık H_{m0} ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)

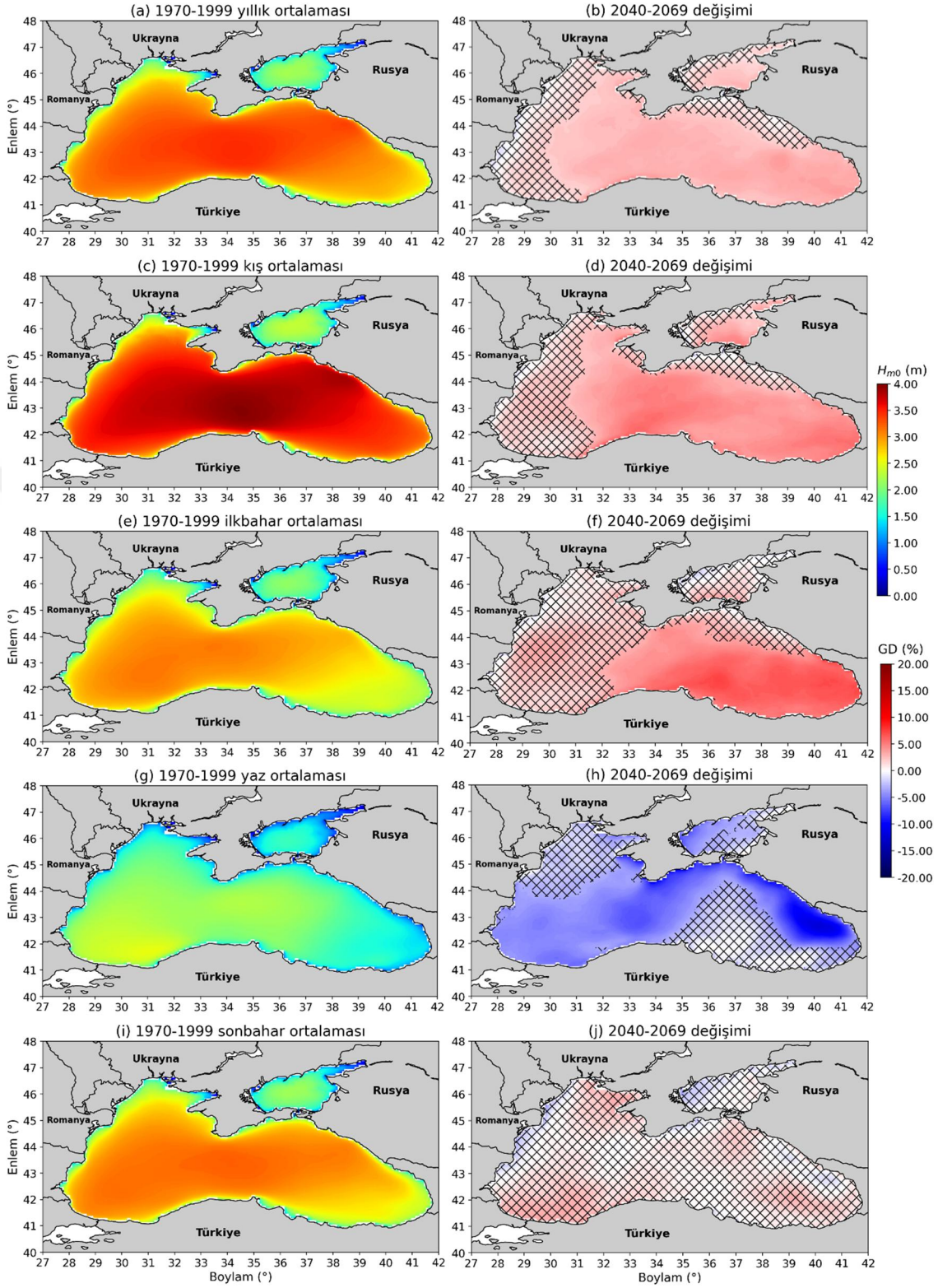
Islek vd., (2022b), H_{m0} eğilimlerini de 2021-2060 ve 2061-2100 dönemleri için irdelemiştir. 2021-2060 döneminde %95 ve üzeri güven aralığında H_{m0} için istatistiksel anlamlı bir eğilim bulunmamıştır. 2061-2100 döneminde istatistiksel olarak anlamlı eğilimler (%75 ve üzeri güven aralığında) havza genelinde azalış eğimi göstermektedir. Bu tez çalışmasında, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı eğilimler bütün gelecek simülasyon periyodunu kapsayacak şekilde 2006-2099 zaman dilimi için hesaplanmıştır. Bu nedenle, Şekil 4.33 a'da görüldüğü gibi yıllık H_{m0} ortalamalarının

eğilimleri neredeyse bütün Karadeniz havzası boyunca istatistiksel olarak anlamlı ve aşağı yönlü eğim göstermektedir.

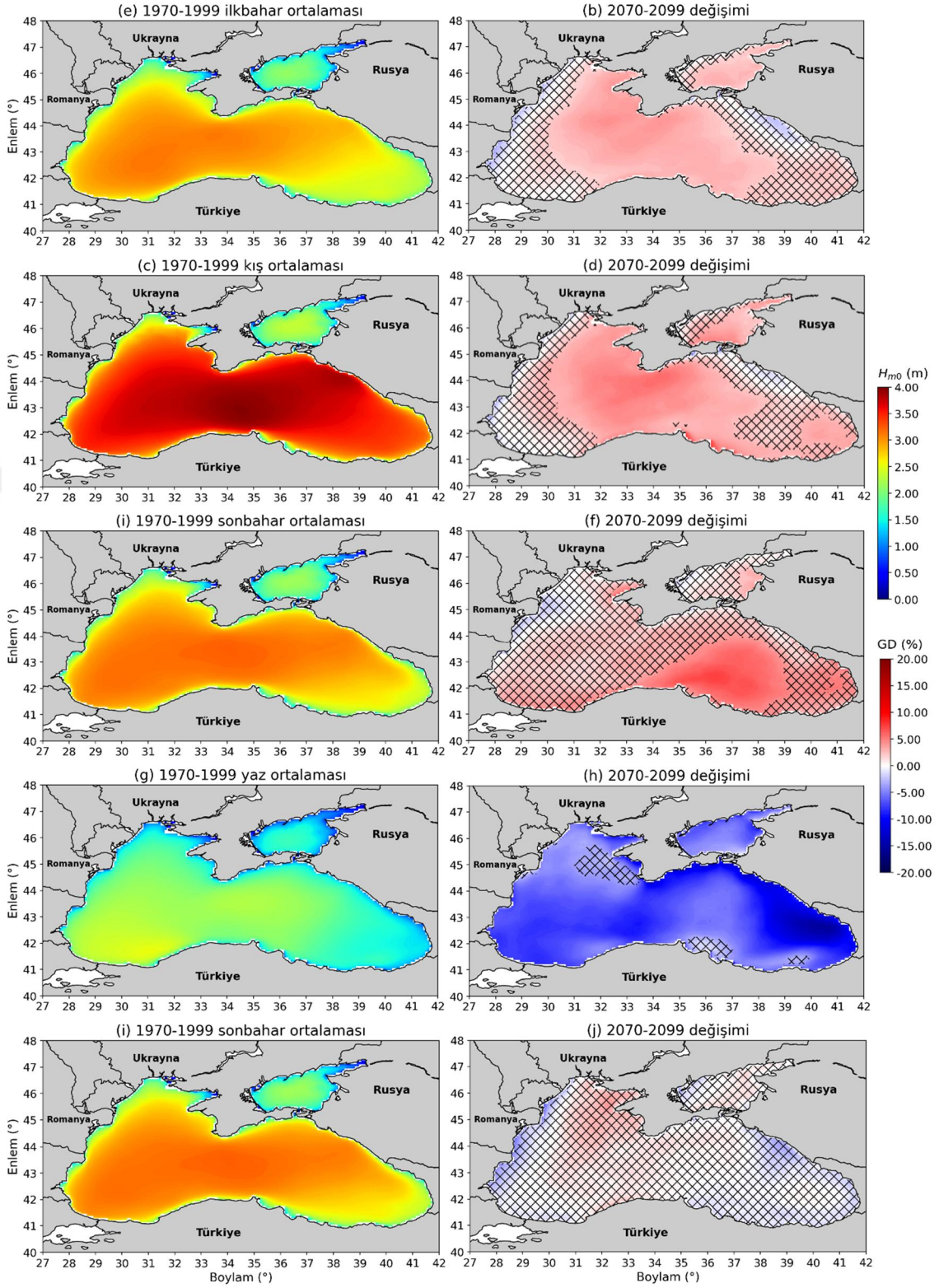
4.3.4. Yıllık ve mevsimlik %99'luk dilimdeki H_{m0} değerlerinin gelecek değişimleri

Belirgin dalga yüksekliklerinin ortalamalarının gelecek dönemler için öngörülen değişimlerinin ardından, aşırı değerlerini temsil eden %99'luk dilimdeki H_{m0} değerlerinin (H_{99}) yıllık ve mevsimlik ortalamalarının değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.34, H_{99} yıllık ve mevsimlik TP ortalamaları ve bu ortalamaların GP1 dönemindeki değişimleri birlikte sunulmaktadır. H_{99} ortalamaları yıllık ölçekte (Şekil 4.34 a), kış mevsimi (Şekil 4.34 c) ve sonbahar (Şekil 4.34 i) için Karadeniz'in merkez bölgesinde en yüksek değerini alarak batı ve doğu bölgesine doğru daha homojen bir dağılım göstermektedir ve en büyük değerleri sırasıyla, 3,4 m, 3,95 m ve 3,1 m olarak gözlenmiştir. Yıllık (Şekil 4.34 b) ve kış mevsimi (Şekil 4.34 d) H_{99} ortalamaları çok benzer bir alansal iklim deseni ile havzanın büyük bir bölümünde %7'ye varan belirgin artışlar göstermektedir. Yıllık ve kış ortalamalarında sadece Karadeniz'in batı bölgesi, kuzey kıyıları ve Azak Denizi'nin kuzey kıyılarında belirgin değişim öngörülmemiştir. Sonbahar H_{99} ortalamalarında (Şekil 4.34 j) havza genelinde belirgin bir değişim beklenmemektedir. İlkbahar mevsimi H_{99} ortalamalarının (Şekil 4.34 e) daha yüksek değerleri (yaklaşık 3,1 m), H_{m0} ortalamalarının genel karakteristiğine benzer şekilde Karadeniz'in batı bölgesinde yoğunlaşmaktadır. GP1 döneminde ilkbahar H_{99} ortalamaları için (Şekil 4.34 f), yıllık ve kış mevsimi değişimlerine benzer ancak, biraz daha dar bir bölgede %8 civarında belirgin artış öngörülmektedir. Havzada H_{99}, en düşük ortalamaları yaz mevsiminde (Şekil 4.34 g) vermektedir ve genel olarak 2,6 m ve altında kalmaktadır. GP1 dönemindeki ortalamaların genel değişim karakteristiğine aykırı bir şekilde, yaz ortalamalarının değişimi (Şekil 4.34 h) için havzanın büyük bir kısmında sadece belirgin azalış beklentisi bulunmaktadır. Belirgin azalış öngörüleri Karadeniz'in doğusunda -%13 seviyelerine kadar ulaşmaktadır.

Karadeniz'de H_{99} ortalamalarının GP2 döneminde, yıllık ve mevsimlik olarak öngörülen değişimleri Şekil 4.35'da sunulmaktadır. Yaz (Şekil 4.35 h) ve sonbahar mevsimleri (Şekil 4.35 j) dışında ortalamalardaki belirgin artış öngörüleri GP1 dönemindekine benzer şekilde havza genelinde baskındır ancak alansal olarak biraz daha sınırlı kalmıştır. Yıllık



Şekil 4.34. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) %99'luk dilimdeki H_{m0} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

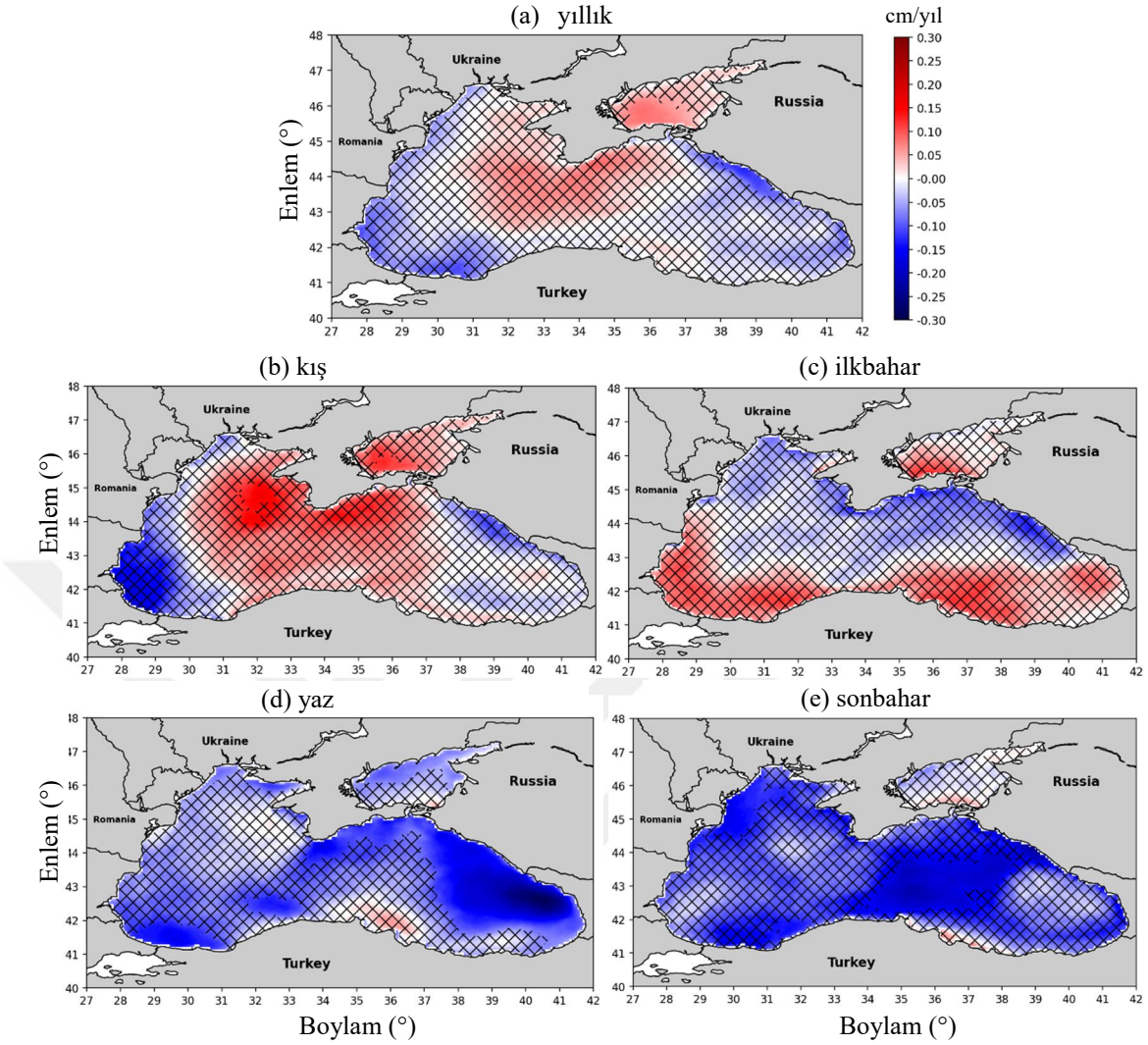


Şekil 4.35. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) %99'luk dilimdeki H_{m0} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

(Şekil 4.35 b), kış (Şekil 4.35 d) ve ilkbahar (Şekil 4.35 f) ortalamalarının değişim haritalarında, belirgin artış beklentisi olan alanlar Karadeniz'in doğu bölgesi tarafında daralma göstermektedir. Öngörülen artış oranları GP1 döneminin ilgili yılı veya mevsimi ile oransal olarak benzerlik göstermektedir. Bu öngörülen değişikliklerle, yıllık H_{99} ortalamaları yerel olarak en fazla 20 cm, kış ortalamaları en fazla 30 cm ve ilkbahar ortalamaları 15 cm civarında artış göstermesi mümkün görülmektedir. Sonbahar H_{99} ortalamaları (Şekil 4.35 j) GP1 döneminde olduğu gibi belirgin değişim göstermemektedir. GP1 döneminde diğer değişimlerden aykırılık gösteren yaz mevsimi H_{99} ortalamaları (Şekil 4.35 h) GP2 dönemi için de belirgin düşüşler ile karakterize olmaktadır. GP1 dönemi ortalamalarından farklı olarak, azalış beklentisi öngörülen alanalar havzada daha geniş alan kaplamakta ve doğuda -%15 oranında değişim oranına ulaşmaktadır. Doğudaki yüksek azalış öngörüsü oranına rağmen, buradaki ortalamaların 1,5 m civarında olması nedeniyle, yerel olarak en fazla 25 cm'lik bir değişim söz konusu olabilmektedir.

4.3.5. Yıllık ve mevsimlik %99'luk dilimdeki H_{m0} değerlerinin eğilimleri

Şekil 4.36, gelecek dönemi boyunca yıllık ve mevsimsel H_{99} ortalamalarının öngörülen eğilimlerini göstermektedir. Havzada H_{99} ortalamaları için istatistiksel olarak anlamlı eğilimlere sahip bölgeler, H_{m0} ortalamaları için olanlardan daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Yıllık H_{99} ortalamaları (Şekil 4.36 a), yalnızca Azak Denizi'nin güneyinde maksimum 0,1 cm/yıla ulaşan anlamlı bir artış eğilimi göstermektedir. Karadeniz'in kuzeydoğu kıyı bölgesinde, yıllık H_{99} ortalamaları için -0,1 cm/yıl eğimli anlamlı bir düşüş eğilimi öngörülmektedir. Öngörülen bu eğilimlerle, 21. yüzyılın sonunda yıllık H_{99} ortalamasında ±10 cm'ye kadar toplam değişiklikler (artışlar veya azalmalar) beklenebilir. Şekil 4.34 b ve Şekil 4.35 b'deki H_{99} ortalamalarında öngörülen belirgin değişimler ile Şekil 4.36 a'da öngörülen ortak değişim Azak Denizi'ndeki H_{99} ortalamasının artmasıdır.



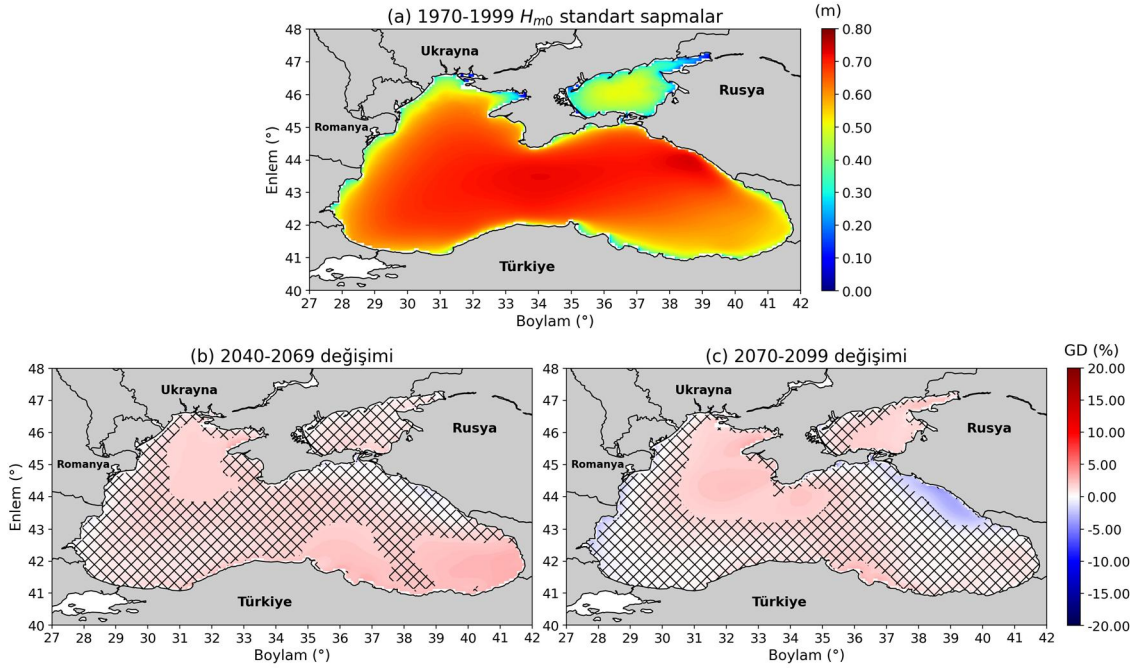
Şekil 4.36. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık H_{99} ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)

H_{99} ortalamalarının mevsimsel eğilim öngörüleri (Şekil 4.36 b-e) Karadeniz için farklı karakteristikler göstermektedir. Bütün gelecek periyodunda H_{99} ortalamaları kış mevsimi (Şekil 4.36 b) ortalamalarının öngörülen yukarı yönlü eğilimleri yalnızca kuzeybatı Karadeniz'de (0,15 cm/yıl) ve Azak Denizi'nin güneyinde (0,1 cm/yıl) dar bir alanda istatistiksel olarak anlamlıdır. İlkbahar mevsiminde (Şekil 4.36 c), havzadaki H_{99} ortalamaları için anlamlı bir eğilim öngörülmemektedir. Yaz (Şekil 4.36 d) ve sonbahar (Şekil 4.36 e) mevsimlerinde, H_{99} ortalamaları Karadeniz'de yalnızca anlamlı bir düşüş eğilimleri göstermektedir. Yazın, H_{99} ortalamaları doğu kıyı bölgesi yakınlarında -0,25 cm/yıl ile en yüksek eğilimi göstermektedir. Sonbahar mevsiminde, H_{99} ortalamalarının -0,18 cm/yıl eğimine ulaşan anlamlı düşüş eğilimleri Doğu Karadeniz'in merkezinde

öngörülmektedir. Sonuç olarak, 2005-2099 döneminin sonunda mevsimsel H_{99} ortalamalarında yerel olarak yaklaşık 25 cm'lik bir düşüş beklenebilir.

4.3.6. Yıllık H_{m0} standart sapmalarının gelecek değişimleri

Yıllık H_{m0} ortalamalarının ve H_{99} değerlerinin iki farklı 30 yıllık gelecek periyodundaki değişimlerinin değerlendirilmesinin ardından, Şekil 4.37'de yıllık H_{m0} standart sapmalarının gelecek değişimi sunulmaktadır. Tarihsel dönemde (Şekil 4.37 a) Karadeniz açıklarında yıllık H_{m0} standart sapmalarının ortalamaları 0,6 - 0,75 m aralığında değiştiği görülmektedir. Yıllık H_{m0} standart sapmalarının GP1 döneminde (Şekil 4.37 b), Karadeniz'in kuzeybatısı ve güneydoğusunda istatistiksel olarak belirgin olmak kaydıyla havzanın genelinde artacağı öngörülmektedir. GP2 dönemimde (Şekil 4.37 c) ise, Karadeniz'in kuzeydoğu kıyı bölgesi haricinde yine havzanın büyük bir bölümünde yıllık H_{m0} standart sapmalarının artış göstereceği tahmin edilmektedir. Şekil 4.31 b ve Şekil 4.32 b'de H_{m0} ortalamalarının havza genelinde azalış göstereceği tahmin edilirken, Şekil 4.34 b ve Şekil 4.35 b'de yıllık H_{99} değerlerinin havza genelinde artış göstermesinin etkisi ile yıllık H_{m0} standart sapmalarında havza genelinde artış beklentisini oluşturmaktadır.



Şekil 4.37. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) H_{m0} standart sapmaları ve gelecek dönemleri için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

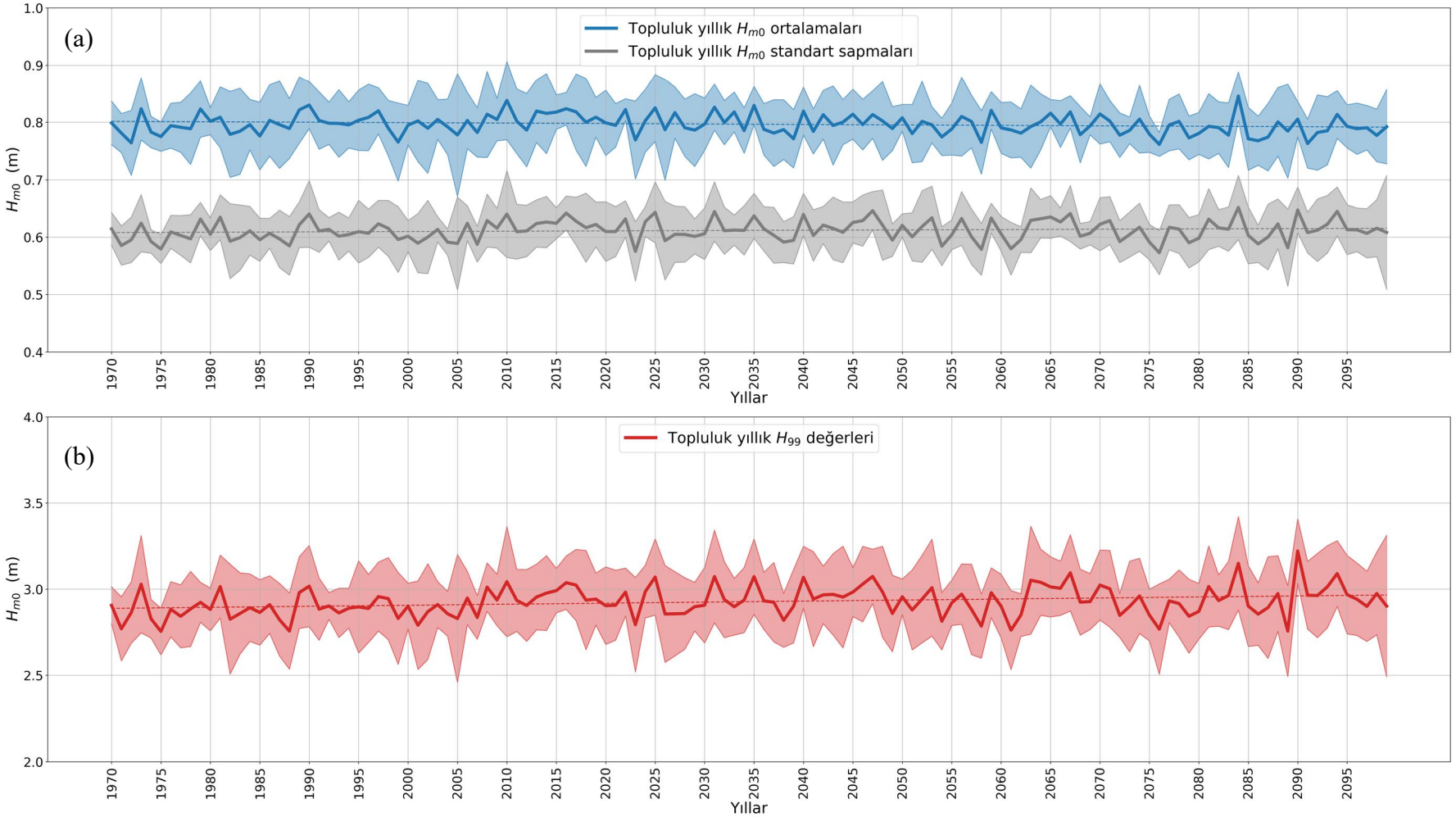
4.3.7. Yıllık H_{m0} ortalamalarının, standart sapmalarının ve %99'luk değerlerinin tarihsel ve gelecek dönem boyunca değişimi

Yıllık H_{m0} ortalamaları, H_{m0} standart sapmaları ve H_{99} değerlerinin tarihsel dönem ve gelecek dönem simülasyonları boyunca tüm havza bazında değişimi Şekil 4.38'de sunulmaktadır. Şekildeki grafiklerde topluluk modelin yıllık H_{m0} ortalamaları, standart sapmaları ve H_{99} değerlerinin değişimleri koyu renkli çizgiler ile gösterilmektedir. Kesikli çizgiler ile bu değişimlere uygun eğilimler belirtilmektedir. Grafiklerde ayrıca, topluluk üyelerinin incelenen değerler için gösterdikleri standart sapmalar kullanılarak hesaplanmış belirsizlik aralıkları da açık renkli bant ile tanımlanmaktadır.

Şekil 4.33 a'da yıllık H_{m0} ortalamalarının bütün gelecek dönem boyunca gösterdiği istatistiksel olarak anlamlı aşağı yönlü eğilime benzer olarak, Şekil 4.38 a'da yıllık H_{m0} ortalamaları 1970-2099 döneminde az da olsa azalış eğilimi göstermektedir. Yine Şekil 4.38 a'da gösterilen yıllık H_{m0} standart sapmalarının 1970-2099 dönemi boyunca az bir eğimle artış göstereceği öngörülmektedir. Yıllık H_{99} değerlerinin havzanın tamamı için 1970-2099 dönemi boyunca değişimi (Şekil 4.38 b), yıllık H_{99} değerlerinin gelecek dönemi sonunda artış beklentisini göstermektedir. H_{m0} ortalamalarının havza bazlı olarak azalış eğilimine karşılık, H_{99} değerlerinin artış göstermesine bağlı olarak yıllık H_{m0} standart sapmalarının artış göstermesine sebep olacağı beklenmektedir.

4.3.8. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga periyodunun gelecek değişimleri

Dalga iklimi değerlendirmesi için önemli bir başka parametre olan ortalama dalga periyodunun (T_{m02}) ortalamalarının gelecek dönemler için değişimleri de incelenmiştir. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40, sırasıyla GP1 ve GP2 dönemlerinde T_{m02} ortalamalarının TP ortalamalarına göreceli olarak öngörülen değişimlerini TP ortalamaları ile beraber göstermektedir. TP yıllık T_{m02} ortalamaları (Şekil 4.39 a) Karadeniz'de kıyıdan açığa doğru 2,5 s ile 3,5 s arasında değişmektedir. Azak Denizi'nde ise ortalamalar 2 s ile 2,6 s arasında seyretmektedir. Kış mevsimi T_{m02} ortalamaları (Şekil 4.39 c), batı kıyısında 3 saniyenin altında iken, Karadeniz'in merkezi ve kuzeydoğu kıyılarına doğru 3,5 s ile 4 s arasında olduğu gözlenmektedir. İlkbahar (Şekil 4.39 e) ve sonbahar (Şekil 4.39 i) T_{m02} ortalamaları büyüklük ve alansal iklim deseni bakımından yıllık ortalamalara benzerdir.

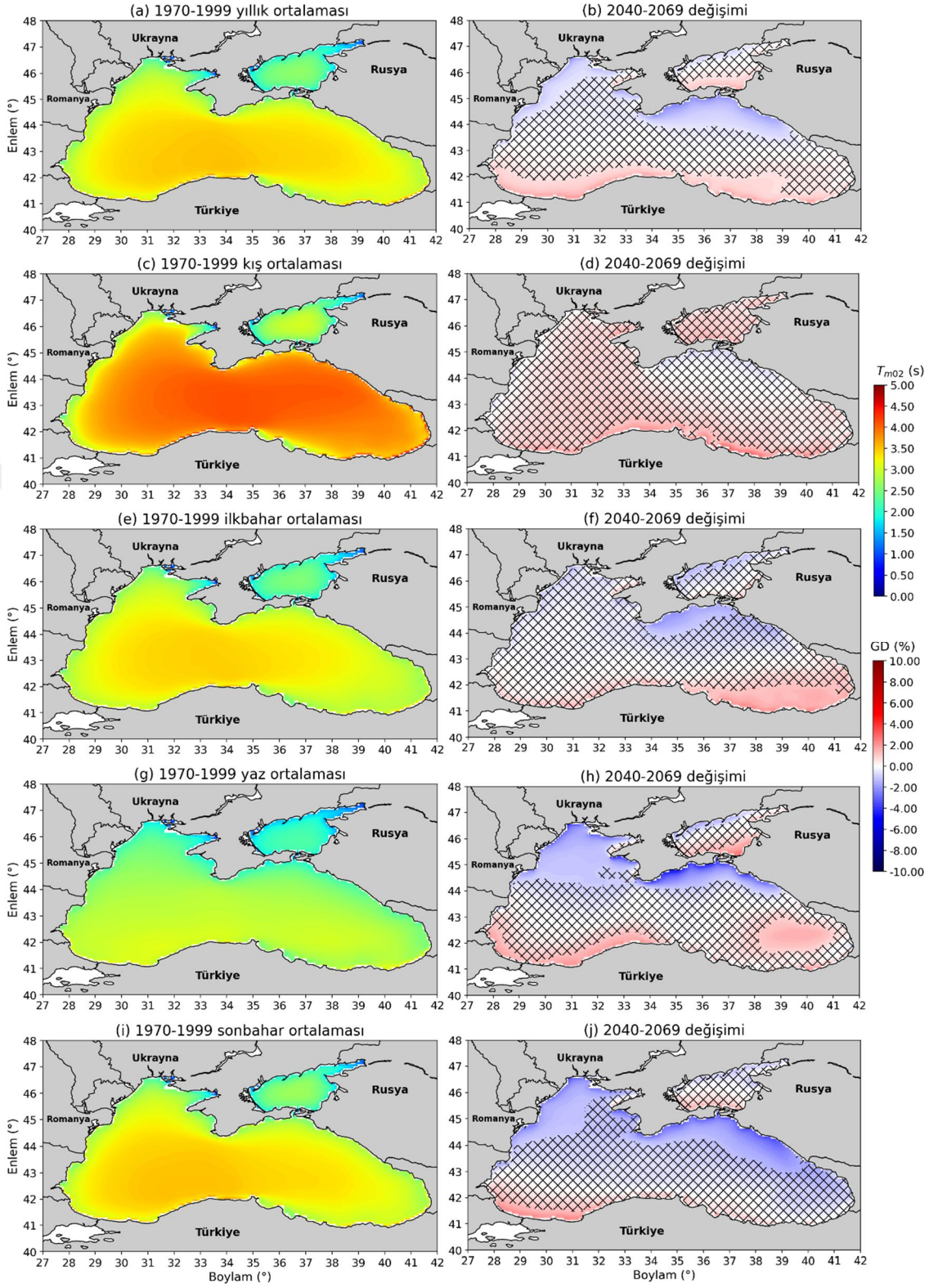


Şekil 4.38. Tarihsel ve gelecek dönem boyunca (1970-2099) topluluğun yıllık H_{m0} ortalamaları, standart sapmaları ve H_{99}'larının değişimi

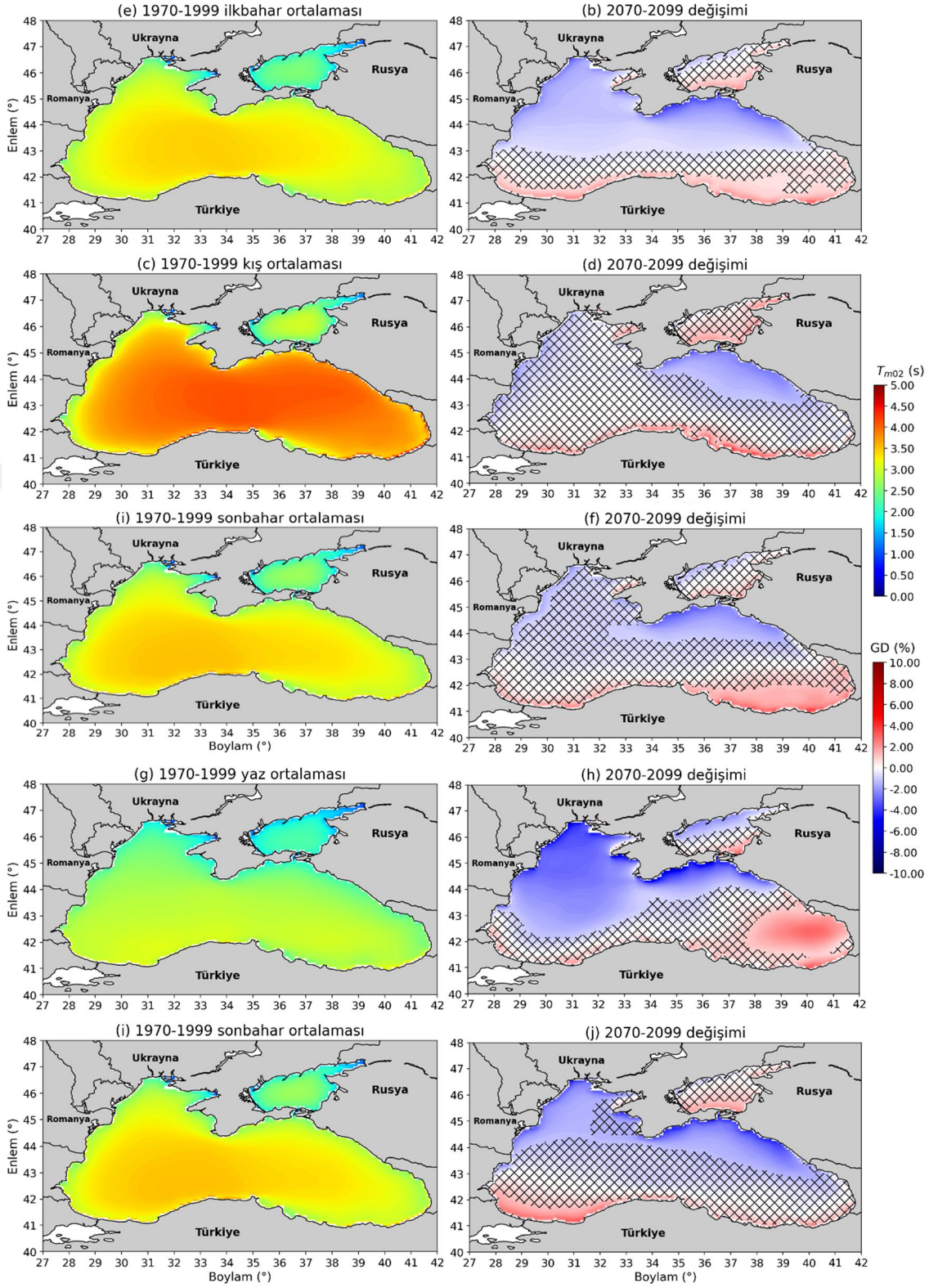
Yaz mevsimi T_{m02} ortalamaları (Şekil 4.39 g) en düşük değerlere sahiptir ve havzanın kuzey kesiminde 1,7 s ile güney bölgesinde 3 s arasında değişmektedir. Azak Denizi dar alana sahip ve sığ bir havza olduğu için bütün mevsimlerin ve yıllık T_{m02} ortalamaları düşük çıkmaktadır.

T_{m02} ortalamalarında gelecek dönemlerde öngörülen belirgin değişikliklerin büyüklüklerinin H_{m0} ortalamalarında beklenen değişikliklerden daha az olduğu gözlenmektedir. Hem Karadeniz'de hem de Azak Denizi'nde, yıllık T_{m02} ortalamaları (Şekil 4.39 b) kuzey kıyılarında -%3'e varan belirgin azalış ve güney kıyılarında %1 ile %2 arasında belirgin artışlar göstermektedir. Bu iklim deseni, değişim oranları farklı olsa da kış mevsimi hariç bütün mevsimlik ortalamaların değişim haritaları için benzerdir. Kış mevsimi T_{m02} ortalamaları (Şekil 4.39 c), yalnızca Karadeniz'in güney kıyılarında dar kesitli bir alan boyunca %2-%3 belirgin artış göstermektedir. Sonbahar ortalamaları (Şekil 4.39 j), güneydoğu kıyılarında ve Azak Deniz'inde belirgin değişiklik beklenmesi dışında yıllık ortalamalara çok benzer bir karakteristiğe sahiptir. İlkbahar T_{m02} ortalamalarının değişimi (Şekil 4.39 f) ise batı bölgesinde belirgin artış ve azalış göstermemesi haricinde yine yıllık ortalamaların değişim haritasına benzemektedir. Yaz mevsiminde (Şekil 4.39 h), yıllık ortalamaların değişiminde güneydoğu kıyıları boyunca gözlenen belirgin artış öngörüsü, doğu bölgesinin merkezinde bir bölgede beklenmektedir. Kuzey kıyılarında ortalamalarda beklenen belirgin azalışların da -%5 seviyelerine çıkması beklenmektedir.

GP2 dönemi yıllık T_{m02} ortalamalarının değişimi (Şekil 4.40 b) GP1 dönemi yıllık T_{m02} ortalamalarının değişim oranlarına (Şekil 4.40 b) benzerlik göstermektedir. Farklı olarak GP2 döneminde belirgin artış beklenen alanlar neredeyse aynı kalırken, belirgin azalış öngörülen bölgelerin alansal olarak güneye doğru arttığı gözlenmiştir. Benzer durum kış mevsimi ortalamalarında (Şekil 4.40 d) da gözlenmiştir. Kışın GP2 döneminde Karadeniz'in güneyinde öngörülen belirgin artışın GP1 dönemindekine benzer olduğu, kuzeydoğu bölgesinde ise belirgin azalış beklentisinin oluştuğu görülmüştür. Kış mevsiminde T_{m02} ortalamalarında öngörülen belirgin azalışlar ilkbahar mevsimi için (Şekil 4.40 f) biraz daha batıya kayarken, güneydoğu kıyısı boyunca daha geniş bir bölgede ortalama %3'lük belirgin artışlar öngörülmektedir. T_{m02} ortalamaları, hem Karadeniz'in (-%6'ya varan) hem de Azak Denizi'nin (-%2) kuzey bölgeleri boyunca yaz



Şekil 4.39. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) T_{m02} ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)



Şekil 4.40. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) T_{m02} ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

mevsiminde (Şekil 4.40 h) belirgin azalış göstermektedir. Aynı mevsim boyunca, Karadeniz'in doğu kesimi ve güneydoğu kıyılarında %1 ile %2 arasında belirgin artışlar beklenmektedir. GP2 dönemi için sonbahar mevsimi T_{m02} ortalamalarının değişiminin (Şekil 4.40 j), GP1 dönemi sonbahar ortalamaları değişimine benzediği görülmüştür. Sadece, havzada belirgin artış ve azalış gösteren alanların biraz genişlediği dikkat çekmektedir.

Yıllık T_{m02} tarihsel dönem ortalamaları (Şekil 4.40 a), Islek vd., (2022b) çalışmasında gelecek dönem değişimlerini belirlemek için referans olarak kullanılan tarihsel dönem ortalamalarına benzerdir. 2070-2099 döneminde beklenen değişimler (Şekil 4.40 b) de, atıf verilen çalışmanın 2061-2100 dönemindeki ortalamaların değişim öngörüsü ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. İki çalışmada da benzer şekilde Karadeniz'in kuzey kıyı hattına paralel şekilde uzanan genişçe bir alanda belirgin azalış, güney kıyı bölgelerinde ise, kuzeydeki artış beklenen alanlara nazaran daha dar bir hat boyunca belirgin artış öngörülmektedir. T_{m02} ortalamalarında belirgin artış ve azalış beklenen alanların genişliği de benzerlik gösterse de, Islek vd., (2022b) çalışması, daha düşük güven aralığı için bu belirgin değişimleri göstermektedir.

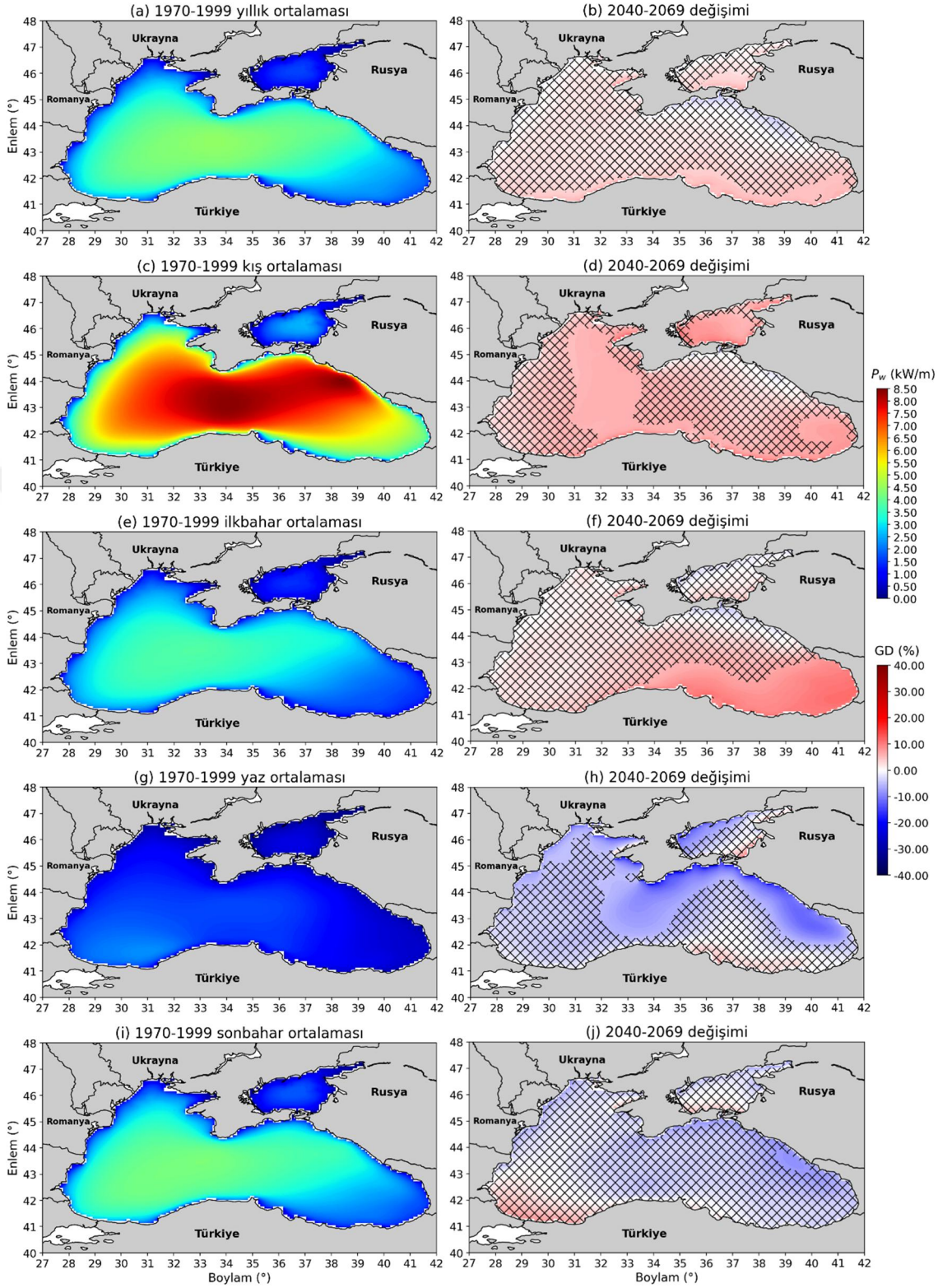
4.3.9. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga gücünün (P_w) gelecek değişimleri

Gelecek dönem değişimleri incelenen başlıca dalga parametrelerinden sonra dalga yüksekliği ve dalga periyoduna bağlı olarak hesaplanan dalga enerji akısı veya ortalama dalga gücü olarak isimlendirilen P_w ortalamalarının değişimi odağa alınmıştır. Dalga gücü, Denklem 3.5'te gösterildiği gibi birinci dereceden dalga enerjisi periyotlarının ve ikinci dereceden dalga yüksekliklerinin bir fonksiyonudur. Okyanus yüzeyinde dalgalar tarafından yayılan enerjinin taşınmasını ifade eder. Bu nedenle hem dalga iklimi değerlendirmeleri hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından biri alan dalga enerjisi projeksiyonları için önem arz etmektedir. TP dönemi yıllık ve mevsimlik P_w ortalamaları ve onların orta vadeli gelecek dönemi olarak nitelendirilen GP1 dönemi değişimleri Şekil 4.41'da sunulmaktadır. Mevcut dalga ikliminde (TP) yıllık ve mevsimsel P_w ortalamaları Karadeniz için 9 kW/m'nin altındadır. Yıllık P_w ortalamaları (Şekil 4.41 a), H_{m0} yıllık ortalamasının (Şekil 4.31 a) en yüksek olduğu bölgede 4,5 kW/m civarında olduğu gözlenmektedir. Mevsimsel P_w ortalamalarında en yüksek değerler kış (Şekil 4.41 c) için

yaklaşık 8,5 kW/m, ilkbahar (Şekil 4.41 e) için 3,8 kW/m, yaz (Şekil 4.41 g) için 2,3 kW/m ve sonbahar (Şekil 4.41 i) için 4,2 kW/m'dir. Yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarının en büyük değerleri tam olarak ilgili H_{m0} ortalamalarının en büyük değere sahip bölgelerde gözlenmektedir. Azak Denizi'nde en yüksek P_w ortalaması kış mevsiminde yaklaşık 2,4 kW/m olarak gözlenmiştir.

Gelecek dönemlerdeki P_w ortalamalarında öngörülen değişimler, ilgili gelecek döneminde H_{m0} ortalamalarında beklenen değişimler ile paralellik göstermektedir. H_{m0} ortalamalarında gözlenen artış ve azalış beklentileri benzer şekilde P_w ortalamalarının değişiminde gözlenmekte ancak; istatistiksel belirginliği bakımından farklılık gösterebilmektedir. Yıllık P_w ortalamaları (Şekil 4.41 b) Karadeniz'in ve Azak Denizi'nin güney kıyıları boyunca %10'a yaklaşan belirgin artış öngörüsü göstermektedir. Havzanın diğer bölgelerinde belirgin bir değişim beklenmemektedir. Yıllık H_{m0} ortalamalarında (Şekil 4.31 b) öngörülen -%2 civarındaki azalış P_w ortalamalarına yansımamıştır. Kış mevsimi P_w ortalamalarında (Şekil 4.41 c) öngörülen değişimler %10'un üzerinde belirgin artışlar şeklinde gözlenmektedir. Kış mevsimi H_{m0} ortalamalarında (Şekil 4.31 d) artış eğilimi gösteren ancak; istatistiksel olarak belirgin olmayan bölgeler P_w ortalamaları için belirgin artış gösterir hale gelmiştir. İlkbahar mevsiminde (Şekil 4.41 f), H_{m0} ortalamalarında (Şekil 4.31 f) %3 civarında belirgin artış öngörülen Karadeniz'in güneydoğu bölgesinde P_w ortalamaları için %15'e yakın belirgin artış daha geniş bir alan için öngörülmektedir. Yaz P_w ortalamaları (Şekil 4.41 h), yalnızca H_{m0} ortalamalarının (Şekil 4.31 h) kuzeyi boyunca gözlenen belirgin azalışı aynı bölgede daha geniş bir alan için belirgin azalış olarak yansıtmaktadır. Karadeniz'in güneyinde H_{m0} ortalamalarındaki belirgin artış beklentisi P_w ortalamaları için belirgin artış şeklinde öngörülmemektedir. Sonbahar P_w ortalamalarında (Şekil 4.41 j) diğer ortalamaların değişiminden farklı bir durum göze çarpmaktadır. H_{m0} ortalamalarının (Şekil 4.31 h), aynı mevsimde belirgin artış öngörüsü bulunan güneybatı kıyılarında P_w ortalamaları için belirgin değişim beklenmemekte ve ayrıca, H_{m0} ortalamaları için belirgin azalış gözlenen doğu bölgesindeki alanın P_w ortalamalarında oldukça daraldığı görülmektedir.

Şekil 4.42'de P_w ortalamalarının GP2 dönemi için öngörülen değişimleri göstermektedir. Yıllık ortalamalarda (Şekil 4.42b) öngörülen artışlar (%4 ila %6) güney Karadeniz kıyısındaki dar bir alan için ve Azak Denizi'nin güneydoğusunda beklenmektedir. Kuzey

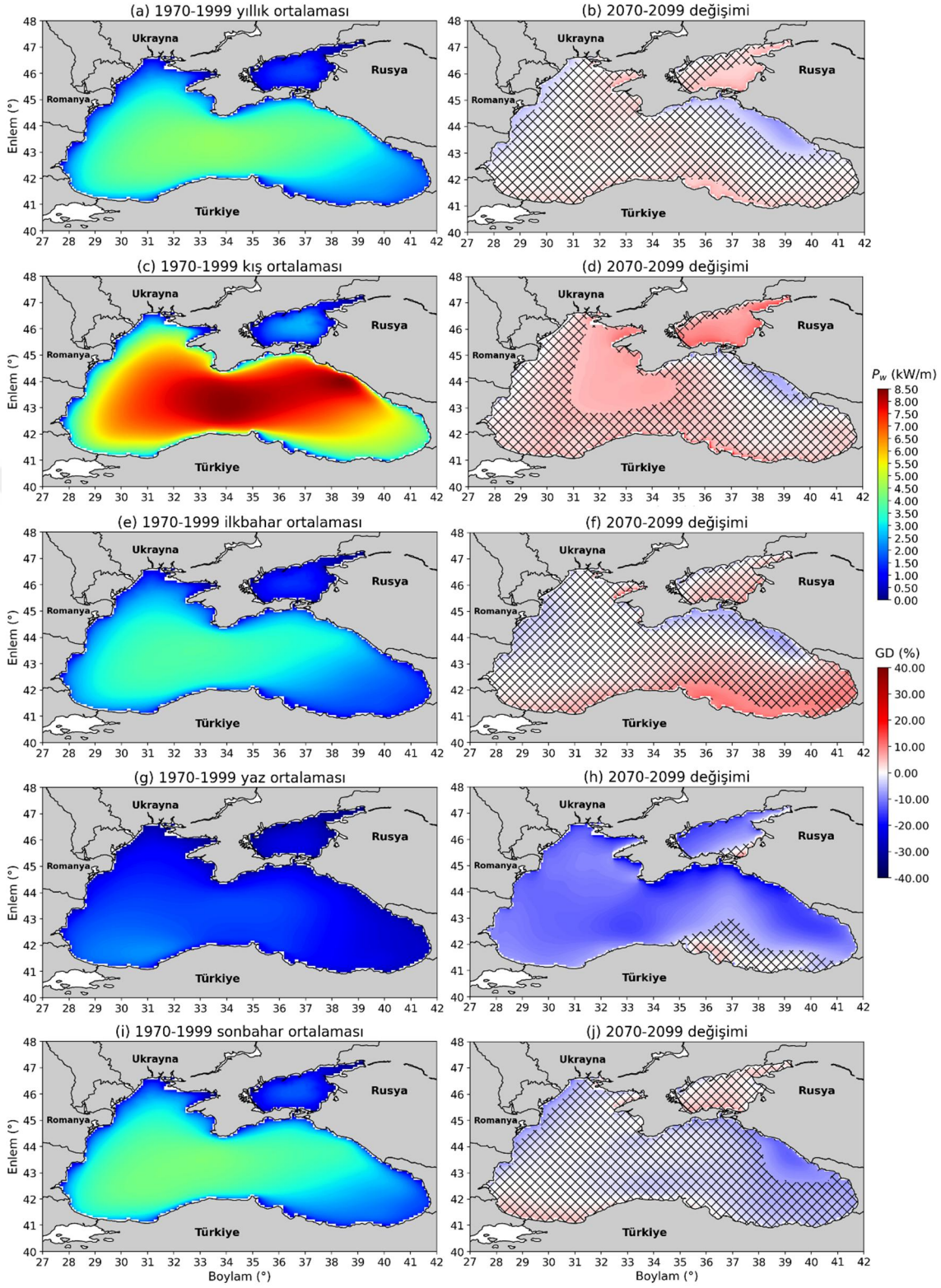


Şekil 4.41. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) P_w ortalamaları ve 2040-2069 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

kıyılarının doğu bölgesinde -%2 ila -%5 arasında belirgin azalışlar öngörülmektedir. Kış mevsimi ortalamaları (Şekil 4.42 d) GP2 döneminde, GP1 dönemindeki belirgin artış öngörülen alanlara göre daha sınırlı görülmüş ve kuzeydoğu kıyısına yakın bölgede azalışlar belirgin hale gelmiştir. İlkbahar mevsiminde (Şekil 4.42 f), H_{m0} ortalamalarının (Şekil 4.32 f) artış gösterdiği Karadeniz'in kuzeydoğusunda P_w ortalamaları -%7 civarında belirgin azalış göstermektedir. Yine H_{m0} ortalamalarının belirgin artış gösterdiği güney kıyılarının doğusunda P_w ortalamaları %15'e varan belirgin artış beklentisi sunmaktadır. En düşük P_w ortalamalarının gözlendiği yaz mevsiminde (Şekil 4.42 h), havzanın çoğunda ortalama olarak -%10 civarında belirgin azalış göstermektedir. Yaz mevsiminde H_{m0} ortalamaları (Şekil 4.32 h) için de havzanın büyük bir kısmında belirgin azalışlar gözlenmekteyken, güneydoğu kıyılarındaki belirgin artış beklentisi P_w ortalamaları için belirgin bir değişim öngörüsüne dönüşmemiştir. GP2 sonbahar mevsimi P_w ortalamalarında (Şekil 4.42 i) da GP1 dönemindeki gibi P_w ortalamalarının belirgin artış ve azalış gösteren alanların daralması söz konusudur. GP2 döneminde doğu bölgesindeki belirgin azalış beklenen alan GP1 dönemindekine göre genişlemiştir. Dalga enerji akısı hesabında, Denklem 3.5'te görüldüğü gibi dalga periyodu birinci dereceden, dalga yüksekliği ikinci dereceden etki etmektedir. Bu nedenle P_w ortalamalarının değişimi çoğunlukla H_{m0} ortalamalarının değişimine uyum göstermektedir.

Karadeniz'de 2071-2100 dönemi için P_w ortalamalarının değişimi Rusu, (2020) çalışmasında tek bir RCA4 rüzgâr alanı ile benzeştirilmiş dalga modeli ile sunulmuştur. Farkların belirginliği ile ilgili bir bilgi sunulmadan, tarihsel dönem ortalamalarına göre Karadeniz'in tamamında, kuzeydoğu kıyısı yakınlarında -%10'un üzerinde, azalış öngörülmüştür. Azak Denizi güney bölgesinde ortalamaların %3 civarında artacağı beklenmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ise, Karadeniz'in ve Azak Denizi'nin güneydoğu kıyılarına yakın bölgelerde %5 civarında belirgin artış, kuzeydoğu kıyılarına yakın yerlerde ise -%5 belirgin azalış beklentisini göstermektedir. Gelecek dönem dalga gücü projeksiyonlarındaki farkların, değişimlerin farklı veri setleri (tekil model/ topluluk) değerlendirilmesi nedeniyle görüldüğü düşünülmektedir.

Aydoğan vd., (2021) gelecek dalga gücü değişimlerini yirmişer yıllık dönemler halinde değerlendirmiştir ancak; farkların belirginliği test edilmemiştir. Atıf yapılan çalışmada en yüksek tarihsel P_w ortalamaları 7 kW/m civarında görünmekteyken, bu tez çalışmasında



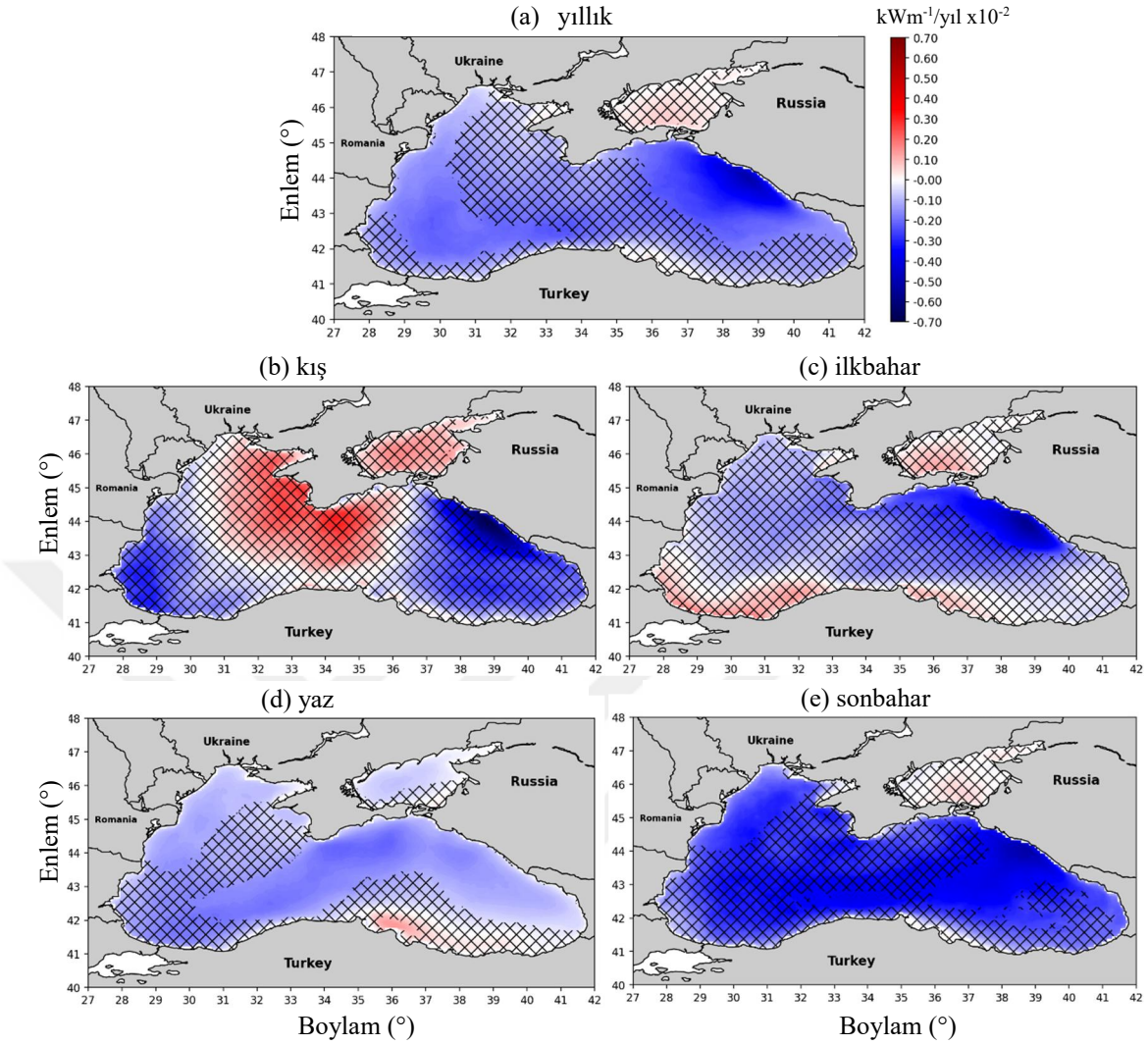
Şekil 4.42. Topluluk modeli tarihsel (1970-1999) P_w ortalamaları ve 2070-2099 dönemi için öngörülen değişimleri (%95 güven aralığında)

tarihsel ortalamaların en yüksek değeri 5 kW/m olarak bulunmuştur. Projeksiyonlar iki farklı rüzgâr kullanılarak yürütülmüş dalga simülasyonları ile sunulmuştur. Bu simülasyonlardan biri 2040-2100 periyodunda, havzanın tamamında, RCP8.5 senaryosuna dayalı P_w gelecek ortalamaları için azalış öngörmektedir. Diğer simülasyonun öngörüsünde, Karadeniz'in batısında azalış, merkez bölgesi ve güney kıyıları boyunca artış beklentisi görülmektedir. Bu tez çalışmasının sonuçları ile uyumlu görünmeyen gelecek P_w değişimlerine, farklı rüzgâr alanlarının kullanılması ve dalga simülasyonlarının tekil olarak kullanılması sebep olarak gösterilebilir.

4.3.10. Yıllık ve mevsimlik ortalama dalga gücünün (P_w) eğilimleri

P_w ortalamalarının GP1 ve GP2 dönemlerindeki değişimlerinin tarihsel dönem ortalamalarına kıyasla irdelenmesinin ardından, yıllık ve mevsimlik P_w ortalamalarının tüm gelecek simülasyon dönemi boyunca öngörülen eğilimleri ise, Şekil 4.43'da sunulmaktadır. Yıllık P_w ortalamaları için önemli bir düşüşün öngörüldüğü Karadeniz'in kuzeydoğusunda (Şekil 4.42 b), Şekil 4.43 a'da yaklaşık -0,005 kWm^{-1}/yıl eğimli anlamlı bir düşüş eğilimi öngörülmektedir. 94 yıllık gelecek döneminin tamamı göz önüne alındığında bu eğilim ile, P_w ortalamalarında yerel olarak toplam 0,47 kW/m'lik bir düşüş gözlenebilir.

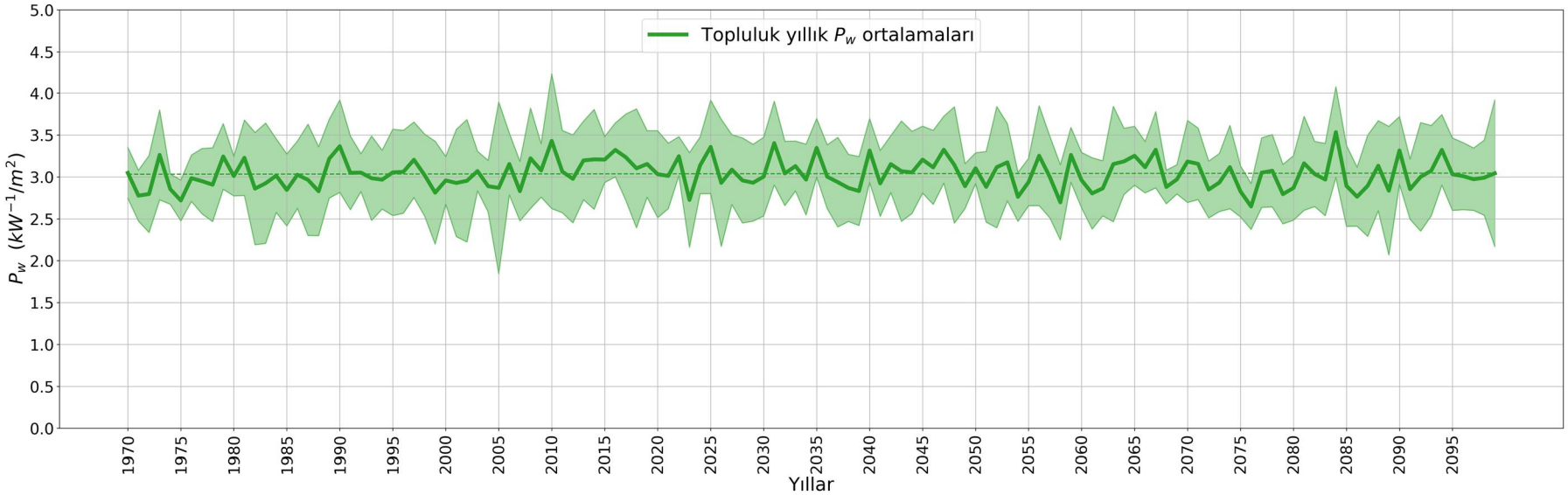
Kış mevsimi ortalamaları için GP1 ve GP2 dönemlerinde belirgin olarak öngörülen artış beklentileri, 94 yıllık periyot için elde edilen eğilimlerde (Şekil 4.43 b) istatistiksel olarak anlamlı görülmemektedir. Kışın yalnızca, GP2 döneminde öngörülen belirgin azalış görülen kuzeydoğu bölgesinde -0.006 kWm^{-1}/yıl eğimli anlamlı düşüş eğilimi olarak gözlenmektedir. İlkbahar (Şekil 4.43 c), yaz (Şekil 4.43 d) ve sonbahar (Şekil 4.43 e) mevsimlerinde, P_w ortalamaları için ortak olarak öngörülen anlamlı eğilimler, Karadeniz'in kuzey doğusunda aşağı yönlü beklenmektedir. Bu düşüş eğilimleri havzada ilkbahar ve sonbaharda yaklaşık -0,005 kWm^{-1}/yıl eğime kadar, yaz mevsiminde ise -0,001 kWm^{-1}/yıl eğimin altında değerler almaktadır. Yaz mevsiminde aşağı yönlü anlamlı eğilimler (-0,001 kWm^{-1}/yıl eğimden düşük), havza genelinde daha yaygın şekilde görülmekte ve yukarı yönlü anlamlı eğilimler sadece güney kıyılarında küçük bir bölgede beklenmektedir (yaklaşık 0,0006 kWm^{-1}/yıl).



Şekil 4.43. Gelecek döneminin tamamı boyunca (2006-2099), topluluk modelinin yıllık P_w ortalamalarının eğilim haritaları (%95 güven aralığında)

4.3.11. Yıllık P_w ortalamalarının tarihsel ve gelecek dönem boyunca değişimi

Havza bazlı yıllık P_w ortalamalarının 1970-2099 periyodundaki değişimleri Şekil 4.44'de sunulmaktadır. 130 yıllık dönemde, P_w ortalamaları artış veya azalış eğilimi göstermemektedir. Tarihsel dönem (1970-1999) ve gelecek dönem (2006-2099) ayrı ayrı değerlendirildiğinde, tarihsel dönemde hafif bir artış eğilimi, gelecek dönemde ise hafif bir azalış eğilimi göze çarpmaktadır. Şekil 4.44'deki gelecek P_w ortalamalarının havza bazlı azalış eğilimi, Şekil 4.43 a'da bütün gelecek dönemi için Karadeniz'de öngörülen istatistiksel olarak anlamlı azalış eğilimlerinin ağırlıklı görülmesi ile benzerlik arz etmektedir.



Şekil 4.44. Tarihsel ve gelecek dönemler boyunca (1970-2099) topluluğun yıllık P_w ortalamalarının değişimi

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, CMIP5 deneyleri ile üretilmiş kaba çözünürlüklü küresel iklim modellerinin, CORDEX girişimi tarafından ölçek küçülterek Avrupa Bölgesi özelinde sunduğu yüksek çözünürlüklü bölgesel iklimi modelleri (EUR-11) kullanılarak, Karadeniz'in güvenilir gelecek rüzgâr ve dalga iklimi projeksiyonlarını oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle, çalışma bölgesini kapsayan sekiz bölgesel iklim modelinin rüzgâr alanları temin edilmiş ve tarihsel dönem dalga simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Gelecek için güvenilir projeksiyonlar sunmak adına, bu modeller kapsamlı bir tarihsel dönem değerlendirmesine tabi tutularak, bu dönemde Karadeniz'in mevcut dalga iklimini en iyi temsil etme kabiliyetine sahip model sorgulanmıştır. Bu değerlendirme neticesinde, tekil modeller ile Karadeniz dalga iklimini değerlendirmek yerine, bu modeller ile teşkil edilmiş topluluk dalga iklimi modelinin belirsizlikleri içeren daha tutarlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Oluşturulan topluluk dalga iklimi modelinin belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga gücü veri setleri kullanılarak gelecek dönem analizleri yapılmıştır. İçinde bulunduğumuz yüzyılın günümüze daha yakın olan 2040-2069 (GP1) ve uzak olan 2070-2099 (GP2) dönemleri için gelecek projeksiyonları çıkartılmıştır. Gelecek projeksiyonları en yüksek emisyon senaryosu olan RCP8.5'e dayalı olarak üretilmiştir. Gelecek dönemler için, belirgin dalga yüksekliğinin (H_{m0}) yıllık ve mevsimlik ortalamaları ve yüksek değerlerini temsil eden yıllık ve mevsimlik %99'luk değerlerinin (H_{99}) ortalamalarının değişimi ilgili gelecek dönemi için irdelenmiştir. Yine aynı dönemler için, ortalama dalga yüksekliği (T_{m02}) ve ortalama dalga gücünün (P_w) yıllık ve mevsimlik ortalamalarının değişimleri incelenmiştir. Dalga parametrelerinin ortalamalarının değişiminin yanı sıra, dalga simülasyonlarında kullanılan rüzgârların ortalamalarının değişimi yine dalga parametreleri için kullanılan topluluk modeli yaklaşımı ile irdelenmiştir. Son olarak, belirgin dalga yüksekliği yıllık ortalamaları ve yıllık %99'luk dilim değerlerinin ortalamalarıyla beraber, ortalama dalga gücünün yıllık ortalamalarının eğilimleri, CMIP5'in gelecek simülasyonları olarak belirlenen 2005-2099 dönemi boyunca incelenmiştir.

ERA5'in Karadeniz'deki dalga yüksekliklerini, özellikle de aşırı dalga yüksekliklerini olduğundan biraz düşük tahmin ettiği görülmüştür. Karadeniz'in doğu bölgesinden alınan noktasal ölçümlerde bu düşük tahmin seviyesinin, havzanın daha batısında kalan

ölçümlere kıyasla daha fazla olduğu göze çarpmıştır. ERA5'in uydu altimetre gözlemlerine karşı performansı da yerinde dalga ölçümlerine karşı performansına benzer görülmüştür. ERA5 H_{m0} ortalamaları, Karadeniz'in batı bölgelerinde altimetre dalga yüksekliği ortalamalarının -%10 civarında altında kalırken, doğu bölgelerinde -%35 ile -%40 altında kaldığı görülmüştür.

Topluluk üyelerinin ERA5'e kıyasla yıllık ortalama H_{m0}'ı olduğundan fazla tahmin ettiği görülmüştür. Yüksek tahminlerin doğu bölgesinde belirgin (ERA5'in ortalama %20'si kadar) olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, TN-6, TN-7 ve TN-8 üyeleri daha düşük seviyede bir yüksek tahmin göstermiştir; hatta bazı Batı Karadeniz bölgelerinde hafif seviyede (-%1 ile -%2) düşük tahmin görülmüştür. H_{99} ortalamaları, havzanın doğu kesiminde ERA5'in %60 fazlası (havza ortalaması %30) kadar, topluluk üyeleri tarafından yüksek tahmin edildiği görülmüştür. Ancak Karadeniz'in güneybatı bölgesinde (ve Azak Denizi'nde), H_{99} ortalamalarının topluluk üyeleri tarafından -%25 düşük tahmin edildiği görülmüştür.

Mevsimsel değerlendirmede, topluluk üyeleri ERA5 ile karşılaştırıldığında, özellikle dalgaların daha sakin olduğu yaz aylarında çok tutarlı olmayan karakteristiklerde (mevsimsellik etkisi yüksek) oldukları görülmüştür. Sonbaharda, topluluk üyelerinin genel olarak dalga yüksekliklerini batıda ERA5'ten düşük, doğu Karadeniz'de ise ERA5'ten yüksek tahmin ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, sonbahar mevsiminde TN-2, TN-7 ve TN-8 için Karadeniz'in doğu kesiminde de düşük tahminler görülmüştür. Değerlendirme sonuçlarının kış ve ilkbahar mevsimlerinde daha tutarlı olduğu görülmüştür. Fırtınalı sezon olan kış mevsiminde, tüm topluluk üyelerinin ERA5 H_{m0} ortalamalarını batıda ERA5'ten düşük, doğuda ise ERA5'ten yüksek tahmin ettiği görülmüştür. İlkbaharda, Azak Denizi hariç tüm havzada ERA5'e kıyasla tüm topluluk üyelerinin H_{m0} ortalamalarını olduğundan fazla tahmin ettiği belirlenmiştir.

Karadeniz'de ERA5 ve topluluk üyelerinin T_{m02} ortalamaları arasındaki farklarının havza genelinde düşük olduğu (yaklaşık olarak -%13 ile %10 arasında) görülmüştür. TN-6, TN-7 ve TN-8 için, tüm havzadaki T_{m02} ortalamaları ERA5 ile karşılaştırıldığında biraz düşük tahmin edildiği görülürken, diğer topluluk üyeleri için doğu bölgesinde yerel yüksek tahminler görülmüştür.

ERA5 ve topluluk üyeleri H_{m0} MAV değerleri Karadeniz'de %70'i aşmaktadır. Bu da hem topluluk üyelerinin hem de ERA5'in dalga yüksekliklerinin yıl içindeki değişkenliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Havzanın doğusunda, topluluk üyelerinin dalga yüksekliklerinin ERA5'e göre daha değişken olduğu tespit edilmiştir.

Ortalama rüzgâr ve dalga yönü (Θ_m) kıyasları, dalgaların doğru tahmin edilebilmesi için hem rüzgâr hızlarının hem de rüzgâr yönlerinin etkili olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızları ve yönlerinde ERA5'e en iyi uyumu gösteren TN-7'nin dalga yüksekliklerinde ERA5'e en benzer üye olduğu görülmüştür. TN-1, ERA5 ile hem yönsel hem de rüzgâr hızı farkları açısından en fazla fark gösteren üye olduğu için dalga yüksekliklerinin de ERA5'ten farklı olduğu anlaşılmıştır. Bütün topluluk üyelerinde en yüksek yön sapması (60° ile 120° arasında), Karadeniz'in sığ bölge olarak bilinen kuzeybatı kesimlerinde tüm topluluk üyeleri için gözlenmiştir.

Topluluk ortalaması ile her bir topluluk üyesinin ortalaması arasındaki ikili farklar (anomaliler) da değerlendirilmiştir. Topluluk üyeleri hem H_{m0} hem de T_{m02} parametreleri için benzer davranış göstermiştir. TN-1'in topluluk ortalamasına göre en yüksek farka sahip üye olduğu belirlenmiştir. TN-7'nin de yüksek anomalileri Karadeniz'in doğu kesiminde gösterdiği tespit edilmiştir. Geri kalan topluluk üyelerinin anomalilerinin havza genelinde %7'nin altında olduğu görülmüştür.

Topluluk üyelerinin tekil değerlendirmelerinin sonucunda, özellikle Karadeniz'in doğu kesiminde yıllık ve mevsimsel H_{m0} ortalamalarını ERA5'e kıyasla fazla tahmin etme eğiliminde oldukları tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ERA5 H_{m0} ortalamalarının yerinde dalga ölçümü ve altimetre gözlemlerden daha düşük tahmin ettiği görülmüştür. Topluluk üyelerinin havzanın doğu bölgesinde ERA5 ortalamalarına göre daha yüksek olan tahminine karşılık, ERA5'in de ortalamaları bu bölgede ölçümlere kıyasla daha düşük tahmin ettiği bulgusu göz önünde bulundurulmuştur. Değerlendirmelerin birçoğunda ERA5 ortalamalarına en uzak kalan topluluk üyesinin TN-1 olduğu görülmüştür. Buna rağmen, özellikle Karadeniz'in doğu bölgesinde diğer topluluk üyelerinin ölçüm ortalamalarından düşük olan dalga yüksekliği ortalamalarını, ölçüm ortalamalarına yaklaştıracak olması nedeniyle TN-1 topluluk veri seti dışında bırakılmamıştır. Topluluk ortalaması, sekiz topluluk üyesinin ağırlıksız ortalamaları ile hesaplanarak her parametre için ayrı ayrı topluluk dalga iklimi veri setleri

oluşturulmuştur. Bütün üyelerinin topluluğa dahil edilmesinin bir başka ve önemli nedeni de iklim modellerinin gösterdiği belirsizliklerin, topluluk modeli kullanılarak kapsanmasını sağlamaktır. Bu sayede, gelecek projeksiyonları için bütün belirsizliklerin de dahil edildiği daha güçlü (güvenilir) veri seti oluşturulmuştur.

Tarihsel topluluk dalga iklimi, ERA5 yeniden analiz veri setleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Topluluk dalga iklimi, topluluk üyelerinin tekil olarak ERA5 ile gösterdikleri performansta daha tutarlı bir karaktere sahip olduğu görülmüştür. Topluluk dalga yüksekliği veri seti, ERA5'in altimetre gözlemleri ve yerinde dalga ölçümlerine kıyasla düşük tahmin eğiliminde olduğu Karadeniz'in doğu bölgesinde ölçümlere yakın ortalamalar göstermiştir. Bu genel değerlendirmeler ışığında, topluluk veri setleri ile Karadeniz'in mevcut dalga ikliminin gerçekçi bir şekilde temsil edilebildiği ve gelecek rüzgâr ve dalga iklimini de güçlü ve güvenilir bir şekilde öngörülebileceği değerlendirilmiştir.

Yıllık ve mevsimlik U_{10} ortalamalarının değişim haritaları (Şekil 4.29 ve 4.30) göstermektedir ki, Karadeniz'de rüzgâr hızlarında özellikle doğu bölgelerinde belirgin azalışlar öngörülmektedir. GP1 döneminde belirgin azalış beklenen bölgelerin GP2 döneminde daha da genişlediği görülmektedir. Karadeniz'in batı bölgesinde kuzey ve güney kıyılarının yakınlarında yıllık ve bazı mevsimlik ortalamalar için belirgin olmasa da artış öngörüsü bulunmaktadır. Ayrıca Karadeniz'in güneydoğu kıyı bölgesinde ve Azak Denizi'nde de belirgin artış beklentileri öngörülmektedir. GP2 döneminde bu artış öngörüsünün etkisini bir miktar kaybettiği görülmektedir. Rüzgâr hızları için belirgin değişimler, tarihsel dönem (1970-1999) ortalamalarının en fazla artış yönünde %3'ü, azalış yönünde -%8'i kadar olabileceği beklenmektedir.

Karadeniz'de dalga yüksekliği ortalamaları genel olarak kuzey bölgelerinde azalış, güney bölgelerinde artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Rüzgâr hızlarındaki belirgin azalışa çoğunlukla benzer bir şekilde yıllık ve mevsimlik H_{m0} ortalamalarındaki değişimler (Şekil 4.31 ve 4.32) havza genelinde belirgin azalış eğilimindedir. GP1 döneminde belirgin artış gözlenen bazı alanların, GP2 döneminde yine değer olarak pozitif GD olarak görünse de belirginliğini yitirdikleri görülmektedir. Ayrıca GP1 döneminde haritalarda belirgin olmayan azalış gösteren bazı bölgelerin (Karadeniz'in kuzeybatı bölgesi gibi), GP2 döneminde belirgin azalış beklenen bölgeler haline geldiği tespit edilmiştir. Tarihsel

30 yıllık periyodun 100 yıl sonrasına denk gelen GP2 döneminde, H_{m0} ortalamalarının belirgin değişim gösteren bölgeleri için, azalış yönünde eğilimin ağırlıkta olduğu gözlenmektedir. Daha çok doğu bölgesinde gözlenen belirgin azalış öngörülerinin TP ortalamalarının -%9'una kadar olabileceği, belirgin artış beklentilerinin ise çok daha sınırlı bir alanda en fazla tarihsel ortalamaların %5'i kadar olabileceği öngörülmektedir.

H_{m0}'in yüksek değerlerini belirten H_{99} ortalamalarındaki belirgin değişikliklerin (-%16 azalış ile %11 artış arasında) H_{m0} ortalamalarına nazaran daha fazla olacağı beklenmektedir. Bununla birlikte yıllık H_{m0}'ların standart sapmaları da hafif bir artış eğilimi göstermektedir. H_{m0} ortalamalarının değişimine göre H_{99} ortalamalarındaki belirgin değişimlerin hem GP1 döneminde hem de GP2 döneminde artış şeklinde havza genelinde ağırlıklı olmasıdır. Yalnızca, yaz mevsimi ortalamalarının havzanın çok büyük bir bölümünde belirgin azalış göstereceği beklenmektedir. Ayrıca sonbahar mevsiminde ortalamalarda belirgin bir değişim öngörülmemektedir Belirgin azalış beklentilerinin tarihsel dönem ortalamalarının -%16'sına kadar ulaşma ihtimali görülürken; belirgin artış beklentilerinin tarihsel ortalamaların %11'i kadar olabileceği öngörülmektedir. T_{m02} ortalamalarının öngörülen değişimlerinin, dalga yüksekliklerindekine nazaran çok daha düşük olduğu ancak yerel olarak en fazla -%6 azalış ile %5 artış olabileceği tahmin edilmektedir.

Yıllık P_w ortalamalarındaki tarihsel dönem ortalamalarına göre öngörülen belirgin azalışlar -%5, belirgin artışlar %10 ile sınırlı olsa da mevsimlik ortalamalarda daha fazla değişiklikler beklenebilmektedir (-%15 ile %15 arasında değişen). Yıllık P_w ortalamaları GP1 döneminde Karadeniz'in ve Azak Denizi'nin güney kıyıları boyunca %8'e kadar belirgin artış öngörülmektedir. GP2 döneminde ise, Karadeniz'de belirgin artış öngörüsü olan alanlar çok daralmakta ve kuzeybatı ile kuzeydoğu kıyılarında -%5'e kadar belirgin azalış öngörüleri meydana gelmektedir. Gelecek dönemlerde, yıllık, kış mevsimi ve ilkbahar mevsimi P_w ortalamaları için ağırlıklı olarak belirgin artış beklenirken; yaz mevsimi ortalamalarında belirgin azalışlar hakimdir ve sonbahar mevsimi ortalamalarında doğu bölgesinde sınırlı bir alanda belirgin azalış öngörülmektedir. Dalga yüksekliği ortalamalarında olduğu gibi, P_w ortalamalarında da GP1 döneminde belirgin artış gözlenen alanların GP2 döneminde belirginliğini yitirmesi; GP1'de belirgin olmayan azalış gösteren bölgelerin de GP2'de alansal olarak genişlemesi söz konusu olmaktadır.

Dalga iklimi topluluğunun tüm gelecek dönem simülasyonları boyunca (2006-2099) irdelenen öngörülen eğilimlerinde azalış eğilimi çok daha ağır basmaktadır. Yıllık H_{m0} ortalamalarında Karadeniz'in tamamında istatistiksel olarak anlamlı azalış eğilimi (-0.08 cm/yıl eğimine ulaşan) öngörülmektedir. Azak Denizi'nde yukarı yönlü eğilimler görülse de yıllık ölçekte sadece çok dar bir kıyı şeridinde istatistiksel olarak anlamlı görülmektedir. H_{99} ortalamalarında yerel olarak H_{m0} ortalamalarına göre daha yüksek anlamlı eğilimler (yaklaşık -0.25 cm/yıl) öngörülmektedir. Ancak istatistiksel olarak anlamlı değişiklik öngörülen alanlar H_{m0} ortalamalarında anlamlı değişim beklenen alanlardan çok daha azdır. H_{99} ortalamaları için anlamlı yukarı yönlü eğilim yalnızca kış mevsiminde batı bölgesinde kuzey kesimlerinde ve yıllık ölçekte Azak Denizi'nin güneyinde gözlenmektedir. 94 yıllık periyotta P_w yıllık ortalamalarında aşağı yönlü eğilimler (-0.005 kWm^{-1}/yıl eğimine ulaşan) istatistiksel olarak anlamlı durumdadır. Yalnızca yaz mevsiminde güney kıyı bölgesinde çok dar bir bölgede sıfıra yakın anlamlı yukarı yönlü eğilim (yaklaşık 0.0006 kWm^{-1}/yıl) görülmektedir.

Bu çalışma, Karadeniz'in rüzgâr ve dalga parametrelerinin belirgin azalış veya artış değişiminden etkilenebilecek alanların belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Değişimler ister azalış ister artış yönünde olsun, bu belirgin değişikliklerin deniz ekosistemi ve deniz faaliyetleri üzerinde bir etkisi olması muhtemeldir. Rüzgâr hızları ve dalga yüksekliklerindeki az miktardaki azalış eğilimi, rüzgâr ve dalga enerjisinin sürdürülebilir kullanımı için gelecekte elverişsiz koşullar oluşturabilir. Ayrıca, deniz yüzeyi dinamiklerinin atmosfer-okyanus arasındaki özellik değişimine katkıda bulunduğu göz önünde bulundurulduğunda, deniz yüzeyi dinamiklerindeki bir azalma da deniz ekosistemi için olumsuz olabilir. Diğer taraftan, özellikle H_{99}'lardaki belirgin artışlarla karakterize edilen alanlarda, kıyı çizgisi ve kıyı yapıları üzerinde etkili olabilecek daha şiddetli fırtına olayları yaşanması olası görülmektedir. Bu alanlarda öngörülen değişimler, en uygun sürdürülebilirliği sağlamak için, kıyı yapılarının tasarımında ve kıyı yönetimi planlarında ciddi şekilde dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Akpinar, A., & Ponce de León, S. (2016). An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *73*, 61–75. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002

Akpinar, A., van Vledder, G. P., Kömürcü, M. I., & Özger, M. (2012). Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, *50–51*, 80–99. https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.09.012

Akpınar, A. (2012). *KARADENİZ'DE DALGA MODELLEMESİ VE DALGA GÜCÜ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESi* [Karadeniz Teknik Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp

Akpınar, A., & Bingölbali, B. (2016). Long-term variations of wind and wave conditions in the coastal regions of the Black Sea. *Natural Hazards*, *84*(1), 69–92. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2407-9

Akpınar, A., Bingölbali, B., & Van Vledder, G. P. (2016). Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*, *126*, 276–298. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.026

Akpınar, A., Bingölbali, B., & Van Vledder, G. P. (2017). Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations. *Ocean Engineering*, *130*, 482–497. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.023

Amarouche, K., Akpınar, A., Bachari, N. E. I., Çakmak, R. E., & Houma, F. (2019). Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Applied Ocean Research*, *84*, 225–241. https://doi.org/10.1016/J.APOR.2019.01.014

Arı Güner, H. A., Yüksel, Y., & Özkan Çevik, E. (2013). Estimation of wave parameters based on nearshore wind–wave correlations. *Ocean Engineering*, *63*, 52–62. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2013.01.023

Arkhipkin, V. S., Gippius, F. N., Koltermann, K. P., & Surkova, G. V. (2014). Wind waves in the Black Sea: Results of a hindcast study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *14*(11), 2883–2897. https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014

Aydoğan, B., & Ayat, B. (2021). Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin. *Ocean Engineering*, *240*, 109936. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.109936

Aydoğan, B., Görmüş, T., Ayat, B., & Çarpar, T. (2021). Analysis of potential changes in the Black Sea wave power for the 21st century. *Renewable Energy*, *169*, 512–526. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.042

Battjes, J. ., & Janssen, J. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 32–32. https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/3294

Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E., & Sclavo, M. (2012). Wave climate of the Adriatic Sea: A future scenario simulation. *Natural Hazards and Earth System Science*, *12*(6), 2065–2076. https://doi.org/10.5194/NHESS-12-2065-2012

Bernardino, M., Rusu, L., & Guedes Soares, C. (2021). Evaluation of extreme storm waves in the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*, *14*(2), 114–128. https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1736748

Bidlot, J. (2020). *ERA5 Wave HRES native grid exact coordinates [Online forum comment]*.

https://confluence.ecmwf.int/display/CUSF/ERA5+Wave+HRES+native+grid+exact+coordinates

Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C4), 7649–7666. https://doi.org/10.1029/98JC02622

Bricheno, L. M., & Wolf, J. (2018). Future Wave Conditions of Europe, in Response to High-End Climate Change Scenarios. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *123*(12), 8762–8791. https://doi.org/10.1029/2018JC013866

Casas-Prat, M., Wang, X. L., & Swart, N. (2018). CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean. *Ocean Modelling*, *123*, 66–85. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.12.003

Cavaleri, L., & Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *86*(C11), 10961–10973. https://doi.org/10.1029/JC086IC11P10961

Çevik, E., Yüksel, Y., Yalçıner, A. C., Arı, H. A., Doğan, U., & Ercenk, A. (2006). *Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi ve Kumlanma Problemi için Karaburun Örneği*. https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Kıyı+çizgisi+değişiminin+belirlenmesi+ve+kumlanma+problemi+için+Karaburun+örneği.&btnG=

Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. WIT PRESS.

Chawla, A., Spindler, D., & Tolman, H. L. (2012). A Thirty Year Wave Hindcast Using The Latest NCEP Climate Forecast System Reanalysis Winds. *12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*.

Chelton, D. B., & Xie, S.-P. (2010). COUPLED OCEAN-ATMOSPHERE INTERACTION AT OCEANIC MESOSCALES. *Oceanography*, *23*(4), 52–69. https://doi.org/10.2307/24860862

Church, J. A., Lead, J. M. G., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M. T., Qin, D., Woodworth, P. L., Anisimov, O. A., Bryan, F. O., Cazenave, A., Dixon, K. W., Fitzharris, B. B., Flato, G. M., Ganopolski, A., Gornitz, V., Lowe, J. A., Noda, A., Oberhuber, J. M., … Review, H. J. Z. (2001). Changes in Sea Level. Içinde B. C. Douglas & A. Ramirez (Ed.), *Climate Change 2001* (ss. 639–694). Cambridge University Press.

CORDEX. (2021). *WCRP CORDEX Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*. How to get access to the data. https://cordex.org/

CORDEX. (2022). *EURO-CORDEX*. https://www.euro-cordex.net/

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., … Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *137*(656), 553–597. https://doi.org/10.1002/QJ.828

DLH. (1999). *Port Hydraulics Laboratory Filyos Harbour Wave Measurements*.

Dobrynin, M., Murawsky, J., & Yang, S. (2012). Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments. *Geophysical Research Letters*, *39*(17). https://doi.org/10.1029/2012GL052843

Eldeberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone [Delft University of Technology]. Içinde *Oceanographic Literature*. https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-bdb09cc0-fb86-3054-9a49-74696108d9d4

Erikson, L. H., Hegermiller, C. A., Barnard, P. L., Ruggiero, P., & van Ormondt, M. (2015). Projected wave conditions in the Eastern North Pacific under the influence of two CMIP5 climate scenarios. *Ocean Modelling*, *96*, 171–185. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.004

Fernandes, R., & Leblanc, S. G. (2005). Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil–Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors. *Remote Sensing of Environment*, *95*(3), 303–316. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2005.01.005

Frey-Buness, F., Heimann, D., & Sausen, R. (1995). A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, *50*(3), 117–131. https://doi.org/10.1007/BF00866111

Galdi, G. P. (2011). *An introduction to the mathematical theory of the Navier-Stokes equations: steady-state problems* (2. baskı). Springer.

Gallagher, S., Gleeson, E., Tiron, R., McGrath, R., & Dias, F. (2016). Twenty-first century wave climate projections for Ireland and surface winds in the North Atlantic Ocean. *Advances in Science and Research*, *13*, 75–80. https://doi.org/10.5194/asr-13-75-2016

Gates, W. L. (1988). Climate and The Climate System. Içinde M. E. Schlesinger (Ed.), *Physically-Based Modelling and Simulation of Climate and Climatic Change: Part 1: C. I* (ss. 3–21). Kluwer Academic Publishers.

GEBCO. (2014). British Oceanographic Data Centre, Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas. https://www.gebco.net/

Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*, 467–490. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-102014-021217

Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method. *Journal of Climate*, *15*(10), 1141–1158. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015

Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures* (P. L.-F. Llu (Ed.); 2. baskı, C. 15). World Scienctific Publishing.

Hasselmann, K., Barnett, T. P., Zeitschrift, E., Bouws, A., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., & Walden, H. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) Wind Work and Radiative Internal Wave Flux in a Hybrid Slab Model View project Ocean Dynamics book View project*.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. ., & Barnett, T. . (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave specturm. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for. *Journal of Physical Oceanography*, *15*(11), 1378–1391. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/15/11/1520-0485_1985_015_1378_capotn_2_0_co_2.xml

Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, *3*(5), 471–476. https://doi.org/10.1038/nclimate1791

Hemer, M. A., & Trenham, C. E. (2016). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble. *Ocean Modelling*, *103*, 190–203.

https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.10.009
Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., … Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/QJ.3803
Hieftje, G. M., & Lodder, R. A. (1988). Quantile Analysis: A Method for Characterizing Data Distributions. *Applied Spectroscopy, Vol. 42, Issue 8, pp. 1512-1520*, *42*(8), 1512–1520. https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=as-42-8-1512
Hoffmann, L., Günther, G., Li, D., Stein, O., Wu, X., Griessbach, S., Heng, Y., Konopka, P., Müller, R., Vogel, B., & Wright, J. S. (2019). From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*(5), 3097–3214. https://doi.org/10.5194/ACP-19-3097-2019
Huang, Y., Weisberg, R. H., Zheng, L., & Zijlema, M. (2013). Gulf of Mexico hurricane wave simulations using SWAN: Bulk formula-based drag coefficient sensitivity for Hurricane Ike. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *118*(8), 3916–3938. https://doi.org/10.1002/JGRC.20283
Hussain, M., & Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, *4*(39), 1556. https://doi.org/10.21105/joss.01556
Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguela, J. A., & Frigaard, P. (2009). Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy*, *34*(11), 2323–2333. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.03.030
IPCC. (2013). *IPCC Working Group I - Background*. https://www.ipcc.ch/working-group/wg1/
IPCC. (2022, Temmuz 25). *What is a GCM?* https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
Isaksen, L., Bonavita, M., Buizza, R., Fisher, M., Haseler, J., Leutbecher, M., & Raynaud, L. (2010). *Ensemble of Data Assimilations at ECMWF*. http://www.ecmwf.int/publications/
Islek, F., Yuksel, Y., & Sahin, C. (2022a). Evaluation of regional climate models and future wind characteristics in the Black Sea. *International Journal of Climatology*, *42*(3), 1877–1901. https://doi.org/10.1002/JOC.7341
Islek, F., Yuksel, Y., & Sahin, C. (2022b). Evaluation of regional climate models and future wave characteristics in an enclosed sea: A case study of the Black Sea. *Ocean Engineering*, *262*, 112220. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.112220
Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., … Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, *14*(2), 563–578. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2
Joussaume, S. (2000). Climat d'hier à demain. Içinde *CNRS Editions* (C. 2). CNRS.
Kamranzad, B., & Mori, N. (2019). Future wind and wave climate projections in the Indian Ocean based on a super-high-resolution MRI-AGCM3.2S model projection. *Climate Dynamics*, *53*(3–4), 2391–2410. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04861-7

Kamworapan, S., & Surussavadee, C. (2019). Evaluation of CMIP5 global climate models for simulating climatological temperature and precipitation for southeast Asia. *Advances in Meteorology*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/1067365

Karl, T. R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern Global Climate Change. *Science*, *302*(5651), 1719–1723. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1090228/SUPPL_FILE/COVER.GIF

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4. baskı). Griffin. https://psycnet.apa.org/record/1948-15040-000

Knutti, R. (2010). The end of model democracy? *Climatic Change*, *102*(3), 395–404. https://doi.org/10.1007/S10584-010-9800-2

Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, *23*(10), 2739–2758. https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1

Komen, G. ., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of physical oceanography*, *14*(8), 1271–1285. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/14/8/1520-0485_1984_014_1271_oteoaf_2_0_co_2.xml

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., Van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., & Wulfmeyer, V. (2014). Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, *7*(4), 1297–1333. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014

Kutupoğlu, V., Çakmak, R. E., Akpınar, A., & van Vledder, G. P. (2018). Setup and evaluation of a SWAN wind wave model for the Sea of Marmara. *Ocean Engineering*, *165*, 450–464. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2018.07.053

Lemos, G., Semedo, A., Dobrynin, M., Behrens, A., Staneva, J., Bidlot, J. R., & 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. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.011

Liang, B., Gao, H., & Shao, Z. (2019). Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN. *Marine Structures*, *64*, 35–53. https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2018.10.011

Lin-Ye, J., García-León, M., Gràcia, V., Ortego, M. I., Stanica, A., & Sánchez-Arcilla, A. (2018). Multivariate Hybrid Modelling of Future Wave-Storms at the Northwestern Black Sea. *Water 2018, Vol. 10, Page 221*, *10*(2), 221. https://doi.org/10.3390/W10020221

Lin, Y., Dong, S., Wang, Z., & Guedes Soares, C. (2019). Wave energy assessment in the China adjacent seas on the basis of a 20-year SWAN simulation with unstructured grids. *Renewable Energy*, *136*, 275–295. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.01.011

Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. D. (2009). The velocity of climate change. *Nature 2009 462:7276*, *462*(7276), 1052–1055. https://doi.org/10.1038/nature08649

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, *13*(3), 245. https://doi.org/10.2307/1907187

Marshall, J., Adcroft, A., Hill, C., Perelman, L., & Heisey, C. (1997). A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers.

Journal of Geophysical Research: Oceans, *102*(C3), 5753–5766. https://doi.org/10.1029/96JC02775

Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., & Zhao, Z. C. (2007). Global climate projections. Chapter 10. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, *November*, 19–92.

Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Dosio, A., & Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophysical Research Letters*, *44*(5), 2416–2426. https://doi.org/10.1002/2016GL072488

Micone, N. (2017). *Development of testing methodologies for the analysis of variable amplitude fatigue and corrosion-fatigue of offshore steels*. Ghent University.

Misra, V. (2014). Ocean-Atmosphere Interaction. Içinde Y. Wang (Ed.), *Encyclopedia of Natural Resources* (C. 2, ss. 798–800). CRC Press. https://doi.org/10.1081/E-ENRW-120048428

Mori, N., Shimura, T., Kamahori, H., Chawla, A., Yasuda, T., & Mase, H. (2015). Long-term wave hindcast and wave climate analysis by JRA-55. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *71*, I103–I108. https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Long-term+wave+hindcast+and+wave+climate+analysis+by+JRA-55&btnG=

Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T., & Mase, H. (2013). Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios-Future change of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering*, *71*, 122–129. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.016

Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., & Oku, Y. (2010). Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming. *Hydrological Research Letters*, *4*(0), 15–19. https://doi.org/10.3178/hrl.4.15

Morim, J., Trenham, C., Hemer, M., Wang, X. L., Mori, N., Casas-Prat, M., Semedo, A., Shimura, T., Timmermans, B., Camus, P., Bricheno, L., Mentaschi, L., Dobrynin, M., Feng, Y., & Erikson, L. (2020). A global ensemble of ocean wave climate projections from CMIP5-driven models. *Scientific Data*, *7*(1). https://doi.org/10.1038/s41597-020-0446-2

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), 747–756. https://doi.org/10.1038/nature08823

NOAA. (2022, Temmuz 20). *Climate Models | NOAA*. https://www.climate.gov/maps-data/climate-data-primer/predicting-climate/climate-models

Özhan, E., & Abdalla, S. (1998). Wind and wave climate of the Black Sea: Progress of the NATO TU-WAVES Project | AVESİS. *3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 97)*, 962–974. https://avesis.metu.edu.tr/yayin/516f9fe0-56c9-44ae-98d8-d51cedfe194c/wind-and-wave-climate-of-the-black-sea-progress-of-the-nato-tu-waves-project

Özhan, E., Abdalla, S., Seziş-Papila, S., & Turhan, M. (1995). Measurements and

modeling of wind waves along the the Turkish Mediterranean Coasts and the Black Sea. *The Second Int. Conf. On the Mediter. Coast. Environment, MEDCOAST 95*, 1899–1910. https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Measurements+and+modeling+of+wind+waves+along+the+Turkish+Mediterranean+coast+and+the+Black+Sea&btnG=

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., … van Ypserle, J.-P. (2014). 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. Içinde *EPIC3Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p., pp. 151, ISBN: 978-92-9169-143-2*. IPCC. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

Pallares, E., Sánchez-Arcilla, A., & Espino, M. (2014). Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains–Application to the Catalan coast. *Continental Shelf Research*, *87*, 41–53. https://doi.org/10.1016/J.CSR.2014.03.008

Perez, J., Menendez, M., Camus, P., Mendez, F. J., & Losada, I. J. (2015). Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Modelling*, *96*, 161–170. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.001

Ramanathan, V. (1988). The Greenhouse Theory of Climate Change: A Test by an Inadvertent Global Experiment. *Science*, *240*(4850), 293–299. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.240.4850.293

Ribal, A., & Young, I. R. (2019). 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations. *Scientific Data*, *6*(1), 1–15. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0083-9

Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C4), 7667–7681. https://doi.org/10.1029/1998JC900123

Rogers, W., Hwang, P., & Wang, D. (2003). Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, *33*(2), 366–389. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/33/2/1520-0485_2003_033_0366_iowgad_2.0.co_2.xml?tab_body=fulltext-display

Rusu, L. (2015). Assessment of the Wave Energy in the Black Sea Based on a 15-Year Hindcast with Data Assimilation. *Energies*, *8*(9), 10370–10388. https://doi.org/10.3390/EN80910370

Rusu, L. (2019a). The wave and wind power potential in the western Black Sea. *Renewable Energy*, *139*, 1146–1158. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.017

Rusu, L. (2019b). The wave and wind power potential in the western Black Sea. *Renewable Energy*, *139*, 1146–1158. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.03.017

Rusu, L. (2019c). Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios. *Renewable Energy*, *142*, 137–146. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.04.092

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.

https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.06.092
Rusu, L., & Guedes Soares, C. (2012). Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, *45*, 183–196. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.02.027
Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., ..., & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(8), 1015–1058.
Semedo, A., Dobrynin, M., Lemos, G., Behrens, A., Staneva, J., de Vries, H., Sterl, A., Bidlot, J. R., Miranda, P. M. A., & Murawski, J. (2018). CMIP5-derived single-forcing, single-model, and single-scenario wind-wave climate ensemble: Configuration and performance evaluation. *Journal of Marine Science and Engineering*, *6*(3). https://doi.org/10.3390/jmse6030090
Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934
Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliott, J. A., & Long, R. B. (1981). Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, *102*, 1–59. https://doi.org/10.1017/S0022112081002528
Stopa, J. E., Cheung, K. F., Tolman, H. L., & Chawla, A. (2013). Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling*, *70*, 207–220. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.10.005
Stopa, J. E., Semedo, A., Staneva, J., Dobrynin, M., Behrens, A., & Lemos, G. (2019). A sampling technique to compare climate simulations with sparse satellite observations: Performance evaluation of a CMIP5 EC-Earth forced dynamical wave climate ensemble with altimeter observations. *Ocean Modelling*, *134*, 18–29. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.12.002
Sverdrup, H., & Munk, W. (1947). *Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting*.
SWAN. (2018). *SWAN USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.20AB*.
The Core Writing Team IPCC. (2015). 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. Içinde *Ipcc*. https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/
Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Indagationes Mathematicae*, *1*(2), 467–482.
Tolman, H. . (2014). Technical Note : User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. Içinde *U.S Department Of Commerce* (version 4.18; s. 311). Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, College Park, MD. http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf
Tolman, H. L. (1999). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 1.18*.
TURANLI, M., & DEMİRHAN, D. (1997). T TESTİ, HOTELLING T, ANOVA VE MANOVA KULLANIM ALANLARI VE BİR UYGULAMA. *Öneri Dergisi*, *2*(8), 3–10. https://doi.org/10.14783/MARUONERI.682295
Türkeş, M. (2000). Hava, İklim, Şiddetli Hava Olayları ve Küresel Isınma. *Devlet*

Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü 2000 Yılı Seminerler, 187–205. https://212.175.180.11/FILES/genel/makale/4_Havaiklim.pdf

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* [Stellenbosch : University of Stellenbosch]. https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/3632

Van Vledder, G. P., & Akpinar, A. (2015). Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. *Applied Ocean Research*, *53*, 161–178. https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.08.006

Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D., Belda, M., Colette, A., Déqué, M., Fernández, J., García-Díez, M., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Karacostas, T., Katragkou, E., Keuler, K., Kotlarski, S., Mayer, S., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Patarčić, M., … Yiou, P. (2013). The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Climate Dynamics*, *41*(9–10), 2555–2575. https://doi.org/10.1007/S00382-013-1714-Z

Wang, X. L., Feng, Y., & Swail, V. R. (2014). Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, *41*(3), 1026–1034. https://doi.org/10.1002/2013GL058650

Watterson, I. G., Bathols, J., & Heady, C. (2014). What influences the skill of climate models over the continents? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(5), 689–700. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00136.1

Whitham, G. B. (1974). *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley. https://books.google.com.tr/books?id=84Pulkf-Oa8C&printsec=frontcover&dq=Linear+and+Nonlinear+Wave&hl=tr&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Linear and Nonlinear Wave&f=false

Yilmaz, N. (2007). *Spectral characteristics of wind waves in the Eastern Black Sea* [MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY]. https://open.metu.edu.tr/handle/11511/17269

Young, I. (1999). *Wind generated ocean waves* (R. Bahattacaharyya & M. . McCormick (Ed.)). Elsevier.

Yu, Y. S., Zou, S., & Whittemore, D. (1993). Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *Journal of Hydrology*, *150*(1), 61–80. https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90156-4

Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, *259*(1–4), 254–271. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7