KARADENİZ'DE SPEKTRAL PİK DALGA ENERJİSİNİN EĞİLİM ANALİZİ

Emine ACAR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARADENİZ'DE SPEKTRAL PİK DALGA ENERJİSİNİN EĞİLİM ANALİZİ

Emine ACAR
501926037

Doç. Dr. Murat KANKAL (Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2022
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARADENİZ'DE SPEKTRAL PİK DALGA ENERJİSİNİN EĞİLİM ANALİZİ

Emine ACAR

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat KANKAL

Bu çalışmada, Karadeniz'de dalga koşullarının analizi gerçekleştirilerek dalgaların sahip oldukları spektral pik enerji ve pik periyodun uzun dönemli yıllık, mevsimlik ve aylık ortalama ve maksimum değerlerinin eğilimlerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, eğilim analizinin uygulanacağı veri seti olarak SWAN üçüncü nesil dalga tahmin modeli çıktıları ve ERA5 yeniden analizine ait 1979-2020 yıllarını kapsayan dalga spektrumları kullanılmıştır. SWAN dalga modelinin çıktılarından ve ERA5 yeniden analizi veri setinden Karadeniz üzerinde seçilen sırası ile 36 ve 876 istasyonda veriler çekilmiş ve işlenmiştir. 42 yıllık periyotta veri setlerinden çekilen dalga spektrumları işlenerek saatlik spektral pik enerji ve pik periyodu verileri ayıklanmıştır. Daha sonra, bu parametrelerin yıllık, mevsimlik ve aylık zaman ölçeklerinde ortalama ve maksimum değerleri hesaplanmıştır. En son adım olarak, üç farklı zaman ölçeğinde dört parametreye Mann-Kendall ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi testleri uygulanmıştır. Böylece, Mann-Kendall ile bütüncül bir şekilde ve yenilikçi yöntem ile alt kategorilerde eğilim sonuçları irdelenmiş, bunun yanı sıra bölgesel ve küresel veri setlerinin eğilim analizi sonuçlarının kıyasının yapılabilmesi mümkün olmuştur. Sonuçta, spektral pik enerjinin her iki model sonucunda da Karadeniz genelinde ilkbahar ve yaz mevsimleri ile Ocak, Mart, Nisan, Ağustos ve Eylül aylarında artan, kış ve sonbahar mevsimleri ile Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık aylarında ise azalan eğilimin baskın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, pik periyotlar neredeyse tüm zaman ölçeklerinde artan eğilim, sonbahar mevsimi ile Mayıs ve Kasım aylarında ise azalan eğilim göstermiştir. SWAN dalga tahmin modeli ve ERA5 yeniden analiz verilerinden elde edilen sonuçların her iki parametre için de birbirini benzer olduğu görülmüştür. Ancak, pik periyotların yıllık ölçekte, kış ve sonbahar aylarında ERA5 ile artan eğilim gösterdiği bölgelerde SWAN modeli ile azalan eğilim tespit edilmiştir. Mann-Kendall testinde güven seviyesi ve yenilikçi yöntemde değişim oranı dikkate alındığında artan eğilimlerin azalan eğilimlere kıyasla daha şiddetli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eğilim analizi, dalga iklimi, dalga spektrumu, ERA5, SWAN, Karadeniz

2022, ix + 104 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

TREND ANALYSIS OF SPECTRAL PEAK WAVE ENERGY ON THE BLACK SEA

Emine ACAR

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Murat KANKAL

In this study, it was aimed to investigate the trends of the spectral peak energy and peak period of the waves and the long-term annual, seasonal and monthly average and maximum values by analyzing the wave conditions in the Black Sea. In this context, the outputs of the SWAN third generation wave prediction model and the wave spectra covering the years 1979-2020 of the ERA5 reanalysis were used as the data set to which the trend analysis will be applied. From the outputs of the SWAN wave model and the ERA5 reanalysis data set, data were captured and processed at 36 and 876 stations, respectively, selected on the Black Sea. Hourly spectral peak energy and peak period data were extracted by processing the wave spectra drawn from the data sets over a 42-year period. Then, the mean and maximum values of these parameters on annual, seasonal and monthly time scales were calculated. As the last step, Mann-Kendall and Improved Visualization of Innovative Trend Analysis tests were applied to four parameters in three different time scales. Thus, trend results were examined in a holistically with Mann-Kendall and in sub-categories with innovative method, and it was possible to compare the trend analysis results of regional and global data sets. As a result, , it was determined that the spectral peak energy is increasing in the spring and summer seasons, January, March, April, August and September, and decreasing in the winter and autumn seasons and May, July, November and December in both models. In addition, peak periods show an increasing trend in almost all time scales, and a decreasing trend in autumn season and May and November. The results obtained from the SWAN wave prediction model and ERA5 reanalysis data were found to be similar for both parameters. However, a decreasing trend was determined by the SWAN model in regions where the peak periods showed an increasing trend with ERA5 in the winter and autumn months and on an annual scale. Considering the confidence level in the Mann-Kendall test and the rate of change in the innovative method, it was seen that increasing trends were more severe than decreasing trends.

Key Words: Trend analysis, wave climate, wave spectrum, ERA5, SWAN, Karadeniz
2022, ix + 104 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca sahip olduğu bilgiyi, tecrübeyi ve desteğini benden esirgemeyen, ihtiyaç duyduğum her anda değerli bilgilerini ve zamanını benimle paylaşan tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Murat KANKAL'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Değerli düşünceleri ile bana yol gösteren, ihtiyaç duyduğum her anda fikirlerini ve önerilerini aldığım ve beni araştırma konusunda teşvik eden Sayın Prof. Dr. Adem AKPINAR'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında karşılaştığım her zorlukta bana vaktini ayıran, tüm sorularıma cevap veren, çalışmanın niteliğini geliştiren ve kullanılan verilerin üretilmesine katkı sağlayan Sayın Dr. Khalid Amarouche'a ve Öğr. Gör. Bilal Bingölbali'ye teşekkür ederim.

Manevi desteğini her zaman hissettiğim Yüksek İnşaat Mühendisi Fatma AKÇAY ve tüm Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü araştırmacı ekibine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını bünyesinde 119N480 No'lu araştırma projesi kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve ERA5 yeniden analiz veri kümelerini sağladığı için Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi'ne (ECMWF) teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında benden sevgilerini ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen, daima yanımda olduklarını bildiğim çok sevgili annem Gülsün ACAR, babam Hüseyin ACAR, kardeşim İrem ACAR ve yapabileceğime inanan tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Emine ACAR

06/09/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Dalga Spektrumu 4
2.2. SWAN Modeli 9
2.3. ERA5 Yeniden Analizi 10
2.4. Literatür Taraması 11
3. MATERYAL VE YÖNTEM 19
3.1. Çalışma Alanı 19
3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Veri Kaynakları 19
3.3. Trend Analizi 24
3.3.1. Mann-Kendall testi 24
3.3.2. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi (GG-YEA) 25
4. BULGULAR VE İRDELEME 27
4.1. Veri Kaynaklarının Genel Özellikleri 27
4.2. Mann-Kendall Sonuçları 33
4.2.1. SWAN modelinde spektral pik enerjiler için Mann-Kendall sonuçları 33
4.2.2. SWAN modeli spektral pik periyotları için Mann-Kendall sonuçları 38
4.2.3. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjileri için Mann-Kendall sonuçları 41
4.2.4. ERA5 yeniden analizi spektral pik periyotları için Mann-Kendall sonuçları 45
4.3. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizinin Sonuçları 49
4.3.1. SWAN modeli spektral pik enerjileri için GG-YEA sonuçları 49
4.3.2. SWAN modeli spektral pik periyotları için GG-YEA sonuçları 59
4.3.3. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjileri için GG-YEA sonuçları 67
4.3.4. ERA5 yeniden analizi spektral pik periyotları için GG-YEA sonuçları 75
4.4. Genel Değerlendirme 83
4.4.1. Bölgesel ve küresel modellerin analiz sonuçlarının değerlendirilmesi 87
4.4.2. Klasik ve yenilikçi eğilim yöntemlerinin değerlendirilmesi 90
4.4.3. Dalga parametreleri üzerine yapılmış önceki çalışmalar ile karşılaştırılması 90
5. SONUÇLAR 93
KAYNAKÇA 96
EKLER 101
EK 1: ERA5 ve SWAN için maksimum spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları 102
EK 2: ERA5 ve SWAN için ortalama spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları 103
ÖZGEÇMİŞ 104

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a_j	Tekil dalga genliğini
c_x, c_y	x ve y yönlerindeki dalga yayılma hızı
c_σ, c_θ	σ ve θ yönlerindeki dalga yayılma hızı
E	Spektral enerji yoğunluğu
E_{maks}	Spektral pik enerji
f_p	Pik dalga frekansı
$H_{1/3}$	Belirgin dalga yüksekliği
H_c	Karakteristik dalga yüksekliği
H_{m0}	Spektral dalga yüksekliği parametresi
H_{rms}	Dalga yüksekliklerinin karesinin ortalamasının karekökü
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
j	Dalga bileşenlerinin sayısı
K_T	Değişim noktası konumu
m_0	Sıfırıncı moment
m_n	n-inci dereceden moment
n	Veri uzunluğu
η_0	Ortalama su yüzeyi kotu
$\eta(t)$	t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesi
S	Mann-Kendall test istatistiği
S_{brk}	Derinlik etkileşimli dalga kırılması nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
S_{frc}	Taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
S_{inp}	Rüzgâr girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi
S_{nl3}	Lineer olmayan üçlü dalga-dalga etkileşimi
S_{nl4}	Lineer olmayan dörtlü dalga-dalga etkileşimi
S_{wcp}	Denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılmasıyla enerji kaybı
t	Zaman
T_{m01}	Spektrumun ortalama frekansına karşılık gelen dalga periyodu
T_{m02}	Ortalama dalga periyodu
T_{m-10}	Enerji dalga periyodu
T_p	Pik periyot
Z	Standart normal değişken
$Z_{\alpha/2}$	α anlamlılık düzeyi için normal dağılımın kritik değeri
α	Anlamlılık düzeyi
σ	Rölatif dalga frekansı
θ	Dalga yönü
ϕ_j	Tekil dalga faz açısı
ω_0	En uzun dalganın açısal dalga frekansı
x_i , x_j	*i* ve *j* zamanlarındaki veri değerleri

Kısaltmalar	Açıklama
C3S	Kopernik İklim Değişikliği Servisi
CAMS	Kopernik Atmosfer İzleme Servisi
CDS	İklim Veri Deposu
CEMS	Kopernik Acil Durum Yönetim Servisi
ECMWF	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
GG-YEA	Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi
IFS	Entegre Tahmin Sistemi
MATLAB	Matrix Laboratory
NetCDF	Ağ Ortak Veri Formu
SWAN	Yakın Kıyı Dalga Benzeşim Modeli
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
YEA	Yenilikçi Eğilim Analizi
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Rüzgâr dalgası spektrumuna bir örnek (SWAN modelinde 4 Aralık 1979, 12.00 tarihine ait spektrum)……..	6
Şekil 2.2.	Çalışmanın akış diyagramı……..	18
Şekil 3.1.	Çalışma alanı……...	20
Şekil 3.2.	SWAN modelinde çalışılan istasyonlar…….……..…….	23
Şekil 3.3.	ERA5 yeniden analizi sayısal ağ noktaları……....…..	23
Şekil 3.4.	Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizinin Gösterimi…….	26
Şekil 4.1.	ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (a) maksimum (b) ortalama (c) standart sapma…….	29
Şekil 4.2.	ERA5 yeniden analizi pik periyotları için baskın periyot değerleri……...	30
Şekil 4.3.	Spektral pik enerji ve belirgin dalga yüksekliği için korelasyon haritası (1. Sütun) ve dağılım grafiği (2. Sütun), (a) kombine dalgalar, (b) rüzgâr dalgaları, (c) soluğan……	32
Şekil 4.4.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları……	34
Şekil 4.5.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları……	36
Şekil 4.6.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyodun Mann-Kendall sonuçları……	39
Şekil 4.7.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyodun Mann-Kendall sonuçları……	40
Şekil 4.8.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları……	42
Şekil 4.9.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları……...	43
Şekil 4.10.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyotların Mann-Kendall sonuçları……..	46
Şekil 4.11.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyotların Mann-Kendall sonuçları…….	48
Şekil 4.12.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları…….	50
Şekil 4.13.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……...	51
Şekil 4.14.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları	56
Şekil 4.15.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları	57
Şekil 4.16.	Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……...	61

Şekil 4.17. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……... 62
Şekil 4.18. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları….. 65
Şekil 4.19. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……. 66
Şekil 4.20. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları…….. 68
Şekil 4.21. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……... 69
Şekil 4.22. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları.. 72
Şekil 4.23. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları… 73
Şekil 4.24. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……... 76
Şekil 4.25. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları……... 77
Şekil 4.26. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları….. 80
Şekil 4.27. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları…… 81

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Kalibre edilmiş SWAN dalga tahmin modelinin fiziksel parametreleri ve model yapılandırılması……..	20
Çizelge 3.2.	SWAN modelinde çalışılan noktaların koordinatları……	22
Çizelge 4.1.	SWAN dalga modeli spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (m^2sn)……..	28
Çizelge 4.2.	SWAN dalga modeli pik periyotları için baskın periyot değerleri……...	30
Çizelge 4.3.	SWAN ve ERA5 modeli maksimum ve ortalama spektral pik enerjinin eğilim analizi sonuçlarına göre baskın eğilim türü...	85
Çizelge 4.4.	SWAN ve ERA5 modeli maksimum ve ortalama pik periyodun eğilim analizi sonuçlarına göre baskın eğilim türü.	86

1. GİRİŞ

Dalga ikliminin bilinmesi; dalgakıran, deniz duvarı, mahmuzlar gibi kıyı yapıları ile petrol ve sondaj platformu, tanker yükleme platformu, açık deniz rüzgâr türbinleri gibi açık deniz yapılarının tasarımında çevresel etkilerin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Deniz dalgaları rastgele olduğu için dalga iklimi parametreleri istatistiksel veya spektral analiz ile açıklanabilmektedir (Chakrabarti, 2005). Deniz durumu esas olarak dalga enerji spektrumundan tahmin edilmektedir ve doğrudan spektrumun şekline bağlıdır. Dalga spektrumunun belirlenmesi dalga iklimi bilgisine ulaşmanın yanı sıra gemilerin ve açık deniz/kıyı yapılarının tasarımı açısından da gerekli olmaktadır (Boukhanovsky, Lopatoukhin ve Guedes Soares, 2007; Nair ve Kumar, 2017). Dalga spektrumundan elde edilen, deniz yapılarının tasarımında ve yorulma ömürlerini değerlendirilmesinde dikkate alınan (Zeinoddini ve diğerleri, 2015) pik periyot (T_p), dalga spektrumunun maksimum yüksekliğe ulaştığı tepe noktasına denk gelen frekans ile tanımlanır. Bretschneider'e (1959) göre dalga spektrum parametreleri olan belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve T_p deniz durumunu belirlemek için temel alınan kavramlardır. Chakrabarti (2005) açık deniz yapılarına uygulanabilen periyot aralığının 5-25 sn olduğu ve tasarım açısından önem taşıyan dalgaların pik enerjisinin, fırtınanın şiddetine bağlı olarak 10-16 sn bandına düştüğünü belirtmiştir. Spektral pik enerjiye denk gelen pik frekansta ya dalga yüksekliği çok büyüktür ya da çok dalga vardır (Yüksel ve Çevik, 2009). Bu nedenle belirli bir yerde spektral pik değerlere ait özellikler, soluğan (swell) veya rüzgâr dalgasının baskınlığını ortaya çıkarabilir.

Spektral pik enerji (E_{maks}), dalga enerjisi spektrumundan elde edilen temel bilgi parçalarından biridir. Güçlü rüzgâr olayları sırasında, dalga spektrumu maksimum dalga enerjisinin görüldüğü en yüksek spektral enerji noktasında sivri bir şekle sahip olma eğilimindedir (CEM, 2012). Bu nedenle, pik enerji ilgili frekanstaki rüzgâr hızı ve dalga yükseklikleri ile ilişkilendirilebilir. Spektral pik enerji, özellikle yapının rezonans frekansında meydana geldiğinde, kıyı ve deniz yapılarına oldukça büyük hasar verebilmektedir (P. Kumar, Zhang ve Kim, 2014). Spektral pik dalga enerjinin uzun dönemli değişimin incelenmesi kıyılarda mevcut veya gelecekte yapılması düşünülen yapılardaki etkisini anlamak açısından oldukça önemlidir. E_{maks} ve T_p yalnızca dalga spektrumundaki baskın enerji ve frekansa karşılık gelen kavramlar değil, aynı zamanda

spektral fonksiyonların elde edilmesinde, dalga gelişiminin belirlenmesinde ve deniz yapılarının tasarımında ve güvenliğinde kritik faktörlerdir (Kejian ve Shunli, 1997; Wen, Zhang, Sun, Guan ve Wu, 1994). Ayrıca George ve Kumar (2020a) deniz yapılarının tasarlanması ve iklim değişikliği çalışmaları için pik periyotlardaki zamansal farklılıkları anlamanın önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Dalga parametrelerinin uzun vadeli eğilimlerinin analizi, mühendislik ilgi alanlarından biri olmakla birlikte; bu eğilimler, çeşitli mühendislik projelerinin tasarımı için kullanılan yüksek tekerrür süresine sahip parametrelerin tahminlerini etkileyebilir (De Leo, De Leo, Besio ve Briganti, 2020). Bu nedenle, dünyanın farklı yerlerindeki araştırmacılar dalga parametreleri üzerine küresel ve bölgesel ölçeklerde eğilim analizleri uygulamışlardır. Eğilim analizlerin temel amacı nesnel bir şekilde geçmiş yıllardaki değişimleri inceleyerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunmaktır (Şen, Şişman ve Dabanli, 2019). İklim değişikliği, dalganın oluşumu ve yayılmasıyla doğrudan bağlantılı meteorolojik değişkenlerin değişmesiyle birlikte dalga iklimini etkileyebilir (Lobeto, Menendez ve Losada, 2021). İklim değişikliğinin dalga iklimi üzerindeki etkilerinin araştırılması, mevcut ve gelecekteki kıyı yapılarının durumunun değerlendirilmesi açısından önemli bir noktadır. Böyle bir değerlendirmenin yapılabilmesi için incelenen parametrelere ait verilerin yeterli uzunlukta olması gerekir. Dalga iklimi parametrelerinin elde edilebilmesi için şamandıra, gönüllü gözlem gemileri verileri, uydu altimetreleri ve modelleme çalışmaları kullanılmaktadır (Akpınar ve Bingölbali, 2016). Ancak şamandıraların dünyanın her yerinde bulunmaması, gönüllü gözlem gemileri verilerinin sınırlı olması ve uydu verilerinin kıyı ve kutup bölgelerinde olmamakla birlikte spektrum ve periyot bilgilerini içermemesi nedeniyle sayısal dalga modelleri kullanarak verilerin tahmininde bulunmak araştırmacılar tarafından tercih edilir olmuştur (Bingölbali, 2018; Perez, Menendez ve Losada, 2017). Ayrıca; geçmiş atmosfer, iklim ve deniz durumunun mümkün olan en eksiksiz halini sağlayan yeniden analiz (reanalysis) verileri de gözlem kayıtlarındaki boşlukları tutarlı bir şekilde doldurarak araştırmacılara iklim değişikliği çalışmalarında önemli bir veri seti sunmaktadır (ECMWF, 2020).

Tez çalışması kapsamında, Karadeniz üzerinde E_{maks} ve T_p parametrelerinin klasik ve yenilikçi yaklaşımlar ile eğilim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerdeki değişiklikler, spektrum şeklinin değişimini ve dolayısıyla düzenli olmayan dalga

rejimlerini yansıtmaktadır. Literatürde pik periyodu ve bu periyoda karşılık gelen spektral pik enerji üzerine yapılmış bir eğilim analizi çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışmada SWAN spektral dalga modeli ile ERA5 yeniden analiz verilerinden elde edilen dalga spektrumlarından yararlanılarak maksimum ve ortalama spektral pik enerji ve pik periyot parametreleri 1979-2020 yıllarını arasında yıllık, mevsimlik ve aylık ölçeklerde incelenmiştir. Bu kapsamda Mann-Kendall ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi (GG-YEA) eğilim analizi yöntemleri uygulanarak uzun dönemli değişimler incelenmiştir. GG-YEA yöntemi ile parametreler istatistiksel olarak "Düşük" ve "Yüksek" değerler olarak sınıflandırılabilmekte ve bu sınıflar için değişim oranları hesaplanabilmektedir. Böylece incelenen spektrum parametrelerine ait yüksek ve düşük değerlerin nasıl bir yönelim gösterdiği bilgisine ulaşılmasını sağlanmıştır. Bununla birlikte, bölgesel ve küresel modellerden elde edilen çıktıların ilişkisi farklı zaman ölçeklerinde ve farklı parametre türlerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca spektrumun iki temel parametresini değişimi incelenerek spektrum şeklindeki meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Dalga Spektrumu

Dalga enerjisi deniz üstünde esen rüzgârların oluşturduğu dalgalardan sağlanmaktadır. Deniz üzerinde üretilen dalgalar düzensiz bir yapıdadır ve boy ve frekansları geniş aralıkta değişmektedir. Dalgaların yönleri rüzgârın esme yönüne bağlı olarak değiştiği için deniz yüzeyinde farklı yönlerden gelen dalgaların süperpozisyonu söz konusudur (Yüksel ve Çevik, 2009). Karmaşık deniz durumunu tanımlamak için kullanılan yöntemlerden biri dalga spektrum analizidir. Dalga spektrumu, dalga enerjisinin dalga frekansına göre dağılımını ifade etmektedir. Bununla birlikte, dalgalarla ilgili belirgin dalga yüksekliği, periyot, dalga uzunluğu ve toplam dalga enerjisi gibi dalga iklimi parametreleri spektrum yardımıyla hesaplanarak deniz durumunun tanımlanması sağlanmaktadır. Spektrum analizin temeli Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform) tekniğine dayanmaktadır. Bu yöntem ile dalga kaydının zaman serisini bir dalga spektrumuna dönüştürerek her bir dalga frekansı için dalga enerjisinin dağılımını belirlenir. FFT yöntemi ile zaman alanından frekans alanına bir dönüşüm sağlanmış olur (CEM, 2012).

Spektrum analizi ile her bir tekil dalganın enerjisi hesaplanır ve frekansa karşı çizilir. Burada tekil ve düzenli dalgalara ait bilgiler kaybolmakta ve süperpoze edilmiş dalgalar söz konusu olmaktadır. Goda (2000) tarafından bir yönde zamanla değişen su yüzeyi yüksekliği denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{j=1}^{n} a_j \sin j\omega_0 t + \phi_j \qquad (2.1)$$

Burada; $\eta(t)$ t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesini, η_0 ortalama su yüzeyi kotunu, j dalga bileşenlerinin sayısını, n ise gözlenen tekil dalga sayısını, a_j katsayısı tekil dalga genliğini, ω_0 en uzun dalganın açısal dalga frekansını ve ϕ_j tekil dalga faz açısını vermektedir. Faz açısı değişimin tüm bileşenlerinin aynı fazda olmayacağını tanımlar. Ayrıca maksimum dalga yüksekliğinin farklı zamanlarda ortaya çıkması da bunu göstermektedir. Yüksek frekanslı bileşenler bazen anlamsız olmakta ve bu sebeple n

sayısının sınırlı tutulması fayda sağlamaktadır. Her bir dalga bileşeni kendi hızı ile hareket etmekte böylece dalga bileşenlerinden ibaret olan spektrum, su yüzeyi boyunca sürekli değişim göstermektedir (WMO, 1998).

Lineer bir dalganın deniz yüzeyi profilinin varyansı alındığında dalga varyans spektrumu fonksiyonu ortaya çıkmaktadır:

$$\sigma_\eta^2 = [(\eta(t) - \bar{\eta}(t))^2] = E[\eta^2(t)] = \frac{1}{T}\int_0^T \eta^2(t)dt = \frac{1}{2}a^2 \quad (2.2)$$

Varyansın frekansa karşılık dağılımı olan spektrum yoğunluk fonksiyonu ve buna bağlı olarak birim alandaki dalga enerjisi sırasıyla Denklem 2.3 ve 2.4'te verilmiştir.

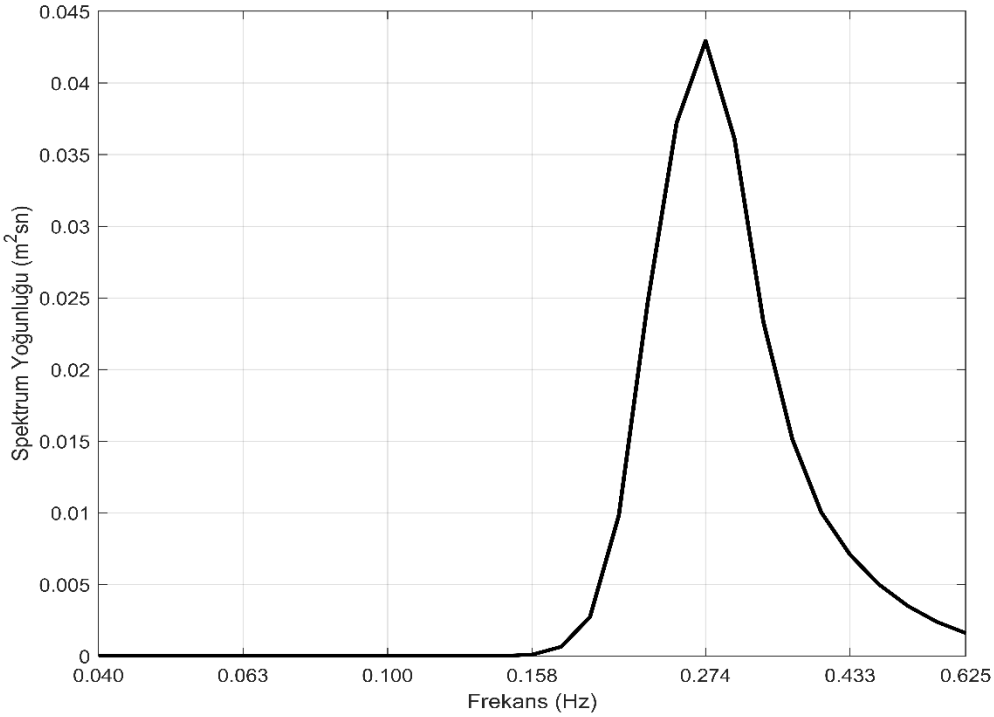
$$S(f) = \frac{1}{2}\frac{a^2}{\Delta f} \quad (2.3)$$

$$E = \frac{1}{8}\rho g H^2 = \frac{1}{2}\rho g a^2 \quad (Joule/m^2) \quad (2.4)$$

Yukarıda ifade edilen denklemlere göre $E(f) = \rho g S(f)$ eşitliği elde edilir. Buna göre yüzey profilinin varyansının ρg ile çarpılmasıyla dalga enerjisi elde edilmiş olur. Her bir dalga bileşeni için çeşitli frekanslar yatay eksende, bunlara karşı gelen dalga genliklerinin kareleri ise düşey eksende çizildiğinde ortaya incelenen dalga sisteminin spektrumu çıkmaktadır (Şekil 1). Buna karşılık hem frekans hem de yön kullanılarak ifade edilen enerji dağılımı yönler dikkate alınarak oluşturulduğunda bu spektruma yönlü dalga spektrumu denilmektedir. Yönlü dalga spektrumu dalga enerjisi dağılımı sadece frekans ile değil yön ile birlikte tanımlamaktadır. Yönlü dalga spektrumu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$S(f,\theta) = S(f)G(\theta|f) \quad (2.5)$$

Burada S(f,θ) yönlü dalga spektrumu yoğunluk fonksiyonu, $G(\theta|f)$ yönlü dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Rüzgâr dalgası spektrumuna bir örnek (SWAN modelinde 4 Aralık 1979, 12.00 tarihine ait spektrum)

Dalga spektrumu, FFT analizi sonucunda bulunan ayrık noktaların sürekli bir eğriye dönüştürülmesiyle oluşturulmaktadır. Ancak bu eğri düzensiz deniz şartlarında her zaman çok düzenli olmayabileceğinden, birkaç tepeden meydana gelen geniş bantlara sahip spektrumların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu tepeler ya dikkatli olarak birbirinden ayrılmalı ya da içinde birden çok tepe var olan geniş bir eğri meydana getirecek şekilde birleştirilmelidir.

Bir dalga spektrumu, bir dalga örneği ve deniz koşulları hakkında çok fazla bilgi verebilir. Çizilen spektrumun genel şekli, rüzgâr veya soluğan dalgasının baskınlığını, mevcut farklı dalgaların sayısını vb. ortaya çıkarır. Kuvvetli fırtına olayları sırasında, spektrum yüksek bir merkezi tepe noktasına sahip olma eğilimindedir. Bunun yanında, oluşum kaynağından uzun bir mesafe yayılan soluğan dalgası için de, dalgalar tek bir keskin tepe noktasına sahip olma eğilimindedir (CEM, 2012).

Dalga spektrumu çeşitli frekanslarda (veya dalga boyu, veya frekans ve yön) dalga enerjisinin (veya deniz yüzeyi varyansı) dağılımıdır. Bu nedenle istatistiksel bir dağılım olarak düşünülürse, spektrumdan birçok parametre tahmin edilebilmekte ve dalga

spektrumu şekli dağılımın momentleri şeklinde ifade edilebilmektedir. Spektrumun n-inci dereceden momenti olan m_n şu şekilde verilmiştir (Goda, 2000; WMO, 1998):

$$m_n = \iint_0^\infty f^n E(f,\theta) d_f d_\theta \tag{2.6}$$

Denklem de E(f), f (bazen f yerine ω= 2πf tercih edilmektedir) frekansına karşılık gelen varyans yoğunluğunu göstermektedir. Dolayısıyla E(f) df, i-nci aralık olan f+df'deki $a_i^2/2$ varyansını ifade etmektedir.

$$m_n = \sum_{i=1}^{n} f_i^n \frac{a_i^2}{2} \tag{2.7}$$

m_n tanımından elde edilen sıfırıncı moment m_0, spektral eğrinin altında kalan alanı verir. Sonlu şekilde yazılırsa,

$$m_0 = \iint E(f,\theta) d_f d_\theta \tag{2.8}$$

$$m_0 = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i^2}{2} = \frac{a^2}{2} \tag{2.9}$$

Sıfırıncı moment m_0, her bir spektral bileşenin varyanslarının toplamından elde edilen dalga kaydının toplam varyansını vermektedir. Bu yüzden spektral eğrinin altında kalan alanın spektrumdan türetilecek olan dalga-yükseklik parametreleri için fiziksel bir anlamı vardır. Dalga spektrumunda dalga enerjisinin maksimum olduğu değere pik dalga enerjisi (E_{maks}), bu değere karşılık gelen frekans ise pik dalga frekansı (f_p) olarak adlandırılır. Pik frekansın tersi ise ($1/f_p$), kaydın pik periyodu (T_p) olarak bilinen ve kıyı mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir parametredir (Akpınar, 2012).

Çoğu zaman, dalga kayıtlarından doğrudan okunan belirgin dalga yüksekliği $H_{1/3}$'e veya gözle gözlemlenen karakteristik dalga yüksekliği H_c'ye karşı gelen bir yükseklik parametresinin dalga spektrumundan türetilmesi istenir. Eğer deniz durumu aynı enerjiye sahip bir sinüs dalgası ile yer değiştirilecek olursa, buna karşı gelen yükseklik, dalga

yüksekliklerinin karesinin ortalamasının karekökü (root-mean-square wave height) ile ifade edilir.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8E}{\rho_w g}} \tag{2.10}$$

H_{rms} değerinin $\sqrt{2}$ ile çarpılmasıyla elde edilen ve daha çok kullanılan spektral dalga yüksekliği parametresi olan H_{m0}, spektral eğrinin altında kalan alan olan m_0'dan hesaplanır (Goda, 2000; WMO, 1998).

$$H_{m0} = \sqrt{2}\sqrt{\frac{8E}{\rho_w g}} = 4\sqrt{m_0} \tag{2.11}$$

Deniz durumu için toplam varyans (m_0) bazen toplam enerji olarak belirtilmektedir, ancak toplam enerji (E) aslında $\rho_w g m_0$ şeklindedir. Teoride H_{m0} ve $H_{1/3}$'ün birbiri ile aynı olma durumu yalnızca tabiatta pek sık rastlanmayan çok dar bir spektrum için geçerlidir. Ancak birçok durum için aralarındaki fark ortalama olarak $H_{m0} = 1.05H_{1/3}$ olacak şekilde oldukça azdır.

Dalga periyodu için parametrelerin türetilmesi çeşitli deniz ve dalga bileşenlerinin kombinasyonları ile çok farklı spektral şekillerin ortaya çıkarmasından dolayı oldukça karmaşık bir konudur. Yaygın olarak kullanılan spektral dalga frekansı ve dalga periyodu parametreleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır (WMO, 1998):

- f_p, spektrumun pik değerine karşılık gelen dalga frekansı (modal frekans veya pik frekans)
- T_p, f_p'ye denk gelen dalga periyodu (T_p=1/f_p)
- T_{m01}, spektrumun ortalama frekansına karşılık gelen dalga periyodu $T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}$
- T_{m02}, ortalama düşerken sıfır olma periyodu (zero down-crossing) $T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
- T_{m-10}, Enerji dalga periyodu dalga enerjisi çalışmalarında J dalga gücünün hesaplanmasında kullanıldığı için bu ismi alır $T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0}$

2.2. SWAN Modeli

SWAN (Simulating WAves Nearshore) spektral dalga modeli verilen rüzgâr, derinlik ve akıntı şartları için dalga parametrelerinin gerçekçi tahminlerini elde etmek için kullanılan ve yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu bir üçüncü nesil sayısal rüzgâr-dalga tahmin modelidir. Hollanda'da Delft Üniversitesi tarafından geliştirilen model, açık deniz ve yakın kıyı bölgelerinde rüzgâr kaynaklı dalga ile soluğan gelişimini, transformasyonunu ve enerji kaybederek değişimini benzeştirmektedir (Akpınar, 2012).

SWAN dalga modeli, dalgaları tanımlamak için iki boyutlu dalga hareket yoğunluk denklemini kullanmaktadır. Model tarafından kullanılan geçerli spektral hareket (enerji) denge denklemi, Denklem 2.12'de verilmektedir (Komen vd., 1994; Mei, 1989). Bu formülasyon, dalga enerjisinin dağılımına ve üretimine ilişkin çok sayıda kaynak ifadesi içermektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}N+\frac{\partial}{\partial x}(c_x\,N)+\frac{\partial}{\partial y}(c_y\,N)+\frac{\partial}{\partial \sigma}\,(c_\sigma\,N)+\frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta\,N)=\frac{S(\sigma,\theta;x,y,t)}{\sigma} \qquad (2.12)$$

Burada; N(σ, θ; x, y, t) rölatif dalga frekansı (σ) ile bölünmüş enerji yoğunluğuna E(σ, θ; x, y, t) eşit olan hareket yoğunluğu; c_x, c_y, c_σ ve c_θ sırasıyla x, y, σ ve θ yönlerindeki dalga yayılma hızı; θ dalga yönü; E spektral enerji yoğunluğu; σ rölatif dalga frekansı ve x, y, t alan ve zamanın boyutlarıdır. $(\partial N/\partial t)$ ifadesi hareket yoğunluğunun zamanla değişimini, $(\partial c_x N/\partial x)$ ve $(\partial c_y N/\partial y)$ ifadeleri bir (x, y) coğrafik alanındaki hareket yoğunluğunun yayılmasını temsil etmektedir. $(\partial c_\sigma N/\partial \sigma)$ ve $(\partial c_\theta N/\partial \theta)$ ifadeleri sırasıyla derinlik ve akıntı değişimleri nedeniyle bağıl frekans kaymasını ve derinlik ve akıntı etkileşimli sapmayı ifade etmektedir (Joubert, 2008).

S(σ, θ; x, y, t) dalga dağılması ve üretiminin bütün etkilerini temsil eden kaynak ifadesidir. Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki üretim, dağılma (enerji kaybı) ve lineer olmayan dalga–dalga etkileşimlerinin etkilerini temsil eden hareket yoğunluğunun kaynak ifadesi (S(σ,θ)) ise aşağıdaki denklemle formüle edilmektedir:

$$S(\sigma,\theta)=S_{inp}(\sigma,\theta)+S_{wcp}(\sigma,\theta)+S_{nl4}(\sigma,\theta)+S_{brk}(\sigma,\theta)+S_{frc}(\sigma,\theta)+S_{nl3}(\sigma,\theta) \qquad (2.13)$$

Burada; S_{inp} rüzgâr girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi, S_{wcp} denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılmasıyla enerji kaybı, S_{nl4} lineer olmayan dörtlü dalga-dalga etkileşimi, S_{brk} derinlik etkileşimli dalga kırılması nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı, S_{frc} taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı ve S_{nl3} lineer olmayan üçlü dalga-dalga etkileşimidir. SWAN modeli ilgili detaylı bilgi ve formülasyonlara modelin el kitabından (SWAN Team, 2020) ulaşılabilmektedir.

2.3. ERA5 Yeniden Analizi

Bu tez kapsamında SWAN modeline ait çıktıların yanında Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF) tarafından küresel ölçekte üretilen beşinci nesil atmosferik yeniden analiz ürünü olan ERA5 kullanılmıştır. 1975 yılında kurulan ECMWF, 35 ülke tarafından desteklenen ve sayısal hava durumu tahminleri yapan bağımsız bir hükümetler arası kuruluştur (URL-1). Avusturya, Belçika, Hırvatistan, Danimarka, Estonya, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, İzlanda, İrlanda, İtalya, Lüksemburg, Hollanda, Norveç, Portekiz, Sırbistan, Slovenya, İspanya, İsveç, İsviçre, Türkiye ve Birleşik Krallık üye devletler olup Bulgaristan, Çek Cumhuriyeti, Gürcistan, Macaristan, İsrail, Letonya, Litvanya, Karadağ, Fas, Kuzey Makedonya, Romanya ve Slovakya ise işbirliği yapan devletler statüsündedir.

ECMWF'nin temel misyonu:

- Sayısal hava tahminleri üretmek ve dünya sistemini izlemek,
- Tahmin becerisini geliştirmek için bilimsel ve teknik araştırma yapmak,
- Meteorolojik verilerin bir arşivini tutmaktır.

Ayrıca, üye ve işbirliği statüsündeki devletler için bilimsel personele eğitim sağlamakta, ve Dünya Meteoroloji Örgütü'ne (WMO) programlarında yardımcı olmaktadır. ECMWF, AB'nin Kopernik Dünya Gözlem Programı'ndan Kopernik Atmosfer İzleme Servisi (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS) ve Kopernik İklim Değişikliği Servisi (Copernicus Climate Change Service, C3S) olmak üzere iki hizmeti sürdürmekte ve Kopernik Acil Durum Yönetim Servisi'ne (Copernicus Emergency Management Service, CEMS) katkıda bulunmaktadır.

ERA5 yeniden analiz süreci 2006 yılında başlayan ve 1979'dan günümüze kadar olan ve oldukça başarılı sonuçlar veren ERA-Interim yeniden analiz sürecinin yerini almıştır. ERA5 2016 yılında ECMWF'de faaliyete geçmiş olan Entegre Tahmin Sistemi'nin (Integrated Forecasting System, IFS) 41r2 Döngüsü kullanılarak 4D-Var veri asimilasyonuna dayanmaktadır. Böylece ERA5; model fiziği, temel dinamikleri ve ERA-Interim'e göre veri asimilasyonundaki on yıllık gelişmelerden faydalanmaktadır. ERA5, önemli ölçüde geliştirilmiş yatay çözünürlüğe ek olarak (ERA-Interim için 79 km'ye kıyasla 31 km sayısal ağ aralığı) bir dizi yenilikçi özelliğe de sahiptir. İklim veri deposu (Climate Data Store, CDS) üzerinden veriler 1950'den günümüze kadar elde edilebilirler. Veriler 1950-1978 yılları için ön sürüm (preliminary version) ve 1979'dan günümüze kadar olacak güncel sürüm olacak şekilde ikiye bölünmüştür (Hersbach ve diğerleri, 2018).

2.4. Literatür Taraması

Çalışma konusuyla ilgili olan literatür aşağıda sunulmuştur:

Martucci ve diğerleri (2010) İtalya kıyılarına yakın seçilmiş 27 nokta üzerinde ERA-40 rüzgâr alanı ile çalıştırılan WAM dalga modeli ile tahmin edilen ve 1958-1999 dönemini kapsayan dalga parametreleri üzerine eğilim analizi yapmışlardır. Lineer regresyon yöntemi kullanarak yaptıkları analiz sonucunda yıllık bazda ve kış mevsiminde dalga yüksekliklerinin azalmaya eğilimli olduğu ve bununla birlikte on yıllık belirgin dalga yükseklikleri için de bir azalma eğilimi olduğunu vurgulamışlardır.

Anoop ve diğerleri (2015) ERA-Interim veri setini kullarak 1979-2012 yılları arasında Kuzey Hint Okyanusu (KHO) için iklimi ve yüzey dalgalarının değişkenliği analiz etmişlerdir. Bunun için, lineer regresyon kullanarak yıllık ve mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliğinin eğimini bulmuşlardır. Ayrıca Kendall's Tau-Sen testi ile eğilimin istatistiksel önemini tespit etmişlerdir. KHO'nun muson öncesi, sırası ve sonrası dönemleri için değerlendirme yapmışlardır. Batı KHO için dalga yüksekliklerinde önemli bir artış olduğunu ve bu durumun Afrika'nın doğu kıyı bölgesini etkileyebileceğini ayrıca muson öncesi dönemde belirgin dalga yüksekliğinin azalmaya eğilimli olduğunu belirtmişlerdir.

Akpınar ve Bingölbali (2016) Karadeniz kıyı şeridini çevreleyen 33 istasyonda 31 yıllık (1979-2009) CFSR rüzgâr verileri ile kurulan SWAN dalga modeli ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliği ve rüzgâr hızının yıllık olarak eğilimlerini Mann-Kendall, Lineer regresyon ve Sen'in Trend Eğim yöntemi ile belirlemişlerdir. Kış aylarında tüm istasyonlarda daha yüksek rüzgâr hızlarının ve belirgin dalga yüksekliklerinin olduğunu, yaz aylarında ise hem H_s hem de rüzgâr hızlarında önemli bir azalma olduğunu ortaya çıkarmışlardır. H_s için Karadeniz'de istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim olmadığını, ortalama rüzgâr hızının ise Türkiye'nin kuzey-doğu kıyıları ve Kırım yarımadası boyunca düşük anlamlılık seviyesinde bir artış eğilimine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, ortalama ve maksimum belirgin dalga yüksekliği ile rüzgâr hızı için genel olarak istatistiksel olarak önemli bir eğilim bulunamadığını bildirmişlerdir.

Divinsky ve Kosyan (2017) 1979-2015 periyodunda Karadeniz dalga ikliminin yersel-zamansal değişkenliğini anlamak amacıyla MIKE 21 SW spektral dalga modeli kullanılarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Seçtikleri 3 referans noktası üzerinde rüzgâr dalgalarının farklı yönlerde tekrarlanmasındaki olası eğilimlerini araştırmışlardır. Mann-Kendall, Güven Aralığı ve Varyasyon katsayısına dayanan bir eğilim metodu kullanmışlardır. Analiz sonuçları Karadeniz'in batısında kuzeydoğu yönündeki rüzgâr dalgaları artarken kuzeybatı yönünde azaldığını, Karadeniz'in doğusunu temsil eden noktada güneydoğudan gelen dalgalar artarken kuzeybatı yönünde azaldığının, Karadeniz'in orta kesiminde ise doğudan gelen dalgaların azaldığı güneyden gelenlerin ise hafif arttığını göstermiştir.

Aydoğan ve Ayat (2018) Karadeniz üzerindeki belirgin dalga yüksekliğinin (H_s) uzun dönemli değişimlerini ortaya koymak amacıyla 38 yıllık (1979-2016) ERA-Interim rüzgâr verileri ile çalıştırılan MIKE 21 SW spektral dalga modeli ile H_s'i tahmin etmiş ve elde edilen veriye eğilim analizi yöntemleri uygulamışlardır. Uzun dönemli eğilimler, parametrik olmayan yöntemler olan Theil-Sen, lineer regresyon ve Mann-Kendall yöntemleri ile hem ortalama hem de şiddetli deniz durumunu yansıttığı düşünülen %95'lik normalleştirilmiş H_s üzerine yıllık ve aylık bazda uygulanmışlardır. Ayrıca Karadeniz'deki H_s'lerin genel eğilimini araştırmak için havza ortalamalı analiz de yapmışlardır. Uygulanan analizler sonucunda yıllık ortalama H_s'in Karadeniz'in doğusunda yılda %1,6'ya kadar arttığı, batı kesiminde ise yılda %1,2'ye kadar azalan bir

eğilim olduğunu tespit etmişlerdir. % 95'lik H_s eğilimlerinin ortalama H_s'e kıyasla daha yüksek bir istatistiksel anlamlılık ortaya çıkardığı, bu da fırtına H_s'lerinin ortalama H_s 'lerden daha yüksek bir artış eğilimine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca iklim endeksleri olan Kuzey Atlantik Salınımı (NAO), Arktik Salınımı (AO), Antarktika Salınımı (AAO), Atlantik Çok Yıllı Salınımı (AMO), Pasifik Kuzey Amerika (PNA), Doğu Atlantik (EA), Doğu Atlantik/Batı Rusya (EA/WR), İskandinavya (SCAND), Niño3 ile Karadeniz dalga alanları arasında istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlar da tespit etmişlerdir.

Caloiero ve diğerleri (2019) Akdeniz üzerinde güney İtalya'daki Calabria bölgesinin kıyıları boyunca ERA-Interim yeniden analiz verilerinden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve enerji periyodu parametreleri üzerine Mann-Kendall ve Yenilikçi Eğilim Analizi yöntemleri uygulamışlardır. 39 yıllık uzun dönemli Mann-Kendall analizi sonucunda yıllık ve mevsimsel ölçekte belirgin dalga yüksekliğinde hafif veya sıfıra yakın bir artma eğilimi, enerji periyodunda da benzer şekilde bir artma eğilimi olduğunu aktarmışlardır. Yenilikçi eğilim analizi yöntemiyle ise ilgili dalga parametrelerinin en yüksek değerlerinde genel bir artış tespit ettiklerini belirtmişlerdir.

Onea ve Rusu (2019) NCEP (ABD Ulusal Çevre Tahmin Merkezi-İklim Tahmin Sistemi) rüzgâr alanı ile koşturulan SWAN dalga modeli ile tahmin edilen dalga verileri ile rüzgâr verilerinin 30 yıllık (1987-2016) analizini Karadeniz üzerinde uygulamışlardır. Çalışmalarının amaçlarından biri olan olumsuz hava olayların uzun vadeli dalgalanmalarını belirlemek için belirgin dalga yüksekliği ve rüzgâr hızlarının lineer eğilimine bakmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre 0,5 m'yi aşan dalgaların genel olarak azaldığı, Odessa bölgesine yakın yerlerde belirgin bir artış olduğu, 1,25 m'lik H_s için ise Constanta Sulina, Odessa, Skadovsk ve Yalta ve Varna bölgelerinde net bir artma eğilimi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, rüzgâr koşulları da göz önüne alındığında, Kerci ve Novorossiysk bölgelerinde deniz koşullarında bir azalma fark etmişlerdir.

Çarpar ve diğerleri (2020) 1979 ve 2016 yılları arasında Karadeniz üzerindeki ortalama ve %95'lik rüzgâr hızlarındaki uzun vadeli eğilimlerinin değişkenliğini araştırmışlardır. Bunun için ERA-Interim ve CFSR rüzgâr hızı veri setleri üzerine parametrik olmayan Mann-Kendall ve Sen'in Eğilim Eğim yöntemlerini uygulamışlardır. Analiz sonucunda CFSR rüzgârlarının ERA-Interim'den daha yüksek bir değişkenlik gösterdiğini

belirlemişlerdir. Ayrıca, ERA-Interim için Azak Denizi'nde yıllık ortalama ve %95'lik rüzgâr hızlarının sırasıyla yılda %0,17 ve %0,20'nin altında azalan eğilim gösterirken doğu bölgesinde yılda %0,35 ve %0,38'e varan bir artan eğilime sahip olduğunu bulmuşlardır. Orta ve şiddetli rüzgâr hızlarının Karadeniz yüzey alanı dikkate alındığında sırasıyla %36 ve %28'inden fazlasının artma eğilimi, %4 ve %2'sinden fazlasının ise azalma eğilimi gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca rüzgâr hızlarının iklim endeksleri olan Pasifik Kuzey Amerika Salınımı ile 0,5'in üzerinde Karadeniz'in neredeyse tamamında istatistiksel olarak anlamlı, Kuzey Atlantik Salınımı ile ise 0,6'nın üzerinde Batı ve Kuzey Karadeniz'de ters bir korelasyon etkisi sunduğunu gözlemlemişlerdir.

De Leo ve diğerleri (2020) 1979-2018 yıllarını kapsayan CFSR rüzgârlarıyla çalıştırılan WaveWatchIII dalga modeli çıktıları kullanarak Akdeniz Havzası üzerinde yıllık maksimum, %98'lik ve ortalama belirgin dalga yüksekliği verilerine Theil-Sen, Mann-Kendall ve Yenilikçi Trend Analizi yöntemleri uygulamışlardır. Ayrıca, Theil-Sen'in eğim, Mann-Kendall için test istatistiğine bağlı p değeri ve Yenilikçi Eğilim Analizi için 1:1 çizgisine uzaklık değerlerinin birbirleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Tüm eğilim ölçütlerinin sonuçlarının dikkate değer bir şekilde ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Yıllık maksimum H_s için Tiren Denizi ve İyonya Denizi'nde azalan eğilim, Ege Denizi'nde ise artan eğilim gösterdiği bilgisini sunmuşlardır. Ayrıca, %98'lik H_s, Sicilya ve Libya arasında artan eğilimler gösterirken, ortalama H_s Akdeniz'in güneydoğu kesiminde azalan eğilim olduğunu belirtmişlerdir.

Divinsky ve Kosyan (2020) Karadeniz üzerindeki yaptıkları çalışmada MIKE 21 SW spektral dalga modelini ERA-Interim rüzgâr alanları ile çalıştırarak tahmin ettiği 40 yıllık (1979-2018) rüzgâr ve soluğan (swell) dalgaları ile dalga gücü hesaplaması yapmışlardır. Ortalama ve maksimum dalga gücünün eğilimlerini Mann-Kendall testi, güven aralığı ve varyasyon katsayısı kavramlarını temel alan bir yöntem ile belirlemişlerdir. Araştırmacılara göre dalga ikliminin oluşumuna en büyük katkıyı Ocak, Mart ve Ekim aylarındaki fırtına koşulları sağlamaktadır. Ortalama ve maksimum yüzey dalgalarının iklimsel dalgalanmalarında istatistiksel olarak anlamlı artan eğilim olduğunu bununla birlikte ortalama dalga gücünün Karadeniz'in kuzeydoğusunda yılda yaklaşık yüzde %0,4, maksimum dalga gücünün ise kuzeydoğu bölgesinde yılda %6-7'ye kadar, Sinop

Burnu'nun batısında yılda %6-7 ve doğusunda yılda %5-6 artma eğiliminde olduğunu tespit etmişlerdir.

İşlek ve diğerleri (2020) yaygın olarak kullanılan iki yeniden analiz veri kaynağı olan ERA-Interim ve NCEP/CFSR kullanılarak 1979-2018 yılları arasındaki 40 yılı kapsayan rüzgâr özelliklerinin (zaman ortalamalı rüzgâr hızı, fırtına süresi, fırtına sayısı) ve 110 m yükseklikte rüzgâr enerjisi potansiyelinin uzun vadeli eğilimleri varyasyon katsayısı hesaplayarak incelemişlerdir. Rüzgâr özelliklerinin, Karadeniz'in kuzey ve batı kesiminde kuvvetli ve istikrarlı, doğusunda ise nispeten daha zayıf, kısa ömürlü ve değişken olduğu göz önüne alınarak havzanın doğu kısmının muhtemelen iklim değişikliğinin etkilerine maruz kalacağını belirtmişlerdir. Karadeniz üzerinde 110 m yükseklikte rüzgâr gücünün uzun vadeli ve mevsimsel değişimini araştırdıklarında kışın yaza göre yaklaşık 2,8 kat daha büyük bir rüzgâr gücü potansiyeli olduğunu tespit etmişlerdir.

Amarouche ve diğerleri (2021) Batı Akdeniz'deki rüzgâr ve dalga iklimindeki değişiklikleri daha iyi anlamak amacıyla Theil-Sen ve Mann Kendall testlerini, SWAN modeli ile tahmin edilen 1979-2020 yılları arasındaki ortalama ve maksimum belirgin dalga yükseklikleri ve rüzgâr hızı parametrelerine mevsimsel ve yıllık ölçeklerde uygulamışlardır. Araştırmacıların başlıca amaçları dalga iklimindeki son değişikliklerin büyüklüğünü değerlendirmek ve bu değişikliklerden en çok etkilenen kıyı bölgelerinin tespiti olmuştur. Batı Akdeniz havzasının büyük bölümünde maksimum H_s ve rüzgâr hızının yıllık bazda artma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca son zamanlarda Akdeniz kıyılarında, Fransız ve İspanyol kıyılarında büyük hasara neden olan fırtınalar ele alındığında mevcut çalışmanın sonuçlarının Batı Akdeniz kıyılarının büyük bir bölümünde endişe verici bir durumu yansıttığını bildirmişlerdir. Mevsimsel olarak ortalama Hs ve rüzgâr hızının kış, ilkbahar ve sonbahar için artan, yaz mevsimi için azalan eğilim gösterdiğini belirlemişlerdir.

De Leo ve diğerleri (2021) Akdeniz üzerinde RCP8.5 emisyon senaryosu altında 7 modellik bir topluluk kullanarak dalga iklimindeki değişiklikleri Theil-Sen, Mann-Kendall ve Yenilikçi Eğilim Analizi yöntemleri ile araştırmışlardır. Dalga ikliminin gelecek projeksiyonları ve değişkenliği, belirgin dalga yüksekliği, ortalama periyot ve ortalama yön parametrelerinin yıllık istatistikleri dikkate alınarak analiz etmişlerdir.

Ortalama olarak, belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodun azalma eğilimi gösterdiğini, dalga yönlerinin ise hafif bir şekilde doğuya kaydığını belirtmişlerdir.

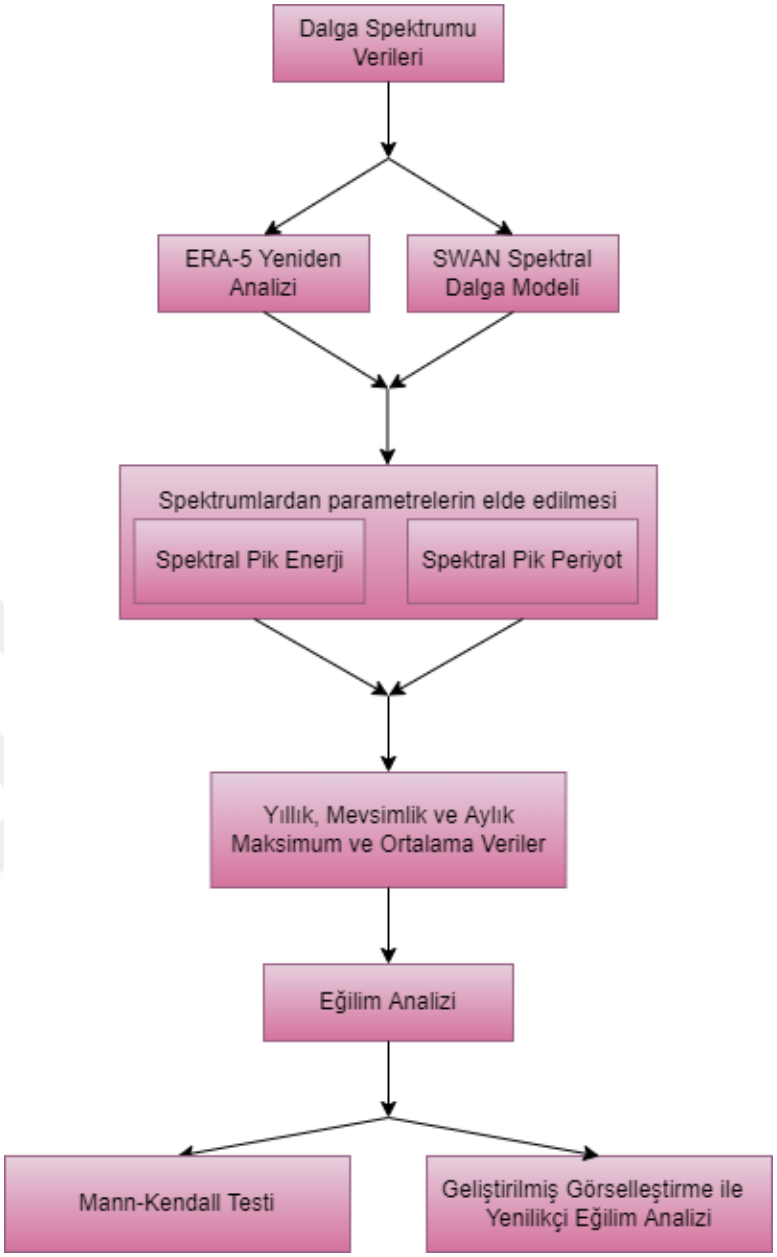
Dalga iklimi üzerine yapılan çalışmalarda araştırmacılar çoğunlukla belirgin dalga yüksekliği üzerine odaklanmışlardır (Arkhipkin, Gippius, Koltermann ve Surkova, 2014; Aydoğan ve Ayat, 2018; Caloiero ve diğerleri, 2019; De Leo, Besio ve Mentaschi, 2021; De Leo ve diğerleri, 2020; Islek, Yuksel, Sahin ve Guner, 2021; Martucci ve diğerleri, 2010; Vanem ve Walker, 2013; Wu, Li ve Wu, 2016). Ayrıca belirgin dalga yüksekliği ile birlikte rüzgâr hızı (Akpınar ve Bingölbali, 2016; Amarouche ve diğerleri, 2021; Hong ve Zhang, 2021; V. S. Kumar ve Anoop, 2015; Meucci, Young, Aarnes ve Breivik, 2020; Onea ve Rusu, 2019), pik periyot (De Leo, Besio, Briganti ve Vanem, 2021; Dodet, Bertin ve Taborda, 2010; Gao, Liang ve Shao, 2021; George ve Kumar, 2020a; Guillou, 2020) dalga gücü (Divinsky ve Kosyan, 2017, 2020; Semedo, Elj ve Rutgersson, 2011) ve dalga enerjisi (Vieira, Cavalcante, Campos ve Taveira-Pinto, 2020) üzerine dünyanın farklı bölgeleri için eğilim analizi yapılmıştır. Yapılan analizler için veri setleri SWAN (Akpınar ve Bingölbali, 2016; Amarouche ve diğerleri, 2021; Arkhipkin ve diğerleri, 2014; Gao ve diğerleri, 2021; Islek ve diğerleri, 2021; Onea ve Rusu, 2019), WaveWatchIII (De Leo, Besio ve Mentaschi, 2021; De Leo ve diğerleri, 2020; Dodet ve diğerleri, 2010), MIKE 21 SW (Aydoğan ve Ayat, 2018; Divinsky ve Kosyan, 2017, 2020) ve WAM (Martucci ve diğerleri, 2010) dalga modelleri ile tahmin edildiği gibi, yeniden analiz ürünleri olan ERA-Interim (Anoop ve diğerleri, 2015; Caloiero, Coscarelli ve Ferrari, 2018) ve devamı niteliğindeki ERA5 (George ve Kumar, 2020a; Hong ve Zhang, 2021) ve ayrıca 100 yılı aşan zaman periyoduna sahip ERA-20CM, ERA-20C ve CERA-20C (Meucci ve diğerleri, 2020) gibi kaynaklardan alınarak doğrudan kullanılabilmektedir.

Eğilim analizleri yaygın olarak klasik yöntemler uygulanarak gerçekleştirilmesine rağmen son on yılda ortaya çıkan yenilikçi yaklaşımlarda verinin alt kategorilere ayrılmasıyla daha detaylı bilgi sağlaması nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır. Hidrometeorolojik veriler üzerine yenilikçi eğilim çalışmaları oldukça yaygınken (Ay ve Kisi, 2015; Caloiero ve diğerleri, 2018; Dabanlı ve diğerleri, 2016; Mallick ve diğerleri, 2021; Şan, Akçay, Linh, Kankal ve Pham, 2021), dalga karakteristikleri üzerine yapılan eğilim çalışmalarında yenilikçi yöntemlerin kullanımı oldukça kısıtlıdır (Caloiero ve

diğerleri, 2019; De Leo ve diğerleri, 2021; 2020). YEA yöntemini, De Leo ve diğerleri (2021; 2020) belirgin dalga yüksekliği üzerine, Caloiero ve diğerleri (2019) ise belirgin dalga yüksekliği ve enerji periyodu üzerine uygulamışlardır. Ancak, dalga iklim parametrelerinden spektral pik enerjinin eğilimi ile ilgili daha önce yapılmış bir eğilim analizi çalışması bulunmamaktadır. Ayrıca, pik periyot (De Leo, Besio, Briganti, ve diğerleri, 2021; Dodet ve diğerleri, 2010; Gao ve diğerleri, 2021; George ve Kumar, 2020b; Guillou, 2020) için dünyanın farklı bölgelerinde yapılan çalışmalar bulunmaktadır ancak bu çalışma Karadeniz üzerinde yapılan ilk çalışma olacaktır.

Dalga iklimini tanımlayan birçok parametre bulunmaktadır. Öte yandan, dalga spektrumun şeklini belirlemek, anlık deniz durumunu anlamak için esastır. Bu nedenle bu çalışmada, hem spektrum şeklini belirlemek hem de tasarım, güvenlik ve gelecek tahminleri için iki önemli parametre olan spektral pik enerji ve pik periyot kullanılmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan dalga enerjisi ile bağlantılı bir kavram olan spektral pik enerjinin eğilimlerinin belirlenmesi, gelecekte bu konuda yapılacak yatırımları etkilemesi ve küresel iklim değişikliğinin bu alanda ne ölçüde olduğuna ışık tutacak bilgilerin elde edilmesi açısından önemlidir. Spektral tepe enerjisindeki değişiklik, spektral yoğunluk şekillerindeki değişiklikleri ve dolayısıyla düzensiz dalga rejimlerini yansıtır. Uygulamalı okyanus mühendisliğinde spektral piklerin önemine rağmen, pik periyotlarındaki eğilim ve buna karşılık gelen spektral pik enerjileri, Karadeniz de dahil olmak üzere dünyanın çeşitli bölgelerinde çalışılmamıştır.

Bu nedenle, bu tez çalışmasında Karadeniz üzerinde farklı kaynaklardan elde edilen spektral pik enerji ve pik periyodun maksimum ve ortalama değerlerine hem klasik Mann-Kendall hem de Geliştirilmiş Görselleştirme ile YEA (GG-YEA) yöntemleri yıllık, aylık ve mevsimlik zaman ölçeklerinde uygulanarak eğilim analizler gerçekleştirilmiştir. Bölgesel olarak çalışma alanının karakteristik özelliklerine göre üretilen SWAN dalga modeli ve küresel ölçekte üretilen ERA5 yeniden analizine ait dalga spektrum verileri kullanılarak karşılaştırma yapmak hedeflenmiştir. Ayrıca, zaman serisini istatistiksel olarak alt sınıflara ayıran ve eğilimin değişim oranının hesaplanabildiği GG-YEA yöntemi ile zaman serisine ait daha detaylı bilgiler elde edilmiştir. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 2.2'de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Çalışmanın akış diyagramı

3. MATERYAL VE YÖNTEM

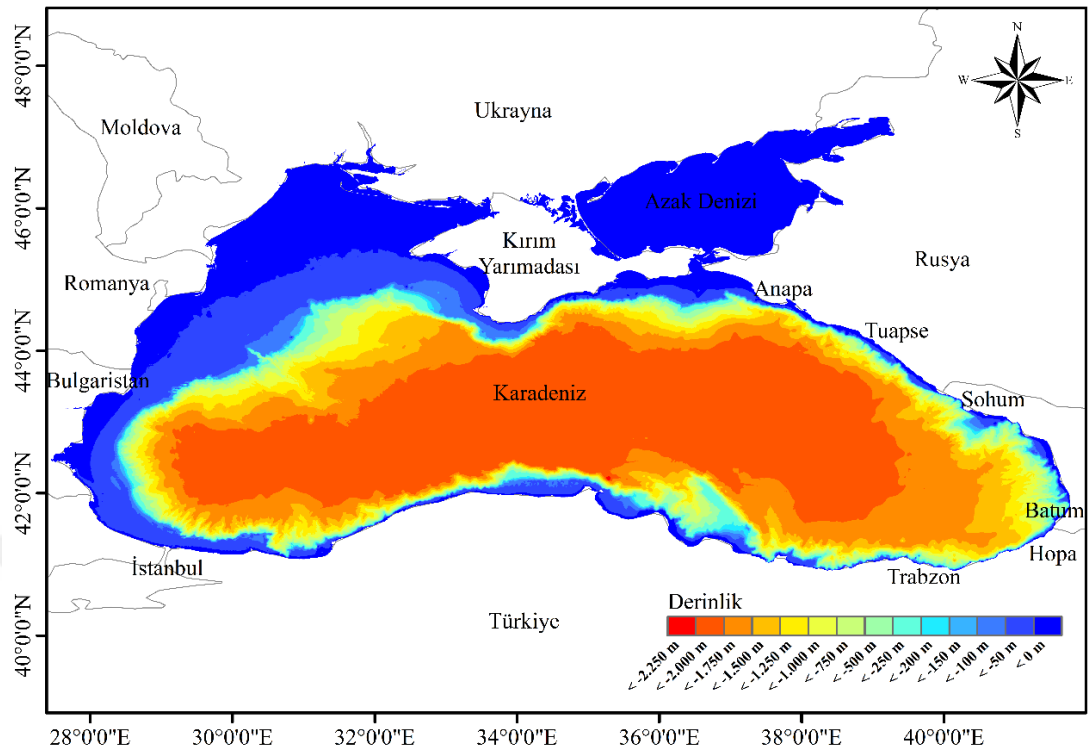
3.1. Çalışma Alanı

Yarı kapalı bir deniz olan Karadeniz, 40°- 48° kuzey enlemleri ile 26°- 42° doğu boylamları arasında yer almakta ve 461.000 km^2'lik bir alanı kaplamaktadır. Kerç ve İstanbul boğazları vasıtasıyla sırasıyla Azak ve Marmara Denizi'ne bağlanan Karadeniz; Bulgaristan, Gürcistan, Ukrayna, Rusya, Romanya ve Türkiye ile çevrilidir (Şekil 3.1). Maksimum derinliği yaklaşık 2.200 m olan ve 0,53 milyon km^3'lük bir su hacmine sahip olan Karadeniz'in oşinografisi nehirlerden gelen tatlı su girdileri, boğaz akıntıları ile topografyasındaki değişikliklerden oldukça etkilenmektedir (Özsoy ve Ünlüata, 1997). Ayrıca, kuzeybatı ve batı bölgeleri haricinde, dik kıta eğimi ve çok dar kıta sahanlığına sahip olduğu bilinir.

Karadeniz kıyıları Balkanlar, Pontus Dağları, Kafkaslar ve Kırım dağları ile çevrilidir. Bu durum, kıyı bölgelerinde belirli rüzgâr desenleri olmasına yol açmaktadır (Arkhipkin ve diğerleri, 2014). Hakim rüzgâr yönü Karadeniz'in batı kesiminde kuzey-kuzeydoğudan, doğu kesiminde ise daha çok güney yönlerinden gelmektedir. Kışın rüzgâr davranışı değişken olmakla birlikte kuzeybatıdan gelen fırtınalara daha çok rastlanmaktadır (Özsoy ve Ünlüata, 1997). 8.350 km kıyı uzunluğuna sahip Karadeniz jeopolitik ve jeolojik özellikleri nedeniyle çevresindeki ülkeler için ekonomik, petrol ve gaz üretimi/iletimi, enerji üretimi, deniz ulaşımı, taşımacılığı ve ticareti, turizm ve ticari/amatör balıkçılık ile açık deniz ve kıyı yapılarının inşaat faaliyetleri açısından oldukça önemlidir (Bingölbali, 2018). Bu çalışmada Azak Denizi de dahil olmak üzere Karadeniz'in tamamı çalışma alanı olarak seçilmiştir.

3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Veri Kaynakları

Tez çalışması kapsamında SWAN spektral dalga modeli ile küresel ERA5 yeniden analiz verilerine ait spektrumlar kullanılmıştır. SWAN modeli spektrumları Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 119N480 numaralı Karadeniz ve Azak Denizi'nin Dalga Spektrumları İklimi adlı proje kapsamında elde edilmiştir. Bu çalışması kapsamında dalga modellemesi yapılmamıştır.



Şekil 3.1. Çalışma alanı

SWAN dalga tahmin modelinin Karadeniz üzerindeki modellemesi kapsamında seçilen fiziksel parametreler Çizelge 1'de sunulmaktadır. SWAN modeli dalga spektrumu 36 yön ile 0,04 Hz ile 0,625 Hz arasında değişen 31 frekans aralığına ve 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu yüksek çözünürlüklü SWAN modeli ile tüm sayısal ağ noktaları (16866 nokta) üzerinde işlem yapmak oldukça uzun süreceği için proje kapsamında çalışma bölgesini temsil edecek optimum sayıda istasyon seçilmiştir. SWAN modeli dalga spektrumu çıktıları Azak Denizi'de dahil olmak üzere Karadeniz içerisinde 25 istasyon ve Gelendzhik, Utrish, Hopa, Samsun, Sinop, Filyos, İstanbul, Karaburun, Burgas, Gloria ve Varna şamandıralarının bulunduğu 11 istasyon da olmak üzere toplamda 36 istasyonda çalışılmıştır. Çizelge 2'de Karadeniz ve Azak Denizi'ni temsil eden istasyonların koordinatları sunulmuştur.

İklim veri deposu üzerinden ERA5 verilerinin çoğuna doğrudan ulaşılabilmektedir. Ancak bu tez çalışması kapsamında kullanılan spektrum verilerini CDS sunmadığı için Python 3 yazılımından gerekli kod yazılarak İklim Veri Deposu Uygulama Program Arayüzü (Climate Data Store Application Program Interface. CDS API) üzerinden ulaşılmıştır. Karadeniz üzerinde (40°K- 48°K enlemleri ile 26°D- 42°D boylamları) 24

yön ve 30 frekans aralığına sahip 2 Boyutlu dalga spektrumu elde edilmiştir. CDS okyanus parametrelerini 0,5°x0,5° mekânsal çözünürlükte sunmasına rağmen, CDS API ile farklı çözünürlükte veriler elde edilebilmektedir. Daha yüksek çözünürlükte olması ve daha önceki çalışmalarda sıklıkla kullanılması nedeniyle 0,25°x0,25° mekânsal çözünürlük seçilmiştir. Bu şekilde daha önceki çalışmalarla kıyaslama kolaylığı da sağlanmış olacaktır.

Çizelge 3.1. Kalibre edilmiş SWAN dalga tahmin modelinin fiziksel parametreleri ve model yapılandırılması

Parametre	**Özellik**
Model versiyonu	41.31
Rüzgâr girdisi	ERA5
Rüzgâr girdi formülasyonu	Komen vd. (1984)
Dispersiyon	Komen vd. (1994), C_{ds2}=0.8
Taban Sürtünmesi	Hasselmann vd. (1973)- JONSWAP
Dalga kırınımı	Battjes ve Janssen (1978)
Lineer olmayan Dörtlü Dalga Etkileşimi	Hasselmann vd. (1985)-DIA
Lineer Olmayan Üçlü Dalga Etkileşimi	Eldeberky (1996)-LTA
Spektrum Frekans Aralığı	0,04-0,625 Hz
Frekans Sayısı	31
Yön Sayısı	36
Zaman Aralığı	30 dakika
Yayılma Formülasyonu	BSBT scheme

Karadeniz ve Azak Denizi dahil olmak üzere 876 sayısal ağ (grid) noktasında çalışılmıştır. Veriler 0,25°x0,25° mekânsal çözünürlüğe ve 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Yönün başlangıç açısı 7,5°'dir ve 15° artarak devam etmektedir. Oşinografi kuralına göre 0° yönü kuzeyi ve 90° ise doğuyu ifade etmektedir. Frekans değerleri ise 0,03453 Hz ile başlamakta, aralıklar f(n)=f(n-1)*1,1, n=2,30 formülasyonuna göre ilerlemekte ve 0,54775 Hz ile sonlanmaktadır. Spektral enerjilerin birimi m^2sn/rad'dır.

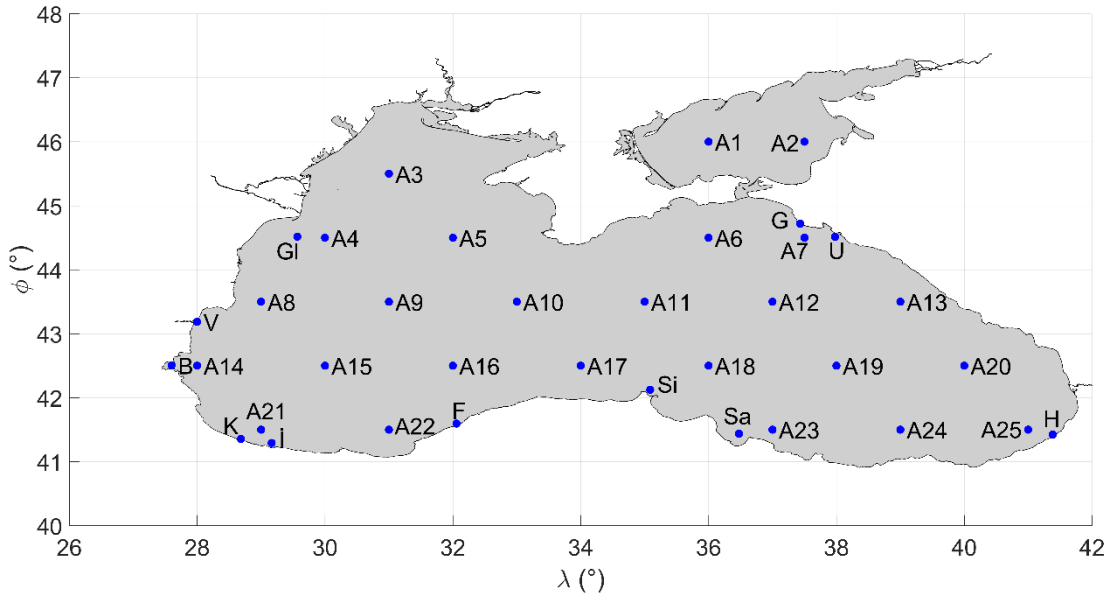
2 boyutlu dalga spektrumu verileri oldukça yüksek mekansal ve zamansal çözünürlüğe sahip olduğu için NetCDF formatında ancak 1'er aylık olacak şekilde indirilebilmiştir. Bu şekilde bile tek bir dosyanın boyutu 2 GB'ın üzerine çıkmış ve toplam 504 dosya için veriler 1 TB'ın üzerinde alan kaplamıştır. Elde edilen verilerin düzenlenmesi R Studio,

haritalandırılması ise MATLAB 2019B programları ile yapılmıştır. Veriler on tabanlı logaritma şeklinde verildiğinden dolayı gerçek değerlerine ulaşmak için verilere 10'un kuvveti alınarak dönüşüm uygulanmıştır. Daha sonra her 1 saatlik spektrum içerisinden pik (maksimum) enerjiler ayrıca pik enerjinin geldiği yön ve frekans bilgileri çekilerek analiz için kullanılacak temel veri kaynağı oluşturulmuştur.

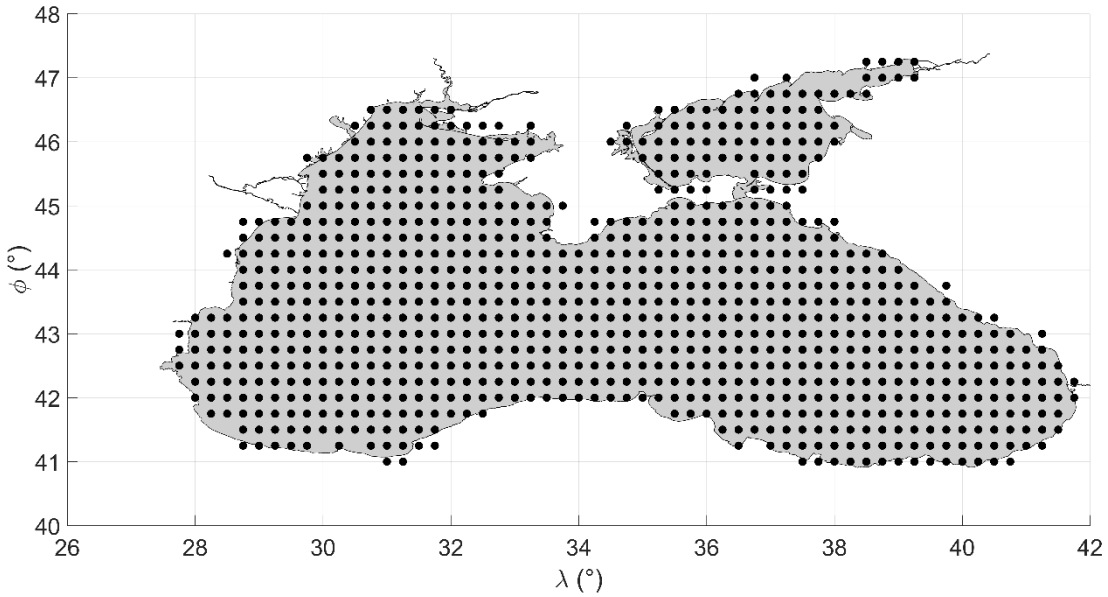
Çizelge 3.2. SWAN modelinde çalışılan istasyonların koordinatları.

İstasyon	Enlem	Boylam	İstasyon	Enlem	Boylam
A1	46°00'00.0"K	36°00'00.0"D	**A19**	42°30'00.0"K	38°00'00.0"D
A2	46°00'00.0"K	37°30'00.0"D	**A20**	42°30'00.0"K	40°00'00.0"D
A3	45°30'00.0"K	31°00'00.0"D	**A21**	41°30'00.0"K	29°00'00.0"D
A4	44°30'00.0"K	30°00'00.0"D	**A22**	41°30'00.0"K	31°00'00.0"D
A5	44°30'00.0"K	32°00'00.0"D	**A23**	41°30'00.0"K	37°00'00.0"D
A6	44°30'00.0"K	36°00'00.0"D	**A24**	41°30'00.0"K	39°00'00.0"D
A7	44°30'00.0"K	37°30'00.0"D	**A25**	41°30'00.0"K	41°00'00.0"D
A8	43°30'00.0"K	29°00'00.0"D	**G**	44°42'36.0"K	37°26'02.4"D
A9	43°30'00.0"K	31°00'00.0"D	**U**	44°30'50.4"K	37°58'40.8"D
A10	43°30'00.0"K	33°00'00.0"D	**H**	41°25'22.8"K	41°22'58.8"D
A11	43°30'00.0"K	35°00'00.0"D	**Sa**	41°26'16.8"K	36°28'33.6"D
A12	43°30'00.0"K	37°00'00.0"D	**Si**	42°07'22.8"K	35°05'13.2"D
A13	43°30'00.0"K	39°00'00.0"D	**F**	41°35'42.0"K	32°03'28.8"D
A14	42°30'00.0"K	28°00'00.0"D	**İ**	41°17'31.2"K	29°09'57.6"D
A15	42°30'00.0"K	30°00'00.0"D	**K**	41°21'18.0"K	28°41'06.0"D
A16	42°30'00.0"K	32°00'00.0"D	**B**	42°30'25.2"K	27°36'00.0"D
A17	42°30'00.0"K	34°00'00.0"D	**Gl**	44°31'01.2"K	29°34'01.2"D
A18	42°30'00.0"K	36°00'00.0"D	**V**	43°11'06.0"K	27°59'52.8"D

Küresel bir model olan ERA5 yeniden analiz verisinin 0,25°x0,25° alansal çözünürlüğe sahip toplamda 876 sayısal ağ noktasında çalışılmıştır. SWAN ve ERA5 modellerinden elde edilen spektrumlar 1 saat çözünürlüğe sahiptir. Şekil 3.2'de SWAN modeli için çalışılan istasyonlar ve Şekil 3.3'de ise ERA5'e ait sayısal ağ noktaları gösterilmektedir.



Şekil 3.2. SWAN modelinde çalışılan istasyonlar



Şekil 3.3. ERA5 yeniden analizi sayısal ağ noktaları

3.3. Trend Analizi

3.3.1. Mann-Kendall testi

(Mann, 1945) ve (Kendall, 1975) tarafından geliştirilen parametrik olmayan Mann-Kendall Yöntemi eğilim analizi çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile bir zaman serisinde artan ya da azalan yönde eğilim olup olmadığına sıfır hipotezi; "H_0: eğilim yok" ile bakılmaktadır. Yöntemin uygulanacağı zaman serisinde $(x_1, x_2, x_3, \dots \dots, x_n)$ x_i ve x_j veri çiftleri iki guruba ayrılır. Mann-Kendall test istatistiği S aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \tag{3.8}$$

n veri uzunluğunu, $\boldsymbol{x_i}$ ve $\boldsymbol{x_j}$ ise sırasıyla *i* ve *j* zamanlarındaki veri değerlerini gösterir.

n ≥ 10 için S değerinin varyansı aşağıda verilen şekilde bulunur:

$$Var(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{p} t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] /18 \tag{3.9}$$

Serinin standart sapması belirlendikten sonra standart normal Z değeri şu şekilde bulunur:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & , \quad S > 0 \; ise \\ 0 & , \quad 0 \quad ise \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & , \quad S < 0 \; ise \end{cases} \tag{3.10}$$

Yukarıda anlatıldığı şekilde bulunan Z'nin mutlak değeri, seçilen α anlamlılık düzeyine karşılık gelen normal dağılımın $Z_{\alpha/2}$ değerinden küçükse sıfır hipotezi kabul edilmektedir. Bu da zaman serisinde artan ya da azalan yönde bir değişim olmadığını ortaya koymaktadır. Z'nin mutlak değerinin $Z_{\alpha/2}$ değerinden büyük olması zaman serisinde bir artış ya da azalışın olduğunu göstermektedir. Ayrıca, S pozitif (negatif) ise

artan (azalan) bir eğilim vardır. Bu çalışma kapsamında %50 ila %99,9 (α = 0,5 ila α = 0,001) arasındaki güven (anlamlılık) düzeyi dikkate alınmıştır. %50'nin altındaki güven seviyesinden düşük değerlerdeki eğilim dikkate alınmamıştır. Düşük güven seviyelerindeki (<%90) eğilimlerin dikkate alınmasının sebebi ise oluşan değişimlerin şiddetini belirlemek ve eğilimlerin yönünü ortaya koyabilmektir.

3.3.2. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi (GG-YEA)

Bu yöntem Şen (2012) tarafından önerilen YEA'nın yeni bir yaklaşımı olarak Güçlü (2020) tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntemde verilerin "Düşük Değerler" ve "Yüksek Değerler" olarak sınıflandırılması istatistiksel bir yaklaşımla yapılması amaçlanmıştır. Bunun için Pettitt Değişim Noktası Testi (Pettitt, 1979) uygulanmıştır.

YEA tekniğinde olduğu gibi, yöntemin ilk uygulama aşamaları, n adet veri içeren $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ serisinin $\left\{b_{1,\frac{n}{2}}\right\}$ ile $\left\{b_{2,\frac{n}{2}}\right\}$ olmak üzere iki eşit bölüme ayrılmasıyla başlar ve $\{s_1\}$ ile $\{s_2\}$ olarak artan şekilde sıralanması ile devam eder. Yönteme ait süreçlerde kullanılan eşitlikler aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\left\{b_{1,\frac{n}{2}}\right\} = \left\{a_1, a_2, \dots, a_{\frac{n}{2}}\right\} \tag{3.11}$$

$$\left\{b_{2,\frac{n}{2}}\right\} = \left\{a_{\frac{n}{2}+1}, a_{\frac{n}{2}+2}, \dots, a_n\right\} \tag{3.12}$$

$$\{s_1\} = \left\{\min(b_{1,\frac{n}{2}}), \dots b_i, \dots, \text{maks}(b_{1,\frac{n}{2}})\right\} \ (1 < \text{i} < \text{n}/2) \tag{3.13}$$

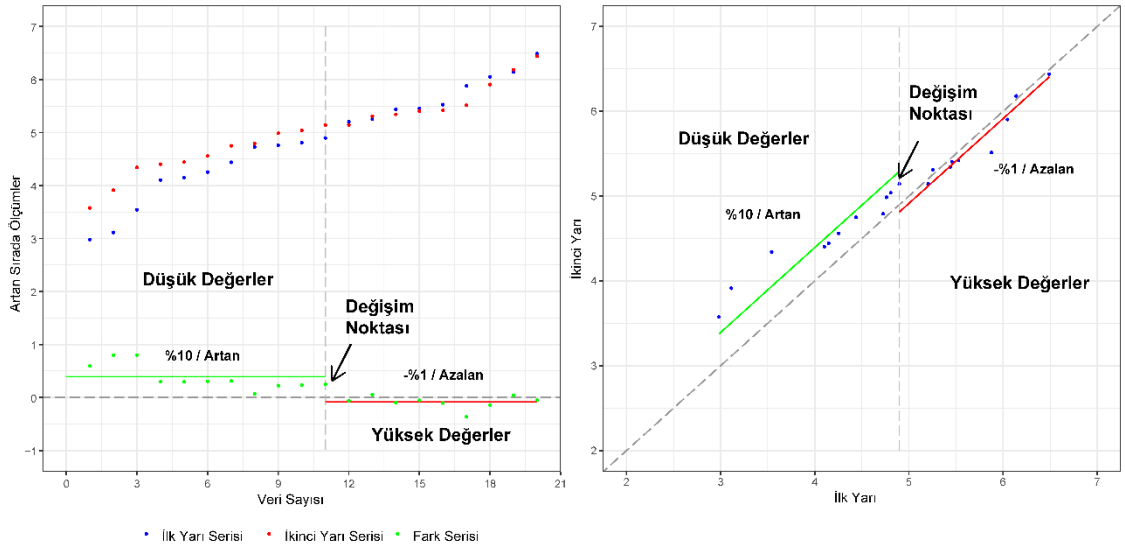
$$\{s_2\} = \left\{\min(b_{2,\frac{n}{2}}), \dots b_j, \dots, \text{maks}(b_{2,\frac{n}{2}})\right\} \tag{3.14}$$

$\{s_1\}$, $\{s_2\}$ ve $\{\{s_2\}\text{-}\{s_1\}\}$ serileri yatay eksende {1, 2, 3, .. , n/2} değerlerine karşı işaretlenir. Artan düzende sıralanmış {s1} ve {s2} serilerinin fark değerleri bulunduktan sonra, bu yeni {{s2}-{s1}} serisine Pettitt (Pettitt, 1979) tarafından önerilen Pettitt testi uygulanır ve değişim noktası bulunur. Pettitt test istatistiklerinden biri olan K_T, değişim noktası konumu aşağıda verilmiştir:

$$K_T = max\left|U_{t,T}\right| \tag{3.15}$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{T} sgn(X_i - X_j) \tag{3.16}$$

Değişim noktasının solundaki kısım "Düşük değerler kategorisi", sağ tarafı "Yüksek değerler kategorisi" olarak sınıflandırılır (Şekil 3.4). Eğilimi tespit etmek için y=0 çizgisi çizilir ve bu çizginin altında (üstünde) fark değerleri varsa azalan (artan) bir eğilim vardır. Klasik ITA yaklaşımında kullanılan 1:1 çizgisi yerine y=0 çizgisi kullanılır. Eğilimin büyüklüğünü ifade eden yüzdelikler, Yüksek ve Düşük değerler kategorisi için sırasıyla 100×(Sol tarafın fark ortalaması)/(Sol tarafın ilk yarı ortalaması) ve 100×(Sağ tarafın fark ortalaması)/(Sağ tarafın ilk yarı ortalaması) olarak hesaplanır.



Şekil 3.4. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizinin Gösterimi

4. BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Veri Kaynaklarının Genel Özellikleri

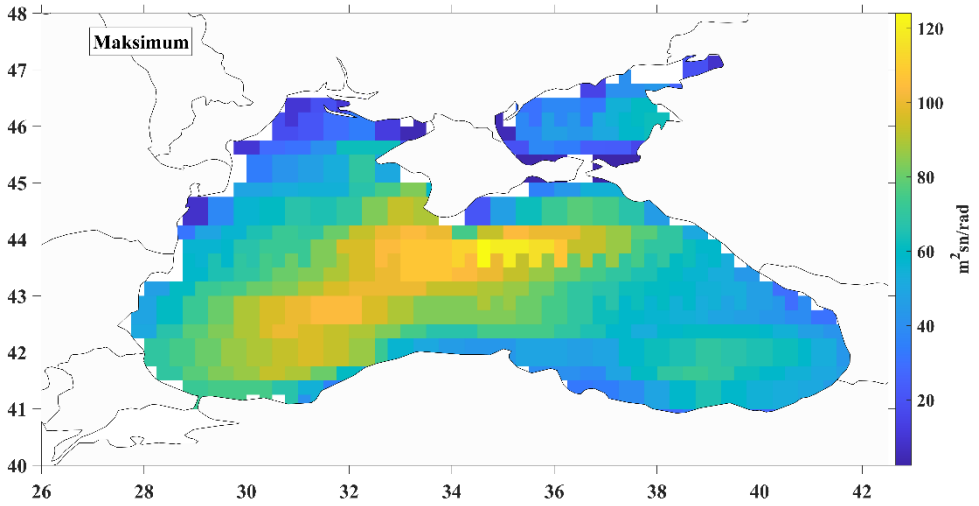
Çalışma kapsamında kullanılan parametrelerin istatistiksel olarak değerlendirmesini yapmak için maksimum, ortalama ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Çizelge 4.1'de SWAN spektral dalga modelinden elde edilen spektral pik enerjiler için istatistiksel bilgiler sunulmaktadır. 1979-2020 yıllarını kapsayan 42 yıllık veri, SWAN modelinde 1 saat çözünürlükte olduğu için 368.184 değer içermektedir. En küçük spektral pik enerji değerleri 0 m^2sn/rad olarak bulunurken, istasyonlardaki ortalama değer 1,47 m^2sn/rad'ı aşmamıştır. Spektral pik enerjilerin en büyük değerleri ise 10 ila 90 m^2sn/rad arasında değişim gösterse de çoğunlukla (>%70) 50 m^2sn/rad'ın üzerindedir. Şekil 4.1 üzerinde ise ERA5 spektral pik enerjilerin istatistiksel özellikleri verilmiştir. ERA5 yeniden analizi SWAN modeli gibi 1 saatlik çözünürlük sunduğu için temel istatistikleri her istasyonda 368.184 veri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekil 4.1a'da görüldüğü gibi spektral pik enerji Karadeniz'in orta ve batı kesiminde 120 m^2sn/rad değerine kadar çıkmaktadır. Ancak kıyı kesimlerinde daha çok 20-60 m^2sn/rad seviyelerindedir. Ortalama spektral pik enerjilerin Orta ve Batı Karadeniz'de yaklaşık 1,1 m^2sn/rad değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.1b). Standart sapma değerlerinin her iki veri seti için de oldukça küçük olduğu belirlenmiştir.

SWAN ve ERA5 modellerine ait spektral pik enerjilerin maksimum ve ortalama parametrelerinin yıllık, mevsimlik ve aylık olarak birbirleriyle olan ilişkisini belirlemek amacıyla modellerde aynı olan A1'den A25'e kadar olan istasyonlar kullanılarak Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır (Ek 1). Tüm farklı istasyonlar ve zaman dilimlerindeki değerlendirmeler için korelasyon katsayısının 0,90'ın üstünde olduğu belirlenmiştir. Maksimum spektral pik enerjiler için A6 ve A7 istasyonlarında tüm zaman ölçeklerinde ayrıca özellikle kış mevsimi ve Aralık ayında da oldukça düşük bir korelasyon vermektedir. Benzer şekilde ortalama spektral pik enerjiler için aynı istasyonların tüm zaman dilimlerinde ayrıca kış ve sonbahar mevsimlerinde tüm istasyonlarda oldukça zayıf bir ilişkisi olduğu görülmektedir (Ek 2).

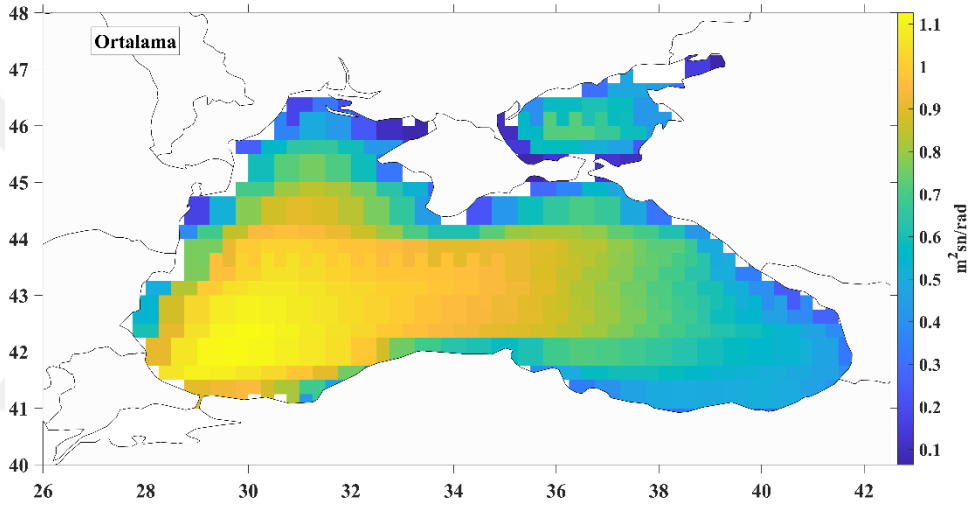
Çizelge 4.1. SWAN dalga modeli spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (m^2sn/rad)

İstasyon	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	İstasyon	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
A1	14,53	0,55	1,11	**A19**	67,39	0,99	2,21
A2	10,87	0,37	0,63	**A20**	60,57	0,86	2,00
A3	33,68	0,91	1,67	**A21**	85,37	1,46	3,23
A4	47,10	1,17	2,22	**A22**	81,80	1,30	2,76
A5	56,43	1,10	2,11	**A23**	53,69	0,90	1,93
A6	79,33	0,98	2,13	**A24**	56,67	0,84	1,92
A7	69,34	0,86	2,15	**A25**	58,90	0,76	1,86
A8	57,96	1,33	2,71	**G**	38,47	0,55	1,48
A9	71,64	1,36	2,67	**U**	64,50	0,77	2,09
A10	80,47	1,36	2,71	**H**	54,95	0,72	1,76
A11	66,90	1,24	2,58	**Sa**	31,23	0,67	1,41
A12	64,68	1,06	2,33	**Si**	42,81	1,06	2,08
A13	58,37	0,88	2,07	**F**	52,59	0,74	1,60
A14	60,71	1,28	2,71	**İ**	81,34	1,35	2,96
A15	80,89	1,47	2,93	**K**	70,52	1,30	3,05
A16	79,61	1,38	2,67	**B**	33,46	0,62	1,35
A17	56,89	1,29	2,46	**Gl**	46,13	1,09	2,08
A18	67,63	1,15	2,48	**V**	32,42	0,56	1,17

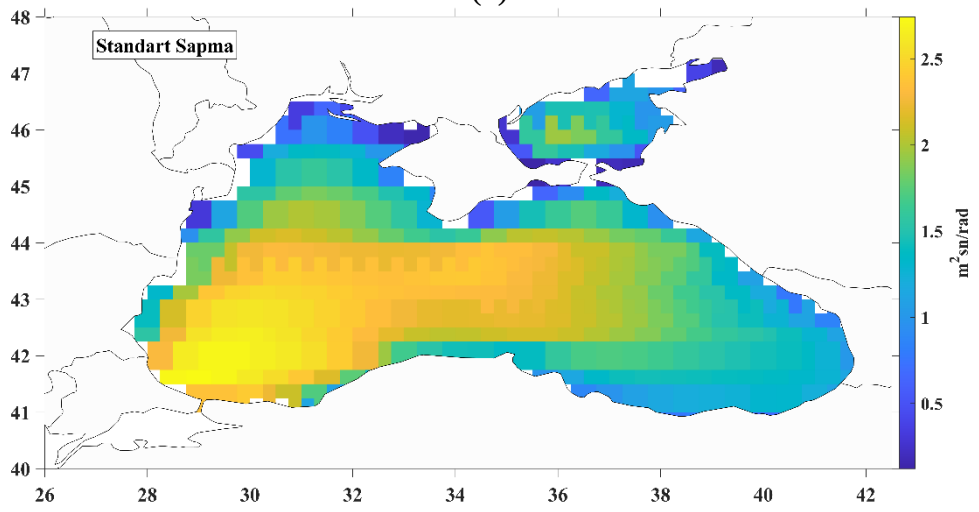
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de sırasıyla SWAN ve ERA5 dalga spektrumlarından elde edilen pik periyotlar içinde spektral pik enerjinin en çok gerçekleştiği periyot değerleri verilmiştir. Bu değerler hesaplanırken 42 yıllık saatlik veriler dikkate alınmıştır. Karadeniz'in özellikle batı ve güneydoğusunu temsil eden istasyonlarda SWAN modelinde 5,27 sn ve ERA5 modelinde 5,21 sn değerinin baskın olduğu söylenebilir. Karadeniz'in güneybatı kıyılarında ERA5 modelinde 5,73 saniyeyi, SWAN modelinde ise 5,77 saniyeyi aşan pik periyotların baskınlığı söz konusudur.



(a)



(b)

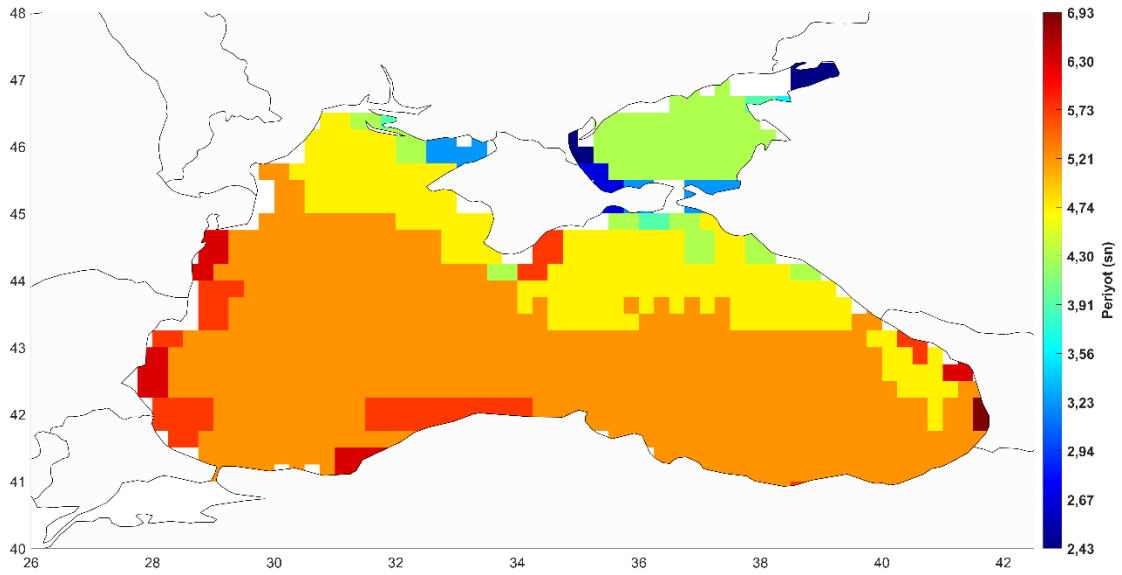


(c)

Şekil 4.1. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (a) maksimum (b) ortalama (c) standart sapma

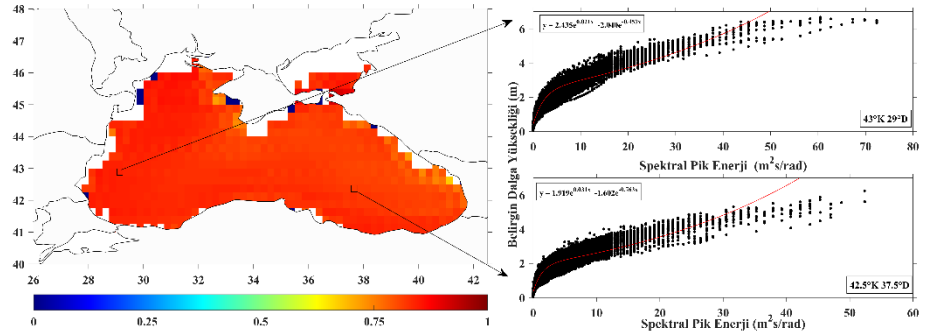
Çizelge 4.2. SWAN dalga modeline ait pik periyotlar için baskın periyot değerleri

İstasyon	Yüzde (%)	Periyot (sn)	İstasyon	Yüzde (%)	Periyot (sn)
A1	14,06	4,00	**A19**	12,99	5,27
A2	14,88	4,00	**A20**	12,54	5,27
A3	13,14	5,27	**A21**	13,25	5,77
A4	13,42	5,77	**A22**	14,06	5,27
A5	13,27	5,77	**A23**	12,73	5,77
A6	12,34	4,80	**A24**	12,42	5,27
A7	10,89	4,38	**A25**	11,90	5,27
A8	13,73	5,77	**G**	10,62	4,00
A9	14,13	5,77	**U**	9,93	4,80
A10	13,86	5,27	**H**	12,03	5,27
A11	13,60	5,27	**Sa**	12,79	5,27
A12	13,01	5,27	**Si**	13,55	5,77
A13	12,42	5,27	**F**	14,32	5,27
A14	13,71	5,77	**İ**	13,69	5,77
A15	14,64	5,77	**K**	14,03	5,77
A16	14,50	5,77	**B**	14,69	5,77
A17	14,24	5,77	**Gl**	13,06	5,77
A18	13,05	5,27	**V**	14,37	5,27

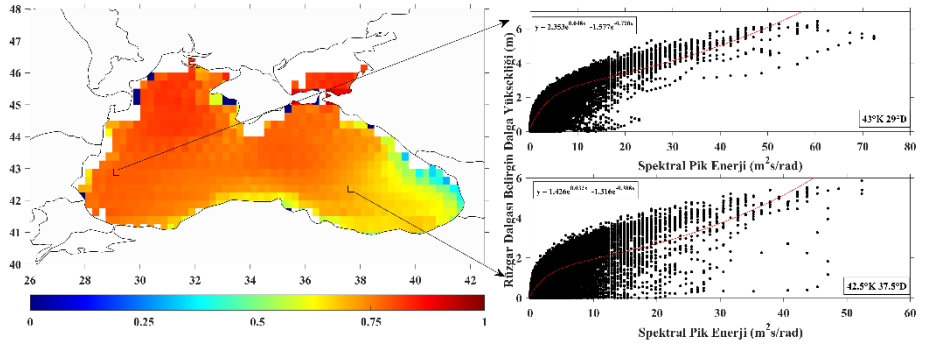


Şekil 4.2. ERA5 yeniden analizi verisine ait pik periyotlar için baskın periyot değerleri

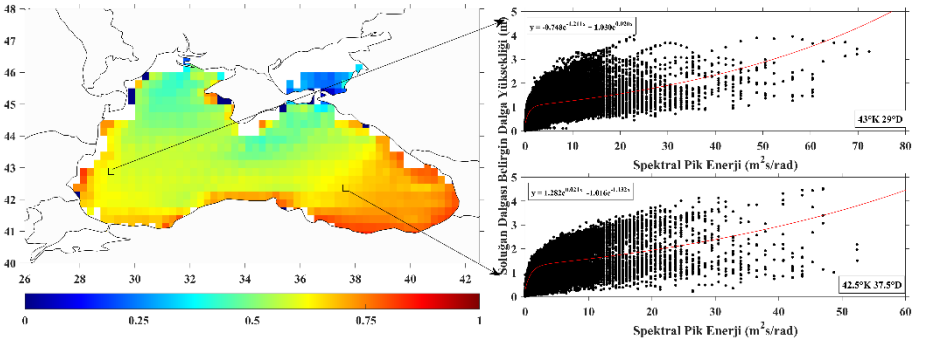
ERA5 yeniden analiz veri setlerinden olan soluğan dalga yüksekliği, rüzgâr dalga yüksekliği ve bütüncül dalga yüksekliği verileri kullanılarak spektral pik enerji ile belirgin dalga yüksekliği arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Bu kapsamda, yükseklikler arasındaki ilişki ERA5 modelinin çıktılarına Pearson korelasyon katsayısı uygulanarak incelenmiştir. Ek olarak, bu parametreler için Batı ve Doğu Karadeniz'i temsil etmek üzere seçilen 43°K-29°D ve 42,5°K-37,5°D koordinatlarına sahip istasyonlarının dalga yüksekliği dağılım grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 4.3). Grafiklere göre pik enerji ve belirgin dalga yüksekliği korelasyonları tüm Karadeniz'de Pearson testine göre bütüncül dalgalar için yaklaşık %80'in üzerinde (0,8) olduğu tespit edilmiştir. Karadeniz'in neredeyse tamamında 0,75'e kadar, Doğu Karadeniz'de ise yaklaşık 0,6'ya kadar bir korelasyon vardır ve rüzgâr dalgaları için Gürcistan kıyılarında daha zayıf bir korelasyon görülmektedir. Buna karşılık, soluğan dalgalar için Karadeniz'in güneydoğu kısmı hariç tüm Karadeniz'de bütüncül dalgalara göre daha düşük bir korelasyon vardır. Buna göre, soluğan dalgalarının esas olarak Doğu Karadeniz'deki pik enerjiyi sağladığı açıktır. Ayrıca, dağılım grafiklerine bakıldığında pik enerji ve belirgin dalga yüksekliği arasında üstel bir ilişki görülmektedir. Böylece belirgin dalga yüksekliği arttıkça pik enerjinin de arttığını yorumlamak mümkündür. Rüzgâr ve soluğan dalgaları için, yüksek pik enerji yoğunluğu daha düşük dalga yüksekliklerinde görülmektedir. Soluğan dalgaları, spektrumda dar bir frekans aralığına sahiptir, bu nedenle rüzgâr dalgalarından çok daha yüksek pik enerjisine sahiptir (Goda, 2000). Soluğan dalgalarında düşük dalga yüksekliklerinde bile yüksek pik enerjisi görülmesi bu durumu desteklemektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.3. Spektral pik enerji ve belirgin dalga yüksekliği için korelasyon haritası (1. Sütun) ve dağılım grafiği (2. Sütun), (a) kombine dalgalar, (b) rüzgâr dalgaları, (c) soluğan

4.2. Mann-Kendall Sonuçları

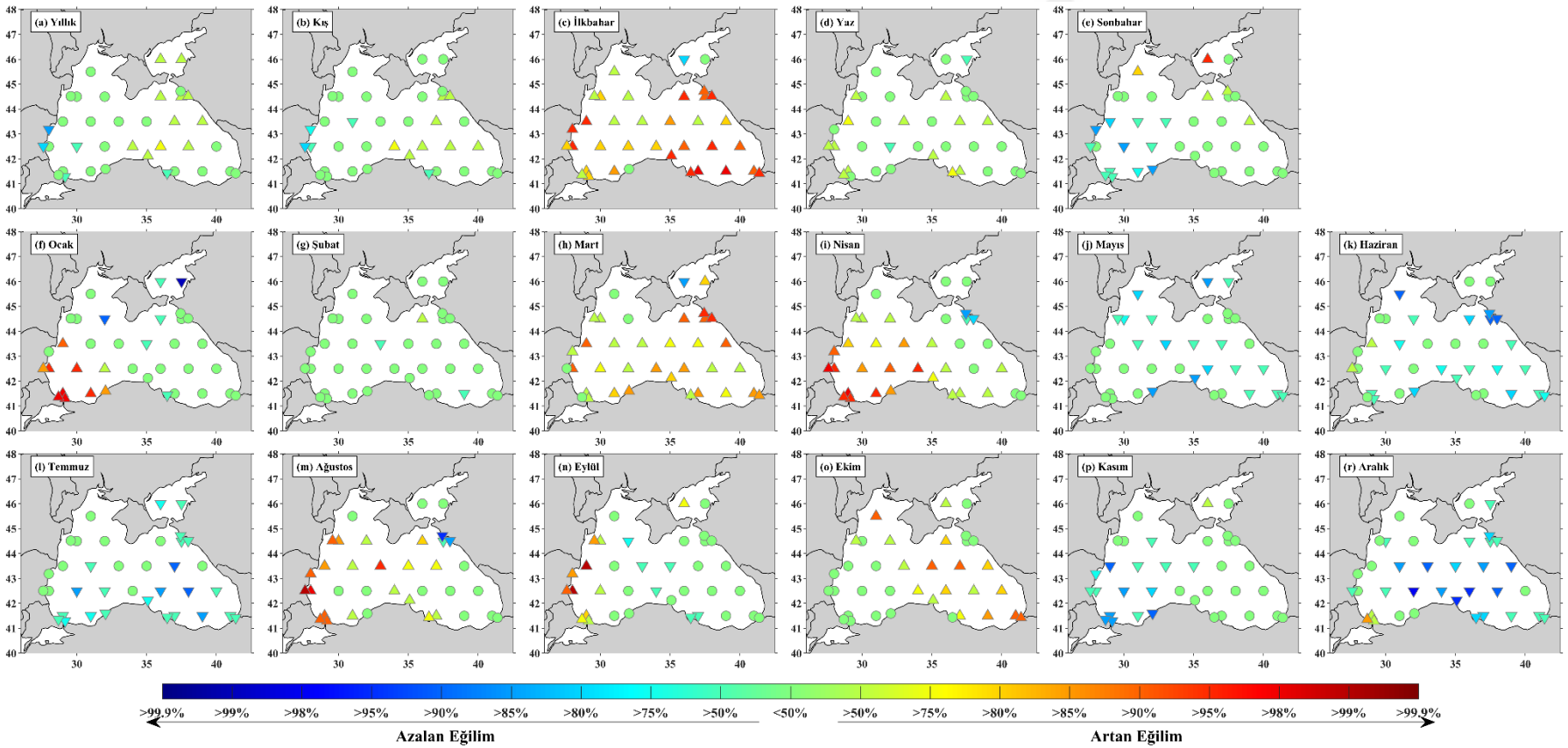
4.2.1. SWAN modelinde spektral pik enerjiler için Mann-Kendall sonuçları

Mann-Kendall analizi SWAN modelinden elde edilen dalga spektrumlarına ait pik enerjiler için yıllık, mevsimlik ve aylık periyotlarda gerçekleştirilmiştir. Maksimum ve ortalama pik enerjiler için MK test sonuçları sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur.

Yıllık maksimum spektral pik enerjinin eğilimi Karadeniz genelinde %50 güven seviyesinin altında kalmıştır (Şekil 4.4a). Azak Denizi'ni temsil eden A1 ve A2 istasyonlarında ve Doğu Karadeniz'i temsil eden A6, A7, A12, A13, A17, A19, U ve Si istasyonlarında %50 güven seviyesinin üstünde artan bir eğilim görülmüştür. Bunun yanında Bulgaristan kıyılarındaki B (%75 güven seviyesi) ve V (%80 güven seviyesi) istasyonlarında azalan eğilim tespit edilmiştir.

Kış mevsiminde genel olarak yüksek güven düzeyinde bir eğilime rastlanmamıştır (Şekil 4.4b). Ancak Bulgaristan kıyılarında %75-80 güven düzeyinde azalan eğilim, Doğu Karadeniz'de ise %75 güven düzeyini aşmayan artan eğilim görülmüştür. İlkbaharda spektral pik enerjinin eğilimi artma yönündedir (Şekil 4.4c). Özellikle Doğu Karadeniz'de %95 güven seviyesinin üzerinde artan eğilim vardır. Yazın Karadeniz genelinde belirgin bir eğilim görülmemektedir (Şekil 4.4d). Bununla birlikte, özellikle kıyı hattında görülen artan eğilimler %75 güven düzeyini aşmamaktadır. Güneybatı Karadeniz bölgesinde sonbahar mevsiminde %75-85 güven seviyesinde azalan eğilim varken çalışma bölgesinin genelinde belirgin bir eğilime rastlanmamıştır (Şekil 4.4e). Ancak Azak denizindeki A1 istasyonunda spektral pik enerjilerin %95 güven seviyesinde artmaya eğilimli olması dikkat çekmektedir.

Ocak ayında Batı Karadeniz'de özelikle Bulgaristan ile Türkiye'nin batı kıyı hattında, %90 güven seviyesinin üstünde artan eğilim vardır (Şekil 4.4f). Doğu Karadeniz'de belirgin bir eğilim görülmezken Azak Denizi'nde %99 güven seviyesinde azalan eğilime rastlanmıştır. Şubat ayında Karadeniz genelinde belirgin bir eğilim yoktur (Şekil 4.4g). Yalnızca %50 güven seviyesinde A6 istasyonunda artan, A10 ve A24 istasyonlarında azalan eğilim ortaya çıkmıştır.

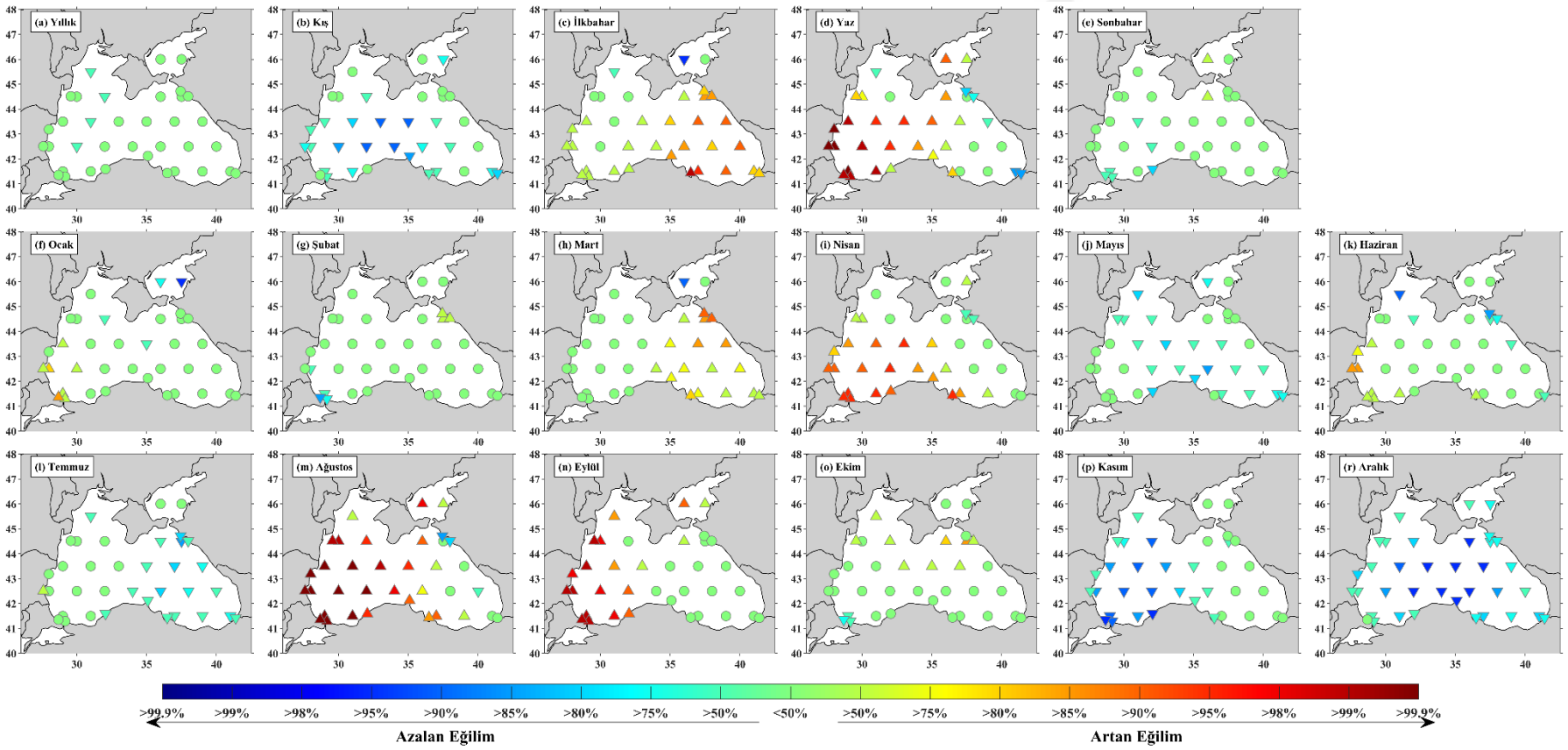


Şekil 4. 4. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları

Mart ayında maksimum spektral pik enerjinin Karadeniz'in neredeyse tamamında artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.4h). Bu artma eğilimi Nisan ayında da devam etmiştir (Şekil 4.4i). Mart ayında Rusya kıyılarında daha yüksek güven seviyelerinde artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Nisan ayında ise yüksek artış eğilimleri Bulgaristan ile Türkiye'nin batı kıyılarında rastlanmıştır. Mayıs ayında özellikle Doğu ve Kuzeybatı Karadeniz ile Azak Denizi'nde daha düşük güven seviyelerinde azalan eğilim vardır (Şekil 4.4j). Ayrıca, A1, F ve Si istasyonlarında maksimum spektral pik enerjiler %85 güven düzeyinde azalmaktadır.

Haziran ve Temmuz aylarında maksimum spektral pik enerjilerin Karadeniz'in neredeyse tamamında azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu azalma Haziran ayında %85-90 güven seviyelerinde Rusya kıyılarında yoğunlaşırken, diğer azalmaların olduğu Doğu Karadeniz'de ve Türkiye'nin Orta Karadeniz kıyılarında daha düşük güven seviyeleri ortaya çıkmıştır(Şekil 4.4k). Azalma eğilimleri Temmuz ayında Karadeniz'in güneyinde ve Azak Denizi'nde daha çok görülmektedir (Şekil 4.4l). Ağustos'ta Türkiye'nin İstanbul kıyılarında (%90), Bulgaristan kıyısında (%99) ve Romanya kıyısında (%90) yüksek güven seviyelerinde artan eğilim dikkat çekmektedir (Şekil 4.4m). Rusya kıyısında Gelendzhik ve Utrish şamandıralarının olduğu istasyonlarda %80-95 azalan eğilim hâkimdir. Eylül ayında Karadeniz genelinde belirgin bir eğilim görülmemiştir. Ancak, özellikle Bulgaristan kıyı şeridinde %95 güven seviyesinin üstünde artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.4n). Ekim ayında A3 istasyonunda ve Doğu Karadeniz'de özellikle güneyde kalan A11, A12, A24, A25 ve H istasyonlarında %90-95 güven seviyesinde artan eğilim dikkat çekmektedir (Şekil 4.4o). Kasım ayında Batı Karadeniz'de ve Aralık ayında ise Karadeniz'in neredeyse tamamında azalan eğilim türünün hâkimiyeti mevcuttur (Şekil 4.4p ve 4.4r).

Ortalama spektral pik enerjilerin MK test sonuçları Şekil 4.5'te sunulmuştur. Yıllık ortalama spektral enerjilerin Karadeniz'in neredeyse tamamında belirgin bir eğilim göstermediği Şekil 4.5a'da görülebilmektedir. Ancak çok düşük güven seviyesi olan %50 durumunda A3, A5, A9 ve A15 istasyonlarında azalan eğilimler tespit edilmiştir.



Şekil 4. 5. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları

Mevsimlik ortalama pik enerjilerin MK sonuçlarına göre kış ve sonbaharda azalan, ilkbahar ve yaz mevsiminde artan eğilimler dikkat çekmektedir. Kışın, özellikle Orta Karadeniz'de %90 güven seviyesinde azalan eğilim vardır (Şekil 4.5b). Ortalama pik enerjiler ilkbaharda Batı Karadeniz'de genellikle belirgin bir eğilim göstermezken Doğu Karadeniz'de %90-95 güven düzeyinde artma eğilimindedir (Şekil 4.5c). Yaz mevsiminde Batı Karadeniz'de özellikle Bulgaristan ile Türkiye'nin batı kıyı hattında %99.9 güven seviyesinde oldukça şiddetli artan yönde eğilim dikkat çekmektedir (Şekil 4.5d). Ayrıca Rusya-Anapa ile Türkiye-Hopa kıyı hattı arasında azalan eğilim gözlemlenmiştir. Sonbaharda Güneybatı Karadeniz'de görülen azalan eğilim dışında ortalama pik enerjilerde genel olarak belirgin bir eğilime rastlanmamıştır (Şekil 4.5e). Azak Denizi'nde ise ortalama pik enerjiler kış ve ilkbahar mevsimlerinde azalmaya, yazın ve sonbaharda ise artmaya eğilimlidir.

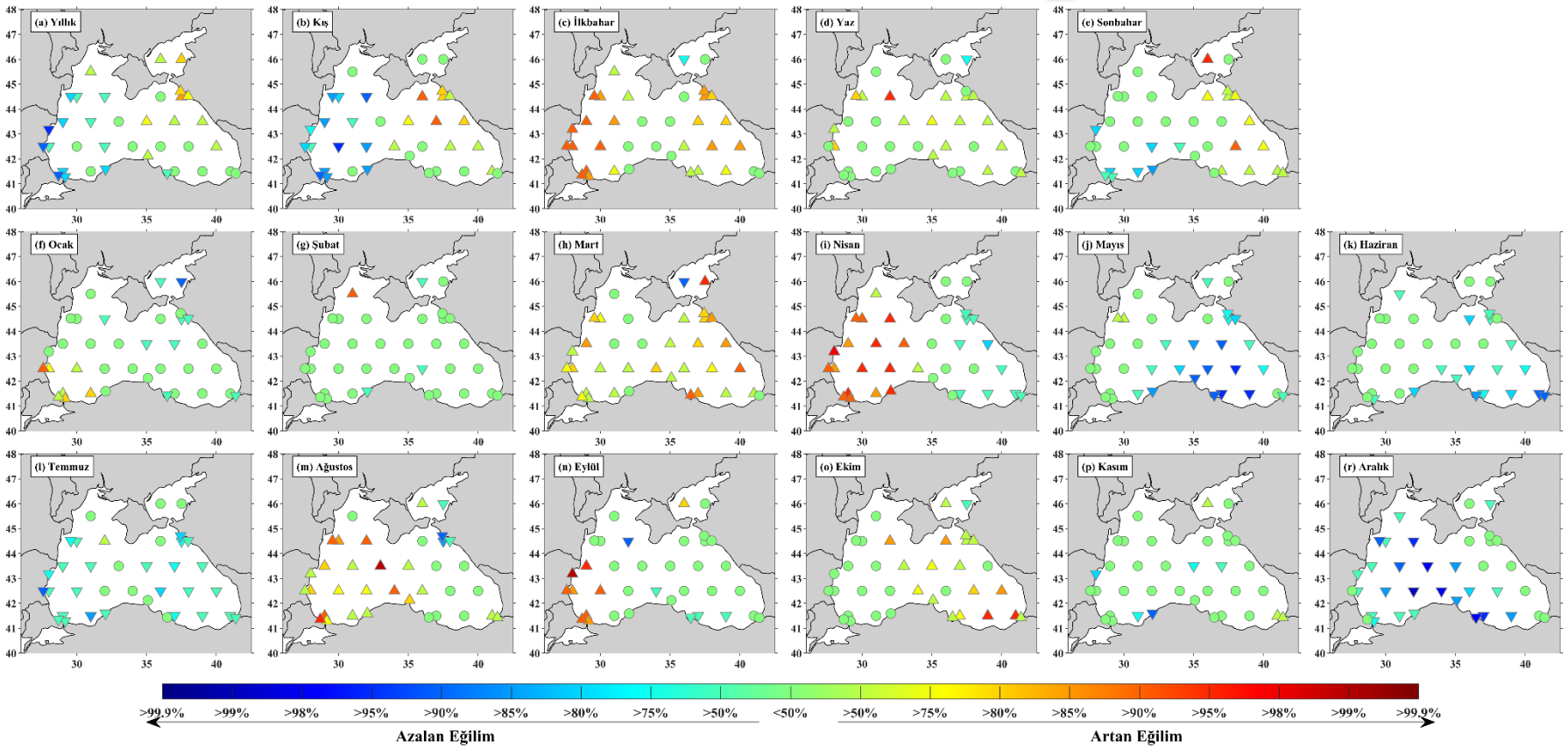
Ocak ve Şubat aylarında Karadeniz'in neredeyse tamamında ortalama pik enerjilerin belirgin bir eğilim göstermediği görülmektedir (Şekil 4.5f ve 4.5g). Ancak, Ocak ayında Bulgaristan ile Türkiye-İstanbul kıyılarında %50-80 güven aralığında bir artan eğilim, ayrıca Azak Denizi'nde %75 üzerindeki bir güven düzeyinde azalan eğilim tespit edilmiştir. Şubat ayında ise Türkiye-İstanbul ile Rusya-Anapa bölgesinde düşük güven seviyelerinde sırasıyla azalan ve artan eğilim vardır. Mart ve Nisan ayında %90-95 güven seviyesine kadar çıkan artan eğilimler dikkat çekmektedir (Şekil 4.5h ve 4.5i). Mart ayında yalnızca Doğu Karadeniz'de bu eğilim deseni görülürken, Nisan ayında Rusya-Gürcistan kıyı hattı ve Kuzeybatı Karadeniz dışında artan eğilim vardır. Mayıs ayında genel olarak azalan eğilim türünün baskın olduğu görülmektedir. Neredeyse Karadeniz'in tamamında görülen bu azalan eğilim için güven seviyesi %85'den daha fazla değildir (Şekil 4.5j). Ortalama pik enerjiler Haziran ayında genel olarak belirgin bir eğilim göstermemiştir. Ancak, Rusya-Gürcistan kıyı hattı ile Karadeniz'in kuzeybatısında azalmaya, güneybatı kıyılarında ise artmaya eğilimlidir (Şekil 4.5k). Temmuz ayında azalan eğilim Doğu Karadeniz'de (<%85 güven seviyesi) tespit edilmiştir (Şekil 4.5l). Ağustos ve Eylül aylarında oldukça yüksek bir güven seviyesine (%99,9) kadar ulaşan artan yönde eğilimler söz konusudur (Şekil 4.5m ve 4.5n). Her iki ay içinde Batı Karadeniz bölgesinde görülen bu eğilim özellikle Bulgaristan ile Türkiye-İstanbul arasındaki kıyı hattında yoğunlaşmaktadır. Doğu Karadeniz'de Eylül ayında belirgin bir eğilim görülmezken, Ağustos ayında bu durum Doğu Karadeniz'in kıyı hattında

geçerlidir. Ekim de çalışma alanında belirgin bir eğilim gözlemlenmemesine rağmen Karadeniz'in güneybatısında ve kuzeyinde %50-75 güven düzeyinde sırasıyla azalan ve artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.5o). Kasım ayında Batı Karadeniz'de ve Aralık ayında özellikle Orta Karadeniz'de %95 güven seviyesinde ortalama pik enerjinin azalan eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 4.5p ve 4.5r).

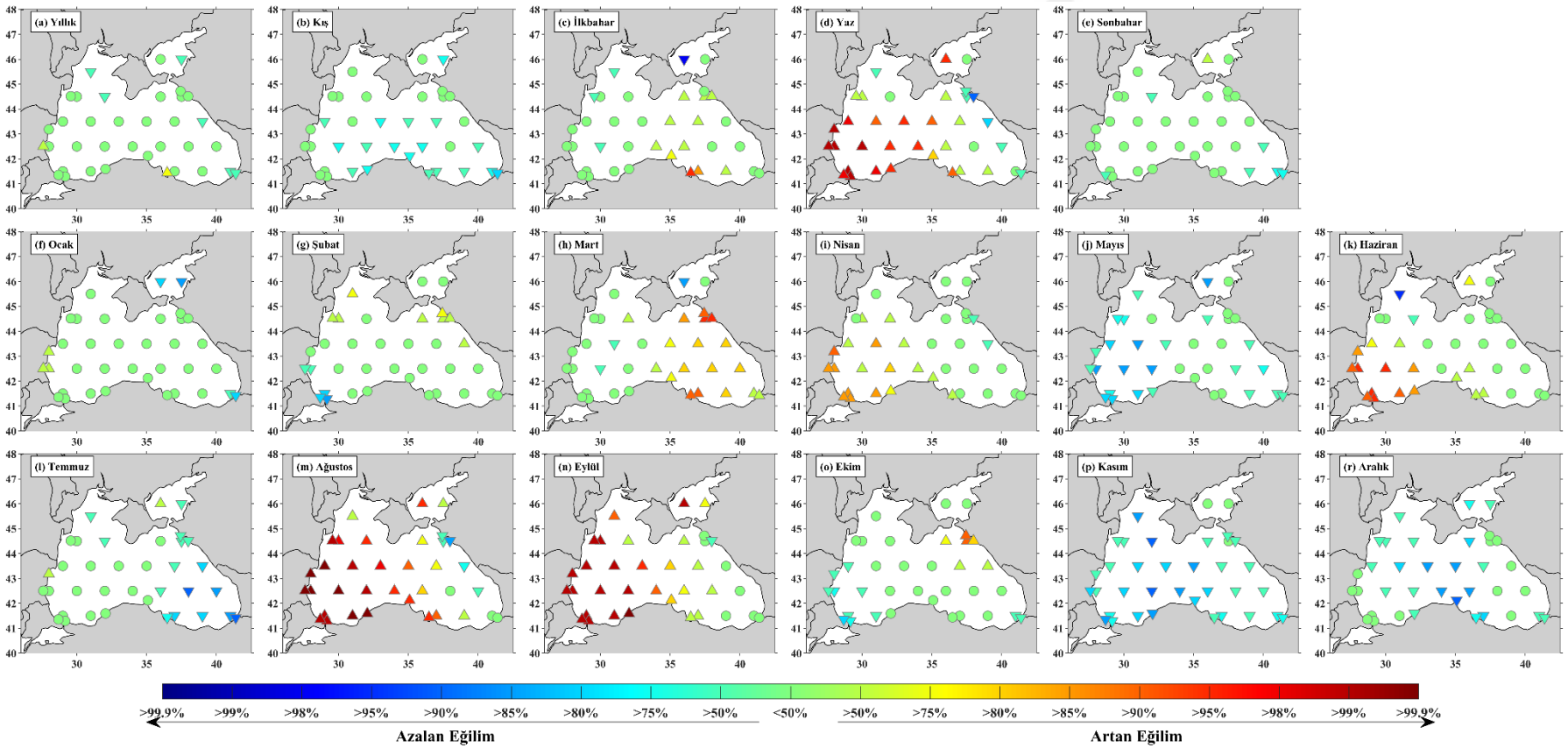
4.2.2. SWAN modeli spektral pik periyotları için Mann-Kendall sonuçları

SWAN çıktıları ile elde edilen pik periyot için MK testi analizi sonuçları sırasıyla maksimum ve ortalama değerlerine göre Şekil 4.6 ve 4.7'de sunulmuştur. Yıllık ölçekte maksimum pik periyotlarında Batı Karadeniz kıyılarında %80-90 güven seviyelerinde azalan, Doğu Karadeniz'de ise düşük güven seviyelerinde artan eğilimler görülmüştür (Şekil 4.6a). Kış mevsiminde Batı Karadeniz'de %90-95 güven seviyelerinde görülen azalan eğilimin yanında özellikle Rusya açıklarında %80-90 güven seviyesinde artan eğilim vardır (Şekil 4.6b). İlkbaharda Karadeniz'in orta kesimi haricinde %90 güven seviyesinde artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.6c). Yaz mevsiminde genelde eğilim bulunamamış yalnızca Doğu Karadeniz'de çok düşük güven seviyesinde (%50) artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.6d). Sonbaharda ise Bulgaristan ile Türkiye'nin batı kıyılarında azalan, Rusya, Gürcistan ve Türkiye'nin doğu kıyılarında ise artan eğilime rastlanmıştır (Şekil 4.6e). Ocak, Şubat ve Kasım ayında neredeyse tüm istasyonlarda belirgin bir eğilim ortaya çıkmamıştır (Şekil 4.6f, 4.6g ve 4.6p). Mart ayında Karadeniz üzerinde %90 güven seviyesini aşmayan artan eğilimler hakim olurken Nisan ayında Batı Karadeniz'de %90-95 güven seviyelerinde aynı yönde eğilimler dikkat çekmektedir (Şekil 4.6h ve 4.6i).

Mayıs ayında Doğu Karadeniz'de genelde %90-95 (Şekil 4.6j), Haziran da Güneydoğu Karadeniz'de %80 (Şekil 4.6k), Temmuz ayında genel olarak %75 güven seviyesini aşmayan (Şekil 4.6l) ve Aralık ayında Rusya-Gürcistan kıyıları haricinde %99 güven seviyesine ulaşan azalan eğilimlerden bahsedilebilir (Şekil 4.6r). Ağustos ayında Karadeniz'in batısında (Şekil 4.6m), Eylül ayında Karadeniz'in güneybatısında, Ekim ayında ise Karadeniz'in doğusunda bulunan bölgelerde artan yönde eğilimler görülmektedir (Şekil 4.6n ve 4.6o).



Şekil 4. 6. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyodun Mann-Kendall sonuçları



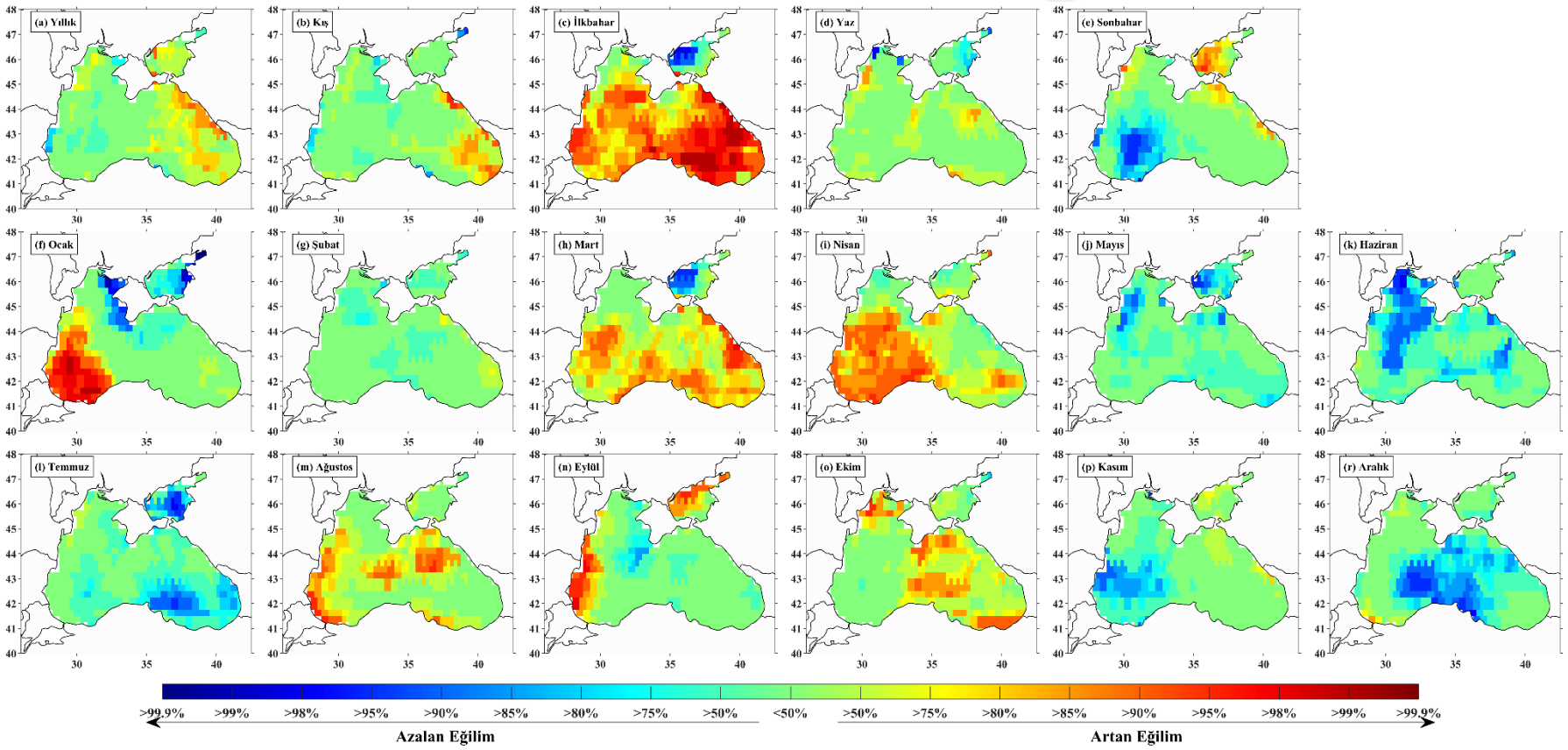
Şekil 4. 7. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyodun Mann-Kendall sonuçları

Ortalama pik periyotlar için yıllık ölçekte neredeyse tüm Karadeniz'de belirgin bir eğilim görülmemiştir (Şekil 4.7a). Benzer şekilde sonbahar mevsimi ile Ocak ve Şubat aylarında da Karadeniz genelinde belirgin bir eğilim olmadığı görülmektedir (Şekil 4.7e, 4.7f ve 4.7g). Kışın, Karadeniz'in orta ve güney kesiminde %75 güven seviyesinde azalan eğilim vardır (Şekil 4.7b). İlkbaharda genel olarak çok düşük güven seviyelerinde artan eğilim görülmüştür ancak yaz mevsiminde Orta ve Güneybatı Karadeniz'de %99 güven seviyesine kadar artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.7c ve 4.7d). Aylık bazda artan eğilimler Mart ayında Karadeniz'in doğusunda %80-85 güven seviyesinde (Şekil 4.7h), Nisan ve Haziran aylarında Karadeniz'in güneybatısında %80-90 güven seviyelerinde (Şekil 4.7i ve 4.7k), Ağustos ve Eylül aylarında ise Karadeniz'in batısında %99,9 güven seviyesine kadar görülmektedir (Şekil 4.7m ve 4.7n). Azalan eğilimler ise Mayıs ayında Karadeniz'in batısında %80-85 güven seviyesinde (Şekil 4.7j), Temmuz da Karadeniz'in güneydoğusunda %80-85 güven seviyesinde (Şekil 4.7l), Kasım ayında Karadeniz'in neredeyse tamamında %80-85 güven seviyesinde ve Aralık ayında Karadeniz'in orta kesiminde %85 güven seviyesinde ortaya çıkmıştır (Şekil 4.7p ve 4.7r).

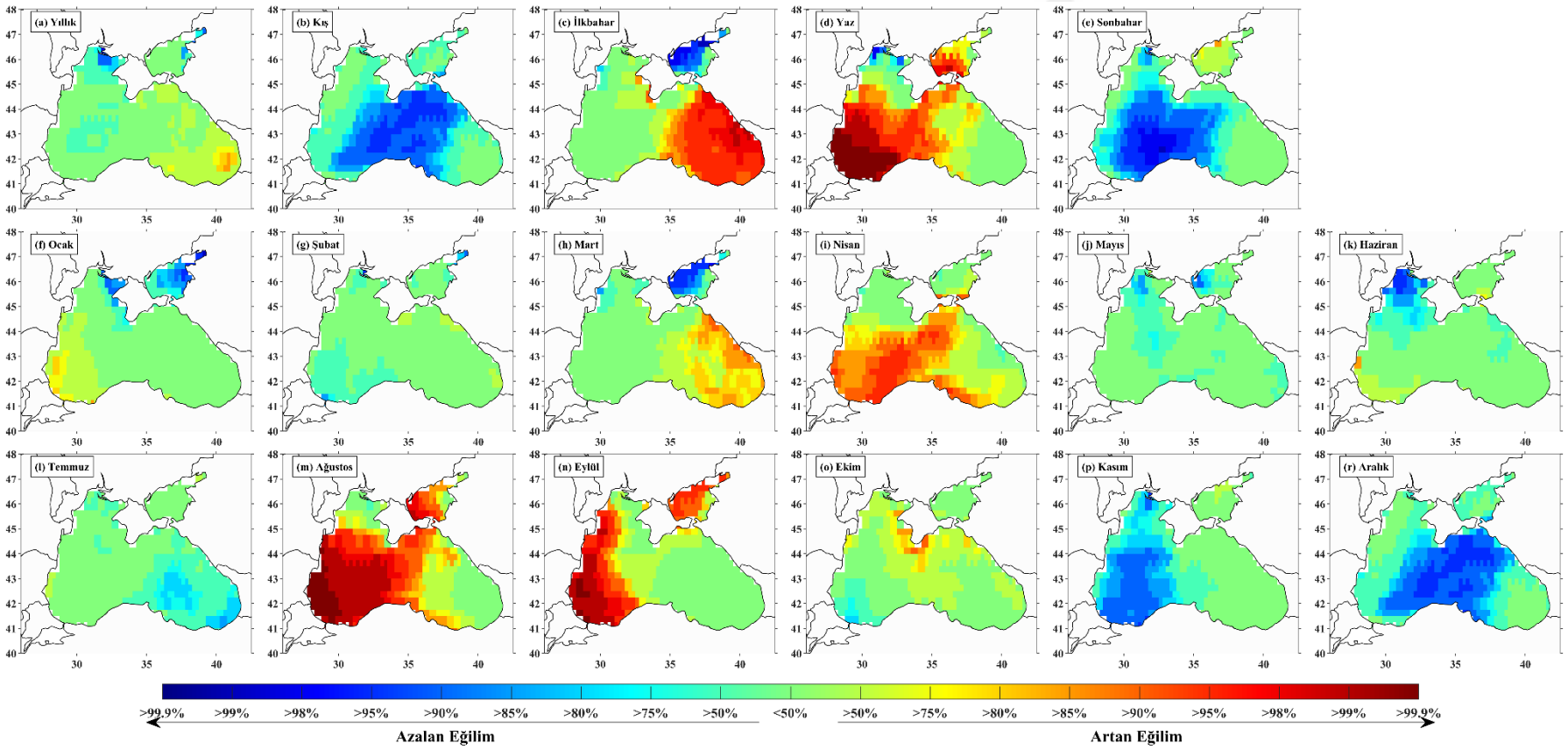
4.2.3. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjileri için Mann-Kendall sonuçları

ERA5 yeniden analizinin Dalga Spektrumu veri setinden alınan maksimum ve ortalama spektral pik enerjiye yıllık, mevsimlik ve aylık olarak MK testi uygulanmıştır. Maksimum ve ortalama değerler %50 ile %99,9 arasında değişen güven seviyeleri için incelenmiştir. MK test sonuçları maksimum ve ortalama spektral pik enerji değerleri için sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

Buna göre, yıllık maksimum pik enerjiler (Şekil 4.8a) Karadeniz üzerinde genellikle belirgin bir eğilim göstermemektedir. Ancak Rusya ve Gürcistan kıyılarında %85 güven düzeyinin üzerinde bir artış eğilimi görülürken, Bulgaristan kıyılarında %80 güven düzeyinde bir azalma eğilimi vardır. Ayrıca Doğu Karadeniz'de %80 güven düzeyinde bir artış eğilimi hakim olurken, Orta ve Batı Karadeniz'de belirgin bir eğilim gözlenmemiştir. Yıllık ortalama pik enerjiler (Şekil 4.9a) için Gürcistan kıyılarında %80-85 güven aralığında bir artış eğilimi tespit edilmiştir. Ek olarak Batı Karadeniz'de (%50 güven seviyelerinde), Ukrayna kıyılarında ve Azak Denizi'nin Rusya kıyılarında %75-90 güven seviyelerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 8. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları



Şekil 4. 9. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları

Mevsimsel maksimum pik enerjilerin analiz sonuçlarına göre, kış ve sonbaharda çoğunlukla belirgin bir eğilim yoktur (Şekil 4.8b ve 4.8e), ancak Karadeniz'in büyük bir bölümünde ilkbahar mevsiminde artan yönde belirgin bir eğilim göze çarpmaktadır (Şekil 4.8c). Kış mevsiminde Güneydoğu Karadeniz ve Rusya kıyılarında Anapa ile Tuapse arasındaki bölgede %85 güven seviyesinin üzerinde artan eğilim görülürken sonbaharda Türkiye'nin batı kıyılarında (41°-43°enlemleri ile 29°-33° boylamları arası) %85 güven seviyesinin üzerinde azalan eğilim vardır. İlkbaharda %80'in üzerinde, özellikle çalışma bölgesinin doğusunda %95'in üzerinde bir artış eğilimi görülürken, Azak Denizi'nin Ukrayna kıyılarında azalan eğilim söz konusudur. Yaz mevsiminde genel olarak belirgin bir eğilim olmamasına karşın bazı bölgelerde %75 güven seviyesinde artış yönünde eğilimler görülebilmektedir (Şekil 4.8d). Ortalama pik enerjilerin tüm mevsimler için daha geniş ve bölgesel bir eğilim göstermiştir. Orta Karadeniz bölgesi kış ve sonbahar mevsimlerinde %85 güven seviyesinin üzerinde bir azalma eğilimi söz konusudur (Şekil 4.9b ve 4.9e). İlkbaharda Karadeniz'in doğu kesiminde ve yaz mevsiminde orta ve batı kesiminde %90'ın üzerinde bir güven düzeyinde artan yönde eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.9c ve 4.9d). Ayrıca Türkiye'nin batı kıyılarının (İstanbul ve Trakya) yaz mevsiminde %99,9'luk güven seviyesinin üzerinde bir artış eğilimi göstermesi dikkat çekmektedir. Ek olarak Azak Denizi'nde yaz (ilkbahar) mevsiminde artan (azalan) eğilimler görülmektedir.

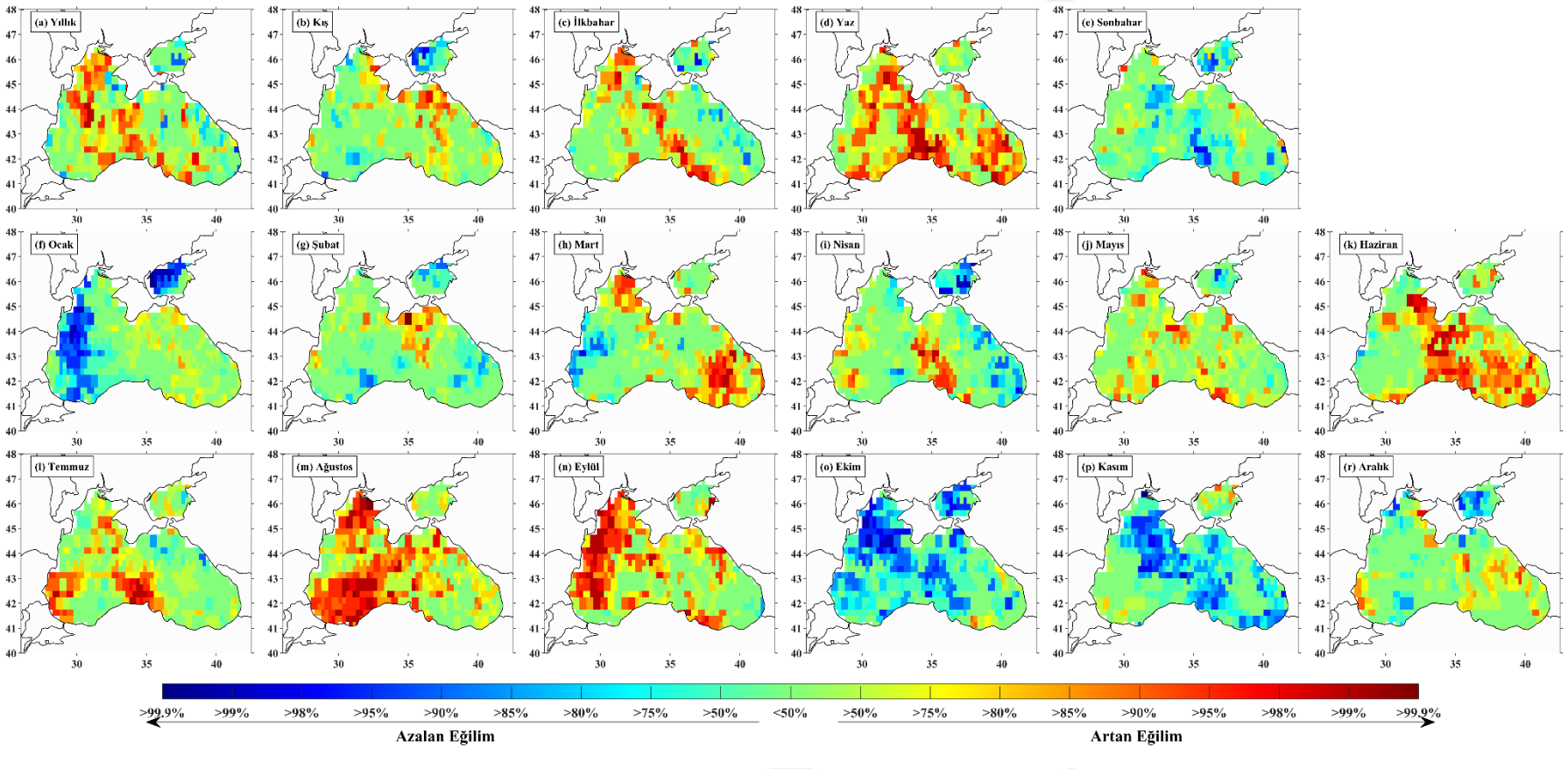
Aylık maksimum ve ortalama pik enerjiler MK test sonuçlarında genel olarak belirgin bir eğilim olmamakla birlikte bölgesel eğilimler gözlemlenebilmektedir. Ocak ayındaki maksimum pik enerjiler, %90-95 güven seviyelerinde Güneybatı Karadeniz'de artan bir eğilime, Kırım Yarımadası'nın batı kıyılarında ve Azak Denizi'nin doğu kıyılarında azalan bir eğilime sahipken (Şekil 4.8f), ortalama spektral pik enerjilerde bu durum etkisini azaltarak %75 güven seviyelerinde olacak şekilde görülmüştür (Şekil 4.9f). Şubat ayında maksimum ve ortalama pik enerjiler için belirgin bir eğilim görülmemekle birlikte çok düşük güven seviyesinde (%50) eğilim gösteren bölgeler bulunmaktadır (Şekil 4.8g ve 4.9g). Mart ayında maksimum pik enerjiler için (Şekil 4.8h) Karadeniz'in daha çok güneyinde özellikle Bulgaristan, Türkiye (batı kıyısı hariç), Gürcistan ve Rusya kıyılarının açıklarında %90-95, ortalama pik enerjiler için ise (Şekil 4.9h) Karadeniz'in doğusunda %80-85 güven seviyesinin üzerinde bir artış eğilimi vardır. Ayrıca Azak Denizi'nde %98 güven düzeyinde azalan bir eğilim gözlenmektedir. Aynı şekilde Nisan

ayı için de maksimum ve ortalama pik enerjiler (Şekil 4.8i ve 4.9i), çok benzer bir eğilim deseni göstermesi ile Karadeniz'in daha çok güneybatı ve orta bölgesinde bütünsel bir artış eğilimine sahip olması dikkat çekmektedir.

Mayıs ayında maksimum ve ortalama pik enerjiler genel olarak belirgin bir eğilim göstermemekle birlikte Karadeniz'in kuzeyinde %75-95 güven düzeyinde azalan eğilim tespit edilen bölgeler bulunmaktadır (Şekil 4.8j ve 4,9j). Haziran ayında (Şekil 4.8k), Batı Karadeniz'de maksimum pik enerjilerde %85-90 güven seviyesinin üzerinde bir azalan eğilimi vardır. Ortalama pik enerjiler, daha çok Ukrayna kıyılarında azalma eğilimindedir ve etkilenen alan maksimum pik enerjilere kıyasla daha dardır (Şekil 4.9k). Temmuz ayında da Karadeniz genelinde belirgin bir eğilim olmamasına rağmen Güneydoğu Karadeniz'de maksimum pik enerjiler için %85-90 (Şekil 4.8l), ortalama pik enerjiler için %75-80 güven düzeylerinde azalan eğilim hakimiyetinin olduğu görülmektedir (Şekil 4.9l). Maksimum spektral pik enerjiler Ağustos'ta Karadeniz'in batı ve güney kıyıları ile orta bölgesinde (Şekil 4.8m) %85-95 güven seviyelerinde, ortalama spektral pik enerjiler ise Orta ve Batı Karadeniz'in büyük bir bölümünde %95-99,9 güven seviyesinin üzerinde artan bir eğilime sahiptirler (Şekil 4.9m). Eylül ayı içinde maksimum pik enerjiler Karadeniz'in batı kıyılarında (Şekil 4.8n), ortalama pik enerjiler ise Batı Karadeniz bölgesinde artmaya eğilimlidir (Şekil 4.9n). Ekim ayında maksimum pik enerjiler Karadeniz'in daha çok doğusunda (Şekil 4.8o), ortalama pik enerjiler ise Kırım Yarımadası'nın kıyılarında artma eğilimindedir (Şekil 4.9o). Karadeniz'in batı kesiminde Kasım ayında ve orta kesiminde Aralık ayında maksimum (Şekil 4.8p ve 4.8r) ve ortalama (Şekil 4.9p ve 4.9r) pik enerjiler için %90-95 güven seviyelerinde azalma eğilimi gözlenmektedir. Ancak ortalama pik enerjilerin daha geniş bir alanda eğilim gösterdiği görülmüştür.

4.2.4. ERA5 yeniden analizi spektral pik periyotları için Mann-Kendall sonuçları

ERA5 yeniden analiz verilerinden elde edilen pik periyot için yıllık, mevsimlik ve aylık bazda uygulanan MK testi sonuçları sırasıyla maksimum ve ortalama değerlerine göre Şekil 4.10 ve 4.11'de sunulmuştur.

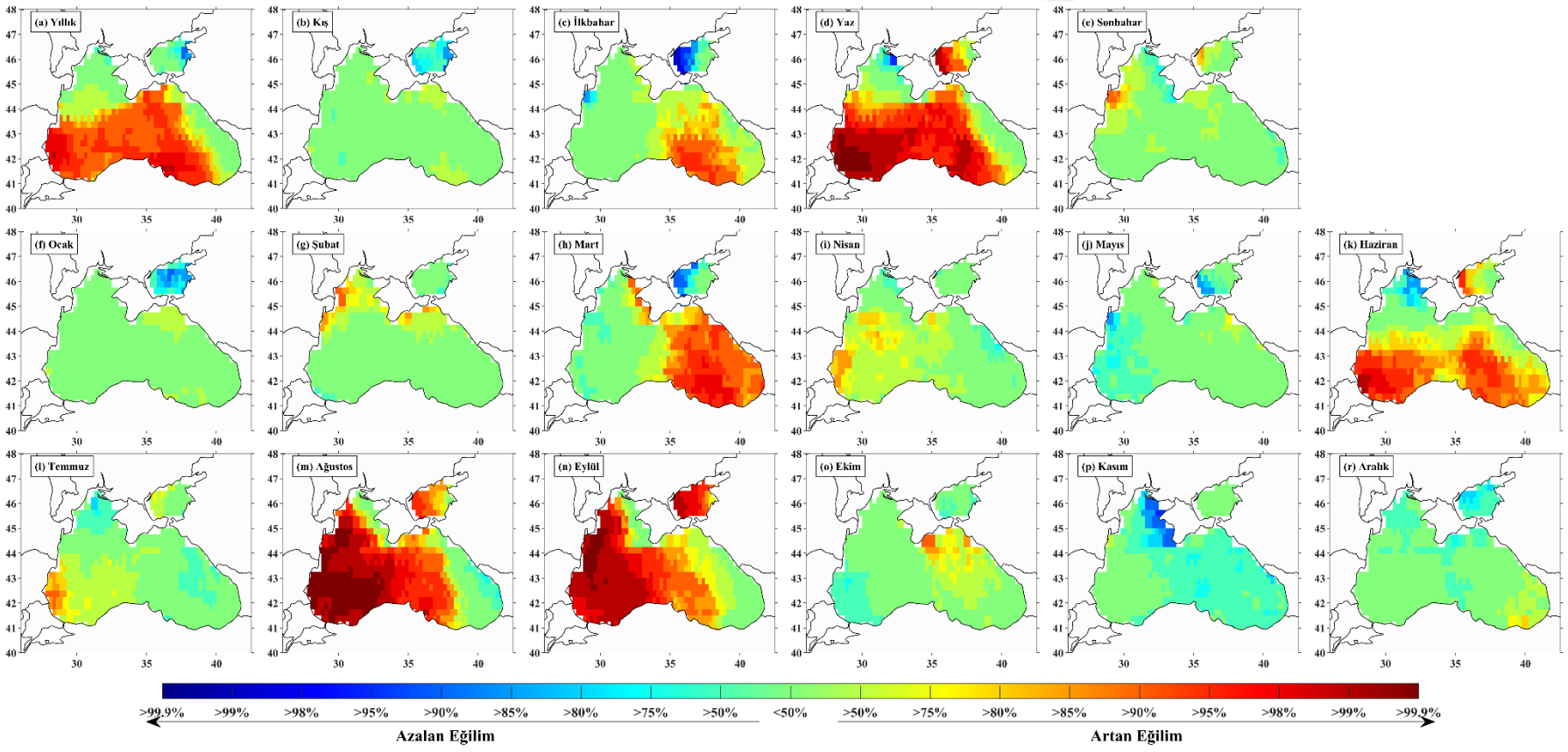


Şekil 4. 10. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyotların Mann-Kendall sonuçları

Yıllık maksimum pik periyot değerlerinin özellikle Kuzeybatı Karadeniz ile Türkiye'nin Trabzon'a kadar olan doğu kıyılarında %90-95 güven düzeyinin üzerinde bir artma eğiliminde olduğu görülmüştür (Şekil 4.10a). Kışın Karadeniz'in kuzey ve doğu kesiminde artan, Karadeniz'in batısı ile Azak Denizi'nde azalan bir eğilim söz konusudur (Şekil 4.10b). İlkbaharda Kuzeybatı ve Orta Karadeniz'de %85-95 güven düzeyinde artan, Rusya ve Gürcistan kıyıları yakınında ise %75-80 güven düzeyinde azalan bir eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.10c). Yaz mevsiminde neredeyse tüm Karadeniz'de %95 güven düzeyinin üstünde artan eğilim vardır (Şekil 4.10d). Sonbaharda ise daha çok Orta Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde %75 güven düzeyinde azalan eğilim görülmüştür (Şekil 4.10e). Mevsimsel ve yıllık maksimum pik periyotların Karadeniz'in genelinde değişim göstermediği açıktır.

Maksimum pik periyotlar Ocak ayında Azak Denizi'nde ve özellikle batı Karadeniz'in kıyı kesiminde yoğunlaşan şekilde %85-95 güven düzeyinde azalan eğilim göstermektedir (Şekil 4.10f). Şubat ayında ise Karadeniz'in kuzeydoğusunda artma, Türkiye'nin batı kıyıları ile Gürcistan açıklarında azalma eğilimi vardır (Şekil 4.10g). Mart ayında Kuzeybatı ve Güneydoğu Karadeniz'de artan, Bulgaristan-Romanya kıyılarında ise azalan eğilim dikkat çekmektedir (Şekil 4.10h). Nisan ayında Azak Denizi ile Doğu Karadeniz kıyılarında azalan, Bulgaristan ve Romanya kıyılarında ve Orta Karadeniz'de artan eğilim gözlemlenmiştir (Şekil 4.10i). Mayıs–Eylül periyodunda genel olarak artan (Şekil 4.10j ve 4.10n), Ekim ve Kasım aylarında ise azalan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.10o ve 4.10p). Aralık ayında Azak Denizi ile Ukrayna ve İstanbul kıyılarında azalan, Doğu Karadeniz'de artan eğilim vardır (Şekil 4.10r).

Ortalama pik periyotlar için yıllık ölçekte Kuzeybatı Karadeniz ve Rusya-Gürcistan kıyıları haricinde çalışma bölgesinin tümünde %90 güven düzeyinin üzerinde artan yönde eğilim gözlemlenmiştir (Şekil 4.11a). Kış ve sonbahar mevsimlerinde neredeyse Karadeniz'in tamamında belirgin bir eğilim ortaya çıkmamıştır (Şekil 4.11b ve 4.11e). İlkbahar da Doğu Karadeniz'de artan, Azak Denizi'nde ise azalan eğilim dikkat çekmektedir (Şekil 4.11c). Yaz mevsiminde ortalama pik periyotların yıllık bazdaki eğilim desenine benzer şekilde %95 güven düzeyinin üstünde hatta Karadeniz'in güneybatısında %99,9 güven düzeyinde artan eğilime sahip oldukları olduğu görülmüştür (Şekil 4.11d).



Şekil 4. 11. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyotların Mann-Kendall sonuçları

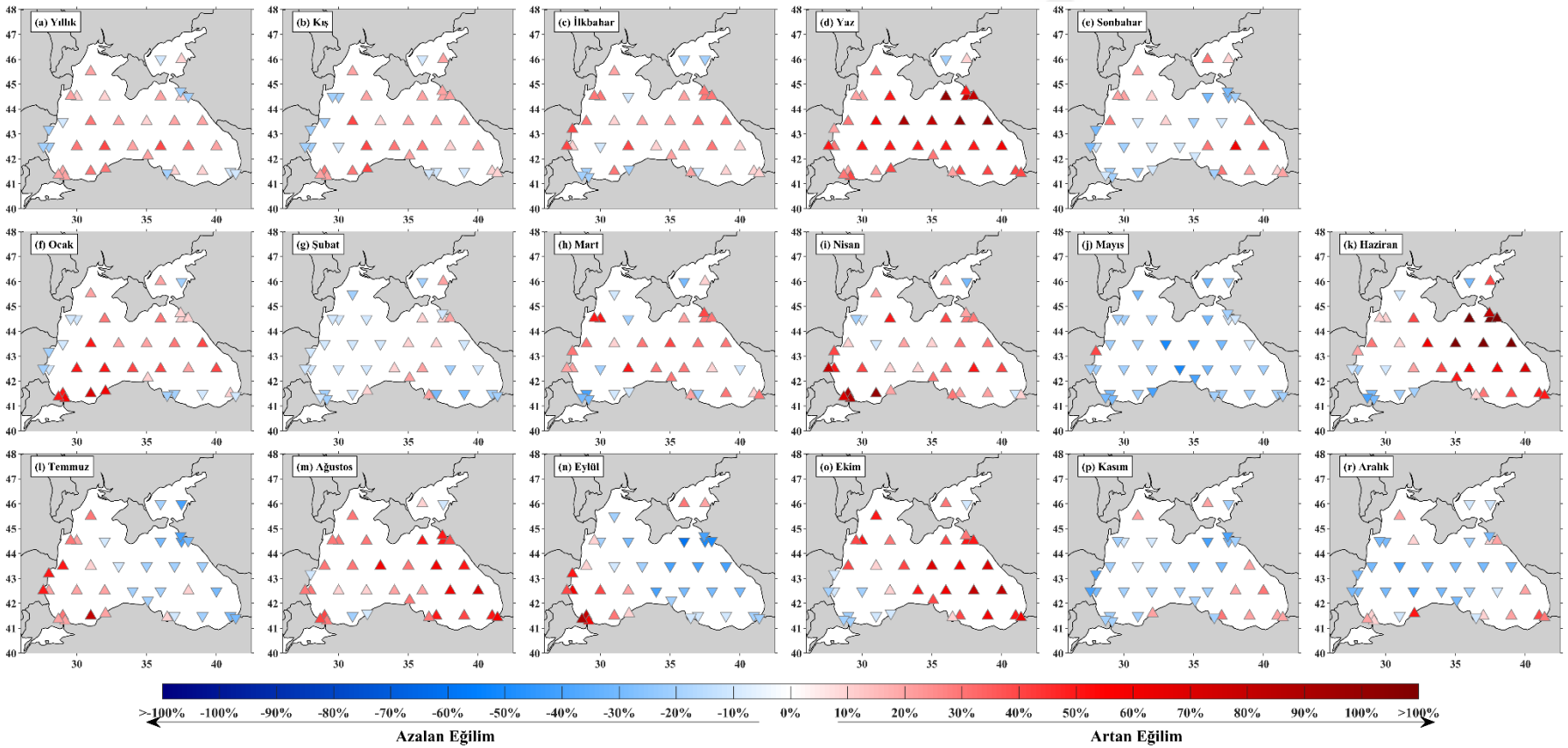
Ortalama pik periyotların Mart ayında Doğu Karadeniz'de %90-95 (Şekil 4.11h), Haziran'da Karadeniz'in güney kesiminde %90-95 (Şekil 4.11k), Ağustos ve Eylül aylarında (Şekil 4.11m ve 4.11n) Orta ve Batı Karadeniz'de %95-99,9 güven düzeyinde arttığı görülmektedir. Diğer aylarda Karadeniz genelinde yüksek güven düzeyine sahip bir eğilim görülmemesine rağmen, Ocak ayında Azak Denizi'nde ve Kasım ayında Kırım yarımadası ile Ukrayna kıyılarında %90 güven seviyesinde azalan eğilim (Şekil 4.11f ve 4.11p), Şubat ayında Karadeniz'in kuzey kıyılarında, Nisan ve Temmuz aylarında Karadeniz'in batısında, Ekim ayında ise Karadeniz'in doğusunda artan eğilimlere rastlanmıştır (Şekil 4.11g, 4.11i, 4.11l ve 4.11o).

4.3. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizinin Sonuçları

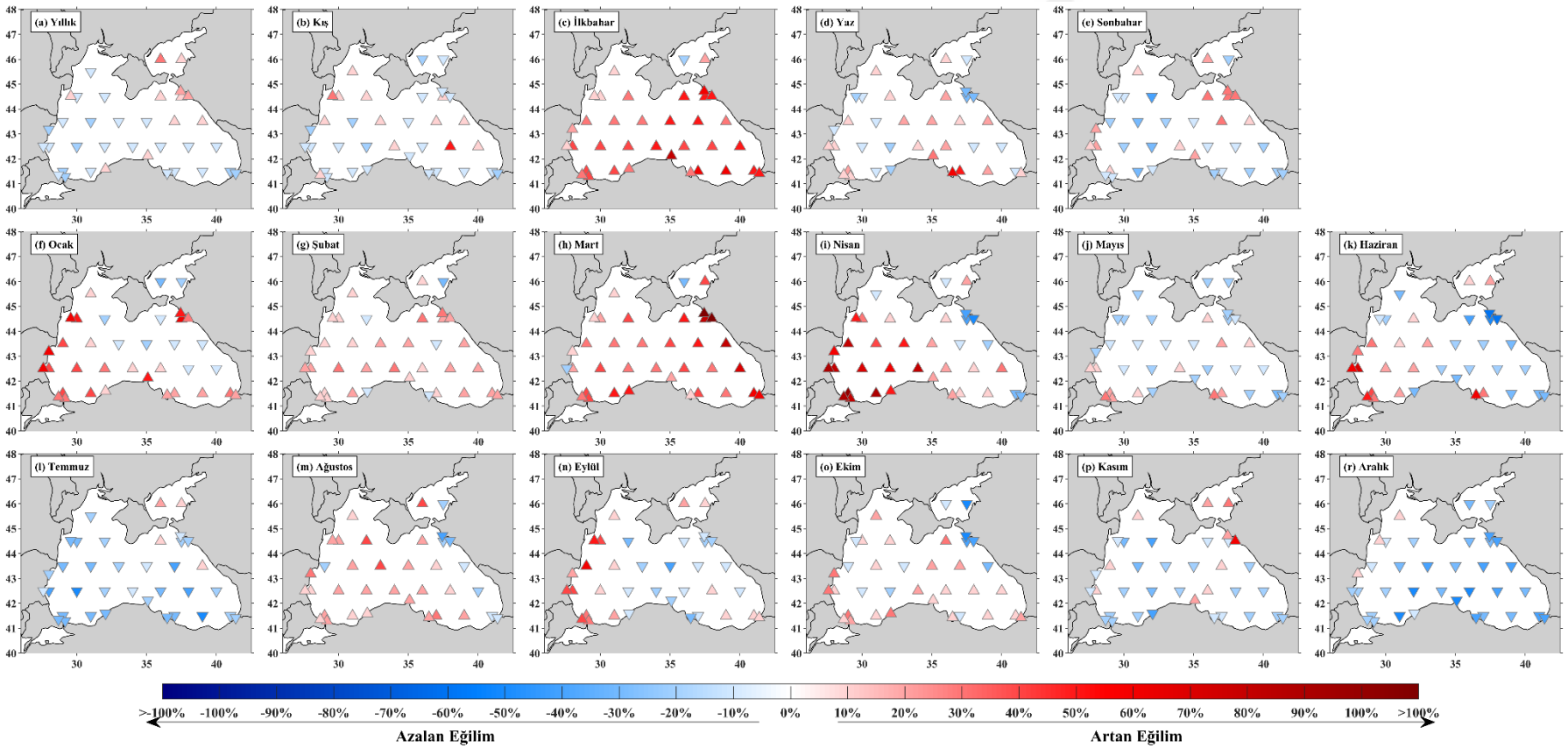
4.3.1. SWAN modeli spektral pik enerjileri için GG-YEA sonuçları

Yıllık, mevsimlik ve aylık zaman aralıklarında olmak üzere SWAN modelinden elde edilen maksimum ve ortalama pik enerjilerin GG-YEA yaklaşımına göre elde edilen sonuçları Şekil 4.12 ile Şekil 4.15 arasında verilmiştir. Maksimum pik enerjilerin "Yüksek" ve "Düşük" kategori değerleri sırasıyla Şekil 4.12 ve 4.13, ortalama pik enerjilerin "Yüksek" ve "Düşük" kategori değerleri ise sırasıyla Şekil 4.14 ve 4.15'te sunulmuştur.

Yıllık bazda yüksek değer kategorisindeki maksimum pik enerjiler Bulgaristan, Rusya-Anapa ve Türkiye'nin Samsun ve Trabzon kıyıları haricinde Karadeniz'in neredeyse tamamında artan eğilimde olduğu görülmektedir. Artan ve azalan eğilimlerin değişim oranı %20'yi aşmamıştır (Şekil 4.12a). Yıllık maksimum pik enerjilerin düşük kategorideki değişimleri yüksek kategorinin tersine azalmaya eğilimlidir (Şekil 4.13a). Sadece Rusya kıyıları ve Azak Denizi'nde ise artan eğilime rastlanmıştır. Düşük değer kategorisi için eğilimin değişim oranı Karadeniz'de %30'u geçmemektedir. Ancak, Azak Denizi'ndeki A1 istasyonunda bu değer %30-40 aralığında gerçekleşmiştir.



Şekil 4. 12. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 13. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

Yüksek kategori maksimum pik enerjiler için kış mevsiminde Karadeniz genelinde artan bir eğilim hakimdir (Şekil 4.12b). Bunun yanında Bulgaristan-Romanya kıyı şeridi boyunca ve Samsun-Trabzon kıyı hattında %20'yi aşmayan değişim oranına sahip azalan yönde eğilimler görülmüştür. Düşük kategori için ise Şekil 4.13b'de görüldüğü gibi genel olarak %10 değişim oranına sahip azalan eğilim söz konusu iken Rusya-Gürcistan açıkları ve Kuzeybatı Karadeniz'de artan eğilim ortaya çıkmıştır. Yüksek kategori maksimum pik enerji ilkbahar mevsiminde neredeyse tüm Karadeniz artan yönde eğilime sahiptir. Bu eğilimin değişim oranı genelde %10-%20 civarında olmakla birlikte %50 değişim oranına kadar çıkmaktadır (Şekil 4.12c). Bunların dışında, Güneybatı Karadeniz ile Azak Denizi'nde %20 azalan eğilim vardır. İlkbaharda düşük kategori maksimum pik enerjiler Karadeniz'in tamamında artan eğilime sahiptir (Şekil 4.13c). Değişim oranının Doğu Karadeniz'de %90'a kadar çıktığı ancak Batı Karadeniz'de biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Yaz mevsiminde yüksek kategori maksimum pik enerjiler Karadeniz'in tamamında, özellikle doğusunda %100 değişim oranının üstüne çıkan şekilde ve artan eğilimdedir (Şekil 4.12d). Düşük kategori pik enerjiler için ise eğilim türü Rusya ile Gürcistan kıyı hatlarında ve Batı Karadeniz'de genellikle azalan, Orta Karadeniz'de ise artan eğilim olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.13d). Değişim oranlarının genelde %±20 bandında kaldığı görülmektedir. Şekil 4.12e'de görüldüğü gibi yüksek kategori maksimum pik enerjiler sonbaharda Karadeniz'in güneydoğusu ve kuzeybatısında ve Azak Denizi'nde %40 değişim oranını geçmeyecek şekilde artmaya, Karadeniz'in güneybatısı ve güneydoğusunda ise azalmaya eğilimlidir. Düşük kategori maksimum pik enerjiler için sonbaharda Karadeniz'in genelinde azalan eğilim, ancak güneybatı kıyı hattında ve kuzeydoğusunda artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.13e).

Ocak ayında maksimum pik enerji için yüksek kategori değerlerin Karadeniz'in güneydoğu ve batı kıyı hattı dışında tüm Karadeniz'de artmaya eğilimli olduğu görülmektedir (Şekil 4.12f). Düşük kategori değerleri için ise Azak Denizi ve Kırım Yarımadası ile Gürcistan açıkları haricinde genelde artan eğilim hakimdir (Şekil 4.13f). Karadeniz'in batı kıyılarında %80-90 değişim oranı görülürken doğu kıyılarında bu oran %10-20 seviyelerinde kalmıştır. Şubat ayı için yüksek kategori maksimum pik enerjinin Güneydoğu ve Batı Karadeniz'de %30'u geçmeyecek şekilde azalan, Türkiye'nin orta kıyı şeridi ile Rusya kıyılarında artan eğilime sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.12g). Şekil 4.13g'den düşük kategori maksimum pik enerjilerin Karadeniz'in neredeyse

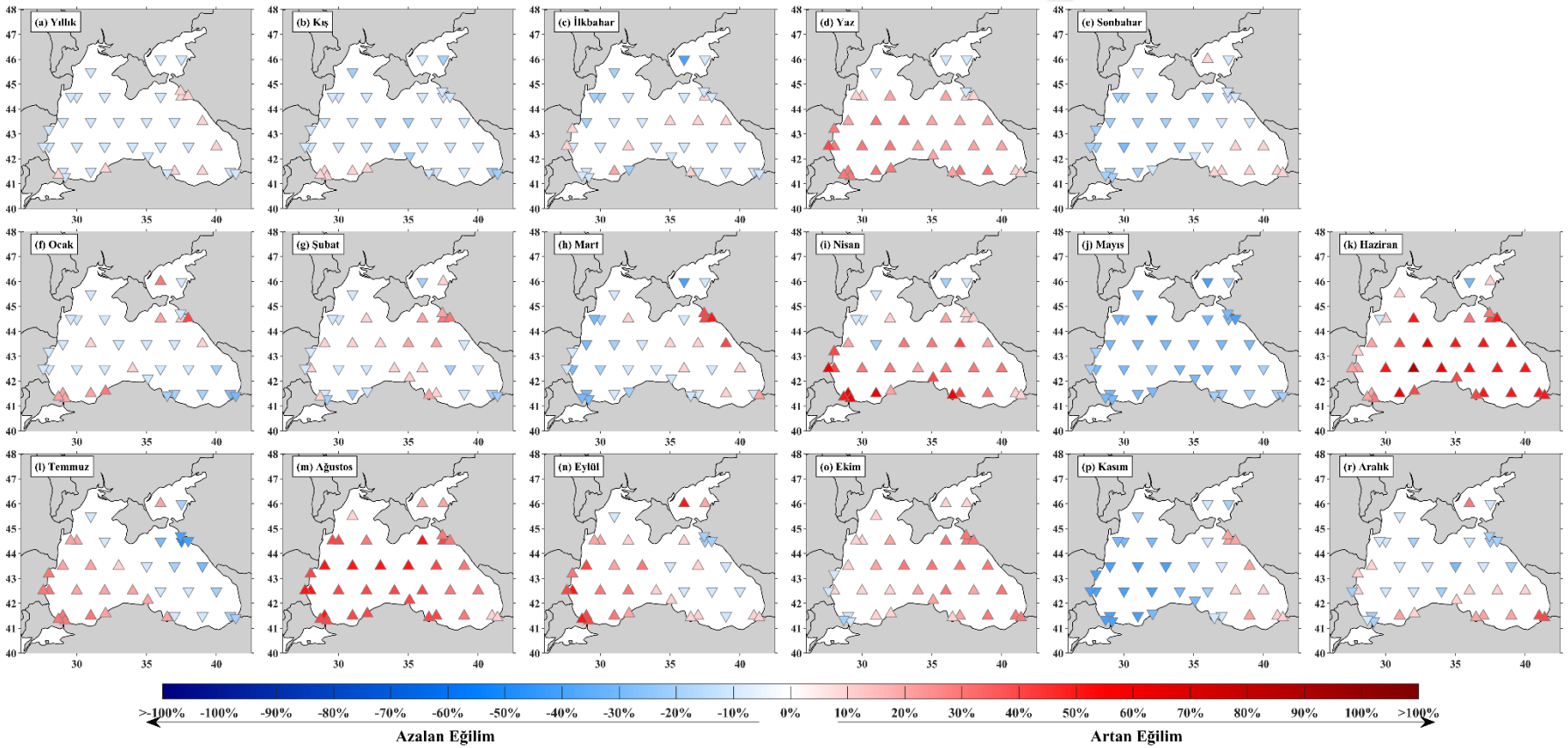
tamamında genellikle %10-20 civarında ve %40'ı geçmeyecek şekilde artmaya eğilimli olduğu görülmektedir. Mart ayında yüksek kategori maksimum pik enerjiler neredeyse tüm Karadeniz'de %40'a kadar artma eğilimindedir (Şekil 4.12h). İstanbul ile Kırım Yarımadası'nın batısını temsil eden bölgede ise azalan eğilim tespit edilmiştir. Düşük kategorileri için ise Bulgaristan-Burgas istasyonu haricinde tüm Karadeniz'de artma eğilimi vardır (Şekil 4.13h). Özellikle doğu kıyılarında %100'e kadar değişimin olduğu dikkat çekmektedir. Nisan ayında hem yüksek hem düşük kategori maksimum pik enerjilerin çalışma alanının genelinde artmaya eğilimli olduğu sırasıyla Şekil 4.12i ve Şekil 4.13i'de görülmektedir. Yüksek kategori için özellikle Karadeniz'in güneybatısında %100'e kadar bir değişime rastlanmıştır. Ayrıca düşük kategori için de Karadeniz'in batısındaki değişim oranı doğusuna göre daha yüksek çıkmıştır. Yüksek kategori maksimum pik enerjinin Mayıs ayında neredeyse tüm Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde azalmaya eğilimli olduğu görülmüştür. Bu eğilimdeki değişim oranının ise %40'ı aşmadığı görülmektedir (Şekil 4.12j). Düşük kategori için ise özellikle Azak Denizi'nde ve Karadeniz'in batısı ile güneydoğusunda azalan eğilim, güneybatı kıyısında da artan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.13j). Haziran ayında Karadeniz'in güneybatısı haricinde yüksek kategori için artan eğilim varken düşük kategori için Batı Karadeniz'de artan, Doğu Karadeniz'de azalan eğilimin hakim olduğu görülmektedir (Şekil 4.12k ve Şekil 4.13k). Bununla birlikte haziran ayında yüksek kategori maksimum pik enerjinin Kuzeydoğu Karadeniz'de %100'ün üstünde bir değişim oranına sahip olması dikkat çekmektedir. Temmuz ayı içinde yüksek kategori pik enerjiler Karadeniz'in batısında özellikle kıyı hattında %40-50'ye kadar artan, doğusunda ve Azak Denizi'nde ise %40'ı aşmayacak şekilde azalan eğilime sahiptir (Şekil 4.12l). Düşük kategori için tüm Karadeniz'de değişim oranı ise %50'yi geçmeyen azalan eğilim dikkat çekmektedir. (Şekil 4.13l). Ağustos ayında yüksek ve düşük kategorideki maksimum pik enerjiler Karadeniz genelinde artmaya eğilimlidir (Şekil 4.12m ve Şekil 4.13m). Bununla birlikte, yüksek kategori için değişim oranı özellikle Karadeniz'in doğusunda %90'a kadar çıkarken düşük kategori için genelde %10-30 civarında kalmıştır. Yüksek kategori maksimum pik enerjilerin Eylül ayında Güneybatı Karadeniz ve Azak Denizi'nde değişim oranının %50 ile %90 arasında artan eğilimde, kalan bölgelerde %50'ye kadar azalan eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 4.12n). Düşük kategori için ise Karadeniz'in doğu ve orta bölgesinde değişim oranında %10 ile %30 arasında azalan eğilim vardır

(Şekil 4.13n). Ayrıca Azak Denizi, Karadeniz'in güneydoğusunda %20'ye kadar, Bulgaristan-Romanya kıyı hattında %50-80 artan eğilim vardır. Ekim ayı içinde Karadeniz'in güneybatısı haricinde tüm Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde genel olarak %50 civarında yüksek kategori maksimum pik enerjilerde artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.12o). Düşük kategoriler için eğilim türü Şekil 4.13o'da görüldüğü üzere tekdüze değildir. Ancak Karadeniz'de genel olarak artan eğilimin hakim olduğu söylenebilir. Kasım ayında yüksek kategori maksimum pik enerjilerde Karadeniz'in güneydoğusu haricinde neredeyse tüm çalışma alanına %40'ı aşmayan değişim oranıyla azalan eğilim hakimdir (Şekil 4.12p). Düşük kategori için ise yine %40'ı aşmayan azalan eğilim neredeyse tüm Karadeniz'i etkilerken, Azak Denizi, Romanya-Ukrayna kıyı hattı ve Türkiye-Sinop ile Rusya-Anapa'yı temsil eden bölgede %10-30 civarında artan eğilim vardır (Şekil 4.13p). Aralık ayı için yüksek kategori maksimum pik enerjiler Karadeniz'in güneyinde ve kuzeybatısındaki artan eğilimler haricinde genel olarak %30 değişim oranını geçmeyecek şekilde azalmaya eğilimlidir (Şekil 4.12r). Düşük kategori için ise Bulgaristan-Ukrayna kıyı hattı dışında tüm Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde azalma eğilimi vardır. Ayrıca Şekil 4.13r'de görüldüğü üzere bölgenin doğusunda değişim oranı %50'ye kadar çıkarken batısında genelde %10 civarında kalmıştır.

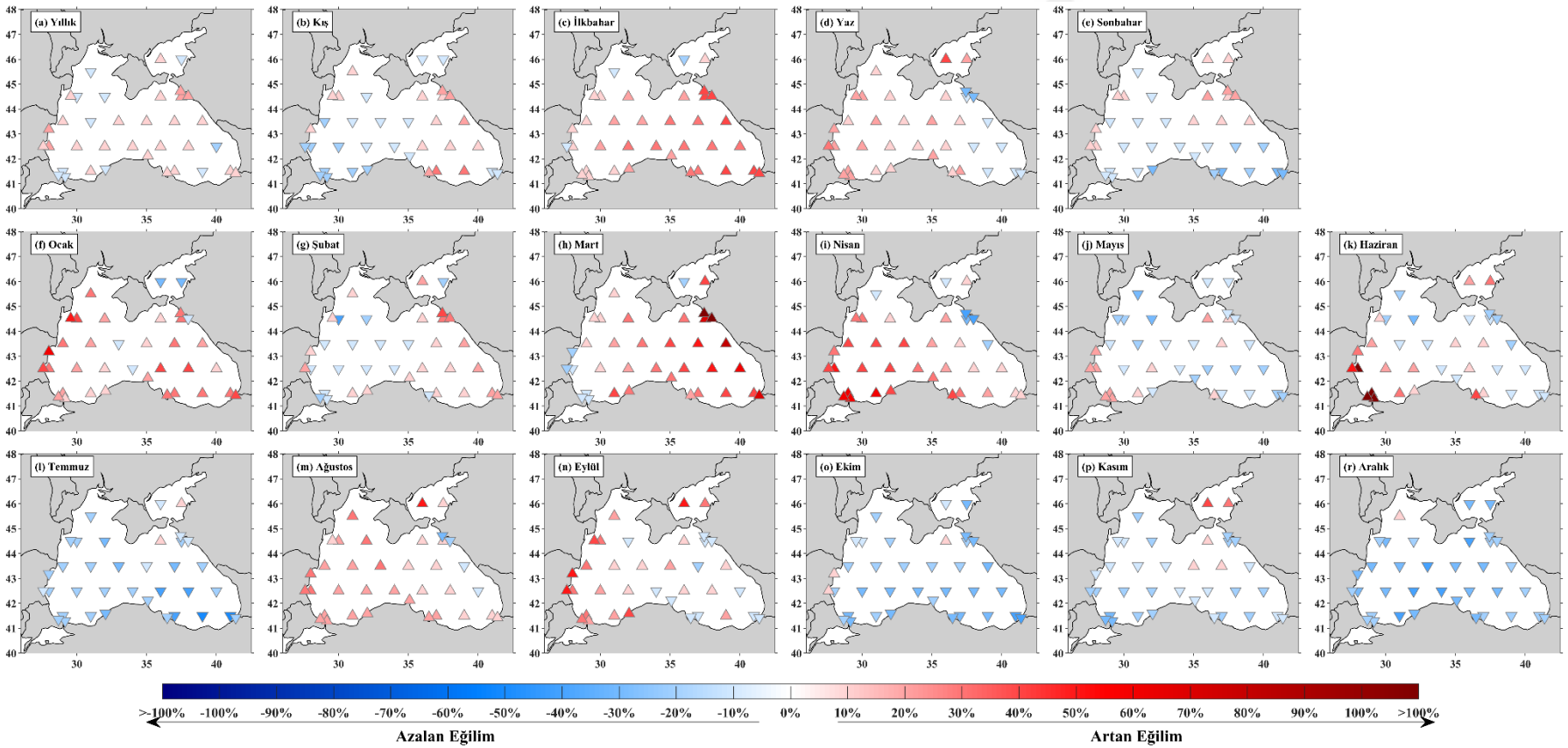
Ortalama pik enerjilerin GG-YEA yöntemine göre yüksek ve düşük kategoriler için elde edilmiş sonuçları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sunulmuştur. Yıllık bazda yüksek değerler için değişim oranının %10 oranında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.14a). Ayrıca ortalama pik enerjilerin yüksek kategori değerleri için Karadeniz'in orta ve batı bölgesinde azalan, doğu kıyılarında ise artan eğilimin hâkim olduğu ortaya çıkmıştır. Düşük kategori için ise Şekil 4.15a'dan da görüldüğü gibi orta ve Doğu Karadeniz ile Bulgaristan-Romanya kıyı hattını genellikle %10 civarında ancak %30'u aşmayacak şekilde artan eğilim görülmüştür. Yüksek kategori ortalama pik enerjinin mevsimlik analiz sonuçlarına göre bölgede kış, ilkbahar ve sonbaharda azalan, yaz mevsiminde ise artan eğilim türünün daha baskın olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.14b'de görüldüğü gibi kışın İstanbul-Filyos şamandıralarının bulunduğu istasyonlar arasında %10'u aşmayan artan eğilim, bunun dışında Azak Denizi ve Karadeniz'in tümünde %10-20 civarında azalan eğilim görülmektedir. Düşük kategori ortalama pik enerji için Doğu ve Kuzeybatı Karadeniz'de genelde %10-20 arasında bir değişim oranında artan, orta ve Güneybatı Karadeniz'de ise %20'yi geçmeyecek şekilde azalan eğilim hakimiyeti söz konusudur (Şekil 4.15b).

İlkbahar'da yüksek kategori değerler için Azak Denizi'nde ve Karadeniz'in batısı ile güneydoğusunda azalan eğilim, kuzeydoğusunda ise artan eğilim söz konusudur. Değişim oranlarının genel olarak %10 civarında olduğu Şekil 4.14c'de görülmektedir. Düşük kategori ortalama pik enerjiler yalnızca Bulgaristan ve Ukrayna kıyı hattında %10 ve Azak Denizi'nde %20 oranında azalma eğilimi gösterirken diğer bölgelerde artan eğilim göstermektedirler. Karadeniz'in doğusunda %50'ye varan artış eğilimleri batısında %10'a kadar düşmektedir (Şekil 4.15c). Yaz mevsiminde yüksek kategori ortalama pik enerjiler neredeyse tüm Karadeniz için yaklaşık %20 oranında artma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.14d). Düşük kategori için ise Karadeniz'in batı ve orta bölgesinde artan eğilim varken doğu kıyılarında azalan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.15d). Sonbahar mevsiminde Şekil 4.14e'de sunulduğu gibi yüksek kategori ortalama pik enerjiler için Karadeniz'in batı ve orta bölgesinde genelde %20 oranında azalan, güneydoğusunda ise %10 oranında artan eğilime rastlanmıştır. Düşük kategoriye göre ise Azak Denizi'nde, Karadeniz'in kuzeydoğusunda ve Bulgaristan-Romanya kıyısında artan eğilim bunun dışında tüm Karadeniz'de azalan eğilim tespit edilmekle birlikte değişim oranının %±20 bandında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.15e).

Ocak ayında ortalama pik enerjilerin yüksek kategorileri için özellikle İstanbul-Filyos kıyı hattı ile Karadeniz'in doğusunda Rusya-Anapa bölgesi haricinde %30'u aşmayan azalan eğilim, kalan bölgelerde ise artan eğilim görülmektedir (Şekil 4.14f). Düşük kategori için ise neredeyse tüm Karadeniz'de artan, Azak Denizi'nde ise azalan eğilim dikkat çekmektedir. Bulgaristan-Romanya kıyı şeridinde değişim oranının %60'a kadar çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4.15f). Şubat ayı içinde Batı ve Güneydoğu Karadeniz'de genelde %10 civarında kalan azalma eğilimi, orta ve Kuzeydoğu Karadeniz'de artma eğilimine dönüşmektedir (Şekil 4.14g). Düşük kategori için ise Karadeniz'in doğusunda ve batı kıyı hattında artan eğilimin, diğer bölgelerde ise azalan eğilimin hakim olduğu görülmektedir (Şekil 4.15g).



Şekil 4. 14. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 15. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

Yüksek kategori ortalama pik enerjiler için Mart ayında Azak Denizi ile Karadeniz'in orta ve batısında %10-30 azalan eğilim, doğusunda ise %50'ye kadar çıkan artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.14h). Düşük kategori için ise Varna ile İstanbul arasındaki kıyıda %20'yi aşmayan azalan eğilim mevcuttur. Bunun yanına neredeyse tüm Karadeniz'de artan eğilim görülmüştür. Ayrıca, batıdan doğuya doğru eğilimin şiddetinin artması dikkat çekici bir durum olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.15h). Nisan ayında ortalama pik enerjilerin yüksek ve düşük kategorileri için eğilimin değişim oranlarının alansal dağılımı birbirine benzemektedir. Her iki kategoride Karadeniz'in neredeyse tamamında artan eğilim baskın olmasına rağmen yüksek kategori için Romanya ve Ukrayna kıyısında (Şekil 4.14i), düşük kategori için ise Rusya kıyılarında azalan eğilim görülmektedir (Şekil 4.15i). Mayıs ayında Azak Denizi'nde ve tüm Karadeniz'de yüksek kategori ortalama pik enerjilerin azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.14j). Değişim oranının Karadeniz'in batısında %40'a çıktığı ancak doğusunda genelde %20 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Düşük kategori için de Karadeniz'in kuzeydoğu, güneydoğu ve güneybatı kıyı hatlarında %10 ila %30 arasındaki oranlarda artan eğilim, kalan bölgelerde ise %30'a kadar varan azalan yönde eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.15j). Haziran ayında yüksek kategori ortalama pik enerjilerin tüm Karadeniz'de artan eğilim gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.14k). Artan değişim oranı Karadeniz'in doğusunda %40, orta bölgede ise %70'e kadar çıkmaktadır, batı kıyısında ise %20'yi geçmemektedir. Düşük kategori için ise Şekil 4.15k'de görüldüğü gibi Rusya-Gürcistan kıyı hattında ve Karadeniz'in kuzeybatısında %20'ye kadar azalan, diğer bölgelerde ve özellikle Karadeniz'in güneybatı kıyısında %100'e kadar ulaşan artan eğilimlere rastlanmıştır. Ortalama pik enerjinin yüksek kategorisi için Temmuz ayında Doğu ve Batı Karadeniz'de sırasıyla azalan ve artan eğilim hakimdir. Bununla birlikte artan eğilimler genelde %30-40 değişim oranına sahiptir. Bunun yanında azalan eğilimler genelde %10 değişim oranına sahip olmakla birlikte bazı bölgelerde bu oranın %50'ye kadar çıktığı görülmektedir (Şekil 4.14l). Tüm Karadeniz'de azalan eğilim görülen düşük kategori ortalama pik enerjilerin değişim oranı güneybatıda %50'ye kadar çıkarken genel olarak %10-20 seviyelerinde kalmıştır (Şekil 4.15l). Ağustos ayında Azak Denizi'nde ve tüm Karadeniz'de ortalama pik enerjilerin her iki kategorisi için artan bir eğilim mevcuttur. Değişim oranının yüksek kategori için (Şekil 4.14m) %50-60'a kadar çıktığı ancak düşük kategori için (Şekil 4.15m) %30'u aşmadığı görülmektedir. Ayrıca düşük kategori için yalnızca Rusya

kıyılarında %10 ila %20 arasında değişen azalan eğilimlere rastlanmıştır. Eylül'de yüksek kategori ortalama pik enerjilerde Doğu Karadeniz'de genellikle azalan eğilimler bunun dışında tüm Karadeniz'de artan eğilimler görülmüştür (Şekil 4.14n). Ayrıca, Karadeniz'in batısında daha yüksek değişim oranları görülürken doğusuna oranlar %10'u aşmamaktadır. Şekil 4.15n'de görüldüğü gibi düşük kategori değerler için Azak Denizi'nde ve Batı Karadeniz'de özellikle kıyı hattında %70'e kadar çıkan artan eğilim, Doğu Karadeniz'de ise %20'yi aşmayan azalan eğilim ortaya çıkmıştır. Ekim ayında ortalama pik enerjilerde Azak Denizi ile neredeyse tüm Karadeniz'de yüksek kategori için artan (Şekil 4.14o), düşük kategori için (Şekil 4.15o) ise azalan eğilimin hakim olduğu görülmektedir. Değişim oranlarının genel olarak her iki kategori için de %10-20 aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Kasım ayı içinde her iki kategoride de azalan eğilimin hakimiyeti söz konusudur. Ancak, yüksek kategori ortalama pik enerjiler Doğu Karadeniz'in kıyı bölgesinde %20 (Şekil 4.14p), düşük kategori de (Şekil 4.15p) ise Azak Denizi ile Kuzeydoğu Karadeniz'de %10 ila %40 arasındaki oranlarda artan eğilim belirlenmiştir. Bununla birlikte azalan eğilimde değişim oranları yüksek kategori için %50'yi düşük kategori için %30'u aşmamaktadır. Aralık ayında yüksek kategori ortalama pik enerjiler Karadeniz'in güneyinde artmaya kuzeyinde ise azalmaya eğilimlidir (Şekil 4.14r). Değişim oranının her iki eğilim türü içinde genelde %10-20 civarında kaldığı söylenebilir. Şekil 4.15r'de görüldüğü üzere düşük kategori için Azak Denizi ile tüm Karadeniz'de değişim oranı genel olarak %30'a kadar olan azalan eğilim yönündedir.

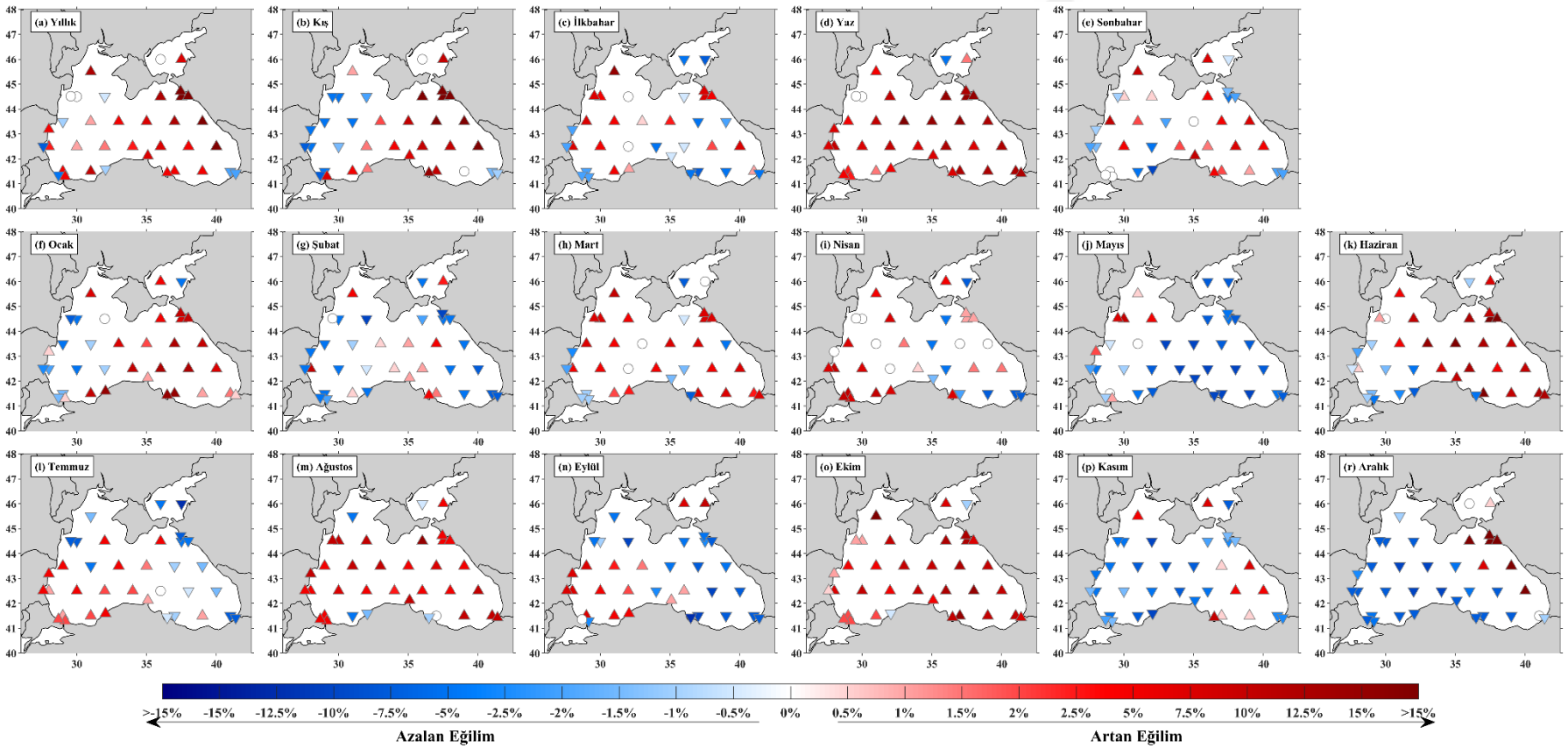
4.3.2. SWAN modeli spektral pik periyotları için GG-YEA sonuçları

SWAN modelinden elde edilen pik periyotlar için yapılan yenilikçi analizin yüksek ve düşük kategori sonuçları maksimum değerler için sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de, ortalama değerler için ise sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sunulmuştur. Değişim oranlarının %±15'i aşmamakla birlikte genelde %±5 bandında değiştiği görülmektedir.

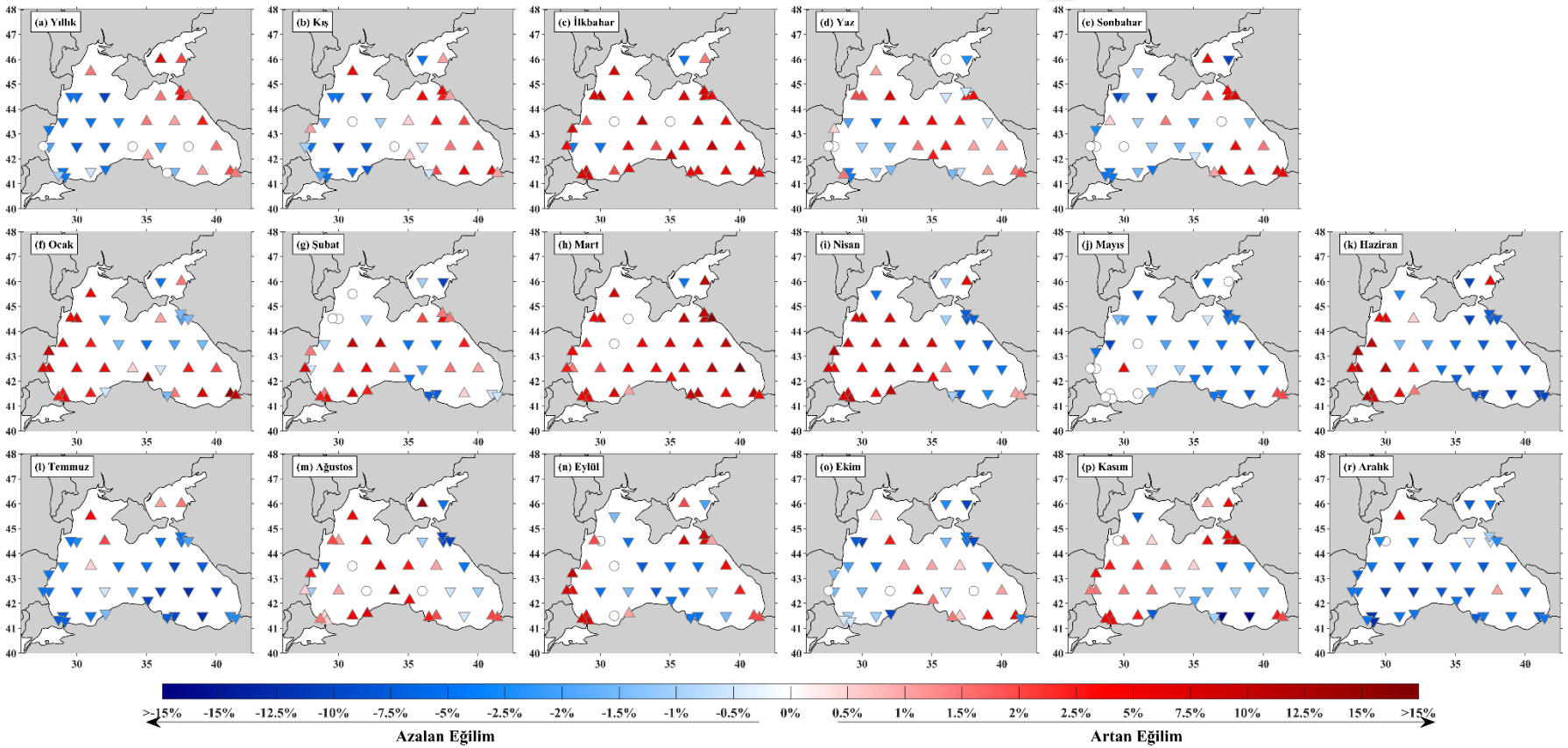
Yıllık ölçekte maksimum pik periyotlara ait yüksek değerlerin Karadeniz genelinde artma eğilimi gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.16a). Özellikle batıdan doğuya doğru değişim oranı artmakta ve Rusya kıyılarında bu oran %15'in üstüne çıkmaktadır. Azak denizi ve Romanya açıklarında ise eğilim görülmeyen istasyonlar mevcuttur. Düşük kategori için Batı Karadeniz'de %2,5 değişim oranının üstünde azalan eğilim, Doğu Karadeniz'de ise genelde çok düşük oranda (%0,5) artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.17a). Kış mevsiminde

yüksek maksimum pik periyotlar için Karadeniz'in doğu ve orta kesimi ile İstanbul-Filyos arasındaki kıyı bölgesinde %15'in üzerine çıkan artan eğilim, batısında ise %2,5 seviyesinde azalan eğilim vardır (Şekil 4.16b). Düşük değerleri içinde benzer şekilde Karadeniz'in batısında azalan, doğusunda artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.17b). İlkbahar da yüksek değerler için eğilimde baskın bir yönün olmadığı görülmektedir (Şekil 4.16c). Bulgaristan, İstanbul, Sinop-Hopa kıyı hattı ile Azak Denizi'nde %0,5 ile %5 arasında bir azalan eğilim bulunurken, Batı Karadeniz ve Rusya-Gürcistan açıklarında genelde %2,5 artan eğilim görülmektedir. Düşük maksimum pik periyotların ise Karadeniz'de yaklaşık %5'in üzerinde artan eğilim hakimiyeti söz konusudur (Şekil 4.17c). Yaz mevsiminde tüm Karadeniz'de, Romanya açıkları haricinde, yüksek maksimum pik periyotlarda değişim oranı genelde %10 olan artan eğilim vardır (Şekil 4.16d). Düşük değerlerinde ise Karadeniz'in güneybatısında %1 ile %2,5 arasında azalan eğilim, kalan bölgelerde %5'i aşmayan artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.17d). Sonbahar mevsiminde de yüksek maksimum pik periyotlar genelde %5 civarında artmaya eğilimlidir. Bulgaristan kıyıları ile Anapa, Filyos, Glorya ve Hopa istasyonlarında azalan eğilim bulunmuştur (Şekil 4.16e). Düşük değerlerinde ise Karadeniz'in güneydoğu kesimi ile Rusya açıklarında %5-7,5 değişim oranına sahip artan eğilim, kalan bölgelerde daha çok azalan eğilim bulunmuştur (Şekil 4.17e).

Veriler aylık ölçekte incelendiğinde Ocak ayında yüksek maksimum pik periyotlar Karadeniz'in doğusunda artma, batısında azalma eğilimindedir (Şekil 4.16f). Düşük değerlerde ise güneydoğu ile batında artma kalan bölgelerde azalma eğilimi söz konusudur (Şekil 4.17f). Şubat ayında yüksek maksimum pik periyotlarda Karadeniz'in orta bölgesi haricinde %5 civarında azalma (Şekil 4.16g); düşük periyotlarda ise bölgenin güneybatısı ile doğu kıyılarında artma diğer bölgelerinde ise azalma eğilimi söz konusudur (Şekil 4.17g). Mart ayında yüksek ve düşük pik periyotlar için Karadeniz üzerinde artan eğilim hâkimiyeti görülmüştür (Şekil 4.16h ve Şekil 4.17h). Ancak yüksek değerlerde Varna-İstanbul arasında ve Doğu Karadeniz'de azalan eğilimler de bulunmaktadır. Nisan ayında yüksek ve düşük pik periyotlar Karadeniz'in orta ve batı kesiminde artmaya, doğusunda ise azalmaya eğilimlidir (Şekil 4.16i ve Şekil 4.17i). Yüksek değerler de eğilim bulunamayan istasyonların olduğu da dikkat çekmektedir.



Şekil 4. 16. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 17. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli maksimum pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

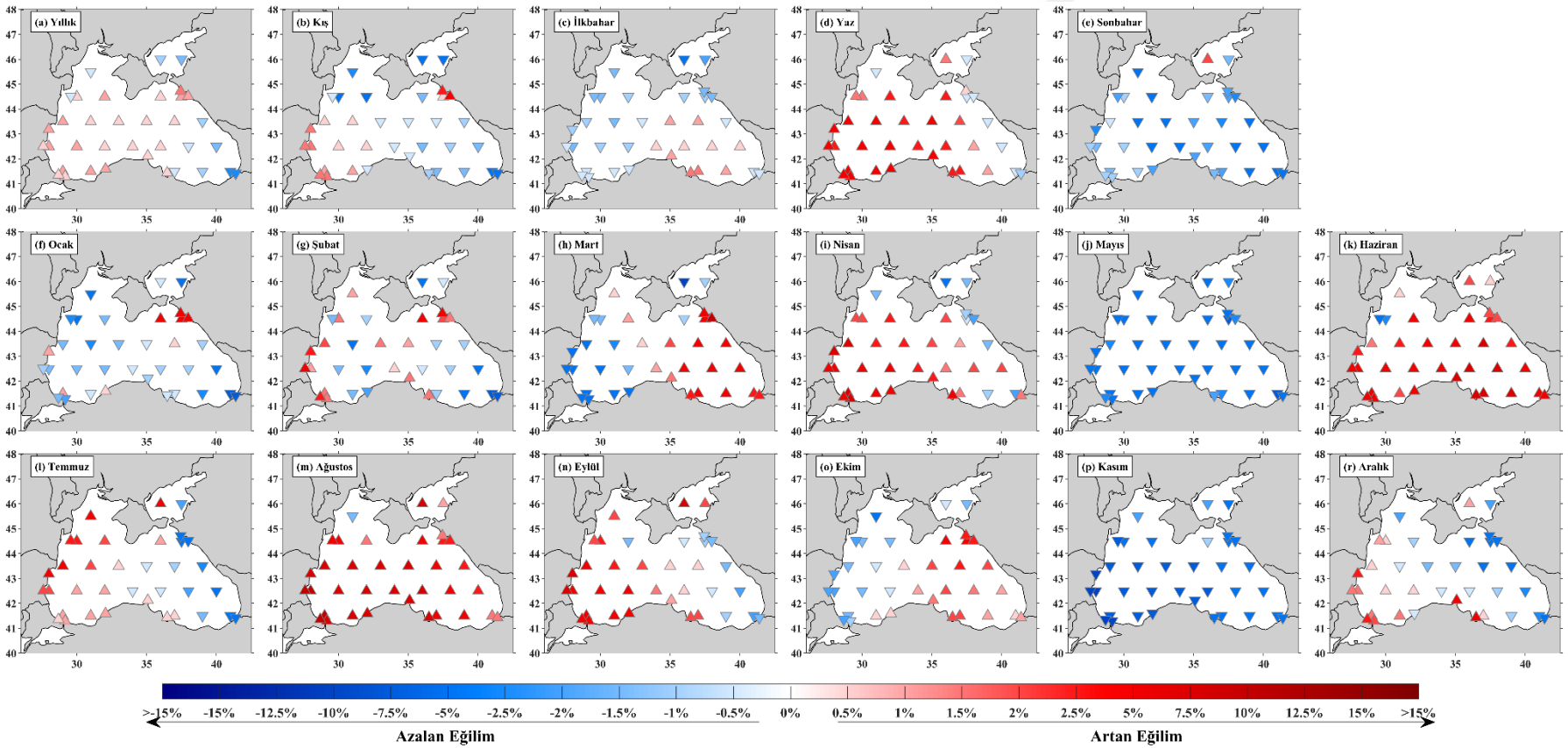
Mayıs ayında tüm Karadeniz'de hem yüksek hem de düşük maksimum pik periyotlar için azalan eğilim görülmektedir. Yüksek değerlerde %10'un üzerinde (Şekil 4.16j), düşük değerlerde ise %5 civarında değişim oranı belirlenmiştir (Şekil 4.17j). Haziran ayında yüksek ve düşük maksimum pik periyotlar için eğilim yönü açısından birbirinden farklı durumlar ortaya çıkmıştır (Şekil 4.16k ve Şekil 4.17k). Yüksek (düşük) değerlerde Karadeniz'in güneybatısında azalan (artan) diğer bölgelerde ise artan (azalan) eğilim görülmüştür. Değişim oranlarının ise genelde %5 ile %12,5 arasında olduğu söylenebilir. Temmuz ayında yüksek maksimum pik periyotlar için Romanya ile Ukrayna açıkları ve Doğu Karadeniz bölgesinde %5'i aşmayan azalan eğilim, diğer bölgelerde de %1-5 arasındaki değişim oranları artan eğilim bulunmuştur (Şekil 4.16l). Düşük değerler için ise Azak Denizi ve Ukrayna açıkları haricinde %12,5 değişim oranında azalma eğilimi hâkimiyeti vardır (Şekil 4.17l). Ağustos ayında maksimum pik periyotun yüksek değerleri %5'in üzerinde artan eğilime (Şekil 4.16m), düşük değerlerinde ise Karadeniz'in doğu kıyı hattında azalan eğilime diğer bölgelerde daha çok artan eğilime rastlanmıştır (Şekil 4.17m). Eylül ayında yüksek değerlerde Güneybatı Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde %5 artan eğilim diğer kısımlarda %5'in üzerinde azalan eğilim (Şekil 4.16n), düşük maksimum pik periyotta ise Karadeniz'in batı ve doğu kıyı hattında artan, diğer bölgelerde azalan eğilim mevcuttur (Şekil 4.17n). Ekim ayında maksimum pik periyodun yüksek değerleri tüm Karadeniz'de %10 seviyesinde artmaya (Şekil 4.16o), düşük değerler ise batısında, Azak Denizi ve Rusya açıklarında azalmaya, bunun dışında genelde %1-1,5 civarında artmaya eğilimlidir (Şekil 4.17o). Kasımda yüksek (düşük) maksimum pik periyotlar Karadeniz'in güneybatısı haricinde azalan (artan) eğilime sahiptir (Şekil 4.16p ve Şekil 4.17p). Aralık ayında hem yüksek (Şekil 4.16r) hem de düşük (Şekil 4.17r) maksimum pik periyotlar genelde %7,5'in üzerinde azalan eğilim etkisinde iken yüksek değerlerde Rusya-Gürcistan kıyı hattında %15'in üstünde artan eğilim görülmüştür.

Ortalama pik periyotlar için yıllık ölçekte yüksek değerler %±5 bandında olmak üzere Güneydoğu Karadeniz haricinde artan eğilim göstermektedir (Şekil 4.18a). Düşük değerlerin de Karadeniz'in doğusu ile Glorya-İstanbul kıyı hattı boyunca artmaya eğilimli olduğu söylenebilir (Şekil 4.19a).

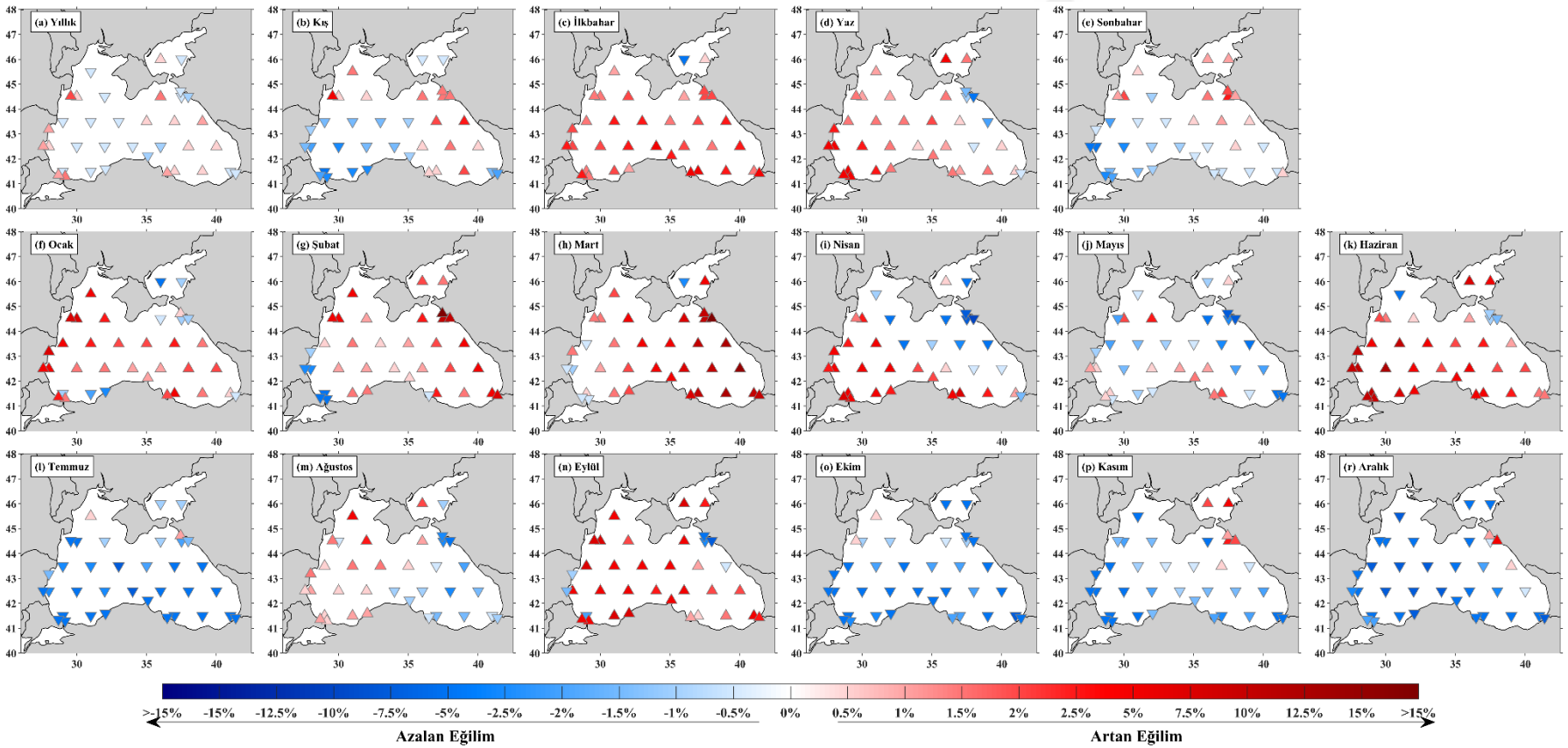
Mevsimlik ölçeklerde bakıldığında yüksek ortalama pik periyot Karadeniz'in güneybatısında kışın %0,5-1 (Şekil 4.18b), doğu kesiminde ilkbaharda %0,5-1 (Şekil

4.18c), neredeyse tamamında yazın %5 değişim oranıyla artan eğilim, kalan bölgelerde %0,5-1 (Şekil 4.18d) ve sonbaharda tamamında %5 civarında azalan eğilim göstermektedir (Şekil 4.18e). Düşük değerlerde kış ve sonbahar mevsimlerinde Ukrayna ve Doğu Karadeniz açıklarında (Şekil 4.19b ve 4.19e), ilkbahar ve yaz mevsimlerinde neredeyse tüm Karadeniz'de artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.19c ve 4.19d).

Aylık bazda yüksek ortalama pik periyotlar için Ocak, Mayıs ve Kasım aylarında Karadeniz'in tamamında sırasıyla %1,5, %5 ve %7,5 değişim oranlarıyla azalan eğilim vardır (Şekil 4.18f, 4.18j ve 4.18p). Şubat ayında yüksek ortalama pik periyot Karadeniz'in güneydoğunda ve batısında kıyı bölgesi haricinde genelde %1,5 değişim oranıyla azalmaya, kalan bölgelerde artmaya eğilimlidir (Şekil 4.18g). Haziran ve Ağustos aylarında %5'in üzerinde artan eğilim hâkimiyeti vardır (Şekil 4.18k ve 4.18m). Benzer şekilde yüksek ortalama pik periyotlar Nisan ve Eylül aylarında da Rusya-Gürcistan kıyı hattı haricinde tüm Karadeniz'de artan eğilim göstermektedir (Şekil 4.18i ve 4.18n). Mart ve Ekim aylarında Batı Karadeniz'de görülen azalan eğilim sırasıyla %5 ve %1,5 değişim oranı, Doğu Karadeniz'de görülen artan eğilim ise yaklaşık %5 değişim oranına sahiptir (Şekil 4.18h ve 4.18o). Temmuz ve Aralık ayları içinde Karadeniz'in daha çok doğusunda %1-5 değişim oranıyla azalan, batısında ise genelde %1-1,5 oranıyla artan eğilim belirlenmiştir (Şekil 4.18l ve 4.18r). Düşük ortalama pik periyotlarda aylık ölçekte Ocak-Mart periyodu ile Eylül'de tüm Karadeniz'de artan eğilim baskın olmakla beraber bahsedilen aylarda Varna-İstanbul kıyı hattında azalan eğilimler de görülmektedir (Şekil 4.19 f, 4.19g, 4.19h ve 4.19n). Haziran'da benzer şekilde tüm Karadeniz'de özellikle güneybatısında %15 artan eğilim vardır (Şekil 4.19k). Nisan ve Ağustos ayları içinde Doğu Karadeniz'de sırasıyla %5 ve %1,5 seviyelerinde azalan, Batı Karadeniz'de de sırasıyla %5 ve %1,5 seviyelerinde artan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.19i ve 4.19m). Mayıs ayında ise Karadeniz üzerinde özellikle doğusunda daha yüksek değişim oranıyla çoğunlukla azalan eğilim baskın olmasına rağmen Burgas-İstanbul ve Filyos-Samsun kıyı hatları ile çalışma bölgesinin kuzeybatısında artan eğilim gösteren istasyonlar bulunmaktadır (Şekil 4.19j).



Şekil 4. 18. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 19. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) SWAN modeli ortalama pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

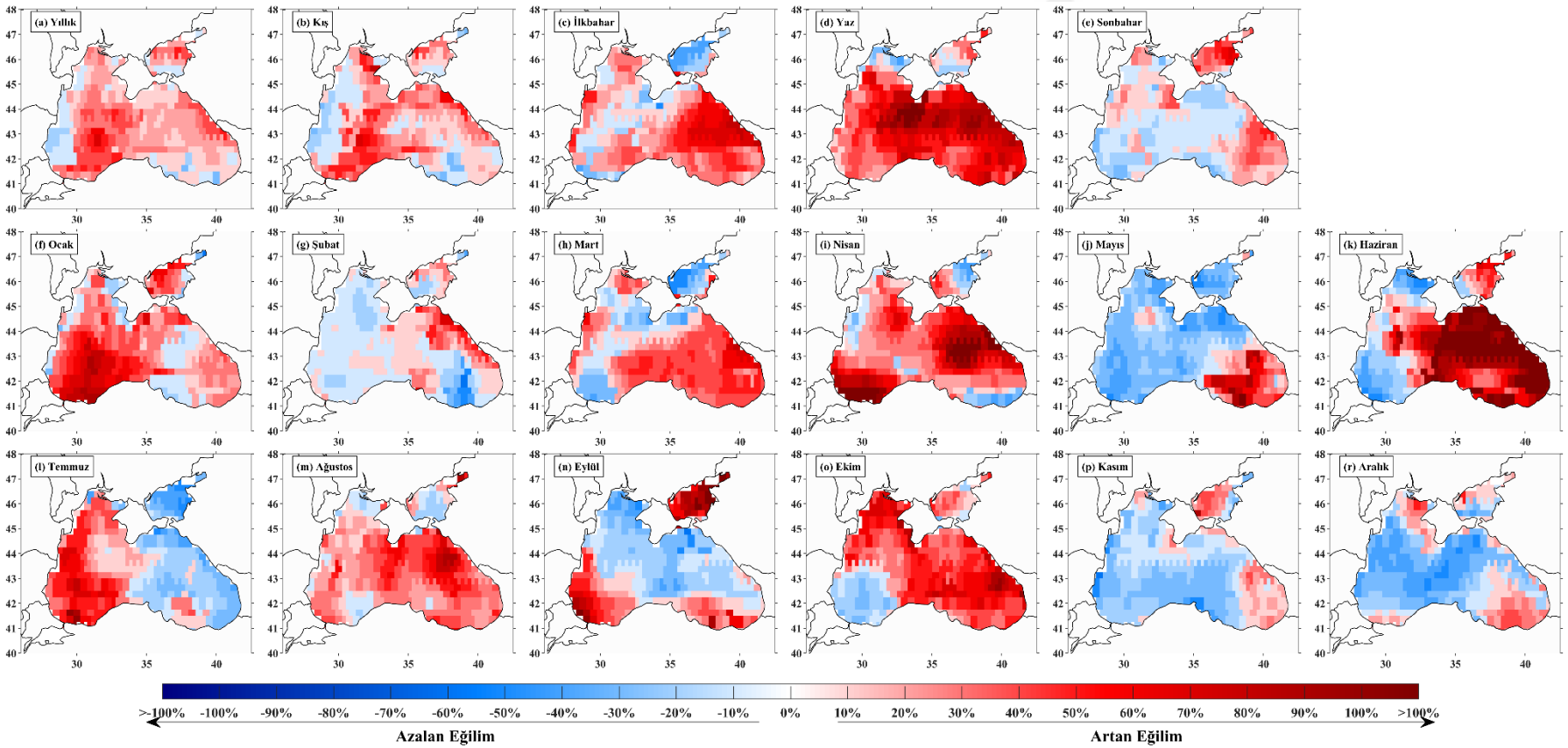
Temmuz ve Ekim-Aralık periyodunda neredeyse tüm istasyonlarda azalan eğilim bulunmuştur (Şekil 4.19l, 4.19o, 4.19p ve 4.19r). Bahsedilen aylarda değişim oranı genelde %5 civarında olduğu belirlenmiştir.

4.3.3. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjileri için GG-YEA sonuçları

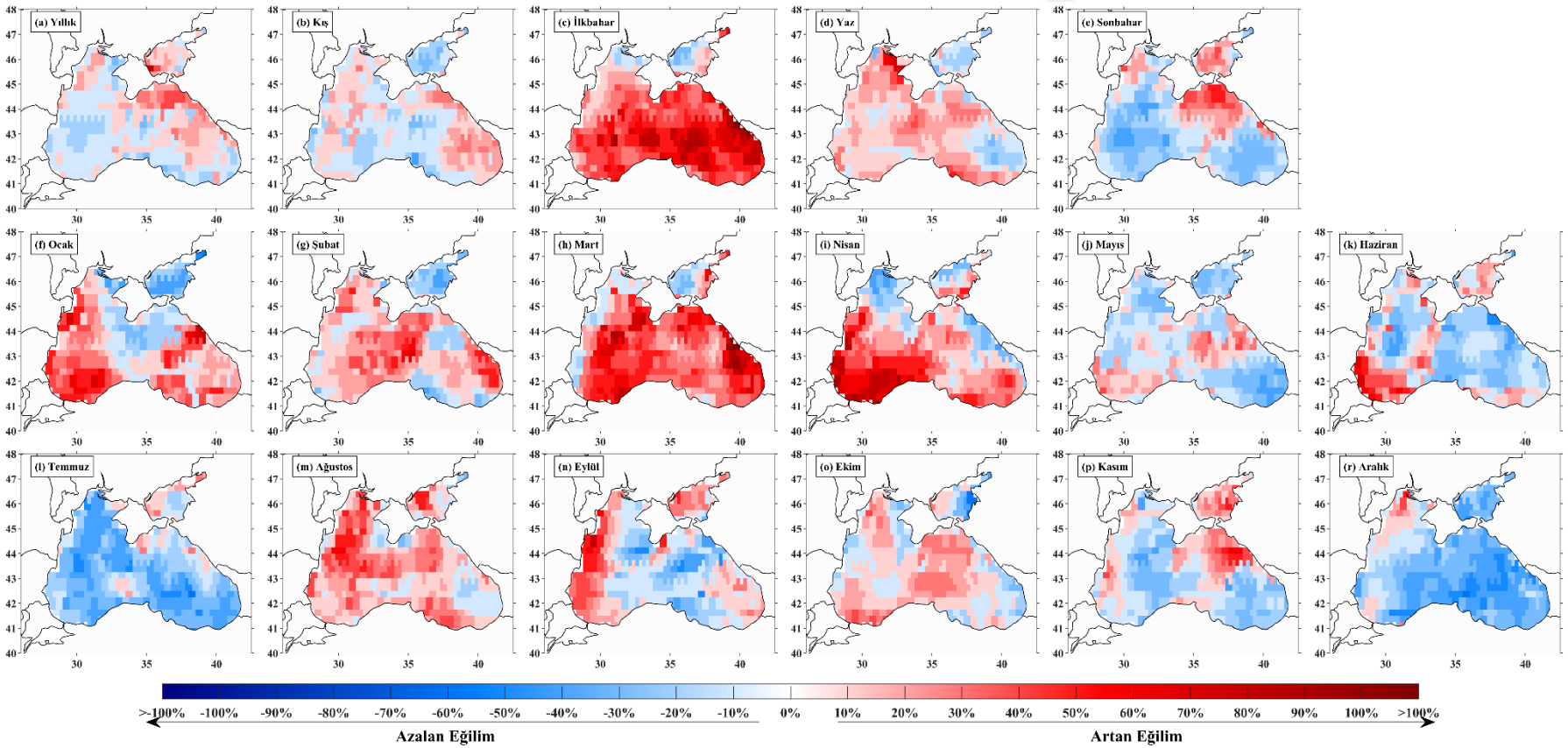
Yenilikçi eğilim analiz yöntemlerinden GG-YEA yaklaşımı, verilerin istatistiksel olarak sınıflandırarak "Yüksek" ve "Düşük" kategorideki değerlerin yorumlanmasına olanak tanımaktdır. Maksimum ve ortalama spektral pik enerjilerin yüksek ve düşük değer kategorileri için analiz sonuçları, Şekil 4.20 ile Şekil 4.23 arasında sunulmaktadır.

Yıllık olarak yüksek maksimum pik enerjiler için genel bir artış eğilimi görülmekle birlikte Bulgaristan ve Romanya açıklarında azalan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.20a). Ayrıca Güneybatı Karadeniz ile Rusya ve Gürcistan kıyılarında artış eğilimi %40 civarındadır. Değişim oranının artan eğilim için %60'ı, azalan eğilim için ise %20'yi geçmediği görülmektedir. Düşük maksimum pik enerjiler ise Karadeniz'in genelinde azalan eğilim göstermesine rağmen Doğu Karadeniz'de %40'a varan artan eğilim göstermişlerdir (Şekil 4.21a).

Kış mevsiminde yüksek maksimum pik enerjilerde Bulgaristan ve Romanya açıkları ve Karadeniz'in güneydoğusunda %10-20 arasında değişen oranlarda azalan eğilimler, bunun dışındaki bölgelerde değişim oranı %50'ye varan artan eğilimler görülmüştür (Şekil 4.20b). Düşük maksimum pik enerjiler ise Karadeniz'in genelinde azalan eğilim göstermesine rağmen Doğu ve Batı Karadeniz kıyılarında artma eğilimindedir (Şekil 4.21b). İlkbaharda hem yüksek hem de düşük maksimum pik enerjilerin neredeyse tüm Karadeniz'de artan eğilim gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.20c ve Şekil 4.21c). Değişim oranlarının ise genel olarak %50'nin üzerinde olduğu söylenebilir. Yaz mevsiminde ilkbaharla benzer şekilde artan eğilim hâkimiyeti söz konusudur. Ancak yüksek maksimum pik enerjiler (Şekil 4.20d), düşük kategoriye göre daha büyük değişim oranlarına sahiptir (Şekil 4.21d). Sonbaharda hem yüksek hem de düşük değerlerin neredeyse tüm Karadeniz'de azalan eğilim gösterdiği, ancak yüksek değerlerin Karadeniz'in güneydoğusunda (Şekil 4.20e), düşük değerlerin ise kuzeydoğusunda artan eğilime sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.21e).



Şekil 4. 20. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



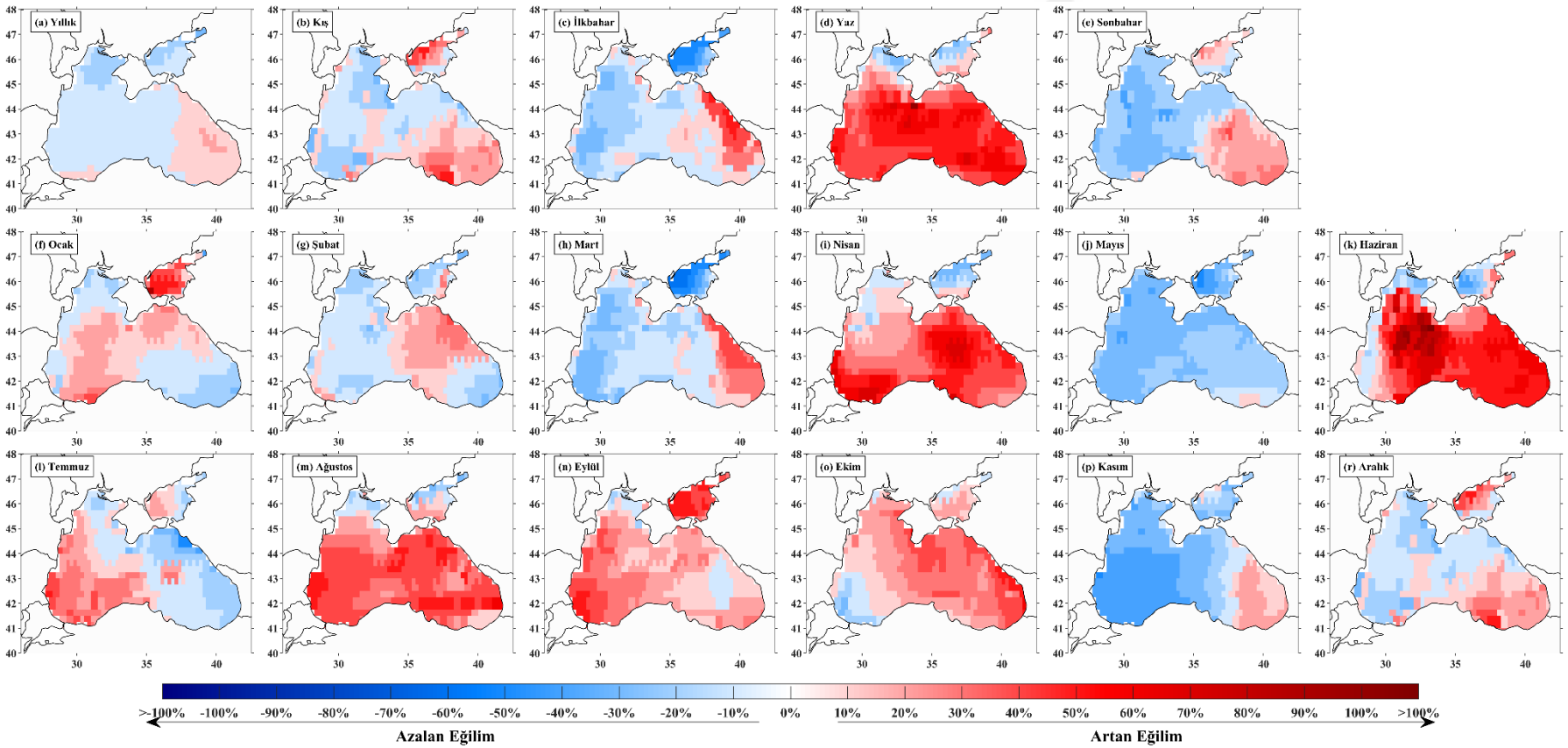
Şekil 4. 21. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

Yüksek maksimum pik enerjiler Ocak ayında Samsun ile Anapa arasındaki bölge dışında tüm Karadeniz ve Azak Denizi'nde artan eğilim göstermiştir (Şekil 4.20f). Batı Karadeniz'de değişim oranları daha yüksek değerler vermiştir. Düşük maksimum pik enerjiler Karadeniz'in orta kesimi ve Azak Denizi'nde azalmaya, kalan bölgelerde artmaya eğilimlidir (Şekil 4.21f). Şubat ayında yüksek maksimum pik enerjilerde Batı ve Güneydoğu Karadeniz'de genelde %10-20 arasındaki oranlarda azalan eğilim, Rusya-Gürcistan kıyılarında ise %50'nin üzerinde artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.20g). Düşük maksimum pik enerjiler de ise Karadeniz genelinde %10-30 arasındaki oranlarda artan eğilim, Azak Denizi'nde, Sinop-Samsun ve Rusya açıklarında %10 ile %30 arasında azalan eğilim görülmüştür (Şekil 4.21g).

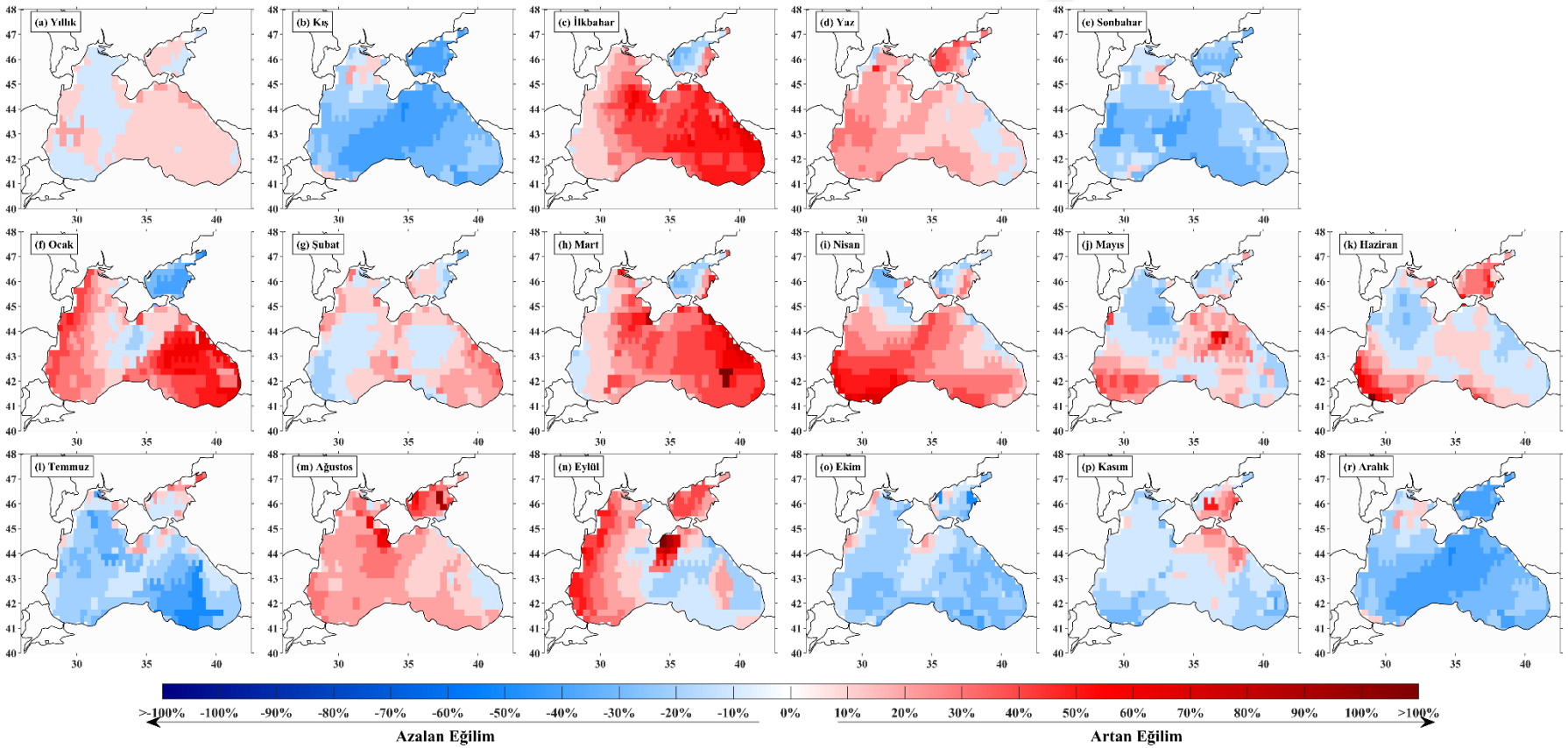
Mart ayı içinde hem yüksek hem de düşük maksimum pik enerjiler için genel olarak %40'ın üstünde artan eğilim görülmüştür (Şekil 4.20h ve Şekil 4.21h). Ancak yüksek değerlerde Kırım Yarımadası'nın çevresinde ve İstanbul açıklarında azalan eğilime rastlanmıştır. Nisan ayında da hem yüksek hem de düşük maksimum pik enerjiler için genel olarak %40'ın üstünde artan eğilimler görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek değerlerde İstanbul ile Rusya kıyılarında %100'e ulaşan artan eğilimlere rastlanmıştır (Şekil 4.20i). Düşük değerlerde Rusya-Gürcistan kıyı şeridi ve Ukrayna açıklarında azalan eğilim vardır (Şekil 4.21i). Mayıs ayında hem yüksek hem de düşük maksimum pik enerjiler için genel olarak azalan eğilim hâkimiyeti söz konusudur. Ancak yüksek değerlerde Güneydoğu Karadeniz'de %50-60 civarında (Şekil 4.20j), düşük değerlerde ise Karadeniz'in güneybatısı ile doğusunda %10-20 civarında azalan eğilime rastlanmıştır (Şekil 4.21j). Haziran ayında yüksek ve düşük değerlerin eğilimlerinin birbiri ile zıt yönde olduğu sırasıyla Şekil 4.20k ve Şekil 4.21k'de görülmektedir. Yüksek maksimum pik enerjiler Ukrayna açıkları ve Güneybatı Karadeniz dışında tüm Karadeniz'de %100'ün üzerinde artan eğilim, düşük değerler ise Güneybatı Karadeniz dışında tüm Karadeniz'de %40'ı aşmayan azalan eğilim göstermektedir. Temmuz ayında yüksek maksimum pik enerjiler Karadeniz'in batısında %50-60 arasındaki oranlarda artan eğilim, doğusunda %20-30 arasındaki oranlarda azalan eğilim göstermektedir (Şekil 4.20l). Düşük değerlerde ise nerdeyse tüm Karadeniz'de azalan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.21l). Ağustos ayı için de hem yüksek hem de düşük maksimum pik enerjiler için çalışma alanında artan eğilim hakimdir. Yüksek değerlerde yüksek eğilim oranları (%70'e varan) varken (Şekil 4.20m), düşük değerlerde %10-30 arasındaki oranlara sahip değişim

oranları belirlenmiştir (Şekil 4.21m). Eylül ayında yüksek maksimum pik enerjiler Karadeniz'in güneybatısı ile güneydoğusunda Bulgaristan ve Türkiye'nin kıyılarını temsil eden bölge ile Azak Denizi'nde yaklaşık %50 civarında (Şekil 4.20n), düşük maksimum pik enerjiler ise Karadeniz'in batı kıyıları ile Gürcistan kıyılarında ve Azak Denizi'nde %10 ila %40 aralığında artan eğilim etkisindedir (Şekil 4.21n). Yüksek maksimum pik enerji Ekim ayında Güneybatı Karadeniz'deki azalan eğilim (%20) dışında tüm Karadeniz'de %50'nin üzerinde artan eğilim göstermiştir (Şekil 4.20o). Düşük değerler için ise genel olarak %10-30 civarında artan eğilim hâkimiyeti söz konusuyken Samsun-Anapa kıyı hattı boyunca, Romanya ile Kırım Yarımadası açıklarında %20'yi geçmeyen ve azalan yönde eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.21o). Kasım ayında yüksek ve düşük maksimum pik enerjiler için neredeyse Karadeniz'in tamamı azalan eğilim etkisindedir (Şekil 4.20p ve Şekil 4.21p). Ancak Karadeniz'in doğusu ile Azak Denizi'nde %10-20 arasındaki oranlarda artan eğilim vardır. Aralık ayında da Kasım ayındaki gibi yüksek ve düşük maksimum pik enerjiler için neredeyse Karadeniz'in tamamı %10-30 azalan eğilim etkisindedir (Şekil 4.20p ve Şekil 4.21p). Ancak yüksek (düşük) değerlerde Karadeniz'in doğusunda (batısında) %10-20 arasında değişen oranlarda artan yönde eğilim görülen bölgeler vardır.

Ortalama spektral pik enerjilerin yüksek ve düşük kategori için sonuçları sırasıyla Şekil 4.22 ile Şekil 4.23'te sunulmuştur. Yıllık ölçekte ortalama pik enerjiler genel olarak %10 değişim oranına sahip olduğu görülmüştür. Yüksek değerlerin Doğu Karadeniz ile İstanbul kıyılarında artan, Azak Denizi dahil kalan alanlarda azalan eğilim hakimdir (Şekil 4.22a). Düşük değerlerde ise Karadeniz'in doğusunda ve batı kıyılarında ayrıca Azak Denizi'nde artan eğilim baskındır (Şekil 4.23a). Kışın yüksek ve düşük ortalama değerler için azalan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 4.22b ve 4.23b). Ancak yüksek ortalama pik enerjiler için Güneydoğu Karadeniz'de artan eğilime de rastlanmıştır. Ayrıca düşük ortalama pik enerjiler özellikle Karadeniz'in orta kesiminde %40 değişim oranına sahiptir. İlkbahar mevsiminde yüksek ve düşük ortalama pik enerjilerin eğilimlerinin birbirine zıt olduğu görülmüştür. Yüksek değerlerin yalnızca Doğu Karadeniz kıyı bölgesinde artan eğilim gösterdiği (Şekil 4.22c), düşük değerlerin ise tüm Karadeniz boyunca artan eğilime sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.23c). Yaz mevsiminde ilkbaharın aksine hem yüksek (Şekil 4.22d) hem de düşük (Şekil 4.23d) ortalama pik enerjiler tüm Karadeniz'de artma eğilimindedir.



Şekil 4. 22. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 23. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik enerjilerin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

Burada yüksek değerlerin değişim oranı %50-60 seviyelerinde iken düşük değerlerin %10-20 bandında kaldığı görülmüştür. Sonbaharda hem yüksek hem de düşük ortalama pik enerjiler neredeyse tüm Karadeniz'de %10-20 arasındaki değerlerde azalan eğilime sahiptir (Şekil 4.22e ve Şekil 4.23e). Bunun yanında yüksek değerler için Güneydoğu Karadeniz de %20 artan eğilim görülmüştür.

Ocak ayında yüksek ortalama pik enerjilerde Güneydoğu Karadeniz ile Bulgaristan-Ukrayna kıyıları boyunca %20'yi aşmayan azalan eğilim bulunmuştur (Şekil 4.22f). Düşük değerlerde ise Karadeniz'in orta bölgesi ile Azak Denizi'nde görülen azalan eğilim dışında tüm Karadeniz artan eğilim etkisindedir. Ayrıca, özellikle bölgenin doğusunda değişim oranı %60'a kadar çıkmaktadır (Şekil 4.23f). Şubat ayında yüksek ortalama pik enerjiler için Batı ve Güneydoğu Karadeniz'de %20'yi aşmayacak şekilde azalan eğilimler tespit edilmiştir (Şekil 4.22g). Düşük değerlerde ise Doğu ve Batı Karadeniz'in orta enlemlerinde azalan, daha çok kıyı kesimlerinde artan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.23g). Değişim oranı ise genellikle %20'yi aşmamaktadır. Mart ayı içinde yüksek ve düşük ortalama pik enerjilerin eğilimlerinin farklı yönlerde olduğu tespit edilmiştir. Yüksek değerlerin yalnızca Doğu Karadeniz kıyı bölgesinde artan eğilim gösterdiği (Şekil 4.22h), düşük değerlerin ise neredeyse tüm Karadeniz boyunca artan eğilime sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.23h). Nisan ayında ise yüksek ve düşük ortalama pik enerjilerin eğilimleri artış yönündedir. Ancak yüksek değerler özellikle Doğu ve Güneybatı Karadeniz'de %50-60 seviyelerinde değişim oranına sahipken (Şekil 4.22i) düşük değerlerde sadece Güneybatı Karadeniz'de bu durum oluşmuştur (Şekil 4.23i).

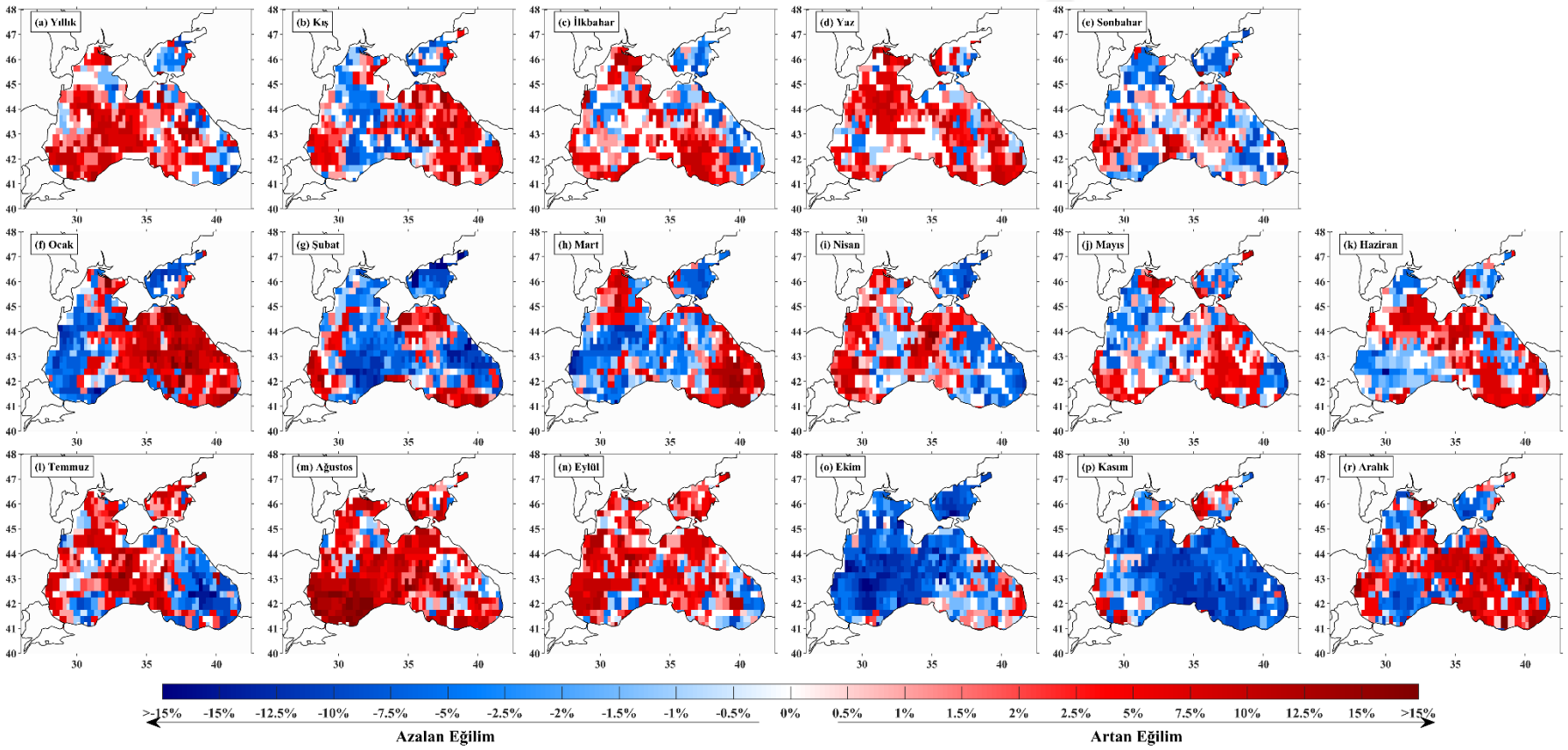
Mayıs ayında yüksek ortalama pik enerjiler için Karadeniz'in batısında %30, doğusunda %20 oranında azalan eğilim hâkimiyeti söz konusu olmuştur (Şekil 4.22j). Düşük değerlerde Güneybatı ile Doğu Karadeniz'de Gürcistan kıyıları haricinde artan eğilim, kalan bölgelerde ise %30'u aşmayan azalan eğilim vardır (Şekil 4.23j). Haziranda yüksek ortalama pik enerjiler için Karadeniz'in batı kıyıları haricinde %50'nin üzerinde değişim oranıyla artan eğilim gözlemlenmiştir (Şekil 4.22k). Düşük değerlerde orta ve Güneybatı Karadeniz ile Türkiye'nin kıyı hattı boyunca ve Azak Denizi'nde artan eğilim diğer bölgelerde %30'u aşmayan azalan eğilim ortaya çıkmıştır (Şekil 4.23k). Yüksek ortalama pik enerjiler Temmuz ayında Ukrayna ve Kırım Yarımadası açıkları dışında Batı Karadeniz'de %20-30 civarında artan, Doğu Karadeniz'de ise %10-20 seviyelerinde

azalan eğilim etkisindedir (Şekil 4.22l). Düşük değerlerde ise hem Azak Denizi'nde hem de Karadeniz'de %40'ı aşmayan azalan eğilim hâkimiyeti söz konusudur (Şekil 4.23l). Ağustos ayında ortalama pik enerjilerin hem yüksek hem de düşük değerlerinde artan eğilim görülmektedir. Yüksek değerlerde değişim oranı %40-50 seviyelerinde iken (Şekil 4.22m) düşük değerlerde bu oran genelde %20 seviyesindedir (Şekil 4.23m). Eylül ayında ise ortalama pik enerjiler yüksek ve düşük değerlerinde Azak Denizi ile tüm Karadeniz'de artan eğilim ortaya çıkmıştır. Yüksek değerlerde değişim oranı %40-50 seviyelerinde iken (Şekil 4.22n) düşük değerlerde bu oran çoğunlukla %20 seviyesindedir (Şekil 4.23n).

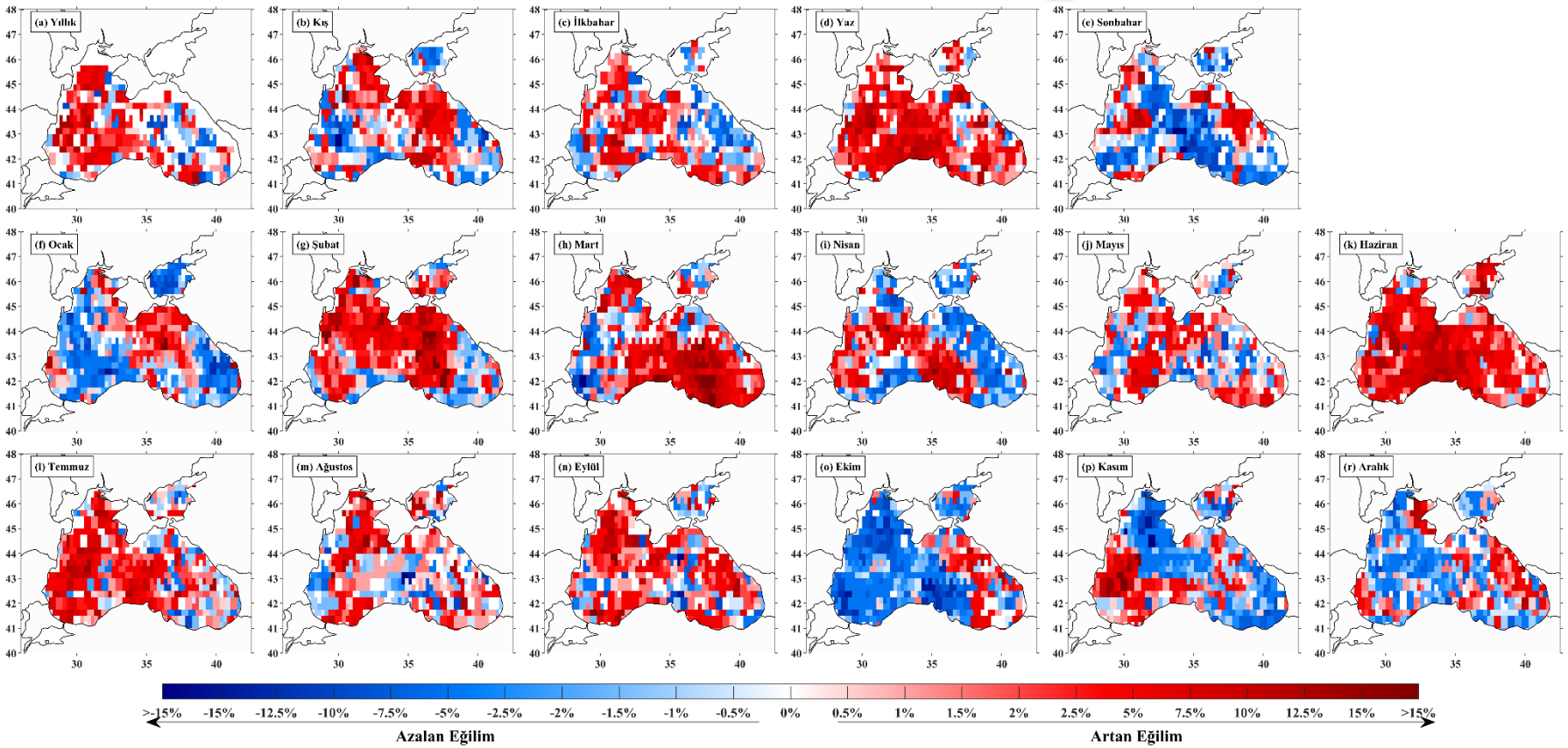
Ekim ayında yüksek ve düşük ortalama pik enerji değerleri için eğilimler farklı yönde çıkmıştır. Yüksek ortalama pik enerjilerin Karadeniz'in güneybatısı haricinde artan eğilim gösterdiği ayrıca batısından doğusuna doğru değişim oranının kademe kademe arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.22o). Düşük değerler ise neredeyse tüm Karadeniz'de ve Azak Denizi'nde %10-30 arasındaki değişim oranıyla azalan eğilim göstermektedir (Şekil 4.23o). Kasım ve Aralık aylarında yüksek ve düşük ortalama pik enerjiler Karadeniz genelinde azalan eğilim hâkimiyetindedir. Yüksek değerlerde Karadeniz'in güneydoğusunda her iki ay içinde, düşük değerlerde ise Kasım ayında bölgenin kuzeydoğu kesiminde artan eğilim görülmüştür. Yüksek değerlerde Kasım ayında değişim oranı doğudan batıya doğru %10 ila %40 arasında değişim gösterirken (Şekil 4.22p) Aralık ayında bu oran %10-20 seviyelerindedir (Şekil 4.22r). Düşük değerlerde ise Kasım ayında çoğunlukla %10 değişim görülürken (Şekil 4.23p) Aralık ayında bu değişim %40'a kadar çıkmaktadır (Şekil 4.23r).

4.3.4. ERA5 yeniden analizi spektral pik periyotları için GG-YEA sonuçları

Maksimum ve ortalama pik periyodun GG-YEA yöntemine göre analiz sonuçları yüksek ve düşük kategorilere göre sırasıyla Şekil 4.24 ile Şekil 4.27'de sunulmuştur. Yıllık bazda yüksek kategori maksimum pik periyotlar Doğu Karadeniz kıyılarında %2,5-%10 arasında değişen azalan eğilim, diğer bölgelerde ise genellikle %5'in üstünde ancak %15'i geçmeyecek şekilde artan eğilim etkisindedir (Şekil 4.24a). Düşük değerlerde ise Azak Denizi ve Doğu Karadeniz kıyılarında eğilim çıkmamıştır (Şekil 4.25a). Bununla birlikte Batı Karadeniz'de %5 ila %10 arasında değişim oranlarına sahip artan eğilim gösteren istasyonlar dikkat çekmektedir.



Şekil 4. 24. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

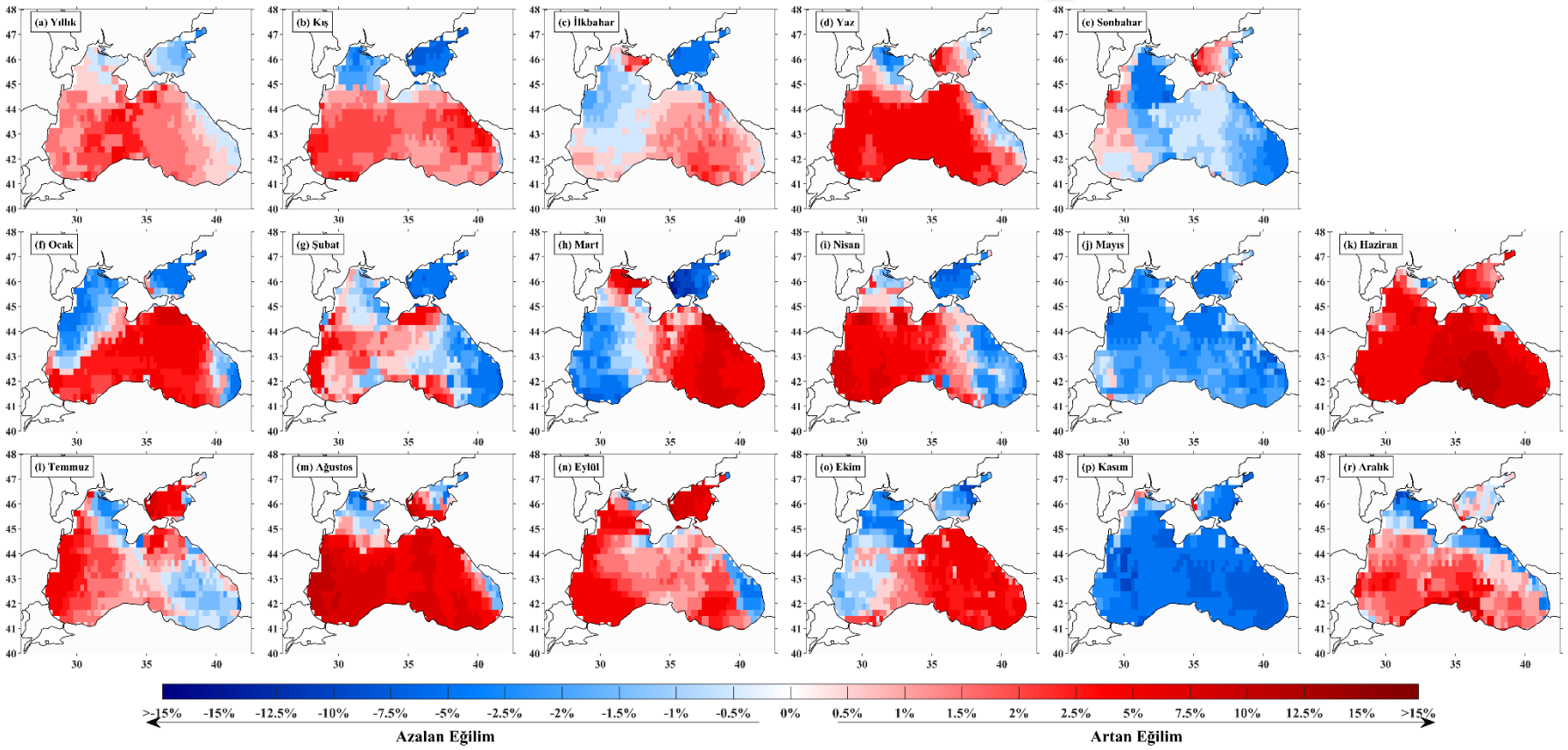


Şekil 4. 25. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli maksimum pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

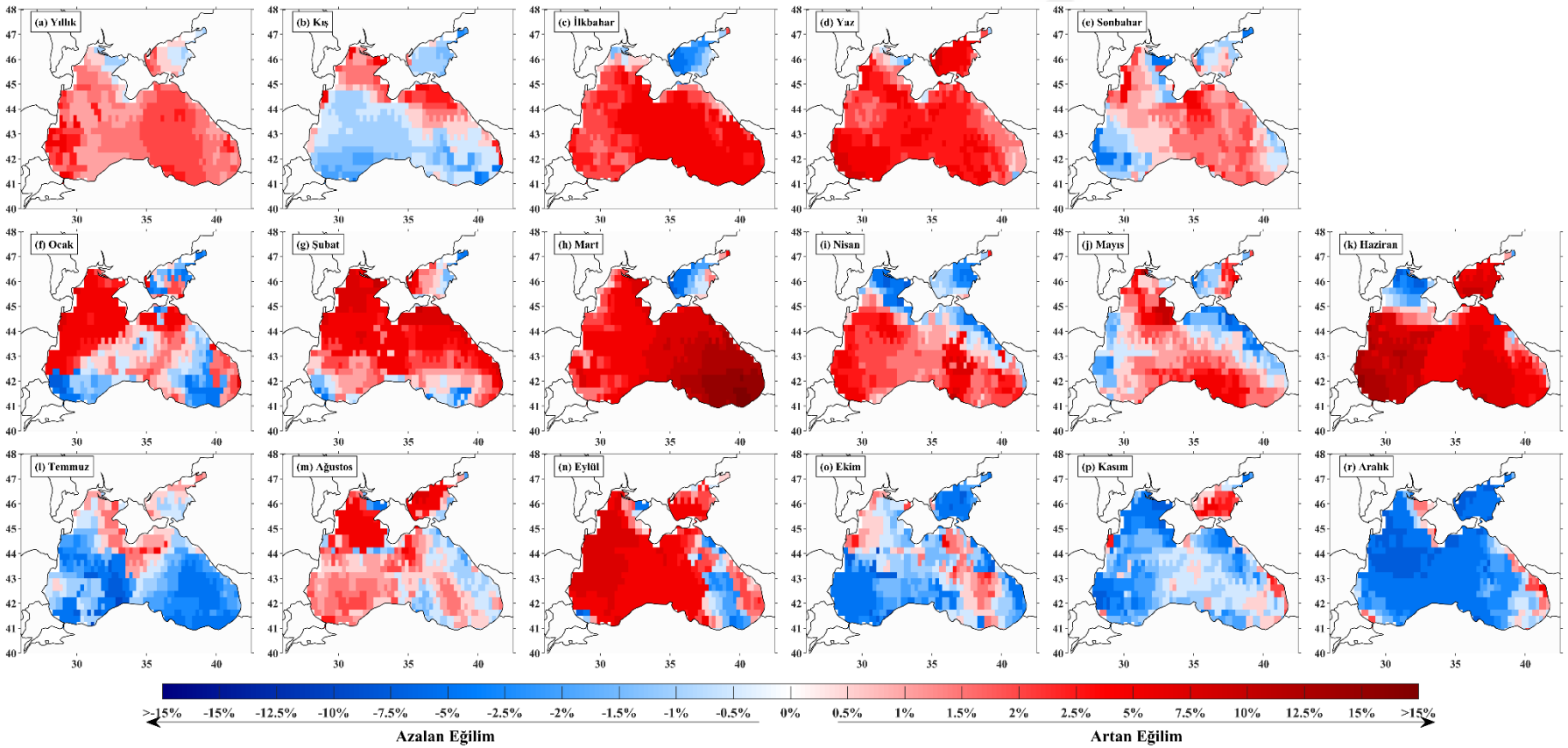
Mevsimsel olarak yüksek kategori maksimum pik periyot için kışın Karadeniz'in doğu ve güneybatısında, ilkbaharda doğu kıyıları haricinde ve yazın neredeyse tamamında yaklaşık %5 ila %15 arasında değişim oranına sahip artan eğilim gösteren noktalar gözlemlenmiştir (Şekil 4.24b, 4.24c ve 4.24d). Ayrıca kışın Batı Karadeniz'de ve ilkbaharda Rusya-Gürcistan açıklarında %5-15 arasında azalan eğilim tespit edilmiştir. Sonbaharda ise yüksek maksimum pik periyotlar Karadeniz genelinde %10'u aşmayacak şekilde azalan eğilim hâkimiyetindeyken bölgenin batısında ve doğusunda artan eğilim gösteren bölgeler bulunmaktadır (Şekil 4.24e). Düşük değerler ise kışın Karadeniz'in kuzeybatısı ile doğusunda, ilkbaharda orta ve batı kesimlerinde, yazın neredeyse tamamında ve sonbaharda yalnızca batı ve doğu kıyılarında %5'in üzerinde artan eğilim, diğer bölgelerde genelde %5'i aşmayan azalan eğilim görülmektedir (Şekil 4.25b-4.25e). Maksimum pik periyotlar aylık ölçekte incelendiğinde, yüksek değerlerinde görülen artan eğilimler Ocak ayında Karadeniz'in doğusunda ve orta kesiminde genellikle %10'dan fazla (Şekil 4.24f), Şubat ayında güneydoğu ile kuzeydoğusunda ve Glorya-İstanbul kıyıları açıklarında %7,5'in üzerinde (Şekil 4.24g), Mart ayında doğu ve kuzeybatısında %7,5'in üzerinde (Şekil 4.24h), Nisan ve Temmuz da batı ve orta kesiminde %5'in üzerinde (Şekil 4.24i ve 4.24l), Mayıs ayında daha çok doğusunda ve güneybatısında %5'in üzerinde (Şekil 4.24j), Haziranda güneybatısı ve Ukrayna açıkları haricinde %5-7,5 seviyelerinde (Şekil 4.24k), Ağustos ve Eylül aylarında neredeyse tamamında sırasıyla genellikle %10'u ve %5'i aşan (Şekil 4.24m ve 4.24n), Aralık ayında ise güneybatısı ile Ukrayna açıkları haricinde %10'un üzerinde değişim oranıyla ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.24r). Bahsedilen aylarda belirlenen bölgeler dışında azalan eğilimler bulunmakta ve genellikle %5'in üzerinde ancak %15'i geçmeyecek şekildedir. Bunun dışında Ekim ve Kasım aylarında ise yüksek maksimum pik periyotlar Karadeniz'in neredeyse tamamında %10'un üzerinde azalan eğilim etkisindedir (Şekil 4.24o ve 4.24p). Düşük kategori maksimum pik periyotların aylık olarak değişim oranları genellikle %±5 bandında gerçekleşmektedir. Artan eğilimler Ocak ayında genellikle Karadeniz'in doğusunda %2,5 seviyelerinde (Şekil 4.25f), Şubat ayında güneydoğusu haricinde %5'in üzerinde (Şekil 4.25g), Mart ayında batı kıyı kesimi haricinde %5'in üzerinde (Şekil 4.25h), Nisan da orta ve batı kesimlerinde Ukrayna ile İstanbul-Sinop açıkları haricinde %5 seviyelerinde (Şekil 4.25i), Mayıs ayında orta, güneydoğu ve kuzeybatı kesimlerinde %5 seviyelerinde (Şekil 4.25j), Haziran da neredeyse tamamında %5'in üzerinde (Şekil

4.25k), Temmuz ayında daha çok orta ve batı kesimlerinde çoğunlukla %5'i aşmayan (Şekil 4.25l), Ağustos ayında daha çok batısında olmakta birlikte tüm Karadeniz'e yayılan ve %1,5-5 seviyelerinde (Şekil 4.25m), Eylül de neredeyse tüm bölgede %2,5-7,5 aralığında (Şekil 4.25n), Ekim ayında doğu kıyılarında %5 (Şekil 4.25o), Kasım ayında güneybatısında %5-7,5 seviyelerinde (Şekil 4.25p), Aralık ayında ise daha çok doğu kıyılarında ve Kırım Yarımadası ile Varna-Filyos kıyı hattında genellikle %5 seviyesinde değişim oranına sahip olacak şekilde eğilimler ortaya çıkmıştır (Şekil 4.25r). Bahsedilen bölgeler dışında ise aylık ölçekte düşük maksimum pik periyotlarda çoğunlukla %2'nin üzerinde ve %7,5'i geçmeyecek şekilde azalan eğilimler tespit edilmiştir.

Yüksek ortalama pik periyotlar yıllık ölçekte neredeyse Karadeniz'in tamamında %5 değişim oranını aşmayacak şekilde artan eğilim; Rusya, Gürcistan ve Ukrayna kıyıları ile Azak Denizi'nde %0,5-1,5 değişim oranı ile azalan eğilim göstermiştir (Şekil 4.26a). Düşük değerler ise tüm Karadeniz'de %5'i geçmeyecek şekilde artan eğilim etkisindedir (Şekil 4.27a). Değerler mevsimsel olarak incelendiğinde yüksek ortalama pik periyotlar kışın Azak Denizi ve Ukrayna açıkları haricinde tüm Karadeniz'de %1,5-2 (Şekil 4.26b), ilkbahar da Doğu Karadeniz'de, Varna-Filyos ve Ukrayna kıyısında %0,5-2 (Şekil 4.26c), yaz mevsiminde Ukrayna, Rusya ve Gürcistan kıyıları haricinde tüm Karadeniz'de %5 (Şekil 4.26d) ve sonbaharda ise yalnızca Azak Denizi ile Batı Karadeniz'in kıyı hattında genellikle %0,5-1 değişim oranına sahip artan eğilim göstermektedir (Şekil 4.26e). Bunun dışında kalan bölgelerde %5'i aşmayan değişim oranı ile azalan eğilim hâkimiyeti söz konudur. Düşük ortalama pik periyotların ise kışın yalnızca Karadeniz'in kuzeyinde %5'i aşmayan (Şekil 4.27b), ilkbaharda Karadeniz'in tamamında %5 (Şekil 4.27c), yazın hem Azak Denizi hem de Karadeniz'de %5 (Şekil 4.26d), sonbaharda ise Karadeniz'in doğu, orta ve kuzeybatısında %0,5-2 aralığında değişim oranına sahip artan eğilim etkisinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.26e). Ayrıca kış ve sonbaharda görülen azalan eğilimler genellikle %0,5-1 ile düşük bir değişim oranına sahiptir.



Şekil 4. 26. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyot yüksek değer kategorisi için GG-YEA sonuçları



Şekil 4. 27. Yıllık (a), mevsimlik (b-e) ve aylık (f-r) ERA5 modeli ortalama pik periyot düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları

Aylık bazda yüksek ortalama pik periyotlar için artan eğilimlerin görüldüğü bölgeler ve eğilimlerin değişim oranları; Ocak ayında Karadeniz'in doğu ve güneybatısında %5 (Şekil 4.26f), Şubat ayında Azak Denizi, Kuzeybatı ve Doğu Karadeniz kıyıları haricinde %0,5 ile %5 arasında (Şekil 4.26g), Mart ve Ekim aylarında daha çok Doğu Karadeniz'de %5 seviyelerinde (Şekil 4.26h ve 4.26o), Nisan ayında Karadeniz'in orta ve batı kesiminde %5 (Şekil 4.26i), Haziran ayında Azak Denizi ve Karadeniz'in tamamında %5 ile %10 arasında (Şekil 4.26k), Temmuz ayında Azak Denizi ile Karadeniz'in daha çok orta ve batı kesiminde batıya gidildikçe değişim oranı artacak şekilde %0,5-5 aralığında (Şekil 4.26l), Ağustos için Kuzeybatı Karadeniz ile Gürcistan kıyısı ve Eylül için Gürcistan kıyısı haricinde tüm Karadeniz'de sırasıyla %5'in üstünde ve %0,5-5 aralığında (Şekil 4.26m ve 4.26n), Aralık ayında ise Kuzeybatı ve Doğu Karadeniz kıyıları haricinde %0,5-5 aralığında değişim oranına sahip olacak şekildedir (Şekil 4.26r). Bahsedilen aylarda diğer bölgelerde genellikle %5'i aşmayan azalan eğilim ortaya çıkmıştır. Ayrıca Mayıs ve Kasım aylarında Azak Denizi ve Karadeniz'in tamamında sırayla %5'i aşmayan ve %5-7,5 aralığında görülen azalan eğilim hâkimiyeti söz konusudur. Düşük kategori ortalama pik periyotlar için Ocak ayında daha çok Karadeniz'in batısında %5, orta kesimi ve Gürcistan kıyılarında ise genellikle %2'yi aşmayacak şekilde (Şekil 4.27f), Şubat ayında Karadeniz'in neredeyse tamamında genellikle %5 (Şekil 4.27g), Mart ayında doğusunda artacak şekilde %5-15, Haziran da batısında artacak şekilde %5-15 aralığında (Şekil 4.27h ve 4.27k), Nisan ayında Ukrayna, Kırım yarımadası ve Rusya kıyıları haricinde %5'i aşmayan (Şekil 4.27i), Mayıs ayında Karadeniz'in batı ve doğu kıyıları haricinde %5'i aşmayan (Şekil 4.27j), Temmuzda Ukrayna ve Kırım yarımadası kıyıları boyunca %1 seviyesinde (Şekil 4.27l), Ağustos ayında Azak Denizi ve Kuzeybatı Karadeniz'de %5, orta ve güneybatısında ise %0,5-1,5 aralığında (Şekil 4.27m), Eylül ayında Karadeniz'in batı ve orta kesimi ile Azak Denizi'nde %5-7,5 seviyelerinde (Şekil 4.27n), Ekim ayında ise Karadeniz'in kuzeybatısı ile doğusunda belli bir bölgede %2'yi aşmayan değişim oranları ile artan eğilimler mevcuttur (Şekil 4.27o). Bahsedilen aylarda diğer bölgelerde azalan eğilimler genellikle %5'i geçmeyecek şekilde ayrıca Kasım ve Aralık aylarında tüm Karadeniz'de sırasıyla %0,5-5 ve %5 değişim oranlarına sahip azalan eğilimler söz konusudur (Şekil 4.27p ve 4.27r).

4.4. Genel Değerlendirme

Yarı kapalı denizlerden biri olan Karadeniz çok dinamiktir ve iklim değişikliğinden ve iklimsel olmayan faktörlerden de güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Hoegh-Guldberg ve diğerleri, 2014). Eğilim analizi yöntemleri iklim değişikliğinin etkilerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan maksimum ve ortalama spektral pik enerji ve pik periyodun analiz sonuçlarıyla ortaya çıkan eğilimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, SWAN ve ERA5 modellerine ait maksimum ve ortalama spektral pik enerji ve pik periyot eğilim analizi sonuçlarından elde edilen baskın eğilim yönleri Karadeniz geneli için sırasıyla Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Maksimum spektral pik enerjilerin yüksek değerlerinde yıllık ölçekte, kış, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde, Ocak, Mart, Nisan, Haziran, Ağustos ve Ekim aylarında Karadeniz genelinde artan eğilimin baskın olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3). Sonbaharda ve Şubat, Mayıs, Kasım, Aralık aylarında azalan eğilim hâkim olmasına rağmen Doğu Karadeniz'de bu süreçlerde de artan eğilim olduğu belirlenmiştir. Düşük maksimum spektral pik enerjiler de değişim oranları genelde %10-20 bandında kalmıştır. İlkbahar ve yaz mevsimleri ile Ocak-Nisan, Ağustos ve Ekim aylarında Karadeniz üzerinde daha çok artan eğilim; yıllık bazda, kış ve sonbaharda ayrıca Mayıs-Temmuz, Eylül, Kasım, Aralık aylarında azalan eğilimin hâkimiyeti söz konusudur. Mann-Kendall testine göre değerlendirme yaptığımızda özellikle ilkbahar, Ocak, Mart, Nisan, Ağustos ve Ekim için yenilikçi yöntemle benzer şekilde artan eğilim; sonbaharda Mayıs-Temmuz, Kasım ve Aralık için de azalan eğilimler daha baskın görülmektedir.

Ortalama spektral pik enerjilerin yüksek değerlerinde yıllık bazda, kış, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde, Ocak-Mart, Mayıs, Kasım ve Aralık aylarında tüm Karadeniz'de azalan eğilim türünün baskın olduğu ancak belirtilen zaman ölçeklerinde Doğu Karadeniz'de artan eğilimin görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, yaz mevsimi ile Nisan, Haziran, Ağustos-Ekim aylarında ise neredeyse Karadeniz'in tamamında artan eğilim durumu oluşmuştur. Düşük ortalama spektral pik enerjiler ise yıllık olarak, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde ve Ocak-Nisan, Ağustos ve Eylül aylarında artmaya eğilimlidir. Kış ve sonbahar mevsimleri ile Mayıs-Temmuz, Ekim-Aralık aylarında tüm Karadeniz üzerinde azalan eğilimin hâkimiyeti dikkat çekmektedir. Mayıs ve Haziran

ayları içinde azalan eğilim söz konusu olmasına rağmen Karadeniz'in güneybatı ile kuzeydoğu kesimlerinde artan eğilimlerde mevcuttur. Mann-Kendall testine göre özellikle ilkbahar, yaz mevsimleri ile Mart, Nisan, Ağustos ve Eylül aylarında artan eğilim; kış, sonbahar, Mayıs-Temmuz, Kasım ve Aralık için de azalan eğilimler belirlenmiştir. Her iki veri türü içinde özellikle ilkbahar, Nisan, Ağustos ve Eylül de görülen artan eğilimler ile sonbahar mevsimi ile Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık aylarında azalan eğilimler dikkat çekmektedir.

Maksimum pik periyotlar için SWAN ve ERA5 model çıktılarının farklı sonuçlar ortaya koyduğu zaman ölçekleri olmasına karşın yüksek değerlerin yıllık bazda, kış, ilkbahar ve yaz mevsimleri ile Ocak, Nisan, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında artan eğilimin baskınlığı dikkat çekmektedir (Çizelge 4.4). Düşük maksimum pik periyotlarda ise ilkbahar, yaz, Şubat, Mart, Nisan ve Ağustos için artan eğilim hâkimiyeti söz konusu olmuştur. Yüksek ortalama pik periyotlar, yıllık ölçekte, yaz mevsimi ile Mart, Nisan, Haziran-Ekim periyodunda Karadeniz'in büyük bölümünde artan eğilim, sonbahar, Mayıs ve Kasım döneminde ise azalan eğilim göstermektedir. Düşük ortalama pik periyotlar, ilkbahar ve yaz mevsimleri ile Ocak-Nisan, Haziran, Ağustos ve Eylül aylarında artan eğilim, kış mevsimi ile Temmuz ve Ekim-Aralık periyotlarında azalan eğilim etkisindedir.

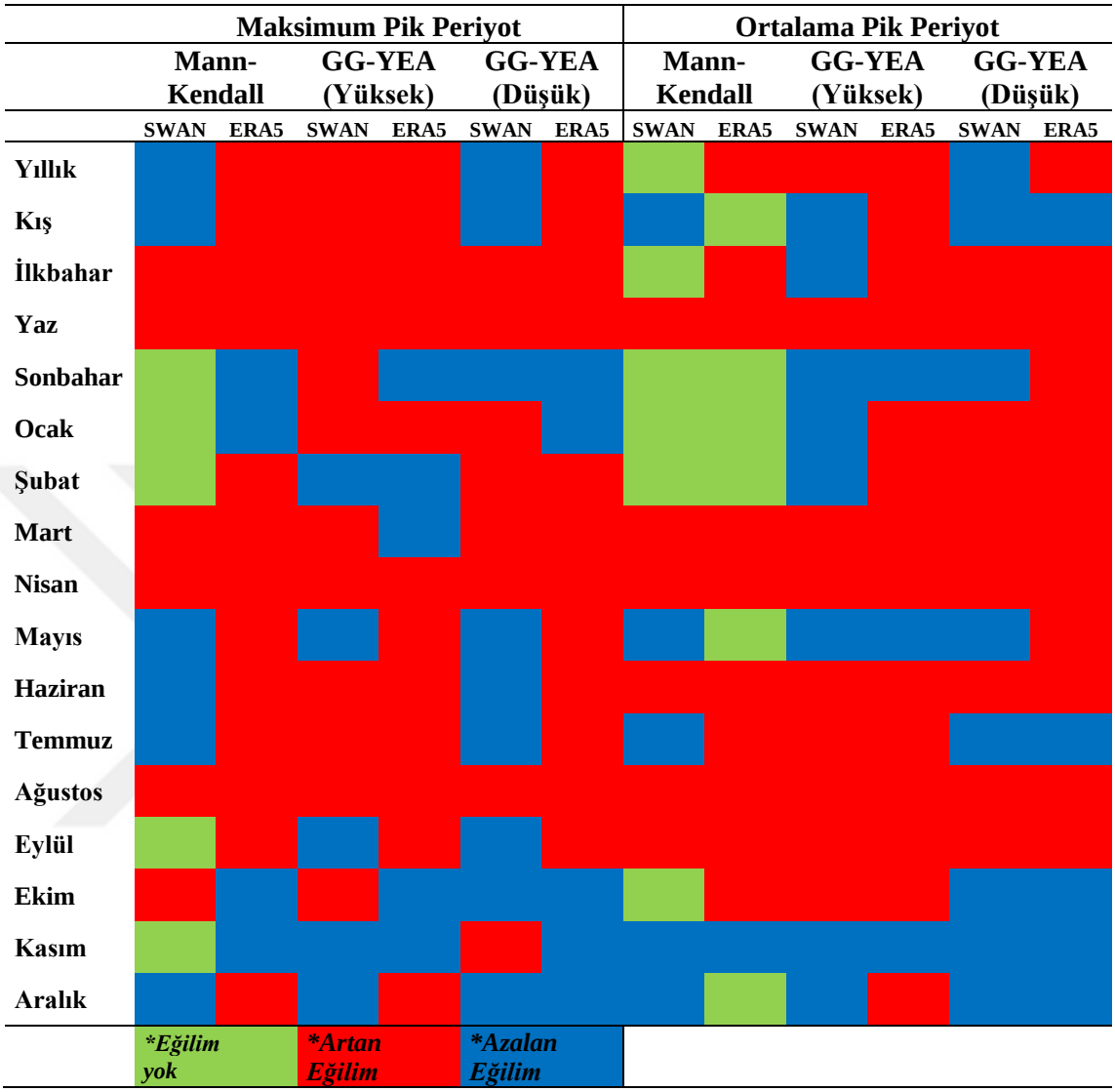
Özellikle yüksek spektral pik enerjilerin maksimum ve ortalamalarında tespit edilen artan eğilimlerin dalga spektrumunun şeklini dolayısıyla spektral pik enerjiyi etkileyen rüzgâr olaylarından kaynaklanabileceği ve son zamanlarda meydana gelen rüzgâr ve dalga iklimindeki ekstremlerin artmasıyla (IPCC, 2021) birlikte olayın küresel iklim değişikliği ile bağlantılı olabileceği düşünülmektedir. Spektral pik enerjide ortaya çıkan ve sonbahar mevsimi ile Mayıs, Kasım ve Aralık aylarındaki azalan eğilimler dışında Karadeniz genelinde artan eğilimin baskın olarak görülmesi, daha büyük pik enerjili dalganın kıyıya ulaşmasıyla mevcut kıyı yapılarında oluşan hasar miktarının büyümesi olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, bilindiği üzere dalga enerjisi dönüştürücüleri (DED) için dalga enerjisinin en yüksek/enerjik olduğu bölgeler dikkate alınmaktadır (Aristodemo ve Algieri Ferraro, 2018; Iglesias ve Carballo, 2010). Spektral pik enerji, toplam enerjiyi veya dalga gücünü tek başına tam olarak tanımlamak için kullanılamasa da, anlık deniz durumunda en yüksek enerji değerini verdiği için önemli çıkarımlar sunabilmektedir.

Karadeniz genelindeki genel artış eğilimi göz önüne alındığında, DED'lerin kurulması için uygun alanların oluştuğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. SWAN ve ERA5 modeli maksimum ve ortalama spektral pik enerjinin eğilim analizi sonuçlarına göre baskın eğilim yönleri

	Maksimum Spektral Pik Enerji						Ortalama Spektral Pik Enerji					
	Mann-Kendall		GG-YEA (Yüksek)		GG-YEA (Düşük)		Mann-Kendall		GG-YEA (Yüksek)		GG-YEA (Düşük)	
	SWAN	ERA5	SWAN	ERA5	SWAN	ERA5	SWAN	ERA5	SWAN	ERA5	SWAN	ERA5
Yıllık												
Kış												
İlkbahar												
Yaz												
Sonbahar												
Ocak												
Şubat												
Mart												
Nisan												
Mayıs												
Haziran												
Temmuz												
Ağustos												
Eylül												
Ekim												
Kasım												
Aralık												
	*Eğilim yok		*Artan Eğilim		*Azalan Eğilim							

Çizelge 4.4. SWAN ve ERA5 modeli maksimum ve ortalama pik periyodun eğilim analizi sonuçlarına göre baskın eğilim yönleri



Her iki spektrum parametresi de sonbahar mevsimi ile Mayıs ve Kasım aylarında azalmaya eğilimli ancak bunun dışında genel olarak artma eğilimindedir. Bu bağlamda dalgaların periyotlarının arttığı yani frekanslarının azaldığı anlaşılmaktadır. Dalga spektrumunda ise pik enerjinin artmasıyla spektral şeklin daha sivri bir hal aldığı ayrıca frekansın azalmasıyla soluğan (swell) dalgalarına ait spektruma yönelmeye başladığı düşünülmektedir. Soluğan dalgaları, üretim alanından uzaklaşarak uzak mesafeler ilerleyerek uzun bir periyoda ve daha düz bir tepeye sahip olan uzun dalgalardır. Genel olarak soluğan dalgaları 10 saniyeden daha büyük periyota sahiptir. Ayrıca uzun dalgalar

olarak soluğan dalgaları liman salınımları gibi durumlarda önemli bir tasarım problemi olabilir (CEM, 2012). Ancak, burada tamamen soluğan dalgalarına dönüşen bir deniz durumundan bahsetmek mümkün değildir. Bunun nedeni hem pik periyotların değişim oranlarının oldukça düşük bir aralıkta (±%5) değişmesi hem de Karadeniz'in fiziksel olarak sınırlı coğrafi boyutunun soluğan dalga oluşumunu sınırlaması olarak düşünülebilir.

4.4.1. Bölgesel ve küresel modellerin analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Tez çalışması sırasında bölgesel olarak çalıştırılan SWAN ile küresel ERA5 yeniden analiz veri setlerinin dalga spektrumlarından elde edilen spektral pik enerjiler ve pik periyotlar üzerine eğilim çalışması yapılmıştır. Bölgesel olarak nitelendirilen SWAN için Karadeniz ve Azak Denizi'ni temsil eden 36 istasyonda değerlendirme yapılmıştır. Yapılan Mann-Kendall ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi yöntemleri yıllık, mevsimlik ve aylık ölçekte ortalama ve uç değerleri temsil ettiği düşünülen maksimum parametreler üzerine uygulanmıştır.

ERA5 yeniden analiz verilerinden elde edilen sonuçlarla SWAN model çıktıları karşılaştırıldığında, sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçları dikkate alındığında yıllık olarak ERA5 sonuçlarının daha yüksek güven düzeyinde sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Şekil 4.4a ve Şekil 4.8a). Kış mevsiminde özellikle Güneydoğu Karadeniz de görülen artan eğilimler SWAN modeli sonuçlarıyla tam olarak uyuşmamaktadır (Şekil 4.4b ve Şekil 4.8b). Bunun dışında kalan mevsim ve aylarda oldukça yakın sonuçlar görülmüştür. Özellikle, Ocak ve Mart aylarında SWAN çıktılarının ERA5 modeli ile daha yakın olduğu dikkat çekmiştir (Şekil 4.4f, 4.4h ve Şekil 4.8f, 4.8h). Ortalama spektral pik enerjilerin Mann-Kendall test sonuçlarına göre bölgesel ve küresel modellerin bulgularının neredeyse aynı olması söz konusudur. Ortalama değerlerin bütüncül yaklaşımda veriyi daha iyi temsil etmesi nedeniyle maksimum değerlere kıyasla bu beklenen bir durumdur. Ancak ilginç bir şekilde yalnızca sonbahar mevsimi için orta ve Batı Karadeniz'de %90 güven seviyesinin üstünde ERA5 bulgularının azalan eğilim göstermesi ile SWAN sonuçları uyuşmamaktadır (Şekil 4.5e ve Şekil 4.9e). Hem maksimum hem de ortalama spektral pik enerji göz önüne alındığında ERA5 bulgularının genel olarak daha yüksek güven seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Ancak, maksimum spektral pik enerji Nisan, Eylül ve

Aralık ayında; ortalama spektral pik enerji yaz mevsimi ile Nisan, Mayıs, Ağustos ve Aralık ayında SWAN modeli Mann-Kendall sonuçları ERA5 modeline göre daha yüksek güven seviyesinde ortaya çıkmıştır.

Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi uygulanarak elde edilen "Düşük" ve "Yüksek" spektral pik enerji bulgularının Mann-Kendall testinde olduğu gibi modellerin çıktılarının oldukça yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yüksek maksimum pik enerjiler her iki tür model çıktıları için neredeyse aynı sonuçları vermiştir. Yalnızca SWAN çıktıları ile yaz mevsiminde Türkiye kıyılarında ve Eylül ayında Güneydoğu Karadeniz'de bulunan %10'u aşmayan azalan eğilimler ERA5 sonuçlarına göre artan eğilim şeklindedir (Şekil 4.12d, 4.12n ve Şekil 4.20d, 4.20n). Ancak her iki model için eğilim türü ve değişim oranlarına göre birbirini desteklediği açıktır. Düşük maksimum pik enerjilerin, Temmuz ayı için SWAN çıktıları ile ERA5'in alansal sonuçları ile karşılaştırıldığında eğilim türü yönünden küçük farklılıklar gösterdiği noktalar bulunmaktadır (Şekil 4.13l ve Şekil 4.21l). Yüksek ortalama pik enerji için bulgular değerlendirildiğinde kış mevsiminde ERA5 modeli için Karadeniz'in güneydoğusunda görülen artan eğilimler SWAN modellinde azalan eğilim olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.14b ve Şekil 4.22b). Bunun dışında eğilim türü ve değişim oranı açısından diğer zaman ölçeklerinde sonuçlar benzemektedir. Düşük ortalama spektral pik enerjilerin ERA5 çıktılarına göre kış mevsiminde tüm Karadeniz'de, yaz mevsiminde Batı Karadeniz'de ve Şubat ayında Doğu Karadeniz'de görülen azalan eğilimler SWAN çıktılarında artan eğilim olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.15d, 4.15g ve Şekil 4.23d, 4.23g). İfade edilen zaman ölçekleri dışında analiz sonuçları oldukça yakındır. Her iki eğilim analizinde de yukarıda bahsedildiği gibi bölgesel ve küresel modellerin çıktılarından elde edilen sonuçları birbirini destekler niteliktedir.

Pik periyotlar için yapılan eğilim çalışmalarının sonuçlarına göre spektral pik enerjide yakalanan benzerlik durumuna tüm zaman ölçeklerinde tam olarak ulaşılamadığı söylenebilir. Maksimum pik periyotların Mann-Kendall sonuçlarına bakıldığında SWAN ve ERA5 sonuçlarının genellikle benzemediği söylenebilir. Küresel ERA5 yeniden analizde yıllık ölçekte Karadeniz'in orta ve batı kesiminde bulunan artan eğilim, SWAN modeli için eğilim yok olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.6a ve Şekil 4.10a). Ayrıca ilkbahar ve yaz aylarında görülen yüksek güven seviyesindeki artan eğilimler bölgesel modellerde

çok düşük olan %50 güven seviyesinde bulunabilmiştir (Şekil 4.6c, 4.16d ve Şekil 4.10c, 4.10d). Mayıs, Haziran, Temmuz, Ekim ve Aralık aylarında tamamen farklı eğilim türü ve güven seviyesinde sonuçlar görülmektedir (Şekil 4.6j-l, 4.6o, 4.6r ve Şekil 4.10j-l, 4.10o, 4.10r). Ortalama pik periyotların Mann-Kendall sonuçları incelendiğinde ise maksimum parametrelere göre daha benzer sonuçlar ortaya çıktığı tespit edilmiştir. ERA5 çıktılarına göre yıllık ölçekte Karadeniz'in kuzeybatı ve doğu kıyıları dışında görülen %85 güven seviyesinin üstündeki artan eğilim SWAN sonuçlarına göre belirgin bir eğilim yok olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.7a ve Şekil 4.11a). Bunun dışında kış mevsimi ile Kasım ayında bölgesel modelde görülen %50-80 güven seviyelerindeki azalan eğilim ERA5 sonuçlarında eğilim yok şeklindedir (Şekil 4.7b, 4.7p ve Şekil 4.11b, 4.11p). Ayrıca ERA5 modeli sonuçlarının SWAN sonuçlarına göre daha yüksek güven seviyelerinde eğilimler tespit ettiği söylenebilir.

Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi uygulanarak elde edilen "Düşük" ve "Yüksek" pik periyot için benzer sonuçların yanında oldukça farklı sonuçlar da ortaya çıkmıştır. İlkbahar ve sonbahar mevsimleri ile Mayıs, Eylül, Ekim ve Aralık aylarında yüksek maksimum pik periyotlar için neredeyse tamamen farklı sonuçlar tespit edilmiştir (Şekil 4.16c, 4.16d, 4.16j, 4.16n-o, 4.16r ve Şekil 4.24c, 4.24d, 4.24j, 4.24n-o, 4.24r). Yüksek ortalama pik periyotların hem bölgesel hem de küresel model çıktılarında oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, kış mevsimi ile Ocak ayında tam tersi sonuçlar ortaya çıkmıştır (Şekil 4.18b, 4.18f ve Şekil 4.26b, 4.26f). Bahsedilen zaman ölçekleri dışında sonuçlar uyuşmaktadır. Düşük ortalama pik periyotlarda da yıllık bazda, sonbahar mevsiminde ve Temmuz ayında görülen farklar dışında sonuçlar hem değişim oranı hem de eğilim türü yönünden birbiriyle uyumlu olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.19a, 4.19e, 4.19l ve Şekil 4.27a, 4.27e, 4.27l).

Pik periyotun maksimum değerleri için yapılan analizlerde spektral pik enerjide görülen benzerlik durumu yakalanamamıştır. Ancak ortalama değerlerin analizinde bu durum geçerli değildir. SWAN modelinde spektrumun frekans aralığı 0,04 Hz ile 0,625 Hz (1,61 sn ile 25 sn) ve ERA5 modelinde 0,034 Hz ile 0,547 Hz (1,828 sn ile 29,4 sn) arasında değiştiği daha önce belirtilmişti, buna göre özellikle maksimum değerlerde ortaya çıkan farklılıklar SWAN ve ERA5 modelinin spektrumlarındaki frekans aralığının değişkenlik göstermesinden dolayı olabileceği düşünülmektedir.

4.4.2. Klasik ve yenilikçi eğilim yöntemlerinin değerlendirilmesi

Klasik yöntem olarak bilinen Mann-Kendall testi araştırmacılar tarafından uzun yıllardır sıklıkla kullanılmaktadır. Yenilikçi eğilim yöntemleri ise son 10 yıllık dönemde ortaya çıkmış ve bazı avantajları nedeniyle araştırmacılar tarafından giderek daha fazla tercih edilen bir yöntem haline gelmeye başlamıştır. Yenilikçi eğilim analiz yöntemleri temelde zaman serisini eşit bir şekilde ayırıp artan düzende sıraladıktan sonra grafik üzerinde görsel olarak ilk yarının ikinci yarıya göre durumunu "Düşük", "Orta" ve "Yüksek" değerler için yorumlayarak ilgili parametre hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Bu tez çalışmasında kullanılan Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi yönteminde ise "Düşük" ve "Yüksek" değerler istatistiksel olarak ayrılmakta ve değişim oranları hesaplanabilmektedir.

İncelenen spektral pik enerji ve pik periyot parametrelerinin her ikisinde de klasik ve yenilikçi yaklaşımlardan elde edilen sonuçları kıyaslandığında Mann-Kendall ile belirlenemeyen bazı alanlarda/istasyonlarda yenilikçi yaklaşım ile "Düşük" ve "Yüksek" değerlerde aslında bir değişim olduğu ortaya çıktığı görülmektedir.

Yöntemler ile ilgili dikkat çeken bir diğer hususta Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi yaklaşımında değişim oranları yıllık ve mevsimlik değerlendirmede genelde %40'ı aşmazken aylık değerlendirmede özellikle maksimum pik enerjiler için bakıldığında %100'ün üzerine çıkan değişim oranları görülmektedir. Ortalama pik enerjiler için ise tüm zaman ölçeklerinde genel olarak ±%20 değişim bandında olmasıyla birlikte %50 değerini pek aşmamaktadır. Değişim oranlarının artan eğilim türü için %100'ün üzerine çıkan daha yüksek değerler verirken azalan eğilim türü için bu oranın en fazla %50'ye çıktığı ancak genel olarak %30'u aşmadığı dikkat çekmektedir. Pik periyotlar için ise değişim oranının genellikle %15'i aşmadığı ve ±%5 bandında değiştiği belirlenmiştir. Mann-Kendall testinde güven seviyesi ve yenilikçi yöntem ile değişim oranına göre artan eğilimlerin, azalan eğilimlere kıyasla daha şiddetli olduğu görülmüştür.

4.4.3. Dalga parametreleri üzerine yapılmış önceki çalışmalar ile karşılaştırılması

Dünyanın birçok yerinden araştırmacılar son on yılda dalga parametreleri üzerine eğilim çalışmaları yapmışlardır. Karadeniz üzerine yapılan çalışmalarda belirgin dalga

yüksekliği, rüzgâr hızı ve dalga gücü parametrelerine odaklanılmıştır. Ancak, spektral pik enerji üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu bölüm içinde literatürde daha önce Karadeniz'de dalga parametreleri üzerine yapılan çalışmalar ile kıyaslama yapılacaktır. Spektral pik enerjinin doğrudan spektrumun şekliyle bağlantılı olmasından dolayı belirgin dalga yüksekliği, rüzgâr hızı ve dalga gücü parametreleri ile yapılan eğilim çalışmalarında benzer durumların söz konusu olup olmadığının araştırılması amaçlanmıştır. Burada alansal değerler veren ERA5 yeniden analizinin spektral pik enerjileri için analiz sonuçları dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Aydoğan ve Ayat (2018), belirgin dalga yüksekliği üzerine yaptıkları çalışmalarında Theil-Sen ve Mann-Kendall yöntemine göre yıllık ortalama normalize edilmiş H_s için Doğu Karadeniz'de artan ve Batı Karadeniz'de azalan bir eğilim bulmuşlardır. Bu sonucun yıllık ortalama pik enerjilerin sonuçlarını desteklediği görülmektedir. Ayrıca, yıllık %95 aşılmama ihtimalli normalize Hs sonuçları, Karadeniz'in kuzey kesiminde azalan, orta ve güney kesimlerinde ise artan bir eğilim olduğunu göstermektedir. Bu bulgular ise GG-YEA yöntemindeki Yüksek maksimum spektral pik enerjilerin sonuçları dışında benzerlik göstermemektedir. Ocak ayı içinde tüm analizler için yapılan iki çalışmada tam tersi bir eğilim söz konusudur. Şubat-Aralık döneminde GG-YEA için yüksek maksimum ve ortalama spektral pik enerjinin eğilim deseni, genel olarak ortalama normalleştirilmiş H_s'in Theil-Sen sonuçlarıyla desteklenmektedir. Mann-Kendall çıktıları karşılaştırıldığında, Mart-Mayıs, Temmuz-Eylül ve Kasım-Aralık dönemlerindeki eğilim türlerine göre ilişkili görülmektedir. Eğilim türü ve bundan etkilenen bölgelerin %95 aşılmama ihtimalli normalize H_s analiz sonuçları, özellikle maksimum spektral pik enerji testi sonuçları için benzerdir.

Divinsky ve Kosyan (2020) tarafından araştırılan rüzgâr dalga gücünün uzun vadeli eğilimi, genel olarak eğilim yönleri açısından bu çalışmanın bulguları ile ilişkilidir. Yıllık bazda, ortalama spektral pik enerjinin Mann-Kendall sonuçları ve özellikle soluğan (swell) dalgaları için ortalama rüzgâr dalgası gücü (P_{ort}) eğilimi benzerdir. Araştırmacılar çalışmalarında "Trend yok" kavramını hafif artan, "Durağan" kavramını ise hafif azalan olarak değerlendirmişlerdir. Bu nedenle, spektral pik enerjilerdeki eğilimlerin dalga gücüne göre daha hassas olduğu ve geniş alanı etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca ortalama spektral pik enerjilerin de ortalama rüzgâr dalgası gücünün karışık deniz durumu için

yapılan analizi ile ilişkili olduğu söylenebilir. Aylık bazda farklılıklar görüldüğü ancak genel olarak eğilimin alansal dağılımının benzerlik gösterdiği görülmüştür. Spektral pik enerjinin Mann-Kendall sonuçları ile dalga gücünün sonuçları özellikle Mart-Mayıs, Ağustos-Eylül ve Kasım-Aralık dönemlerinde ortalama veriler için ve Şubat, Mayıs, Haziran ve Aralık ayları dışında maksimum veriler için benzerdir. Ayrıca, araştırmacıların analiz tekniklerinin sadece Mann-Kendall testine dayandığı belirtilmelidir.

Çarpar ve arkadaşları (2020) Karadeniz üzerine 1979-2016 yıllarını kapsayacak şekilde x yönünden gelen rüzgâr hızı (U10) ile ilgili bir eğilim çalışması yürütmüşlerdir. Yıllık olarak inceledikleri CFSR ve ERA-Interim rüzgâr verileri için, Batı Karadeniz'de artan Doğu Karadeniz'de azalan eğilim tespit etmişlerdir. Ortalama ve %95'lik U10 rüzgâr hızının analiz sonuçları ile ortalama spektral pik enerji sonuçlarının eğilim desenlerinin ilişkili olduğu söylenebilir. Mart-Mayıs, Ağustos-Eylül ve Kasım-Aralık aylarında ERA-Interim'in $U10_{ort}$ analiz sonuçları ile maksimum ve ortalama spektral pik enerjinin Mann-Kendall sonuçları düşükte olsa bir benzerlik göstermektedir. Ocak ayında ise Aydoğan ve Ayat'ın (2018) çalışmasında olduğu gibi bu çalışmanın sonuçları ile tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır. Ayrıca, Ocak ayı dışında spektral pik enerjilerin sonuçlarının ERA-Interim'in $U10_{ort}$ ve $U10_{95}$ analiz sonuçları ile CFSR sonuçlarına kıyasla daha yakın bir ilişki bulunmaktadır. Analiz edilen verilerin süresi aynı olmadığı için ortaya çıkan farklılıkların beklenebileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR

Karadeniz üzerindeki spektral pik enerji ve pik periyodun eğilimine odaklanılan bu tez çalışması kapsamında SWAN spektral dalga modeli ile ERA5 yeniden analizinin dalga spektrumları kullanılmıştır. Uzun dönemli değişimler Mann-Kendall testi ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi ile analiz edilmiştir. 1979-2020 yıllarını kapsayan ve Karadeniz ile Azak Denizi'ni temsil eden SWAN modelinde 36 istasyon ile ERA5 yeniden analizi ile 0,25°x0,25° alansal çözünürlüğe sahip 876 sayısal ağ noktasında çalışılmıştır. Yıllık, mevsimlik ve aylık zaman ölçeklerinde maksimum ve ortalama parametreler için gerçekleştiren analizler sonuçlarında elde edilen bilgiler aşağıdaki gibi sunulmuştur;

- Spektral pik enerjilerin Karadeniz genelinde ilkbahar ve yaz mevsimleri ile Ocak, Mart, Nisan, Ağustos ve Eylül aylarında artma, kış ve sonbahar mevsimleri ile Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık aylarında ise azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca pik periyotlar neredeyse tüm zaman ölçeklerinde artan eğilim, sonbahar mevsimi ile Mayıs ve Kasım aylarında ise azalan eğilim göstermektedirler.
- Bölgesel SWAN modeli ile küresel ERA5 modeli çıktıları üzerine analizi gerçekleştirilen spektral pik enerjilerin eğilim analiz sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Bununla birlikte ortalama pik periyotlar içinde aynı durum geçerli olmuş, ancak maksimum pik periyotlar için yapılan analizlerde farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu durumun dalga spektrumlarının frekans aralıklarının iki model için ayrı değerlerde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Maksimum pik enerjilerin Mann-Kendall sonuçlarının kullanılan modeller için oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Ortalama spektral pik enerjiler için de neredeyse aynı sonuçlar çıkarken yalnızca sonbaharda ERA5 çıktılarının SWAN çıktıları ile uyuşmadığı görülmüştür. Ayrıca maksimum pik periyot için küresel ve bölgesel model çıktılarının çok fazla uyuşmadığı, ortalama pik periyot için ise yıllık ölçek, kış mevsimi ve Kasım ayı dışında sonuçlar birbirine daha yakın çıkmıştır.
- Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi yöntemi uygulanarak elde edilen "Düşük" ve "Yüksek" spektral pik enerji bulgularının bölgesel ve

küresel model çıktılarının hem eğilim türü hem de değişim oranı yönünden oldukça yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Pik periyotlarda ise özellikle yıllık ölçekte, kış mevsimi ile Ocak ve Şubat aylarında ERA5 çıktılarında görülen eğilimler bölgesel model çıktılarıyla oldukça farklıyken, ortalama pik periyotların sonuçlarının genel olarak birbirine yakın olduğu görülmüştür.

- Yenilikçi yöntem ile klasik Mann-Kendall yöntemi kıyaslandığında yenilikçi eğilim analizi yönteminin verilerin alt kategorilerde incelenmesi ile daha ayrıntılı bilgilere ulaşma imkânı verdiği görülmüştür.
- Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi yaklaşımında pik enerjiler için değişim oranları yıllık ve mevsimlik zaman aralıklarında genelde %40'ı aşmazken aylık ölçeklerde bakıldığında %100'ün üzerine çıkan değişim oranları görülmektedir. Böylece zaman periyodunu kısalttığımızda geniş zamanda görülemeyen değişimleri de belirleme durumu ortaya çıkmıştır. Ayrıca pik periyotların değişim oranlarının ±%5 bandında değişmekte ve çoğunlukla %15'i aşmamaktır.
- Her iki analiz sonucuna göre artan eğilimin, Mann-Kendall için daha yüksek güven seviyelerinde, GG-YEA için daha büyük değişim oranlarıyla ifade edildiği ancak azalan eğilim oranlarında bu durum geçerli olmadığı, sonuç olarak artan eğilimlerin daha şiddetli olduğu tespit edilmiştir.
- Karadeniz üzerindeki dalgaların pik periyotlarının daha yüksek değerlere doğru kaydığı ve pik enerjilerinin arttığı görülmüştür. Karadeniz üzerindeki bu artış eğilimleri genelde tüm bölgeyi etkilerken özellikle Doğu Karadeniz'de daha şiddetli bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durumda, artış gösteren spektral pik enerjinin gerçekleştiği pik frekans değeri mevcut kıyı ve deniz yapılarının rezonans frekansı ile eşleşmesi halinde yapılara ciddi zararlar verebilecektir.

Spektral pik enerji ve pik periyodun eğilimlerinin, Kuzey Atlantik Salınımı (NAO), Arktik Salınımı (AO), Antarktika Salınımı (AAO), Atlantik Çoklu Onyıllık Salınımı (AMO), Pasifik Kuzey Amerika Paterni (PNA), El Niño ve La Niña gibi iklim endeksleriyle arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi bu parametrelerde meydana gelen değişimlerin nedenlerinin net bir şekilde ortaya konulması açısından faydalı olacaktır. Aynı zamanda, iklim değişikliği senaryoları ile gelecekteki spektrumların incelenmesinin ve güncel analiz yöntemleriyle değerlendirilmesinin kıyı/deniz

yapılarının tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir durum olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Akpınar, A. (2012). *Karadeniz'de dalga modellemesi ve dalga gücü potansiyelinin belirlenmesi (Doktora Tezi)*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Akpınar, A. ve Bingölbali, B. (2016). Long-term variations of wind and wave conditions in the coastal regions of the Black Sea. *Natural Hazards 2016 84:1*, *84*(1), 69–92. doi:10.1007/S11069-016-2407-9

Amarouche, K., Bingölbali, B. ve Akpınar, A. (2021). New wind-wave climate records in the Western Mediterranean Sea. *Climate Dynamics 2021*, *1*, 1–24. doi:10.1007/S00382-021-05997-1

Anoop, T. R., Kumar, V. S., Shanas, P. R. ve Johnson, G. (2015). Surface Wave Climatology and Its Variability in the North Indian Ocean Based on ERA-Interim Reanalysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *32*(7), 1372–1385. doi:10.1175/JTECH-D-14-00212.1

Aristodemo, F. ve Algieri Ferraro, D. (2018). Feasibility of WEC installations for domestic and public electrical supplies: A case study off the Calabrian coast. *Renewable Energy*, *121*, 261–285. doi:10.1016/J.RENENE.2018.01.012

Arkhipkin, V. S., Gippius, F. N., Koltermann, K. P. ve Surkova, G. V. (2014). Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Hazards Earth Syst. Sci*, *14*, 2883–2897. doi:10.5194/nhess-14-2883-2014

Ay, M. ve Kisi, O. (2015). Investigation of trend analysis of monthly total precipitation by an innovative method. *Theoretical and Applied Climatology*, *120*(3–4), 617–629. doi:10.1007/s00704-014-1198-8

Aydoğan, B. ve Ayat, B. (2018). Spatial variability of long-term trends of significant wave heights in the Black Sea. *Applied Ocean Research*, *79*, 20–35. doi:10.1016/j.apor.2018.07.001

Battjes J. A. ve Janssen J. P. F. M. (1978). Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves. *Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering* içinde , Proceedings (ss. 569–587). New York: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780872621909.034

Bingölbali, B. (2018). *Karadeniz'in güney batı kıyıları için iç içe geçmiş karelaj sistemli dalga tahmin modelinin geliştirilmesi ve dalga iklim analizi (Yüksek Lisans Tezi)*. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Boukhanovsky, A. V., Lopatoukhin, L. J. ve Guedes Soares, C. (2007). Spectral wave climate of the North Sea. *Applied Ocean Research*, *29*(3), 146–154. doi:10.1016/J.APOR.2007.08.004

Bretschneider, C. L. (1959). *Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves*. Beach Erosion Board, Corps of Engineers.

Caloiero, T., Aristodemo, F. ve Ferraro, D. A. (2019). Trend analysis of significant wave height and energy period in southern Italy. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-019-02879-9

Caloiero, T., Coscarelli, R. ve Ferrari, E. (2018). Application of the Innovative Trend Analysis Method for the Trend Analysis of Rainfall Anomalies in Southern Italy. *Water Resources Management*, *32*(15), 4971–4983. doi:10.1007/s11269-018-2117-z

Çarpar, T., Ayat, B. ve Aydoğan, B. (2020). Spatio-Seasonal Variations in Long-Term Trends of Offshore Wind Speeds Over the Black Sea; an Inter-Comparison of Two Reanalysis Data. *Pure and Applied Geophysics 2019 177:6*, *177*(6), 3013–3037. doi:10.1007/S00024-019-02361-7

CEM. (2012). Coastal Engineering Manual Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100).

Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)*. Elsevier.

Dabanlı, İ., Şen, Z., Yeleğen, M. Ö., Şişman, E., Selek, B. ve Güçlü, Y. S. (2016). Trend Assessment by the Innovative-Şen Method. *Water Resources Management*, *30*(14), 5193–5203. doi:10.1007/S11269-016-1478-4/FIGURES/4

De Leo, F., Besio, G., Briganti, R. ve Vanem, E. (2021). Non-stationary extreme value analysis of sea states based on linear trends. Analysis of annual maxima series of significant wave height and peak period in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, *167*, 103896. doi:10.1016/J.COASTALENG.2021.103896

De Leo, F., Besio, G. ve Mentaschi, L. (2021). Trends and variability of ocean waves under RCP8.5 emission scenario in the Mediterranean Sea. *Ocean Dynamics*. doi:10.1007/s10236-020-01419-8

De Leo, F., De Leo, A., Besio, G. ve Briganti, R. (2020). Detection and quantification of trends in time series of significant wave heights: An application in the Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, *202*. doi:10.1016/J.OCEANENG.2020.107155

Divinsky, B. V. ve Kosyan, R. D. (2017). Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years. *Continental Shelf Research*, *136*, 1–19. doi:10.1016/J.CSR.2017.01.008

Divinsky, B. V. ve Kosyan, R. D. (2020). Climatic trends in the fluctuations of wind waves power in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *235*, 106577. doi:10.1016/J.ECSS.2019.106577

Dodet, G., Bertin, X. ve Taborda, R. (2010). Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, *31*(3–4), 120–131. doi:10.1016/J.OCEMOD.2009.10.010

ECMWF. (2020). Reanalysis. 17 Mayıs 2022 tarihinde https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis adresinden erişildi.

Eldeberky, Y. (1996). *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*. https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A707ca57d-81c3-4103-bc6e-aae1c90fce63 adresinden erişildi.

Gao, H., Liang, B. ve Shao, Z. (2021). A global climate analysis of wave parameters with a focus on wave period from 1979 to 2018. *Applied Ocean Research*, *111*, 102652. doi:10.1016/J.APOR.2021.102652

George, J. ve Kumar, V. S. (2020a). Climatology of wave period in the Arabian Sea and its variability during the recent 40 years. *Ocean Engineering*, *216*. doi:10.1016/J.OCEANENG.2020.108014

George, J. ve Kumar, V. S. (2020b). Climatology of wave period in the Arabian Sea and its variability during the recent 40 years. *Ocean Engineering*, *216*, 108014. doi:10.1016/J.OCEANENG.2020.108014

Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures, Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 15*. World Scientific.

Güçlü, Y. S. (2020). Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA. *Journal of Hydrology*, *584*, 124674. doi:10.1016/J.JHYDROL.2020.124674

Guillou, N. (2020). Estimating wave energy flux from significant wave height and peak period. *Renewable Energy*, *155*, 1383–1393. doi:10.1016/J.RENENE.2020.03.124

Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., …

Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project ({JONSWAP}). *Dtsch. Hydrogr. Z, A8*(Suppl), 1–95.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H. ve Barnett, T. P. (1985). Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Specturm. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. *Journal of Physical Oceanography*, *15*(11), 1378–1391. doi:10.1175/1520-0485(1985)015<1378:CAPOTN>2.0.CO;2

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., … Thépaut, J.-N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. doi:10.24381/cds.adbb2d47

Hoegh-Guldberg, O., Cai, R., Poloczanska, E. S., Brewer, P. G., Sundby, S., Hilmi, K., … Kissel, E. (2014). *The Ocean. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Cambridge University Press*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Hong, B. ve Zhang, J. (2021). Long-Term Trends of Sea Surface Wind in the Northern South China Sea under the Background of Climate Change. *Journal of Marine Science and Engineering 2021, Vol. 9, Page 752*, *9*(7), 752. doi:10.3390/JMSE9070752

Iglesias, G. ve Carballo, R. (2010). Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay. *Renewable Energy*, *35*(11), 2490–2500. doi:10.1016/J.RENENE.2010.03.016

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. doi:10.1017/9781009157896.001

Islek, F., Yuksel, Y. ve Sahin, C. (2020). Spatiotemporal long-term trends of extreme wind characteristics over the Black Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *90*, 101132. doi:10.1016/J.DYNATMOCE.2020.101132

Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C. ve Guner, H. A. A. (2021). Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea using two different wind fields. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, *94*, 101165. doi:10.1016/J.DYNATMOCE.2020.101165

Joubert, J. R. (2008). An investigation of the wave energy resource on the South African coast, focusing on the spatial distribution of the south west coast. Stellenbosch: University of Stellenbosch.

Kejian, W. ve Shunli, L. (1997). Fluctuations of peak energy and peak frequency of local wavelet energy spectrum for wind waves. *Acta Oceanologica Sinica*, *16*(4), 429–439.

Kendall, M. (1975). Rank correlation methods. *Griffin, London*. https://www.worldcat.org/title/rank-correlation-methods/oclc/3827024 adresinden erişildi.

Komen, G J, Hasselmann, K. ve Hasselmann, K. (1984). On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, *14*(8), 1271–1285. doi:10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2

Komen, Gerbrand J, Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. ve

Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press.

Kumar, P., Zhang, H. ve Kim, K. I. (2014). Spectral Density Analysis for Wave Characteristics in Pohang New Harbor. *Pure and Applied Geophysics*, *171*(7), 1169–1185. doi:10.1007/s00024-013-0710-x

Kumar, V. S. ve Anoop, T. R. (2015). Spatial and temporal variations of wave height in shelf seas around India. *Natural Hazards*, *78*(3), 1693–1706. doi:10.1007/S11069-015-1796-5

Lobeto, H., Menendez, M. ve Losada, I. J. (2021). Future behavior of wind wave extremes due to climate change. *Scientific Reports*, *11*(1). doi:10.1038/S41598-021-86524-4

Mallick, J., Talukdar, S., Almesfer, M. K., Alsubih, M., Ahmed, M. ve Islam, A. R. M. T. (2021). Identification of rainfall homogenous regions in Saudi Arabia for experimenting and improving trend detection techniques. *Environmental Science and Pollution Research 2021*, *1*, 1–26. doi:10.1007/S11356-021-17609-W

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend Author (s): Henry B . Mann Published by : The Econometric Society Stable. *Econometrica*, *13*(3), 245–259. http://www.jstor.com/stable/1907187 adresinden erişildi.

Martucci, G., Carniel, S., Chiggiato, J., Sclavo, M., Lionello, P. ve Galati, M. B. (2010). Statistical trend analysis and extreme distribution of significant wave height from 1958 to 1999 - An application to the Italian Seas. *Ocean Science*, *6*(2), 525–538. doi:10.5194/OS-6-525-2010

Mei, C. C. (1989). *The applied dynamics of ocean surface waves* (C. 1). World scientific.

Meucci, A., Young, I. R., Aarnes, O. J. ve Breivik, Ø. (2020). Comparison of Wind Speed and Wave Height Trends from Twentieth-Century Models and Satellite Altimeters. *Journal of Climate*, *33*(2), 611–624. doi:10.1175/JCLI-D-19-0540.1

Nair, M. A. ve Kumar, V. S. (2017). Wave spectral shapes in the coastal waters based on measured data off Karwar on the western coast of India. *Ocean Science*, *13*(3), 365–378. doi:10.5194/OS-13-365-2017

Onea, F. ve Rusu, L. (2019). Long-Term Analysis of the Black Sea Weather Windows. *Journal of Marine Science and Engineering 2019, Vol. 7, Page 303*, *7*(9), 303. doi:10.3390/JMSE7090303

Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü. (1997). Oceanography of the Black Sea: a review of some recent results. *Earth-Science Reviews*, *42*(4), 231–272.

Perez, J., Menendez, M. ve Losada, I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, *124*, 1–11. doi:10.1016/J.COASTALENG.2017.03.005

Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Source: Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, *28*(2), 126–135.

Şan, M., Akçay, F., Linh, N. T. T., Kankal, M. ve Pham, Q. B. (2021). Innovative and polygonal trend analyses applications for rainfall data in Vietnam. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-021-03574-4

Semedo, A., Elj, K. S. ve Rutgersson, A. (2011). A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. *American Meteorological Society*. doi:10.1175/2010JCLI3718.1

Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, *17*(9), 1042–1046. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556

Şen, Z., Şişman, E. ve Dabanlı, İ. (2019). Innovative Polygon Trend Analysis (IPTA) and

applications. *Journal of Hydrology*, *575*(November 2018), 202–210. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.028

SWAN Team. (2020). *Swan scientific and technical documentation, swan cycle iii version SWAN, Scientific and Technical Documentation, SWAN Cycle III version 41.31A. Delft University of Technology*.

URL-1. (y.y.). -. https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are adresinden erişildi.

Vanem, E. ve Walker, S. E. (2013). Identifying trends in the ocean wave climate by time series analyses of significant wave height data. *Ocean Engineering*, *61*, 148–160. doi:10.1016/J.OCEANENG.2012.12.042

Vieira, F., Cavalcante, G., Campos, E. ve Taveira-Pinto, F. (2020). Wave energy flux variability and trend along the United Arab Emirates coastline based on a 40-year hindcast. *Renewable Energy*, *160*, 1194–1205. doi:10.1016/J.RENENE.2020.07.072

Wen, S. C., Zhang, D., Sun, S., Guan, C. ve Wu, K. (1994). Form of deep-water wind-wave frequency spectrum, I. Derivation of spectrum. *Progress in Natural Science*, *4*(4), 407–427.

WMO. (1998). World meteorological organization guide to wave analysis and forecasting.

Wu, L., Li, X. ve Wu, T. (2016). South China Sea Wave Height Trends Analysis Using 20CR Reanalysis, 57–61. doi:10.2991/ICACIE-16.2016.14

Yüksel, Y. ve Çevik, E. Ö. (2009). *Kıyı Mühendisliği*. Istanbul, Türkiye: Beta.

Zeinoddini, M., Ranjbar, P., Khalili, H., Ranaei, A., Golpour, H. ve Fakheri, J. (2015). Remaining fatigue life assessment of aging fixed steel offshore jacket platforms. *http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2015.1009122*, *12*(2), 223–238. doi:10.1080/15732479.2015.1009122

EKLER

EK 1 ERA5 ve SWAN için maksimum spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları
EK 2 ERA5 ve SWAN için ortalama spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları

EK 1: ERA5 ve SWAN için maksimum spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları

	Yıllık	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
A1	0,96	0,98	0,97	0,89	0,93	0,98	0,94	0,97	0,96	0,93	0,92	0,95	0,89	0,96	0,95	0,96	0,98
A2	0,42	0,48	0,67	0,88	0,73	0,74	0,68	0,72	0,88	0,74	0,84	0,88	0,94	0,89	0,85	0,84	0,68
A3	0,59	0,69	0,71	0,90	0,62	0,88	0,73	0,84	0,80	0,83	0,87	0,94	0,85	0,85	0,80	0,84	0,65
A4	0,78	0,76	0,80	0,63	0,82	0,89	0,83	0,86	0,67	0,63	0,82	0,80	0,56	0,87	0,82	0,84	0,68
A5	0,69	0,75	0,56	0,78	0,87	0,90	0,84	0,72	0,59	0,79	0,77	0,89	0,68	0,85	0,74	0,90	0,84
A6	0,37	0,33	0,38	0,19	0,32	0,32	0,40	0,52	0,67	0,54	0,26	0,40	0,55	0,53	0,60	0,57	0,49
A7	0,38	0,39	0,47	0,44	0,47	0,59	0,44	0,46	0,55	0,40	0,31	0,48	0,45	0,61	0,29	0,60	0,60
A8	0,91	0,96	0,91	0,85	0,87	0,95	0,97	0,97	0,88	0,91	0,90	0,88	0,89	0,90	0,94	0,92	0,97
A9	0,85	0,87	0,89	0,94	0,89	0,95	0,93	0,95	0,92	0,88	0,95	0,93	0,80	0,91	0,94	0,94	0,91
A10	0,88	0,84	0,93	0,94	0,96	0,93	0,92	0,95	0,95	0,89	0,94	0,96	0,88	0,95	0,90	0,95	0,90
A11	0,83	0,81	0,86	0,93	0,90	0,92	0,87	0,91	0,90	0,90	0,96	0,95	0,92	0,96	0,92	0,92	0,92
A12	0,75	0,66	0,87	0,96	0,88	0,85	0,86	0,90	0,86	0,90	0,95	0,94	0,89	0,94	0,89	0,88	0,92
A13	0,85	0,78	0,86	0,92	0,88	0,89	0,91	0,91	0,82	0,90	0,96	0,94	0,90	0,96	0,93	0,91	0,95
A14	0,86	0,90	0,91	0,79	0,73	0,92	0,94	0,91	0,90	0,89	0,82	0,90	0,88	0,93	0,86	0,92	0,97
A15	0,85	0,95	0,92	0,89	0,88	0,91	0,94	0,94	0,96	0,90	0,87	0,93	0,91	0,88	0,93	0,92	0,93
A16	0,83	0,90	0,91	0,90	0,93	0,94	0,91	0,96	0,94	0,90	0,94	0,95	0,87	0,89	0,91	0,95	0,90
A17	0,91	0,88	0,84	0,91	0,93	0,93	0,93	0,95	0,92	0,84	0,94	0,93	0,85	0,93	0,94	0,93	0,94
A18	0,85	0,87	0,90	0,91	0,93	0,94	0,96	0,96	0,90	0,93	0,92	0,97	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94
A19	0,83	0,90	0,90	0,89	0,92	0,87	0,92	0,95	0,88	0,92	0,94	0,96	0,90	0,94	0,95	0,96	0,94
A20	0,80	0,83	0,87	0,93	0,91	0,85	0,93	0,96	0,92	0,93	0,95	0,95	0,89	0,96	0,95	0,92	0,89
A21	0,87	0,89	0,88	0,93	0,82	0,94	0,94	0,92	0,95	0,90	0,91	0,85	0,91	0,84	0,93	0,88	0,95
A22	0,77	0,88	0,86	0,93	0,80	0,82	0,94	0,89	0,92	0,91	0,93	0,94	0,90	0,85	0,88	0,92	0,91
A23	0,47	0,66	0,78	0,77	0,82	0,78	0,81	0,78	0,88	0,86	0,83	0,88	0,85	0,84	0,74	0,92	0,72
A24	0,64	0,79	0,85	0,84	0,87	0,87	0,93	0,89	0,86	0,82	0,89	0,89	0,84	0,90	0,89	0,95	0,85
A25	0,68	0,77	0,89	0,85	0,87	0,91	0,92	0,90	0,85	0,90	0,93	0,88	0,89	0,92	0,90	0,95	0,93

EK 2: ERA5 ve SWAN için ortalama spektral pik enerjideki Spearman korelasyon katsayıları

	Yıllık	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
A1	0,98	0,54	0,90	0,89	0,32	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98
A2	0,86	0,54	0,72	0,87	0,20	0,91	0,86	0,88	0,97	0,95	0,95	0,97	0,97	0,97	0,95	0,93	0,88
A3	0,90	0,40	0,67	0,78	0,39	0,94	0,89	0,91	0,90	0,88	0,93	0,90	0,93	0,92	0,91	0,92	0,85
A4	0,93	0,38	0,74	0,89	0,06	0,92	0,94	0,91	0,84	0,84	0,91	0,92	0,90	0,92	0,94	0,96	0,92
A5	0,92	0,49	0,81	0,70	0,55	0,94	0,89	0,88	0,83	0,86	0,83	0,86	0,77	0,90	0,83	0,97	0,90
A6	0,42	0,09	0,41	0,70	0,20	0,45	0,51	0,54	0,70	0,70	0,54	0,73	0,75	0,74	0,83	0,67	0,55
A7	0,23	0,09	0,31	0,30	0,07	0,41	0,29	0,35	0,60	0,54	0,33	0,39	0,32	0,59	0,73	0,52	0,47
A8	0,97	0,43	0,88	0,88	0,03	0,97	0,97	0,98	0,96	0,96	0,95	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,98
A9	0,98	0,38	0,82	0,82	0,29	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95	0,93	0,93	0,93	0,96	0,97	0,98	0,96
A10	0,97	0,46	0,78	0,87	0,32	0,97	0,97	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,92	0,98	0,97	0,97	0,98
A11	0,89	0,34	0,79	0,86	0,40	0,95	0,97	0,93	0,94	0,97	0,99	0,98	0,92	0,98	0,96	0,96	0,97
A12	0,85	0,36	0,77	0,82	0,38	0,95	0,94	0,93	0,93	0,95	0,98	0,96	0,94	0,96	0,96	0,96	0,94
A13	0,96	0,39	0,87	0,79	0,57	0,97	0,96	0,98	0,97	0,96	0,99	0,96	0,96	0,98	0,93	0,97	0,96
A14	0,93	0,43	0,87	0,75	0,02	0,97	0,96	0,97	0,96	0,96	0,90	0,93	0,94	0,97	0,95	0,96	0,98
A15	0,97	0,39	0,91	0,78	0,19	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,99	0,98
A16	0,96	0,47	0,85	0,86	0,34	0,98	0,98	0,95	0,95	0,96	0,95	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	0,97
A17	0,96	0,36	0,71	0,83	0,40	0,96	0,97	0,92	0,94	0,94	0,97	0,95	0,92	0,97	0,98	0,98	0,97
A18	0,92	0,34	0,80	0,82	0,39	0,97	0,98	0,93	0,95	0,96	0,99	0,98	0,94	0,99	0,97	0,98	0,97
A19	0,92	0,34	0,79	0,81	0,49	0,97	0,96	0,96	0,93	0,96	0,98	0,97	0,92	0,98	0,97	0,98	0,96
A20	0,93	0,31	0,78	0,76	0,50	0,96	0,97	0,94	0,93	0,96	0,99	0,97	0,95	0,99	0,96	0,99	0,95
A21	0,95	0,50	0,87	0,71	0,08	0,96	0,95	0,97	0,98	0,97	0,95	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,97
A22	0,91	0,51	0,85	0,78	0,16	0,90	0,92	0,93	0,95	0,95	0,96	0,94	0,90	0,91	0,94	0,96	0,93
A23	0,62	0,28	0,81	0,74	0,35	0,92	0,88	0,86	0,92	0,89	0,92	0,96	0,87	0,90	0,87	0,94	0,82
A24	0,91	0,37	0,81	0,77	0,50	0,96	0,97	0,93	0,96	0,96	0,95	0,97	0,94	0,96	0,98	0,98	0,96
A25	0,91	0,33	0,78	0,77	0,59	0,96	0,96	0,93	0,89	0,96	0,96	0,96	0,94	0,96	0,97	0,97	0,91