



Long-term (1979-2019) changes in the Black Sea storminess

Kadir Tahtacı^{ID}, Berna Ayat*^{ID}

Yıldız Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, 34220, İstanbul, Turkey

Highlights:

- Long-term changes in the Black Sea storminess
- Seasonal variability of the long-term changes in the Black Sea storminess
- Relations of the Black Sea storminess to the climate indices

Keywords:

- Sea storm
- Trend analysis
- The Black Sea
- Climate oscillation index

Article Info:

Research Article
Received: 16.06.2021
Accepted: 28.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.952585

Acknowledgement:

The authors thank the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Weather Service for providing oscillation index data and Dr. Burak Aydoğan for providing the wave data.

Correspondence:

Author: Berna Ayat
e-mail: bayat@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5174

Graphical/Tabular Abstract

Storms cause erosion on the coasts and change the shoreline, causing serious damage to coastal structures and watercraft and causing loss of life and property. Global climate change is known to have an impact on storm characteristics.

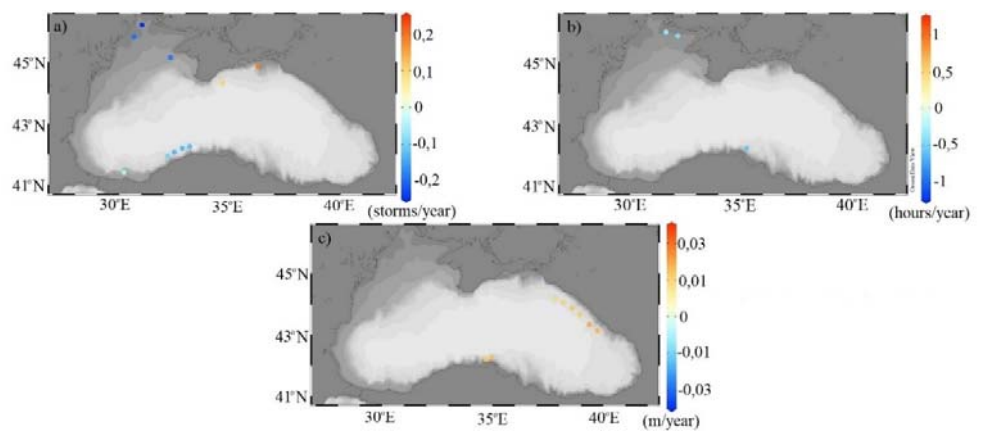


Figure A. Long-term trends in (a) annual number of storms, b) annual maximum storm durations, c) annual maximum wave heights of storms. Trend values of 90% significance or above are presented.

Purpose: This study aims to reveal the long-term (1979-2019) trends in the characteristics of sea storms along the Black Sea shoreline. Long-term trends of storm durations, wave heights, and an annual number of storms were studied for this purpose. The objectives of the study also include revealing the seasonal characteristics of the long-term trends and the relations to the climate oscillation indices.

Theory and Methods:

Singular storms were determined by considering the threshold value at which wave height exceeds twice the average wave height. Thus, annual storm numbers, average, total, and maximum storm durations, average, average peak, and maximum wave heights of storms were obtained for each year from time series consisting of hourly data obtained from the spectral wave model. Theil-Sen method was used to determine long-term upward or downward trends in these parameters, and the Mann-Kendall test was used to determine the significance levels of the determining trends. Analyses were carried out on a monthly basis to determine the seasonality of storminess in change. The relations of the climate long-term oscillation indices with the storminess of the Black Sea were determined.

Results:

The results of the study indicated a downward trend of 2 storms/decade along the coast of Odessa and the west of the Crimean Peninsula, and a 1 cm/decade increase in the average wave heights of storms. Seasonal analysis revealed a statistically significant upward trend in all storm parameters in the August-October term in the western Black Sea. The number of storms and wave heights showed positive correlations at a confidence level of 95% with PNA and AMO indices along the northern coasts of the Black Sea.

Conclusion:

Sea storms present statistically significant long-term trends along the Black Sea shoreline.



Karadeniz'in fırtınalılığındaki uzun dönemli (1979-2019) değişimler

Kadir Tahtacı^{ID}, Berna Ayat*^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Karadeniz'in fırtınalılığındaki uzun dönemli değişimler
- Karadeniz'in fırtınalılığındaki değişimlerin mevsimsel karakteristikleri
- Karadeniz'in fırtınalılığındaki değişimlerin iklim uzun dönem salınım indeksleri ile ilişkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.06.2021

Kabul: 28.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.952585

Anahtar Kelimeler:

Deniz fırtınası,
eğilim analizi,
Karadeniz,
iklim salınım indeksi

ÖZ

Fırtınalar, kıyılarda erozyona sebep olup kıyı çizgisini değiştirmekte, kıyı yapılarına ve deniz taşıtlarına ciddi zararlar verip can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Küresel iklim değişikliğinin fırtına karakteristikleri üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada Karadeniz kıyıları boyunca 1979-2019 yılları arasındaki deniz fırtınaları incelenmiştir. Bunun için spektral dalga modelinden elde edilmiş saatlik dalga karakteristiklerinden oluşan zaman serileri kullanılmıştır. Tekil fırtınaların belirlenmesinde dalga yüksekliğinin, ortalama dalga yüksekliğinin iki katını aştığı eşik değer dikkate alınmıştır. Yıllık fırtına sayıları, ortalama, toplam ve maksimum fırtına süreleri, fırtınaların ortalama, ortalama pik ve maksimum dalga yükseklikleri elde edilmiştir. Bu parametrelerdeki uzun dönemli artış ve azalma eğilimlerinin belirlenmesi için Theil-Sen yöntemi ve belirlenen eğilimlerin anlamlılık düzeylerinin belirlenmesi için ise Mann-Kendall Testi kullanılmıştır. Analizler fırtınalılığın değişimindeki mevsimselliği ortaya koymak için aylık bazda gerçekleştirilmiştir. İklim uzun dönem salınım indekslerinin Karadeniz'in fırtınalılığı ile olan ilişkileri belirlenmiştir. Sonuçlar Karadeniz'in kuzeyindeki Odessa kıyısı ve Kırım Yarımadası'nın batısında fırtına sayılarında 2 adet/on yıl mertebesinde azalma, fırtınaların ortalama dalga yüksekliklerinde ise 1 cm/on yıl değerinde artış eğilimi olduğunu göstermiştir. Mevsimsel analizler, Karadeniz'in batısında ağustos-ekim dönemi fırtına parametrelerinin tümünde anlamlı artış eğilimi bulunduğunu ortaya koymaktadır. Karadeniz'de oluşan fırtınaların sayıları ve dalga yükseklikleri Karadeniz'in kuzey kıyılarında PNA ve AMO indeksleri ile %95 anlamlılık düzeyinde pozitif korelasyonlar göstermiştir.

Long-term (1979-2019) changes in the Black Sea storminess

H I G H L I G H T S

- Long-term changes in the Black Sea storminess
- Seasonal variability of the long-term changes in the Black Sea storminess
- Relations of the Black Sea storminess to the climate indices

Article Info

Research Article

Received: 16.06.2021

Accepted: 28.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.952585

Keywords:

Sea Storm,
trend analysis,
the Black Sea,
climate oscillation index

ABSTRACT

causing loss of life and property. Global climate change is known to have an impact on storm characteristics. In this study, sea storms between 1979 and 2019 were identified along the Black Sea coast. For this aim, time series consisting of hourly data obtained from the spectral wave model were used. In determining singular storms, the threshold value at which wave height exceeds twice the average wave height was taken into account. Thus, annual storm numbers, average, total and maximum storm durations, average, average peak, and maximum wave heights of storms were obtained for each year. Theil-Sen method was used to determine long-term upward or downward trends in these parameters, and the Mann-Kendall test was used to determine the significance levels of the determined trends. Analyses were carried out on a monthly basis to determine the seasonality of storminess in change. The relations of the climate long-term oscillation indices with the storminess of the Black Sea were determined. The results of the study showed a downward trend of 2 storms/decade in storm numbers on the coast of Odessa and the west of the Crimean Peninsula, and a 1 cm/decade increase in the average wave heights of storms. Seasonal analysis reveals that there is a statistically significant upward trend in all storm parameters in the August-October term in the west of the Black Sea. The number of storms and wave heights in the Black Sea showed positive correlations at a confidence level of 95% with PNA and AMO indices along the northern coasts of the Black Sea.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fırtınalar rüzgârların etkisiyle oluşan, kıyı bölgelerini dinamik olarak etkileyen doğa olaylarıdır. Fırtınaların etkilerine bakıldığında, mevcut veya inşaat halindeki kıyı yapılarının tahrip olduğu, kıyı bölgelerinde oluşan erozyonlar sonucu kıyı çizgisinin değiştiği, katı madde taşınımından dolayı kıyı yapılarının işlevselliğini yitirdiği ve gemilerin hasara uğraması sonucu denizcilik faaliyetlerinin zarar gördüğü bilinmektedir.

Fosil yakıt kullanımları ve diğer insan faaliyetleri nedeniyle atmosferde artan CO₂ ve diğer gazlar dünya üzerinde sera etkisinde bulunarak küresel ısınmaya neden olmaktadır. Küresel ısınma sonucu buzullar erimekte ve deniz seviyeleri artmakta olup, bu etkilere paralel olarak iklimsel değişikliklerin yanı sıra fırtına karakteristiklerinde de değişiklikler görülmektedir. İlerleyen yıllarda da küresel ısınmanın ve buna bağlı olarak fırtına iklimlerindeki değişikliklerin devam edeceği öngörülmektedir [1]. Denizcilik faaliyetleri iklimsel değişimlerden olumsuz etkilenmektedir. Rata ve Rusu [2], 2001-2017 yılları arasında Karadeniz’de oluşan kazaları incelemiş, kaza sayılarının son yıllarda artan bir eğilim gösterdiğini, kazaların çoğunlukla sonbahar-kış döneminde görüldüğünü ve kazaların çoğunlukla rüzgâr dalgaları nedeniyle meydana geldiğini belirtmiştir. Küresel iklim değişikliği sonrası oluşan fırtınaların, insanların yaşam alanlarındaki etkileri artış göstermektedir. Lin ve Shullman [3], New York kıyıları için yaptıkları taşkın risk analizi sonucu fırtına iklimindeki değişimin risk ve belirsizliği artırabileceğini açıklamışlardır. Karim ve Mimura [4], iklim değişikliği sonucu, Bangladeş’in batı bölgesinde olası bir fırtına için, taşkın etki alanının %15,3 oranla artacağını ve taşkın derinliğinin kıyı şeridinden 20 km içeride %22,7 kadar genişleyeceğini belirlemişlerdir. Pugatch [5], Meksika’da yaptığı çalışmada fırtınalarla ilişkili ölümlerin, devam eden iklim değişikliği senaryolarına göre %52’ye kadar bir artış veya %10’a kadar düşüş gösterebileceğini belirtmiştir. İklim değişikliklerindeki etkiler Karadeniz kıyılarında da görülmüştür. Görmüş ve Ayat [6], Karadeniz’in güneybatı kıyılarında yaptıkları kırılma analizi sonucu Güneybatı Karadeniz’in iklim değişikliğine karşı hassas bir bölge olduğunu bildirmişlerdir. Tătui vd. [7], Karadeniz kıyılarında 33 yıl için (1984-2017) yaptıkları kırılma analizi sonucu, Karadeniz kıyılarının %19’unun (800 km uzunluğundaki bir kıyı şeridi) erozyondan ciddi derecede etkilendiğini ve bu alanların çoğunlukla Romanya (%37), Ukrayna (%29) ve Gürcistan (%26) kıyılarında bulunduğunu açıklamıştır. Bu bilgiler ışığında fırtına iklimini anlama ve geleceğe dair tahminlerde bulunma açısından uzun dönem dalga verileri büyük önem taşımaktadır. Uzun dönem dalga verileri, gözlemler (şamandıra, radar vb.), ampirik yöntemler (formüller, abaklar), fiziksel modeller ve spektral dalga modelleriyle elde edilebilmektedir. Bu veri setleri ve araçlar, deniz yapılarının tasarımı ve planlanması, kıyı erozyonu ve rehabilitasyon çalışmaları için daha güvenilir tasarım dalga yükseklikleri belirlenebilmesine yardımcı

olmasının yanı sıra, gelecekteki dalga ikliminin daha iyi bir tahminini sağlamak için dalga özelliklerinin uzun vadeli eğilimlerinin değerlendirilebilmesine imkân sağlamaktadır.

Bilimsel araştırmalarda fırtınalar için ortak bir matematiksel tanım bulunmamaktadır. Fırtına olaylarının tanımı, rüzgâr hızı, dalga yüksekliği ve süre gibi parametreler aracılığıyla eşik değerler kullanılarak yapılırken, deniz dalgaları kullanılarak belirlenen fırtınalardaki dalga eşik değerleri, geçmişte yapılan çalışmaların buldukları bölgedeki deniz şartlarına göre farklılıklar göstermiştir. Tekil fırtınaları belirleyebilmek için dalga yüksekliği eşik değerini Haerens vd. [8] Belçika kıyıları için 3,75 m, Del Río vd. [9] Atlas Okyanusu’nun İspanya kıyıları için 1,5 m, Corbella ve Stretch [10] Güney Afrika kıyıları için 3,5 m, Ferreira [11] Portekiz kıyıları için 6 m, Molina vd. [12] Akdeniz’in İspanya kıyıları için 1,5 m, Contento vd. [13] Orta ve Batı Akdeniz kıyıları için 4 m, Ponce de León ve Guedes Soares [14] Kuzey Yarımküre kıyıları için 9 m, Almeida vd. [15] Portekiz kıyıları için 3 m, ve Zainescu vd. [16] Romanya kıyıları için 1,6 m olarak belirlemişlerdir. Valchev ve Trifonava [17] ve Trifonova vd. [18] Karadeniz’in batısında yaptıkları çalışmada Varna kıyılarındaki morfolojik değişimlere neden olan fırtına eşiğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Trifonova vd. [18] sonuç olarak, kıyı çizgisi değişimleri ile fırtına şiddeti arasında kesin bir ilişki belirlenemediğini ancak kıyı profilindeki değişimlerin farklı fırtına şiddetlerine karşı daha hassas olduğunu, $0,7 \times 10^6$ J/m² toplam enerjiye sahip olan fırtınaların kıyı morfolojisinde geri döndürülemeyecek değişimler yaratma potansiyeli olduğunu bildirmişlerdir. Laface, Arena ve Guedes Soares [19], Atlas Okyanusu, Pasifik Okyanusu ve Akdeniz’deki fırtınalarla yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada fırtına tanımı için dalga eşiği olarak ortalama dalga yüksekliğinin (H_{ort}) 1,5 katını ($1,5 \times H_{ort}$) kullanmıştır. Araştırmacılar bu değer yerine ortalama dalga yüksekliğinin 2 veya 3 katının kullanılmasının da yanlış olmadığını belirtmişlerdir.

Geçmiş yıllarda uzun dönem rüzgâr ve dalga verileri kullanılarak fırtına sürelerine ilişkin tespitlerde bulunulmuştur. Zheng, Pan ve Li [20], Çapraz Kalibre Edilmiş Çok Platformlu (CCMP) rüzgâr verilerini kullanarak 1988-2011 dönemi için küresel okyanus deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki rüzgâr hızının (U_{10}) iklimsel değişimlerini bölgesel ve mevsimsel olarak araştırmıştır. U_{10} ’un 3,35 cm/s/yıl oranında arttığını belirtmişlerdir [20]. Ganea, Mereuta ve Rusu [21], Avrupa’daki denizlerin kıyıları boyunca rüzgâr ve dalga koşullarının analizi için altı tanesi Karadeniz sahil şeridinde bulunan 40 farklı konuma ait 35 yıllık (1983-2017) verileri Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi’nden (ECMWF) temin etmiş ve sonuç olarak Kuzeybatı Karadeniz’de U_{10} ’da 1 cm/s/on yıl mertebesinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma eğilimi bulmuşlardır. Çarpar, Ayat ve Aydoğan [22], 1979 ve 2016 yılları arasını kapsayan 37 yıllık dönem için Karadeniz’de rüzgâr hızlarının uzamsal ve mevsimsel değişimlerini ECMWF ERA-Interim ve ABD Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri’nden (CFRS) temin ettikleri iki yeniden analiz

verisini kullanarak karşılaştırmıştır. Araştırmacılar rüzgâr hızlarının Karadeniz yüzey alanının %28 ile %36'sı üzerindeki kesim için arttığını, yüzey alanının %2 ile %4'ü üzerindeki kesim için ise azaldığını belirtmişlerdir [22]. Ağırbaş [23], 1970 ve 2010 arasındaki 40 yıllık dönem için Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında bulunan yedi kıyı istasyonunda ölçülen rüzgâr verilerinin uzun dönemli değişimlerini analiz etmiştir. Araştırma sonuçlarına göre U_{10} Güneybatı Karadeniz'de 2 cm/s/yıl anlamlı bir artış ve Güneydoğu Karadeniz'de 3 cm/s/yıl anlamlı bir azalma eğilimi sergilemektedir [23]. Akpınar ve Bingölbali [24], 1979 ve 2009 yılları arasında kapsayan 31 yıl için, Karadeniz'in kıyı bölgelerindeki rüzgâr ve dalga koşullarının uzun dönemli değişimlerini incelemiştir. U_{10} 'un, Karadeniz'in güneydoğu kıyılarında ve Kırım Yarımadası çevresinde sırasıyla 0,398 cm/s/yıl-0,813 cm/s/yıl ve 0,902 cm/s/yıl-1,337 cm/s/yıl aralığında istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir [24]. Aydoğan ve Ayat [25], Karadeniz'de belirgin dalga yüksekliğindeki uzun dönemli değişimleri incelemiştir. Araştırmacılar ortalama belirgin dalga yüksekliği değerinin Karadeniz'in doğusunda (%1,6/yıl'a kadar) arttığını, batısında ise (%1,2/yıl'a kadar) azaldığını açıklamışlardır. Divinsky ve Kosyan [26] Karadeniz'de dalga ikliminin uzamsal olarak homojen olmadığını ve yıllararası salınımların batıda daha belirgin olduğunu bildirmişlerdir. Divinsky ve Kosyan [27] daha sonra dalga gücünün uzun dönemli değişimlerini analiz ettikleri çalışma sonucunda dalga gücünün Karadeniz'in kuzeydoğusunda %0,4/yıl mertebesinde bir hızla artış eğilimi gösterdiğini bildirmişlerdir. Zainescu vd. [16], Tuna Deltası kıyısında yaptıkları fırtına iklimi çalışmasında sonuç olarak ekstrem dalga yüksekliğine sahip fırtınaların çoğunlukla kuzeydoğu ile güneydoğu arasındaki bir yön diliminden (50° ile 130°) geldiğini tespit etmişlerdir. Valchev, Trifonova ve Andreeva [28], 1948 ve 2010 yılları arasında kapsayan 63 yılda Batı Karadeniz'de oluşan fırtınalardaki değişimleri araştırmış fakat istatistiksel olarak anlamlı bir artış veya azalma eğilimi bulamamışlardır. Saprykina vd. [29], Karadeniz'in doğu kıyıları için dalga iklimindeki değişkenliği, 1979'dan 2016'ya kadar olan 38 yıllık dönem boyunca incelemiş ve dalga ikliminin konumsal farklılık gösterdiğini, bu bakımdan Doğu Karadeniz'in kuzeydoğu, kuzeybatı ve güney olmak üzere üç bölgeye ayrılabilceğini belirtmişlerdir.

Daha önce Karadeniz'de yapılan iklimsel çalışmalar çoğunlukla rüzgâr hızları ve dalga yüksekliklerindeki değişimlere odaklanmakta, fırtına karakteristiklerindeki uzun dönemli değişimleri dikkate alan çalışmalar ise yerel ve kısıtlı kalmaktadır. Bu kapsamda Karadeniz'de fırtına iklimindeki değişikliklerin daha iyi anlaşılması için fırtına sayıları ve süreleri gibi farklı fırtına karakteristiklerini de dikkate alan kapsamlı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada Karadeniz kıyıları boyunca, toplam 95 konum için fırtına karakteristiklerinde son 41 yılda meydana gelen uzun dönemli değişimlerin ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca iklim uzun dönem salınım indekslerinin Karadeniz'in fırtınalılığı ile olan ilişkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2150

2. ÇALIŞMA ALANI, VERİLER VE YÖNTEM (STUDY AREA, DATA AND METHOD)

2.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Çalışma alanı 27°-42° Doğu ile 40,5°-47° Kuzey koordinatları arasında kalan Karadeniz havzasını kapsamaktadır. Karadeniz, 423.000 km² yüzölçümüne ve 555.000 km³ hacme sahip olup, ortalama derinliği 1.315 m, maksimum derinliği ise 2.258 m'dir [30]. Karadeniz'in doğu-batı yöndeki uzunluğu maksimum 1.175 km ve kuzey-güney yöndeki en kısa mesafe yaklaşık 260 km'dir. Karadeniz'in batimetri ve deniz etrafındaki kara alanlarının yükseklik bilgileriyle, Karadeniz'e kıyısı olan ülkeler, kıyılardaki önemli şehirler, komşu denizler ve denize dökülen başlıca nehirler Şekil 1'de gösterilmiştir.

Asya ile Avrupa kıtaları arasında yer alan Karadeniz'in, kuzeyinde Ukrayna, kuzeydoğusunda Rusya, doğusunda Gürcistan, güneyinde Türkiye, batısında ise Bulgaristan ve Romanya bulunmaktadır. Karadeniz kıyı şeridinin toplam uzunluğu (Azak ve Marmara denizleri hariç) 4.987 km'dir [31]. Karadeniz'in rüzgâr iklimi incelendiğinde, batı kıyılarda daha yüksek rüzgâr hızları görülmektedir [32]. Uzun dönemli değişimlere bakıldığında rüzgâr hızları, Karadeniz'in batı kıyılarında anlamlı bir azalma, doğu kıyılarında ise anlamlı bir artış eğilimindedir [22]. Dalga iklimi açısından Karadeniz'in kuzeydoğu kesimi homojen değilken, güneydoğu kesimi daha homojen bir görüntü vermektedir [29]. Karadeniz'in doğu kıyılarında dalga enerjisi düşük olup, enerji kıyı boyunca batıya doğru artmakta, güneybatı kıyılarında en yüksek değerlere ulaşmaktadır [33].

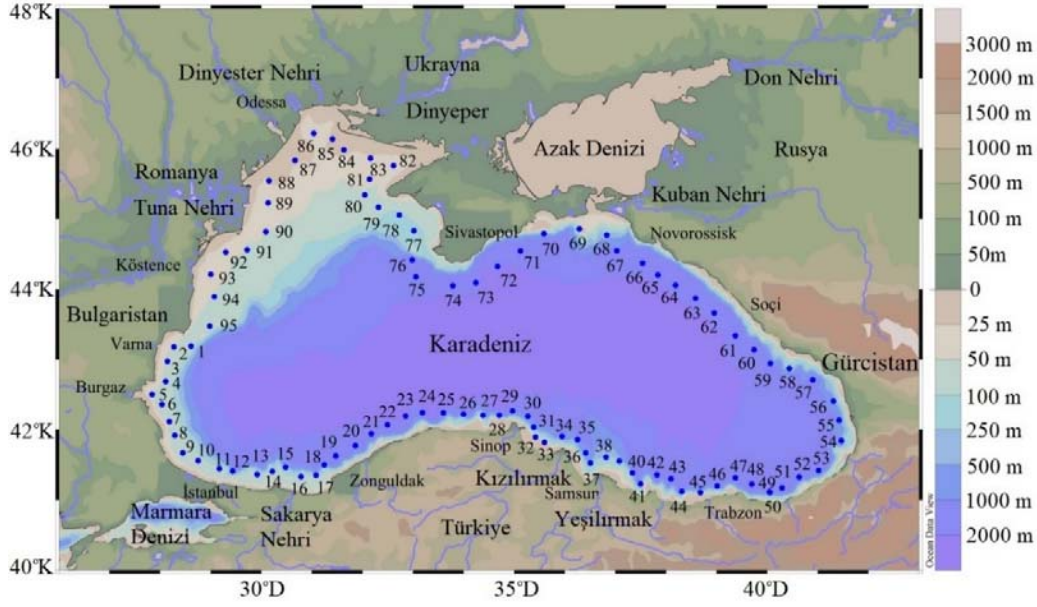
2.2. Veriler (Data)

Çalışmada tüm Karadeniz'i kapsayan detaylı bir istatistiksel analiz yapmak amacıyla Karadeniz kıyılarında 95 konum seçilmiştir (Şekil 1). Bu konumlar seçilirken önemli şehirler, limanlar, deltalar ve boğazlar dikkate alınmış olup, konumların derinlikleri buldukları bölgedeki batimetriye göre farklılık göstermiştir. Tüm bu konumlar için 1979-2019 yılları arasında kapsayan, dalga verileri zaman serileri üçüncü nesil spektral dalga modeli SWAN [36] 41.20 versiyonu [37] kullanılarak Karadeniz için kurulmuş olan modelden [34, 35] elde edilmiştir. SWAN modeli dalga denkleminin (Eş. 1) faz ortalamalı çözümüne dayanmaktadır.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial C_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Eş. 1'de N dalga hareketinin yoğunluğunu, \vec{x} iki boyutlu konumu, σ frekansı, θ yönü, C_g dalga grup hızını ve S ise enerji kazanım ve kayıplarını ifade etmektedir. S, rüzgâr enerjisinin transferi ile dalga gelişimi ve çoklu dalga etkileşimleri gibi etkileri ve dalga kırılması, köpüklenme ve taban sürtünmesi gibi enerji kayıplarını içermektedir.

Çalışma alanı 9.029 adet eleman ve 5.560 adet düğüm noktasından oluşan, homojen olmayan ve kıyıları boyunca



Şekil 1. Çalışma alanı ve seçilen çalışma konumları (Study area and selected study locations)

sıklaştırılmış yapılandırılmamış bir çözüm ağı kullanılarak ayrılaştırılmıştır [35]. Hesap ağının ortalama eleman alanı 51 km² ve en küçük eleman alanı ise 1 km²'dir. Derinlik verileri Okyanusların Genel Batimetrik Çizelgeleri [38] veri tabanından 30 ark saniye çözünürlükte elde edilmiş ve oluşturulan hesap ağına enterpole edilmiştir [35].

Modelde girdi olarak ERA 5 [39] veri setinden elde edilmiş, deniz yüzeyinden 10 m yükseklikte yeniden analiz verilerinin rüzgâr hızı bileşenleri kullanılmıştır. Rüzgâr alanlarının zamansal çözünürlüğü 1 saat ve uzamsal çözünürlüğü ise 0,25°×0,25°'dir.

Frekans düzleminde ayrıştırma için 32 eşit yön dilimi, 0,05-1 Hz. aralığında logaritmik olarak değişen 35 frekans değeri dikkate alınmıştır. Çözümler durağan olmayan modda, 60 dakika zaman aralığı ve herbir zaman adımında üç iterasyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde rüzgâr dalgalarının oluşumu ve büyümesi, bu dalgaların taban sürtünmesi ve dalga kırılması nedeniyle enerji sönümlenmesi, dalgaların dörtlü etkileşimi, sığlaşması, dönmesi ve kırılmasına ilişkin fiziksel süreçler dikkate alınmıştır. Model parameterizasyonunda GEN3 ST6 fiziği [40] dikkate alınmıştır. Spektral dalga modelinden elde edilen dalga verilerinin doğrulanması amacıyla T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından İstanbul (41,29°K ve 29,16°D) ve Samsun (46°K ve 35°D) konumlarında yerleştirilmiş şamandıralardan 10.03.2015 ile 20.03.2016 tarihleri arasında elde edilmiş dalga ölçümleri kullanılmıştır [35]. Model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçümlerle karşılaştırılması ile korelasyon katsayıları ve ortalama mutlak hatalar hesaplanmıştır. Korelasyon katsayıları İstanbul ve Samsun istasyonlarında sırasıyla 0,95 ve 0,91, ortalama mutlak hatalar ise yine sırasıyla 0,14 ve 0,62 m olarak elde edilmiştir [35]. Model kurulumu ve

parameterizasyonuna ilişkin daha fazla bilgi için Aydoğan ve Ayat [35]'e bakılabilir.

Karadeniz'in fırtınalılığının iklim uzun dönem salınım indeksleri ile olan ilişkisini incelemek amacıyla analizlerden elde edilen sonuçlar ile kuzey yarımkürede yer alan iklim uzun dönem salınım indeksleri arasındaki korelasyonlar değerlendirilmiştir. Çalışmada değerlendirmeye alınan indeksler: Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) [41], Doğu Atlantik/Batı Rusya Salınımı (EA/WR) [41], Doğu Atlantik Salınımı (EA) [42], Pasifik/Kuzey Amerikan Salınımı (PNA) [42], Atlantik Çoklu On yıllık Salınımı (AMO) [43] olarak seçilmiştir. İklim uzun dönem salınım indeksleriyle ilgili tüm veriler Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi Fiziksel Bilimler Laboratuvarı'ndan (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>) temin edilmiştir.

2.3. Eğilim, Anlamlılık ve Korelasyon Analizleri (Trend, Significance and Correlation Analyses)

Çalışmada ilk olarak, seçilen 95 konuma ait 41 yıllık saatlik dalga yüksekliği zaman serilerinden tekil fırtınalar elde edilmiştir. Tekil fırtınalar belirlenirken eşik üstü pik yöntemi uygulanmış ve eşik değeri olarak her bir konum için ortalama dalga yüksekliğinin 2 katı ($2 \times H_{\text{ort}}$) olarak dikkate alınmıştır. Fırtınaların bu eşik aştığı anda başladığı ve bu eşik altına düştüğünde sonlandığı kabul edilmiştir [19].

Tekil fırtınalar elde edildikten sonra analizi yapılacak parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler; toplam fırtına sayısı, ortalama fırtına süresi, toplam fırtına süresi, maksimum fırtına süresi, fırtınaların ortalama dalga yüksekliği, fırtınaların ortalama pik dalga yüksekliği ve fırtınaların maksimum dalga yüksekliğidir. Çalışmada

dikkate alınan fırtına tanımı ve parametreleri Şekil 2’de zaman serisi üzerinde gösterilmiştir.

Çalışmada dikkate alınan fırtına parametrelerinin uzun dönemli değişim eğilimleri Theil-Sen [44] yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde edilen eğilimlerin anlamlılık seviyesini belirlemek amacıyla Mann-Kendall [45, 46] testi kullanılmıştır. Karadeniz’in fırtınalılığı ile uzun dönem salınım indeksleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için Pearson korelasyon katsayısı hesaplama yöntemi [47] kullanılmıştır. Çalışmada uzun dönemli eğilimler için en az %90, fırtınalılığın uzun dönem salınım indeksleriyle ilişkisi için en az %95 anlamlılık düzeyi dikkate alınmıştır. Eğilim analizi için seçilen zaman aralığının sonuçlar üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 1979-2019 dönemi 10’ar yıllık dört döneme ayrılmış ve 41 yıl için yedi parametreye uygulanan analizler bu 10’ar yıllık dönemlerde de tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fırtınalılığın değişimindeki mevsimselliği ortaya koymak için aylık bazda analizler yapılmıştır. 95 konumda 41 yıl boyunca yukarıda belirtilen yedi parametrenin uzun dönemli değişimleri 12 ay için ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Theil-Sen yöntemi, zaman serisi verilerindeki veri çiftleri için eğimlerin medyanını tahmin etmeye yönelik parametrik olmayan bir yöntemdir. T_k ’nın eğimi Eş. 2’deki gibi hesaplanır.

$$T_k = \frac{y_j - y_i}{t_j - t_i} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Eş. 2’de N, zaman serisindeki veri çiftlerinin sayısıdır, T_k zaman serisindeki k’inci i-j çiftinin eğimidir ($j > i$), y_j ve y_i sırasıyla t_j ve t_i zamanlarındaki verilerdir. N değeri Eş. 3’te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3)$$

Eş. 3’te n, zaman serisindeki toplam veri sayısıdır. T_k değerlerinin medyanı belli bir zaman aralığına ait veri kümesinin eğilimini gösterir.

Kendall’in tau istatistiği olarak da adlandırılan Mann-Kendall testi hidro-meteorolojik zaman serilerinin eğilimlerinin belirlenmesinde sıkça kullanılan bir metottur.

Mann-Kendall testinin istatistiği S, Eş. 4’teki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

Eş. 4’teki $(x_j - x_k)$ değerinin işareti ise Eş. 5’te verilen ifade ile belirlenmektedir.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{eğer } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{eğer } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{eğer } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Asimptotik olarak, normal bir dağılıma sahip ve ortalaması sıfır olan test istatistiği S’in varyansı Eş. 6’daki gibi hesaplanır.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

Eğer zaman serisinde benzer değerler (bağ durumu) varsa varyans hesabı Eş. 7’deki gibi hesaplanır.

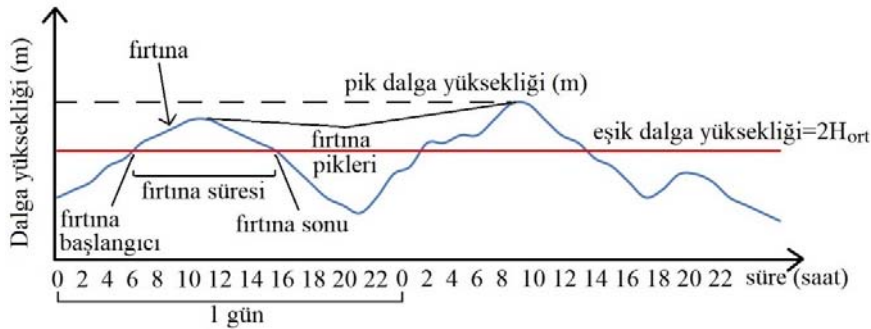
$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (7)$$

Varyansı belirlenen Mann-Kendall testinin anlamlılık derecesi, Z standartlaştırılmış test istatistiğinin Eş. 8’e göre hesaplanıp kritik Z değeriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S > 0 \\ 0 & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Eğer seçilen α anlamlılık seviyesinde $|Z| \leq Z_\alpha$ ise H_0 hipotezi kabul edilir, aksi halde reddedilir. Hesaplanan S değeri pozitif ise artış, negatif ise azalma yönünde bir eğiliminin varlığı söz konusudur.

Karadeniz’in fırtınalılığının, kuzey yarımküre iklim uzun dönem salınım indeksleriyle (NAO, EA, EA/WR, AMO ve PNA) ilişkisini belirlemek için iki değişken arasındaki korelasyonlar hesaplanmıştır. Elde edilen korelasyon sonuçları için anlamlılık sınırı, Pearson korelasyon katsayısı



Şekil 2. Fırtına tanımı ve parametreleri (Storm definition and parameters)

(r) hesaplama yöntemi kullanılarak, %95 anlamlılık düzeyi ve 41 örnekleme için $r=0,301$ değeri olarak belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

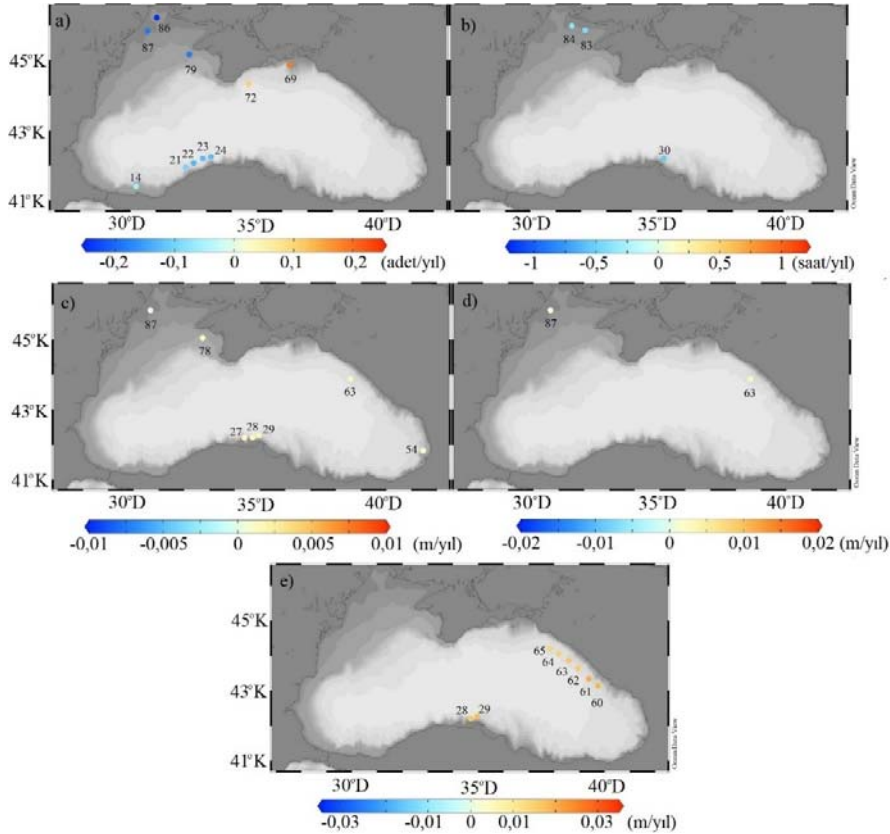
Karadeniz'in fırtınalığındaki uzun dönemli değişimleri incelemek amacıyla ilk olarak yıllık analiz yapılmıştır. Dikkate alınan yedi fırtına parametresi için 95 konum arasından istatistiksel olarak anlamlı eğilim tespit edilen konumlar ve 41 yıllık zaman serilerinden elde edilen eğilim değerleri haritalar üzerinde sunulmuştur.

3.1. Fırtına Parametrelerindeki Uzun Dönemli Değişimler (Long-term Variations in Storm Parameters)

41 yıllık saatlik dalga yüksekliklerinden oluşan veri setinden elde edilen fırtına zaman serileri kullanılarak, yıllık toplam fırtına sayıları, yıllık ortalama fırtına süresi, yıllık toplam fırtına süresi, yıllık maksimum fırtına süresi, fırtınaların yıllık ortalama dalga yüksekliği, fırtınaların yıllık ortalama pik dalga yüksekliği ve fırtınaların yıllık maksimum dalga yüksekliklerindeki uzun dönemli değişimler belirlenmiştir. Buna göre istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenen konumlar ile bu konumların çalışma alanı içindeki dağılımları Şekil 3'te ve eğilim değerleri ile anlamlılık

düzeyleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Haritaların hazırlanmasında Ocean Data View yazılımı [48] kullanılmıştır. Şekil 3a ve Tablo 1'de görüldüğü gibi fırtına sayılarında Karadeniz'in güneybatı kıyılarındaki beş konumda her 8-20 yıl arasında 1 adedi bulan anlamlı azalma eğilimleri elde edilmiştir. Çarpar vd. [22]'nin Karadeniz'in kuzeybatı sahillerindeki rüzgâr hızları için buldukları azalma eğilimine paralel olarak, bu çalışmada, Karadeniz'in kuzeybatısında bulunan iki konumdaki fırtına sayılarında anlamlı azalma eğilimleri görülmüştür. Odessa kıyısındaki 87 numaralı konum ile Kırım Yarımadası'nın batısında bulunan 79 numaralı konumda her 10 yılda yaklaşık 2 adet anlamlı azalma eğilimi tespit edilmiştir. Yine Odessa kıyılarındaki her 20 yılda 5 adedi bulan anlamlı azalma eğilimi (86 numaralı konum) hem maksimum şiddetli hem de %98 ile anlamlılık değeri en yüksek eğilim değeri olmuştur. Karadeniz'in kuzeyindeki iki konumdan Kerç Boğazı yakınlarındaki 69 numaralı konumda her 10 yılda 2 adete yakın değişimler mevcuttur. Bu noktanın batısında bulunan 72 numaralı konumdaysa daha düşük şiddetli olarak her 10 yılda 2 adetlik bir artış eğilimi görülmektedir.

Yıllık maksimum fırtına süreleri için sadece azalma eğilimleri elde edilmiştir (Şekil 3b), Tablo 1). Sinop kıyısındaki 30 numaralı konumda her 10 yılda 5,5 saate



Şekil 3. a) Fırtına sayıları, b) Yıllık maksimum fırtına süreleri, c) Fırtınaların yıllık ortalama dalga yükseklikleri, d) Fırtınaların yıllık ortalama pik dalga yükseklikleri, e) Fırtınaların yıllık maksimum dalga yüksekliklerinde 1979-2019 arası uzun dönemli değişimler. Yalnızca %90 anlamlılık düzeyi ve üzerindeki eğilim değerleri sunulmuştur (Long-term (1979-2019) trends in (a) annual number of storms, b) annual maximum storm durations, c) annual average wave heights of storms, d) annual average peak wave heights of storms, e) annual maximum wave heights of storms. Trend values of 90% significance or above are presented)

Tablo 1. Fırtına parametrelerindeki 41 yıllık (1979-2019) eğilim değerleri ve anlamlılık düzeyleri (41-year (1979-2019) trend values and significance levels in storm parameters)

| | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Yıllık toplam fırtına sayıları | Konum Numarası | 14 | 21 | 22 | 23 | 24 | 69 | 72 | 79 | 86 | 87 |
| | Eğilim (adet/yıl) | -0,06 | -0,10 | -0,13 | -0,13 | -0,13 | 0,19 | 0,11 | -0,19 | -0,25 | -0,19 |
| | Anlamlılık (%) | 90 | 91 | 95 | 96 | 91 | 93 | 90 | 94 | 98 | 98 |
| Yıllık maksimum fırtına süreleri | Konum Numarası | 30 | 83 | 84 | | | | | | | |
| | Eğilim (saat/yıl) | -0,54 | -0,43 | -0,38 | | | | | | | |
| | Anlamlılık (%) | 96 | 92 | 95 | | | | | | | |
| Fırtınaların yıllık ortalama dalga yükseklikleri | Konum Numarası | 27 | 28 | 29 | 54 | 63 | 78 | 87 | | | |
| | Eğilim (m/yıl) | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | | | |
| | Anlamlılık (%) | 91 | 91 | 94 | 92 | 95 | 91 | 95 | | | |
| Fırtınaların yıllık ortalama pik dalga yükseklikleri | Konum Numarası | 63 | 87 | | | | | | | | |
| | Eğilim (m/yıl) | 0,003 | 0,002 | | | | | | | | |
| | Anlamlılık (%) | 95 | 96 | | | | | | | | |
| Fırtınaların yıllık maksimum dalga yükseklikleri | Konum Numarası | 28 | 29 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | | |
| | Eğilim (m/yıl) | 0,016 | 0,018 | 0,018 | 0,020 | 0,016 | 0,016 | 0,015 | 0,014 | | |
| | Anlamlılık (%) | 90 | 90 | 95 | 95 | 92 | 93 | 94 | 92 | | |

yakın ve %96 anlamlılık düzeyine sahip bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu eğilim değeri bu parametre için en yüksek şiddetli ve anlamlılık değeri en yüksek eğilim değeri olmuştur. Ayrıca Karadeniz'in kuzeyinde bulunan 83 ve 84 numaralı konumlarda her 10 yılda yaklaşık 4 saat değerinde anlamlı azalma eğilimi elde edilmiştir. Fırtınaların yıllık ortalama, yıllık ortalama pik ve yıllık maksimum dalga yükseklikleri için sadece artış eğilimleri gözlenmiştir (Şekil 3c, Şekil 3d, Şekil 3e), Tablo 1). Sinop kıyılarında doğuya doğru gidildikçe şiddetini arttıran artış eğilimi 29 numaralı konumda her 10 yılda 1,7 cm'lik artış değeri ile fırtınaların yıllık ortalama dalga yükseklikleri için elde edilen en yüksek eğilim değerine ulaşmaktadır (Şekil 3c), Tablo 1). Yine bu parametre için, Batum kıyısında her 10 yılda 1,1 cm, Kırım Yarımadası'nın batısındaki 78 numaralı konumda her 10 yılda 1,4 cm anlamlı artış eğilimi elde edilmiştir (Şekil 3c, Tablo 1). Fırtınaların yıllık ortalama dalga yüksekliklerindeki uzun dönemli değişimin istatistiksel olarak anlamlı artış değerlerine ulaştığı diğer konumlar Karadeniz'in kuzeydoğusundaki Rusya kıyısında bulunan 63 numaralı konum (0,15 cm/yıl) ve Karadeniz'in kuzeybatısındaki Odessa kıyısında bulunan 87 numaralı konum (0,08 cm/yıl) olmuştur (Şekil 3c, Tablo 1). 63 ve 87 numaraları konumlardaki bu artış eğilimi, fırtınaların ortalama pik dalga yükseklikleri bakımından da geçerliliğini korumuştur (Şekil 3d, Tablo 1). 63 numaralı konumda her 10 yılda 3,1 cm'lik artış eğilimi, bu parametre için elde edilen en yüksek eğilim değeri olmuştur. 87 numaralı konumda ise her 10 yılda 1,7 cm'lik artış eğilimi saptanmıştır. Fırtınaların maksimum dalga yükseklikleri için Karadeniz'in doğu

kıyıları boyunca istikrarlı bir artış eğilimi gözlenmiştir. Karadeniz'in kuzeydoğusundaki Rusya kıyıları boyunca 60-65 numaralı konumlar arasındaki bölgede kuzeydoğudan güneydoğuya doğru eğilim değerinin şiddetinin de arttığı görülmektedir. Belirlenen anlamlı artış eğilimlerinin, bu bölge için Çarpar vd. [22]'in rapor ettiği rüzgâr hızlarındaki artış ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Bu bölgedeki bulgular, Akpınar ve Bingölbali [24]'ün ve Aydoğan ve Ayat [25]'in dalga yüksekliklerindeki artışa ilişkin literatür bulgularını da teyit etmektedir. Saprykina vd. [29] da bu bölgeyi, Doğu Karadeniz dalga ikliminin homojenliği açısından ayrı bir bölge olarak belirlemiştir. Bu çalışmanın sonuçları da bu bulguyu desteklemektedir. Elde edilen bulgular Divinsky ve Kosyan [27]'nin bu bölgede ortalama ve maksimum dalga gücünde (dalga yüksekliğinin karesi ile doğru orantılıdır) belirlemiş olduğu %0,4/yıl değerindeki artış eğilimlerini de desteklemektedir. Soçi kıyılarındaki 61 numaralı konum, yılda 2 cm'lik artışla bu parametre için en yüksek artış eğilimi değerine sahip konum olmuştur. Ayrıca 63 numaralı konum için dalga yüksekliğiyle alakalı tüm parametrelerde artış olduğu tespit edilmiştir. Sinop kıyılarındaki 28 ve 29 numaralı konumlarda da yılda 1,8 cm'ye ulaşan anlamlı artış eğilimleri tespit edilmiştir. Bulgular Karadeniz kıyıları boyunca istatistiksel olarak anlamlı değişimler gösteren konumlarda, yıllık fırtına sayılarının ve sürelerinin azalma eğiliminde olduğunu buna karşın fırtına dalga yüksekliklerinin arttığını göstermektedir. Bunun tek istisnası Kerç Boğazı'nın doğusundaki 69 numaralı konum ile Yalta kıyılarındaki 72 numaralı konumlar olmuştur. Bu konumlarda fırtına sayılarında 10

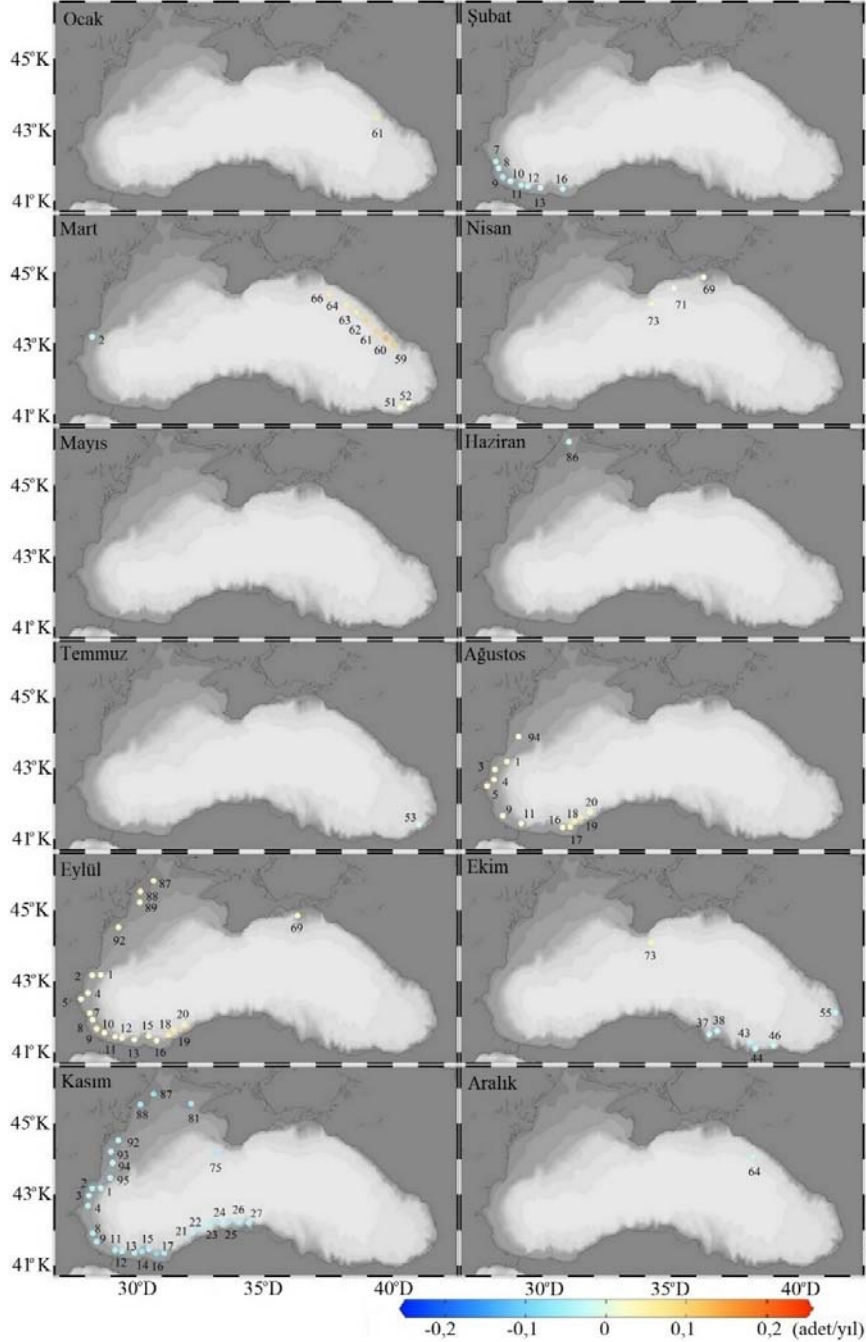
yılda 2 adet'e varan istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimleri elde edilmesine karşın, fırtına dalga yüksekliklerinde istatistiksel olarak anlamlı değişimler elde edilememiştir. Yıllık ortalama fırtına süreleri ve fırtınaların yıllık toplam süreleri için ise istatistiksel olarak anlamlı herhangi bir değişim eğilimi belirlenmemiştir. Valchev, Trifonova ve Andreeva [28] Batı Karadeniz'de Varna açıklarındaki bir noktada yaptıkları fırtına analizinde fırtınaların sayısı, fırtına süreleri ve fırtına dalga enerjisi parametrelerinin hiçbirinde istatistiksel olarak anlamlı bir eğilime rastlamadıklarını bildirmişlerdir. Anılan bölge için

bu çalışmanın sonuçları da Valchev, Trifonova ve Andreeva [28]'in bulgularını teyit etmektedir.

3.2. Mevsimsel Değişimler (Seasonal Variations)

3.2.1. Fırtına sayılarındaki mevsimsel değişimler (Seasonal variations in numbers of storms)

Fırtına sayılarındaki mevsimsel değişimleri belirlemek amacıyla ilk olarak 95 konumda 41 yıl boyunca 12 ay için toplam fırtına sayıları bulunmuş ve uzun dönemli değişimleri



Şekil 4. Toplam fırtına sayılarındaki uzun dönemli mevsimsel eğilimler (adet/yıl) (41-year seasonal trends in numbers of storms (number of storms/year))

incelenmiştir. İstatistiksel olarak %90 ve üzerinde anlamlılık düzeyine sahip uzun dönemli eğilim değerleri ve bunların çalışma alanı içindeki dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4'e göre ağustos ve eylül aylarını kapsayan yaz sonu ve sonbahar başlangıcı dönemlerinde, batı ve güneybatı kıyılarındaki fırtına sayılarında her 20 yılda 1 adedi bulan anlamlı artış eğilimleri tespit edilmiştir. Güneybatı sahillerinde şubat ayı fırtına sayılarının her 20 yılda 1 adedi bulan azalma eğilimi sergilediği görülmektedir. Sinop'tan Kırım Yarımadası'na kadar uzanan yay boyunca, kasım ayı fırtına sayılarında yine her 20 yılda 1 adedi aşan anlamlı azalma eğilimleri elde edilmiştir. Mart ayı fırtına sayılarında Karadeniz'in kuzeydoğusundaki yedi konumda ve güneydoğusundaki iki konumda her 10 yılda 1 adedi bulan ve doğuya gidildikçe şiddetini arttıran anlamlı artış eğilimleri olduğu görülmektedir. Nisan ayı fırtına sayılarında Kırım Yarımadası'nın doğusundaki üç konumda (69, 71 ve 75) 25 yılda 1 adete ulaşan anlamlı artış eğilimleri olduğu tespit edilmiştir. Türkiye'nin Doğu Karadeniz kıyılarında ekim ayı fırtına sayılarının her 30 yılda 1 adet değerinde azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Mayıs ayı için dikkate alınan konumlarda herhangi bir değişim eğilimi gözlenmemiştir.

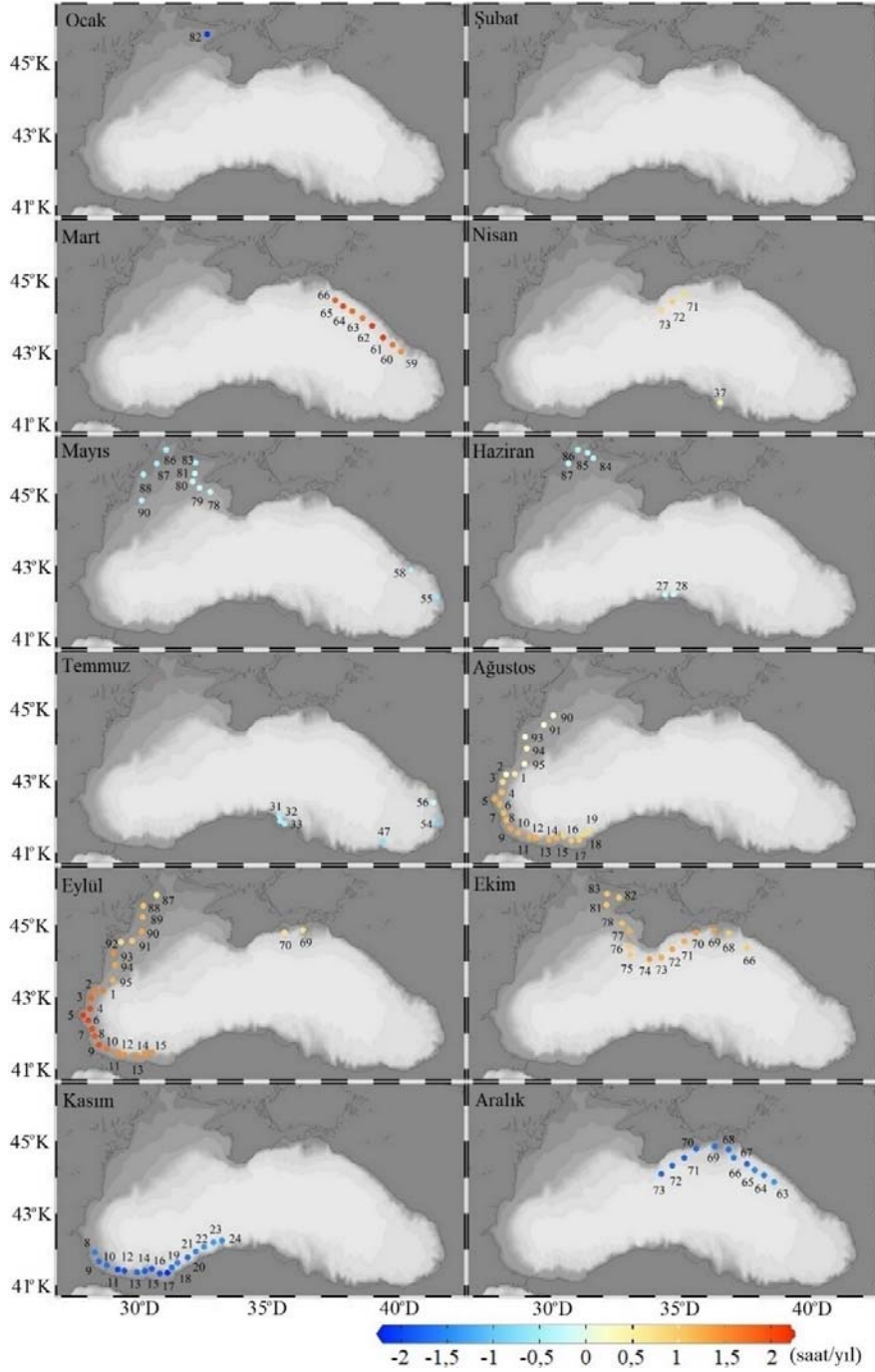
3.2.2. Toplam fırtına sürelerindeki mevsimsel değişimler (Seasonal variations in total storm duration)

Toplam fırtına sürelerindeki mevsimsel değişimleri saptamak için 95 konumda 12 ay için toplam fırtına süreleri bulunmuş ve 41 yıl boyunca değişimleri incelenmiştir. Uzun dönemde istatistiksel olarak anlamlı değişimlere sahip konumlar ve bu konumların sahip olduğu eğilim değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Bulgular bölgesel olarak kümelenen eğilimlere işaret etmektedir. Toplam fırtına sürelerinde Mart, nisan, ağustos, eylül ve ekim ayları için artış, mayıs-haziran-temmuz ve kasım-aralık-ocak aylarını kapsayan iki dönem için ise anlamlı azalma eğilimleri gözlenmektedir. Ağustos ve eylül ayları toplam fırtına sürelerinde Karadeniz'in güneybatı ve batı sahillerinde her 10 yılda 13 saati bulabilen anlamlı artış eğilimleri fırtına sayılarındaki artışlarla da paralellik göstermektedir. Ekim ayında kuzey sahillerini kapsayan her 10 yılda 14 saate yaklaşan anlamlı artışlar meydana geldiği görülmektedir. Mart ayında Kerç Boğazı'ndan Gürcistan sınırına kadar olan kuzeydoğu sahillerinde yine her 10 yılda 21 saati bulan artışlar gözlenirken, bu bölgede toplam fırtına sürelerindeki artış fırtına sayılarındaki artış ile paralellik göstermektedir. Nisan ayındaysa Kırım Yarımadası'nın doğu sahillerindeki üç konumda ve Samsun kıyısında diğer konumlara göre daha düşük şiddetli artış eğilimleri elde edilmiştir. Yine bu bölgede de toplam fırtına sürelerinin yanısıra fırtına sayılarının da arttığı görülmektedir. Mayıs ayında Karadeniz'in kuzeybatısındaki Odessa kıyılarındaki ve doğu kıyılarındaki her 10 yılda 6 saati bulan anlamlı azalma eğilimleri gözlenmiştir. Haziran ayında Sinop ve Kırım Yarımadası'nın batı kıyılarındaki anlamlı azalma eğilimleri tespit edilmiştir. Temmuz ayında Samsun-Sinop arasında ve güneydoğu sahillerinde her 10 yılda 4-8,5 saat arasında anlamlı azalma

eğilimleri bulunup. Kasım ayında Türkiye'nin Bulgaristan sınırından başlayıp, Bartın'a kadar uzanan sahil şeridi boyunca anlamlı azalma eğilimlerine rastlanmış olup, aynı bölge için fırtına sayılarının da azaldığı görülmüştür. Aralık ayında Kerç Boğazı'nın Karadeniz'e bakan doğu ve batı bölgelerindeki konumlarda her 10 yılda 13-22 saat arasında anlamlı azalma eğilimleri gözlenirken, bu bölgede fırtına sayıları da azalmaktadır. Şubat ayı için istatistiksel olarak anlamlı herhangi bir değişim bulunamamıştır. Bulgular genel olarak toplam fırtına sürelerindeki istatistiksel olarak anlamlı değişimlerin saptandığı konumlarda aylık ortalama fırtına süreleri, aylık maksimum fırtına süreleri ve fırtına sayılarında da aynı yönde eğilimler olduğuna işaret etmektedir.

3.2.3. Fırtınaların dalga yüksekliklerindeki mevsimsel değişimler (Seasonal variations in wave heights of storms)

Fırtınaların ortalama, pik ve maksimum dalga yüksekliklerindeki uzun dönemli mevsimsel değişimler 95 konumda 12 ay için ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuçlar tüm bu değişkenler için benzer eğilimlerin varlığını göstermiştir. Fırtınaların maksimum dalga yükseklikleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı eğilime sahip konumlar ve bu konumlardaki uzun dönem eğilim değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Karadeniz'de fırtınaların maksimum dalga yüksekliklerinde genel olarak artış eğilimleri olduğu tespit edilmiştir. Ağustos ve eylül aylarında Karadeniz'in sadece batı kıyılarındaki gözlenen artış eğilimleri, ekim ayında Karadeniz'in güneydoğu kıyılarındaki Kırım Yarımadası'nın doğusunda ve kuzeybatısındaki Odessa ile Romanya kıyıları arasındaki bölgede gözlenmektedir. Fırtına dalga yüksekliklerinde özellikle Batı Karadeniz kıyılarındaki artış eğilimlerinin mevsimsel karakteristikleri fırtına sayıları ve süreleri bakımından elde edilen eğilimlerle paralellik göstermektedir. Fırtına sayıları ve süreleri bakımından dikkate değer bir uzun dönemli değişimin görülmediği ocak ayı fırtına dalga yüksekliklerinin güneybatı ve batı sahillerinde artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Mart ayında doğu kıyıları boyunca fırtına sayıları ve süreleri için de gözlenen artış eğilimlerinin güney kıyılarındaki aynı eğilimi sergilediği gözlenmiştir. Azalma eğilimleri ise çoğunlukla mayıs-temmuz dönemindedir. Ağustos ayında Karadeniz'in batısında ve güneybatısında gözlenen anlamlı artış eğilimleri İstanbul kıyılarındaki (11 numaralı konumda) yılda 1,72 cm'ye ulaşmaktadır. Eylül ayında Karadeniz'in batısında gözlenen artış eğilimleri yılda 2,51 cm'ye ulaşmaktadır. Ekim ayında Karadeniz'in güneydoğusunda, kuzeybatısında ve Kırım Yarımadası'nın doğusunda artış eğilimi değerleri yılda 2,24 cm değerine ulaşmaktadır. Karadeniz'in güneydoğusunda ekim ayı fırtına dalga yükseklikleri artarken, fırtına sayıları azalmaktadır. Ocak ayında Karadeniz'in batısında ve güneybatısında yılda 2,5 cm'ye ulaşan anlamlı artış eğilimleri gözlenirken, kuzeydeki Kırım Yarımadası'nın batı kıyılarındaki yılda 2,55 cm'yi bulan azalma eğilimleri elde edilmiştir. Mart ayında Karadeniz'in kuzeydoğusunda, doğusunda ve güneyinde yılda 3,27 cm'ye varan anlamlı artış eğilimleri gözlenmiştir. Mart ayında Karadeniz'in doğusunda analize tabi tutulan tüm

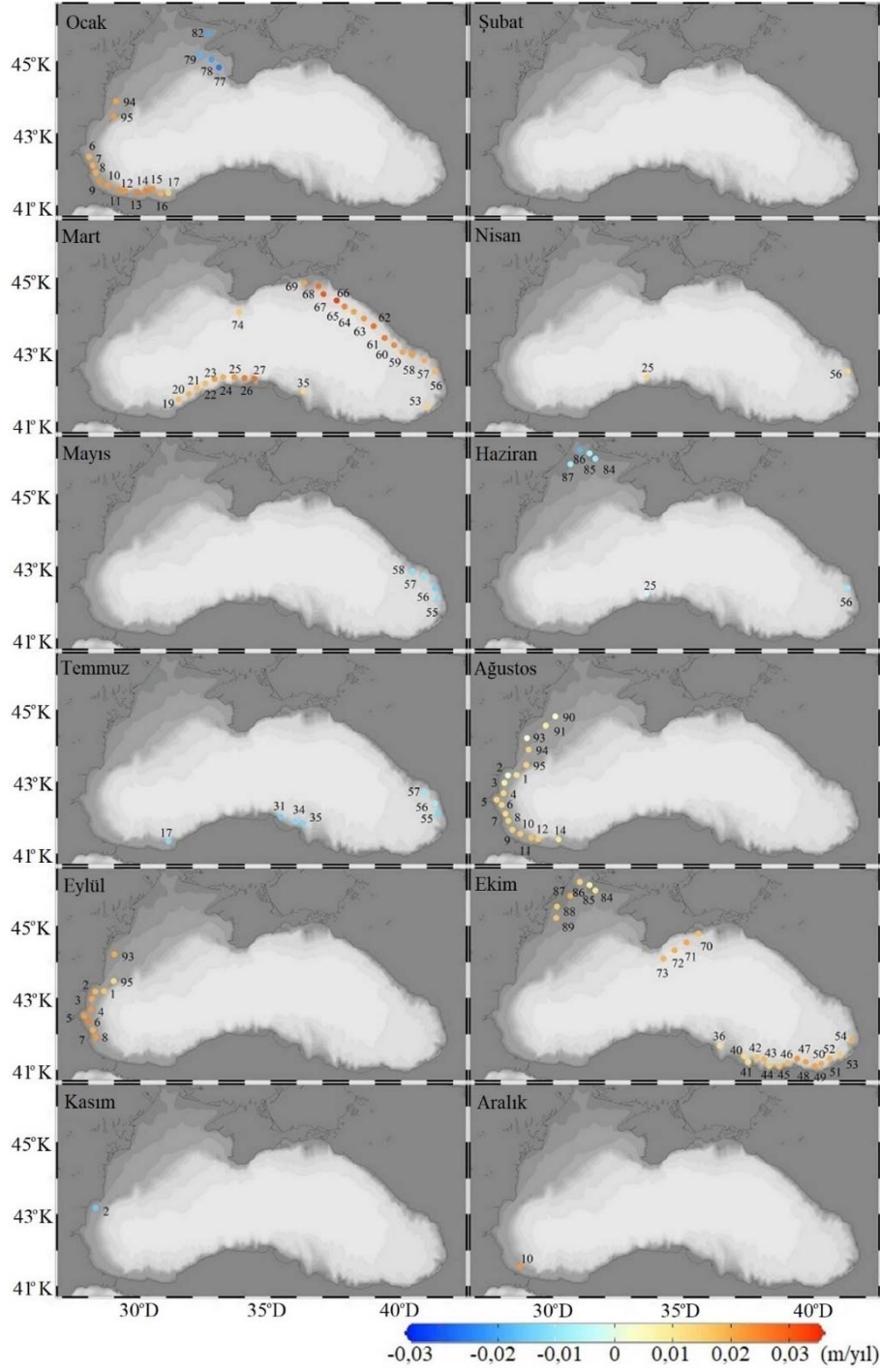


Şekil 5. Toplam fırtına sürelerindeki 41 yıllık mevsimsel eğilimler (saat/yıl)
(41-year seasonal trends in total storm durations (hours/year))

parametrelerde artış eğilimi elde edilmiştir. Yine mart ayı için Karadeniz güney kıyılarında fırtına dalga yüksekliklerinin arttığı tespit edilmiştir. Nisan ayında sadece Karadeniz'in güneyindeki 25 numaralı konumda ve doğudaki 56 numaralı konumda yılda 1,34 cm'lik artış eğilimleri bulunmuştur.

Haziran ayında Karadeniz'in kuzeybatısındaki Odessa ve güneyindeki Sinop kıyılarında yılda 1,8 cm'ye ulaşan azalma eğilimleri belirlenmiştir. Odessa kıyısında fırtınalar ile ilgili

tüm parametrelerin, Sinop kıyısında fırtınaların dalga yükseklikleri ve süreleriyle ilgili tüm parametrelerin azalma eğiliminde olduğu saptanmıştır. Temmuz ayında Karadeniz'in güney kıyılarında ve doğusunda yılda 1,5 cm'yi bulan azalma eğilimleri gözlenmiştir. Temmuz ayında Zonguldak kıyısında sadece fırtınaların dalga yükseklikleri azalırken, Karadeniz'in güneydoğu kıyılarında fırtınaların sürelerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Mayıs ayında sadece Karadeniz'in doğusundaki Gürcistan kıyılarında yılda 1,1-1,5 cm arası azalma eğilimleri görülmektedir. Bu bölgede



Şekil 6. Fırtınaların maksimum dalga yüksekliklerindeki 41 yıllık mevsimsel eğilimler (m/yıl)
(41-year seasonal trends in maximum wave heights of storms (m/year))

tüm fırtına parametrelerinde azalma eğilimi gözlenmiştir. Kasım ayında sadece Karadeniz'in batısındaki 2 numaralı konumda yılda 1,56 cm'lik bir azalma elde edilmiştir. Aralık ayında ise sadece Karadeniz'in güneybatısındaki 10 numaralı konumda yılda 2,24 cm'lik anlamlı bir artış eğilimi belirlenmiştir. Şubat ayı için fırtına dalga yüksekliklerinin uzun dönemli değişimlerine ilişkin istatistiksel olarak anlamlı herhangi bir eğilim tespit edilmemiştir.

3.4. Karadeniz'in Fırtınalılığının İklim Uzun Dönem Salınım İndeksleri ile İlişkisi (The Relationship of the Black Sea Storminess to the Climate Oscillation Indices)

Karadeniz'in fırtınalılığının iklim uzun dönem salınım indeksleri ile olan ilişkisini incelemek amacıyla, istatistiksel olarak anlamlı değişim eğilimi belirlenen konumlarda fırtına parametreleri ile uzun dönem salınım indeksleri arasındaki

korelasyon katsayıları hesaplanmıştır (Tablo 2). Tablo 2'ye göre Karadeniz'in kuzeyinde anlamlı değişim eğilimi tespit edilen konumlarda (69, 72, 79, 86, 87) ve güneyinde bulunan 22 numaralı konumda yıllık fırtına sayıları değişimi ile PNA indeksi arasında %95 anlamlılık seviyesinde pozitif korelasyon elde edilmiştir. Kırım Yarımadası'nın doğusunda bulunan 69 ve 72 numaralı konumlarda fırtına sayıları için en yüksek korelasyon değerleri EA ve AMO indeksleri ile elde edilmiştir. Karadeniz'in güneyinde bulunan 21 ve 23 numaralı konumlardaki fırtına sayıları EA/WR ile pozitif bir ilişki göstermiştir. Kuzeybatıda bulunan 87 numaralı konumdaki fırtına sayıları ise NAO ile negatif korelasyon sergilemiştir. Sonuçlar fırtına sayılarının en çok PNA indeksi ile etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. Bu etkileşim kendisini 0,47'ye varan pozitif korelasyon katsayıları ile ortaya koymaktadır. EA/WR dışındaki diğer indekslerle fırtına sayıları arasındaki korelasyonlar Aydoğan ve Ayat [25]'te uzun dönem salınım indeksleri ile belirgin dalga yüksekliği arasında elde edilen korelasyon değerleri ile uyumludur. Maksimum fırtına sürelerinde anlamlı değişim eğilimi tespit edilen konumların hiçbirinde uzun dönemli salınım indeksleriyle istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki

gözlenmemiştir. Kırım Yarımadası'nın batısında bulunan 78 numaralı konumda fırtınaların ortalama dalga yüksekliklerindeki uzun dönemli değişimler ile EA/WR indeksi arasında negatif, AMO indeksi arasında ise pozitif korelasyon gözlenmiştir. Odessa kıyısında bulunan 87 numaralı konumda fırtınaların ortalama dalga yükseklikleri EA/WR ile negatif korelasyon sergilemektedir. Sinop kıyısında bulunan 27 numaralı konumdaki fırtınaların ortalama dalga yükseklikleri ise EA ile pozitif bir ilişki göstermiştir. Karadeniz'in kuzeybatısındaki Odessa kıyısında bulunan 87 numaralı konumda oluşan fırtınaların ortalama pik dalga yükseklikleri EA/WR ile 0,43 korelasyon katsayısıyla negatif, AMO ile 0,31 korelasyon katsayısıyla pozitif bir ilişki ortaya koymuştur.

Karadeniz'in kuzeydoğu kıyılarında fırtınaların maksimum dalga yükseklikleri EA/WR ile negatif, AMO ve PNA ile pozitif bir ilişki ortaya koymuştur. Genel olarak bakıldığında uzun dönem salınım indeksleriyle Karadeniz'in kuzeyinde fırtına karakteristiklerinde anlamlı uzun dönemli değişim eğilimi tespit edilen konumlardaki fırtınalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki mevcuttur. Çalışma

Tablo 2. Karadeniz fırtınalılığının iklim uzun dönemli salınım indeksleriyle ilişkisi, r
(Relationship of the Black Sea storminess to the climate oscillation indices, r)

| Fırtına Parametresi | Konum Numarası | NAO | EA | EA/WR | AMO | PNA |
|--|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Yıllık fırtına sayısı | 14 | -0,110 | -0,200 | 0,272 | -0,197 | 0,112 |
| | 21 | 0,228 | -0,005 | 0,426 | -0,223 | 0,164 |
| | 22 | 0,136 | 0,049 | 0,255 | -0,181 | 0,326 |
| | 23 | 0,113 | -0,025 | 0,304 | -0,194 | 0,277 |
| | 24 | 0,180 | 0,035 | 0,296 | -0,136 | 0,265 |
| | 69 | -0,127 | 0,323 | -0,144 | 0,343 | 0,357 |
| | 72 | -0,269 | 0,331 | -0,139 | 0,392 | 0,466 |
| | 79 | -0,093 | 0,139 | 0,013 | -0,028 | 0,400 |
| | 86 | -0,289 | -0,081 | -0,241 | -0,003 | 0,324 |
| | 87 | -0,307 | -0,070 | -0,239 | -0,081 | 0,320 |
| Yıllık maksimum fırtına süresi | 30 | 0,108 | -0,201 | -0,022 | -0,153 | -0,067 |
| | 83 | 0,008 | -0,102 | -0,031 | -0,180 | 0,087 |
| | 84 | -0,086 | -0,192 | 0,023 | -0,220 | 0,086 |
| Fırtınaların yıllık ortalama dalga yükseklikleri | 27 | 0,181 | 0,302 | -0,241 | 0,154 | 0,095 |
| | 28 | 0,187 | 0,233 | -0,112 | 0,077 | 0,061 |
| | 29 | 0,150 | 0,208 | -0,133 | 0,149 | 0,043 |
| | 54 | -0,121 | 0,163 | -0,211 | 0,267 | 0,139 |
| | 63 | 0,095 | 0,295 | -0,151 | 0,270 | 0,042 |
| | 78 | -0,175 | 0,042 | -0,326 | 0,418 | 0,180 |
| Fırtınaların yıllık ortalama pik dalga yükseklikleri | 87 | -0,185 | 0,018 | -0,409 | 0,267 | 0,141 |
| | 63 | 0,121 | 0,271 | -0,160 | 0,278 | 0,022 |
| Fırtınaların yıllık maksimum dalga yükseklikleri | 87 | -0,187 | 0,036 | -0,434 | 0,309 | 0,153 |
| | 28 | 0,211 | 0,052 | -0,152 | 0,143 | 0,165 |
| | 29 | 0,218 | 0,045 | -0,156 | 0,131 | 0,145 |
| | 60 | 0,195 | 0,279 | -0,301 | 0,283 | 0,178 |
| | 61 | 0,144 | 0,275 | -0,304 | 0,308 | 0,231 |
| | 62 | 0,086 | 0,246 | -0,330 | 0,281 | 0,274 |
| | 63 | 0,058 | 0,213 | -0,314 | 0,303 | 0,326 |
| | 64 | 0,049 | 0,156 | -0,277 | 0,292 | 0,349 |
| | 65 | 0,058 | 0,142 | -0,203 | 0,238 | 0,342 |

alanında fırtınalılığın AMO ve EA/WR indeksleri ile ilişkisi Saprykina, Kuznetsov ve Valchev [49]'un hem gözlemlerle hem de spektral dalga modelinden elde edilmiş dalga yüksekliği zaman serileri ile yapmış oldukları çalışmanın sonuçları ile de uyumludur. Bulgular Karadeniz'de fırtına parametreleri ile en fazla sayıda anlamlı korelasyon veren iklim indekslerinin EA/WR ve PNA olduğunu göstermektedir. Bu sonuç PNA'nın Karadeniz için en etkili indeks olduğunu belirten Çarpar vd. [22]'in bulguları ile de uyumludur. Zainescu vd. [16] de Karadeniz'in batısında Tuna Deltası'nda oluşan fırtınaların NAO, EA ve EA/WR ile olan ilişkisi ortaya koymuştur. Bu çalışmada her ne kadar Karadeniz'in batısı için istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki elde edilememiş ise de bu iklim salınım indekslerinin Karadeniz'in diğer kıyılarında etkili olduğu ortaya konulmuştur. Divinsky ve Kosyan [26] ise Karadeniz'de rüzgâr dalgalarının zamansal değişimine bakıldığında 0,5 yıl periyotlu değişimlerin NAO indeksi ile negatif korelasyona sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada yalnızca Ukrayna kıyılarında NAO ile negatif bir uyum belirlenmiştir. Bulgular arasındaki farklılıklar dikkate alınan analiz dönemleri, kullanılan veriler, kullanılan analiz yöntemleri gibi nedenlerden ileri gelmektedir. Maksimum fırtına süresi dışındaki diğer fırtına parametrelerinin tümünün EA/WR ve AMO indeksleriyle anlamlı korelasyonlar sergilediği görülmüştür. En yüksek pozitif korelasyon katsayısı 72 numaralı konumda 0,47 ile fırtına sayıları ile PNA indeksi arasında elde edilmiştir. En yüksek negatif korelasyon katsayısı ise 87 numaralı konumda fırtınaların ortalama pik dalga yüksekliği ile EA/WR indeksi arasında belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Karadeniz kıyıları boyunca 1979-2019 yılları arasındaki 41 yıllık dönem için spektral dalga modelinden elde edilen ve saatlik verilerden oluşan dalga yüksekliği zaman serileri kullanılarak tekil fırtınalar belirlenmiştir. Belirlenen fırtınaların sayıları, süreleri ve dalga yükseklikleriyle ilgili yedi parametre dikkate alınarak Karadeniz fırtınalılığındaki uzun dönemli değişimler araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

1. Genel olarak Karadeniz'in fırtınalılığında yıllık ve mevsimsel bazda istatistiksel olarak anlamlı değişimler bulunmuştur.
2. Fırtına parametrelerinin yıllık analizinden elde edilen uzun dönemli değişim eğilimlerinin Karadeniz kıyıları boyunca homojen olmadığı, konumsal farklılıklar sergilediği görülmüştür. Türkiye'nin Batı Karadeniz kıyılarında, Odessa kıyılarında ve Kırım Yarımadası'nın batı ucunda yıllık fırtına sayıları her 10 yılda 1-2 adet arası azalma eğilimindedir. Buna karşın aynı bölgede fırtınaların ortalama dalga yükseklikleri ise her 10 yılda yaklaşık 1 cm mertebesinde artmıştır. Kırım Yarımadası'nın doğu kıyılarında ise fırtına sayılarının her 10 yılda 1-2 adet arası artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Karadeniz'in doğusunda, kuzeydoğusunda ve Sinop kıyısında fırtınaların

dalga yüksekliğiyle ilgili parametreler artış eğilimi göstermiştir.

3. Mevsimsel analiz sonuçları Karadeniz'in batısında yaz sonu ve bahar başlangıcı dönemi (ağustos-ekim) fırtına parametrelerinin tümünde anlamlı artış eğilimi bulunduğunu göstermiştir. Mart ayında Karadeniz'in kuzeydoğusunda fırtına parametrelerinin hepsi artış eğilimindedir. Haziran ayında Karadeniz'in kuzeybatısındaki Odessa kıyılarında tüm parametreler için azalma eğilimi tespit edilmiştir. Ekim ayında Karadeniz'in güneydoğusunda fırtına sayıları azalırken fırtınaların dalga yükseklikleri artmıştır. Kasım ayında Karadeniz'in tüm batı kıyılarında fırtına sayıları azalmaktadır.
4. Fırtına tanımında belirlenen eşik dalga yüksekliği değeri sonuçları etkilemektedir. Çalışmada fırtına tanımı için ilk olarak dalga eşiği, ortalama dalga yüksekliğinin 1,5 katı ($1,5 \times H_{ort}$) olarak seçilmiş fakat homojen ve anlamlı sonuçlar elde edilememesi nedeniyle %95'lik en yüksek aşılma olasılığına yakın bir değer olan ortalama dalga yüksekliğinin 2 katı ($2 \times H_{ort}$) dalga eşiği olarak belirlenmiştir.
5. Karadeniz'in fırtınalılığı genel olarak iklim uzun dönem salınım indeksleri ile ilişkilidir. Fırtına sayıları ve fırtınaların dalga yükseklikleri Karadeniz'in kuzey kıyılarında PNA ve AMO indeksleri ile %95 anlamlılıkta pozitif korelasyonlar göstermiştir. Maksimum fırtına süreleri içinse uzun dönemli salınım indeksleriyle herhangi bir korelasyon elde edilememiştir.
6. Bu çalışmada Karadeniz'in fırtına iklimindeki uzun dönemli değişimler sadece dalga verileri kullanılarak tespit edilmiştir. Gelecek çalışmalarda fırtına tanımında farklı dalga eşikleri kullanılabileceği gibi rüzgâr hızı ve fırtına süresi dikkate alınarak çeşitli fırtına tanımları da değerlendirilmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Uzun dönem iklim salınım indeks verilerini sağladığı için Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi Fiziksel Bilimler Laboratuvarı'na ve dalga verilerini sağlayan Doç. Dr. Burak Aydoğan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 151, 2014.
2. Rata, V. ve Rusu, L., Assessing the traffic risk along the main Black Sea maritime routes, In Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Engineering, Belgrade, Serbia, 27th-28th September, 2018.
3. Lin, N. ve Shullman, E., Dealing with hurricane surge flooding in a changing environment: part I. Risk assessment considering storm climatology change, sea

- level rise, and coastal development, *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 31 (9), 2379-2400, 2017.
4. Karim, M. F. ve Mimura, N., Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh, *Global Environ. Change*, 18 (3), 490-500, 2008.
 5. Pugatch, T., Tropical storms and mortality under climate change, *World Development*, 117, 172-182, 2019.
 6. Görmüş, T. ve Ayat, B., Vulnerability assessment of Southwestern Black Sea, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 663-681, 2020.
 7. Tătui, F., Pîrvan, M., Popa, M., Aydoğan, B., Ayat, B., Görmüş, T., Korzinin, D., Văidianu, N., Vespremeanu-Stroe, A., Zăinescu, F., Kuznetsov, S., Preoteasa, L., Shtremel, M. ve Saprykina, Y., The Black Sea coastline erosion: Index-based sensitivity assessment and management-related issues, *Ocean Coastal Manage.*, 182, 104949, 2019.
 8. Haerens, P., Bolle, A., Trouw, K. ve Houthuys, R., Definition of storm thresholds for significant morphological change of the sandy beaches along the Belgian coastline, *Geomorphology*, 143-144, 104-117, 2012.
 9. Del Río, L., Plomaritis, T. A., Benavente, J., Valladares, M. ve Ribera, P., Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast, *Geomorphology*, 143-144, 13-23, 2012.
 10. Corbella, S. ve Stretch, D. D., Simulating a multivariate sea storm using Archimedean copulas, *Coastal Eng.*, 76, 68-78, 2013.
 11. Ferreira, Ó., Storm groups versus extreme single storms: Predicted erosion and management consequences, *J. Coastal Res.*, 42, 221-227, 2005.
 12. Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G. ve Ciraolo, G., Storm energy flux characterization along the Mediterranean coast of Andalusia (Spain), *Water*, 11 (3), 509, 2019.
 13. Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. ve Ciuffardi, T., A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *J. Mar. Sci. and Technol.*, 16 (2), 181-201, 2011.
 14. Ponce de León, S. ve Guedes Soares, C., Hindcast of extreme sea states in North Atlantic extratropical storms, *Ocean Dyn.*, 65 (2), 241-254, 2015.
 15. Almeida, L., Ferreira, Ó., Vousdoukas, M. ve Dodet, G., Historical variation and trends in storminess along the Portuguese South Coast, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11 (9), 2407-2417, 2011.
 16. Zăinescu, F. I., Tătui, F., Valchev, N. N. ve Vespremeanu-Stroe, A., Storm climate on the Danube delta coast: evidence of recent storminess change and links with large-scale teleconnection patterns, *Nat. Hazard.*, 87 (2), 599-621, 2017.
 17. Valchev, N. ve Trifonova, E., Wave Climate Clustering to Define Threshold Values with Respect to the Expected Morphological Response, *Journal of Coastal Research*, 56, 1666-1670, 2009.
 18. Trifonova, E.V., Valchev, N.N. Andreeva, N.K., Eftimova, P.T., Critical storm thresholds for morphological changes in the western Black Sea coastal zone, *Geomorphology*, 143-144, 81-94, 2012.
 19. Laface, V., Arena, F. ve Guedes Soares, C., Directional analysis of sea storms, *Ocean Eng.*, 107, 45-53, 2015.
 20. Zheng, C. W., Pan, J. ve Li, C. Y., Global oceanic wind speed trends, *Ocean Coastal Manage.*, 129, 15-24, 2016.
 21. Ganea, D., Mereuta, E. ve Rusu, E., An evaluation of the wind and wave dynamics along the European Coasts, *J. Mar. Sci. Eng.*, 7 (2), 43, 2019.
 22. Çarpar, T., Ayat, B. ve Aydoğan, B., Spatio-seasonal variations in long-term trends of offshore wind speeds over the Black Sea; an inter-comparison of two reanalysis data, *Pure Appl. Geophys.*, 177 (6), 3013-3037, 2019.
 23. Ağırbaş, E., The meteorological Investigation of Turkish coasts of the Black Sea, *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 2 (3), 53-58, 2017.
 24. Akpınar, A. ve Bingölbalı, B., Long-term variations of wind and wave conditions in the coastal regions of the Black Sea, *Nat. Hazard.*, 84 (1), 69-92, 2016.
 25. Aydoğan, B. ve Ayat, B., Spatial variability of long-term trends of significant wave heights in the Black Sea, *Appl. Ocean Res.*, 79, 20-35, 2018.
 26. Divinsky, B. ve Kosyan, R. D., Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years, *Cont. Shelf Res.*, 136, 1-19, 2017.
 27. Divinsky, B. ve Kosyan, R. D., Climatic trends in the fluctuations of wind waves power in the Black Sea, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 235, 106577, 2020.
 28. Valchev, N. N., Trifonova, E. V. ve Andreeva, N. K., Past and recent trends in the western Black Sea storminess, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12 (4), 961-977, 2012.
 29. Saprykina, Y., Shtremel, M., Aydoğan, B. ve Ayat, B., Variability of the nearshore wave climate in the Eastern part of the Black Sea, *Pure Appl. Geophys.*, 176 (8), 3757-3768, 2019.
 30. Kostianoy, A. G. ve Kosarev, A. N. (Ed.), *The Black Sea Environment*, Springer, Berlin, 2008.
 31. Görmüş, T., Ayat, B., Aydoğan, B. ve Tătui, F., Basin scale spatiotemporal analysis of shoreline change in the Black Sea, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 252, 107247, 2021.
 32. Aydoğan, B., Offshore wind power atlas of the Black Sea Region, *J. Renewable Sustainable Energy*, 9 (1), 013305, 2017.
 33. Aydoğan, B., Ayat, B. ve Yüksel, Y., Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data, *Renewable Energy*, 57, 436-447, 2013.
 34. Aydoğan, B., Görmüş, T., Ayat, B. ve Çarpar, T., Analysis of potential changes in the Black Sea wave power for the 21st century, *Renewable Energy* 169, 512-526, 2021.
 35. Aydoğan, B. ve Ayat, B., Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin, *Ocean Eng.* 240, 109936, 2021.

36. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104 (C4), 7649-7666.
37. The Swan team, SWAN cycle III version 41.20AB user manual. <http://swanmodel.sourceforge.net>. Erişim tarihi Eylül 17, 2019.
38. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), The GEBCO_2014 Grid v20141103. <http://www.gebco.net>. Erişim tarihi Nisan 2, 2016.
39. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), Erişim tarihi Şubat 15, 2018.
40. Rogers, W.E., Babanin, A.V., Wang, D.W., 2012. Observation-consistent input and whitecapping-dissipation in a model for wind-generated surface waves: description and simple calculations, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 29, 1329-1346, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00092.1>.
41. Barnston, A. G. ve Livezey, R. E., Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Weather Rev.*, 115 (6), 1083-1126, 1987.
42. Wallace, J. M. ve Gutzler, D. S., Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Weather Rev.*, 109 (4), 784-812, 1981.
43. Enfield, D.B., Mestas-Nunez, A.M., ve Trimble, P.J., The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental, *U.S. Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077-2080, 2001.
44. Sen, P. K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, 63 (324), 1379-1389, 1968.
45. Mann, H. B., Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13 (3), 245-259, 1945.
46. Kendall, M.G., Rank correlation methods, Charles W. Griffin, London, 1975.
47. Pearson, K., Notes on the history of correlation, *Biometrika*, 13 (1), 25-45, 1920.
48. Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2020. Erişim tarihi Kasım 12, 2020.
49. Saprykina, Y., Kuznetsov, S. ve Valchev, N., Multidecadal Fluctuations of Storminess of Black Sea Due to Teleconnection Patterns on the Base of Modelling and Field Wave Data, Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018), Lecture Notes in Civil Engineering 22, K. Murali et al. (eds.), Springer Nature Singapore Pte Ltd., 773-781, 2019.