|  |
| --- |
| TEZ ADI  **ÖĞRENCİ NUMARA ve AD-SOYAD** |



T. C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

**TEZ ADI**

**ÖĞRENCİ NUMARA ve AD-SOYAD**

Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

……… Ana Bilim Dalı’nda Bitirme Tezi Olarak Kabul Edilen Tezdir.

Unvan Ad-Soyad

Unvan Ad-Soyad

Unvan Ad-Soyad

Unvan Ad-Soyad

Tezin Danışmanı

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Bölüm Başkanı

:

:

:

###### BURSA 202…

# ÖZET

……………………………….

###### 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 ……………………en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ad soyad

gg/aa/yyyy

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

[ÖZET ii](#_Toc160635395)

[1. GENEL BİLGİLER 5](#_Toc160635396)

[1.1. Dalga Spektrumu 5](#_Toc160635397)

[1.2. SWAN Modeli 8](#_Toc160635398)

[2. MATERYAL VE YÖNTEM 10](#_Toc160635399)

[2.1. Çalışma Alanı 10](#_Toc160635400)

[2.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Veri Kaynakları 10](#_Toc160635401)

[3. BULGULAR VE İRDELEME 14](#_Toc160635402)

[3.1. Veri Kaynaklarının Genel Özellikleri 14](#_Toc160635403)

[4. SONUÇLAR 19](#_Toc160635404)

[KAYNAKÇA 20](#_Toc160635405)

# 1. GENEL BİLGİLER

# 1.1. 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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Burada; t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesini, ortalama su yüzeyi kotunu, j dalga bileşenlerinin sayısını, n ise gözlenen tekil dalga sayısını, katsayısı tekil dalga genliğini, en uzun dalganın açısal dalga frekansını ve 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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |
|  | (4) |

Yukarıda ifade edilen denklemlere göre eşitliği elde edilir. Buna göre yüzey profilinin varyansının 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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Burada S(f,θ) yönlü dalga spektrumu yoğunluk fonksiyonu, yönlü dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil 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

# 1.2. 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.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

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; cx, cy, cσ ve cθ 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. (∂N/∂t) ifadesi hareket yoğunluğunun zamanla değişimini, (∂cxN/∂x) ve (∂cyN/∂y) ifadeleri bir (x, y) coğrafik alanındaki hareket yoğunluğunun yayılmasını temsil etmektedir. (∂cσN/∂σ) ve (∂cθN/∂θ) 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:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Burada; Sinp rüzgâr girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi, Swcp denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılmasıyla enerji kaybı, Snl4 lineer olmayan dörtlü dalga-dalga etkileşimi, Sbrk derinlik etkileşimli dalga kırılması nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı, Sfrc taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı ve Snl3 lineer olmayan üçlü dalga-dalga etkileşimidir. SWAN modeli ilgili detaylı bilgi ve formülasyonlara modelin el kitabından (SWAN Team, 2020) ulaşılabilmektedir.

# 2. MATERYAL VE YÖNTEM

# 2.1. Çalışma Alanı

Yarı kapalı bir deniz olan Karadeniz, 40°- 48° kuzey enlemleri ile 26°- 42° doğu boylamları arasında yer almakta ve 461.000 km2'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 km3’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.

# 2.2. 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 2. 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 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), Cds2=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 m2sn/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 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.

# 3. BULGULAR VE İRDELEME

# 3.1. 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 m2sn/rad olarak bulunurken, istasyonlardaki ortalama değer 1,47 m2sn/rad’ı aşmamıştır. Spektral pik enerjilerin en büyük değerleri ise 10 ila 90 m2sn/rad arasında değişim gösterse de çoğunlukla (>%70) 50 m2sn/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 m2sn/rad değerine kadar çıkmaktadır. Ancak kıyı kesimlerinde daha çok 20-60 m2sn/rad seviyelerindedir. Ortalama spektral pik enerjilerin Orta ve Batı Karadeniz’de yaklaşık 1,1 m2sn/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 3. SWAN dalga modeli spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (m2sn/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 3. ERA5 yeniden analizi spektral pik enerjilerinin istatistiksel özellikleri (a) maksimum (b) ortalama (c) standart sapma



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

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 U10ort 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 U10ort ve U1095 analiz sonuçları ile CFSR sonuçlarına kıyasla daha yakın bir ilişki bulunmaktadır. Analiz edilen verilerin süresi aynı olmadığı için ortaya çıkan farklılıkların beklenebileceği düşünülmektedir.

# 4. 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.

# KAYNAKÇA

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.