

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARADENİZ'DE DALGA MODELLEMESİ VE DALGA GÜCÜ  
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Adem AKPINAR**

**ŞUBAT 2012  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KARADENİZ'DE DALGA MODELLEMESİ VE DALGA GÜCÜ  
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Adem AKPINAR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02.01.2012**

**Tezin Savunma Tarihi : 14.02.2012**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat İhsan KÖMÜRCÜ**

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında**

**Adem AKPINAR Tarafından Hazırlanan**

**KARADENİZ'DE DALGA MODELLEMESİ VE DALGA GÜCÜ  
POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 01 / 2012 gün ve 1437 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Hızır ÖNSOY**

**Üye : Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ**

**Üye : Prof. Dr. Basri ERTAŞ**

**Üye : Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER**

**Üye : Doç. Dr. Murat İhsan KÖMÜRCÜ**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Çeşitli dalga tahmin yöntemlerinin Karadeniz'e uygulanmasına ve bölgedeki dalga gücü potansiyelinin belirlenmesine yönelik bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda hazırlanmıştır.

Doktora Tez Danışmanlığımı üstlenerek konu seçiminde ve çalışmaların ilerleyen aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Murat İhsan KÖMÜRÇÜ'ye teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Doktora Tez İzleme Komitesi Hocalarım Sayın Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ'a ve Sayın Prof. Dr. Hızır ÖNSOY'a değerli önerileri ve yönlendirmelerinden dolayı şükranlarımı sunarım. Yapıcı eleştirilerinden yararlandığım Sayın Hocam Prof. Dr. Basri ERTAŞ'a ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Hocam Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER'e ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamın her aşamasındaki değerli önerilerinden dolayı Doç. Dr. Mehmet ÖZGER'e, ECMWF veri tabanlarına ilişkin değerli önerilerinden dolayı Dr. Saleh ABDALLA'ya, Sayısal programın temininden dolayı Delft Üniversitesi SWAN araştırma grubuna ve sayısal analiz aşamasında karşılaştığım sorunları çözmedeki yardımlarından dolayı Dr. Gerbrant Van VLEDDER'e ve Dr. Nico BOOIJ'e, çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen Dr. Hüseyin DEMİR'e, Dr. Murat KANKAL'a, Bilgisayar Yük. Müh. Hakan KARPUZ'a, Arş. Gör. Mehmet Ali GÜCER'e ve Oğuz AKTÜRK'e şükranlarımı sunarım.

NATO TU-WAVES projesi kapsamında Karadeniz'de gerçekleştirilen şamandıra ölçümlerinin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Dr. Erdal ÖZHAN'a ve projeyi maddi olarak destekleyen NATO'nun Barış için Bilim adlı birimine, rüzgar verilerini paylaşımından dolayı ve ECMWF rüzgar alan verileri için gerekli izinlerin alımındaki yardımlarından dolayı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne ve ECMWF rüzgar alan verilerini paylaşımından dolayı Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF)'ne ve analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Gümüşhane Üniversitesi Ümit Uzman Bilgisayar Salonundaki bilgisayarların kullanımına izin vermesinden dolayı Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na teşekkür ederim.

Son olarak, Doktora tezimin hazırlanması aşamasında manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim anneme, babama, kardeşlerime ve hayatımın her anını birlikte yaşayacağım Çiğdem ENSAROĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Adem AKPINAR  
Trabzon 2012



## **TEZ BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum “Karadeniz’de Dalga Modellemesi ve Dalga Gücü Potansiyelinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Murat İhsan KÖMÜRCÜ’nün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

02/01/2012

Adem AKPINAR

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
1.3. Literatür Taraması.....	5
1.4. Küresel Dalga Gücü Potansiyeli ve Potansiyelin Değerlendirilme Durumu.....	12
1.4.1. Dalga Gücü Kaynağı ve Küresel Dağılımı.....	12
1.4.2. Dalga Enerjisinin Dünyadaki Gelişme Durumu.....	14
1.5. Dalga Mekaniği .....	16
1.5.1. Giriş.....	16
1.5.2. Enerji Yoğunluğu.....	18
1.5.3. Dalga Enerjisi Akısı.....	19
1.5.4. Spektral Analiz.....	20
1.5.4.1. Dalga Parametreleri ve Dalga Spektrumu.....	20
1.5.4.1.1. Dalga Spektrumu.....	21
1.5.4.1.2. Spektrumdan Elde Edilen Dalga Parametreleri.....	23
1.5.4.2. Dalga Enerjisi Yoğunluk Spektrumu Şekilleri.....	27
1.5.4.2.1. Pierson – Moskowitz Spektrumu.....	28
1.5.4.2.2. JONSWAP Spektrumu.....	29
1.5.5. Dalga Gücü Hesaplama Prosedürü.....	30

1.6.	Rüzgar Dalgaları.....	31
1.6.1.	Rüzgar Dalgalarının Oluşumu.....	31
1.6.2.	Rüzgar Kayıtları Yardımıyla Dalga Tahmini.....	33
1.6.2.1.	Rüzgar Verileri.....	34
1.6.2.2.	Feç Mesafesi.....	35
1.6.2.3.	Fırtına Süresi .....	36
1.7.	Dalga Tahmin Yöntemleri .....	36
1.7.1.	Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemleri.....	39
1.7.1.1.	Wilson Yöntemi.....	39
1.7.1.2.	CEM Yöntemi .....	40
1.7.1.3.	SPM Yöntemi.....	41
1.7.1.4.	JONSWAP Spektrum Yöntemi.....	42
1.7.2.	Sayısal Dalga Tahmin Yöntemleri.....	43
1.8.	SWAN Üçüncü Kuşak Sayısal Dalga Tahmin Modeli.....	43
1.8.1.	Genel Formülasyon (Teori).....	44
1.8.2.	SWAN'ın Kapsadığı Süreçler.....	46
1.8.2.1.	Rüzgar Kaynaklı Dalga Üretimi veya Oluşumu.....	46
1.8.2.2.	Derinlik Etkileşimli Dalga Kırılması.....	48
1.8.2.3.	Denizin Köpüklenmesi.....	48
1.8.2.4.	Taban Sürtünmesi.....	49
1.8.2.5.	Lineer Olmayan Dalga–Dalga Etkileşimleri.....	49
1.8.3.	Durgun ve Durgun Olmayan Durum Benzeşimleri.....	50
1.8.4.	SWAN'la Gerçekleştirilecek Uygulamalar İçin Öneriler.....	50
1.8.4.1.	Sayısal Aşama İçin Öneriler.....	51
1.8.4.2.	Fiziksel Süreçler İçin Öneriler.....	52
1.9.	Dalga Enerjisi Gelişim İndeksi (DEĞİ).....	52
1.10.	Dalga Gücü Süreklilik Eğrileri.....	53
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	54
2.1.	Çalışma Bölgesi.....	55
2.2.	Veri Kaynakları.....	56
2.2.1.	ECMWF Verileri.....	57
2.2.1.1.	ECMWF Verilerinin Temini.....	58
2.2.1.2.	ECMWF Verilerinin Özellikleri.....	58

2.2.1.3.	ECMWF Verilerinin Dosya Formatı.....	60
2.2.2.	DMİ Verileri.....	61
2.2.3.	Dalga Ölçüm (Şamandıra) Verileri.....	61
2.3.	Karadeniz’de Açık Deniz ve Yakın Kıyı Dalga Modellemesi ve Tahmini.....	64
2.3.1.	SWAN Dalga Tahmin Modelinin Karadeniz’e Uygulanması.....	65
2.3.1.1.	SWAN Model Analizleri İçin Gerekli Girdiler.....	66
2.3.1.1.1.	SWAN Benzeşimleri İçin Hesaplama Karelajının Oluşturulması.....	66
2.3.1.1.2.	Batimetri Veri Dosyasının Hazırlanması.....	68
2.3.1.1.3.	Rüzgar Veri Dosyasının Hazırlanması.....	69
2.3.1.1.4.	SWAN Girdi Dosyasının (Swn Dosyası) Hazırlanması.....	72
2.3.1.2.	SWAN’da Durgun ve Durgun Olmayan Durum Analizleri İçin Duyarlılık Analizi.....	73
2.3.1.3.	Benzeşim Süreci.....	75
2.3.1.4.	SWAN Benzeşim Modelinin Çıktıları.....	75
2.3.2.	Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Karadeniz’e Uygulanması .....	77
2.3.2.1.	Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Uygulanmasında Yön Değişim Açısı Etkisinin İrdelenmesi .....	80
2.4.	Modellerin Doğrulama Analizi.....	84
2.4.1.	SWAN Sonuçlarının Performanslarının İrdelenmesi.....	84
2.4.2.	Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	88
2.4.3.	ECMWF Dalga Tahmin Verilerinin İrdelenmesi.....	92
2.4.4.	Model Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi.....	98
2.5.	Karadeniz’de Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi.....	99
2.5.1.	Ortalama Yıllık Dalga Gücünün Alansal Dağılımının Belirlenmesi.....	100
2.5.2.	Ortalama Mevsimsel Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi .....	102
2.5.3.	Ortalama Aylık Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi..	104
2.6.	Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Dalga Gücünün İrdelenmesi.....	107
2.6.1.	Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Ortalama Yıllık ve Mevsimsel Dalga Gücü Değişiminin Kıyaslanması.....	107
2.6.2.	Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Seçilen Noktaların Dalga Enerjisi Gelişim İndekslerinin Kıyaslanması.....	111

2.6.3.	Seçilen İstasyonlarda Tahmini Dalga Gücü Süreklilik Eğrileri (Aşılma Olasılıkları).....	112
2.6.4.	Odaklanılan İstasyonlarda Dalga Gücü Değişimlerinin Kıyaslanması...	114
2.6.5.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Elde Edilebilecek Dalga Enerji Miktarının İrdelenmesi.....	116
3.	SONUÇLAR.....	124
4.	ÖNERİLER.....	129
5.	KAYNAKLAR.....	131
6.	EKLER.....	141
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

KARADENİZ'DE DALGA MODELLEMESİ VE DALGA GÜCÜ POTANSİYELİNİN  
BELİRLENMESİ

Adem AKPINAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Murat İhsan KÖMÜRCÜ  
2012, 140 Sayfa, 7 Sayfa Ek

Bu çalışmada, Karadeniz için açık deniz ve yakın kıyı dalga parametrelerinin tahmini, ECMWF ERA Interim rüzgar alan verileri kullanılarak üçüncü nesil dalga tahmin modeli (SWAN) ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, Hopa ve Sinop istasyonlarında iki farklı rüzgar kaynağı verileri (DMI ve ECMWF) kullanılarak dört farklı basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi (Wilson, SPM, Jonswap ve CEM yöntemleri) ile de dalga parametrelerinin tahmini yapılmıştır. SWAN, basitleştirilmiş dalga tahmin sonuçları ve ECMWF'in dalga tahmin verileri, Hopa ve Sinop istasyonlarındaki ölçüm verileriyle ( $H_s$  ve  $T_z$ ) kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, SWAN model sonuçları, Hopa istasyonundaki METU3 dalga tahmin verileri ile de kıyaslanmıştır. Bütün bu kıyaslamaların neticesinde, çalışılan bölgede baz alınan zaman diliminde SWAN modelin en iyi sonucu verdiği ( $H_s$  için Hopa'da  $R = 0.71$ , Sinop'da ise  $R = 0.66$ ) belirlenmiştir.

SWAN dalga modeli, 6 saat zaman ve  $0.016^\circ \times 0.016^\circ$  alansal çözünürlükte 15 yıllık bir süre için koşturulmuş ve tüm Karadeniz için çeşitli dalga parametrelerini ( $H_s$ ,  $T_{m-01}$ ,  $T_z$ ,  $T_e$ ,  $\theta$  ve iki spektrum parametresi) içeren bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı kullanılarak öncelikle tüm Karadeniz için belirgin dalga yüksekliği ve gücünün yıllık, mevsimlik ve aylık ortalama alansal dağılım haritaları üretilmiş, daha sonra, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz bölümüne odaklanılarak açık deniz şartlarında belirlenen noktalarda dalga gücünün zamansal değişimleri incelenmiştir. Belirlenen noktalarda kurulması olası dalga gücü çiftliklerinin DEĞİ değerleri ve dalga gücünün aşılma olasılıkları irdelenerek elde edilebilecek dalga enerji miktarları da tespit edilmiştir.

Tüm Karadeniz dikkate alındığında, dalga gücü potansiyelinin Türkiye kıyılarının batı kesiminde en büyük değere (3 kW/m) ulaştığı, batıdan doğuya doğru gidildiğinde ise bu değer azaldığı (1.5 kW/m) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz bölümünde seçilen noktalarda kurulacak dalga çiftliklerinden (2100 m uzunluğunda) üretilebilecek enerji miktarlarında (10 MWh/m/yıl - 5 MWh/m/yıl) da benzer bir eğilim olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karadeniz'de dalga gücü potansiyeli, Karadeniz'de SWAN dalga tahmin modeli, Rüzgar dalgaları, Basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri, ECMWF veri tabanları.

PhD. Thesis

SUMMARY

WAVE MODELING AND WAVE POWER POTENTIAL DETERMINATION IN THE  
BLACK SEA

Adem AKPINAR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Department Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Murat İhsan KÖMÜRÇÜ  
2012, 140 Pages, 7 Pages Appendix

In this study, hindcasting of offshore and nearshore wave parameters in the Black Sea was carried out by the third generation wave prediction model (SWAN - Simulated Wave Nearshore) using the ECMWF ERA Interim wind fields. In addition, wave parameters were estimated by 4 different parametric or simplified models (Wilson, SPM, Jonswap, and CEM methods) using two different wind sources (DMI and ECMWF) at Hopa and Sinop buoy stations where measured wave parameters data is available. Results of the SWAN, simplified models, and wave hindcast data of the ECMWF were compared against measurement data ( $H_s$  ve  $T_z$ ) at Hopa and Sinop buoy stations. The models accuracies were evaluated by comparing each other using statistical error measures. Besides, the SWAN model results were compared with the METU3 wave hindcasts at Hopa station. As a result of all these comparisons, it was observed that the SWAN model gives the best results ( $R = 0.71$  at Hopa station,  $R = 0.66$  at Sinop station for  $H_s$ ) in the study area and at that period.

The SWAN model, which was set-up with temporal and spatial resolutions of 6 hours and  $0.016^\circ \times 0.016^\circ$  respectively, was run for a period of 15 years and a dataset including various wave parameters ( $H_s$ ,  $T_{m01}$ ,  $T_z$ ,  $T_e$ ,  $\theta$ , and two spectrum parameters) for all of the Black Sea was generated. The annual, seasonal, and monthly mean spatial distributions of significant wave height and wave power for all of the Black Sea were firstly produced by using this dataset, and then, the temporal changes of wave power at a few stations, which are in open sea, were examined by focusing on the Middle and Eastern Black Sea Region of Turkey. Probabilities of exceedance of wave power at these stations and wave energy development index values of wave farms that may be established around these stations were determined and amount of wave energy that can be harnessed around these stations was identified.

Considering the whole Black Sea, it is determined that the western part of the Turkish coasts of the Black Sea has the largest value of the potential of wave power (3 kW/m) and this value decreases to 1.5 kW/m from west to east. Similarly, it is concluded that there is a similar trend for the amounts of wave energy (from 10 MWh/m/year to 5 MWh/m/year), which will be able to be produced from the wave farms installed at the selected locations (2100 m long) in the Middle and Eastern Black Sea Section of Turkey.

**Key Words:** Wave power potential in the Black Sea, SWAN wave prediction model in the Black Sea, Wind waves, Simplified wave prediction methods, ECMWF data base.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tezin genel yapısı, ana ve alt hedefleri (akış diyagramı).....	4
Şekil 1.2. Ortalama yıllık okyanus dalga gücünün küresel dağılımı (kW/m).....	14
Şekil 1.3. Sinüsoidal dalga profili.....	17
Şekil 1.4. Dalga kayıtları enerji spektrumu (dalga yüksekliği 6.13 m, ortalama dalga periyodu 8.41 s ve rüzgar hızı 14.2 m/s).....	22
Şekil 1.5. Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumları (US Army, 2003; Chakrabarti, 1987).....	28
Şekil 1.6. Farklı örneklerden alınan enerji yoğunluk spektrumları (Özger, 2007)..	31
Şekil 1.7. Feç Boyunca Dalgaların Değişimi.....	32
Şekil 1.8. Düzensiz bir kıyıda etkili feçin hesaplanması için açıklayıcı şema.....	35
Şekil 1.9. Rüzgar dalgası artışının gelişimi (Arıkan, 1998).....	47
Şekil 2.1. Çalışma Bölgesi ve ilgilenilen istasyonlar (URL-3, 2011).....	56
Şekil 2.2. Hopa şamandıra istasyonu için 1995 Ocak ayı süresince (a) Abdalla vd. (1995) tarafından sunulan grafiksel veri ve (b) MEDCOAST'tan indirilen grafiksel veri.....	63
Şekil 2.3. Sinop şamandıra istasyonu için 1994 Kasım ayı süresince (a) Özhan vd. (1995) tarafından sunulan grafiksel veri ve (b) MEDCOAST'tan indirilen grafiksel veri.....	64
Şekil 2.4. SWAN modellemesi için izlenen yol.....	65
Şekil 2.5. Deniz dibi derinlik konturları ile ilgili SWAN modelin karelej alanlaması.....	67
Şekil 2.6. Batimetri veri dosyası dönüşüm süreci.....	68
Şekil 2.7. Tüm Karadeniz'in batimetri haritası.....	69
Şekil 2.8. ECMWF ERA Interim veri tabanından rüzgar verisi temini için izlenen yol.....	70
Şekil 2.9. ECMWF ERA Interim veri dosyası dönüşüm süreci.....	71
Şekil 2.10. 1995 yılı Ocak ayının 1. günündeki ilk kayıt için ECMWF ERA Interim veri tabanından temin edilen tahmini rüzgar alanı.....	71
Şekil 2.11. Bir swn dosyasının oluşturulma aşamaları.....	72
Şekil 2.12. Durgun ve durgun olmayan durumlar için SWAN analizlerinin tahmini dalga karakteristiklerinin zamansal değişimlerinin kıyaslanması (1995 yılı Ocak ayı için).....	74



Şekil 2.13.	Durgun ve durgun olmayan durumlar için SWAN analizlerinin tahmini dalga karakteristiklerinin saçılım diyagramlarının kıyaslanması (1995 yılı Ocak ve Şubat ayları için).....	74
Şekil 2.14.	Toplu İş Dosyası Üretimi ve Benzeşim Süreci.....	76
Şekil 2.15.	Farklı fırtına yönü değişimleri için farklı istasyonlarda tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin RMS hatalarının karşılaştırılması.....	82
Şekil 2.16.	Farklı fırtına yönü değişimleri için farklı istasyonlarda tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin belirlilik katsayılarının ( $R^2$ ) karşılaştırılması.....	82
Şekil 2.17.	Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için (a) Hopa şamandıra noktasına en yakın DMİ istasyonunun (b) Hopa şamandıra noktasına en yakın ECMWF karelej noktasının rüzgar verileri kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerinin en kötü ve en iyi şartlardaki saçılım diyagramları.....	84
Şekil 2.18.	Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için (a) Sinop şamandıra noktasına en yakın DMİ istasyonunun ve (b) Sinop şamandıra noktasına en yakın ECMWF karelej noktasının rüzgar verileri kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerinin en kötü ve en iyi şartlardaki saçılım diyagramları.....	85
Şekil 2.19.	Hopa şamandıra istasyonunda SWAN analiz sonuçlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$ ve $T_z$ için) saçılım diyagramları.....	86
Şekil 2.20.	Sinop şamandıra istasyonunda SWAN analiz sonuçlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$ ve $T_z$ için) saçılım diyagramları.....	86
Şekil 2.21.	Hopa şamandıra istasyonunda 1995 Ocak ayına ait METU3 tahminleri ile SWAN durgun durum analiz sonuçlarının şamandıra dalga ölçüm verileriyle kıyaslanması.....	88
Şekil 2.22.	Hopa istasyonunda en iyi sonuç veren basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmin verilerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının saçılım diyagramları.....	91
Şekil 2.23.	Sinop istasyonunda en iyi sonuç veren basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmin verilerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının saçılım diyagramları.....	91
Şekil 2.24.	Hopa şamandıra istasyonunda 1995 yılı Ocak ayı için ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini belirgin dalga yüksekliklerinin (a) ve ortalama dalga periyotlarının (b) zaman serilerinin ölçülmüş verilerle kıyaslanması.....	94

Şekil 2.25.	Sinop şamandıra istasyonunda 1996 yılı Ocak ayı için ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini belirgin dalga yüksekliklerinin (a) ve ortalama dalga periyotlarının (b) zaman serilerinin ölçülmüş verilerle kıyaslanması.....	95
Şekil 2.26.	Hopa şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$ ve $T_z$ için) saçılım diyagramları.....	96
Şekil 2.27.	Sinop şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$ ve $T_z$ için) saçılım diyagramları.....	97
Şekil 2.28.	Hopa şamandıra istasyonunda 1995 yılı Mayıs ayı için oluşturulan en iyi modellerin ve ECMWF veri tabanının dalga tahminlerinin ölçüm verileri ile kıyaslanması.....	99
Şekil 2.29.	SWAN model sonuçlarına dayanan Karadeniz'in ortalama yıllık belirgin dalga yüksekliği dağılımı.....	100
Şekil 2.30.	SWAN model sonuçlarına dayanan Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	101
Şekil 2.31.	SWAN model sonuçlarına dayanan kış mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	102
Şekil 2.32.	SWAN model sonuçlarına dayanan sonbahar mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	103
Şekil 2.33.	SWAN benzeşim sonuçlarına dayanan ilkbahar mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	103
Şekil 2.34.	SWAN model sonuçlarına dayanan yaz mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	104
Şekil 2.35.	SWAN model sonuçlarına dayanan Ocak ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	105
Şekil 2.36.	SWAN model sonuçlarına dayanan Nisan ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	105
Şekil 2.37.	SWAN model sonuçlarına dayanan Temmuz ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	106
Şekil 2.38.	SWAN model sonuçlarına dayanan Ekim ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı.....	106
Şekil 2.39.	Dalga gücünün değişiminin irdelendiği istasyonlar (URL-3, 2011).....	107
Şekil 2.40.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık ortalama dalga gücü değişimi (ortalama değerler için).....	108
Şekil 2.41.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık dalga gücü değişimi (%5 aşılma ihtimalli değerler için).....	109

Şekil 2.42.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık dalga gücü değişimi (%90 aşılma ihtimalli değerler için).....	109
Şekil 2.43.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (ortalama değerler için)...	110
Şekil 2.44.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (%5 aşılma ihtimalli değerler için).....	110
Şekil 2.45.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (%90 aşılma ihtimalli değerler için).....	111
Şekil 2.46.	Her istasyon için DEĞİ değerlerinin bir kıyaslaması.....	112
Şekil 2.47.	Sinop, Samsun, Ordu ve Giresun istasyonlarında farklı güç seviyelerinin mevsimlik aşılma olasılıkları.....	113
Şekil 2.48.	Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında farklı güç seviyelerinin mevsimlik aşılma olasılıkları .....	114
Şekil 2.49.	İstasyonların ortalama yıllık dalga gücünün istatistiksel parametrelerinin bir kıyaslaması.....	115
Şekil 2.50.	Odaklanılan bütün istasyonların aşılma olasılıklarının kıyaslanması....	115
Şekil 2.51.	Her bir istasyon için toplam elde edilebilecek ortalama yıllık dalga enerjisinin belirgin dalga yüksekliğinin belli aralıklarında oluşma miktarlarının kıyaslaması.....	121
Şekil 2.52.	Her bir istasyon için toplam elde edilebilecek ortalama yıllık dalga enerjisinin dalga periyodunun belli aralıklarında oluşma miktarlarının kıyaslaması.....	122
Şekil 2.53.	Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda elde edilebilecek toplam ortalama yıllık dalga enerji miktarlarının kıyaslanması.....	123
Ek Şekil 6.1.	Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin SWAN model sonuçlarına dayanan mevsimlik dağılımları.....	141
Ek Şekil 6.2.	Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ocak, şubat, mart ve nisan ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	142
Ek Şekil 6.3.	Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin mayıs, haziran, temmuz ve ağustos ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	143
Ek Şekil 6.4.	Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin eylül, ekim, kasım ve aralık ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	144
Ek Şekil 6.5.	Yıllık ortalama dalga gücünün ocak, şubat, mart ve nisan ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	145
Ek Şekil 6.6.	Yıllık ortalama dalga gücünün mayıs, haziran, temmuz ve ağustos ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	146

Ek Şekil 6.7. Yıllık ortalama dalga gücünün eylül, ekim, kasım ve aralık ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları.....	147
---	-----

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. SWAN'da hesaplamalı ızgara ayrıklaştırması için önerilen seçenekler (Van der westhuysen, 2002; Van Vledder, 2011).....	51
Tablo 1.2. Modelin uygulanması için SWAN El Kitabı'nda (SWAN, 2008) önerilen fiziksel süreçlerin formülasyonları.....	52
Tablo 2.1. Hopa ve Sinop şamandıralarında kaydedilmiş belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu verilerinin istatistiği.....	63
Tablo 2.2. Hopa şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin hata istatistiği.....	79
Tablo 2.3. Sinop şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin hata istatistiği.....	80
Tablo 2.4. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında kaydedilmiş şamandıra verileri ve SWAN analizi ile tahmin edilmiş dalga verilerinin eşzamanlı değerlerinin istatistiksel analizinin özeti.....	87
Tablo 2.5. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında kaydedilmiş şamandıra verileri ve SWAN analizi ile tahmin edilmiş dalga verilerinin 0.5 m'den büyük dalga yükseklikleri için eşzamanlı değerlerinin istatistiksel analizinin özeti.....	87
Tablo 2.6. 1995 yılı süresince Hopa şamandıra istasyonunda oluşturulan sekiz basitleştirilmiş dalga tahmin modeli için tahmini dalga karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri.....	89
Tablo 2.7. 1995 yılı süresince Sinop şamandıra istasyonunda oluşturulan sekiz basitleştirilmiş dalga tahmin modeli için tahmini dalga karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri.....	90
Tablo 2.8. Hopa şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri ile tahmin edilmiş dalga karakteristiklerinin şamandıra verileriyle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği.....	90
Tablo 2.9. Sinop şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri ile tahmin edilmiş dalga karakteristiklerinin şamandıra verileriyle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği.....	91
Tablo 2.10. 1995 yılı süresince Hopa şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini dalga parametreleri için istatistiksel parametrelerin hata istatistiği.....	93
Tablo 2.11. 1995 yılı süresince Sinop şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini dalga parametrelerinin istatistiksel parametrelerinin hata istatistiği.....	93

Tablo 2.12. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği.....	98
Tablo 2.13. Dalga gücü değişiminin irdelendiği istasyonların genel karakteristikleri.....	108
Tablo 2.14. Sinop, Samsun ve Ordu istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık toplam oluşma süreleri (saat).....	117
Tablo 2.15. Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık toplam oluşma süreleri (saat).....	118
Tablo 2.16. Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık ortalama yıllık dalga enerjisi dağılımları (kWh/m.yıl).....	119
Tablo 2.17. Sinop, Samsun, Giresun ve Ordu istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık ortalama yıllık dalga enerjisi dağılımları (kWh/m.yıl).....	120

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	: Dalga genliği
$A$ ve $B$	: Dalga frekans ve yönü ile rüzgar hızı ve yönüne bağlı katsayılar
$a_j$	: $j$ -inci dalga bileşeni genliği
$C$	: Dalga yayılma hızı
$C_b$	: Taban sürtünme katsayısı
$C_D$	: Sürüklenme katsayısı
$C_g$	: Dalgaların grup hızı
$C_{go}$	: Açık denizdeki dalgaların grup hızı
$C_o$	: Açık deniz dalga yayılma hızı
$c_x, c_y$	: Sırasıyla $x$ ve $y$ yönlerindeki dalga yayılma hızları
$c_\sigma, c_\theta$	: Sırasıyla $\sigma$ ve $\theta$ yönlerindeki dalga yayılma hızları
$d$	: Su derinliği
$D_i$	: $i$ 'ninci saatlik veri noktasındaki rüzgar yönü
DMİ	: Devlet meteoroloji işleri genel müdürlüğü
$D_{tot}$	: Dalga kırılması nedeniyle toplam enerjide dağılmanın oranı
$\bar{D}$	: Ortalama rüzgar yönü
$E$	: Toplam enerji
ECMWF	: Avrupa orta vadeli hava tahmin merkezi
$E(f)$	: Dalga enerji spektrumu
$E_k$	: Kinetik enerji
$E_p$	: Potansiyel enerji
$E_{tot}$	: Toplam dalga enerjisi
$\bar{E}$	: Enerji yoğunluğu
$E[\sum_j a_j^2]$	: Yüzey yer değiştirmenin varyansı
$E(\sigma, \theta)$	: Enerji yoğunluğu
$f$	: $H_z$ cinsinden dalga frekansı
$F$	: Feç mesafesi
$F_{efektif}$	: Efektif feç mesafesi
$F_{eşdeğer}$	: Eşdeğer feç mesafesi

FFT	: Fourier dönüşümü
$F_{\text{gerçek}}$	: Mevcut feç mesafesi
$F_{\text{min}}$	: Minimum feç uzunluğu
$f_p$	: Pik frekans
$g$	: Yerçekimi ivmesi
GRIB	: Gridded binary uzantılı dosya formatı
H	: Dalga yüksekliği
$H_{\text{mo}}$	: Spektral dalga yüksekliği parametresi
$H_{\text{rms}}$	: Eşdeğer dalga yüksekliği parametresi
$H_s (H_{1/3})$	: Belirgin dalga yüksekliği
j	: Dalga bileşenlerinin sayısı
Jonswap	: Kuzey Denizi ortak dalga gözlem projesi
k	: Dalga sayısı
$\bar{k}$	: Ortalama dalga sayısı
L	: Dalga boyu
$L_o$	: Açık deniz dalga boyu
METUS3	: Basitleştirilmiş üçüncü nesil rüzgar dalgası tahmin modeli
$m_n$	: n'inci moment
$m_o$	: Sıfırıncı moment
MWD	: Ortalama dalga yönü
MWP	: Ortalama dalga periyodu
$m_{-1}$	: Frekans aralığı (f) için enerji yoğunluğu oranı
n	: Sabit
n	: Toplam bileşen sayısı
NASA	: Amerika Ulusal Hava ve Uzay Araştırmaları Kurumu
NCEP	: NOAA rüzgar-dalga tahmin veritabanı
NOAA	: Amerika ulusal deniz ve atmosfer kurumu
$N(\sigma, \theta)$	: Hareket yoğunluğu
OWC	: Salınlımlı su kolonu
$\bar{p}$	: Dalga enerji akısı veya dalga gücü
RMS	: ortalama karekök hata
$S_{\text{brk}}$	: Taban odaklı kırılma nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
$S(f)$	: Dalga varyans spektrumu



$S_{frc}$	: Taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
$S_{inp}$	: Rüzgar girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi
$S_{n/3}$	: Üçlü lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi
$S_{n/4}$	: Dörtlü lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi
SWAN	: Yakın kıyı dalga benzeşim modeli
$S_{wcp}$	: Denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılmasıyla enerji kaybı
SWH	: Belirgin dalga yüksekliği
$S(\sigma, \theta)$	: Dalgaların üremesi ve transformasyonundaki bütün etkileri temsil eden kaynak ifadesi
$t$	: Rüzgar esme süresi
$t$	: Zaman
$T$	: Dalga periyodu
$T_e$	: Enerji dalga periyodu
$t_{gerçek}$	: Mevcut fırtına süresi
$t_{min}$	: Minimum fırtına süresi
$T_{m01}$	: Spektrum ortalama frekansına karşı gelen dalga periyodu
$T_{m02} (T_z)$	: Ortalama düşerken sıfır olma periyodu
$T_{m10}$	: Enerji dalga periyodu
$T_p$	: Pik periyot
$T_s (T_{1/3})$	: Belirgin dalga periyodu
TÜMAS	: Meteorolojik Veri Arşiv Sistemi
$U_A$	: Rüzgar gerilme faktörü
$U_{deniz}$	: Deniz üzerindeki rüzgar hızı
$U_i$	: i'ninci saatlik veri noktasındaki rüzgar hızı
$U_{kara}$	: Kara üzerinde rüzgar hızı
$U_{10}$	: 10 m yükseklikte rüzgar hızı
$U_{19.5}$	: 19.5 m yükseklikte rüzgar hızı
$U^*$	: Sürtünme hızı
$\bar{U}$	: Ortalama rüzgar hızı
$V$	: Rüzgar hızı
WAM	: Dalga tahmin modeli
WIND	: 10 metre yükseklikte rüzgar hızı
$w_o$	: En uzun dalganın açılal dalga frekansı

YSA	: Yapay sinir ağları
x	: Konum
x, y, ve t	: Alan ve zamanın boyutları
$\alpha$	: Dalga spektrumunun şekline bağlı katsayı
$\gamma$	: Pik artırma faktörü
$\theta$	: Dalga yönü
$\sigma$	: Rölatif dalga frekansı
$\bar{\sigma}$	: Ortalama frekans
$\eta$	: Dalga profili
$\eta(t)$	: t anında ölçölen su yüzeyi düşey yer değiştirmesi
$\eta_o$	: Ortalama su yüzeyi kotu
$\phi_j$	: j-inci dalga bileşenin faz açısı
$\Gamma$	: Bağımlı diklik katsayısı
$\partial N/\partial t$	: Hareket yoğunluğunun zamanla değişimi
10U	: 10 m yükseklikte U rüzgar bileşeni
10V	: 10 m yükseklikte V rüzgar bileşeni

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dalgalar, deniz yapılarını etkileyen çevresel faktörler arasında en önemli olanıdır. Dalgaların varlığı, deniz yapılarının projelendirilmesini kara yapılarınınkinden oldukça farklı kılmaktadır. Çünkü, dalgalar doğadaki en karmaşık olaylardır ve dalgaların karakterleri ile davranışlarının tamamıyla anlaşılması kolay değildir (Çevik, 2003).

Deniz ortamında ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilir gelişimi, dalgalar gibi çevresel şartlar hakkında uzun dönemli veriye gereksinim duymaktadır. Benzer şekilde, rüzgar dalgası istatistiksel karakteristiklerinin bilgisi, kıyı yapılarının ve dalga enerji dönüşüm sistemlerinin tasarımını, sediment taşınım çalışmalarını, kıyı erozyonu ve kirlilik taşınım süreçlerini içeren çok çeşitli uygulamalar için gereklidir. Diğer taraftan, dalga parametrelerinin daha uzun periyotlarda ölçülmesi oldukça pahalıdır ve çok fazla zaman gerektirmektedir. Bu nedenle, çoğu bölgede dalga ölçümü mevcut olmamakta veya çok kısa süreli dalga kayıtları bulunmaktadır ve böylece ölçülmüş mevcut dalga verilerini kullanarak bunları daha uzun sürelerle iletme ihtiyacı doğmaktadır. Genellikle uzun dönemli rüzgar verilerine ulaşmak dalga verilerine ulaşmaktan daha kolaydır. Bundan dolayı dalga parametreleri, ulaşılması daha kolay olan rüzgar ve basınç verileri kullanılarak birçok yöntem ile tahmin edilmeye çalışılmaktadırlar. Bunun için tarih boyunca dalgaları tahmin etmek için birçok yöntem geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Moeini ve Etemad-Shahidi, 2007; Şahin vd., 2007).

Dalga parametrelerinin rüzgar verilerinden tahmini için bir çok teorik yaklaşımın kullanılması mümkündür. Genelde doğru yaklaşım uygun girdi bilgilerine ve araştırmanın amaçlarına bağlıdır. İki boyutlu sayısal spektruma ait dalga tahmin modeli ile dalga parametrelerinin tahmini için atmosfere ait basınç alanı hakkında detaylı bilgi gerekmektedir. Bu karmaşık modellere karşın bazı ampirik ifadelerle dayanan basit dalga tahmin yöntemleri de kullanılmaktadır, bu yöntemlerde ihtiyaç duyulan girdi verileri çok azdır (Şahin vd., 2007).

Okyanus dalgaları kıyı alanlarında yenilenebilir enerjinin yüksek yoğunluklu bir formudur. Dünya dalga enerji potansiyelinin şu andaki dünyanın kurulu elektrik kapasitesinin (yaklaşık 3.5 TW) yarısından daha fazla yaklaşık 2 TW olduğu tahmin

edilmektedir. Dünya nüfusunun yaklaşık % 37'si 60 mil'lik bir kıyı çizgisinde yaşamaktadır. Bu gerçek, kaynak ve talep arasında iyi bir eşleşme olduğunu kanıtlamaktadır (Beyene ve Wilson, 2007).

Türkiye ve dünyada; nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, sanayileşme, sosyal ve ekonomik sebepler enerjiye olan talebi hızla artırmıştır. Dünya ülkelerinin ve özellikle de Türkiye'nin kaynaklarıyla artan ihtiyaçlarını karşılayamaması, yerli enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açığı giderek büyütmede, bu durumda, dışa bağımlılığı artırmaktadır. Bundan dolayı, ülkelerin öz kaynaklarını kullanma gerekliliği giderek artan bir önem kazanmaktadır (Akpınar vd., 2009). Dolayısıyla ülkelerin geleceği için temiz, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça önemlidir (Akpınar vd., 2008). Bu bağlamda, geçmiş yıllarda ham petrolde yaşanan krizler, gelişmiş ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya yöneltmiştir. Gerek güneş ve rüzgar, gerekse de su enerjisinden elektrik elde edilmesi üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları bu teknolojileri günümüzde nükleer santraller ile boy ölçüşebilir duruma getirmiştir. Nükleer enerjide araştırma veya geliştirme, ağırlıklı olarak atıklarının depolanması konusunda devam ederken; güneş, rüzgar ve sudan elektrik enerjisinin elde edilmesi üzerine araştırma ve çalışmalar hızla artmaktadır. Son yıllarda ise deniz kaynaklı enerjiler; çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilememesi, yerli ve de yenilenebilir olması nedeniyle tüm dünyada yayılmaya ve uygulama alanları bulmaya başlamıştır. Bu enerji türünün, yerkürenin % 75'inden fazlasını okyanus ve denizlerin kapsadığı göz önüne alınırsa, önemli bir enerji kaynağı olma potansiyeli taşıyabileceği açıkça görülmektedir. Üç yanı denizlerle çevrili, 8300 km'nin üzerinde kıyı şeridinde sahip olan Türkiye'de de, dalga enerjisi üzerine yapılan çalışmalar özellikle son yıllarda hızla artmaktadır.

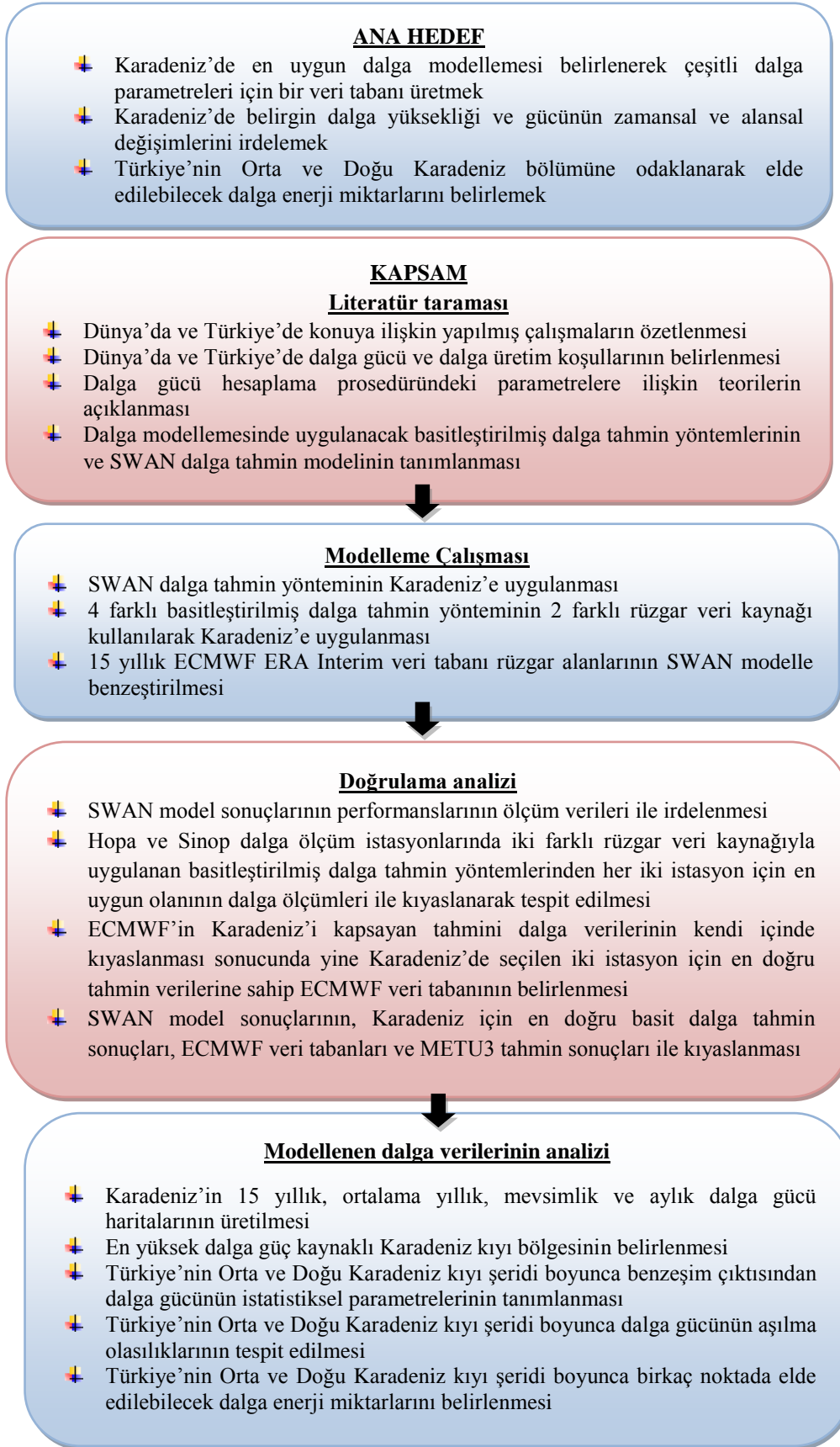
Dalga enerjisi üzerine ilk yapılan çalışmalar 1970'lerde başlamasına karşın, bu araştırmaların hız kazanması ve verimli sonuçların elde edilmesi 1980'lerin sonu ile 1990'ların başına rastlamaktadır. Değişik ölçeklerdeki modeller kullanılarak yapılan çalışmalarda, dalgaların sahip olduğu enerji farklı bir forma (elektrik enerjisine) dönüştürülmeye çalışılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda, yenilenebilir enerji türleri arasında dalga enerjisinin de önemli bir yer tuttuğu ortaya konulmuş ve gelişmekte olan pek çok ülke, ilgisini dalga enerjisine yönlendirmiştir. Araştırmalar ile dalga enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin maliyetinin göreceli olarak oldukça düşük olduğunun ortaya çıkmasıyla, dalga enerjisi çalışmaları birçok ülkenin yatırım programı kapsamına alınmıştır. Halen Avustralya, Çin, Danimarka, Hindistan, Japonya, Norveç

Portekiz, İsveç, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi ülkelerde kurulu pilot tesisler çalışmaktadır. İngiltere’de ise ticari olarak dalga enerjisinden elektrik üretimi yapılmaktadır. ABD genelinde yapılan bir çalışmada tüm kıyıların toplam dalga enerjisi potansiyelinin, 2300 TWh/yıl olduğu belirtilmiştir (Bedard vd., 2005). Türkiye’de ise Marmara denizi dışında açık deniz kıyılarının 8210 km’yi bulmasına rağmen, dalga rasatları ve bunlara ilişkin ölçüm verileri yok denecek kadar azdır. Sınırlı sayıdaki çalışmalar ise dalga gücünün, Akdeniz kıyıları için ortalama 13 kW/m olduğunu belirtmektedir. Türkiye dışında Akdeniz’de yapılmış ölçümler, bu gücün yıl boyu 8.4 - 15.5 kW/m arasında değiştiğini göstermiştir. Bu değer, iç denizlerde daha da düşebilmektedir. Bu konuda Türkiye için kesin bir veri bulunmamasına karşın, Türkiye kıyılarının beşte birinden sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyelinin, 18.5 milyar kWh olduğu tahmin edilmektedir (Ün, 2003).

Dalga enerjisi; güç kaynağının sonsuz ve bol olması, fosil yakıtlara bağımlılığı, küresel ısınmayı, asit yağmurlarını, her türlü kirliliği dolaylı olarak azaltması, iş sahası açması, deniz ortamında yapılacak diğer çalışmalarda potansiyel teknolojinin kullanımına olanak tanınması, tuzlu suyun tatlı suya çevrilip ihtiyaç bulunan bölgeye pompalanması ve kıyıların korunması gibi alanlara yeni bir yaklaşım getirmektedir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bir enerji kaynağının başarılı bir şekilde keşfedilebilmesi için, kaynağın iyi bir şekilde anlaşılabilmesi, tanımlanabilmesi ve bu kaynaktan uygun bir şekilde yararlanılabilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, Karadeniz’de en uygun dalga modellemesine odaklanarak, Karadeniz için dalga gücünün alansal dağılımının ve ayrıca Türkiye’nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyı şeridi boyunca birkaç istasyonda dalga gücünün zamansal ve alansal dağılımının kapsamlı bir tanımlamasını sağlamaktadır. Çalışma, bir literatür taramasından, basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin ve üçüncü nesil sayısal dalga tahmin modeli SWAN (Simulated Wave Nearshore)’ın Karadeniz’e uygulanmasından, SWAN analizi sonucunda 15 yıllık bir veri tabanı oluşturulmasından, bu veritabanının doğrulanmasından ve modellenen tahmini dalga verilerinin ve dalga gücü potansiyelinin detaylı analizinden ibarettir. Tüm çalışmanın ve çalışmanın her alt bölümünün hedefleri Şekil 1.1’de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Tezin genel yapısı, ana ve alt hedefleri (akış diyagramı)

Şekil 1.1, bu çalışmanın ana ve alt hedeflerini, uygulanma yöntemini ve tezin genel yapısını özetlemektedir. Ana hedefin gerçekleşmesiyle modellenen tahmini dalga veri analizinden elde edilen istatistiksel çıktılar, dalga enerji dönüşümü için uygun olan en iyi alanların kanıtlanmasına bir başvuru kitabı olarak hizmet edebilecektir. Ayrıca, modellenen dalga verileri ile Karadeniz'in tümü için oluşturulan veri tabanı, bu çalışma bölgesinde uygulanacak bilimsel veya uygulama maksatlı kıyı planlama çalışmalarına, ihtiyaç duyacakları dalga karakteristikleri için önemli bir kaynak olabilecektir. Oluşturulan veri tabanının ve tezin potansiyel kullanıcıları akademisyenler, ulusal-bölgesel hükümetler, özel teşebbüsler ve dalga enerji dönüşüm sistem üreticileridir.

### 1.3. Literatür Taraması

Tez çalışması kapsamında konuyla ilgili literatür taramasının özet bilgileri aşağıda sunulmuştur;

Gülçağ (1996), basitleştirilmiş üçüncü kuşak rüzgar dalgası tahmin modelinin geliştirilmiş versiyonunun (METUS3) doğrulanma çalışmasını gerçekleştirmiştir. Model, Karadeniz ve Doğu Akdeniz basenindeki dört ayrı noktada (Alanya, Dalaman, Sinop, Hopa) birkaç ay için denenmiştir. Modelin verdiği tahminler, dalga ölçümleri ve METU3 tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, hatasız rüzgar alanları kullanıldığı sürece modelin geliştirilmiş versiyonunun oldukça doğru tahminler verdiği belirlenmiştir.

Özhan ve Abdalla (1999), Türkiye'yi çevreleyen denizler için rüzgar ve dalga iklimine ilişkin detaylı bilgiler verebilen Türkiye kıyıları için hazırlanmış bir rüzgar ve dalga iklim atlası üretmişlerdir. Bu atlas, Türkiye kıyılarının dalga iklimlerini elde edebilmeyi hedefleyen NATO TU-WAVES projesi ile doğrudan ilişkilidir. Araştırma 1994-2000 yılları arasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Erdal Özhan tarafından yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan veriler, ECMWF rüzgar alanları ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DMI) sinoptik haritalarından elde edilmiştir. Çalışma, Karadeniz, Ege Denizi ve Akdeniz'de 30 km aralıklarda, Marmara Denizi'nde ise 10 km aralıklarda verilen rüzgar ve dalga iklimlerini sunmaktadır. Her nokta için, yüzeysel rüzgar hızları ve gözlenen dalga yükseklikleri yıllık ve mevsimlik olarak verilmiştir. Ayrıca, çalışmada belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ilişkileri, rüzgar ve dalgaların uzun dönemli ekstrem olasılık dağılımları ve aylık en yüksek rüzgar ve dalga dağılımları sunulmuştur.

Sebastiao vd. (2000), Portekiz kıyıları açıklarında ikinci nesil dalga üretim modeli kullanarak dalga karakteristiklerinin tahminini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen model, bu bölgede 6 aylık bir periyotta 3 saatlik aralıklarla ölçülmüş şamandıra verileri ile kalibre edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan rüzgar alan verileri ECMWF'den temin edilmiş ve kalibre edilen modelin belirgin dalga yüksekliğinin tahminlerinde tatmin edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanında, model sonuçları WAM (Wave Prediction Model) model sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve modelin WAM modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Van der Westhuysen (2002), Güney Afrika'da seçilmiş bir kıyı bölgesine SWAN sayısal modelinin uygulanmasını değerlendirmiştir. Yakın kıyı dalga spektrası ve dalga parametrelerinin, SWAN'la benzeştirilme derecesini incelemiştir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için, çeşitli duyarlılık analizleri yapıldıktan sonra hakim dalgaya ilişkin süreçlerin ve uygun modelin kurulmasıyla seçilmiş olan en son model (koşmalar) işlenmiştir. Elde edilen bulgular, mevcut alan ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, SWAN benzeşimlerinin, dalga spektral şekli ve parametrelerinin yakın kıyı istasyonundaki gözlemlerle iyi doğrulandığı belirlenmiştir.

Ozdamar vd. (2004), Türkiye'nin Çeşme kıyılarının dalga enerji potansiyelini araştırmışlardır. Bu maksatla, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Kurumu tarafından Çeşme'de 05.11.1998 – 05.11.1999 yılları arasında deniz seviyesinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızları ölçülmüştür. Ölçülmüş olan değerlerin deniz seviyesinden 19.5 m'lik yükseklikte alınmış olduğu kabulü yapılmıştır. Bu yaklaşımla, Pierson-Moskowitz Dalga Enerji Spektrumu tertip edilmiştir. Bu dalga enerji spektrumu yardımıyla bir yıl içerisinde ölçüm alanında elde edilebilen dalga enerjisi belirlenmiştir. Dalga enerjisinin aylık değişimi değerlendirilmiştir. Böylece, ölçüm alanında kurulması planlanan bir metre genişlikli bir türbin tarafından üretilebilecek elektriğin birim maliyeti hesaplanmıştır.

Özhan ve Yılmaz (2004), Türkiye'de dalga enerjisi konusundaki ilgiye katkıda bulunmak amacıyla, 1994-2001 yıllarında yürütülen NATO TU-WAVES Projesi kapsamında gerçekleştirilen dalga tahminlerinden elde edilen veri tabanı kullanılarak, Karadeniz'deki dalga enerjisi dağılımını inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sunulan dalga verileri, 01.09.1991 – 31.07.1999 tarihleri arasındaki 8 yıl için ECMWF analiz rüzgar alanları ve WAM modelinin enlemde ve boylamda  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (yaklaşık 25 km x 25 km) alansal çözünürlükte kullanılmasıyla tahmin edilen dalga özellikleridir. Çalışmanın sonuçlarına göre, Karadenizin batı kesiminin dalga enerjisi



doğusuna oranla daha yüksektir ve dalga enerjisi mevsimsel olarak önemli düzeyde değişmektedir. Dalga enerjisi büyük oranda, sıklıkla oluşan küçük yükseklikteki dalgalarla taşınmaktadır. Dalga enerjisinin en yoğunlaştığı dalga dönemleri 4 – 9 s arasındadır.

Sağlam (2004), Türkiye’deki kullanılabilir dalga potansiyelini tespit etmeyi ve dalga araçları teknolojisi tipi hakkında en uygun kararı vermeyi hedeflemiştir. Bu amaca ulaşmak için, hem yerli hem de diğer ülkelerin dalga enerjisi ve dönüştürücüleri üzerinde yapılan çalışmaları incelemiştir. Türkiye kıyıları boyunca birçok noktada yaklaşık dalga enerjisi yoğunluklarını hesaplamak için ihtiyaç duyulan bilgi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından yayınlanan dalga atlasından çıkarılmıştır. Hesaplanan deniz güç yoğunluk değerleri surfer programı kullanılarak harita üzerinde konturlarla gösterilmiştir.

Sağlam ve Uyar (2005) ve Sağlam vd. (2010), Türkiye’deki kullanılabilir dalga potansiyeli ile verimli bir dalga enerji sisteminin kurulup kurulamayacağı ve Türkiye’deki mevcut enerji programına entegre edilebilir nitelikte kurulabilecek dalga enerjisi dönüştürücü teknolojisi tipi hakkında en uygun kararı vermeyi amaçlamışlardır. Bu maksatla, Türkiye’nin denizlerinden enerji üretmek için faydalı olabilecek uygun teknolojiyi ortaya çıkarmak üzere diğer ülkelerdeki mevcut teknolojiler gözden geçirilmiş ve RETScreen International’ın “Small Hydro” fizibilite çalışmalarından da faydalanılarak maliyet etkinliği hesaplanmıştır. Dalga enerjisi bakımından en uygun bölgeleri ve en uygun teknolojiyi seçebilmek maksadıyla Dalga Enerji Santrali Proje Analizi yapılmıştır. Sonuçta, teknik olarak elde edilebilir potansiyelin 4 kW/m ve 17 kW/m arasında bir yıllık dalga gücü ile yaklaşık 10 TWh/yıl olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Finike ve Marmaris arasında Ege denizinin güney batı kıyıları açıklarındaki ve İstanbul Boğazının kuzeyinde Karadeniz’in batısındaki bölgeler dalga enerjisinin elde edilebilmesi için en uygun alanlar olarak önerilmiştir.

Beyene and Wilson (2006), Kaliforniya’nın kuzey, orta ve güney kıyılarının dalga enerji potansiyellerini uzun dönemli istatistiksel dalga verilerine dayanarak hesaplamış ve bu üç bölgeyi kendi içlerinde kıyaslamıştır. Bu maksatla, Kaliforniya kıyılarının üç bölümünün (Kuzey Kaliforniya, Güney ve Orta Kaliforniya, Güney Kaliforniya) dalga istatistiği çıkarılarak matematiksel bir model geliştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucuna göre, Kaliforniya’nın kuzey ve orta bölgeleri kısmen düşük frekanslı yüksek dalgalarla karakterize edilirken güney bölgeleri daha yüksek frekanslı düşük dalgalarla karakterize edilmiştir. Genel olarak, bu çalışmada, bu üç bölge için Kaliforniya’nın dalga enerji potansiyeli değerlendirilmiş ve kıyaslanmıştır.

Uygur vd. (2006) tarafından Batı Karadeniz (Akçakoca) bölgesinde beş yıllık (1996-2000) gözlemsel çalışmalar yapılmış (dalga yüksekliği ölçülmüş, grup hızı ve bazı parametreler ampirik formüller yardımıyla hesaplanmış) ve bölgenin dalga enerji potansiyeli tespit edilmiştir. Yaptıkları incelemeler sonucunda, Akçakoca sahillerinin 5 yıllık ortalama dalga yüksekliği 0.55 m olarak ölçülmüş ve dalga enerji potansiyeli parametrik olarak yaklaşık en düşük 6 kW/m ve en fazla 28 kW/m olduğu belirlenmiştir.

Ardhuin vd. (2007), Batı Akdeniz’de iki kez bir aylık süre ile rüzgar ve dalga şartlarını tahmin etmiştir. Dört farklı meteorolojik model (ALADIN, COAMPS, ARPEGE, ECMWF) ve üç farklı dalga modeli (WAM Cycle 4, VAG, Wavewatch III) kullanılmıştır. Elde edilen değerler, uydu ve şamandıra rüzgar ve dalga gözlem sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışmanın bulgularına göre, ALADIN ve COAMPS meteorolojik modellerinin çözünürlüğünün açık denizlerde yeterince iyi olduğu ve model rüzgar alanlarının kalitesini iyi tanımlanmış meteorolojik şartların artıracağı sonucuna varılmıştır.

Beyene and Wilson (2007), Kaliforniya’nın dalga enerji kaynak potansiyelini sayısal olarak haritalamışlardır. Çalışmada, biriktirilen derin su dalga kayıtları, istatistiksel bir ortalama dalga veri tabanı oluşturmak maksatlı değerlendirilmiştir. Daha sonra, Kaliforniya kıyılarının denize doğru 100 m ve 1000 m derinlik konturlarına bağlanan 1°’lik enlem sınırları için uzun dönemli yıllık ortalama ve aylık açık deniz dalga olasılık dağılımları oluşturulmuştur. Bu olasılık dağılımları, SWAN yazılım programından yararlanılarak, Kaliforniya’nın kıyısız bölgelerinde dalgadan kullanılabilir enerji elde etme potansiyelini, nicel olarak belirlemek ve benzeştirmek için kullanılmıştır. Bu metot, muhtemel dalga enerji dönüşümü için dalga enerji kaynağını haritalamak maksadıyla uygulanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kıtasal Kuzey Amerika’nın batı kıyısının daha güçlü dalgalara sahip olduğunu, dalga enerji potansiyelinin kuzeye doğru arttığını göstermiştir. Güneyin sığ sularında yaklaşık 10 kW/m kadar düşük potansiyel mevcutken kuzeyde 32 kW/m kadar yüksek potansiyel bulunmaktadır.

Çapan (2007), Türkiye’nin Karadeniz kıyılarındaki rüzgar dalgası ikliminin daha iyi anlaşılmasını sağlamayı hedeflemiştir. Bu amaçla, ECMWF tarafından 65 ay süreli veri sağlanmış ve elde edilen veriler, Türkiye’nin Karadeniz kıyıları boyunca seçilen on iki bölgede incelenmiştir. Her bölge için rüzgar ve rüzgar dalgası gülleri, belirgin dalga yüksekliğine karşılık ortalama rüzgar dalga periyodu ilişkisi, en yüksek değerler istatistiği analizi ve log-lineer toplam dağılımları sunulmuştur. Ayrıca, dalga ikliminin daha iyi anlaşılabilmesi amacı kapsamında, önceki çalışmalarla bir kıyaslama da yapılmıştır.

Henfridsson vd. (2007), Baltık Denizi'nde ve Kuzey Denizi'nin Danimarka kıyılarında kurulması muhtemel dalga gücü tesislerinin olası örneklerini incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, dalga enerjisinin fiziksel olarak muhtemel olduğunu göstermektir. Bu bağlamda, dalga enerjisinin ılımlı iklimlerde dahi çevresel avantajlara sahip ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu kanıtlamayı hedeflemişlerdir. Çalışmanın sonuçları, yalnızca Kuzey Denizi'nde dalga enerji üretimi için ümit verici alanların bulunduğunu göstermemiş, aynı zamanda Baltık Denizi'nin de pek çok bölümünün önemli dalga enerjisi potansiyeline sahip olduğunu ispatlamıştır.

Kabdaşlı vd. (2007), Türkiye'deki dalga enerjisi potansiyelinin belirlenmesini ve bu potansiyelin verimli bir biçimde kullanılabilmesi için gerekli ve özgün teknolojilerin geliştirilmesini amaçlamışlar ve dalga enerjisi alanında Türkiye'deki az sayıdaki kaynağa katkıda bulunulmasını hedeflemişlerdir. Bu bağlamda, Kumköy çalışması ile söz konusu hedeflere yönelik araştırmaların bir örneği gerçekleştirilmiş ve bölgede kullanılabilir ölçekte dalga enerjisinin üretilebileceği görülmüştür.

Rogers vd. (2007), Güney Kaliforniya'da SWAN modelini kullanarak dalga tahminleri gerçekleştirmişlerdir. Bu tahminlerde SWAN'nın yeteneği kapsamında olan durgun durum ve durgun olmayan durumlar için ve ayrıca kaba coğrafik çözünürlük ve yüksek coğrafik çözünürlük şartlarını kullanarak gerçekleştirdikleri tahminleri kıyaslamış ve bu şartlarda oluşacak hataları değerlendirmişlerdir. Çalışmalarının sonuçları, durgun durum analizlerini kullanmanın ortalama karekök (RMS) hatalarını faz hatası nedeniyle bir miktar artırdığını ve SWAN'ın yeni paralel hesaplama özellikleri ile bölgesel ölçekte operasyonel yüksek çözünürlüklü dalga tahminleri için önemli bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Cornett (2008), WAVEWATCH-III rüzgar dalga modeliyle 10 yıllık periyotta üretilen dalga iklim tahminlerinin analizlerinden türetilen, küresel dalga enerji kaynaklarının bir araştırmasının sonuçlarını vermiştir. Çalışmada, küresel dalga enerji kaynağının alansal ve zamansal değişimleri sunulmuş ve tanımlanmıştır. Dalga enerji kaynağının zamansal değişiminin miktarlaştırılması ve tanımlanması için gerekli birkaç parametre tartışılmış ve yeni sonuçlar önceki çalışmalar ve şamandıra ölçümlerinden gerçekleştirilen enerji tahminleriyle kıyaslanarak doğrulanmıştır.

Dragani vd. (2008), Rio de la Plata (Arjantin) açıklarındaki dalga iklimini araştırmak için, Amerika'nın Ulusal Okyanus ve Atmosfer Kurumu'nun (NOAA) NCEP/NCAR re-analiz veri tabanının 10 m yükseklikteki rüzgarları kullanılarak koşturulan SWAN

modelini uygulamış ve doğrulamışlardır. Çalışmada, dalga parametrelerinin 13 aylık periyotlu alan ölçümlerinin zaman serileri sayısal benzeşimlerden elde edilen sonuçları doğrulamak için kullanılmıştır. Benzeştirilen ve ölçülmüş dalga parametreleri arasındaki farkları azaltmak için rüzgar hızına bağlı bir düzeltme katsayısı, rüzgar düzeltme faktörü olarak uygulanmıştır. Dalga yükseklikleri ve yönlerini tatmin edici bir şekilde benzeştiren ancak periyotları düşük tahmin eden nispeten düşük çözünürlüklü dalga modeli gelecek uygulamalar ve araştırmalar için güvenilir bir araç olacağı belirtilmiştir.

Joubert (2008), Güney Afrika kıyılarındaki dalga enerjisini, özellikle en yüksek dalga enerjisinin ortaya çıktığı kıyısal bölgelerdeki alansal dağılımına odaklanarak araştırmıştır. Çalışmada, Güney Batı kıyı bölgesindeki (Cape Point'ten Elands Körfezine) dalga gücü karakteristiklerine odaklanılmıştır. Çalışmanın hedefini gerçekleştirebilmek için, 10 yıllık derin deniz dalga verilerinin güney batı kıyı alanlarına SWAN modeli yardımıyla transfer edilmesi ile yakın kıyı dalga modellemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışılan alanla ilgili istatistiksel bilgiler ve dalga enerjisinin alansal dağılımı elde edilmiştir. Model çıktılarının doğruluğu aynı periyotta yapılan dalga ölçümleriyle karşılaştırılarak araştırılmıştır. Modelin aylık dalga enerjisi kaynak verilerine bakıldığında, ölçülmüş değerlerden en fazla % 9 daha yüksek tahminler yaptığı görülmüş ve bu değer, modelin doğruluğu açısından kabul edilebilir bir aralıkta olduğu değerlendirilmiştir.

Rusu (2009), Karadeniz havzasında dalga enerji kaynaklarını değerlendirmeyi hedeflemiştir. Çalışma özellikle denizin batı bölümüne odaklanmış ve dalga iklimini değerlendirmek için öncelikle ölçülmüş gerçek veriler kullanılarak orta dönemli bir dalga analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yakın kıyı dalga modeline dayanan bir dalga tahmin sistemi Karadeniz'e uyarlanmıştır. Kullanılan dalga modeli, dalga üremesini ve yakın kıyı dalga dönüşüm süreçlerini içeren ve dalgaları benzeştiren bir yapıya sahiptir. Ölçülmüş verilerle yapılan kıyaslamalar özellikle belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu bakımından dalga tahmin sisteminin çoğunlukla güvenilir sonuçlar sağladığını göstermiştir.

Rusu and Soares (2009), Portekiz'in yakın kıyı bölgelerindeki dalga enerjisi alansal dağılımı için birkaç amaca yönelik uygun model analizi etmişlerdir. Öncelikle, hedeflenen bölgedeki dalga ikliminin orta dönemli bir analizi 1994-2003 yılları arasındaki 10 yıllık şamandıra ölçümlerine dayanarak gerçekleştirilmiştir. İki farklı spektral modele (WAM ve SWAN) dayanan bir dalga tahmin sistemi, dalga şartlarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu çalışma, Portekiz'in yakın kıyı bölgesinde dalga enerjisinin alansal

dağılım modelini değerlendirmek için spektral aşamaya dayanan karmaşık bir dalga tahmin sistemini kullanmanın geçerliliğini (verimliliğini) kanıtlamış ve aynı zamanda, maksimum dalga gücü tahminlerinin genellikle maksimum belirgin dalga yükseklikli bölgelerle çakışmayacağını göstermiştir. Böylece, kıyısız çevrede dalga enerjisi bakımından zengin olan bölgeler daha iyi belirlenmiş olacaktır.

Waters vd. (2009), İsveç'in batı kıyılarının açıklarındaki dalga iklimini değerlendirmişlerdir. Çalışma, Skagerrak ve Kattegat'da açık deniz ve yakın kıyı bölgelerindeki 13 alanda sekiz yıllık (1997-2004) dalga verilerine dayanmaktadır. Veriler, bir dalga ölçüm şamandırası verileri ile kalibre edilen WAM ve SWAN dalga modellerinin bir ürünüdür. Sonuç olarak, çalışma bölgesindeki dalga enerji akıları hesaplanmış ve Skagerrak bölgesinin açık deniz kısmındaki ortalama dalga enerji akısının 5.2 kW/m, yakın kıyı kesimindeki 2.8 kW/m, Kattegat bölümünde ise 2.4 kW/m olduğu belirlenmiştir.

Duman (2010), Türkiye kıyılarında ölü deniz ve rüzgar dalgası enerjisi potansiyelini belirlemeyi hedeflemiştir. Bu maksatla, 156 aylık bir süre için 6 saat aralıklarla ECMWF'ten çeşitli dalga parametrelerini temin etmiştir. Çalışmada, Türkiye'nin Karadeniz ve Akdeniz kıyı çizgisi boyunca 5 bölge için değerlendirmeler yapılmıştır. Her bölge için ayrı ayrı ölü deniz dalgasının belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodunun ve rüzgar dalgasının belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodunun ortak olasılık dağılımları çizilmiştir. Ayrıca, ölü deniz dalgasının belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodu için ve rüzgar dalgasının belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodu için, ölü deniz dalga gücü için ve rüzgar dalgası için süreklilik eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, dalga enerjisinden yararlanmak için en uygun alanlar olarak, İstanbul boğazının kuzeyinde, Karadeniz'in batısındaki bölgelerin olduğu belirtilmiş, ancak verilere ilişkin herhangi bir doğrulama yapılmamıştır.

Iglesias ve Carballo (2010), Estaca de Bares (İspanya)'nın dalga enerji kaynağını şamandıra verileri, 44 yıllık tahmini dalga verileri ve sayısal modelleme kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada, enerjinin çoğunun, 2 m ve 5 m arasındaki belirgin dalga yükseklikli ve 11 s ve 14 s arasında enerji periyotlu dalgalar tarafından üretildiği belirlenmiştir. Ayrıca, SWAN sayısal dalga modelini kullanarak yakın kıyı modellemesi yapılmış ve dalga yüksekliği ve gücünün yakın kıyı bölgesindeki değişimleri ortalama dalga şartları, artan dalga şartları, çok enerjik şartlar ve azalan dalga şartları için dört ayrı durumda incelenmiştir. Yakın kıyı bölgesinde kurulabilecek sistemler için dalga gücünün 100 m'nin altındaki su derinliklerindeki değişimleri irdelenmiştir. Sonuç olarak, belirgin dalga

yüksekliği ve dalga gücünün maksimum değerlerinin bütün durumlarda 100 m'den daha düşük derinliklerde olduğu görülmüştür. Ayrıca, her durumda, maksimum belirgin dalga yüksekliğinin yeri, maksimum dalga gücününki ile aynıdır. Aynı zamanda, modelleme sonucunda ilgi alanında dalga gücü yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler de belirlenmiştir.

Arinaga ve Cheung (2011), üçüncü nesil bir spektral dalga modeli WAVEWATCH III ve Final Global Tropospheric Analysis rüzgar verileri ile bir tahmin çalışması, dalga iklim araştırması ve kaynak değerlendirmesi için yararlı bir veri tabanı üretmeyi hedeflemiştir. 10 yıllık periyot için 6 saat aralıklarda 77° K ve 77° G enlemleri arasında 1.25° x 1°'lik bir küresel karelağı kapsayan dalga verileri, şamandıra ve uydu verileri ile doğrulanmıştır. Uydu verilerine kıyasla, hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri regresyonunun dünyada altı deniz bölgesinde, 0.36 – 0.48 m RMS hata değerleriyle iyi korelasyona sahip olduğu, ancak pik dalga periyodu regresyonunun dünya okyanuslarında birden fazla pik değerine sahip spektrumlu deniz durumları nedeniyle kabul edilebilir olmadığı belirlenmiştir. Ortalama dalga periyot kıyaslaması ise iyi korelasyon göstermiştir. Sonuçta, mevcut küresel rüzgar dalga ve ölü deniz dalgası kaynaklarının genel bir değerlendirilmesi sağlanmış ve yüksek çözünürlüklü rüzgarlarla bir iç içe geçmiş yakın kıyı dalga modellemesi, kıyı bölgelerindeki dalga enerji potansiyelinin detaylı değerlendirmesi için gerçekleştirilmiştir.

Kim vd. (2011), Kore yarımadası çevresindeki bölge için bir dalga kaynak değerlendirme çalışması sunmuşlardır. Çalışma bölgesinde mevsimsel ve yıllık ortalama dalga gücünün alansal dağılımları, SWAN sayısal dalga model tahminleri yardımıyla elde edilmiştir. Çalışmada en yüksek aylık ortalamalı dalga gücü (25 kW/m) kışın yarımadanın güneybatı kıyısında gözlenmiştir. Belirgin dalga yüksekliği ve enerji periyodu arasındaki korelasyon sayısal benzeşimle elde edilen yakın kıyı dalga gücünü düzeltmek için gözönünde bulundurulmuştur. Düzeltme prosedürü şamandıra verileri ile benzeştirilen verilerin kıyaslanmasıyla doğrulanmıştır.

## **1.4. Küresel Dalga Gücü Potansiyeli ve Potansiyelin Değerlendirilme Durumu**

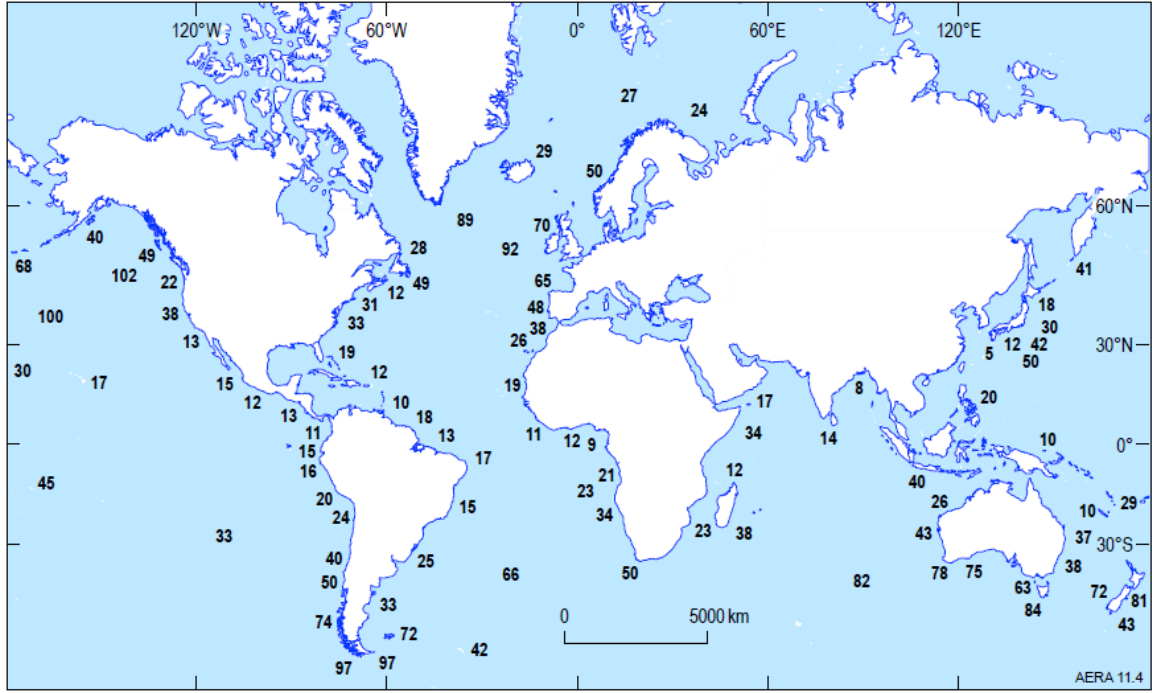
### **1.4.1. Dalga Gücü Kaynağı ve Küresel Dağılımı**

Archimedes prensibi ve yerçekimi arasında ortaya çıkan büyük güç dalga enerjisidir. Dalga enerjisi en çok önerilen yenilenebilir enerji teknolojilerden biridir. Büyük bir enerji

kaynağı olmasının yanında birçok yenilenebilir enerji kaynağından daha güvenilirdir. Güneş ve rüzgar enerjisi zamanın % 20-30'unda temin edilebilirken dalga enerjisi zamanın % 90'ında elde edilebilmektedir. Temiz, ucuz ve doğal enerji kaynağı olan, doğal dengeyi koruyan, temiz hava sağlayan ve ülke ekonomisine destek olan dalga enerjisi, (Pelc ve Fujita, 2002) üç yanı denizlerle çevrili ülkemizde yararlanılması gereken yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir.

Dalga enerjisi güneş radyasyonunun doğrudan bir sonucudur. Rüzgarlar dünyanın farklı ısınmasıyla oluşmaktadır. Bu rüzgarların büyük okyanus veya deniz alanları üzerinden esmesi sırasında rüzgar enerjisinin bir miktarı su dalgası oluşturmaktadır. Üretilen dalgaların büyüklüğü rüzgar hızına, rüzgarın estiği fırtına süresine ve feç mesafesine bağlıdır. Deniz alanlarında, rüzgardaki enerji, dalgalara iletilmekte ve dönüşüm sürecindeki her safhada yoğunlaşmaktadır. Bundan dolayı, dünya yüzeyinin tipik olarak  $100 \text{ W/m}^2$ 'lik homojen bir şekilde dağılmış güneş ışınımı güç seviyeleri, göreceli yüksek dalga enerjisinin meydana geldiği okyanus bölgelerinde,  $10\text{--}50 \text{ kW/m}^2$ 'deki yersel olarak yoğunlaşmış güç seviyelerine sahip dalgalara dönüştürülebilmektedir. Fırtına dalgaları, dalga üretim alanına yakın veya içerisinde çok düzensiz bir yapı sergilemektedir. Rüzgar yön değiştirdikten sonra bile oluştukları yönde seyahat etmeye devam etmektedir. Derin sularda, dalgalar enerji kaybı nedeniyle fırtına bölgesi (rüzgar alanları) dışına seyahat edebilmektedirler. Dalgalar ilerledikçe başlangıç noktalarından büyük mesafeler (örneğin on binlerce kilometre) kat edebilen bir ölü deniz dalgası veya düzenli ve düzgün dalgalar olmaktadır (Boud, 2003; Joubert, 2008).

Dalga gücü, dalga genliğinin karesi ve hareket periyodu ile orantılıdır. Uzun periyotlu ( $\sim 7 - 10 \text{ s}$ ), büyük genlikli ( $\sim 2 \text{ m}$ ) dalgaların birim genişliği de ( $\text{m}$ )  $40 - 50 \text{ kW}$  enerji oluşmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi dalga enerjisi de dünyada düzenli dağılıma sahip değildir. Dünyada yüksek dalga gücüne sahip birkaç bölge bulunmaktadır. Her iki yarıkürede  $\sim 30^\circ$  ve  $\sim 60^\circ$  enlemler arasında dalga hareketi batı rüzgarlarının hakimiyeti ile yüksektir. Şekil 1.2'de dalga gücünün okyanus bazında dünyadaki dağılımı görülmektedir. Avrupa Ülkelerinin Akdeniz sahillerinde yıllık dalga gücü  $4$  ile  $11 \text{ kW/m}$  arasında değişmekte ve en yüksek değerler Ege Denizinin güney batı bölgesinde görülmektedir. Avrupa'nın toplam dalga enerji kaynağı  $320 \text{ GW}$  iken Avrupa'nın Akdeniz sahilleri boyunca derin su kaynağı yıllık  $30 \text{ GW}$  mertebesindedir (Clement vd., 2002; CRES, 2002).



Şekil 1.2. Ortalama yıllık okyanus dalga gücünün küresel dağılımı (kW/m)

Kıyıya doğru hakim rüzgar yönünde uzun feçlere sahip kıyılar, enerjisi yüksek dalga iklimlerine sahip olma eğilimi göstermektedir. Dünya’da bu kıyılar, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi Kuzey Amerika’nın Kuzey Batı Kıyıları, Güney Amerika’nın Güney Batı Kıyıları, Avrupa, Afrika, Avustralya ve Yeni Zelanda Kıyıları olarak sıralanabilir.

Dünyanın dalga gücü potansiyeli, 1970’lerdeki elektrik enerji tüketimi ile aynı büyüklükte (86 – 87 kWh/yıl) olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 1.2, yıllık ortalama güç seviyelerinin, 20 – 70 kW/m arasında veya daha büyük seviyeli yüksek dalga iklimlerinin, güçlü fırtınaların meydana geldiği sıcak bölgelerde (30° N – 60° S enlemleri) bulunduğunu göstermektedir. Bunun yanında, belirgin dalga iklimleri daha küçük dalga gücü değişkenliğiyle dengelenen düşük güç seviyeli düzenli rüzgarların estiği  $\pm 30^\circ$  enlemler içerisinde bulunmaktadır (Boud, 2003; Joubert, 2008).

#### 1.4.2. Dalga Enerjisinin Dünyadaki Gelişme Durumu

Dalga enerjisi üzerine çalışmalar 1970’lerde petrol krizinin üzerine hız kazansa da birkaç başarısız denemeden sonra dalga enerjisi üzerine olan ilgi azalmıştır. Ancak teknolojinin ilerlemesi ile ilgi yeniden artmış ve birçok yeni teknoloji geliştirilmiştir. Dalga



enerjisi üretim sistemleri üzerine 1000'in üzerinde patent alınmış ve birçok ticari potansiyeli olan tesis de üretime girmiştir (Pelc ve Fujita, 2002).

Dünyada ilk ticari dalga enerji tesisi Limpet 500, 2000 yılında İskoçya'nın Islay adasında kurulmuştur ve Kasım 2000'in sonlarından beri de İngiltere'nin elektrik şebekesine güç sağlamaktadır. Limpet 500, 0.5 MW kapasiteli ve Wavegen tarafından tasarlanmış bir tesistir. Ayrıca, İskoçya'nın Edinburgh Okyanus Güç Dağıtım Ltd. Şirketi Islay'da, küçük (200 evin enerjisini karşılayacak) ve kıyıdan uzak uygulanan dalga enerji sistemi inşa etmiştir. 2002 yılında tamamlanan tesis yılda 2.5 milyon kWh elektrik üretecektir. Bu şirket, ayrıca İskoçya'nın desteği ile toplam kapasitesi 700 MW olan 900 cihaz kullanarak yılda 2.5 milyon kWh'dan fazla üretim yapmayı planlamaktadır (Pelc ve Fujita, 2002).

Birçok ülkede Salınlı Su Kolonu (OWC) dalga üretim sistemi gösterim amaçlı yapılmıştır. Çeşitli yıllarda İskoçya'da (75 kW), Hindistan'da (150 kW), Japonya'da (Sakata Port'da 60 kW, Sanze'de 40 kW, Kujukuri-Cho'da 30 kW, Haramachi'de 130 kW) ve Norveç'te (500 kW) gösterim amaçlı OWC sistemi uygulanmıştır. Avustralya'da Energetech OWC ve Sri Lanka OWC sistemleri test amaçlı kullanılmaktadır.

Birçok ülkede dalga enerjisi üzerine yapılmış programlar yürütülmektedir. Özellikle Avrupa ülkelerinde bu programlar ile dalga enerjisinde önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Bu programlar çerçevesinde Norveç'te OWC ve Tapchan sistemleri, 1980'lerde ticari olarak kurulmuştur. Portekiz'de kıyı boyu OWC uygulaması, (500 kW) Azores'in Pico adasında gerçekleştirilmiştir. İsveç'te İsveç Housepump, İngiltere'de de OSPREY OWC sistemleri geliştirilmiştir. Bunların yanında, Avustralya'da, Hindistan'da, Japonya'da ve Kore'de de dalga enerjisi üzerine yapılan programlar yürütülmektedir (Ün, 2003).

Türkiye'de ise, Marmara denizi dışında açık deniz kıyılarının 8210 km'yi bulmasına rağmen, dalga rasatları ve bunlara ilişkin ölçüm verileri yok denecek kadar azdır. Sınırlı sayıdaki çalışmalar ise dalga gücünün, Akdeniz kıyıları için ortalama 13 kW/m olduğunu belirtmektedir. Türkiye dışında Akdeniz'de yapılmış ölçümler, bu gücün yıl boyu 8.4 - 15.5 kW/m arasında değiştiğini göstermiştir. Bu değer, iç denizlerde daha da düşebilmektedir. Bu konuda Türkiye için kesin bir veri bulunmamasına karşın, Türkiye kıyılarının beşte birinden yararlanılarak sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyelinin 18.5 milyar kWh olduğu tahmin edilmektedir. Ancak, dalga enerjisinin kullanılması, Türkiye'nin gündemine henüz girmemiştir (Ün, 2003).

## 1.5. Dalga Mekaniği

### 1.5.1. Giriş

Bu çalışma, lineer dalga teorisinin dalga parametrelerini yeterli doğrulukta tanımladığı yerler olan derin denizdeki ve orta derinlikteki suların dalga enerjisi gücüyle ilgili olduğundan dolayı, lineer dalga teorisi aşağıda dalga enerjisi gücü ile ilişkili parametreleri tanımlamakta kullanılmıştır.

Lineer dalga teorisi okyanus dalgalarını basit sinüzoidal dalgalar olarak tanımlamaktadır. Dalga profilinin, ortalama su seviyesinin üstündeki maksimum yüksekliği dalga tepesi olarak, bu seviyenin en altında kalan kısmı da dalga çukuru olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.3). Ortalama su seviyesinden dalga tepesine ya da çukuruna olan mesafe dalga genliği (a) ve dalga tepesinden dalga çukuruna kadar olan mesafe de dalga yüksekliği (H) olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir derinlikteki düzenli bir dalganın dalga boyu (L), genliklerin eşit olduğu ve dalga tepesinden dalga tepesine ya da bir çukurdan diğer çukura ardışık noktalar arasındaki yatay mesafedir ve lineer dalga teorisine göre tanımlanmaktadır. Düzenli bir dalganın yayılma hızı ise dalga boyunun dalga periyoduna oranıdır. Dalga boyu, periyodu, su derinliği ve dalga yayılma hızı (C) arasındaki ilişkiler, Denklem 1.1, 1.2 ve 1.3'de verilmiştir.

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (1.1)$$

$$C = \frac{L}{T} \quad (1.2)$$

$$C = \frac{g T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (1.3)$$

Burada; g yerçekimi ivmesi, T dalga periyodu (sabit bir noktadan bir dalga boyunun geçmesi için gerekli süre), d su derinliği (okyanus tabanından ortalama su yüzeyine olan mesafe)'dir.

Su derinliğinin dalga boyuna oranının (d/L) 1/2 olduğu su derinliğine derin deniz sınırı adı verilmektedir. Derin deniz sınırından derindeki bölgeler derin deniz, kıyı

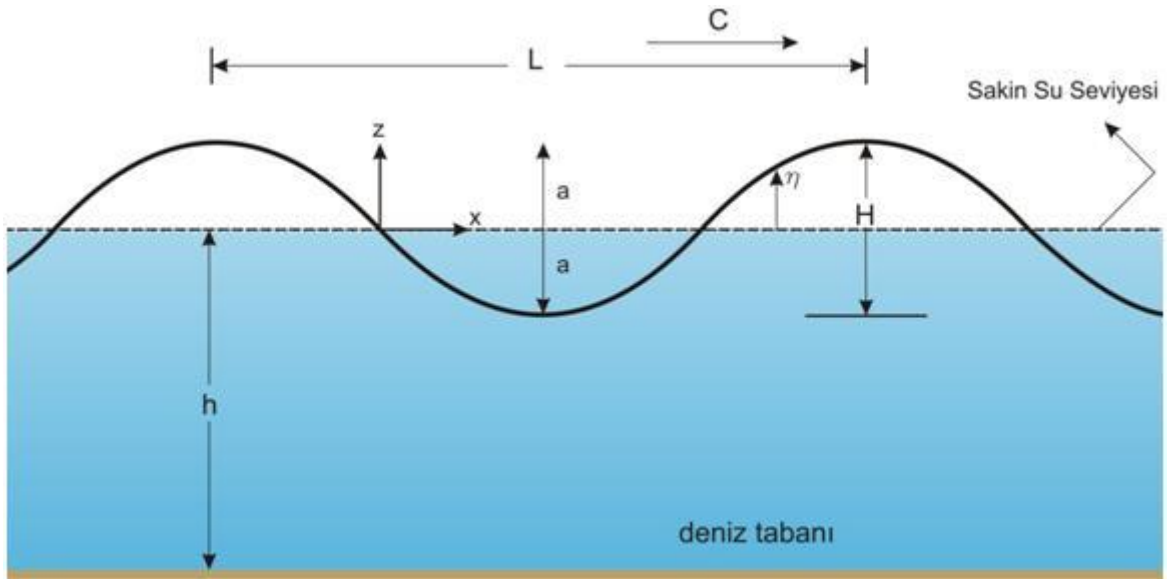
tarafındaki bölgeler ise sığ su olarak adlandırılmaktadır. Derin denizdeki dalga parametreleri  $\omega$  indisi ile ifade edilmektedir. Derin denizlerde su derinliği büyük olduğundan hiperbolik tanh fonksiyonu 1'e yönelmektedir. Bu durumda, Denklem 1.1 ve 1.3 eşitliklerinden derin deniz dalga boyu ve hızı,

$$L_o = \frac{g T^2}{2 \pi} = 1.56 T^2 \quad (1.4)$$

$$C_o = \frac{g T}{2 \pi} = 1.56 T \quad (1.5)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Dalga problemlerini çözmeye teorik bir dalga formu kullanılmaktadır. İdealize edilmiş bu dalga profiline, sinüs fonksiyonu ile aynı yapıda olduğundan sinüzoidal dalga ismi verilmektedir. Sinüzoidal dalga profili, Şekil 1.3'te verilmektedir.



Şekil 1.3. Sinüzoidal dalga profili

Sinüs dalgasında, dalga şekli veya profili, durgun su seviyesinden düşey mesafenin, zamanın ve yerin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta = a \sin(2\pi) \left[ \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right] \quad (1.6)$$

Denklemden,  $\eta$  dalga profilinin durgun suya göre düşey mesafesini ve  $x$  yatay eksen boyunca alınan mesafeyi temsil etmektedir.

Dalga gücü enerji yoğunluğuna bağlıdır ve enerji yoğunluğunu saptayacak denklemler aşağıdaki bölümde çıkarılmıştır.

### 1.5.2. Enerji Yoğunluğu

Dalga sisteminin toplam enerjisi onun kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Kinetik enerji, toplam enerjinin dalga hareketiyle birleşmiş bir su partikülünün hızından dolayı olan kısmıdır. Potansiyel enerji ise çukur ile dalga tepesi arasında kalan akışkan kütlelerin oluşturduğu enerjidir. Bir okyanus dalgasının toplam enerjisi ( $E$ ),

$$E = E_k + E_p \quad (1.7)$$

denklemleriyle hesaplanmaktadır. Burada;  $E_k$  kinetik enerji (Joules) ve  $E_p$  potansiyel enerji (Joules)'dir.

Lineer teoriye göre eğer potansiyel enerji ortalama su seviyesine göre saptanırsa, tüm dalgalar aynı yönde gelişmekte, potansiyel ve kinetik enerji bileşenleri eşit olmakta ve her birim dalga tepesi genişliğinin bir dalga boyundaki toplam dalga enerjisi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (1.8)$$

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (1.9)$$

$$E = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (1.10)$$

Her birim yüzey alanındaki toplam ortalama dalga enerjisi, özgül enerji ya da enerji yoğunluğu ( $\bar{E}$ ) olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\bar{E} = \frac{E}{L} \quad (1.11)$$

$$\bar{E} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (1.12)$$

Dalga enerjisi yayılmasının oranı doğrudan dalganın grup hızına bağlıdır. Grup hızı ( $C_g$ ) aşağıdaki formülle ifade edilebilmektedir.

$$C_g = n C \quad (1.13)$$

Bu denklemdeki n katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilen bir sabittir.

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(4 \pi d / L)}{\text{Sinh}(4 \pi d / L)} \right] \quad (1.14)$$

Derin denizlerde grup hızı ( $C_{g_0}$ ), Denklem 1.14'ten  $n = 0.5$  olacağından,

$$C_{g_0} = \frac{0.5 L_0}{T} \quad (1.15)$$

olarak sadeleşmektedir. Dalga gücü ile ilişkili tüm parametreler tanımlandıktan sonra aşağıdaki bölümde dalga gücü için bir denklem çıkarılmıştır.

### 1.5.3. Dalga Enerjisi Akısı

Dalga enerjisi akısı (dalga gücü), dikey bir düzlem boyunca dalga yayılımı yönünde iletilen enerjinin dalga ilerleme yönüne ve tüm derinliğe yayılması oranıdır. Doğrusal teoriyi varsaymayı sürdürerek, dik düzlem boyunca dalga gelişim yönünde iletilen her birim dalga tepesi genişliğinin ortalama enerji akısı,

$$\bar{P} = \bar{E} C_g \quad (1.16)$$

$$\bar{P} = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g \quad (1.17)$$

Derin denizlerde dalga enerjisi yoğunluğu yüzey bölgesinden ortalama su seviyesinin alt tarafındaki  $L_0/2$  bölgesine iletilmektedir. Dalga enerjisi akısı ( $\bar{P}$ ) aynı zamanda dalga gücü (enerjisi) olarak da tanımlanmaktadır. Dalga teorisinin tanımlanması göstermiştir ki dalga gücü üç temel dalga parametresine dayanmaktadır (dalga yüksekliği, dalga periyodu ve su derinliği) (US Army, 2003).

#### 1.5.4. Spektral Analiz

##### 1.5.4.1. Dalga Parametreleri ve Dalga Spektrumu

Dalga enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için deniz dalga şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu ancak dalga rasatları ve dalga modellerinin kullanılması ile mümkün olmaktadır. Son zamanlarda dalga enerjisinin belirlenmesinde atmosfer-deniz dalga modelleri kullanılmaktadır. Ülkemizde dalga rasatları, ilgili kurum (Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı) ve bazı araştırma projeleri (NATO TU-WAVES vb.) kapsamında yapılmaktadır. Bu nedenle, elde edilen uzun dönemli dalga kayıtları bulunmamaktadır. Ayrıca ölçüm yapılan istasyonların sayısı da yeterli değildir. Meteorolojik veriler kullanılarak uzun süreli veriler üretilebilir ve deniz üzerinde dalga ölçüm istasyonu kurmadan sadece meteorolojik değişkenlerin ölçülmesi veya daha önceden kaydedilmiş veriler ile dalga karakteristikleri belirlenebilmektedir. Genel olarak dalgalar, yükseklik ve periyot gibi iki değişkenle tanımlanmaktadır. Bunun yanında, rüzgarın ortaya çıkardığı dalgalarda etkin olarak üç faktör mevcuttur. Bunlar; rüzgar hızı (V), rüzgar esme süresi (t) ve (F) ile gösterilen feç mesafesidir. Tam gelişmiş deniz durumunda ise dalgalarda etkin faktör sadece rüzgar hızıdır (Özger, 2007).

Dalga enerjisinin belirlenmesinde iki önemli parametre vardır. Bunlar; belirgin dalga yüksekliği ( $H_s$ ) ve enerji periyodu ( $T_e$ )'dir. Dalga enerjisi dönüştürücülerinin hidrodinamik tepkileri dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile doğru orantılı olan dalga gücünün düzeyi ile yakından alakalıdır. Dalga enerjisi yapılabirlik çalışmalarında, çeşitli dalga yüksekliklerinde ve periyotlarında yıllık elektrik üretiminin nasıl değiştiğinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun için de ortalama dalga gücünün belirlenmesi gerekmektedir.

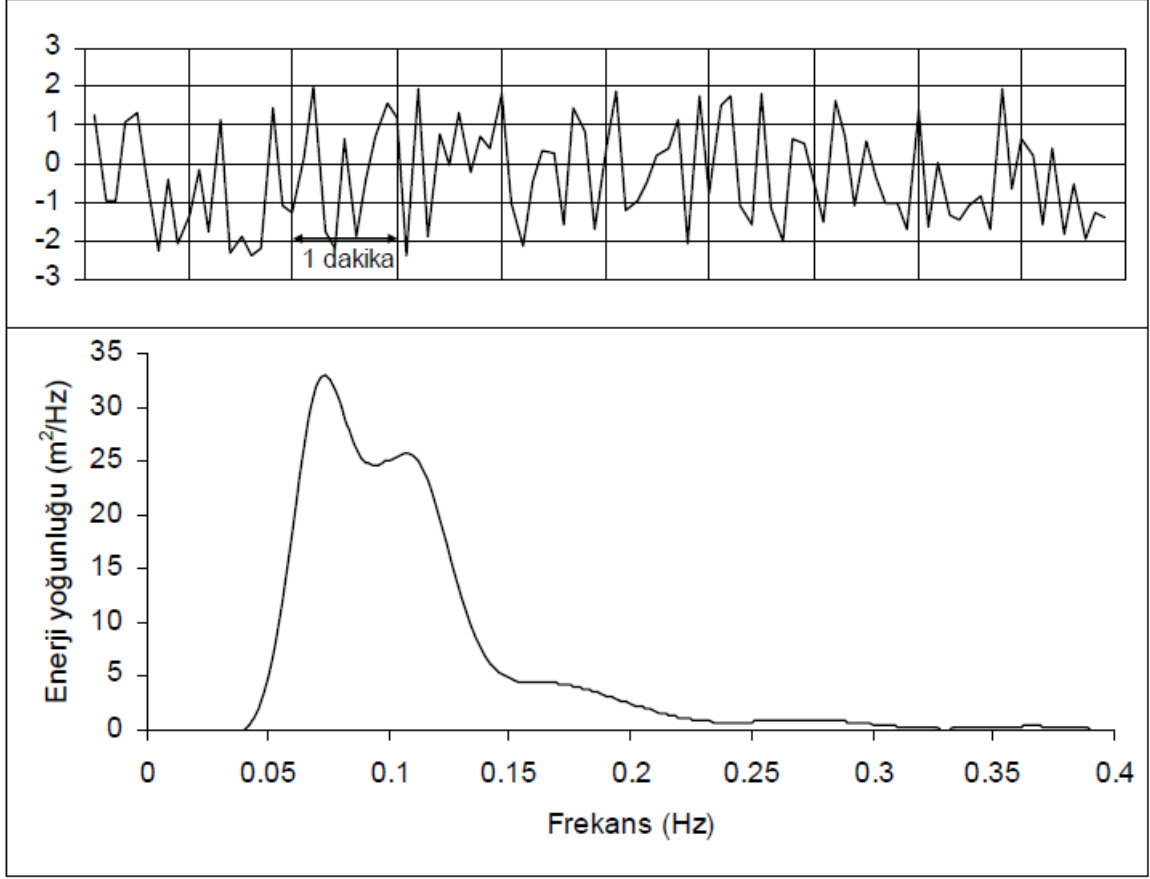
### 1.5.4.1.1. Dalga Spektrumu

Deniz yüzeyi, düzensiz görünüşünü aslında birçok basit dalganın birleşiminden almaktadır. Farklı dalgaların üst üste bindiği deniz yüzeyi durumunu en iyi ifade edebilmenin yolu, dalga spektrumu yöntemini kullanmaktır. Denizde ölçülen bir dalga kaydı harmonik (veya Fourier) analizi yardımıyla farklı frekansta, yönde, genlikte ve fazda düzgün sinüs ve kosinüs dalgaları şeklinde bileşenlerine ayrılabilir. Böylece, dalga ölçümleri zaman ortamından frekans ortamına aktarılmış olmaktadır. Her bir frekans ve yön, bir dalga bileşenine karşılık gelirken, her bir dalga bileşeni de genlik ve faz gibi büyüklüklerden meydana gelmektedir. Bu yüzden harmonik (Fourier) analiz düzensiz fakat belli bir periyodikliği olan bir dalga kaydına sinüs eğrilerinin toplamı açısından bir yaklaşım sağlamaktadır (Özger, 2007). Bir yönde zamanla değişen su yüzeyi yüksekliği denklemi Goda (2000) tarafından şu şekilde verilmiştir;

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{j=1}^n a_j \sin(j \omega_0 t + \phi_j) \quad (1.18)$$

Burada;  $\eta(t)$  t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesi,  $\eta_0$  ortalama su yüzeyi kotunu,  $\omega_0$  en uzun dalganın açısal dalga frekansını, j dalga bileşenlerinin sayısını,  $a_j$  katsayısı j-inci dalga bileşeni genliğini,  $\phi_j$  açısı j-inci dalga bileşenin faz açısını ve n ise toplam bileşen sayısını vermektedir. Faz açısı değişimin tüm bileşenlerinin aynı fazda olmayacağı bilgisini vermektedir. Maksimum dalga yüksekliğinin farklı zamanlarda ortaya çıkması bunu göstermektedir. Yüksek frekanslı bileşenler bazen anlamsız olmakta ve bu sebeple n sayısının sınırlı tutulması fayda sağlamaktadır. Her bir dalga bileşeni kendi hızı (dalga periyodu veya frekansı) ile hareket etmekte ve bu yüzden dalga bileşenlerinden ibaret olan spektrum, su yüzeyi boyunca sürekli değişim göstermektedir. Düşük frekanslı bileşenler yüksek frekanstaki bileşenlere göre daha hızlı hareket etmektedir. Her bir dalga bileşeni için  $a_j$  genliklerinin karelerinin beklenen değeri (aritmetik ortalama), yüzey yer değiştirmesinin beklenen varyansına ( $E[\sum_j a_j^2]$ ) katkıda bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan fonksiyon dalga varyans spektrumu  $S(f)$  olarak bilinmektedir. Her bir dalga bileşeni için çeşitli frekanslar (örneğin 0.1 Hertz (Hz) 10 saniyelik bir periyoda denk gelmektedir) yatay ekseninde, bunlara karşı gelen dalga genliklerinin kareleri ise düşey ekseninde çizildiğinde ortaya incelenen dalga sisteminin spektrumu çıkmaktadır (Şekil 1.4).

Bu şekilde ölçülmüş bir dalga kaydının spektrumu, hesaplandığı verilerden alınan bir örnek ile beraber gösterilmiştir (WMO, 1998).



Şekil 1.4. Dalga kayıtları enerji spektrumu (dalga yüksekliği 6.13 m, ortalama dalga periyodu 8.41 s ve rüzgar hızı 14.2 m/s)

Pratikte dalga spektrumu farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır. Şu anda en çok kullanılan algoritma olan hızlı Fourier dönüşümü (FFT), Cooley ve Tukey (1965) tarafından geliştirilmiştir. Bundan daha yavaş bir yöntem ise Blackman ve Tukey (1959) tarafından öne sürülen Wiener-Kinchine teoremini esas alan oto-korelasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın yerini şimdi tamamıyla FFT tekniği almıştır (Özger, 2007).

Denklem 1.12'den hesaplanan dalga enerjisi yoğunluğu denkleminde  $H = 2a$  yerine konduğu zaman aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (1.19)$$



Dalga spektrumu,  $E$  ile gösterilip dalga-enerjisi spektrumu olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak, Denklem 1.19'dan  $\rho g$  terimi düşürülüp düşey eksene sadece  $a^2/2$  veya daha basit olarak  $a^2$  değerleri çizilmektedir. Bu yüzden dalga-enerji spektrumu çoğu zaman varyans spektrumu bazen de enerji-yoğunluk spektrumu olarak adlandırılmaktadır (WMO, 1998).

Dalga spektrumu, FFT analizi sonucunda bulunan ayırık noktaların sürekli bir eğriye dönüştürülmesiyle oluşturulmaktadır. Bu eğri her zaman çok düzenli olmayabilir. Düzensiz deniz şartları, 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. Büyük okyanus dalgaları (swell), enerjilerinin tepe değerinin etrafında oldukça dar frekans aralığında bir spektrum meydana getirmektedir. Böyle dar bir spektrum bu dalgaların çıplak gözle de oldukça rahat bir şekilde tespit edilebileceğini göstermektedir.

Ölçümler, dalga yönleri hakkında bilgi sağladıkları için bunlardan sadece çeşitli frekanslara karşı gelen enerji dağılımı,  $E(f)$  hesaplanabilir. Düşey eksen dalga enerjisi  $m^2/Hz$  birimi ile gösterilir. Daha önceden de belirtildiği gibi spektrum, teoride sürekli olmasına rağmen, pratikte varyanslar (veya enerjiler) ayırık frekanslar için hesaplanmaktadır. Son yıllarda yöntem bilimlerinde meydana gelen gelişmeler ile birlikte dalga spektrumlarına da yeni bir bakış açısı gelmiştir. Klasik dalga spektrumları ile deniz ve göl yüzeylerindeki enerji dağılımları uygun bir şekilde temsil edilirken, istatistik momentler yardımıyla sık kullanılan dalga parametreleri tespit edilebilmektedir (Özger, 2007).

#### 1.5.4.1.2. Spektrumdan Elde Edilen Dalga Parametreleri

Dalga spektrumu çeşitli frekanslarda (veya dalga boyu, veya frekans ve yön) dalga enerjisinin (veya deniz yüzeyi varyansı) dağılımıdır. İstatistiksel bir dağılım olarak düşünülürse, bu spektrumdan birçok parametre tahmin edilebilmekte ve bu yüzden dalga spektrumu şekli dağılımın momentleri şeklinde ifade edilebilmektedir. Spektrumun  $n$ -inci dereceden momenti  $m_n$ , şu şekilde tanımlanmaktadır (Goda, 2000; WMO, 1998).

$$m_n = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f^n E(f, \theta) d_f d_{\theta} \quad (1.20)$$

Burada;  $E(f)$   $f$  (bazen  $f$  yerine  $w = 2\pi f$  tercih edilmektedir) frekansına karşı gelen varyans yoğunluğunu göstermektedir. Dolayısıyla  $E(f) df$ ,  $i$ -nci aralık olan  $f+df$  deki  $a_i^2/2$  varyansını temsil etmektedir. Pratikte, Denklem 1.20'deki integral,  $f_i = idf$  ile sonlu toplamlar şeklinde de ifade edilebilmektedir.

$$m_n = \sum_{i=1}^n f_i^n \frac{a_i^2}{2} \quad (1.21)$$

$m_n$ 'nin tanımından, sıfıncı moment  $m_0$ , spektral eğrinin altında kalan alandır. Sonlu şekilde yazılırsa,

$$m_0 = \iint E(f, \theta) d_f d_\theta \quad (1.22)$$

$$m_0 = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2} = \frac{a^2}{2} \quad (1.23)$$

olmaktadır. Denklem 1.23, her bir spektral bileşenin varyanslarının toplamından elde edilen dalga kaydının toplam varyansını vermektedir. Bu yüzden spektral eğrinin altında kalan alanın spektrumdan türetilcek olan dalga-yükseklik parametreleri için fiziksel bir anlamı vardır. Basit bir dalga için  $E$  dalga enerjisi (birim alan için) dalga yüksekliğine bağlı olarak Denklem 1.12'de sunulmuştur (Özger, 2007).

Maksimum enerji yoğunluğunun olduğu dalga, enerji yoğunluğu spektrumunda kaydedilmiş olan frekansın tersi ( $1/f$ ), kaydın tepe periyodu ( $T_p$ ) olarak bilinmektedir. Bu, kıyı mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılan çok önemli bir parametredir. Bir diğer önemli dalga parametresi de  $E(f)$  frekans spektrumundan çıkartılan spektral dalga yüksekliği parametresi ( $H_{m0}$ )'dir. Bu spektral dalga parametresi spektral eğrinin altında kalan alan ( $m_0$ )'a bağlı olarak hesaplanmaktadır (Goda, 2000; WMO, 1998).

$$H_{m0} \cong 4 \sqrt{m_0} \quad (1.24)$$

Örnekleme yapılan periyotta en yüksekten aşağıya doğru kaydedilmiş tüm dalgaların en büyük üçte birinin dalga yüksekliklerinin ortalama yüksekliği olarak tanımlanan belirgin dalga yüksekliği ( $H_s$  veya  $H_{1/3}$ ), aynı zamanda spektrumdaki kayıtların

değişiminden (varyansından) ya da değişimin integralinden çıkartılabilmektedir. Genel olarak  $H_s$  yaklaşık  $H_{m_0}$ 'a eşit varsayılmaktadır. Ancak, deniz durumu için toplam varyans,  $m_0$  iken toplam enerji  $E$ 'nin  $\rho g m_0$  olacağı gözden kaçırılmamalıdır. Teoride  $H_{m_0}$  ve  $H_s$ 'nin birbirine denk düşmesi durumu, ancak tabiatta pek sık rastlanmayan çok dar bir spektrum için geçerlidir. Bununla birlikte birçok durum için aralarındaki fark ortalamada

$$H_{m_0} = 1.05 H_s \quad (1.25)$$

olacak şekilde oldukça azdır. Belirgin dalga yüksekliğinin kullanımı esnasında hangi büyüklüğün ( $H_{m_0}$  veya  $H_s$ ) esas alındığının belirtilmesi bu bakımdan önemlidir (Özger, 2007).

Düzenli bir dalga yüksekliği parametresinin, dalga gücünün saptanması için ölçülmüş düzensiz dalga kayıtlarının, aynı dalga enerjisi yoğunluğunun kapsamına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden bir eşdeğer dalga yüksekliği parametresinden söz edilmektedir. Bu eşdeğer dalga yüksekliği parametresi de genel olarak ortalama karekök dalga yüksekliği olarak bilinmekte ve aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır (Goda, 2000; WMO, 1998).

$$H_{rms} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (1.26)$$

Eşdeğer dalga yüksekliği parametresine ( $H_{rms}$ ) benzer bir şekilde, düzenli bir dalga periyodu parametresinde, düzensiz dalga kaydının eşdeğer enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyulmaktadır. Burada; lineer dalga teorisinden yararlanarak çıkarılan dalga gücü denklemlerinde kullanılan dalga periyodu parametresi, enerji periyodu olarak adlandırılmakta ve aşağıdaki formülle tanımlanmaktadır (Joubert, 2008).

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (1.27)$$

$$T_e = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^{-1} E(f, \theta) d_f d_\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(f, \theta) d_f d_\theta} \quad (1.28)$$

Burada;  $m_1$  frekans aralığı ( $f$ ) için enerji yoğunluğu oranı ve  $m_0$  dalga spektrumundaki toplam enerjidir.  $T_e$  etkin biçimde enerji yoğunluğu spektrumunu eşit aralıklarda ikiye bölmektedir. Denklem 1.28,  $T_e$  nin dalga enerjisi yoğunluğu spektrumunun integrasyonu ile saptandığını göstermektedir. Ölçülmüş olan deniz durumları, sıklıkla belirgin dalga yüksekliği veya pik periyot yada ortalama periyot ( $T_z$ ) ifadeleri kullanılarak özelleştirilmektedir. Enerji periyodu nadiren tercih edilmekte ve spektral şeklin bilinmediği durumlarda diğer değişkenlerden tahmin edilmek zorundadır. Örneğin, İngiltere'nin deniz kökenli yenilenebilir enerji kaynakları atlasının hazırlanmasında enerji periyodu ile ortalama periyot arasında,

$$T_e = 1.14 T_z \quad (1.29)$$

gibi bir ilişkinin olduğu varsayılmıştır (ABPMERL, 2004). Pik periyodun bilinmesi durumunda diğer bir yaklaşım ise,

$$T_e = \alpha T_p \quad (1.30)$$

olarak kabul edilmektedir. Burada;  $\alpha$  katsayısı dalga spektrumunun şekline bağlıdır. Pearson-Moskowitz spektrumu için bu katsayı 0.86'dır. Güney İngiltere'nin dalga enerji kaynağının değerlendirilmesi çalışmasında ise Hagerman (2001) enerji periyodu ile pik periyodun birbirine eşit olduğunu varsaymıştır. Cornett (2008) ise, pik artırma faktörünün 3.3 olduğu bir standart JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project) spektrumu için daha doğru bir yaklaşım olduğunu savunduğu aşağıdaki eşitliği baz almıştır.

$$T_e = 0.9 T_p \quad (1.31)$$

Sıklıkla kullanılan dalga frekansları ve periyotları şu şekilde özetlenebilmektedir (Özger, 2007);

- ✓ Spektrumun tepe değerine karşı gelen dalga frekansı veya pik frekans ( $f_p$ ),
- ✓ Pik frekansa karşı gelen pik dalga periyodu ( $T_p$ )  $\left( T_p = (f_p)^{-1} \right)$ ,
- ✓ Spektrumun ortalama frekansına karşı gelen dalga periyodu ( $T_{m01}$ )  $\left( T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \right)$ ,

- ✓ Ortalama düşerken sıfır olma periyodu ( $T_{m02}$ ),  $T_z$ 'e teorik olarak denk olan

$$\text{dalga periyodu} \left( T_{m02} = \sqrt{\frac{m_o}{m_2}} \right),$$

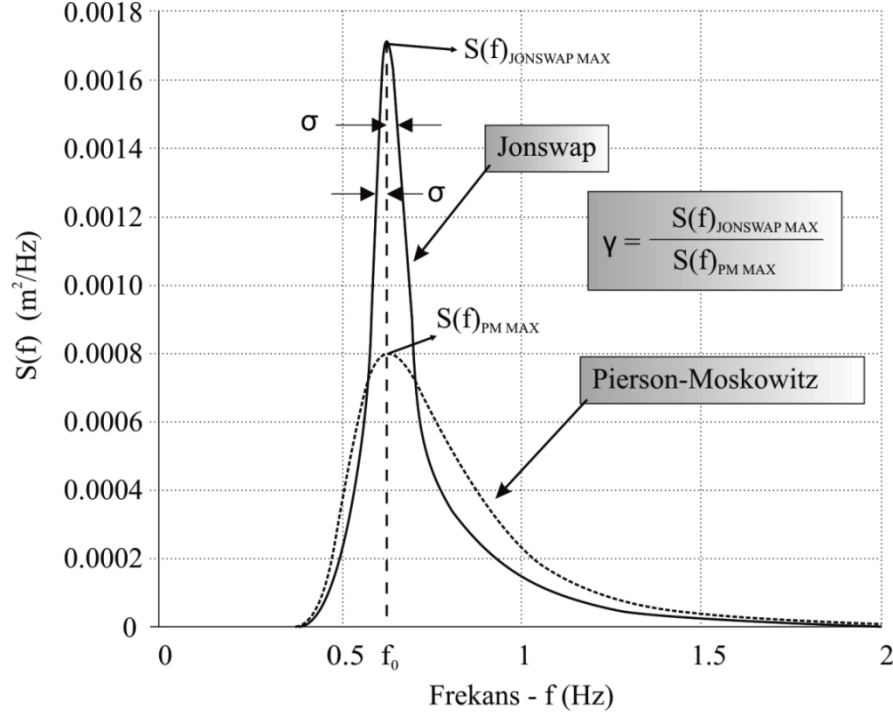
- ✓ Enerji dalga periyodu ( $T_e$  veya  $T_{m-10}$ ), dalga enerjisi çalışmalarında dalga gücünün hesaplanmasında kullanıldığından dolayı bu isim ile anılmaktadır

$$\left( T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_o} \right).$$

#### 1.5.4.2. Dalga Enerjisi Yoğunluk Spektrumu Şekilleri

Deniz dalgalarının ortaya çıkmasının sebebi rüzgarlardır. Bu yüzden, dalga tahmininde rüzgar hızı, esme süresi ve feç mesafesi göz önünde tutulması gereken faktörlerdir. Pratikte deniz üzerinde ve kıyı kesiminde inşa edilecek yapıların mühendislik hesaplamalarında dalga etkisi önemli bir yer tutmaktadır. Dalga tahminleri için geliştirilmiş birçok model bulunmaktadır. Çoğunlukla ve basit olarak dalga karakteristiklerini belirlemek için esas rüzgar hızına dayanan Pierson-Moskowitz ve JONSWAP dalga spektrumları kullanılmaktadır (Bishop vd., 1992). Pierson-Moskowitz spektrumu, yalnız açıkdenizlerde tam gelişmiş deniz durumu için uygulanabilmektedir. Tam gelişmiş deniz durumu, rüzgarın yüzlerce kilometre deniz üzerinde birkaç gün boyunca esmesi sonucu meydana gelmektedir. Pierson-Moskowitz spektrumu ile dalga özellikleri hesaplanırken sadece rüzgar hızı dikkate alınırken, sığ sular içinde geçerli olan JONSWAP spektrumunda feç mesafesi ve rüzgar esme süresi girdi değişkenleri olarak kullanılmaktadır. JONSWAP spektrumunun geçerliliği son yıllarda yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Carter, 1982).

Dalga enerjisi yoğunluğu spektrumu, Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumu ile Şekil 1.5'te verilmiştir. Dalga enerjisi yoğunluk fonksiyonunun şekli onun pik artırma faktörüyle ( $\gamma$ ) tanımlanmaktadır. Bu faktör JONSWAP ve Pierson-Moskowitz spektrumlarının maksimum enerji yoğunluklarının oranıdır. Bundan dolayı  $\gamma = 1$  olan JONSWAP spektrumu bir Pierson-Moskowitz spektrumudur.



Şekil 1.5. Pierson-Moskowitz ve JONSWAP spektrumları (US Army, 2003; Chakrabarti, 1987)

Pierson-Moskowitz spektrumu verilen bir rüzgar hızında doyma durumuna ulaşan bir dalga alanını tanımlamaktadır. Bu durumda, rüzgar alanı içerisinde hiçbir rüzgar enerjisinin dalga enerjisi için transfer edilmediği varsayılmaktadır. Bu dalga alanı durumu genel olarak tam olarak gelişmiş deniz şeklinde tanımlanmaktadır. Dalga alanı sadece rüzgar hızı ile ifade edilmekte, feç ve sürenin sonsuz olduğu varsayımı yapılmaktadır. Böylece; düşük  $\gamma$  değeri, pik frekans civarında büyük bir frekans aralığında enerji yayılımının bir göstergesi olmaktadır. Diğer bir deyişle, JONSWAP dağılımı feç sınırlıdır ve onun pik enerji yoğunluğu daha dar frekans aralığında yayılmaktadır. Bir spektrum  $\gamma$  değeri yardımıyla spektrum şeklinin belirlenmesiyle üretilmektedir. Üretilen spektrumdan dalga gücüne ilişkin parametreler örneğin  $T_e$  türetilmektedir (Joubert, 2008).

#### 1.5.4.2.1. Pierson – Moskowitz Spektrumu

Oşinografi ve kıyı mühendisliğindeki problemlere belki de en basit fakat en güvenilir yaklaşım, Pierson ve Moskowitz (1964) tarafından sunulmuştur. Yukarıda da bahsedildiği gibi buradaki kabul, rüzgarın uzunca bir süre geniş bir alan üzerinde esmesi, yani tam gelişmiş durum şartıdır. Bu spektrum, Kuzey Atlantik Okyanusu'nda hız ölçerler ile

yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiştir. İlk olarak rüzgarın uzunca bir süre estiği zamana rasgelen dalga verileri seçilmiştir. Daha sonra, farklı rüzgar hızlarına karşı gelen dalga spektrumları hesaplanmış ve sonuç olarak spektrum aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Pierson ve Moskowitz, 1964).

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[ -\beta \left( \frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right)^4 \right] \quad (1.32)$$

Burada;  $f$  Hz cinsinden dalga frekansı,  $\alpha$  değeri  $8.1 \times 10^{-3}$ ,  $\beta$  değeri 0.74 ve  $U_{19.5}$  ise deniz yüzeyinden 19.5 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızıdır. Bu yükseklik Pierson and Moskowitz (1964) tarafından kullanılan anemometrelerin ölçüm aldığı yüksekliktir. Bu rüzgar hızı, atmosferik sınır tabakası üzerindeki hava akışı durağan kabul edilerek ve sürüklenme katsayısı da  $1.3 \times 10^{-3}$  alınarak 10 m yükseklikteki rüzgar hızına aşağıdaki şekilde dönüştürülebilmektedir (Bishop vd., 1992).

$$U_{19.5} = 1.026 U_{10} \quad (1.33)$$

Pierson ve Moskowitz spektrumundan elde edilen tepe frekansı,

$$f_p = 0.877 \frac{g}{2\pi U_{19.5}} \quad (1.34)$$

ve belirgin dalga yüksekliği,

$$H_{mo} = 0.0246 (U_{19.5})^2 \quad (1.35)$$

şeklinde verilmiştir (Pierson and Moskowitz, 1964).

#### 1.5.4.2.2. JONSWAP Spektrumu

Hasselmann vd. (1973) yılında JONSWAP projesi kapsamında topladıkları verileri analiz ettikten sonra dalga spektrumunun hiçbir zaman tam gelişmiş duruma ulaşamayacağını öne sürmüşlerdir. Doğrusal olmayan dalgalar arasındaki etkileşimden

dolayı çok uzun zaman ve mesafe geçse bile gelişimini sürdüreceği fikrini öne sürmüşlerdir. Önerdikleri dalga spektrumunda feç mesafesini de göz önünde tutmuşlardır. Bu spektrum elde edilirken rüzgar hızı yerine, tepe frekans ifadesinden yararlanılmıştır. Pierson and Moskowitz ve JONSWAP spektrumları arasındaki fark, Şekil 1.5'ten görülmektedir. JONSWAP modelinin tepe değerleri yakalama şansı daha fazladır.

Doğa şartlarında çok farklı şekillerde spektrumlar meydana gelmektedir. Bunların bazılarında farklı dalga sistemleri gösteren birden çok tepe meydana gelmektedir. Şekil 1.6'da, farklı deniz durumları için gerçekte yapılmış ölçümlerden elde edilen enerji spektrumları yer almaktadır.

### 1.5.5. Dalga Gücü Hesaplama Prosedürü

Bu tezde kullanılan dalga gücü hesaplama yöntemi, Joubert (2008)'de tanımlanan prosedüre benzerdir. Çoğunlukla ölçülen dalga verileri belirgin dalga yüksekliğini, pik periyodu ve ortalama dalga yönünü içermektedir. Bu kaydedilen dalga parametrelerinden dalga gücünü hesaplamak için altı adımdan oluşan bir prosedür tanımlanmıştır;

- Denklem 1.26'dan  $H_{rms}$
- $H_{rms}$  kullanılarak Denklem 1.12'den  $\bar{E}$  (Joule / m<sup>2</sup>)
- Denklem 1.27 veya 1.28'den  $T_e$
- $T_e$  kullanılarak Denklem 1.1'den  $L$
- Denklem 1.2, Denklem 1.14 ve Denklem 1.13'ten  $C$ ,  $n$  ve  $C_g$
- Denklem 1.16'dan  $\bar{P}$  (kW/m)

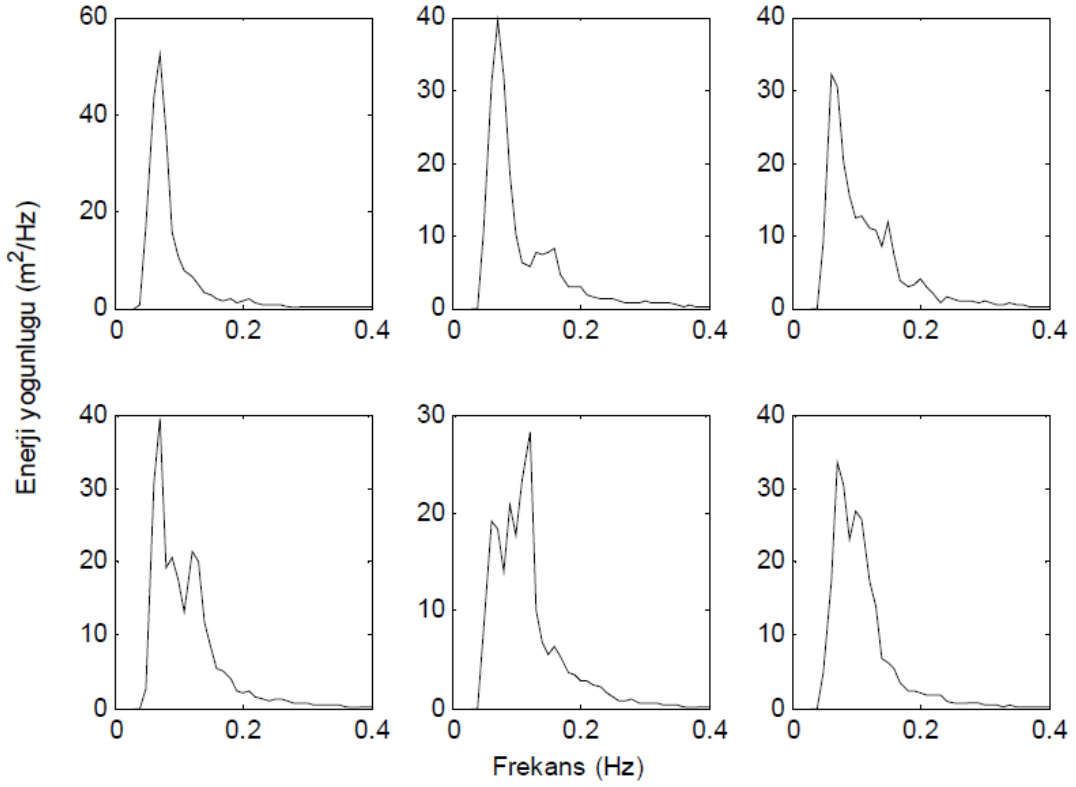
Bu prosedüre göre derin deniz şartlarında dalga gücü,

$$\bar{P} = \bar{E} C_{go} = \frac{\rho g H_{rms}^2}{8} \frac{g T_e}{4\pi} = \frac{\rho g^2 H_{rms}^2 T_e}{32\pi} \quad (1.36)$$

formülüyle tanımlanabilmektedir. Karadeniz için deniz suyu yoğunluğu tipik bir değer olarak 1015 kg/m<sup>3</sup> alındığında ve  $H_{rms}$  yerine Denklem 1.26'daki değeri yerine konduğunda Denklem 1.36 aşağıdaki şekilde Karadeniz'e uyarlanabilmektedir.

$$\bar{P} \text{ (kilowatt/metre)} = 0.486 H_s^2 T_e \quad (1.37)$$





Şekil 1.6. Farklı örneklerden alınan enerji yoğunluk spektrumları (Özger, 2007)

## 1.6. Rüzgar Dalgaları

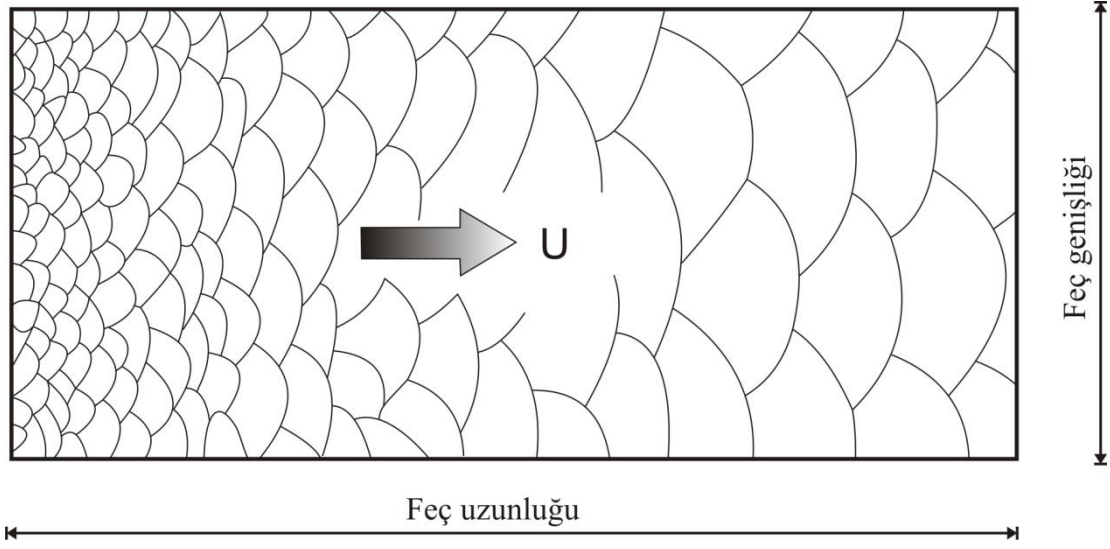
### 1.6.1. Rüzgar Dalgalarının Oluşumu

Rüzgar dalgalarının oluşmasını açıklayan mekanizmalar tam olarak anlaşılamamakla beraber, yapılan araştırmalar, dalgaların, deniz üzerindeki rüzgarın teğetsel ve normal gerilmelerinden meydana geldiğini göstermektedir. Rüzgar dalgalarının oluşumunu etkileyen başlıca parametreler;

- Rüzgar hızı (U),
- feç (kabarma) mesafesi (F),
- fırtına süresi (t),
- su derinliği (d),
- feç genişliği (f) dir.

Rüzgar tarafından dalgalara enerji transferini etkileyen en önemli parametre rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı arttıkça, dalga yüksekliği ve periyodu da artar. Dalgaları üreten

rüzgarın estiği mesafe ise feç olarak adlandırılır. Feç boyunca dalgaların değişimi Şekil 1.7'de görülmektedir. Görüldüğü gibi, dalgalar feç başlangıcında küçükken feçin sonuna doğru maksimuma ulaşmaktadır. Fırtına süresi büyüdükçe dalgaların yükseklik ve periyotları da büyür.



Şekil 1.7. Feç Boyunca Dalgaların Değişimi

Genellikle derin denizdeki dalgalar hesaplanıp sığ suya taşındığından, su derinliği hesaplarda dikkate alınmaz. Feç genişliğinin etkisi ise oldukça azdır; bu sebeple hesaplamalarda feç genişliği de dikkate alınmaz. Bu durumda, dalgaların büyüklüğünü (yükseklik ve periyotlarını) etkileyen üç parametre rüzgar hızı, feç mesafesi ve fırtına süresi olarak ortaya çıkmaktadır.

Verilen bir rüzgar hızı için, feç mesafesi ve fırtına süresi arttıkça dalgaların büyüyeceği yukarıda ifade edilmiştir. Ancak, bu büyüme sınırsız değildir ve limit bir değeri vardır. Bu limit durumda, rüzgardan dalgaya aktarılan enerji, dalga kırılması ve enerji yayılmasıyla dengelenir. Dalgaların bu denge durumuna "tam kabarmış deniz" denir.

Belirli bir rüzgar hızı için dengenin kurulabilmesi için gerekli minimum feç uzunluğu ( $F_{\min}$ , km);

$$F_{\min} = 16 (U)^{3/2} \quad (1.38)$$

eşitliğiyle verilir. Belirli bir rüzgar hızı için dengein kurulabilmesi için gerekli minimum fırtına süresi ( $t_{\min}$ , saat) ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$t_{\min} = 11.1(U)^{1/2} \quad (1.39)$$

Eğer gerçek feç uzunluğu veya fırtına süresi, minimum değerlerden küçük iseler dalgalar maksimum yüksekliğe erişemez. Bu durumdaki denize, "gelişmekte olan deniz" denir. Bu durumda, özet olarak şu ifadeler yazılabilir;

$$\begin{aligned} F_{\text{gerçek}} > F_{\min} \quad \text{ve} \quad t_{\text{gerçek}} > t_{\min} \quad \text{ise, Tam Kabarmış Deniz} \\ F_{\text{gerçek}} < F_{\min} \quad \text{veya} \quad t_{\text{gerçek}} < t_{\min} \quad \text{ise, Gelişmekte Olan Deniz} \\ F_{\text{gerçek}} < F_{\min} \quad \text{ve} \quad t_{\text{gerçek}} \geq t_{\min} \quad \text{ise, Gelişmekte Olan Deniz Feç Limitli} \\ F_{\text{gerçek}} \geq F_{\min} \quad \text{ve} \quad t_{\text{gerçek}} < t_{\min} \quad \text{ise, Gelişmekte Olan Deniz Süre Limitli} \end{aligned}$$

Feç mesafesi, göl, körfez ve boğaz gibi dar yerlerde dalga büyüklüğünü etkilemekte, açık denizlerde ise genellikle  $F_{\text{gerçek}} > F_{\min}$  olduğundan feç mesafesi dalga oluşumunda etkili olmamaktadır (Yüksek, 2010).

### 1.6.2. Rüzgar Kayıtları Yardımıyla Dalga Tahmini

Rüzgar dalgalarının ölçümü güç ve pahalı olduğundan, eldeki gözlemler oldukça kısa sürelidir. Ülkemizde ise, henüz sistematik bir dalga ölçüm ağı kurulamamıştır. Bazı üniversitelerin yöresel çalışmaları ise projelendirmede dikkate alınamayacak kadar yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, NATO'nun "Barış için Bilim" adlı birimi tarafından sponsorluğu yapılan NATO TU-WAVES projesi kapsamında Türkiye kıyılarında birkaç noktada dalga karakteristikleri ölçülmüştür. Ancak, buradaki ölçümler sistematik olmadığından (Ergin, 2009), projelendirmede gerekli olan veriler, daha uzun süreli olan rüzgar kayıtları yardımıyla tahmin edilmektedir.

Bir kıyı meteoroloji istasyonundaki saatlik rüzgar cetvellerinden alınan değerler istasyonun bulunduğu yerde, yerden  $z$  metre yükseklikteki hız değerleridir. Bu değerler;

$$U_{10} = U_z \left( \frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (1.40)$$

bağıntısı kullanılarak yerden 10 m yükseklikteki hıza çevrilmektedir (US Army, 2003). Kara üzerinde 10 m yükseklikteki değerin ise deniz üzerindeki 10 m yükseklikteki değere dönüştürülmesi gerekmektedir (Uysal, 1995). Bu maksat için, Hsu (1980) tarafından verilen bir formül kullanılabilmektedir (Arıkan, 1998).

$$U_{\text{deniz}} = 3.0 (U_{\text{kara}})^{0.67} \quad (1.41)$$

Burada;  $U_{\text{deniz}}$  deniz üzerindeki rüzgar hızı (m/s) ve  $U_{\text{kara}}$  ise kara üzerindeki rüzgar hızıdır.

### 1.6.2.1. Rüzgar Verileri

Türkiye için rüzgar verileri başlıca iki kaynaktan temin edilmektedir. Bu kaynaklardan ilki DMİ Genel Müdürlüğü'nce hazırlanan günün her saatindeki saatlik ortalama rüzgar hızları (m/s) ve rüzgar yönlerini içeren Saatlik Rüzgar Cetvelleri'dir. Bu cetvellerden (tablolardan) elde edilen rüzgar değerleri, önce yerden 10 m yükseklikteki rüzgar değerlerine, sonra da deniz üzerinde 10 m yükseklikteki rüzgar hızlarına dönüştürülmektedir.

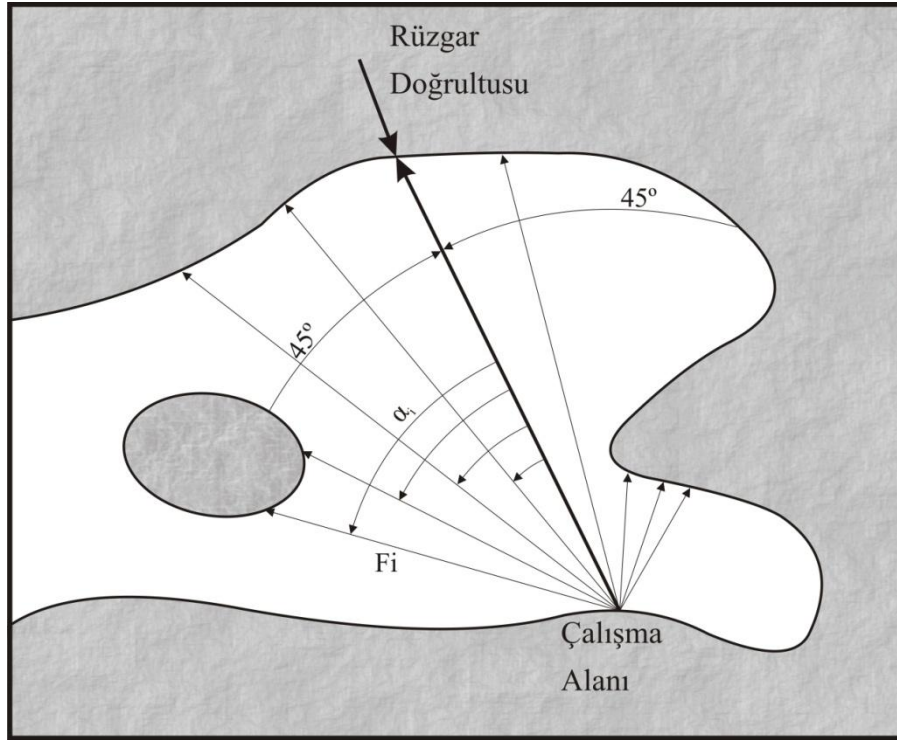
Diğer rüzgar kaynağı ise, DMİ tarafından 6'şar saat aralıklarla (saat 0.00, 6.00, 12.00 ve 18.00'da) hazırlanan atmosferde aynı hava basıncındaki yerlerin birleştirilmesiyle elde edilen eşbasınç (izobar) eğrilerini içeren (Türkiye'de bu eğriler 4 milibar aralıklarla çizilmekte) Sinoptik Yer Basınç Haritaları'dır. İzobarlar arasındaki mesafeye ve bölgenin enlem derecesine bağlı olarak denizden 1000 m yükseklikteki rüzgar hızları hesaplanmakta ve bir grafik yardımıyla denizden 10 m yükseklikteki rüzgar hızlarına dönüştürülmektedir. Bu haritalar 6 saatte bir çizildiği için, fırtına süreleri 6 saat veya katları (12, 18 saat vb.) şeklindedir. Sinoptik harita verileri yardımıyla tahmin edilen dalga değerleri gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekle beraber, elde edilmeleri saatlik rüzgar cetvellerinden daha güçtür (Yüksek, 2010).

Bu iki veri kaynağının dışında, Türkiye tarafından kaydı gerçekleştirilmeyen ancak Türkiye'yi kapsayan ECMWF ve NOAA gibi çeşitli hava tahmin merkezlerinin zamansal ve alansal çözünürlüğe sahip olan rüzgar alanları da mevcuttur.

### 1.6.2.2. Feç Mesafesi

Dalgaları oluşturan rüzgarın estiği mesafe olarak tanımlanabilen feç uzunluğu, yönlere bağlı olarak değişmektedir. Normal kıyılarda belli bir yöndeki feç, o yönde ilgili kıyı noktasını karşı kıyıya birleştiren dik uzaklık olarak haritalardan ölçülmektedir. Körfez, koy ve burun gibi düzensizliklerin olduğu kıyılarda ise, komşu kıyıların feç mesafesine etkisini dikkate almak için literatürde değişik yöntemler tanımlanmasına karşın, bunlardan en çok kullanılan efektif feç değeri hesaplanmaktadır. Kıyılarda göz önüne alınan konum, dikkate alınan dalga yönünden itibaren her iki tarafta  $\pm 45^\circ$ 'lik bir bantta  $7.5^\circ$ 'lik aralıklarda feç uzunlukları ölçülmekte ve bu yön için etkili (efektif) feç olarak tanımlanan feç uzunluğu, (Şekil 1.8) Denklem 1.42 yardımıyla belirlenebilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

$$F_{\text{efektif}} = \frac{\sum F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (1.42)$$



Şekil 1.8. Düzensiz bir kıyıda etkili feçin hesaplanması için açıklayıcı şema

### 1.6.2.3. Fırtına Süresi

Rüzgarların esme sürelerini belirlemek için, US Army (2003)'de ifade edilen kararlı rüzgar kavramından yararlanılmaktadır. Buna göre, fırtına süresinin aşağıdaki şartları sağlayan saatlik veri noktası sayısına veya aşağıdaki şartları sağlamayan iki veri noktası arasındaki saat sayısına eşit olduğu varsayılmaktadır (Kazeminezhad vd., 2005).

$$|U_i - \bar{U}| < 2.5 \text{ m/s} \quad (1.43)$$

$$|D_i - \bar{D}| < 15^\circ \quad (1.44)$$

Burada;  $\bar{U}$  ve  $\bar{D}$  sırasıyla yukarıdaki koşulları sağlayan ilk ve son veri noktaları arasındaki ortalama saatlik rüzgar hızı ve yönüdür.  $U_i$  ve  $D_i$  ise  $i$ 'nci saatlik veri noktasındaki rüzgar hızı ve yönüdür.

### 1.7. Dalga Tahmin Yöntemleri

Dalga yüksekliklerinin yeterince uzun süreli ölçülmüş değerleri her zaman mevcut değildir. Bu nedenle belirgin dalga yüksekliği ve periyodu meteoroloji istasyonlarında veya hava tahmin merkezlerinde ölçülmüş mevcut rüzgar verileri ya da varsa dalga ölçüm değerlerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle tahmin edilmektedir. Kıyı yapılarının projelendirilmesi veya kıyı gelişiminin belirlenmesinde kullanılan tasarım dalgaları ya ölçülmüş dalga kayıtları değerlendirilerek ya da rüzgar verilerinden tahmin edilerek elde edilmektedir.

Dalga şartlarının elde edilebilmesi için iki yöntem vardır;

- ✓ Dalga kayıt cihazları kullanılarak doğrudan ölçme,
- ✓ Meteorolojik verilerden dolayı tahmin, yani dalga tahminlerinin rüzgar verileri kullanılarak yapılmasıdır.

Dalga kayıtlarının analizi için ise yine iki yöntem bulunmaktadır;

- ✓ Her bir dalga kaydının karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametreleri ile tanımlanmaya çalışılması (kısa dönem dalga istatistiği)

- ✓ Belirli bir dönem boyunca karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametrelerinin meydana gelme frekansının belirlenmesi (uzun dönem dalga istatistiği)

Dalga ölçümü yaparak dalga parametrelerini belirlemenin yanı sıra rüzgar verilerinden dalga parametrelerini elde etmenin birçok farklı yolu bulunmaktadır. Fakat en uygun yaklaşım elde edilen verilerin kalitesine ve yapılacak çalışmanın amacına göre değişmektedir. Örneğin iki boyutlu sayısal spektral tahmin modeli için detaylı atmosfer basınç alanları gerekirken SPM (Shore Protection Manual) metodu olarak bilinen dalga tahmin yönteminde istenen girdi oldukça basittir ve bununla beraber elde edilen çıktı oldukça sınırlıdır. Sadece belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga yönü elde edilmektedir (Fröhle ve Fittschen, 1998). Birçok araştırmacı, farklı kıyı problemlerini incelemek ve çözmek amacıyla değişik dalga tahmini yöntemlerini uygulamışlardır. Bunlar; enerji taşınımı denkleminde dayanan dalga tahmin modelleri ve ampirik tahmin modelleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Rüzgar nedenli sayısal dalga modellerinin gemi rotalarının belirlenmesi ve açık deniz teknolojisi gibi konularda oldukça faydalı oldukları gözlemlenmektedir. Bu modeller son yıllarda dalga iklim çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bütün sayısal dalga modellerinin temeli enerji kaynak terimlerinin çözümüne dayanmaktadır. Bu yaklaşımların dışında, boyut analizlerine dayanan daha basit yarı ampirik yöntemler de günümüzde kullanılmaya devam edilmektedir.

En mükemmel dalga tahmin teknikleri, bilgisayar teknolojisine olan ihtiyaç, modelin karmaşıklığı ve doğru meteorolojik verilere gereksinim duymaları nedeniyle gelişmiş olanakları bulunan laboratuarlarda kullanılabilir. Bu laboratuvarların sayısı oldukça azdır. Ancak, basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri herkes tarafından kolayca kullanılabilir. Bu yöntemler bütün problemlere cevap bulamamalarına rağmen, bazı tasarım çalışmaları için olası dalga koşullarının belirlenmesinde kullanılabilirler. Bu basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri, dikkate alınan dalgaların verilen süre için sabit hız ve doğrultuda esen rüzgarlardan dolayı oluştuğu kesin kabulüne dayanmaktadır (Yüksel ve Çevik, 2009).

Günümüze kadar dalga tahmini için farklı ampirik modeller (Sverdrup, Munk ve Breitshneider (SMB) yöntemi (Bretschneider, 1970), Wilson yöntemi (Wilson, 1965), SPM yöntemi (US Army, 1984), Coastal Engineering Manual (CEM) yöntemi (US Army, 2003), JONSWAP yöntemi (Hasselmann vd., 1973), Donelan yöntemi (Donelan, 1980);

Donelan vd., 1985)) geliştirilmiştir. Ancak, yüksek hızlı bilgisayarların gelişimiyle, birkaç gelişmiş sayısal model daha tasarlanmıştır. Enerji taşınımı denkleminin dayanan bu modeller birinci, ikinci ve üçüncü nesil olarak sınıflandırılmaktadır. 1950'lerin sonunda Gelci vd. (1957) tarafından ilk model geliştirilmiştir. Fakat geliştirilen bu modelde birçok kaynak fonksiyonuyla ilgili belirsizlikler mevcuttur. Phillips (1957) ile Miles (1957)'nin sunduğu dalga gelişim ve Hasselmann (1962) tarafından öne sürülen dalga-dalga etkileşiminden dolayı lineer olmayan enerji transferi teorileriyle dalga gelişim modellemesinin iskeleti oluşturulmaya başlanmıştır (Massel, 1996). Birinci nesil dalga modelleri uzun seneler boyunca uygulanmış ve hala işlevselliğini kaybetmemiştir. Bu model, ışın tekniğine dayanmakta ve aynı zamanda sığ su koşullarında da kullanılabilir. Birinci, ikinci ve üçüncü nesil dalga modelleri arasındaki farklılık çözümde kullanılan yöntemlerden kaynaklanmaktadır. İkinci nesil dalga modelleri dalga tahmini için spektrumun şeklinde kısıtlamalar yaparak lineer olmayan dalga girişimi kaynak terimlerinin geniş ölçekte parametreleştirilmesini kullanmaktadır. Üçüncü nesil dalga modelleri ise daha detaylı lineer olmayan dalga girişimi kaynak terimlerinin parametreleştirilmesini kullanmakta ve spektrumun şeklindeki kısıtlamaları azaltmaktadır. Dünyada birçok üçüncü nesil dalga modeli kullanılmasına karşılık bunların kökeninde WAM dalga modeli (WAMDI group, 1988) olduğu belirtilmektedir (US Army, 2003). Diğer üçüncü nesil dalga modellerine örnek olarak Schwab vd. (1984), Clancy vd. (1986), HISWA modeli (Holthuysen vd., 1989), WAVEWATCH modeli (Tolman, 1991), MIKE 21 SW (DHI, 2004) ve SWAN modeli (Booij vd., 1999) gösterilebilmektedir (Çevik vd. 2006). Sayısal modeller, etkin dalga üretiminin gerçekleştiği su yüzeyindeki karelaaj noktaları boyunca enerji denge denklemini çözmekte ve bol miktarda batimetrik, meteorolojik ve oşinografik verilere ihtiyaç duymaktadır (Etemad-Shahidi vd., 2009).

Son yıllarda modern modelleme tekniklerinin hızla yayılması ile beraber, dalga tahmin modelleri de sıkça kullanılır hale gelmektedir. Yapay sinir ağları (YSA) ile dalga parametreleri tahmin edilebilmektedir (Deo ve Kiran Kumar, 2000; Deo vd., 2001; Tsai vd., 2002; Deo ve Jagdale, 2003; Makarynskyy 2004 ve Makarynskyy vd., 2005). Ayrıca, dalga parametrelerinin tahmini için bulanık mantık ile modeller de kullanılmaktadır (Kazeminezhad vd., 2005; Özger ve Şen, 2007). Diğer taraftan, dalga tahminleri için alışılmış zaman serisi modelleri de kullanılmıştır. Bunun için, stokastik modeller olarak oto regresif kayan ortalama (ARMA ve ARIMA) süreçleri de uygulanmıştır (Agrawal and Deo, 2002).



### 1.7.1. Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemleri

Gelişmiş sayısal modellerin mevcut olmadığı durumlarda, rüzgardan dalga tahmini üzerinde boyut analizi prensiplerinin de kabul edilebilir bir etkisi olduğu görülmektedir. İlişkiler derin sudaki karakteristik dalga parametrelerinin rüzgar hızı, feç mesafesi ve rüzgar esme süresine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu üç parametre esas alınarak geliştirilen ve bu çalışmada da dalga tahmininde kullanılan birkaç basitleştirilmiş dalga tahmin yönteminin uygulanma şekilleri, bir sonraki bölümde izah edilmiştir.

#### 1.7.1.1. Wilson Yöntemi

Bu metotta, feç sınırlı şartın sonlanması için minimum rüzgar esme süresi, Denklem 1.45'den hesaplanabilmektedir.

$$t_{\min} = 1.0 F^{0.73} U_{10}^{-0.46} \quad (1.45)$$

Burada;  $t_{\min}$  saat biriminde minimum rüzgar esme süresi ve  $F$  kilometre biriminde feç mesafesidir. Feç sınırlı şart durumunda belirgin dalga yüksekliği ve periyodu Denklem 1.46 ve 1.47'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$H_s = 0.30 \frac{U^2}{g} \left[ 1 - \left[ 1 + 0.004 \left( \frac{g F}{U^2} \right)^{0.5} \right]^{-2} \right] \quad (1.46)$$

$$T_s = 8.61 \frac{U}{g} \left[ 1 - \left[ 1 + 0.008 \left( \frac{g F}{U^2} \right)^{1/3} \right]^{-5} \right] \quad (1.47)$$

Rüzgarın  $t_{\min}$ 'dan daha düşük hızda esmesi durumunda feç sınırlı varsayımlar geçerli olamaz. Wilson metodunda, dalgaların oluşumu süre sınırlı ise, Denklem 1.45'de  $t_{\min}$  yerine rüzgar esme süresinin konulmasıyla bir eşdeğer feç mesafesi (Denklem 1.48) hesaplanmakta ve sonra dalga parametrelerin de bu eşdeğer feç değeri kullanılarak, Denklem 1.46 ve 1.47 yardımıyla yeniden hesaplanmaktadır.

$$F_{eş} = 1.0 t^{1.37} U_{10}^{0.63} \quad (1.48)$$

Burada;  $F_{eş}$  kilometre biriminde eşdeğer feç mesafesi ve  $t$  saat biriminde fırtına süresidir (Yüksel ve Çevik, 2009; Etemad-Shahidi vd., 2009).

### 1.7.1.2. CEM Yöntemi

Bu metotta, feç sınırlı şartın sonlanması için minimum rüzgar esme süresi, Denklem 1.49'dan hesaplanabilmektedir.

$$t_{\min} = 77.23 \frac{F^{0.67}}{U_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (1.49)$$

Burada;  $t_{\min}$  saniye biriminde minimum rüzgar esme süresi ve  $F$  metre biriminde feç mesafesidir. Feç sınırlı şart durumunda belirgin dalga yüksekliği ve periyodu, Denklem 1.50 ve 1.51'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\frac{g H_s}{U_*^2} = 4.13 \times 10^{-2} \left( \frac{g F}{U_*^2} \right)^{0.5} \quad (1.50)$$

$$\frac{g T_s}{U_*} = 0.651 \left( \frac{g F}{U_*^2} \right)^{1/3} \quad (1.51)$$

Burada,  $U_*$  Denklem 1.52'deki formülle tahmin edilebilen sürtünme hızı (m/s)'dir.

$$U_* = U (C_D)^{0.5} \quad (1.52)$$

Burada,  $C_D$  Denklem 1.53'deki gibi tanımlanabilen sürüklenme katsayısıdır.

$$C_D = 0.001 (1.1 + 0.035 U) \quad (1.53)$$

Süre sınırlı şartlarda eşdeğer feç uzunluğu, Denklem 1.54'den hesaplanmalıdır.

$$\frac{g F}{U_*^2} = 5.23 \times 10^{-3} \left( \frac{g t}{U_*} \right)^{1.5} \quad (1.54)$$

Süre sınırlı şart durumunda belirgin dalga yüksekliği ve periyodunun belirlenebilmesi için bu denklemden elde edilen eşdeğer feç değerinin, Denklem 1.50 ve 1.51'de yerine konulması gerekmektedir (US Army, 2003; Etemad-Shahidi vd., 2009).

### 1.7.1.3. SPM Yöntemi

SPM yönteminde açık deniz dalga tahminleri JONSWAP spektrumuna dayanan bir parametrik model kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, belirgin dalga yüksekliği ve pik periyot, rüzgar hızı, feç uzunluğu ve fırtına süresi ile ilişkilidir.

$$(H_s, T_s) = f(U_A, F, t) \quad (1.55)$$

Burada,  $U_A$  rüzgar gerilme faktörüdür ve

$$U_A = 0.71 U_{10}^{1.23} \quad (1.56)$$

eşitliğiyle belirlenmektedir. Feç sınırlı şart durumunda, US Army (1984) veya SPM yöntemi rüzgardan açık deniz dalgaların tahmini için Denklem 1.57, 1.58 ve 1.59'daki parametrik modeli önermektedir.

$$\frac{g H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{0.5} \quad (1.57)$$

$$\frac{g T_p}{U_A} = 0.286 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{1/3} \quad (1.58)$$

$$\frac{g t_{\min}}{U_A} = 68.80 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{2/3} \quad (1.59)$$

Burada,  $F$  metre ve  $t_{\min}$  saniye biriminde verilmiştir ve rüzgar hızının  $t_{\min}$  süresince sabit olduğu varsayılmaktadır (Liu ve Frigaard, 2001). Rüzgarın  $t_{\min}$ 'dan daha düşük hızda esmesi durumunda feç sınırlı varsayımlar geçerli olamaz. SPM metodunda, dalgaların oluşumu süre sınırlı ise Denklem 1.59'da  $t_{\min}$  yerine rüzgar esme süresinin konulmasıyla bir eşdeğer feç mesafesi hesaplanmakta ve sonra dalga parametreleri bu feç değeri kullanılarak Denklem 1.57 ve 1.58 yardımıyla yeniden hesaplanmaktadır (Ozeren and Wren, 2009). Elde edilen  $T_p$  değerine karşılık belirgin dalga periyodu;

$$T_s = 0.95 T_p \quad (1.60)$$

formülüyle belirlenmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

#### 1.7.1.4. JONSWAP Spektrum Yöntemi

JONSWAP spektrumu gelişen deniz durumu için dalga karakteristiklerini tahmin etmekte sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde beklenen frekans spektrumu şu şekilde ifade edilmektedir (Hasselmann vd., 1973).

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right] 3.3 \exp\left[-(f - f_p)^2 / 2 \sigma^2 f_p^2\right] \quad (1.61)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases} \quad (1.62)$$

Feç sınırlı durum için tanımlanan belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu şu şekilde tahmin edilmektedir.

$$H_s = 0.0163 F^{1/2} U \quad (1.63)$$

$$T_z = 0.439 F^{3/10} U^{2/5} \quad (1.64)$$

ve süre sınırlı durum için,

$$H_s = 0.0146 t^{5/7} U^{9/7} \quad (1.65)$$

$$T_z = 0.419 t^{3/7} U^{4/7} \quad (1.66)$$

denklemleri kullanılmaktadır. Burada;  $H_s$  metre,  $T_z$  saniye,  $F$  kilometre,  $U$  m/s ve  $t$  saat cinsinden verilmiştir. Eğer aşağıdaki şart sağlanıyorsa, feç sınırlı durum için yazılan formüller geçerlidir.

$$t > 1.167 F^{0.7} / U^{0.4} \quad (1.67)$$

Aksi takdirde süre sınırlı duruma ait olan eşitlikler kullanılmalıdır (Özger, 2007; Akpınar vd., 2011).

### 1.7.2. Sayısal Dalga Tahmin Yöntemleri

Bu bölümün giriş kısmında belirtildiği gibi pek çok sayısal dalga tahmin yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında; üçüncü nesil dalga tahmin modeli SWAN, son zamanlarda tüm dünyada ilgi odağı olmuş, en gelişmiş dalga tahmin yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem neredeyse tüm yakın kıyı dalga dönüşümlerini ve etkileşimlerini içermektedir. Bunun yanında, son zamanlarda ülkemizde DMİ Genel Müdürlüğü'nün de ilgi duyduğu bir yöntem haline gelmiştir. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada dalga benzeşimlerini gerçekleştirmek üzere SWAN modeli kullanılmıştır. Bu modelin kullanım adımları, Bölüm 1.8'de detaylı bir biçimde verilmektedir.

### 1.8. SWAN Üçüncü Kuşak Sayısal Dalga Tahmin Modeli

Bu bölümün amacı, SWAN modelin teorik bir tanımlamasını sunmaktır. Bu tanımlama SWAN'ın uygulama alanını, modelin göreceli karmaşık yapısını ve bünyesinde barındırdığı teoriyi izah etmektedir. Burada, SWAN modelin uygulanmasına ilişkin genel çerçevede bilgiler verilmiştir, SWAN modele ait daha detaylı bilgiler ise Ris (1997), Young (1999), Holthuijsen (2000), Van der westhuysen (2002) ve SWAN (2008) kaynaklarından sağlanabilir.

SWAN model; verilen rüzgar, derinlik ve akıntı şartları için dalga parametrelerinin gerçekçi tahminlerini elde etmek için kullanılan yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu bir üçüncü nesil sayısal rüzgar-dalga tahmin modelidir. Model, açık deniz ve yakın kıyı bölgelerinde rüzgar kaynaklı dalga ile soluşan gelişimini, transformasyonunu ve enerji kaybederek değişimini benzeştirmektedir. SWAN Hollanda'da Delft University of Technology tarafından geliştirilmiştir.

### 1.8.1. Genel Formülasyon (Teori)

SWAN, dalgaları tanımlamak için iki boyutlu dalga hareket yoğunluk denklemini kullanmaktadır. Hareket yoğunluğu akıntuların sahip oldukları enerjiyi muhafaza etmek için varyans yoğunluğundan daha fazla kullanılmaktadır. SWAN tarafından kullanılan geçerli spektral hareket (enerji) denge denklemi, Denklem 1.68'de verilmektedir (Komen vd., 1994; Mei, 1983). Bu formülasyon, dalga enerjisinin saçılımına ve üretimine ilişkin çok sayıda kaynak ifadesi içermektedir. SWAN'da dalga spektrumunun gelişimi dalga enerji yoğunluğunun dengesinin bir Eularian formülasyonu ile tanımlanmaktadır. Bu formülasyonun tanımlanma maksadı, spektral dalga enerji yoğunluğunun en eksiksiz formuyla yani zaman ve alana bağlı değişken olarak düşünülmesidir.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma} \quad (1.68)$$

$$E = E(\sigma, \theta; x, y, t) \quad (1.69)$$

Burada;  $N(\sigma, \theta; x, y, t)$  rölatif dalga frekansı ( $\sigma$ ) ile bölünmüş enerji yoğunluğuna  $E(\sigma, \theta; x, y, t)$  eşit olan hareket yoğunluğu,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_\sigma$  ve  $c_\theta$  sırasıyla  $x$ ,  $y$ ,  $\sigma$  ve  $\theta$  yönlerindeki dalga yayılma hızı,  $\theta$  dalga yönü,  $E$  spektral enerji yoğunluğu,  $\sigma$  rölatif dalga frekansı, ve  $x$ ,  $y$ ,  $t$  alan ve zamanın boyutlarıdır. Denklem 1.68'in sol tarafındaki ilk ifade ( $\partial N/\partial t$ ) hareket yoğunluğunun zamanla değişimini, ikinci ve üçüncü ifadeler bir  $(x, y)$  coğrafik alanındaki hareket yoğunluğunun yayılmasını temsil etmektedir. Dördüncü ve beşinci ifadeler sırasıyla derinlik ve akıntı değişimleri nedeniyle bağlı frekans kaymasını ve derinlik ve akıntı etkileşimli sapmayı ifade etmektedir (Joubert, 2008).

Eularian enerji denge yaklaşımında dalga enerjisinin dengesi bir ızgarada (karelaj alanında) çok sayıda önceden belirlenmiş hücrelerde düşünülmektedir. Enerjinin dengesi bir zaman aralığında ( $\Delta t$ ) ve  $\Delta x \Delta y$  büyüklüğündeki her karelaj alan hücresi içinde aşağıdaki gibi bir enerji değişiminin söz konusu olduğunu belirtmektedir.

$$\text{Enerjinin değişimi} = \text{Enerjinin net ithalatı} + \text{net yersel enerji üretimi} \quad (1.70)$$

Bu prensibin uygulanması derin sular için enerji denge denklemi olarak bilinen spektrumda her frekans bileşeni için geçerli olan aşağıda ifade edilen denklemlerle sonuçlanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} E + \frac{\partial}{\partial x} (c_x E) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y E) = S(\sigma, \theta; x, y, t) \quad (1.71)$$

Burada;  $S(\sigma, \theta; x, y, t)$  dalga saçılması ve üretiminin bütün etkilerini temsil eden kaynak ifadesidir. Enerji denge denkleminin sığ su bölgelere uygulanması durumunda ise üç farklı şartın yukarıda verilen denkleme ilave edilmesi gerekmektedir. Birincisi, taban veya akıntıdan dolayı sapma nedeniyle enerjinin yayıldığı bölgede dalga yönü, dalganın coğrafik alan içerisinde hareket etmesinden dolayı değişmektedir. Alanda  $(x, y)$  enerji akısına benzer bir şekilde,  $\theta$  alanında akı  $\frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta E)$  ifadesiyle hesaba katılmaktadır.

Burada,  $c_\theta$  her frekans bileşeni için lineer dalga teorisine dayanan sapma nedeniyle oluşan yön değişiminin açılmal hızıdır. İkincisi, derinlik ve akıntıdaki değişimler nedeniyle göreceli frekansın değişkenliğinin etkisi, frekans alanındaki yayılma hızına ilişkin olan  $c_\sigma$ 'lı  $\frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma E)$  ifadesiyle hesaba katılmaktadır. Sonuncu adaptasyon faaliyeti ise hareket yoğunluğuna geçiştir ( $N(\sigma, \theta; x, y, t) = E(\sigma, \theta; x, y, t) / \sigma$ ). Bu değişim, akıntıların sahip oldukları enerjinin değil yalnızca hareketin muhafaza edilmesinden dolayı yapılmaktadır. Bu ilavelerin yapılması sığ sular için spektral hareket denge denklemini, Denklem 1.68'deki gibi açığa çıkarmaktadır (Van der westhuysen, 2002). Bu denklemin sağ tarafındaki üretim, dağılma (enerji kaybı) ve lineer olmayan dalga – dalga etkileşimlerinin etkilerini temsil eden hareket yoğunluğunun kaynak ifadesi ( $S(\sigma, \theta)$ ) ise aşağıdaki denklemlerle daha açık bir şekilde formüle edilebilmektedir;

$$S(\sigma, \theta) = S_{\text{inp}}(\sigma, \theta) + S_{\text{brk}}(\sigma, \theta) + S_{\text{frc}}(\sigma, \theta) + S_{\text{wcp}}(\sigma, \theta) + S_{\text{nl3}}(\sigma, \theta) + S_{\text{nl4}}(\sigma, \theta) \quad (1.72)$$

Burada;  $S_{\text{inp}}$  rüzgar girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi,  $S_{\text{brk}}$  taban odaklı kırılma nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı,  $S_{\text{frc}}$  taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı,  $S_{\text{wcp}}$  denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılmasıyla enerji kaybı,  $S_{\text{nl3}}$  üçlü lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi ve  $S_{\text{nl4}}$  dörtlü lineer olmayan dalga-dalga etkileşimidir (Zubier, 2002). Bu süreçlerle ilgili detaylı bilgi ve formülasyonlara SWAN (2008)'den ulaşılabilmektedir.

### 1.8.2. SWAN'ın Kapsadığı Süreçler

Denklem 1.68 ve 1.72'nin ifadeleri SWAN'ın aşağıdaki fiziksel mekanizmaları hesaba katan bir üçüncü nesil dalga üretim modeli olduğunu göstermektedir.

SWAN'ın kapsadığı yayılma süreçleri (SWAN, 2008);

- ✓ Coğrafik alanda dalga yayılması
- ✓ Derinlik ve akıntı etkisiyle alansal değişimler nedeniyle sapma
- ✓ Derinlik ve akıntı etkisiyle alansal değişimler nedeniyle sıkışma
- ✓ Kırınım
- ✓ Akıntılara karşı yansımalar ve engellemeler
- ✓ İletim yoluyla engellere karşı yansıma veya tıkanıklık'dır.

Model aynı zamanda aşağıdaki üretim ve dağılım süreçlerini de hesaba katmaktadır;

- ✓ Atmosferik girdilerle (rüzgar) dalga üretimi
- ✓ Derinlik etkileşimli kırılma nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
- ✓ Denizin köpüklenmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
- ✓ Taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılmasıyla enerji kaybı
- ✓ Derin ve sığ sularda dalga – dalga etkileşimleri (üçlü ve dörtlü)

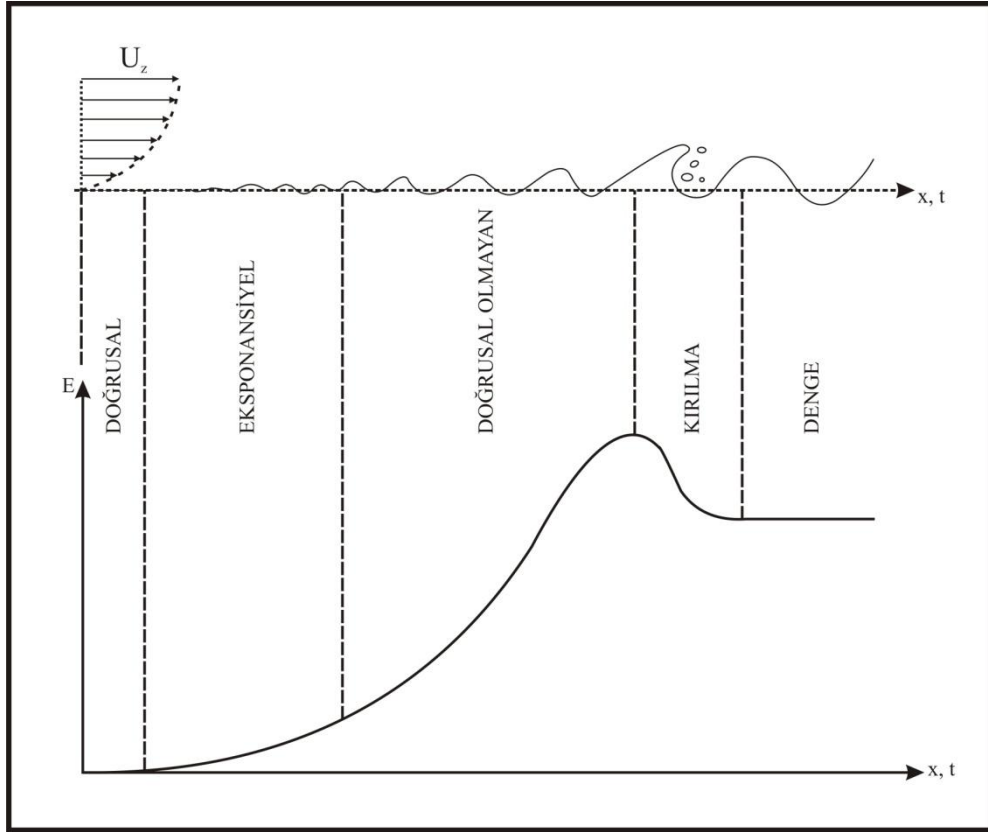
#### 1.8.2.1. Rüzgar Kaynaklı Dalga Üretimi veya Oluşumu

Bir rüzgar alanının sahip olduğu kinetik enerjinin, dalga enerjisine dönüştürülmesi  $S_{\text{inp}}$  kaynak ifadesi yardımıyla modellenmektedir. SWAN dalga enerjisi üretimi lineer artış mekanizması (Phillips, 1957) ve eksponansiyel artış mekanizması (Miles, 1957) olarak



bilinen iki mekanizmayı bünyesinde barındırmaktadır. Lineer artış mekanizmasının dalga üretiminin ilk safhalarında hakim olurken, fırtına durumunun artmasından dolayı daha sonrasında eksponansiyel artış mekanizmasının etkin olduğu bilinmektedir (Van der westhuysen, 2002).

Rüzgarlar nedeniyle oluşan dalganın artışı veya büyümesi (Şekil 1.9) bir dalga bileşeninin lineer ve üstel büyüme ifadelerinin toplamı olarak tanımlanmaktadır;



Şekil 1.9. Rüzgar dalgası artışının gelişimi (Arıkan, 1998)

$$S_{\text{inp}}(\sigma, \theta) = A + B E(\sigma, \theta) \quad (1.73)$$

Burada; A ve B dalga frekans ve yönü ile rüzgar hızı ve yönüne bağlıdır. Akıntıların etkileri, görünen yersel rüzgar hızı ve yönü kullanıldığı için hesaba katılmaktadır. A katsayısı lineer büyümeyi tanımlarken, B katsayısı üstel büyümeyi ifade etmektedir. Lineer büyüme ifadesi küçüktür ve yalnızca dalga artışının başlangıç safhasına katkıda bulunmaktadır (de Jong, 1997). A ifadesi için kullanılan formülasyon Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981) ve Tolman (1992)'nin ifadeleriyle tanımlanmaktadır. B katsayısı

için ise SWAN'da isteğe bağlı olarak iki çeşit ifadenin kullanılmasına imkan tanınmaktadır. Bunların ilki WAM Cycle 3 modelin ilk sürümünden alınmış Snyder vd. (1981)'in ifadesidir. Bu ifade Komen vd. (1984) tarafından sürtünme hızına göre yeniden ölçeklendirilmiştir. SWAN'da B katsayısı için kullanılabilen ikinci ifade ise WAM Cycle 4 modelinden alınmış rüzgar ile dalga arasındaki karşılıklı etkileşimi hesaba katan Janssen (1991)'in ifadesidir.

### 1.8.2.2. Derinlik Etkileşimli Dalga Kırılması

Derinlik etkileşimli dalga kırılmasının oluşma süreci tam anlamıyla henüz anlaşılammıştır ve onun spektral modellemesiyle ilgili çok az şey bilinmektedir. Bu durumun tersine bu tip dalga kırılması nedeniyle toplam enerji dağılımı iyi bir şekilde modellenebilmektedir. SWAN'da Battjes ve Janssen (1978)'in dalga kırılma modelinin derinlik sınırlı bölümünün spektral versiyonu kullanılmaktadır;

$$S_{brk}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (1.74)$$

Burada;  $E_{tot}$  toplam dalga enerjisi ve  $D_{tot}$  Battjes ve Janssen (1978)'e göre dalga kırılması nedeniyle toplam enerjide dağılımın oranıdır (bu değer sıfırdan küçük bir katsayıdır).

### 1.8.2.3. Denizin Köpüklenmesi

Köpüklenme olayı, maksimum dalga dikliğinin ( $H_{max}/L = 0.14$ ) aşılması durumunda meydana gelmektedir. Köpüklenme olayı nedeniyle enerji dağılımı rüzgar alanlarının varlığında daha sık meydana gelmektedir. Günümüzdeki üçüncü nesil dalga üretim modellerinde, köpüklenme formülleri Hasselmann (1974)'ün modeline dayanmaktadır;

$$S_{wcp}(\sigma, \theta) = -\Gamma \frac{\bar{k}}{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (1.75)$$

Burada;  $\Gamma$  bağımlı diklik katsayısı,  $k$  dalga sayısı ve  $\bar{\sigma}$  ve  $\bar{k}$  sırasıyla ortalama frekans ve ortalama dalga sayısı anlamına gelmektedir. Komen vd. (1984) tam kabarmış deniz

durumu için bağımlı diklik katsayısını tahmin etmiştir. Buradan bağımlı diklik katsayısının kullanılan rüzgar girdi formülasyonuna bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. SWAN’da rüzgar girdisi olarak iki farklı ifade kullanıldığı için aynı zamanda bağımlı diklik katsayısı için de iki değer kullanılmaktadır. Bunların ilki Komen vd. (1984) iken ikincisi ise Janssen (1991)’e dayanarak bu ifadenin uyarlanmasıdır.

Günümüze kadar SWAN’ın doğruluğunu geliştirmek için pek çok alternatif köpüklenme ifadeleri önerilmiştir. SWAN’da iki alternatif sunulmuştur. Köpüklenme olayı için bir alternatif formülasyon Hurdle ve Van Vledder (2004)’te tanımlandığı gibi Kümülatif Diklik Metoduna, ikinci alternatif ise Alves ve Banner (2003)’in tanımladığı metoda dayanmaktadır.

#### 1.8.2.4. Taban Sürtünmesi

SWAN’da taban sürtünmesi nedeniyle meydana gelen enerji dağılımı üç farklı ifadeyle tanımlanabilmektedir. Hasselmann vd. (1973)’ün ampirik JONSWAP modeli, Collins (1972)’nin sürüklenme kanunu modeli ve Madsen vd. (1988)’in eddy-viskozite modeli isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. SWAN’da taban sürtünmesi nedeniyle dalga enerjisi dağılımına ortalama bir akıntının etkisi hesaba katılmamıştır. Bu ifadeler tamamen Denklem 1.76 ile açıklanabilmektedir;

$$S_{\text{frc}} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \text{Sinh}^2(k d)} E(\sigma, \theta) \quad (1.76)$$

Burada;  $C_b$  taban sürtünme katsayısıdır.

#### 1.8.2.5. Lineer Olmayan Dalga–Dalga Etkileşimleri

Derin denizde dörtlü (quadruplet) dalga–dalga etkileşimleri spektrumun gelişiminde hakim rol üstlenmektedir. Bu durumda, dalga enerjisi spektral pik değerinden daha düşük frekanslara ve enerjinin köpüklenme olayıyla dağılmakta olduğu daha yüksek frekanslara aktarılır. Dörtlü dalga etkileşimlerinin formülasyonu Boltzmann integrali ile tanımlanmaktadır. Ancak, bu integrali çözmek yoğun hesaplamalar gerektirdiğinden dolayı

uygulanmamaktadır. Bununla birlikte, Hasselmann vd (1985) tarafından türetilen Ayrık Etkileşim Yaklaşımı SWAN’da uygulanmaktadır. Üçlü dalga-dalga etkileşimleri derin suda çok küçük öneme sahiptir, ancak çok sığ bölgelere gelince önemli olabilmektedirler. Çok sığ bölgelerde Eldeberky ve Battjes (1995)’in Yığışınlı Üçlü Yaklaşımı’na dayanan üçlü (triad) dalga–dalga etkileşimleri SWAN’da uygulanmaktadır. Bu etkileşim enerjiyi düşük frekanslardan daha yüksek frekanslara aktarmaktadır (de Jong, 1997).

### 1.8.3. Durgun ve Durgun Olmayan Durum Benzeşimleri

SWAN’ın kullandığı hareket denge denklemi, Denklem 1.71’de verilmiştir. Bu denklem sınır şartları ve/veya zamanla değişebilen kaynak ifadeleri kullanılarak uygulanırsa, SWAN durgun olmayan veya zamana bağımlı bir modda işletilmiş olmaktadır. Bu duruma zıt olarak, bütün sınır koşulları ve bütün kaynak ifadelerinin zamanla değişmemesi söz konusuysa, Denklem 1.71 aşağıdaki gibi sadeleştirilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S(\sigma, \theta; x, y)}{\sigma} \quad (1.77)$$

Sınır şartlarının zamanla değişmeyen olması göz önünde bulundurulması durumundaki benzeşimler durgun durum olarak ifade edilmektedir. Sınır dalga şartlarının ve kaynak ifadelerinin hesaplamalı alanın içerisinde dalgaların yayılma süresine bağlı olarak yavaşça değiştiği durumlarda, durgun durum benzeşimlerinin (zamanla değişmeyen) uygun olduğu düşünülmektedir (Van der westhuysen, 2002).

### 1.8.4. SWAN’la Gerçekleştirilecek Uygulamalar İçin Öneriler

Daha önceki bölümlerde izah edildiği gibi, SWAN’da fiziksel süreçler ve model kurguları bakımından çok çeşitli seçenekler mevcuttur. Bunların yanında, kullanıcı modelin sayısal içeriğine ilişkin seçenekler bakımından büyük bir özgürlüğe sahiptir. SWAN (2008) modelin uygulanması ve yapılandırılması üzerine çok sayıda tavsiyeler içermektedir. Bu tavsiyelerden önemlileri bir sonraki bölümde özetlenmiştir.

### 1.8.4.1. Sayısal Aşama İçin Öneriler

SWAN’da gerçekleştirilecek analizlerde hesaplama için çeşitli karelej (ızgara) tabanları kullanılmaktadır. Girdi miktarları coğrafik alanda (x, y) bir ayrıklaştırmaya sahip olan girdi ızgarasının üzerinde yer almaktadır. Hareket denge hesabı coğrafik (x, y) alanda, yönsel ( $\theta$ ) alanda ve frekans ( $\sigma$ ) ve zaman (t) alanında ayrıklaştırmaya sahip olan bir hesaplamalı ızgara üzerinde gerçekleştirilmektedir. Model sonuçlarının doğruluğu için bu ızgaraların uygun tanımlaması önemlidir. Bu bağlamda, Tablo 1.1’de ızgara tanımlamaları için önerilen sınırlar özetlenmiştir.

Bu tablodaki önerilerin uygulamaya geçirilmesinde modellenmenin yeterince gerçekleştirildiğine dikkat edilmelidir. Bu çözünürlükler belirlenirken hesaplamalı ızgara üzerindeki ayrıklaştırmaların modellenmiş miktarları yeterince çözebilmesine özen gösterilmelidir. Diğer bir deyişle, alansal çözünürlük batimetrik detayların çözümlenebilmesi için, yönsel çözünürlük yönsel dalga bileşenlerinin dağılımının çözümlenebilmesi için ve frekans çözünürlüğü ise ilgili spektral detayların çözümlenebilmesi için yeterince iyi olmalıdır. Ayrıca, tavsiye edilen üst ve alt frekans sınırları spektrumun bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşimin ve rüzgar-dalga artışının oluşmasına izin verebilmelidir.

Tablo 1.1. SWAN’da hesaplamalı ızgara ayrıklaştırması için önerilen seçenekler (Van der westhuysen, 2002; Van Vledder, 2011)

Bileşen	Önerilen seçenek	Bu çalışmada kullanılan değerler
Yönsel Çözünürlük ( $\Delta\theta$ )		
Rüzgar dalgası şartları için	15° – 10°	10°
Ölü deniz dalgası şartları için	5° – 2°	-
Frekans Çözünürlüğü ( $\Delta\sigma/\sigma$ )	0.1	
Frekans Aralığı (f)		
Minimum frekans	0.04 Hertz	0.04 Hertz
Maksimum frekans	1.00 Hertz	1.00 Hertz
Alansal Çözünürlük ( $\Delta x, \Delta y$ )		
Açıkdeniz şartlarında	2 km x 2 km	1.3 km x 1.8 km
Yakın kıyı şartlarında	100 m	-
Limanlarda	20 m – 50 m	-

Bu sınırlamalar nedeniyle, ayrıklaştırma seçeneği modellenecek durumun veya yerin veya örnek çalışmanın belirli şartlarına bağlıdır. Bu belirli çalışma alanı için daha

detaylı hesaplamalar gerekli ise, her benzeşim için, iç içe geçmiş daha yüksek ayrıklaştırmalı ikinci bir ızgara mevcuttur (Van der westhuysen, 2002).

#### 1.8.4.2. Fiziksel Süreçler İçin Öneriler

SWAN'ın standart yapılandırması olarak bilinen mevcut fiziksel süreçlerin formülasyonları ve onların ilgili katsayılarının önerilen formları, Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Modelin uygulanması için SWAN El Kitabı'nda (SWAN, 2008) önerilen fiziksel süreçlerin formülasyonları

Fiziksel Süreç	Formülasyon	Katsayı
Lineer dalga artışı	Devre dışı bırakılmış	Yok
Eksponansiyel dalga artışı	Komen vd (1984)	
Denizin köpüklenmesi	Hasselmann (1974) ve WAMDI group (1988)	$C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}$ $\delta = 0$ $p = 4$ $\dot{S}_{PM} = 3.02 \times 10^{-3}$
Dörtlü dalga – dalga etkileşimleri	Hasselmann vd (1985)	$\lambda = 0.25$ $C_{n/4} = 3 \times 10^7$ $C_{sh1} = 5.5$ $C_{sh2} = 6/7$ $C_{sh3} = -1.25$
Taban sürtünmesi	Hasselmann vd (1973)	$C_{JON} = 0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$
Üçlü dalga – dalga etkileşimleri	Eldeberky (1996)	$\alpha_{EB} = 0.1$
Derinlik etkileşimli dalga kırılması	Eldeberky ve Battjes (1996) tarafından uyarlanmış Battjes ve Janssen (1978)	$\alpha_{BJ} = 1$ $\gamma_{BJ} = 0.73$

Burada ifade edilen SWAN'ın standart yapılandırması ilk olarak Ris (1997) tarafından tanımlanmış ve sonrasında SWAN (2008)'de sahip olduğu forma geliştirilmiştir. Bu bölümde özetlenen SWAN'ın değerlendirilme çalışmasının çoğu somutlaştırılmıştır ve somutlaştırılmış bu süreçlerin bir alan çalışmasının ilk dalga tahmin benzeşimleri için kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, Bölüm 2'de uygulanacak dalga tahmin çalışmasında yürütülecek olan benzeşimler için tüm süreçleri burada önerildiği gibi içeren bir düzen kullanılmıştır.

#### 1.9. Dalga Enerjisi Gelişim İndeksi (DEGI)

Dalga enerjisi gelişim indeksi, Hagerman (2001) tarafından ortalama yıllık dalga enerji akısının maksimum fırtına dalgası enerji akısına (herhangi bir dalga gücü santral

platformunun veya gövde yapısı ve temelinin veya demirlemesinin güç santralının hizmet ömrü boyunca emebildiği enerjiyi temsil etmekte) oranı olarak tanımlanmıştır. Hagerman (2001)'e göre, daha düşük bir DEĞİ, bir dalga güç santralının belli bir bölgede yıllık ortalama dalga enerji kaynağından yararlanabilmek için gerekli olacak yatırım maliyeti açısından ödenmek zorunda kalınacağı daha az bir tasarım maliyetinin olacağı anlamına gelmektedir.

$$DEĞİ = \frac{\bar{P}}{P_{maks.}} \quad (1.78)$$

### 1.10. Dalga Gücü Süreklilik Eğrileri

Dalga gücünün belli bir değere eşit veya ondan büyük olduğu zaman yüzdesi hesaplanıp dalga güçleri düşey ekseninde, zaman yüzdeleri ise yatay ekseninde gösterilerek çizilen eğri dalga gücünün süreklilik eğrisini vermektedir (Bayazıt, 2003). Bu eğri yardımıyla, hem belli bir zaman yüzdesinde (örneğin yılın 3 ayında) aşılacak dalga gücü ve hem de belli bir dalga gücüne eşit veya büyük değerlerin aşılma ihtimalleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla bu eğri, kurulması muhtemel bir dalga güç tesisinin tasarımında ihtiyaç duyulacak güvenilir gücün hesabında önem arz etmektedir. Dalga gücü süreklilik eğrisi çizilirken, dalga güçleri büyükten küçüğe doğru dizilmekte ve her bir dalga gücünün aşılma ihtimali,

$$p = i / (n + 1) \quad (1.79)$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Burada; i sıraya dizilmiş dalga güçlerinin sıra numarası ve n toplam veri sayısıdır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

Bu çalışmada, açık denizde ve yakın kıyıda tasarımı planlanan bütün yapıların boyutlandırılmasında en önemli ihtiyaçlardan biri olan dalga karakteristiklerinin Karadeniz'in tümünü kapsayacak şekilde elde edilebilmesi için açık deniz ve yakın kıyı dalga modellemesi yapılmıştır. Modelleme sonucunda Karadeniz için bir veri tabanı elde edilmiş ve bu veri tabanından yararlanarak Karadeniz'in dalga gücü potansiyeli belirlenmiştir.

Çalışmada, öncelikle Karadeniz için mevcut veri kaynakları irdelenerek açık deniz ve yakın kıyı dalga tahmini ve modellemesi gerçekleştirilmiştir. Dalga tahmininde ve modellemesinde, basitleştirilmiş dalga tahmin modelleri ve üçüncü nesil bir dalga tahmin modeli (SWAN) kullanılmıştır. SWAN modeli, durgun ve durgun olmayan durumlar için analiz yapabilme kabiliyetine sahip olduğundan her iki durum için bir duyarlılık analizi yapılarak hangi durumun kullanılmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinin uygulanmasında, fırtınaları belirlemede etkin olan kritik yön değişim açısı da bir duyarlılık analizi ile belirlenmiştir. Basitleştirilmiş dalga tahmin modelleri, bu yön değişim açısı dikkate alınarak Karadeniz'e uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında oluşturulan SWAN modeli ve basitleştirilmiş dalga tahmin modelleri ile ECMWF'nin Karadeniz dalga tahmin verileri daha önceden ölçülmüş dalga verileri ( $H_s$  ve  $T_z$ ) ile kıyaslanarak test edilmiştir. Bu kapsamda, SWAN dalga modellemesinin doğruluğu, Hopa ve Sinop istasyonlarında mevcut olan dalga ölçümleri ile belirlenmiş ve ayrıca SWAN sonuçları önceden gerçekleştirilen METU3 dalga tahminleri ile kıyaslanmıştır. Daha sonra, Karadeniz'de dalga ölçümü mevcut iki istasyon için en iyi basit dalga tahmin modeline karar verilmiştir. En iyi model, oluşturulan basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinin kendi içlerinde kıyaslanması yapılarak belirlenmiştir. Aynı işlem, ECMWF'nin sahip olduğu farklı veri takımları için de gerçekleştirilmiş ve Karadeniz için en uygun ECMWF veri takımı tespit edilmiştir. Son olarak, çalışmada doğrulama analizi kapsamında belirli bir zaman diliminde gerçekleştirilen dalga tahminleri ile ECMWF veri takımlarının tahminleri karşılaştırılmıştır.

SWAN dalga modellemesi sonucunda Karadeniz için oluşturulan 15 yıllık veri tabanı kullanılarak Karadeniz'de belirgin dalga yüksekliğinin ve dalga gücünün zamansal ve



alansal değişimleri irdelenmiştir. Bu kapsamda, bu iki parametrenin aylık, mevsimlik ve yıllık ortalama haritaları üretilmiştir. Bununla birlikte, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyı şeridi için elde edilebilecek dalga enerji miktarları daha detaylı irdelenmiştir. Öncelikle, belirlenen noktadaki (Sinop, Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa) dalga gücünün zamansal değişimleri yıllık ve mevsimlik olarak incelenmiştir. Bir dalga güç santralının tasarım maliyetine ilişkin ön bilgi veren dalga enerji gelişim indeksi parametresi (DEGI) her bir nokta için belirlenmiş ve irdelenmiştir. Kurulması muhtemel bir güç santralının tasarımına ilişkin faydalı bilgiler sunabilen mevsimsel ve yıllık dalga gücü aşılma olasılık diyagramları her bir nokta için elde edilmiştir. Sonuçta, çalışma kapsamında incelenen noktalarda elde edilebilecek dalga gücü potansiyeli belirlenmiş ve genel değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2.1. Çalışma Bölgesi

Karadeniz, 41° - 46° kuzey enlemleri ve 28° - 41.5° doğu boylamları arasında yer alan sırasıyla İstanbul ve Çanakkale Boğazları vasıtasıyla Marmara Denizine ve Ege Denizine ve Kerch Boğazı sayesinde Azak denizine bağlanan, batıdan doğuya böbrek formunda bir denizdir. Güneyde Türkiye kıyı şeridinin eğimi ve kuzeyde Kırım yarımadası ile eliptik şekillenen havza olarak uzanmaktadır. 8350 kilometre kıyı şeridine sahip, 461 bin km<sup>2</sup> alan kaplayan (Azak Denizi dahil, Marmara Denizi hariç), en geniş yeri doğu - batı yönünde Burgaz (Bulgaristan) - Poti (Gürcistan) arası 1170 km ve kuzey-güney yönünde Odesa (Ukrayna) - Ereğli (Türkiye) arası 600 km ve en derin noktası 2210 m olan Karadeniz, karalarla çevrili dünyanın en büyük havzasıdır (URL-1, 2011; URL-2, 2011). Şekil 2.1, çalışma bölgesini ve çalışma sonucunda elde edilen veri tabanını (dalga modelini) doğrulama aşamasında kullanılan şamandıra istasyonlarının (dalga ölçüm istasyonları) ve meteorolojik rüzgar kayıt istasyonlarının yerlerini göstermektedir.

Karadeniz'in güney sahilleri (Türkiye kıyıları), bu bölgede kurulması muhtemel dalga güç santrallerinin hizmet edebileceği yerleşim bölgelerinin olması ve kurulmasına uygun pek çok sanat yapısının ve özellikle Karadeniz Sahil Yolu'nun sahil boyunca yer almasından dolayı dalga enerjisinden yararlanmak için uygun gözükmektedir. Bölgede, halk çoğunlukla sahil kesimlerine küçük yerleşim bölgeleri şeklinde konumlanmış durumdadır. Ayrıca, sahil boyunca pek çok liman ve kıyı koruma yapısı mevcuttur. Dolayısıyla, bölgede dalga enerjisinden yararlanmak maksadıyla dalga güç santrallerinin

kurulumu için çok uygun yerler bulunmaktadır. Aynı zamanda, bölgede kurulması muhtemel dalga güç santrallerinin bölgesel olarak hizmet edebileceği pek çok alan (Karadeniz sahil yolunun aydınlatması ve küçük yerleşim bölgelerinin aydınlatması vb.) mevcuttur. Bundan dolayı, bu çalışmada Karadeniz'in güney sahilleri boyunca dalga enerjisi potansiyeline ve potansiyelinden yararlanma imkanlarının araştırılmasına odaklanılmıştır.



Şekil 2.1. Çalışma Bölgesi ve ilgilenilen istasyonlar (URL-3, 2011)

## 2.2. Veri Kaynakları

Rüzgar verilerinin kalitesi gerçekleştirilecek rüzgar - dalga modelinin doğruluğunu etkilemesinden dolayı güvenilir dalga tahmininin elde edilebilmesi için uygun rüzgar kaynağının seçimi önemli bir önkoşuldur. Bundan dolayı, bu çalışmada rüzgar veri kaynağı olarak merkezi İngiltere'de olan ECMWF'nin ve DMI'nin veri tabanları dikkate alınmıştır. Hem SWAN modelinde hem de basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinde rüzgar girdisi olarak bu veri tabanlarından yararlanılmıştır. Oluşturulacak rüzgar - dalga modellerinin performanslarını test etmek için ise NATO TU-WAVES projesi kapsamında daha önceden Sinop ve Hopa açıklarında ölçülmüş şamandıra dalga ölçüm verileri kullanılmıştır.

### 2.2.1. ECMWF Verileri

Bu çalışmada rüzgardan dalga tahminini gerçekleştirebilmek için kullanılan iki rüzgar veri kaynağından biri ECMWF tahmini rüzgar alanlarıdır. ECMWF, 1975 yılında kurulan şu anda 32 ülke tarafından desteklenen bağımsız bir uluslar arası kurumdur. Kurumun merkezi İngiltere’de Londra’nın batısında Reading kasabasında yer almaktadır. Kurum, Türkiye’nin dahil olduğu 18 ülke ile üyelik antlaşmasına ve 14 ülke ile işbirliği antlaşmasına sahiptir (ECMWF, 2010). Türkiye’de, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ECMWF’nin temsilcisidir. DMİ, ECMWF’nin verilerine giriş iznine sahiptir ve aynı zamanda bu iki kurum karşılıklı bilgi alışverişinde bulunmaktadır. ECMWF, küresel atmosferik tahminleri ve dalga tahminlerini geliştirmekte, rüzgar ve dalga tahmin modelleri kurgulamakta, araştırma denemeleri yapmakta ve gözlemlerden, analizlerden, tahminlerden ve araştırma denemelerinden elde edilen verileri biriktirmektedir (Berkün, 2007).

Bu çalışmada kullanılan ECMWF verileri, ECMWF ve DMİ’den alınan özel izin ile ECMWF veri sunucusundan temin edilmiştir. Veriler, internet üzerinden özel bir anahtar kart yardımıyla ECMWF’nin veri arşivleme hizmeti kullanılarak indirilmiştir. Bu arşivleme hizmeti birkaç veri tabanından oluşmaktadır. Bunlar; Operasyonel arşiv, Re-analiz arşiv (ERA-Interim, ERA-15 ve ERA-40) ve bazı özel veri tabanları (örneğin DEMETER, ECSN, ELDAS, ENSEMBLES, MACC, MERSEA, PROVOST, TIGGE, TOST ve YOTC)’dir.

ECMWF mevcut olan verileri kullanarak doğrulama işlemini gerçekleştirdikten sonra, model alanları ve her gün saat 00.<sup>00</sup> ve 12.<sup>00</sup>’da olmak üzere en az 10 günlük tahmin alanları üreten bir operasyonel arşiv geliştirmektedir. Bu arşivin modeli, ECMWF ürünlerinin kalitesini artırmak için modelin formülasyonu, fiziği, sayısal kısmı ve veri benzeşim süreci geliştirilerek yılda birkaç kez yükseltilmektedir. Aynı zamanda, yeni bir veri elde edildiği durumda, model sonuçlarını doğrulamak için bu yeni veri modele dahil edilmektedir. Bunların yanında, modelde bazen yeni parametreler tanımlanabilmekte ve üretilebilmektedir. Bu yüzden, bu model değişimleri nedeniyle, tahmini operasyonel rüzgar alanlarının kalitesi ve varlığı zamanla değişebilmektedir. Sonuç itibarıyla, dikkatli düzeltmelerin yapılmaksızın operasyonel model sonuçlarına dayanarak iklim veya yıllık değişimler hakkında sonuçlara ulaşılmasının denenmesi hatalı sonuçlar elde edilmesine yol açabilmektedir (Abdalla, 2010). Bu sorun nedeniyle, ECMWF tarafından re-analiz (ERA) projeleri gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı, değişken bir model yerine sabit bir model sürümünü kullanmaktır. Gerçekleştirilen inceleme neticesinde, ECMWF’nin üç ayrı re-analiz projesine sahip olduğu

anlaşılması ve bunların en son ürünü olan ERA-Interim olarak adlandırılan re-analiz veri tabanının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu veri tabanı, 1979 yılı ocak ayından günümüze kadar 6 saatlik zaman çözünürlüklü rüzgar alanlarına sahiptir. Dalga parametrelerinin tahmini için bu re-analiz veri tabanının atmosferik model çıktıları kullanılırken, gerçekleştirilen tahminleri kıyaslamak maksadıyla da aynı veri tabanının dalga model çıktıları değerlendirilmiştir. Atmosferik modelden iki yönlü tahmini yüzeysel rüzgar alanları ve dalga modelinden ise tahmini ölü deniz ve rüzgar dalgası parametreleri temin edilmiştir.

ERA-Interim veri tabanı dışındaki diğer re-analiz veri tabanları ERA-15 ve ERA-40, sırasıyla 15 ve 40 yıllık süreler için ilgili hava parametrelerinin küresel ve kısa süreli tahminlerinin re-analiz arşivleridir. Diğer özel veri tabanları ise belirli bölgelere odaklanan dolayısıyla küresel bir öneme sahip olmayan bölgesel veri tabanlarıdır.

#### **2.2.1.1. ECMWF Verilerinin Temini**

ECMWF'den verilerin temin edilmesi değişik yollarla gerçekleştirilebilmektedir. Veri temininde en kolay yöntem ECMWF'nin web sitesinden verileri sipariş etmektir. Web adresi, anahtar kart ve talimatlar kullanılarak arşivlere kolaylıkla giriş yapılabilecek doğrudan bir bağlantıya sahiptir. Verileri temin etmenin başka bir yolu ise, Meteorolojik Arşiv ve Geri Alma Sistemi (MARS)'ni kullanmaktır (Çaban, 2007). Bu çalışmada, çevrimiçi veri siparişi ile verilerin temin edilmesi yolu tercih edilmiştir. Çalışma verileri, ERA-Interim veri tabanından doğrudan sipariş usulüyle talep edilmiş ve onay geldikten sonra indirilmiştir. Bu işlem için, veri tabanının seçiminden sonra, veriler arzu edilen parametreler (gerekli dalga ve rüzgar parametreleri, veri zaman aralığı, günlük gözlem saatleri ve son olarak bu parametrelerin enlem ve boylam bakımından yeri ve alansal karelej aralığı) seçilerek sipariş edilmiş, talebin ECMWF tarafından değerlendirilmesinden sonra, açılan bağlantı yardımıyla arzu edilen özellikte talep edilen dosyalar GRIB (Gridded binary) formatında temin edilebilmiştir.

#### **2.2.1.2. ECMWF Verilerinin Özellikleri**

Analiz edilecek olan veriler, ECMWF veri tabanının iki farklı alt veri tabanından indirilmiştir. Rüzgar verileri atmosferik modelden, dalga verileri ise dalga modeli alt veri tabanından elde edilmiştir. Çalışma kapsamında ECMWF veri tabanından indirilen veriler;

- 10U- 10 m yükseklikteki U rüzgar bileşeni (m/s)
- 10V- 10 m yükseklikteki V rüzgar bileşeni (m/s)
- WIND – 10 m yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
- SWH – Belirgin dalga yüksekliği (m)
- MWD – Ortalama dalga yönü (derece)
- MWP – Ortalama dalga periyodu (s)'dur.

ECMWF ERA Interim veri tabanının atmosferik modelinden elde edilen 10 m yükseklikte U ve V rüzgar bileşenleri sırasıyla enlemsel ve boylamsal yönlerde su yüzeyinin 10 metre yukarısındaki rüzgar hızlarına karşılık gelmektedir. Yönleri kartezyen koordinat sistemiyle aynıdır. U ve V'ler, sırasıyla rüzgar bileşenlerinin enlem ve boylamlarını göstermektedir. U bileşeninin pozitif yönü doğuya, V bileşeninin pozitif yönü ise kuzeye doğrudur. Rüzgar bileşenlerinin alansal çözünürlüğü enlemde ve boylamda  $0.25^\circ$  dir. Diğer parametreler ise, dalga modeli çıktısından temin edilmiştir. Bu veri alt tabanının alansal çözünürlüğü de atmosferik modelde ki gibidir ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). WIND parametresi, yönden bağımsız olarak verilen su yüzeyinden 10 m yukarıdaki rüzgar hızıdır. Yönün gerekliliği nedeniyle, bu parametre yalnızca yüzeysel analizden elde edilen rüzgar verilerini doğrulamak amacıyla sadece ECMWF ERA Interim veri tabanı için indirilmiştir. MWD, MWP ve SWH parametreleri, ECMWF'nin WAM modeli kullanılarak gerçekleştirilen tahmin değerleridir (ECMWF, 2008; Janssen vd., 2005). Bu üç parametre, SWAN ile ECMWF rüzgar verilerinden yararlanarak gerçekleştirilecek analiz sonucunda elde edilecek dalga verileri ile karşılaştırılabileceği düşüncesiyle, ECMWF arşivinden ERA Interim, ERA 40 ve Operasyonel veri tabanlarının her biri için ayrı ayrı temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan veriler, 01.01.1989 ve 31.05.2010 tarihleri arasındaki rüzgar ve dalga verilerini içermektedir. Bu verilerdeki zaman çözünürlüğü 6 saattir. Bu çözünürlük, tüm Karadeniz üzeri için temin edilen veri tabanında her bir noktada günde 4 kez veri kaydının olduğu, yani bir nokta için yılda 1460 adet veri kaydı alındığı anlamına gelmektedir. Toplam 21 yıllık veri tabanı söz konusu olduğundan bir noktadaki toplam veri kaydı 30660 adettir. Temin edilen verilerin alansal çözünürlüğü  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  olduğundan tüm Karadeniz üzerinde bu şekilde karelajlara bölünen alanda, her bir karelajın kesişim noktaları, veri kaydını temsil etmektedir. Bu karelajlama, tüm Karadeniz üzerinde 61 x 29'luk bir matrise karşılık gelmektedir. Böylelikle, tüm yüzey dikkate alındığında, anlık bir veri kaydında 1769 adet veri bulunmaktadır. 1 günlük süreçte 4 kayıt alındığından 1 günlük veri dosyasında toplam 7076 adet, 1 yıllık süreçte 2 milyon 582 bin 740 adet veri

ve çalışma süresi kapsamında indirilen 21 yıllık dosyalarda toplam 54 milyon 237 bin 540 adet veri bulunmaktadır.

Çalışmada kullanılan atmosferik alt veri tabanındaki 10 m yükseklikteki U ve V rüzgar bileşenleri, ECMWF veri tabanının sınırlı sayıda verinin indirilmesine izin vermesinden dolayı, aylık dosyalar halinde indirilmiştir. Bu iki parametreyi de içeren toplam bir yıl için 12 aylık veri dosyası, bir seferde indirilebilmiştir. Toplamda, atmosferik modelden 10 m yükseklikteki U ve V rüzgar bileşenlerini içeren 252 adet dosya indirilmiştir. Dalga modelinde ise, indirilen her bir dosyanın bütün parametreleri kapsamı mümkün olmamıştır. Bu nedenle, ECMWF'nin dalga modelinden indirilecek parametreler iki gruba ayrılarak kaydedilebilmiştir. Her iki grup için ayrı ayrı 1 günlük veri bir seferde tek dosya halinde ve yaklaşık 1 yıllık veri indirilebilmiştir. Sonuçta, toplam 21 yıllık veri tabanının her bir grubu için 7665 adet dosya kaydedilmiştir.

### **2.2.1.3. ECMWF Verilerinin Dosya Formatı**

ECMWF'den temin edilen bütün veriler GRIB uzantılı dosya formatında elde edilebilmiştir. GRIB dosya formatı bir veri alışveriş ve biriktirme formatıdır. Bu dosya formatında veriler, etkin bir şekilde paketlenmekte, sıkıştırılmakta ve bu yolla verilerin biriktirilmesi ve iletilmesi etkin bir biçimde yapılmaktadır. Ancak, GRIB dosyalar içindeki verilerin bu dosyaların içinden çıkarılmadan herhangi bir yazılımda açılması ve/veya okunabilmesi mümkün olamamaktadır. GRIB dosyalarından verilerin çıkarılabilmesi için özel bir yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu maksat için çok az program mevcuttur ve bu dosya formatından verilerin çıkarılması hususunda tatmin edici dokümantasyon bulmak zordur. Bu çalışmada, PanoplyWin yazılımı kullanılmıştır. Ancak bunun yanında; ECMWF, UNIX sistemler için mevcut olan GRIB dosyalarını yönetmek için GRIBEX yazılımı da mevcuttur (Aldoğan, 2008).

PanoplyWin kullanımı oldukça basit ve kolay olan bir yazılımdır. Program, NASA (National Aeronautics and Space Administration)'nın internet sitesinden indirilip kullanılabilir (NASA, 2010). Böylelikle, çözümleme süreci PanoplyWin programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kodu çözülen GRIB dosyaları txt uzantılı metin dosyası olarak kaydedilmiştir. Her GRIB dosyası bir aylık periyotdaki verileri içermekte ve bu yüzden her ay ve her rüzgar bileşeni için ayrı ayrı toplamda (259 ay ve 2 rüzgar bileşeni için) 518 metin dosyası üretilmiştir. Üretilen metin dosyaları metin belgesi olarak

okunabilmesine rağmen bu halleriyle anlamlı değillerdir. Bu yüzden; son olarak, üretilen bu dosyalar Microsoft Excel yardımıyla düzenlenerek SWAN'da analiz edilebilecek biçime dönüştürülmüştür.

### **2.2.2. DMİ Verileri**

Analizlerde kullanılan diğer rüzgar veri kaynağı ise DMİ rüzgar veri takımıdır. DMİ, Karadeniz kıyı şeridi boyunca bazı noktalarda rüzgar ölçüm rasatlarına sahiptir. SWAN rüzgar - dalga modelini ve bu modele girdi olarak kullanılması planlanan ECMWF rüzgar veri takımını doğrulamak amacıyla Hopa ve Sinop şamandıra dalga ölçüm istasyonlarına en yakın DMİ rüzgar rasat istasyonları belirlenmiş ve bu istasyonların verileri kullanılmıştır (Şekil 2.1). Hopa DMİ rüzgar istasyonu olarak adlandırılan rüzgar ölçüm istasyonu  $42^{\circ}24'24''$  kuzey enlemi ve  $41^{\circ}25'58''$  doğu boylamında, Sinop DMİ rüzgar istasyonu ise  $42^{\circ}01'60''$  kuzey enlemi ve  $35^{\circ}09'60''$  doğu boylamında yer almaktadır. Bu istasyonlar, Sinop ve Hopa şamandıra istasyonlarına en yakın DMİ meteoroloji istasyonlarıdır. Bu istasyonların rüzgar verileri, DMİ'nin internet sitesinden TUMAS (Meteorolojik Veri Arşiv Sistemi) veri tabanına üye olunarak elde edilmiştir ve Hopa DMİ rüzgar istasyonu için 1975-2010 yılları arasındaki, Sinop DMİ rüzgar istasyonu için ise 1980 - 2010 yılları arasındaki periyodu kapsayacak şekilde DMİ'den çevrimiçi olarak talep edilmiştir. Resmi kurum yazısı ile talebin DMİ'ye iletilmesinin ardından TUMAS veri tabanında üyelik bölümünde aktif hale getirilen veriler indirilmiştir. Talep edilen parametreler 10 m yükseklikteki saatlik ortalama rüzgar hızı ve yönüdür. DMİ rüzgar rasat istasyonlarında kaydedilen verilerin zamansal çözünürlüğü 1 saattir ve bu veriler alansal çözünürlüğe sahip değillerdir.

### **2.2.3. Dalga Ölçüm (Şamandıra) Verileri**

Çalışmada dalga modellerini ve tahminlerini doğrulamak için Türkiye kıyılarında NATO TU-WAVES projesi kapsamında Sinop ve Hopa açıklarında kurulmuş ve işletilmiş iki şamandıra istasyonunun dalga kayıtları kullanılmıştır.  $41^{\circ}25'24''$  kuzey enlemi ve  $41^{\circ}23'00''$  doğu boylamında yer alan Hopa şamandıra istasyonunda 1994 (Aralık ayı), 1995 (tüm aylar), 1996 (tüm aylar), 1997 (Ocak ayı ve Mayıs - Aralık ayları), 1998 (tüm aylar)

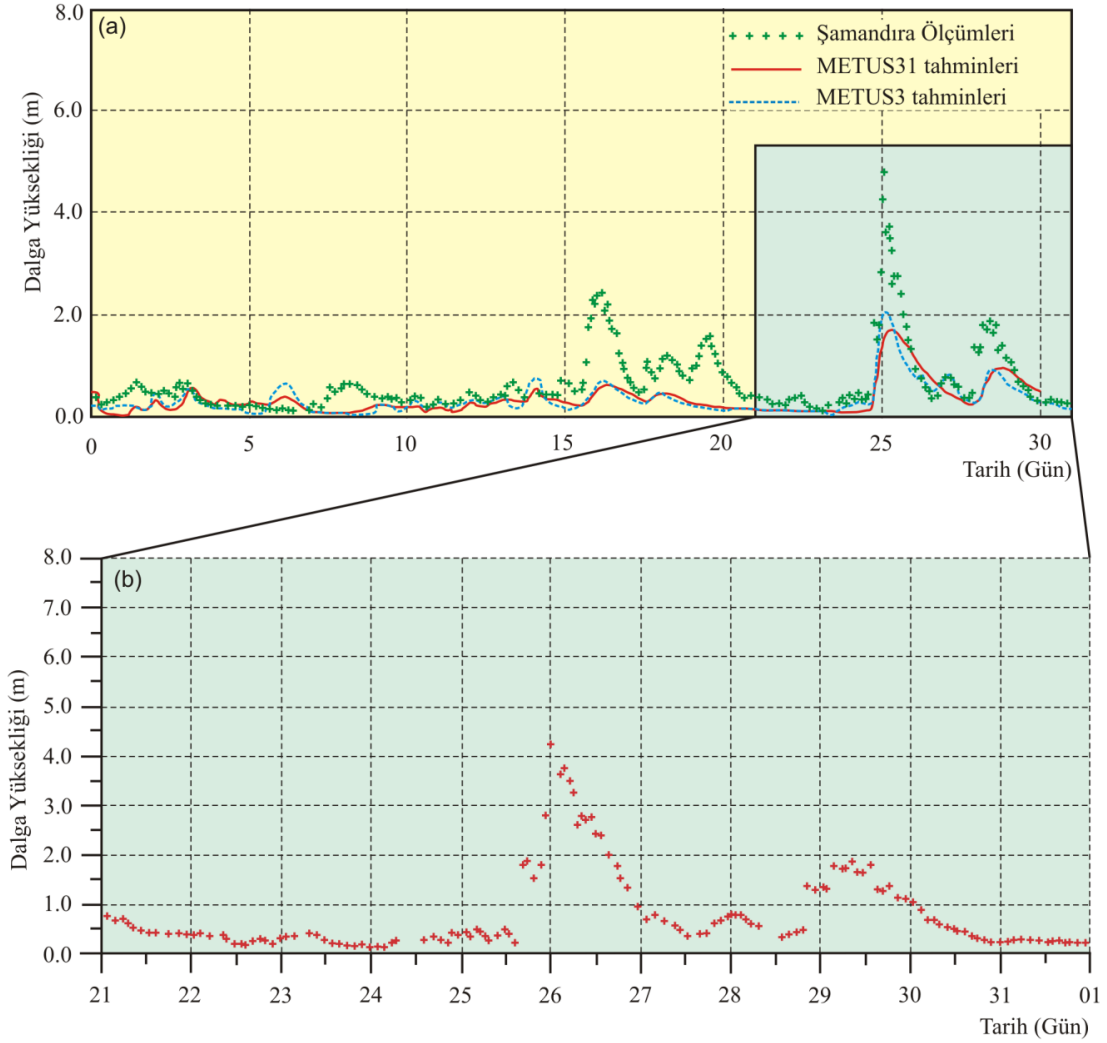
ve 1999 (Ocak - Nisan ayları) yılları arasında kaydedilmiş toplam 48 aylık veri mevcuttur. 42°07'24" kuzey enlemi ve 35°05'12" doğu boylamında yer alan Sinop şamandıra istasyonunda ise 1994 (Aralık ve Kasım ayları), 1995 (Aralık ve Kasım ayları) ve 1996 (Ocak – Haziran ayları) yıllarında toplamda 10 aylık veri kaydedilmiştir. Şekil 2.1 her iki şamandıra ölçüm istasyonunun yerlerini göstermektedir. 100 m'lik derinlikte kurulmuş her iki şamandıra istasyonuna ve dalga ölçümlerine ilişkin detaylı bilgiler Özhan vd. (1995)'ten elde edilebilir.

Şamandıra verileri grafiksel olarak MEDCOAST (Mediterranean Coastal Foundation)'ın internet sitesinden indirilmiştir. Bir aylık şamandıra verisi üç ayrı resim dosyası (jpeg uzantılı) halinde siteye yüklendiğinden, 48 aylık Hopa şamandıra verileri için 144 adet ve 10 aylık Sinop şamandıra verileri için ise 30 adet resim dosyası temin edilmiştir. Ancak, veriler resim dosyası olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle, her birinde belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü gibi üç parametrenin zamansal değişim grafiğini içeren toplam 174 adet resim dosyası, Getdata programı yardımıyla sayısallaştırılmıştır. Bu grafiksel veriler programda sayısallaştırılırken öncelikle koordinat tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra her ölçüm noktası üzerine nokta atılarak sayısallaştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve sayısallaştırılan veriler Microsoft Excel formatında kaydedilmiştir.

Özhan vd. (1995) ve Abdalla vd. (1995)'in çalışmalarında NATO TU-WAVES projesi kapsamında gerçekleştirdikleri dalga tahminleri ile şamandıra ölçümlerinin karşılaştırılmış grafikleri irdelendiğinde, Hopa ve Sinop dalga ölçüm istasyonları için sayısallaştırılan grafiksel verilerde 1 günlük kaymanın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.2 ve 2.3). Bundan dolayı, sayısallaştırılan verilerde düzeltme yoluna gidilmek zorunda kalmıştır. Şekil 2.2'den görülebileceği gibi, 1995 yılı Ocak ayının 26. gününde dalga yüksekliğinin zamansal değişiminin bir pik yapması gerekirken MEDCOAST'tan temin edilen dalga ölçüm grafiklerinde pik 25. günde gerçekleşmiştir. Ayrıca, Sinop şamandıra istasyonuna ait dalga yüksekliğinin zamansal değişim grafiğinde 1994 yılı Kasım ayının 5. gününde pikin gerçekleşmesi gerekirken, MEDCOAST'tan temin edilen grafiksel verilerde bu pikin 6. günde olduğu Şekil 2.3'ten görülmektedir.

Şamandıra istasyonlarına ilişkin sayısallaştırılan ve düzeltilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu verilerinin istatistiği Tablo 2.1'de verilmiştir.

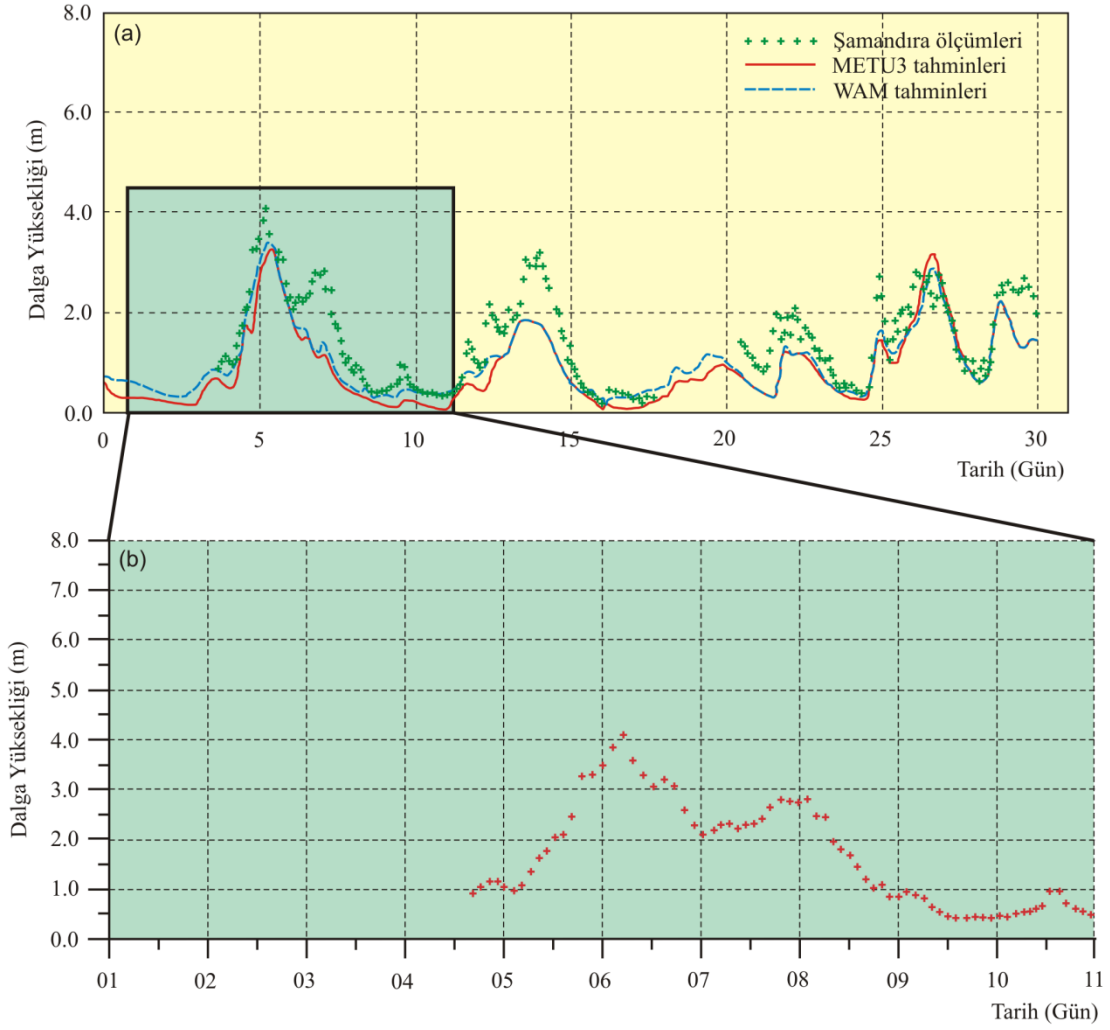




Şekil 2.2. Hopa Şamandıra istasyonu için 1995 Ocak ayı süresince (a) Abdalla vd. (1995) tarafından sunulan grafiksel veri ve (b) MEDCOAST'tan indirilen grafiksel veri

Tablo 2.1. Hopa ve Sinop Şamandıralarında kaydedilmiş belirgin dalga yüksekliliği ve ortalama dalga periyodu verilerinin istatistiği

İstasyon Adı	Yıl	Veri sayısı	Belirgin Dalga Yuksekliliği (m)			Ortalama Dalga Periyodu (s)		
			Min.	Maks.	Ortalama	Min.	Maks.	Ortalama
HOPA	1995	9184	0.034	4.786	0.588	1.889	8.885	3.782
	1996	5567	0.034	4.103	0.589	2.094	8.885	4.037
	1997	1785	0.068	4.239	0.666	1.940	8.732	4.099
	1998	2323	0.034	6.026	0.759	2.043	8.374	4.230
	1999	730	0.034	5.641	0.672	2.196	9.294	4.118
	<b>Tüm yıllar</b>	<b>19589</b>	<b>0.034</b>	<b>6.026</b>	<b>0.655</b>	<b>1.889</b>	<b>9.294</b>	<b>4.053</b>
SİNOP	1994	612	0.205	4.103	1.327	2.655	7.047	4.468
	1995	403	0.137	4.342	0.630	2.196	6.945	3.425
	1996	2546	0.068	5.449	0.823	1.940	7.404	3.804
	<b>Tüm yıllar</b>	<b>3561</b>	<b>0.068</b>	<b>5.449</b>	<b>0.927</b>	<b>1.940</b>	<b>7.404</b>	<b>3.899</b>



Şekil 2.3. Sinop şamandıra istasyonu için 1994 Kasım ayı süresince (a) Özhan vd. (1995) tarafından sunulan grafiksel veri ve (b) MEDCOAST'tan indirilen grafiksel veri

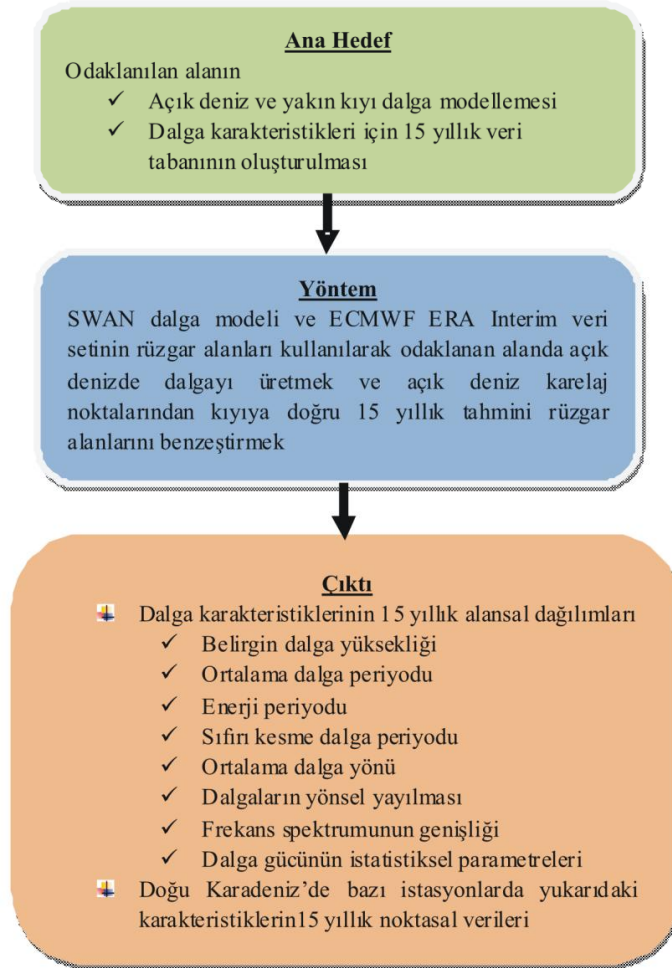
### 2.3. Karadeniz'de Açık Deniz ve Yakın Kıyı Dalga Modellemesi ve Tahmini

Açık deniz ve yakın kıyı dalga modellemesi ve tahminini gerçekleştirebilmek için bu çalışmanın literatür taraması bölümünde belirtildiği gibi pek çok basitleştirilmiş ve sayısal dalga tahmin yöntemi mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri, Türkiye'de ve dünyada dalga tahmini için sıklıkla tercih edilen yöntemler arasından seçilmiştir. Bunların yanında, literatürde sunulan sayısal dalga tahmin yöntemleri arasında; üçüncü nesil dalga tahmin modeli SWAN, son zamanlarda tüm dünyada ilgi odağı olmuş, en gelişmiş dalga tahmin yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem neredeyse tüm yakın kıyı dalga dönüşümlerini ve etkileşimlerini içermektedir. Bunun yanında, son zamanlarda ülkemizde DMİ Genel

Müdürlüğü'nün de ilgi duyduğu bir yöntem haline gelmiştir. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada sayısal dalga benzeşimlerini gerçekleştirmek üzere SWAN modeli kullanılmıştır.

### 2.3.1. SWAN Dalga Tahmin Modelinin Karadeniz'e Uygulanması

Karadeniz'de açık deniz ve yakın kıyı dalga modellemesinin gerçekleştirilmesi ve dalga enerji dönüşüm sistemleri için uygun olan yerlerin bulunması amacıyla, tüm çalışma alanının dalga yüksekliği, periyodu ve gücünün alansal ve miktarsal dağılımlarının detaylı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda; açık deniz ve yakın kıyı dalga modellemesi, SWAN sayısal dalga tahmin modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model, tüm Karadeniz'i kapsamaktadır. Model benzeşiminde girdi verisi olarak ECMWF ERA Interim veri takımının rüzgar alanları kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde izlenen yol Şekil 2.4'te özetlenmektedir.



Şekil 2.4. SWAN modellemesi için izlenen yol

Derin sudan yakın kıyıya doğru dalga ilerlemesini benzeştirmek için, ECMWF ERA Interim veri takımının rüzgar alanlarının sayısal modele tanımlanması gerekmektedir. ECMWF rüzgar alanlarının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Ücretsiz kullanıma sahiptirler.
- ✓ Benzeşim süresi olarak planlanan 15 yıllık dönem boyunca kesintisizdirler (6 saat kayıt aralıklı).
- ✓ Veriler doğrulanmıştır.

Çalışma alanında dalga karakteristiklerinin alansal dağılımları derin denizden kıyıya doğru SWAN dalga modeli kullanılarak dalga üremesi ve ilerlemesi benzeştirilerek sayısallaştırılmıştır. SWAN dalga modelinin bu uygulamayı gerçekleştirebilmesi için ihtiyaç duyulan girdi gereksinimleri aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

### **2.3.1.1. SWAN Model Analizleri İçin Gerekli Girdiler**

SWAN’da dalga benzeşim sürecindeki ilk adım dalga şartlarının modelleneceği hesaplama alanını tanımlamaktır. Hesaplamalı karelaj tanımlandıktan sonra, planlanan analizlerin gerçekleştirilebilmesi için bazı girdilere ihtiyaç duyulmaktadır. Benzeşimlere başlayabilmek için; batimetri dosyasının, rüzgar alanından dalga modellemesi yapılacak ise rüzgar girdi dosyasının, SWAN girdi (swn) dosyasının ve ayrıca gerekli ise sınır şartlarını, dalga alanlarını, başlangıç şartlarını ve akıntı alanlarını içeren dosyaların hazırlanması gerekmektedir. SWAN’ın kullanıcı el kitabı (SWAN, 2008) bu dosyaların hazırlanması hususunda geniş bilgi içermektedir. SWAN yardımıyla model benzeşimi hazırlanan dosyaların SWAN kurulum dosyası ve toplu komut (batch) dosyası ile birlikte aynı klasörde C klasörü içerisinde teşkil edilmesiyle, MS-DOS ortamında SWAN modeli çalıştırılarak yapılmıştır.

#### **2.3.1.1.1. SWAN Benzeşimleri İçin Hesaplama Karelajının Oluşturulması**

Çalışmanın bu aşamasında, tüm Karadeniz’in dalga karakteristiklerinin ve özellikle dalga gücü kaynağının sayısallaştırma aşamalarında kullanılacak karelaj oluşturulmuştur. SWAN benzeşimleri için tüm Karadeniz’i içine alan yaklaşık 1170 x 880 km boyutlarında

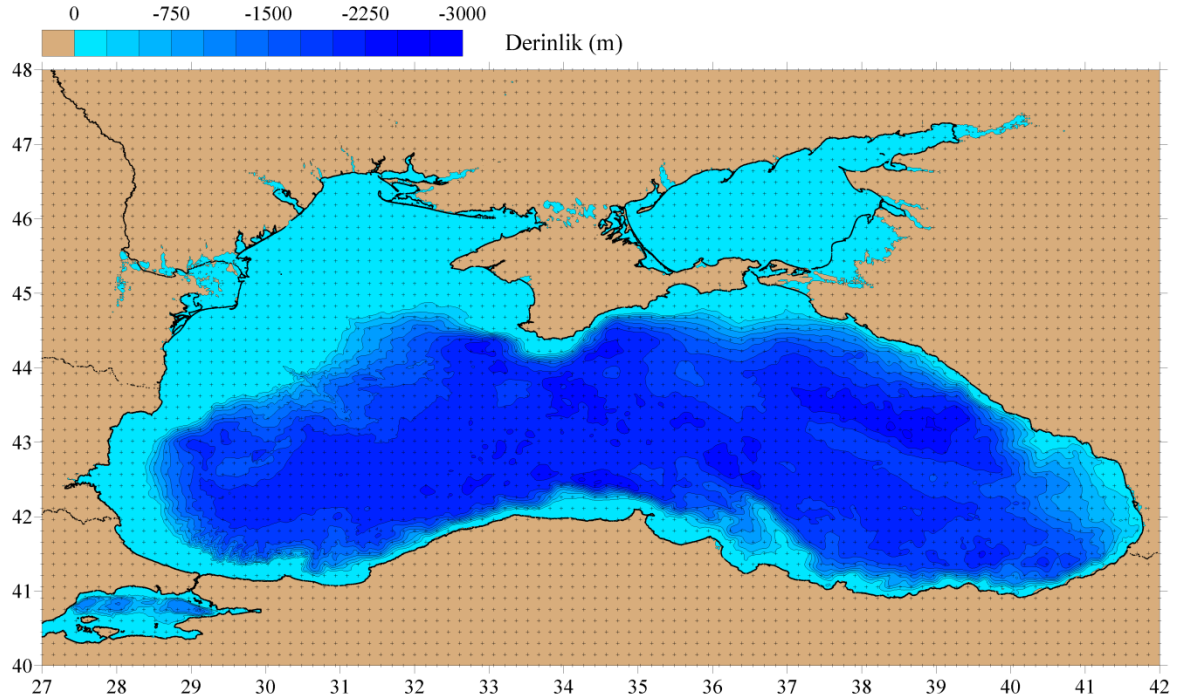
üniform (homojen), dikdörtgen biçimli bir hesaplama karelağı belirlenmiştir. Bu alan, yaklaşık  $8^{\circ}$  enlem ( $40^{\circ}$  K –  $48^{\circ}$  K) ve  $15^{\circ}$  boylamı ( $27^{\circ}$  D –  $42^{\circ}$  D) kapsamaktadır.

x ve y yönlerinde sırasıyla 901 ve 481 karelağ noktasının sınırladığı karelağ çözünürlüğü, yaklaşık 1.3 km ( $0.0167^{\circ}$ ) x 1.83 km ( $0.0167^{\circ}$ )'ye eşit oluşturulmuştur. Toplamda tüm karelağ alanı üzerinde (yaklaşık % 56 sı karada olacak şekilde) 433381 karelağ noktası bulunmaktadır. Seçilen çözünürlük, incelenen literatüre göre açık deniz dalga enerji transferi için yeterli görülmüştür, ancak sığ sularda (yaklaşık 50 m den daha az derin sularda) bu yaklaşım biraz kaba kalmaktadır. Bu çalışmanın maksadı için, ana ilgi alanı derin denizden 50 m'lik bir derinliğe kadar olduğundan dolayı projenin hedefinin gerçekleştirilebilmesi için seçilen karelağ alanlamasının yeterli olduğu düşünülmektedir.

Hesaplamalı karelağın belirlenmesinden sonraki adım, diğer temel SWAN girdi parametrelerinin hazırlanmasıdır. Bunlar aşağıda sıralanan adımları içermektedir;

- Tanımlanan hesaplamalı karelağ içerisinde deniz dibinin bir batimetri dosyası
- Tanımlanan alanı kapsayan rüzgar veri dosyası
- Eğer varsa hesaplamalı karelağın sınırları üzerinde sınır şartları

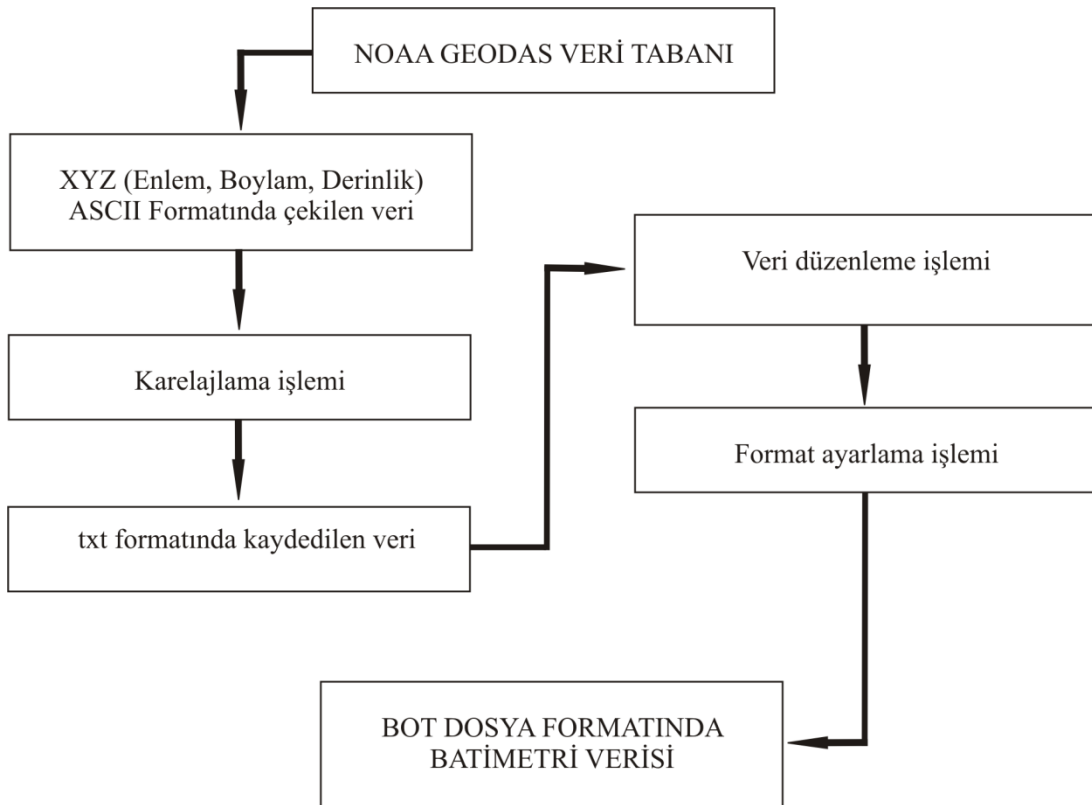
Tüm Karadeniz'i kapsayan hesaplamalı karelağ alanının deniz dibi derinlik konturları ile birlikte gösterimi, Şekil 2.5'te görülmektedir.



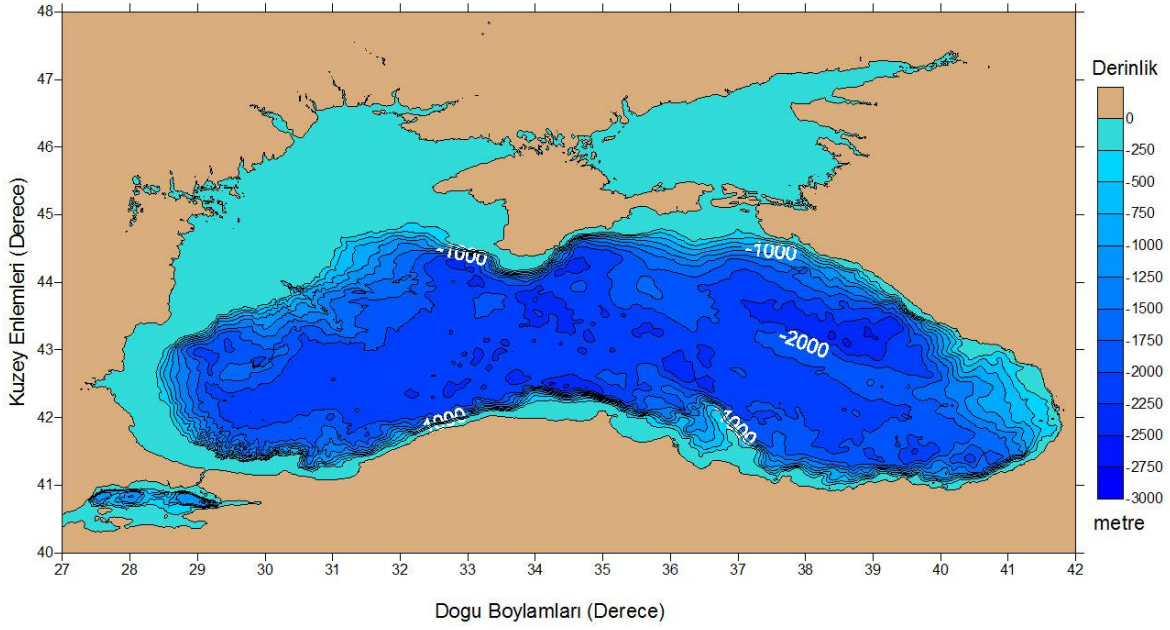
Şekil 2.5. Deniz dibi derinlik konturları ile ilgili SWAN modelin karelağ alanlaması

### 2.3.1.1.2. Batimetri Veri Dosyasının Hazırlanması

Bu çalışmada, öncelikle tüm Karadeniz'i kapsayan ECMWF rüzgar alanları ve Karadeniz'in batimetrisi kullanılarak SWAN yardımıyla dalga modellemesi ve benzeştirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla, SWAN'da kullanılacak girdi dosyaları analiz yapılacak formatta düzenlenmiştir. SWAN'da dalga benzeşimi yapılabilmesi için üç adet girdi dosyasının hazırlanması gerekmektedir. Bu girdi dosyaları; Karadeniz batimetrisi, ECMWF rüzgar alanları ve swn dosyasıdır. Karadeniz'in batimetri verisi NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)'dan temin edilmiştir. NOAA'nın internet sitesinden girilen ilgi alanı koordinatlarına göre batimetri verisi XYZ (Lon, Lat, Depth) ASCII formatında indirilebilmektedir. NOAA'dan  $0.0167^{\circ} \times 0.0167^{\circ}$  alansal çözünürlükte temin edilen bu veri, bir yazılım yardımıyla okutularak karelajlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Karelajlanan veri, metin dosyası formatında kaydedilmiştir. Microsoft Excel'e atılan bu veri, düzenlendikten sonra son işlem olarak SWAN'da kullanılabilir duruma getirilebilmesi için bot uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir. Batimetri veri dosyasının dönüştürülme işlem sırası, Şekil 2.6'da ve işlenmiş son hali ise Şekil 2.7'de görülmektedir.



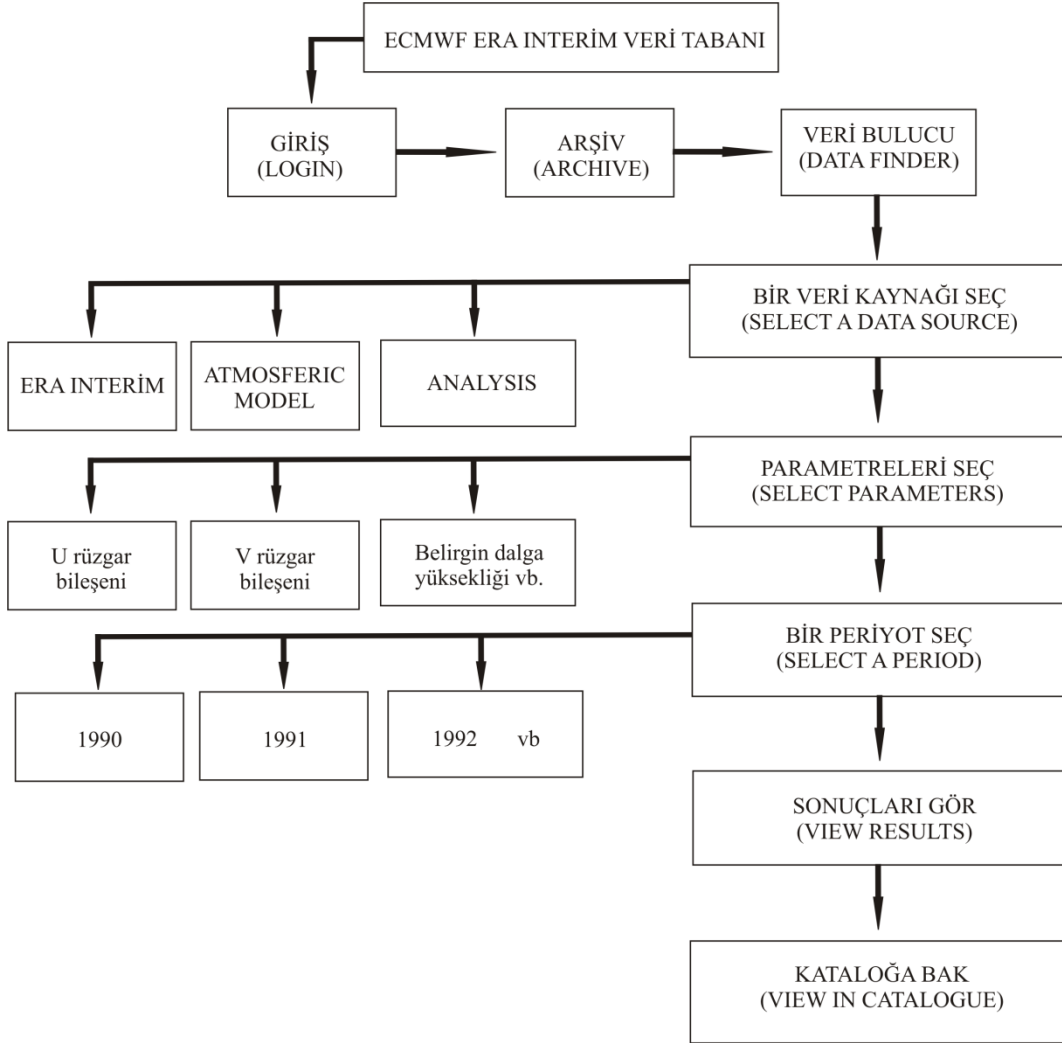
Şekil 2.6. Batimetri veri dosyası dönüşüm süreci



Şekil 2.7. Tüm Karadeniz'in batimetri haritası

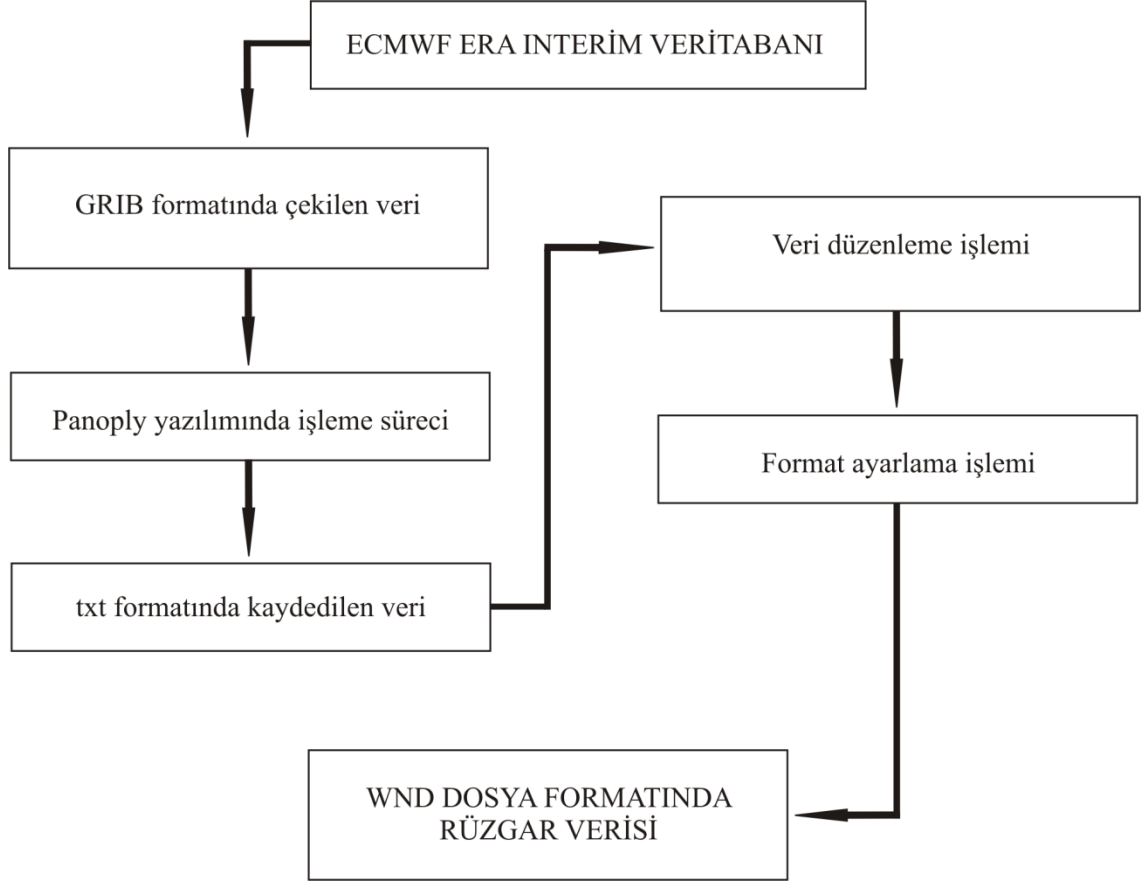
### 2.3.1.1.3. Rüzgar Veri Dosyasının Hazırlanması

Analizlerde rüzgar girdi verisi olarak ECMWF'nin ERA Interim veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanından istenilen özellikteki veriler, Şekil 2.8'deki adımlar takip edilerek grib formatında temin edilmiştir. Grib formatındaki veriler, NASA'nın internet sitesinden ücretsiz olarak temin edilen bir yazılım (PanoplyWin) programı ile okutulmuştur. Bu yazılım yardımıyla okunan veriler metin dosyası formatında kaydedilmiş ve Microsoft Excel'e aktarılarak burada gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Daha sonra veriler, SWAN'ın algılayabileceği formatta ve düzende wnd uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir. Rüzgar veri dosyasının dönüştürülme işlem sırası, Şekil 2.9'da ve analize sokulan rüzgar verisinin grafiksel gösterimi ise Şekil 2.10'da görülmektedir.

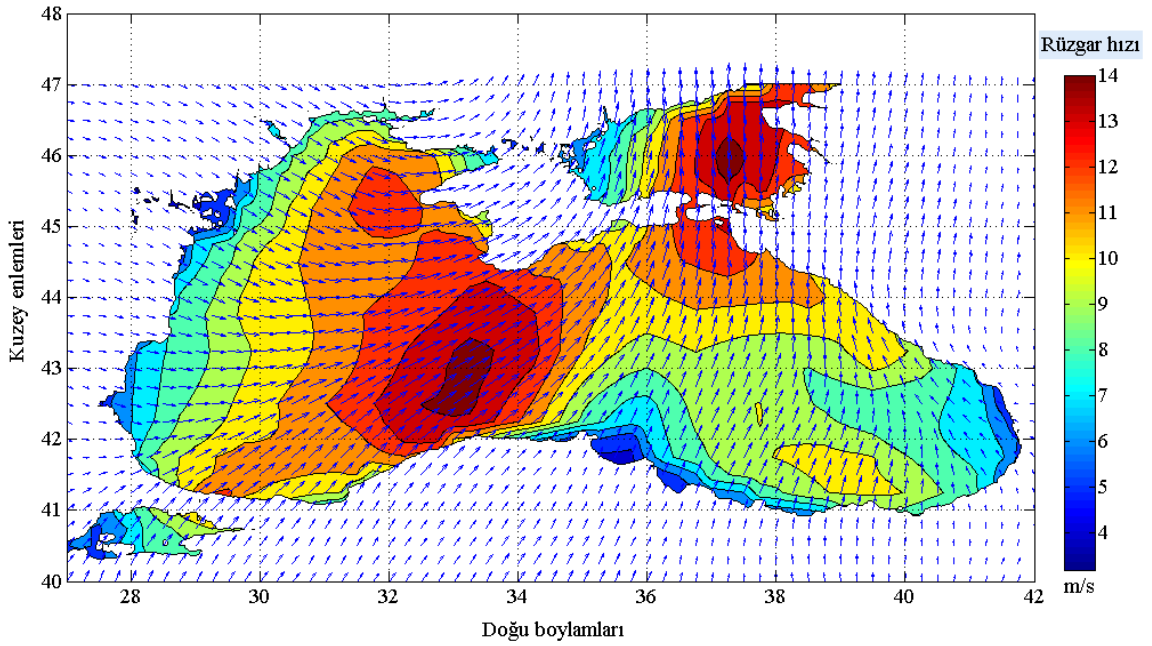


Şekil 2.8. ECMWF ERA Interim veri tabanından rüzgar verisi temini için izlenen yol





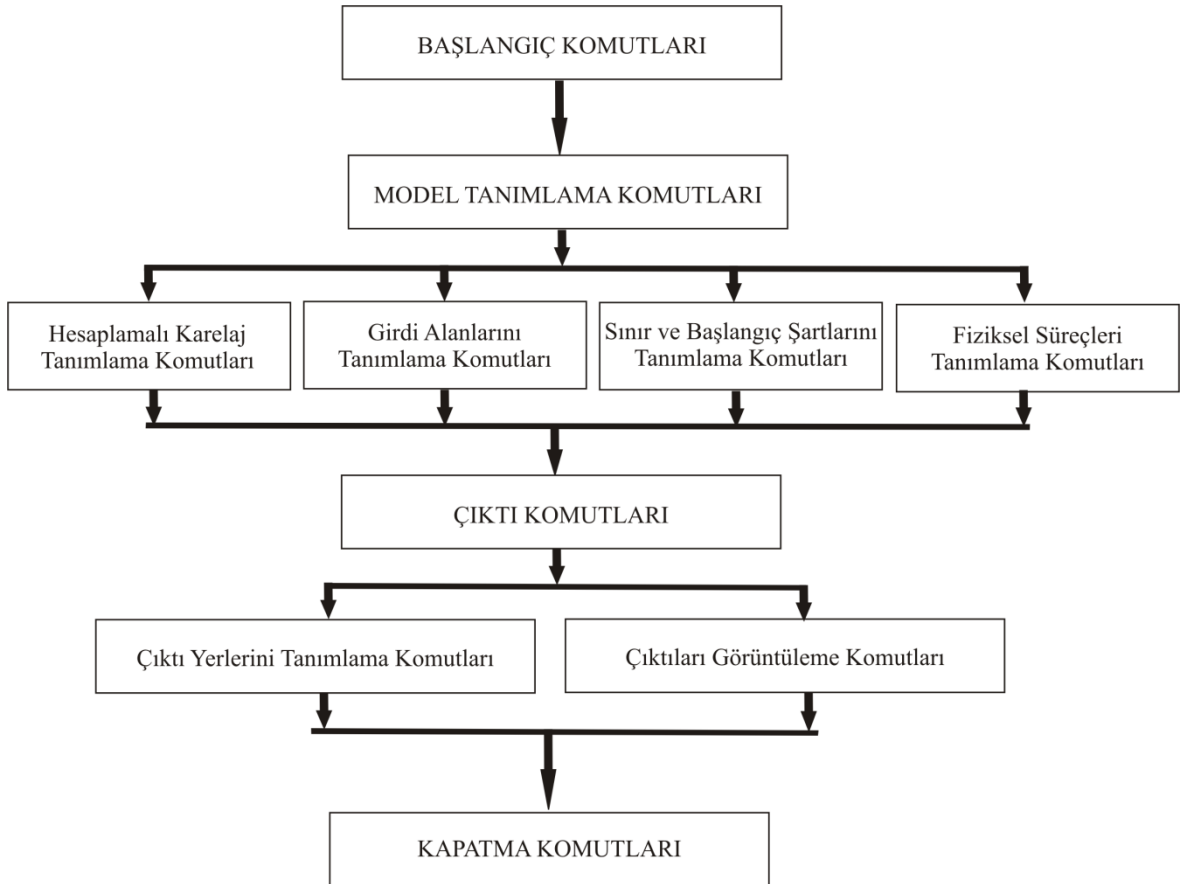
Şekil 2.9. ECMWF ERA Interim veri dosyası dönüşüm süreci



Şekil 2.10. 1995 yılı Ocak ayının 1. günündeki ilk kayıt için ECMWF ERA Interim veri tabanından temin edilen tahmini rüzgar alanı

### 2.3.1.1.4. SWAN Girdi Dosyasının (Swn Dosyası) Hazırlanması

Swn dosyası, SWAN’da dalga benzeşimi yapabilmek için gerekli en önemli girdi dosyasıdır. SWAN benzeşimi için gerekli bu girdi dosyasının hazırlanmasında dikkat edilmesi gereken hususlara ilişkin detaylı bilgiler, SWAN kullanıcı el kitabı (SWAN, 2008)’nda bulunmaktadır. SWAN girdi dosyası, Şekil 2.11’den de görülebileceği gibi birkaç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak başlangıç komutları girilmiş ve sonrasında model tanımlanması yani sırasıyla hesaplamalı karelej alanının ve girdi alanlarının (batimetri, rüzgar alanı, dalga alanı ve akıntı alanı) tanımlanması yapılmıştır. Bunların yanında, sınır şartları ve dalga ilerlemesi ve dönüşümündeki fiziksel süreçler de tanımlanmaktadır. Ancak, bu çalışmada, seçilen karelej alanının herhangi bir deniz sınırına sahip olmamasından ve tüm sınırların kara ile bütünleşmesinden dolayı sınır şartı tanımlamasına gerek olmamıştır. Son basamak olarak düşünülebilecek aşamada ise çıktı alanları veya noktaları tanımlanmış ve aynı zamanda istenilen çıktılar girilmiştir.



Şekil 2.11. Bir swn dosyasının oluşturulma aşamaları

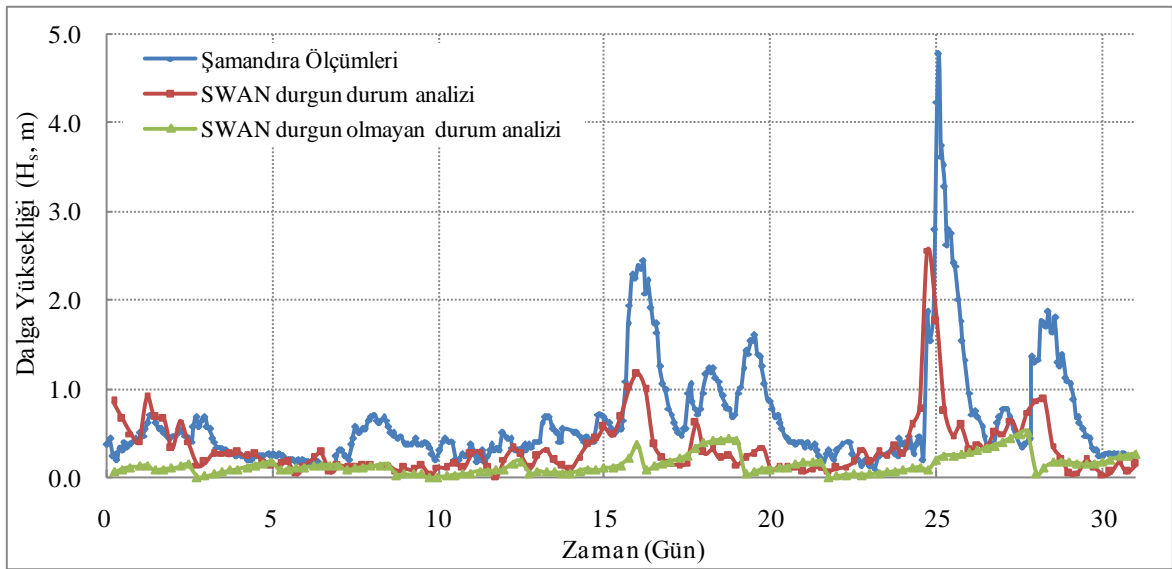
Swan dosyaları durgun ve durgun olmayan durumlar için iki farklı şekilde oluşturulabilmektedir. Durgun durum analizlerinde her benzeşim tek bir rüzgar alanı için gerçekleştirilmekte iken durgun olmayan durum analizleri zamana bağlı değişimleri kapsadığından birkaç rüzgar alanını tek seferde içerecek şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada hangi deniz durumuna göre dalga benzeşimlerinin yapılması gerektiğine ilişkin bir sonraki bölümde bir duyarlılık analizi yapılmış ve bu duyarlılık analizi sonuçlarına dayanarak çalışmada swan dosyaları durgun durum analizine göre düzenlenmiştir.

### **2.3.1.2. SWAN'da Durgun ve Durgun Olmayan Durum Analizleri İçin Duyarlılık Analizi**

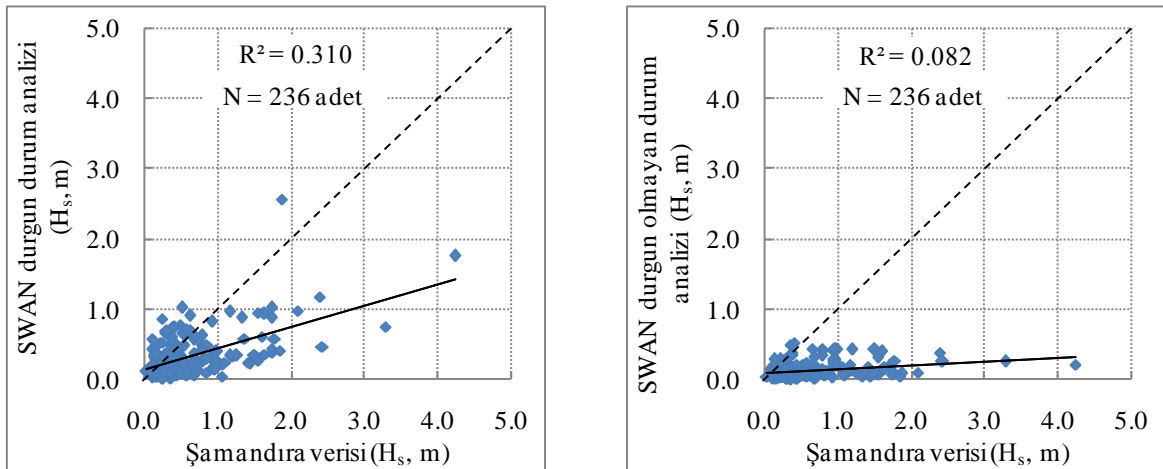
On beş yıllık veri benzeşim sürecine başlamadan önce, Bölüm 1.8.3'te detaylı izah edilen durgun ve durgun olmayan durumlar için iki aylık periyodu kapsayacak şekilde bu iki durumun kıyaslaması için bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. 1995 yılının Ocak ve Şubat ayları için hem durgun hem de durgun olmayan duruma göre SWAN analizleri yapılmış ve Hopa şamandıra istasyonuna karşılık gelen karelij noktasındaki tahmini dalga karakteristiklerinin zamansal değişimleri ile saçılım diyagramları oluşturularak kıyaslanmıştır (Şekil 2.12 ve 2.13). Bu şekillerden zamansal değişim grafiği incelendiğinde, normal şartlarda durgun olmayan durum için gerçekleştirilen analizlerin daha doğru sonuçlar vermesi beklenirken durgun durum analizleri bu halleriyle durgun olmayan durum analizlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Durgun durum analizleri ölçülmüş dalga kaydında gözlenen pikleri ve çukurları durgun olmayan durum analizlerine göre belirgin bir şekilde daha iyi tahmin etmiş ve ölçülmüş zamansal dalga kaydına daha yakın sonuçlar vermiştir. Bu durumun çıktı olarak istenen dalga karakteristiklerinin zaman aralığının (çözünürlüğünün) 6 saat olmasından kaynaklandığı, bunun yanında daha düşük zaman aralığında (örneğin 10 dakika) veri benzeşiminin gerçekleştirilmesi durumunda durgun olmayan durum analizlerinin iyileşeceği tahmin edilmektedir.

Tahmini dalga verileri ile Hopa şamandıra istasyonunda ölçülen dalga verilerinin zamansal çözünürlükleri farklıdır. Özellikle şamandıra ölçüm verilerinin zamansal olarak bir sürekliliğinden söz etmek mümkün değildir ve bu veriler kesikli kayıtlar şeklindedir. Bu nedenle, tahmini ve ölçülmüş verilerin eşzamanlı değerlerinin de irdelenmesinin yol gösterici sonuçlar verebileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı, tahmini dalga parametreleri ile ölçülmüş veriler geliştirilen bir karşılaştırma kodu kullanılarak eşzamanlı kayıtlar elde edilmiştir. Bu karşılaştırma işlemi için, kullanılan programın hesap alanında şamandıra

ölçümünün zamanı, dalga karakteristiği ve tahmini dalga karakteristiklerinin zamanı için ayrı ayrı dosyalar oluşturulmuş ve kod çalıştırılmıştır. Sonuçta, eşzamanlı olan ölçülmüş ve tahmin edilmiş dalga karakteristikleri elde edilmiştir. Durgun ve durgun olmayan durum analizlerinden elde edilen dalga karakteristiklerinin tahmini verileri ile eşzamanlı ölçüm kayıtlarının saçılım diyagramları Şekil 2.13'te sunulmuştur. Bu saçılım diyagramlarından da durgun durum analiz sonuçlarının durgun olmayan durum analiz sonuçlarına göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, 15 yıllık süre için gerçekleştirilmesi planlanan açık deniz ve yakın kıyı dalga modellemesi durgun durum için yapılmıştır.



Şekil 2.12. Durgun ve durgun olmayan durumlar için SWAN analizlerinin tahmini dalga karakteristiklerinin zamansal değişimlerinin kıyaslanması (1995 yılı Ocak ayı için)



Şekil 2.13. Durgun ve durgun olmayan durumlar için SWAN analizlerinin tahmini dalga karakteristiklerinin saçılım diyagramlarının kıyaslanması (1995 yılı Ocak ve Şubat ayları için)

### 2.3.1.3. Benzeşim Süreci

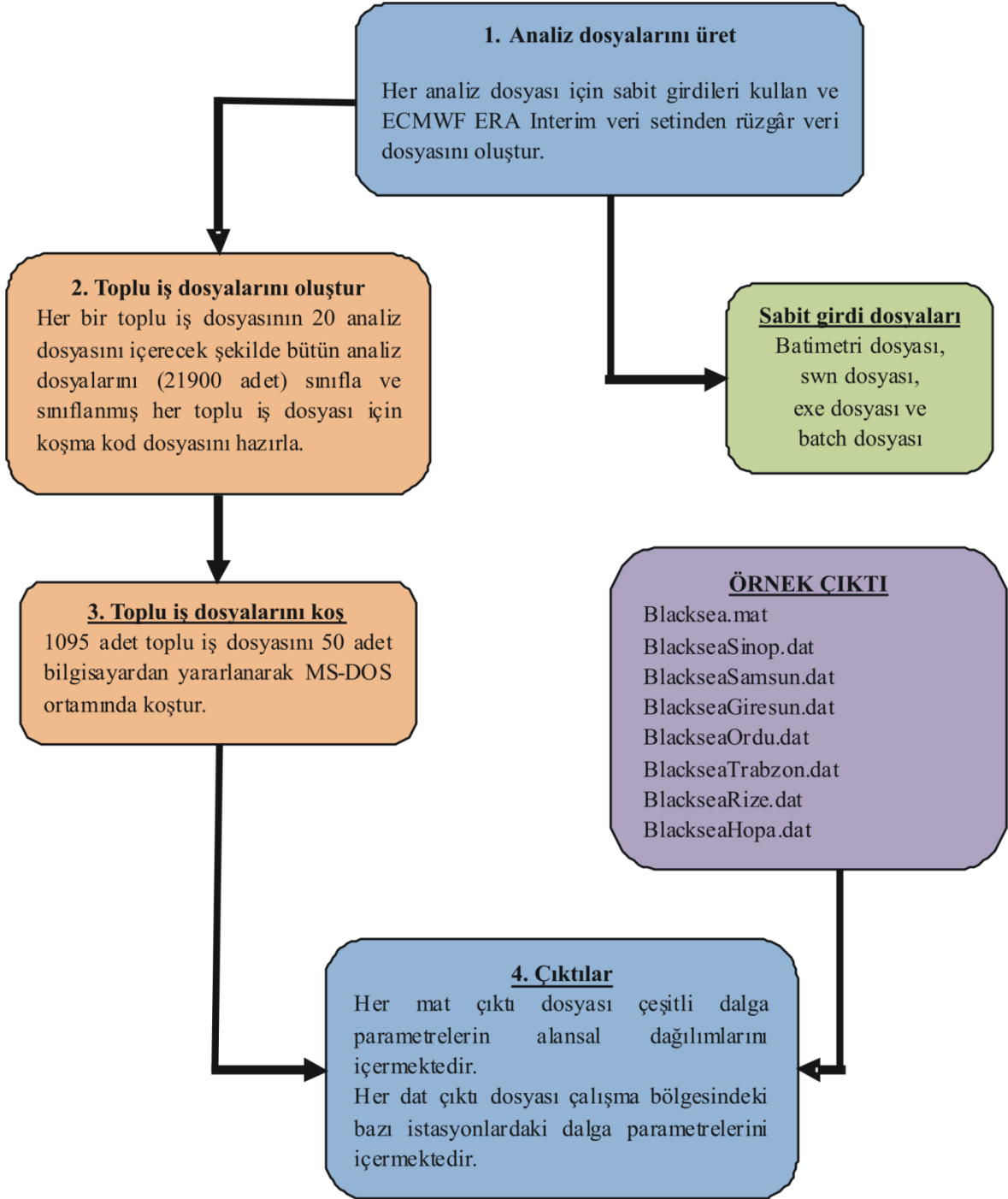
Dalga benzeşiminde deniz durumuna karar verdikten sonra, durgun durum analizleri için analiz dosyalarının hazırlanması gerekmektedir. 15 yıllık süreyi kapsayacak şekilde her kayıt için olacak şekilde toplamda 21900 adet analiz dosyası hazırlanmıştır. Her bir analiz dosyası aşağıda sıralanan dosyaları içermektedir:

- ✓ Batimetri dosyası
- ✓ Rüzgar veri dosyası
- ✓ SWAN girdi (swn) dosyası
- ✓ SWAN kurulum (exe) dosyası
- ✓ Toplu komut (batch) dosyası.

Bu dosyalardan rüzgar veri dosyası haricindeki diğer dosyalar her analiz dosyasında sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Yalnızca, rüzgar veri girdi dosyası her analiz dosyasında farklı değerlere sahiptir. Analiz dosyaları hazırlandıktan sonra, analizler Gümüşhane Üniversitesi Ümit Uzman Bilgisayar Salonu'nda her biri 2.93 GHz işlemcili toplam 50 bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. 6 saatlik bir rüzgar kaydı için her analiz dosyası için SWAN modelin ihtiyaç duyduğu toplam koşma süresi yaklaşık 30 dakikadır ve her analizin koşmasının bitmesinden sonra diğer analiz dosyasının tekrardan koşturulması gerekmektedir. Bu işlem çok uzun bir süreç olduğundan dolayı yaklaşık 20 analiz dosyasını tek seferde koşturacak toplu iş dosyaları hazırlanmış ve analizler bu toplu iş dosyaları (toplam 1080 adet) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu benzeşim süreci Şekil 2.14'te ana hatlarıyla ifade edilmiştir.

### 2.3.1.4. SWAN Benzeşim Modelinin Çıktıları

SWAN benzeşimlerinden istatistiksel çıktıların elde edilmesinin amacı farklı tipteki dalga enerji dönüşüm teknolojileri için çalışma alanında uygun kıyı alanlarının belirlenmesini sağlamaktır. Batimetrik kontur haritasıyla bağlantılı olarak istatistiksel çıktıların kullanımı, dalga çiftliği geliştiren kişi, firma veya ülkeler için belirli tipteki dalga enerji dönüştürücülerine bağlı olarak uygun su derinlikli alanların bulunmasını sağlamaktır. Seçilen bir alanda bir dalga enerji dönüştürücüsünün dalga gücü kapasitesi, bu çalışmanın istatistiksel dalga gücü çıktısından belirlenebilir. Bu sürecin tam tersi olarak, yüksek dalga güçlü alanların belirlenmesi de mümkündür.



Şekil 2.14. Toplu İş Dosyası Üretimi ve Benzeşim Süreci

Şekil 2.14'ün son çıktısı 15 yıllık dalga modellemesinin tümü düşünüldüğünde yaklaşık 500 GB'lık büyük miktarda üretilen veri tabanından arzu edilen istatistiksel parametreleri çıkarmak ve yönetebilmek için geniş bir programlama sürecine gerek duyulmuştur. Bundan dolayı, veri tabanının oluşturulmasından sonraki süreçte kodlamanın yapılabilmesi için bilgisayar programlaması yapılmıştır.

Her bir analiz çıktısında iki türde sonuç dosyası mevcuttur. Bu çıktı dosyalarından ilki, her bir parametrenin alansal değişimini içeren Blacksea.mat dosyası, ikincisi ise dat uzantılı noktasal verilerdir. İstatistiksel parametreler yardımıyla çalışılan alanda dalga gücü kaynağının alansal olarak sayısallaştırılması için oluşturulan bu veri tabanından; aylık, mevsimlik ve yıllık ortalama değer çıkartılmıştır. Veri miktarının çok büyük kapasitede olmasından dolayı mat uzantılı dosyalardan istenilen parametrenin aylık ortalamalarını veren bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program yardımıyla herhangi bir dalga parametresi için, örneğin dalga gücü, her ayın ortalama değerleri elde edilmiştir. İkinci türdeki dosyaların kullanılabilir olması için ise, her bir dalga parametresinin 15 yıllık zamansal değişimlerini verecek şekilde ayrı bir program daha yazılmıştır. Bu program yardımıyla oluşturulan veri tabanından, örneğin Hopa noktasında belirgin dalga yüksekliğinin 15 yıllık zamansal değişim değerleri çıkartılmıştır. Bu noktasal veriler yardımıyla Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyı şeridi boyunca yedi noktada dalga gücünün üç istatistiksel parametresi (ortalama, %90 ve %5 aşılma ihtimalli değer) değerlendirilmiştir. Bu parametreler tahmini ortalama dalga şartlarını, en düşük alt limit güç seviyelerini ve ekstrem şartları tanımlamaktadır. İstatistiksel parametreler aylık ve yıllık olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanı için bu araştırmadan elde edilen çıktı verileri kapsamlıdır. 15 yıllık tahmini verilerden aşağıdaki ortalama dalga gücü alansal dağılımı haritaları türetilmiştir.

- Ortalama aylık (yani 15 yıl boyunca ocak aylarının ortalaması vb.)
- Mevsimlik (15 yıl boyunca sonbahar mevsimlerinin ortalaması vb.)
- Ortalama yıllık (bütün 15 yıllık verinin ortalaması)

### **2.3.2. Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Karadeniz'e Uygulanması**

Karadeniz için gerçekleştirilecek dalga modellemesinde kullanılacak iki rüzgar veri kaynağının performanslarını değerlendirmek ve SWAN spektral dalga tahmin modelinin analiz sonuçları ile kıyaslama yapabilmek amacıyla basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri de Karadeniz'e uyarlanmıştır. Bunun için, Hopa ve Sinop şamandıralarındaki dalga ölçüm periyodu boyunca hem DMİ hem de ECMWF'nin rüzgar veri takımları kullanılarak belirgin dalga yüksekliği ( $H_s$ ) ve ortalama dalga periyodu ( $T_z$ ) tahmin edilmiştir. Bu işlem dört ayrı basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi seçilerek yapılmıştır. Yöntemler, her iki veri kaynağı kullanılarak Hopa ve Sinop istasyon verilerine

uygulanmıştır. Öncelikle, ECMWF verileri bileşke rüzgar hızının bileşenlerine sahip olduğundan, bu bileşenler yardımıyla her kaydın bileşke rüzgar hızları ve yönleri belirlenmiştir. Daha sonra, hem ECMWF hem de DMİ rüzgar kayıtları için kaydedilmiş her rüzgar yönü için efektif feç mesafeleri, Bölüm 1.6.2.2’de belirtildiği gibi hesaplanmıştır. Her iki veri kaynağının rüzgar kayıtlarında Bölüm 1.6.2.3’te izah edildiği gibi, fırtına belirleme yöntemindeki yön değişiminin  $15^\circ$  ve rüzgar hız değişiminin 2.5 m/s olacağı kabulüne göre oluşan fırtınalar belirlenmiştir. En son aşama olarak ise, her iki veri kaynağı için belirlenen her fırtınanın ortalama rüzgar hızları, yönleri, efektif feç mesafeleri ve fırtına süreleri kullanılarak bütün basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri, Bölüm 1.7.1’de belirtildiği gibi ECMWF ve DMİ verilerine uygulanmıştır.

Basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri ile tahmin edilen dalga karakteristiklerinin zamansal değişimleri, uygun bir değerlendirme yapma imkanı vermediğinden, ölçülen dalga karakteristikleri ile eşzamanlı tahmini dalga verilerinin karşılaştırılması kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda, geliştirilen karşılaştırma kodu kullanılarak eşzamanlı kayıtlar elde edilmiştir. Eşzamanlı tahmin edilmiş ve ölçülmüş dalga karakteristikleri, hem dalga tahmin yöntemlerinin hem de rüzgar veri kaynaklarının performanslarını değerlendirebilmek için kıyaslanmıştır. Dalga tahmin yöntemlerinin miktarsal kıyaslaması için bias parametresi, saçılım indeksi (SI), hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMS hatası), ortalama mutlak hata (MAE), korelasyon katsayısı (R) ve belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) kullanılmıştır. Bu istatistiksel hata parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir;

$$\text{bias} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} (P_i - O_i) \quad (2.1)$$

$$\text{SI} = \frac{\text{RMS Hatası}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (2.2)$$

$$\text{RMS Hatası} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (2.3)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (2.4)$$



$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2\right)\left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2\right)}} \quad (2.5)$$

Tablo 2.2 ve 2.3, sırasıyla Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu tahmininde basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin ve veri kaynaklarının hata istatistiklerini vermektedir. Sonuçlar her ne kadar Wilson yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi olduğunu gösterse de, oluşturulan bu modellerin her iki veri kaynağının kullanılması durumunda bile dalga parametrelerini yeterince doğru tahmin etmediği görülmektedir. Bu durum, veri kaynaklarının doğruluğunun düşük olmasından, dalga parametreleri tahmin edilirken kullanılan fırtına belirleme yönteminin hatalı olmasından, modellerin Karadeniz için uygun olmamasından vb. nedenlerden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 2.2. Hopa şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin hata istatistiği

Veri kaynağı - Tahmin yöntemi	Çakıştırılan veri sayısı	bias	SI	RMS Hatası	MAE	R	R <sup>2</sup>
Belirgin Dalga Yüksekliği (m)							
DMİ – Jonswap	1083 adet (12 ay)	-0.500	1.212	0.782	0.516	0.295	0.087
DMİ – CEM		-0.525	1.240	0.801	0.535	0.279	0.078
DMİ – SPM		-0.473	1.177	0.760	0.503	0.322	0.104
DMİ – Wilson		-0.489	1.180	0.762	0.501	0.389	0.151
ECMWF – Jonswap	690 adet (12 ay)	-0.401	1.188	0.640	0.424	0.322	0.104
ECMWF – CEM		-0.421	1.212	0.653	0.435	0.322	0.104
ECMWF – SPM		-0.395	1.178	0.634	0.424	0.334	0.112
ECMWF – Wilson		-0.451	1.246	0.670	0.454	0.399	0.159
Ortalama Dalga Periyodu (s)							
DMİ – Jonswap	1083 adet (12 ay)	-2.486	0.735	2.847	2.533	0.014	0.000
DMİ – CEM		-2.806	0.791	3.062	2.810	0.021	0.000
DMİ – SPM		-2.212	0.680	2.633	2.298	0.033	0.001
DMİ – Wilson		-2.513	0.723	2.800	2.522	0.079	0.006
ECMWF – Jonswap	690 adet (12 ay)	-2.115	0.708	2.650	2.332	0.114	0.013
ECMWF – CEM		-2.535	0.757	2.836	2.555	0.120	0.014
ECMWF – SPM		-1.989	0.674	2.525	2.196	0.124	0.015
ECMWF – Wilson		-2.658	0.774	2.898	2.659	0.163	0.026

Bu bölümde gerçekleştirilen dalga tahminleri tatmin edici sonuçlar üretememiştir. Bu nedenle, fırtınaların oluşmasında sınırlayıcı rol üstlendiği tespit edilen fırtına süresinin belirlenmesinde en uygun rüzgar yön değişim açısının değişik değerleri için analiz yapılmasına karar verilmiştir. Ancak, her hangi bir noktadaki zamansal rüzgar kaydından

yola çıkılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde, yön değişim açısı ve rüzgar hız değişimine göre fırtınaların çıkartılması uzun bir zaman almaktadır. Bundan dolayı, kayıt zamanı, rüzgar yönü, feç mesafesi ve rüzgar hızından oluşan veri dosyasından istenilen yön değişim açısı ve rüzgar hız değişimine göre fırtınaları ayıklayabilen bir program hazırlanmıştır. Geliştirilen fırtına belirleme programı yardımıyla dalga tahminlerinin yapılabilmesi için ihtiyaç duyulan fırtına süreleri belirlenmektedir. Bu programdaki kodlama ile büyük bir zaman kazancı sağlandıktan sonra, bir sonraki bölümde fırtına belirleme yönteminde en uygun rüzgar yön değişim açısının belirlenerek yön değişim açısı için bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.3. Sinop şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin hata istatistiği

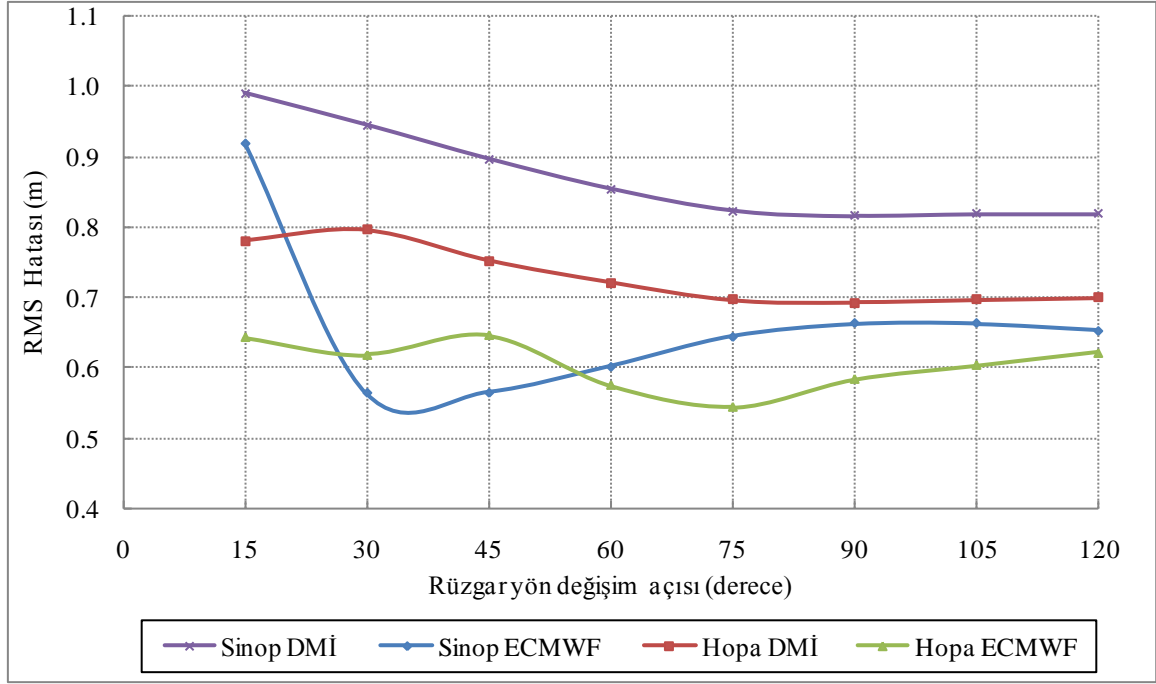
Veri kaynağı - Tahmin yöntemi	Çakıştırılan veri sayısı	bias	SI	RMS Hatası	MAE	R	R <sup>2</sup>
Belirgin Dalga Yüksekliği (m)							
DMİ – Jonswap	461 adet (10 ay)	-0.491	0.903	0.991	0.704	0.285	0.081
DMİ – CEM		-0.550	0.937	1.023	0.742	0.272	0.074
DMİ – SPM		-0.263	0.962	1.056	0.718	0.317	0.100
DMİ – Wilson		-0.479	0.837	0.919	0.645	0.370	0.137
ECMWF – Jonswap	426 adet (10 ay)	-0.496	1.054	0.956	0.580	0.304	0.092
ECMWF – CEM		-0.552	1.072	0.973	0.605	0.335	0.112
ECMWF – SPM		-0.409	1.048	0.951	0.575	0.293	0.086
ECMWF - Wilson		-0.625	1.125	1.021	0.650	0.308	0.095
Ortalama Dalga Periyodu (s)							
DMİ – Jonswap	461 adet (10 ay)	-0.842	0.562	2.289	1.881	0.111	0.012
DMİ – CEM		-1.787	0.567	2.307	2.045	0.106	0.011
DMİ – SPM		-0.386	0.522	2.123	1.701	0.133	0.018
DMİ – Wilson		-1.283	0.464	1.888	1.622	0.193	0.037
ECMWF – Jonswap	426 adet (10 ay)	-0.769	0.534	2.085	1.721	0.070	0.005
ECMWF – CEM		-1.715	0.552	2.152	1.847	0.085	0.007
ECMWF – SPM		-0.521	0.519	2.026	1.622	0.079	0.006
ECMWF - Wilson		-1.882	0.574	2.239	1.937	0.078	0.006

### 2.3.2.1. Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Uygulanmasında Yön Değişim Açısı Etkisinin İrdelenmesi

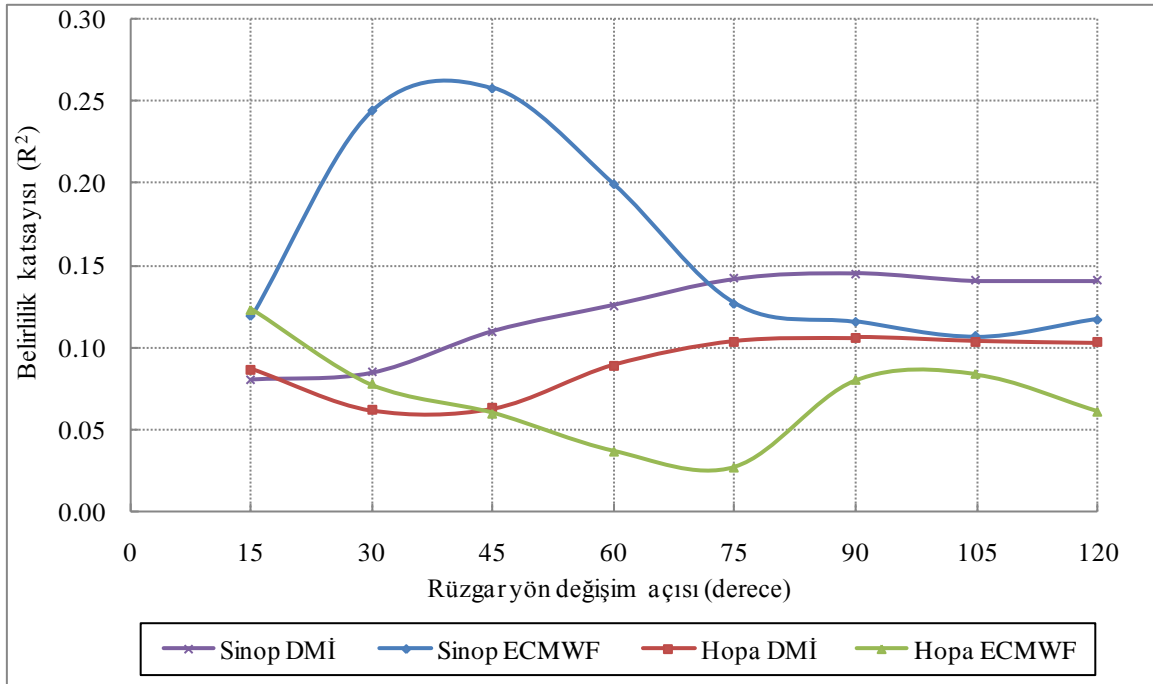
Dalga tahmin yöntemlerinin uygulamasında fırtına belirleme yöntemini sınırlayan iki kriter mevcuttur. Bunlardan biri rüzgarın doğrultusunun değişmesidir. Rüzgar doğrultusunun belirli bir değerden (15°, 30°, 45°, 90° gibi) daha az yön değiştirmesi durumunda fırtınanın devam ettiği, verilen kriterden daha fazla yön değiştirmesi durumunda ise o fırtınanın sona erdiği ve yeni bir fırtınanın başladığı kabulüne

dayanmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise, rüzgar hızındaki değişimdir. Rüzgar hızındaki değişimin belirli bir değerden (2.5 m/s gibi) daha az olması durumunda fırtınanın devam ettiği kabul edilmektedir (Şahin vd., 2007). Veri kayıtlarının irdelenmesi sonucunda, rüzgar hızındaki değişimin rüzgar yönündeki değişimden çok daha düşük olmasından dolayı, fırtına belirleme yönteminde rüzgar yön değişim açısı etkisinin irdelenmesine karar verilmiştir. Her istasyon için farklı kritik yön değişim açıları baz alınarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinin dalga şamandıra verileri ile kıyaslanması sonucunda en uygun rüzgar yön değişim açıları tespit edilmiştir. Daha sonra, belirlenen bu yön değişim açılara göre dalga tahmin yöntemlerinin tekrar uygulanmasıyla, en doğru basitleştirilmiş dalga tahmin modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, fırtına sürelerinin belirlenebilmesi için kritik rüzgar yönü değişim açısı değeri olarak 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105° ve 120° olmak üzere sekiz farklı değer belirlenmiştir. Her bir yön için iki farklı rüzgar veri kaynağı ve iki farklı istasyon seçilerek geliştirilen fırtına belirleme programı yardımıyla fırtına süreleri tespit edilmiştir. Dalga karakteristiklerinin tahminleri için ise, son zamanlarda en çok kullanılan basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi olmasından dolayı, yalnızca JONSWAP yöntemi kullanılmıştır. Tahminler, Hopa şamandıra istasyonu için 1995 (tüm aylar) yılını ve Sinop şamandıra istasyonu için 1994 (Kasım ve Aralık ayları), 1995 (Kasım ve Aralık ayları) ve 1996 (Ocak - Haziran ayları) yıllarını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tahminler yapıldıktan sonra, uygun kıyaslanmanın yapılabilmesi için, her bir yön değişim açısı için gerçekleştirilen dalga tahminleri ile şamandıra dalga ölçümlerinin eşzamanlı kayıtları geliştirilen karşılaştırma kodu yardımıyla elde edilmiştir. En iyi kritik rüzgar yönü değişim açısı değerinin belirlenmesi için, her bir rüzgar yön değişim açısı ve Jonswap dalga tahmin yöntemi kullanılarak dalga yükseklikleri belirlenmiş ve tahminler ile dalga ölçümleri arasındaki korelasyonlar ve RMS hataları tespit edilmiştir. Sonuçta, her bir rüzgar yön değişim açısı için elde edilen korelasyon ve hatalar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.15 ve 2.16'da farklı rüzgar yönü değişimleri için iki istasyonda iki farklı rüzgar veri kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen tahmini belirgin dalga yüksekliğine ilişkin RMS hata değerlerinin ve belirlilik katsayılarının değişimleri görülmektedir.



Şekil 2.15. Farklı fırtına yönü değişimleri için farklı istasyonlarda tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin RMS hatalarının karşılaştırılması



Şekil 2.16. Farklı fırtına yönü değişimleri için farklı istasyonlarda tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin belirlilik katsayılarının ( $R^2$ ) karşılaştırılması

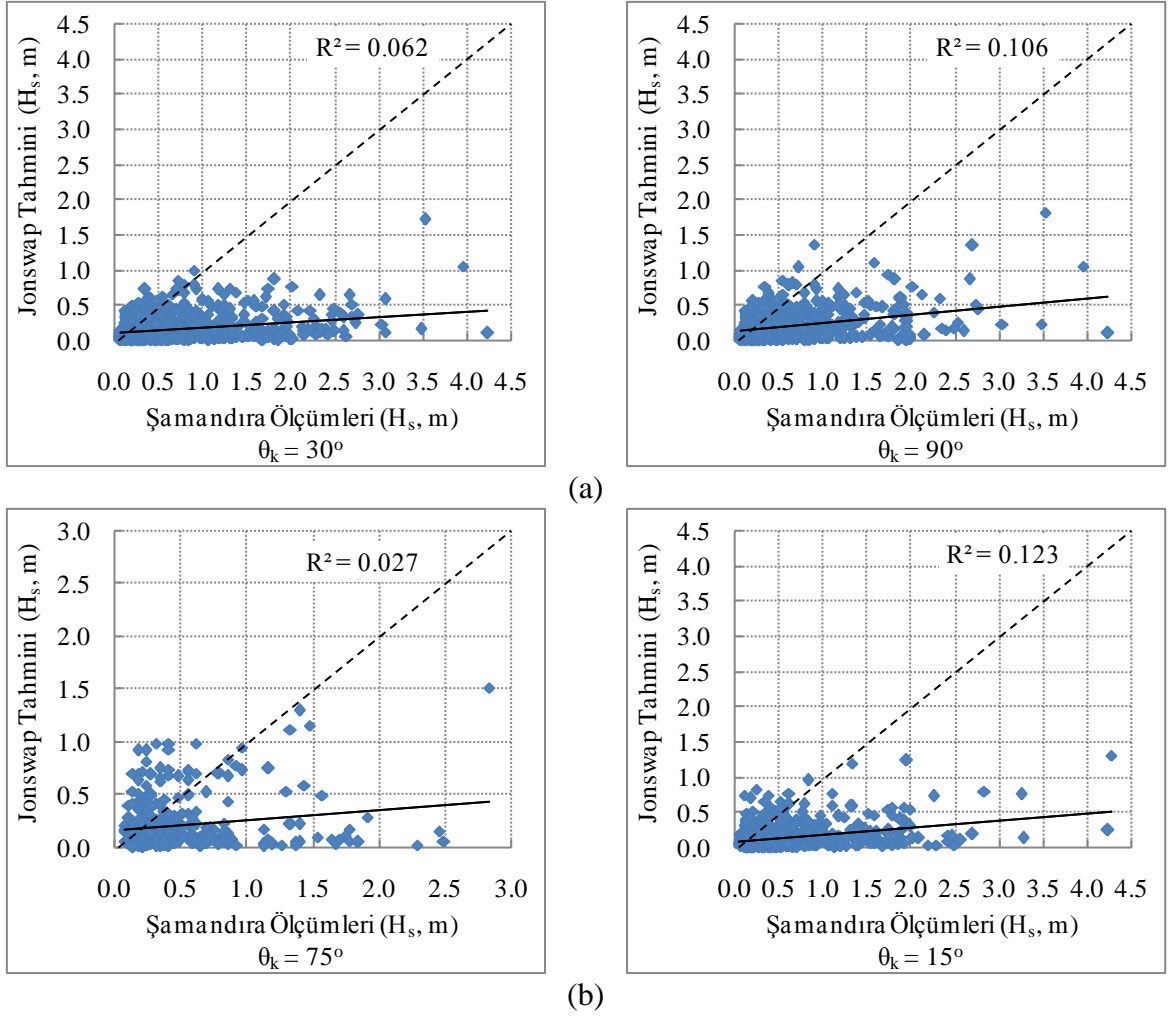
Şekil 2.15 ve 2.16'dan görülebileceği gibi, DMİ verileri kullanılarak Sinop şamandıra istasyonu için gerçekleştirilen dalga tahminlerinde en az hata, fırtınanın  $90^\circ$  yön

değiştirdiğinde, fırtınanın sona erdiği ve yeni deniz şartlarının oluştuğu kabulü yapıldığında oluşmaktadır. ECMWF verileri kullanılarak aynı istasyon için gerçekleştirilen dalga tahminlerinde ise en az hata, fırtınanın 45° yön değiştirdiğinde, fırtınanın sona erdiği ve yeni deniz şartlarının oluştuğu kabulü yapıldığında olmaktadır. Ayrıca, Sinop istasyonunda her iki veri kaynağı için belirlenen kritik rüzgar yön değişim açıları baz alınarak gerçekleştirilen tahminlerin ölçümlerle ilişkisinin diğer yön değişim açılarına göre daha iyi olduğu da Şekil 2.16'dan görölmektedir.

Hopa şamandıra istasyonunda ise, DMİ verileri kullanılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde en az hatanın, fırtınanın 90° yön değiştirdiğinde; ECMWF verileri kullanılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde ise en az hatanın, fırtınanın 75° yön değiştirdiğinde, fırtınanın sona erdiği ve yeni deniz şartlarının oluştuğu kabulü yapıldığında oluştuğu görölmektedir. Ancak, ECMWF verileri kullanılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde en az hata fırtınanın 75° yön değiştirdiğinde oluştuğu gözlenirken en iyi belirlilik katsayısı fırtınanın 15° yön değiştirdiğinde fırtınanın sona erdiği ve yeni deniz şartlarının oluştuğu kabulü yapıldığında oluştuğu anlaşılmıştır. Kritik rüzgar yönü değişim açıları için elde edilen sonuçların ölçümler ile ilişkisini gösteren saçılma grafikleri de Şekil 2.17 ve 2.18'de sunulmuştur.

Bütün bu değerlendirmelerin işığında, DMİ verileri kullanılarak Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için gerçekleştirilecek dalga tahminlerinde kritik rüzgar yön değişim açısı 90° olarak kabul edilerek dört basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi bu veri kaynağına uygulanarak 4 dalga modeli (DMİ - Jonswap, DMİ - SPM, DMİ - CEM ve DMİ - Wilson modelleri) tekrardan oluşturulmuştur. Aynı şekilde, ECMWF verileri kullanılarak Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için gerçekleştirilecek dalga tahminlerinde ise kritik rüzgar yön değişim açılarının 15° ve 45° olması durumunda en iyi dalga tahmininin yapılacağı anlaşılmış ve bu sınır değerlere göre dört basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi bu veri kaynağına uygulanarak 4 dalga modeli tekrardan oluşturulmuştur.

DMİ verileri kullanılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde hem Orta Karadeniz hem de Doğu Karadeniz'de kritik rüzgar yön değişim açısının 90° kabulü yapılması durumunda en iyi dalga tahmininin elde edildiği görölmüştür. şahin vd. (2007)'de Batı Karadeniz için aynı kritik rüzgar yön değişim açısının en iyi dalga tahminini verdiğini belirlemiştir. Buradan yola çıkarak, DMİ verileri kullanılarak Karadeniz'in güney kıyıları boyunca herhangi bir noktada gerçekleştirilecek basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinin uygulamasında kritik rüzgar yön değişim açısının 90° olarak kabul edilebileceği anlaşılmaktadır.



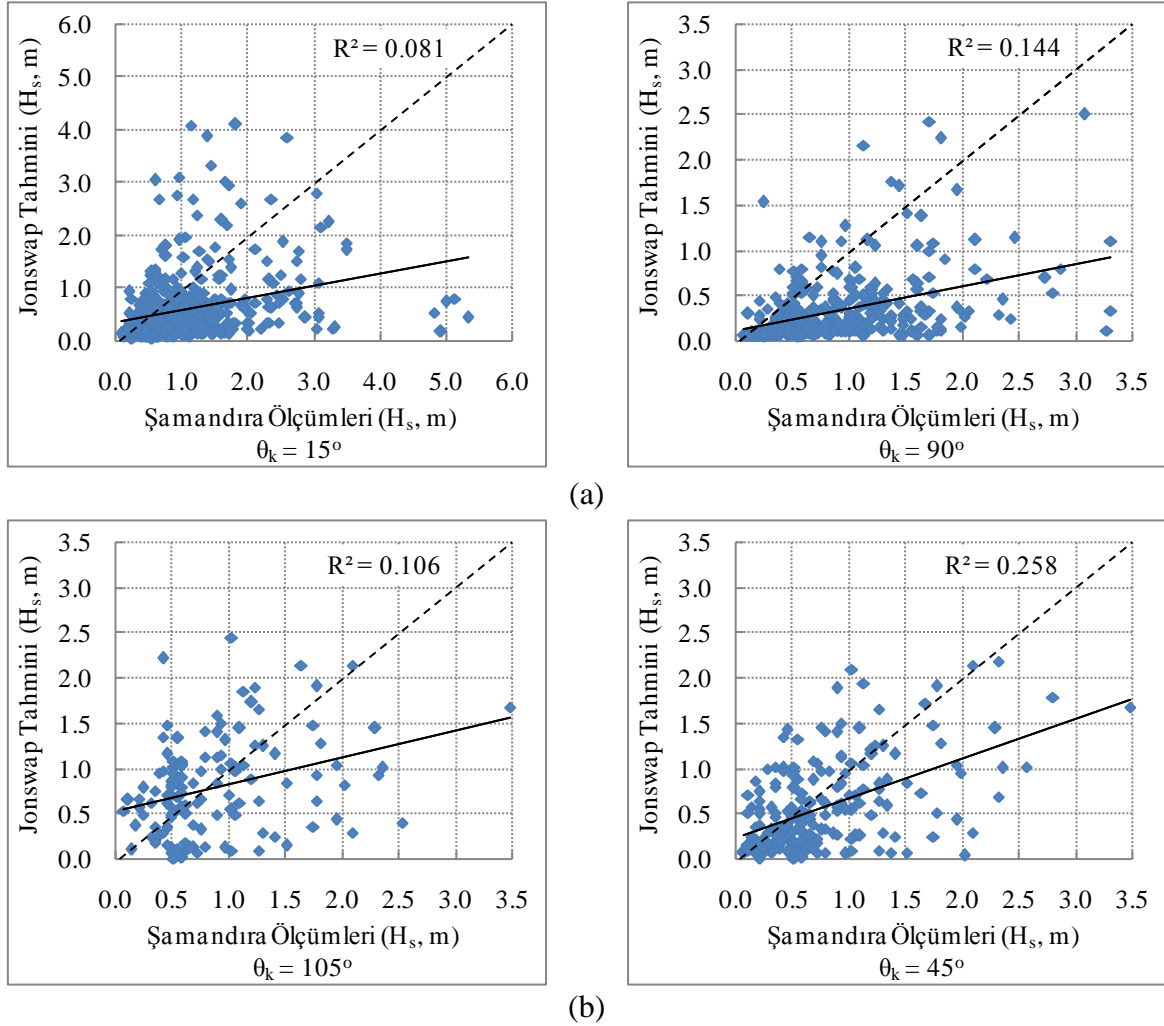
Şekil 2.17. Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için (a) Hopa şamandıra noktasına en yakın DMİ istasyonunun (b) Hopa şamandıra noktasına en yakın ECMWF karelej noktasının rüzgar verileri kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerinin en kötü ve en iyi şartlardaki saçılım diyagramları

## 2.4. Modellerin Doğrulama Analizi

### 2.4.1. SWAN Sonuçlarının Performanslarının İrdelenmesi

Bu çalışmada, dalgaların benzeşimi için SWAN 40.81 sürümü kullanılmıştır. Kurulan model üçüncü nesil modda ve durgun durumda icra edilmiştir. Rüzgar hızının alansal değiştiği, zamanda ise sabit kaldığı varsayılmıştır. Model, Karadeniz'in güney kıyılarında önceden dalga ölçümü gerçekleştirilen iki şamandıranın verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Bunun için, Hopa şamandıra istasyonunda kaydedilmiş 1995 yılının 12 aylık ölçülmüş dalga parametreleri, Sinop şamandıra istasyonunda ise 1994 ve 1995

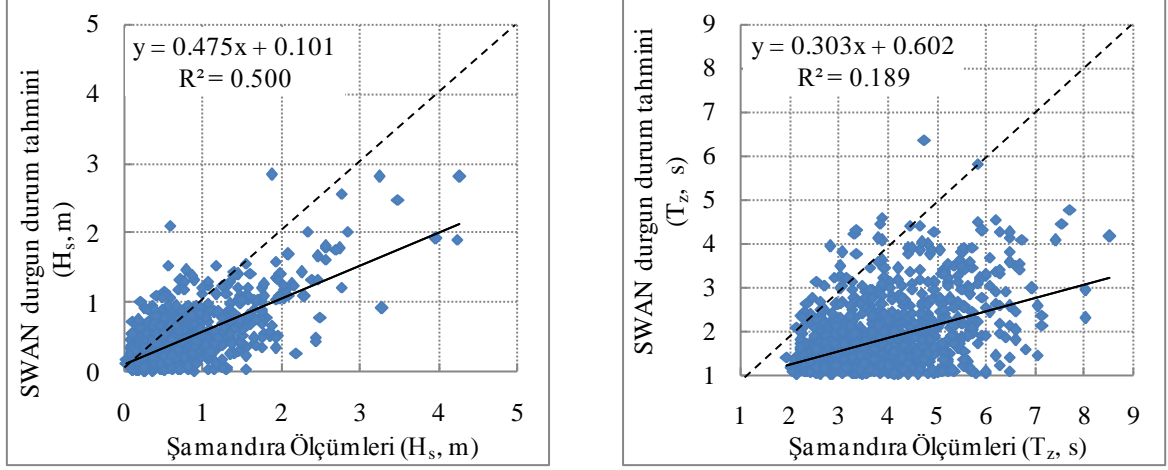
yıllarının Kasım - Aralık aylarının ve 1996 yılının ilk altı ayının ölçülmüş dalga parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca, Abdalla vd. (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları olan METU3 tahminleri ile de ilaveten bir kıyaslama yapılmıştır. Doğrulama için kullanılan model çıktıları karelaj ağının düğüm noktalarından alınmıştır.



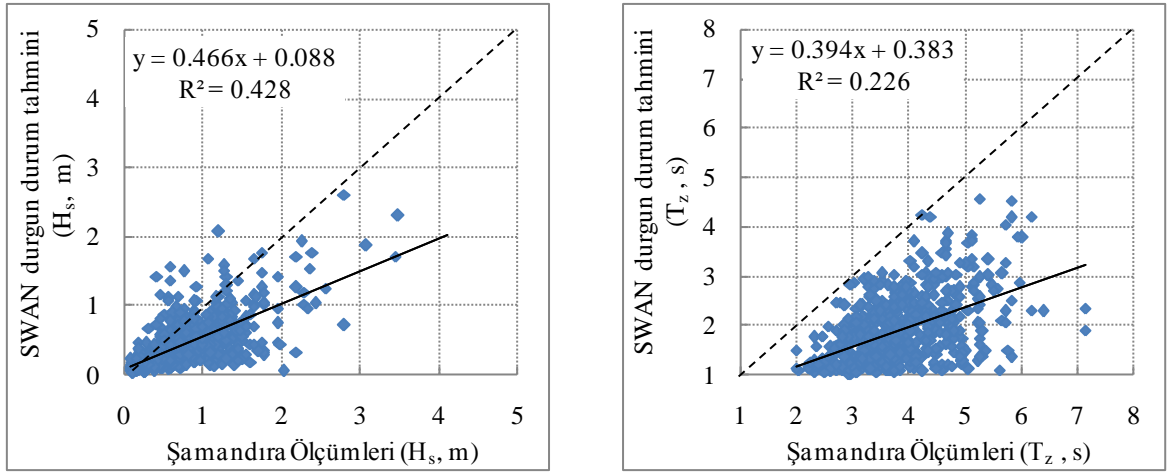
Şekil 2.18. Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için (a) Sinop şamandıra noktasına en yakın DMİ istasyonunun ve (b) Sinop şamandıra noktasına en yakın ECMWF karelaj noktasının rüzgar verileri kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerinin en kötü ve en iyi şartlardaki saçılım diyagramları

Doğrulama süresi boyunca, eşleştirilen kaydedilmiş ve tahmin edilmiş dalga verilerinin saçılım diyagramları, Şekil 2.19 ve 2.20’de sunulmuştur. Bu şekillere göre, SWAN modeli düşük dalgaları yüksek, büyükleri ise düşük tahmin etmektedir.

Modellenmiş ve ölçülmüş dalga yükseklikleri arasındaki korelasyon iki şamandıradaki da ortalama dalga periyodununkinden daha yüksektir.



Şekil 2.19. Hopa şamandıra istasyonunda SWAN analiz sonuçlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$  ve  $T_z$  için) saçılım diyagramları



Şekil 2.20. Sinop şamandıra istasyonunda SWAN analiz sonuçlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$  ve  $T_z$  için) saçılım diyagramları

Çalışılan zaman diliminde, Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında ölçülmüş ve tahmin edilmiş dalga verilerinin eşzamanlı değerlerinin istatistiksel analizlerinin özeti, Tablo 2.4'te verilmektedir. Her iki istasyonda da, ortalama dalga periyodunun tahmininde belirgin dalga yüksekliğinininkine göre daha yüksek negatif bias parametresi, SWAN modelinin ortalama dalga periyodunu düşük tahmin ettiği anlamına gelmektedir. Diğer



yandan, genelde dalga yüksekliği için modelin ortalama hatasının dalga periyodununkinden daha düşük olduğu bu tablodan görülebilmektedir.

Tablo 2.4. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında kaydedilmiş şamandıra verileri ve SWAN analizi ile tahmin edilmiş dalga verilerinin eşzamanlı değerlerinin istatistiksel analizinin özeti

	Belirgin dalga yüksekliği (m)				Ortalama dalga periyodu (s)			
	Ortalama hata	RMS hatası	Bias	SI	Ortalama hata	RMS hatası	Bias	SI
Hopa şamandıra istasyonu (n = 1228 adet)	-0.366	0.516	-0.34	1.11	-1.885	2.081	-1.93	1.10
Sinop şamandıra istasyonu (n = 623 adet)	-0.340	0.427	-0.20	1.14	-1.926	2.250	-2.01	1.29
Ortalama	-0.353	0.472	-0.27	1.125	-1.906	2.166	-1.97	1.195

Dalga tahminlerinde genel olarak küçük dalgaların tahmin hatası büyük dalgalarınkinden daha yüksek olabilmektedir. Bunu gözlemleyebilmek için, 0.5 m'den daha küçük dalgalar elenerek daha büyük dalgalar için hata istatistiği yeniden oluşturulmuştur. Temsili sonuçlar, Tablo 2.5'te görülmektedir.

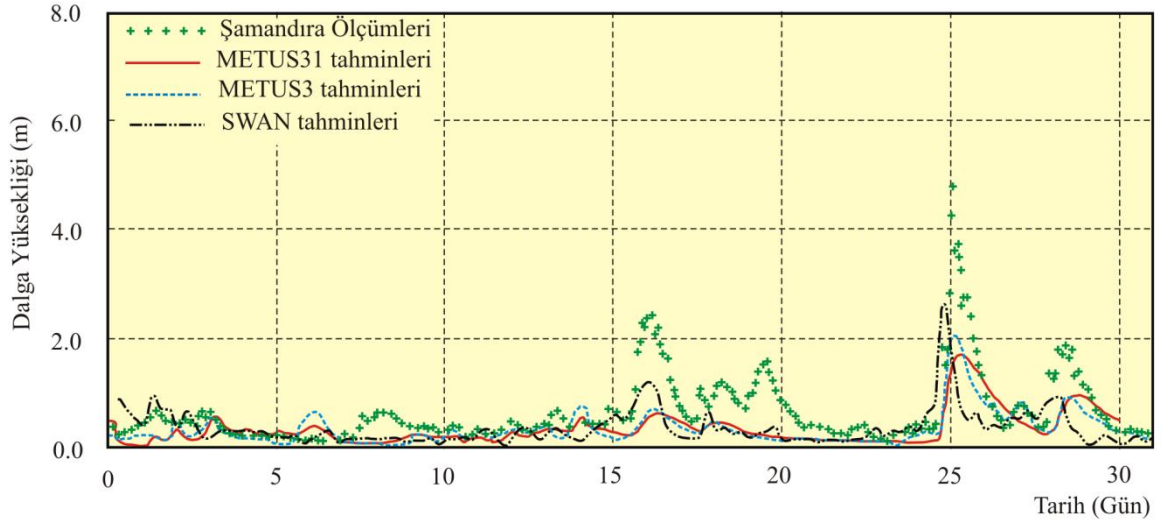
Tablo 2.5. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında kaydedilmiş şamandıra verileri ve SWAN analizi ile tahmin edilmiş dalga verilerinin 0.5 m'den büyük dalga yükseklikleri için eşzamanlı değerlerinin istatistiksel analizinin özeti

	Belirgin dalga yüksekliği (m)				Ortalama dalga periyodu (s)			
	Ortalama hata	RMS hatası	Bias	SI	Ortalama hata	RMS hatası	Bias	SI
Hopa şamandıra istasyonu (n = 219 adet)	0.948	0.663	-0.37	0.70	2.921	2.225	-1.88	0.76
Sinop şamandıra istasyonu (n = 197 adet)	0.870	0.545	-0.32	0.63	2.637	1.686	-1.56	0.64
Ortalama	0.909	0.604	-0.34	0.67	2.779	1.956	-1.72	0.70

Tablo 2.4 ve 2.5'e göre, dalga yüksekliği ve periyodunun tahmini için modelin hataları, küçük dalgaların elenmesinden sonra yaklaşık % 0.45 azalmıştır. Bu durum, bu dalgaların oluşumunda açıklanamayan bir mekanizma nedeniyle olabilir. Ayrıca, bu tablolardan, belirgin dalga yüksekliğinin tahminindeki hatanın, Hopa şamandıra

istasyonunda, Sinop şamandıra istasyonuna kıyasla daha büyük olduğu görülebilmektedir. Burada SWAN modellemesine ilişkin elde edilen bulgular, Moeini ve Etemad-Shahidi (2009) ve Lin vd. (2002)'nin çalışmalarının sonuçlarıyla uyum içerisinde.

SWAN modelin doğruluğunun şamandıra ölçümleri ile değerlendirilmesinin ardından, modelin Karadeniz'de geçmiş yıllarda gerçekleştirilen bir dalga modelleme çalışması olan METU3 tahminleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Bu kapsamda, kıyaslama için yalnızca 1 aylık dalga kaydı elde edilebilmiştir. Bu dalga kaydı ile aynı zamanda modellenmiş tahmini SWAN dalga yüksekliğinin zamansal eğilim grafikleri karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır (Şekil 2.21). SWAN model sonuçlarının zamansal eğiliminin şamandıra ölçüm verilerine benzer olduğu bu şekilde görülebilmektedir. Ayrıca, SWAN modeli, dalga yüksekliğinin zaman serisindeki tepe ve çukur değerlerini METU3 sonuçlarına göre daha iyi tahmin etmiştir. Dalga yüksekliği için, SWAN sonuçları ölçülen verileri iyi tahmin etmiş ve rüzgar hız değişimine yanıt olarak artış ve düşüşleri izlemiştir.



Şekil 2.21. Hopa şamandıra istasyonunda 1995 Ocak ayına ait METU3 tahminleri ile SWAN durgun durum analiz sonuçlarının şamandıra dalga ölçüm verileriyle kıyaslanması

#### 2.4.2. Basitleştirilmiş Dalga Tahmin Yöntemlerinin Sonuçlarının İrdelenmesi

Basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinin uygulanmasında, kritik rüzgar yön değişim açısı için gerçekleştirilen duyarlılık analizi neticesinde en iyi dalga tahmin sonucuna sahip yön değişimine karar verilmiştir. Bu yön değişim açısı ve çalışmada dikkate alınan iki rüzgar veri kaynağına göre dört basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi Karadeniz'e uygulanmıştır. Tablo

2.6 ve 2.7, Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında her iki veri kaynağı ve dört basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi ile oluşturulan sekiz modelin 1995 yılı süresince tahmini dalga parametrelerinin hata istatistiğini vermektedir. Bu tablolardan görülebileceği gibi, Hopa şamandıra istasyonunda belirgin dalga yüksekliğinin tahmin hatası minimum, maksimum ve ortalama değerler bazında en küçük DMİ verilerinde CEM yönteminden elde edilirken, ortalama dalga periyodunun en düşük tahmin hatası ise aynı verilerde SPM yönteminden elde edilmiştir. Sinop şamandıra istasyonunda ise belirgin dalga yüksekliğinin tahmininde ECMWF verilerinde SPM metodunun ve ortalama dalga periyodunun tahmininde ise CEM yönteminin, diğer modellere göre daha doğru sonuç verdiği belirlenmiştir.

Modellerin kendi içlerinde daha detaylı bir analizi için tahmini ve ölçülmüş dalga karakteristiklerinin eşzamanlı değerleri irdelenmiştir. Bu eşzamanlı verilerin elde edilebilmesi için, oluşturulan sekiz basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmini dalga parametreleri ile ölçülmüş veriler, geliştirilen çakıştırma kodu kullanılarak eşleştirilmiştir. Tablo 2.8 ve 2.9, Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiğini vermektedir.

Tablo 2.6. 1995 yılı süresince Hopa şamandıra istasyonunda oluşturulan sekiz basitleştirilmiş dalga tahmin modeli için tahmini dalga karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri

Veri kaynağı – Tahmin yöntemi	Kritik yön değişim açısı (derece)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Standart sapma
Belirgin dalga yüksekliği (m)					
DMİ – Jonswap	90	0.008	1.829	0.200	0.202
DMİ – CEM		<b>0.021</b>	<b>4.532</b>	<b>0.833</b>	0.720
DMİ – SPM		0.016	5.714	0.961	0.875
DMİ – Wilson		0.007	1.492	0.187	0.189
ECMWF – Jonswap	15	0.001	1.301	0.144	0.176
ECMWF – CEM		0.001	1.209	0.123	0.155
ECMWF – SPM		0.001	1.432	0.151	0.206
ECMWF - Wilson		0.001	0.894	0.090	0.099
Şamandıra ölçümleri	-	<b>0.034</b>	<b>4.786</b>	<b>0.601</b>	<b>0.588</b>
Ortalama dalga periyodu (s)					
DMİ – Jonswap	90	0.325	<b>7.985</b>	1.803	1.220
DMİ – CEM		0.672	14.225	<b>4.088</b>	1.922
DMİ – SPM		<b>0.789</b>	11.833	5.433	2.398
DMİ – Wilson		0.346	5.027	1.526	0.769
ECMWF – Jonswap	15	0.219	7.565	1.690	1.322
ECMWF – CEM		0.198	4.845	1.245	0.801
ECMWF – SPM		0.192	6.679	1.812	1.274
ECMWF - Wilson		0.044	3.701	1.108	0.595
Şamandıra ölçümleri	-	<b>1.889</b>	<b>8.885</b>	<b>3.784</b>	<b>1.117</b>

Tablo 2.7. 1995 yılı süresince Sinop şamandıra istasyonunda oluşturulan sekiz basitleştirilmiş dalga tahmin modeli için tahmini dalga karakteristiklerinin istatistiksel parametreleri

Veri kaynağı – Tahmin yöntemi	Kritik yön değişim açısı (derece)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer	Standart sapma
Belirgin dalga yüksekliği (m)					
DMİ – Jonswap	90	0.048	2.508	0.360	0.372
DMİ – CEM		0.043	5.377	1.490	1.106
DMİ – SPM		0.044	6.912	1.699	1.357
DMİ – Wilson		<b>0.060</b>	2.672	0.441	0.416
ECMWF – Jonswap	45	0.008	2.667	0.610	0.538
ECMWF – CEM		0.050	3.446	0.835	0.606
ECMWF – SPM		0.011	<b>4.252</b>	<b>0.890</b>	0.748
ECMWF - Wilson		0.002	1.731	0.345	0.326
Şamandıra ölçümleri		<b>0.068</b>	<b>4.342</b>	<b>0.917</b>	<b>0.622</b>
Ortalama dalga periyodu (s)					
DMİ – Jonswap	90	0.675	8.868	2.123	1.384
DMİ – CEM		0.629	8.362	4.649	1.900
DMİ – SPM		0.821	11.787	6.186	2.869
DMİ – Wilson		0.853	6.307	2.225	1.033
ECMWF – Jonswap	45	0.530	11.020	3.778	2.104
ECMWF – CEM		<b>0.958</b>	<b>7.530</b>	<b>3.980</b>	1.433
ECMWF – SPM		0.742	10.471	5.102	2.140
ECMWF - Wilson		0.190	5.480	2.287	1.074
Şamandıra ölçümleri		<b>1.940</b>	<b>7.404</b>	<b>3.957</b>	<b>0.864</b>

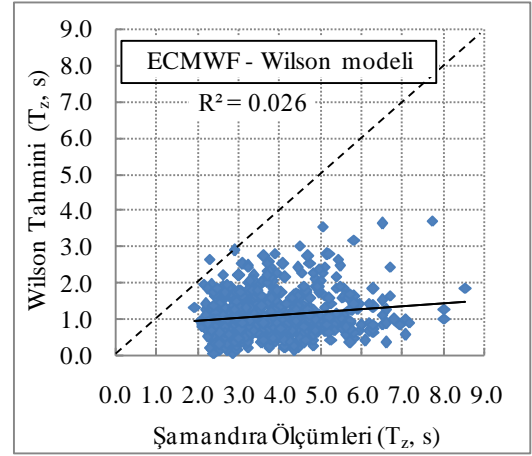
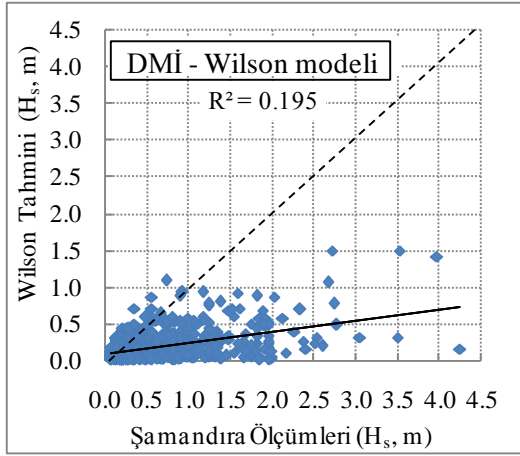
Tablo 2.8. Hopa şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri ile tahmin edilmiş dalga karakteristiklerinin şamandıra verileriyle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği

Veri kaynağı - Tahmin yöntemi	Kritik yön değişim açısı (derece)	Belirgin dalga yüksekliği (m)		Ortalama dalga periyodu (s)	
		RMS Hatası	R	RMS Hatası	R
DMİ – Jonswap	90	0.694	0.327	2.511	0.033
DMİ – CEM		0.744	0.419	2.354	0.047
DMİ – SPM		0.880	0.439	3.281	0.027
DMİ – Wilson		<b>0.684</b>	<b>0.442</b>	2.538	0.078
ECMWF – Jonswap	15	0.640	0.322	2.650	0.114
ECMWF – CEM		0.653	0.322	2.836	0.120
ECMWF – SPM		0.634	0.334	2.525	0.124
ECMWF - Wilson		0.670	0.399	<b>2.898</b>	<b>0.163</b>

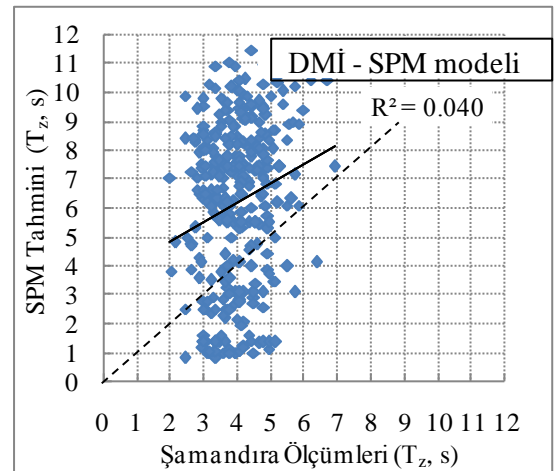
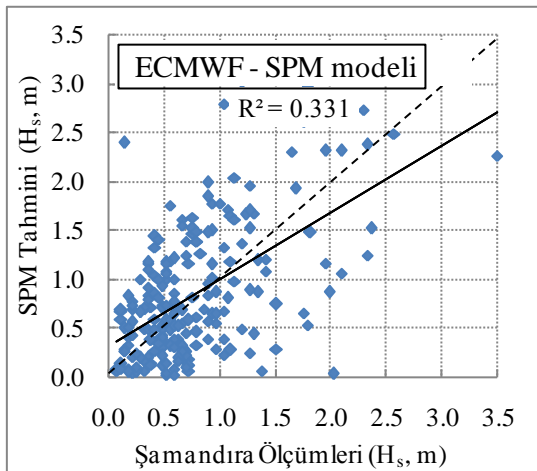
Bunların yanında, her iki istasyonda en iyi sonuç veren basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmin verilerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının (belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu) saçılım diyagramları Şekil 2.22 ve 2.23'te sunulmuştur. Bu tablo ve şekiller incelendiğinde, her iki dalga parametresinin tahmininde Hopa şamandıra istasyonunda Wilson, Sinop şamandıra istasyonunda ise SPM yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tablo 2.9. Sinop şamandıra istasyonu için basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri ile tahmin edilmiş dalga karakteristiklerinin şamandıra verileriyle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği

Veri kaynağı - Tahmin yöntemi	Kritik yön değişim açısı (derece)	Belirgin dalga yüksekliği (m)		Ortalama dalga periyodu (s)	
		RMS Hatası	R	RMS Hatası	R
DMİ – Jonswap	90	0.817	0.380	2.457	0.091
DMİ – CEM		1.040	0.500	2.004	0.175
DMİ – SPM		1.382	0.466	3.561	<b>0.202</b>
DMİ – Wilson		0.756	0.425	2.186	0.123
ECMWF – Jonswap	45	0.566	0.508	2.135	0.016
ECMWF – CEM		0.533	0.563	1.522	0.048
ECMWF – SPM		<b>0.589</b>	<b>0.576</b>	2.393	0.066
ECMWF - Wilson		0.655	0.552	2.093	0.050



Şekil 2.22. Hopa istasyonunda en iyi sonuç veren basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmin verilerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının saçılım diyagramları



Şekil 2.23. Sinop istasyonunda en iyi sonuç veren basitleştirilmiş dalga tahmin modelinin tahmin verilerinin ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının saçılım diyagramları

### 2.4.3. ECMWF Dalga Tahmin Verilerinin İrdelenmesi

Karadeniz'i içine alacak şekilde dünyanın çeşitli denizleri için dalga karakteristiklerini gerçekleştiren ve bir veri tabanında bu verileri biriktiren birkaç hava tahmin merkezi bulunmaktadır. Bu hava tahmin merkezleri kendi sayısal programları ve atmosferik modelleri yardımıyla dalga modellerini oluşturmaktadırlar. Bidlot vd. (2002) beş ayrı hava tahmin merkezinin (Avrupa orta vadeli hava tahmin merkezinin dalga modeli, İngiltere'nin ulusal hava tahmin merkezinin Met Office dalga modeli, Amerikan ordusunun operasyonel küresel atmosferik tahmin sistemi, Kanada meteoroloji merkezinin atmosferik model sistemi ve Amerika'nın ulusal okyanus ve atmosfer kurumunun NOAA/NCEP operasyonel dalga modeli) dalga modellerinin performanslarını şamandıra ve uydu verilerini temel alarak değerlendirmiştir. Bidlot vd. (2002)'nin çalışma sonuçlarına göre, ECMWF'nin dalga modelinin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, en düşük tahmini rüzgar hatalarına sahip olan merkezin (ECMWF) en düşük dalga tahmin hatalarına da sahip olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı, bu çalışmada SWAN sayısal dalga tahmin sonuçlarını kıyaslamak için, ECMWF'nin veri sisteminin sahip olduğu farklı veri tabanları arasında bir değerlendirme yaparak Karadeniz için en doğru dalga tahmin modelinin belirlenmesine çalışılmıştır.

ECMWF, üç adet re-analiz veri tabanına (ERA 15, ERA 40 ve ERA Interim) ve 1 adet operasyonel veri tabanına sahiptir. Bu veri tabanlarından, ECMWF ERA 15 veri tabanı 1994 yılına kadar veriye sahiptir ve bu çalışmanın doğrulama analizinde 1995 yılı verileri kullanılmıştır. Bu nedenle, doğrulama analizinde bu veri tabanına ilişkin herhangi bir kıyaslama yapılamamıştır. Diğer üç veri tabanına ilişkin gerekli kıyaslamaların yapılabilmesi için, 1995 yılını kapsayan dalga tahmin verileri her üç veri tabanından elde edilmiştir. Temin edilen veriler 6 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip dalga alanları şeklinde olduğundan ve bu çalışmada daha önceden dalga ölçümü gerçekleştirilen Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarına odaklanıldığından, bu istasyonlara en yakın karelej noktalarının verileri her bir veri tabanından ayıklanmıştır.

ECMWF veri tabanlarının kıyaslaması için öncelikle 1995 yılı süresince bu veri tabanlarının sahip olduğu tahmini dalga karakteristiklerinin istatistiksel parametrelerinin (minimum, maksimum ve ortalama) hata istatistiği elde edilmiştir. Tablo 2.10 ve 2.11'de Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için elde edilen hata istatistikleri özetlenmiştir.

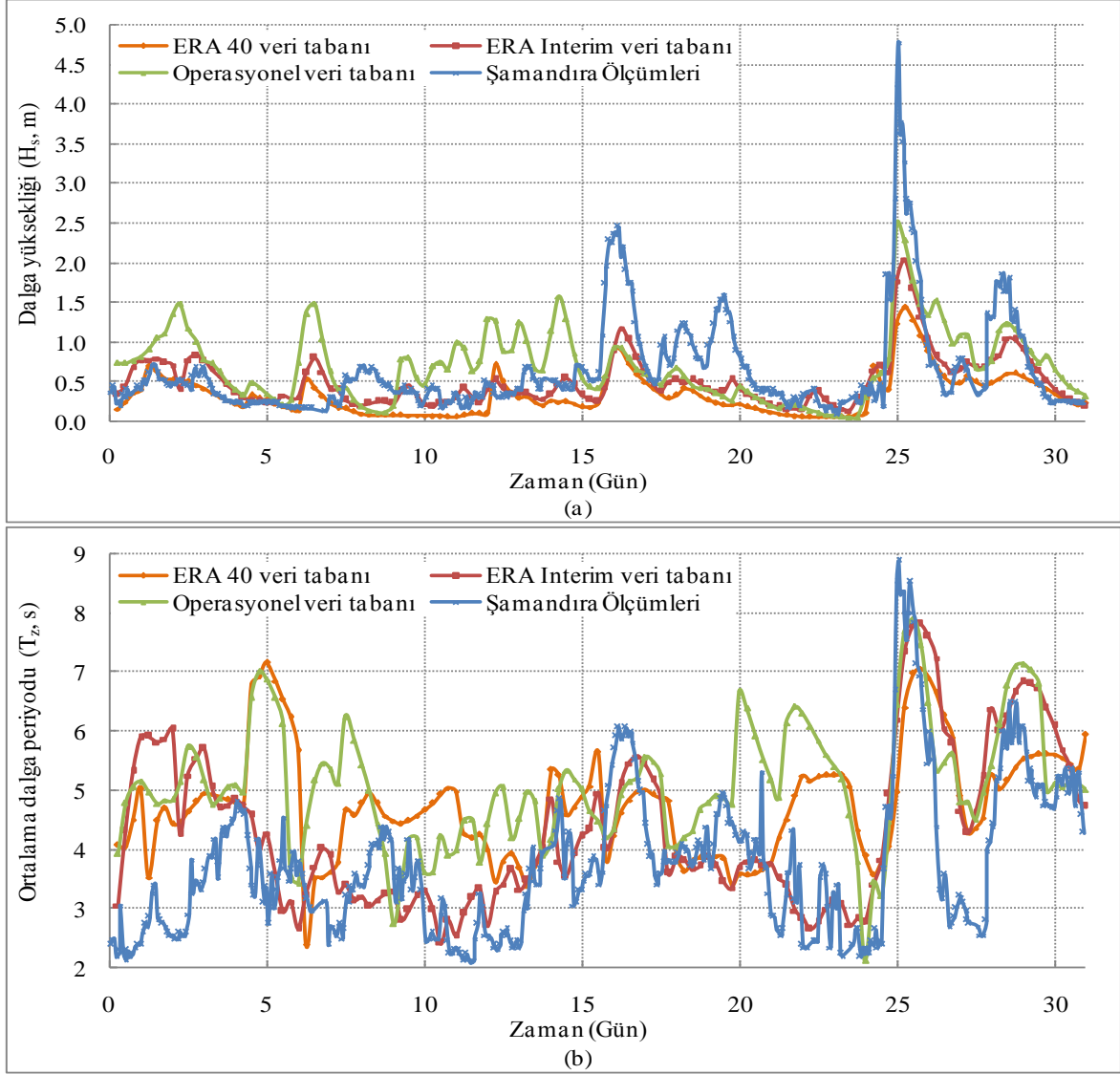
Tablo 2.10. 1995 yılı süresince Hopa şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini dalga parametreleri için istatistiksel parametrelerin hata istatistiği

	Minimum		Maksimum		Ortalama		Standart sapma
	Değer	R. H. (%)	Değer	R. H. (%)	Değer	R. H. (%)	
Belirgin dalga yüksekliği (m)							
ERA 40 veri tabanı	0.069	50.7	2.776	72.4	0.346	73.7	0.300
ERA Interim veri tabanı	0.055	38.2	3.172	50.9	0.455	32.1	0.356
Operasyonel veri tabanı	0.045	24.5	3.493	37.0	0.572	5.1	0.395
Şamandıra ölçümleri	0.034	-	4.786	-	0.601	-	0.588
Ortalama dalga periyodu (s)							
ERA 40 veri tabanı	2.407	21.5	7.978	11.4	4.637	18.4	0.861
ERA Interim veri tabanı	1.753	7.8	8.152	9.0	4.121	8.2	1.244
Operasyonel veri tabanı	2.128	11.2	8.471	4.9	4.581	17.4	0.915
Şamandıra ölçümleri	1.889	-	8.885	-	3.784	-	1.117

Tablo 2.11. 1995 yılı süresince Sinop şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini dalga parametrelerinin istatistiksel parametrelerinin hata istatistiği

	Minimum		Maksimum		Ortalama		Standart sapma
	Değer	R. H. (%)	Değer	R. H. (%)	Değer	R. H. (%)	
Belirgin dalga yüksekliği (m)							
ERA 40 veri tabanı	0.069	1.5	2.761	57.3	0.669	37.1	0.477
ERA Interim veri tabanı	0.079	13.9	3.151	37.8	0.819	12.0	0.531
Operasyonel veri tabanı	0.087	21.8	3.039	42.9	0.683	34.3	0.424
Şamandıra ölçümleri	0.068	-	4.342	-	0.917	-	0.622
Ortalama dalga periyodu (s)							
ERA 40 veri tabanı	2.498	22.3	7.956	6.9	4.771	17.1	0.874
ERA Interim veri tabanı	1.895	2.4	8.209	9.8	4.627	14.5	1.189
Operasyonel veri tabanı	3.105	37.5	8.003	7.5	4.843	18.3	0.812
Şamandıra ölçümleri	1.940	-	7.404	-	3.957	-	0.864

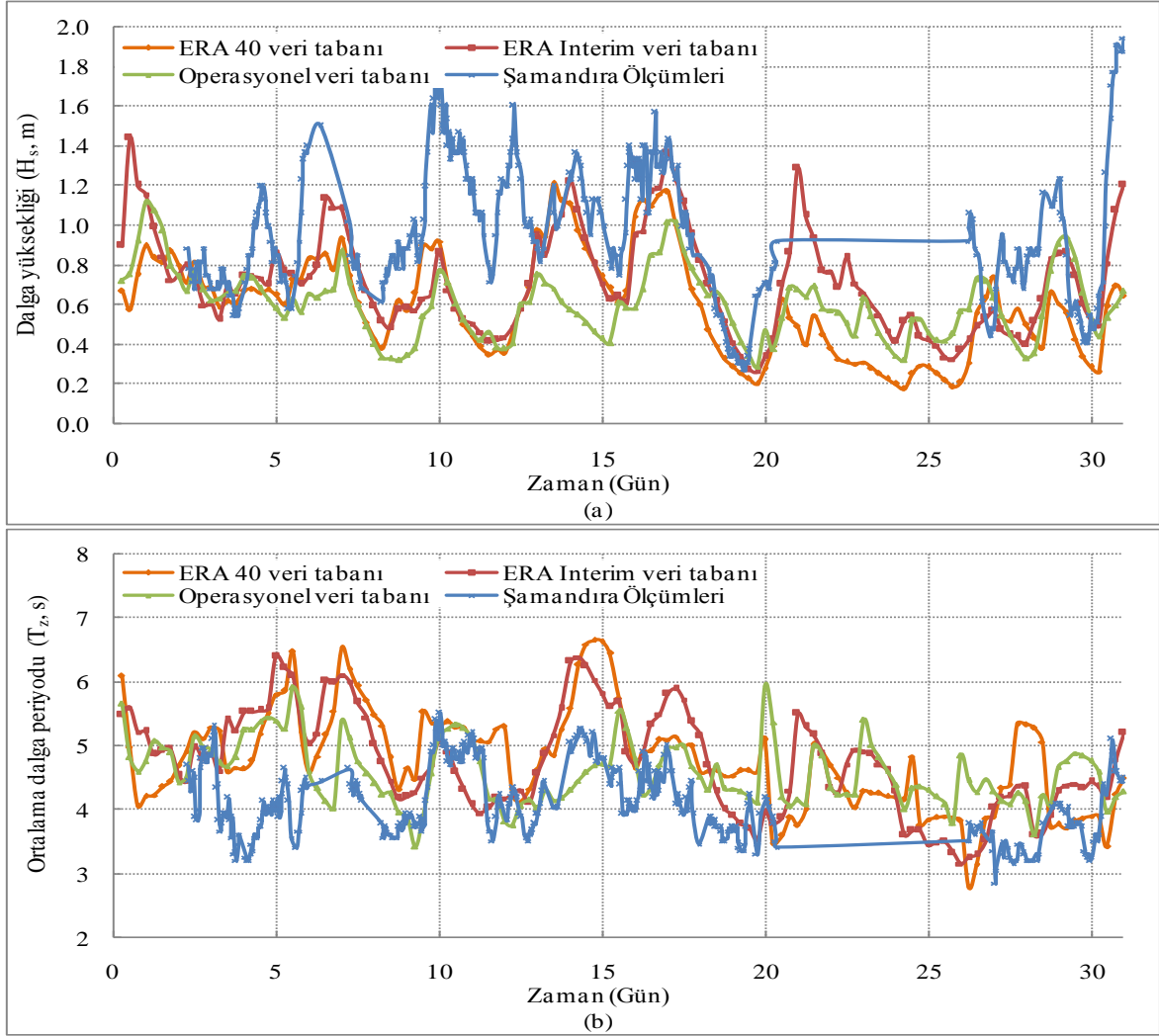
Dalga kayıtlarının zamansal değişimleri ile ilgili 1 yıllık sürede detaylı bir kıyaslama yapılmasının anlaşılabilir olmamasından dolayı, uygun bir değerlendirme yapabilmek için 1 aylık bir zaman diliminde kıyaslama yapılmıştır. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için sırasıyla 1995 ve 1996 yıllarının Ocak aylarında ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini belirgin dalga yüksekliklerinin ve ortalama dalga periyotlarının zaman serilerinin ölçülmüş verilerle kıyaslanması, Şekil 2.24 ve 2.25'te sunulmuştur. Bu grafiklerden, Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için ERA Interim veri tabanının hem belirgin dalga yüksekliğinin hem de ortalama dalga periyodunun zamansal eğilimlerini ve bu zaman periyodunda oluşan pikleri, diğer veri tabanlarına göre daha iyi tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 2.24. Hopa şamandıra istasyonunda 1995 yılı Ocak ayı için ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini belirgin dalga yüksekliklerinin (a) ve ortalama dalga periyotlarının (b) zaman serilerinin ölçülmüş verilerle kıyaslanması

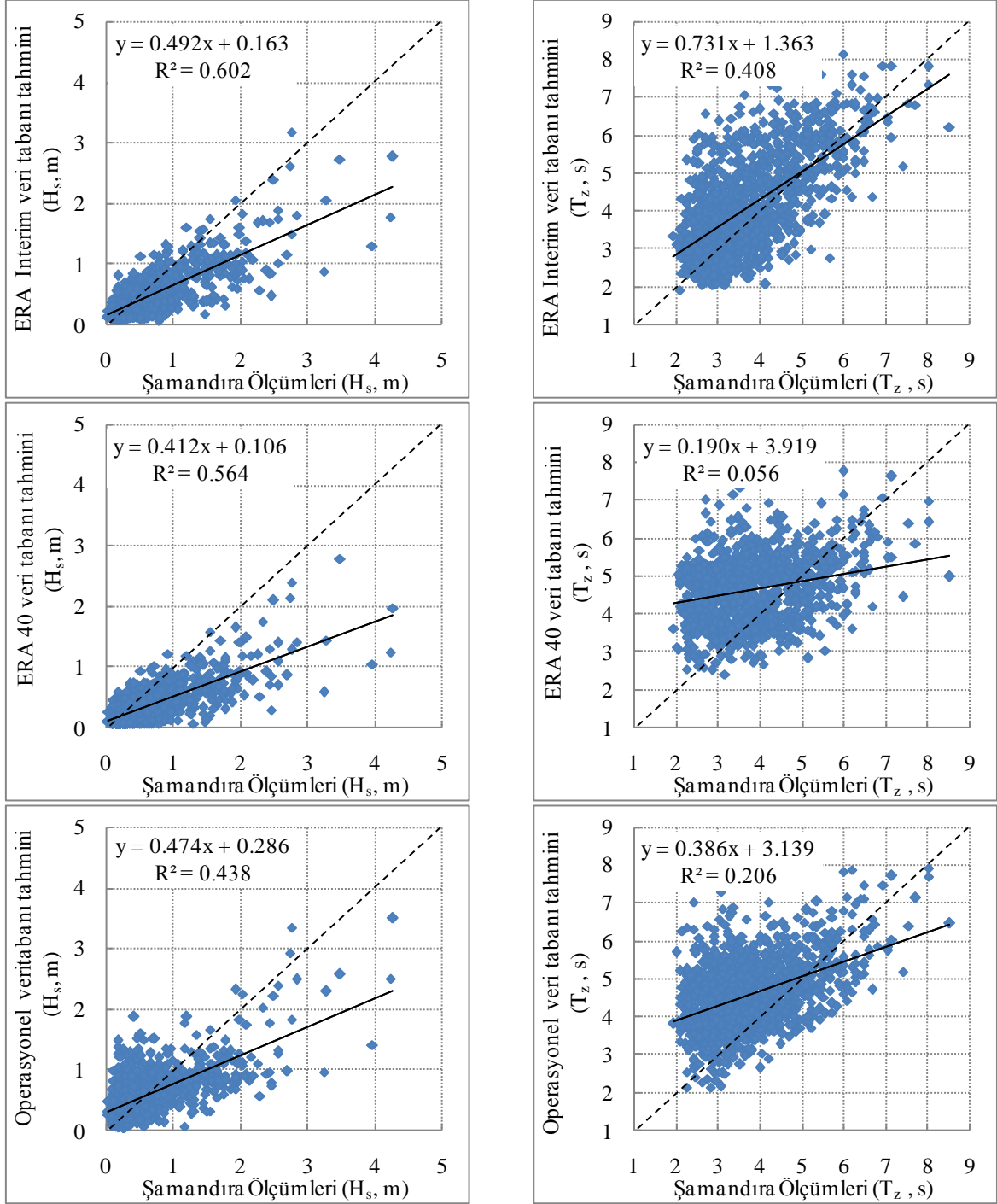
ECMWF'nin tahmini dalga verileri ile Hopa şamandıra istasyonunda ölçülen dalga verilerinin zamansal çözünürlükleri farklıdır. Özellikle şamandıra ölçüm verilerinin zamansal olarak bir sürekliliğinden söz etmek mümkün değildir ve bu veriler kesiklidir. Bu yüzden, yukarıdaki kıyaslamaların yanı sıra, tahmini ve ölçülmüş verilerin eşzamanlı değerlerinin de bir değerlendirilmesinin uygun sonuçlar verebileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı, ECMWF'nin üç veri tabanının tahmini dalga parametreleri ile ölçülmüş veriler, geliştirilen çakıştırma kodu kullanılarak eşzamanlı olarak ayıklanmıştır.



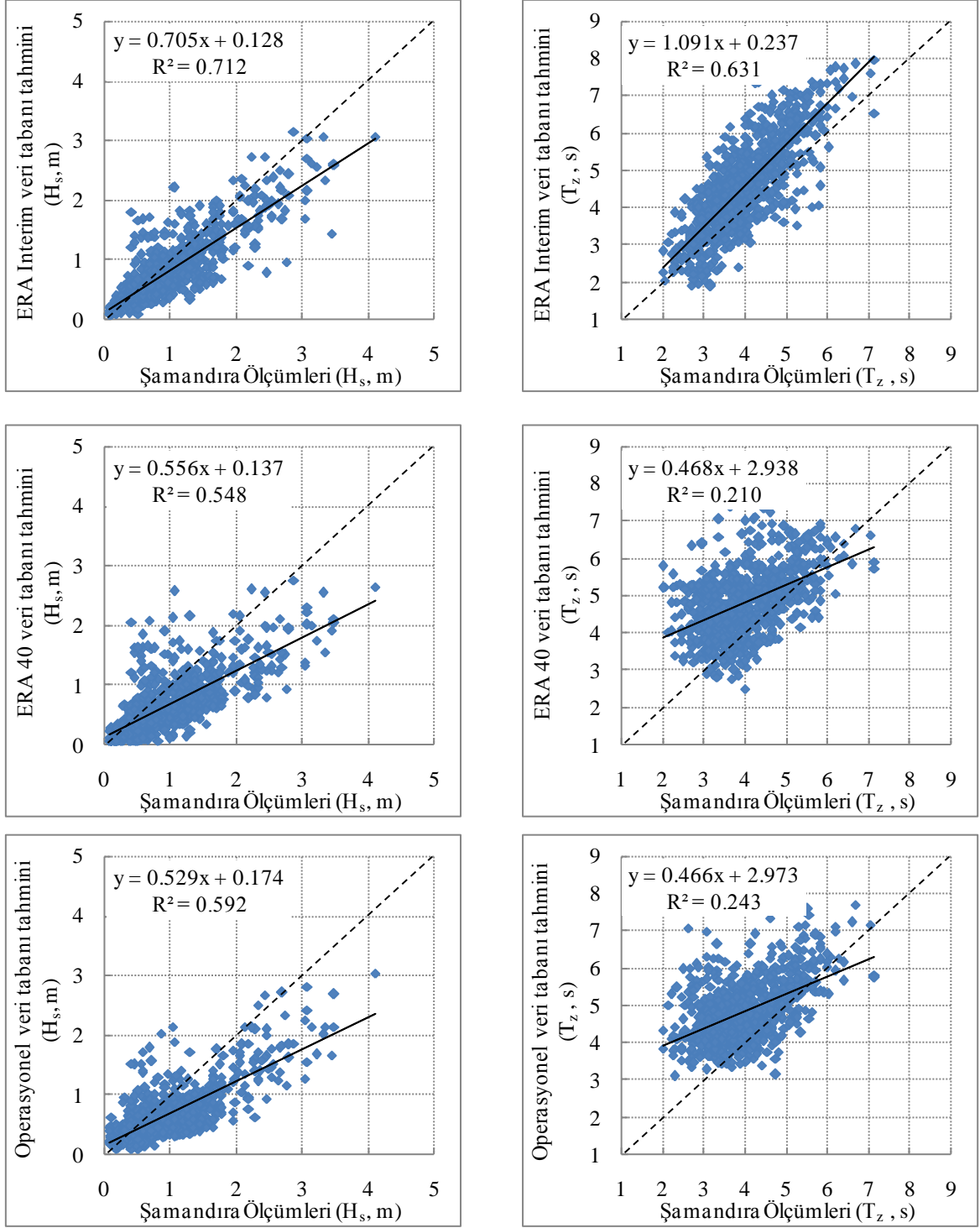


Şekil 2.25. Sinop şamandıra istasyonunda 1996 yılı Ocak ayı için ECMWF veri tabanlarının sahip olduğu tahmini belirgin dalga yüksekliklerinin (a) ve ortalama dalga periyotlarının (b) zaman serilerinin ölçülmüş verilerle kıyaslanması

Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının (belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga periyodunun) saçılım diyagramları, Şekil 2.26 ve 2.27’de sunulmuştur. Tablo 2.12’de, her iki istasyonda ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği verilmektedir. Bu tablodan görülebileceği gibi, her iki şamandıra istasyonunda eşleştirilmiş eşzamanlı verilerde üç dalga parametresi için de en az hataya sahip veri tabanı, ECMWF ERA Interim’dir. Eşzamanlı verilerden çizilmiş saçılım diyagramlarından da, ECMWF ERA Interim veri tabanının diğer veri tabanlarına göre çok daha iyi olduğu görülmektedir. Burada, asıl dikkati çeken ECMWF ERA Interim veri tabanının ortalama dalga periyodunu diğer veri tabanlarına nazaran çok daha iyi tahmin etmesi olmuştur.



Şekil 2.26. Hopa şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının ( $H_s$  ve  $T_z$  için) saçılım diyagramları



Şekil 2.27. Sinop şamandıra istasyonunda ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının (H<sub>s</sub> ve T<sub>z</sub> için) saçılım diyagramları

Tablo 2.12. Hopa ve Sinop şamandıra istasyonlarında ECMWF veri tabanlarının ölçülmüş verilerle eşleştirilmiş eşzamanlı kayıtlarının hata istatistiği

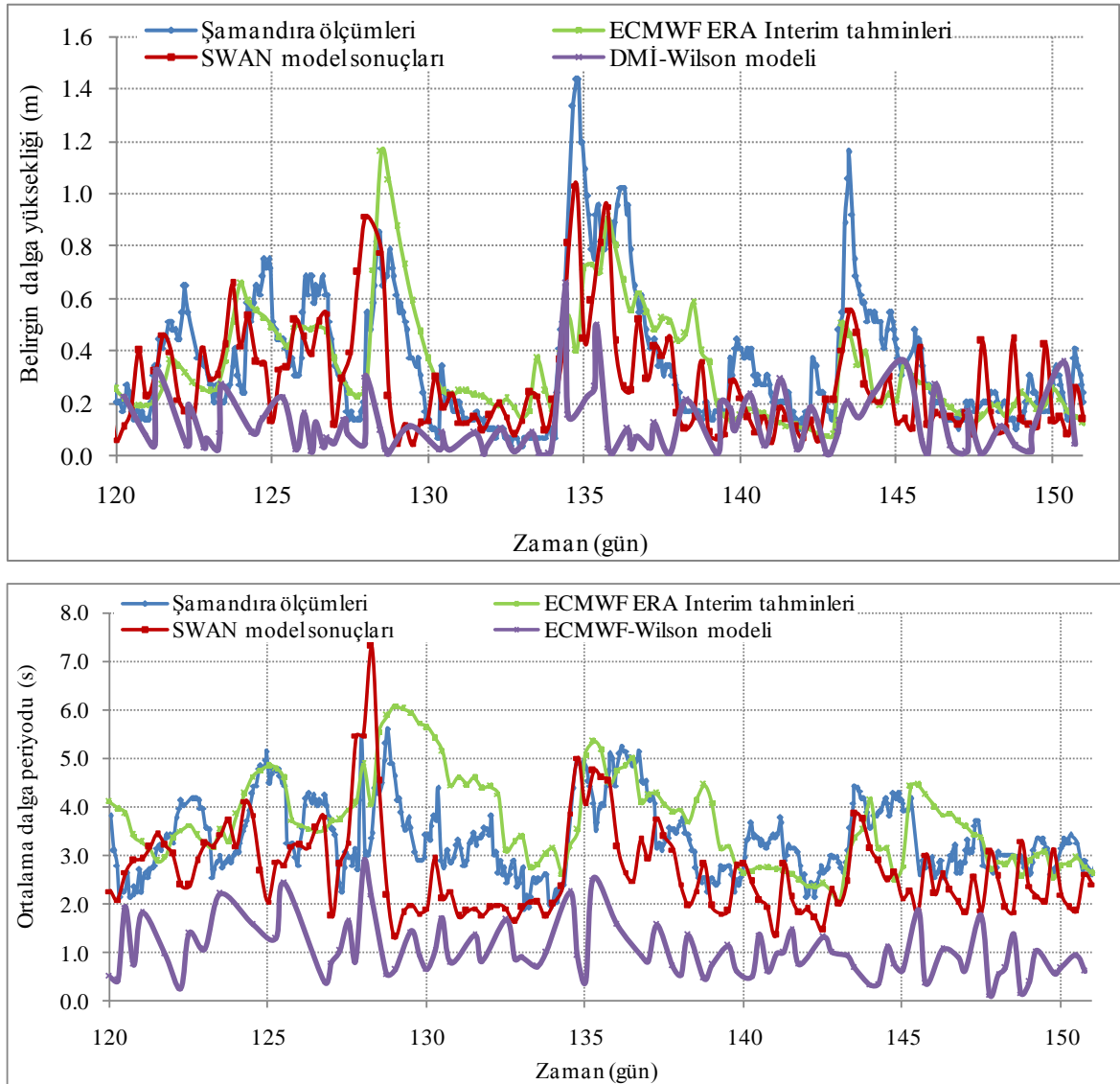
	Belirgin dalga yüksekliği ( m )		Ortalama dalga periyodu ( s )		Ortalama dalga yönü ( derece )	
	RMS hatası	R	RMS hatası	R	RMS hatası	R
Hopa şamandıra istasyonu						
ERA 40 veri tabanı	0.435	0.751	1.501	0.238	87.306	0.247
ERA Interim veri tabanı	<b>0.367</b>	<b>0.776</b>	<b>1.056</b>	<b>0.639</b>	<b>86.217</b>	<b>0.296</b>
Operasyonel veri tabanı	0.400	0.662	1.347	0.455	277.57	0.306
Sinop şamandıra istasyonu						
ERA 40 veri tabanı	0.509	0.740	1.238	0.459	179.73	0.138
ERA Interim veri tabanı	<b>0.372</b>	<b>0.844</b>	<b>0.952</b>	<b>0.794</b>	<b>176.17</b>	<b>0.444</b>
Operasyonel veri tabanı	0.487	0.769	1.211	0.493	190.31	0.338

#### 2.4.4. Model Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi

Çalışmanın doğrulama analizinin bulgularına göre, basitleştirilmiş dalga tahmin modellerinden uygulanan şekliyle baz alınan zaman dilimi için Sinop istasyonunda ECMWF ERA Interim rüzgar verilerini kullanarak uygulanan SPM yönteminin en iyi model ( $H_s$  için  $R = 0.576$  ve  $T_z$  için  $R = 0.066$ ) olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, Hopa istasyonunda ise DMİ rüzgar verilerini kullanarak uygulanan Wilson yönteminin en iyi model ( $H_s$  için  $R = 0.442$  ve  $T_z$  için  $R = 0.078$ ) olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki uygulama noktası ve ele alınan zaman dilimi için ECMWF veri tabanlarından ECMWF ERA Interim dalga modelinin diğer ECMWF dalga tahmin modellerine göre daha iyi ( $H_s$  için  $R = 0.776$  ve  $T_z$  için  $R = 0.639$ ) olduğu belirlenmiştir.

Doğrulama analizi sonucunda, SWAN analiz sonuçlarının şamandıra verileri ile basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerine göre çok daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, şamandıra verilerine kıyasla, SWAN sonuçlarının ECMWF veri tabanları dalga tahminlerinin zamansal eğilimlerinden daha iyi bir eğilim içinde oldukları ve şamandıra verilerini daha iyi takip ettikleri de görülmüştür. Ayrıca, ECMWF veri tabanı yalnızca açık deniz şartları için geçerli bir veri tabanıdır ve alansal çözünürlüğü SWAN modelinkine göre oldukça kabadır. SWAN modeli ise hem açık deniz şartlarını hem de yakın kıyı dalga modellemesini kapsamaktadır. Şekil 2.28, tahmin modellerinin performanslarının kendi içlerinde irdelenmesi sonucunda elde edilen en iyi SWAN model ve basitleştirilmiş dalga tahmin sonuçlarının ve ECMWF veri tabanı tahminlerinin dalga ölçümleri ile bir aylık periyotta zamansal değişimlerinin kıyaslamasını sunmaktadır. Bunların yanında, SWAN model sonuçları daha önceden gerçekleştirilmiş METU3 dalga tahmin sonuçları ile de kıyaslanmış ve SWAN model

sonuçlarının METU3 tahminlerine göre dalga ölçüm verilerinin zamansal değişimlerini daha iyi temsil ettiği görülmüştür. Bundan dolayı, çalışmanın sonraki bölümleri için veri tabanı olarak SWAN model sonuçlarından oluşturulan veri takımı kullanılmıştır.



Şekil 2.28. Hopa şamandıra istasyonunda 1995 yılı Mayıs ayı için oluşturulan en iyi modellerin ve ECMWF veri tabanının dalga tahminlerinin ölçüm verileri ile kıyaslanması

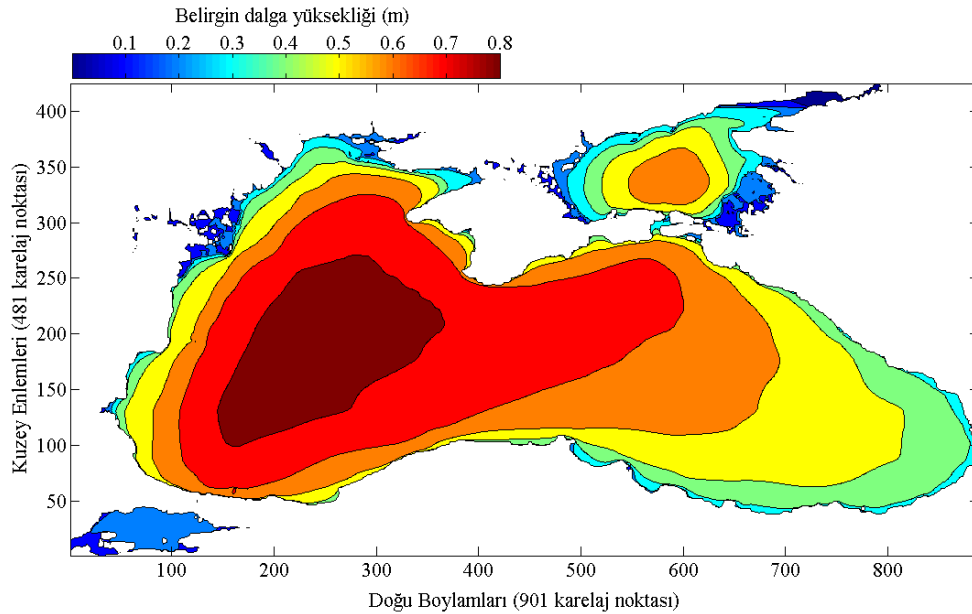
## 2.5. Karadeniz’de Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, 15 yıllık süre için gerçekleştirilen SWAN model sonuçları kullanılarak Karadeniz’de dalga gücünün alansal değişimleri aylık, mevsimlik ve yıllık bazda incelenmiştir. Bu maksat için, SWAN benzeşimi sonucunda oluşturulan veri

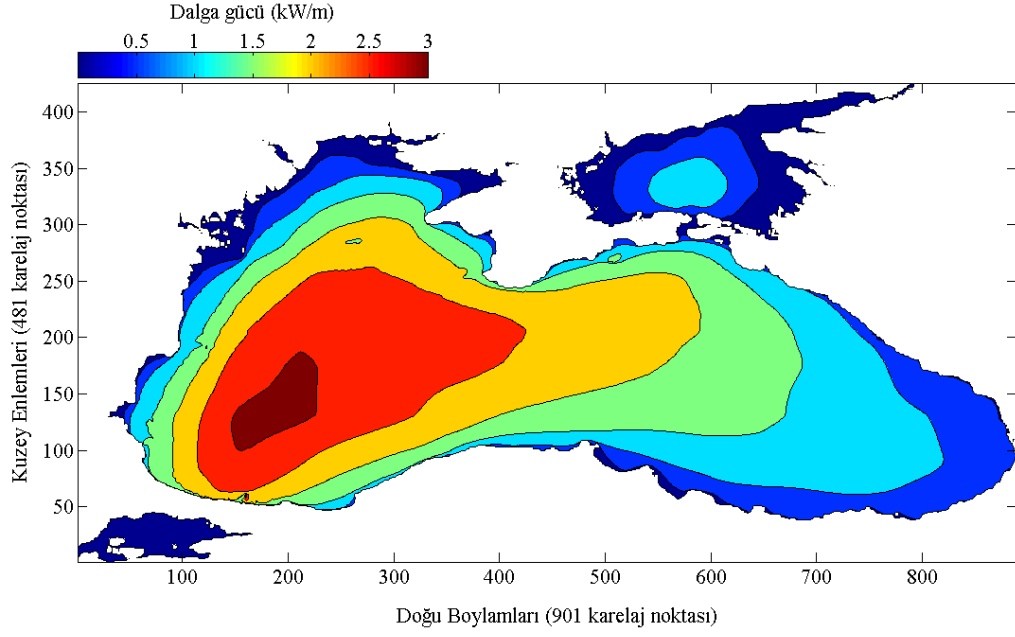
tabanındaki 21900 alansal dağılım haritaları kullanılmıştır. Öncelikle, ortalama yıllık dalga gücünün alansal dağılımı, 21900 benzeşimin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Daha sonra, her ayda 4 benzeşim olduğundan bu dört alansal dağılım haritasının ortalaması alınarak her ayın ortalama alansal dağılım haritaları üretilmiştir. Bu aylık ortalamalar kullanılarak, dalga gücünün mevsimlik haritaları, önce her yılın her mevsimi için ( $3*4=12$  benzeşim) tahmin edilen alansal dağılım haritalarının daha sonra 15 yıllık sürede her yıl için elde edilen bu haritaların ortalamaları ( $12*15=180$  benzeşim) alınarak üretilmiştir. Her ayın ortalama dalga gücü alansal dağılım haritası ise, 15 yıllık sürede her ay için elde edilen ortalama alansal dağılım haritalarının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Örneğin, ocak ayının ortalama dalga gücü alansal dağılım haritası 60 ( $4*15$ ) ayrı benzeşimin ortalaması alınarak üretilmiştir.

### 2.5.1. Ortalama Yıllık Dalga Gücünün Alansal Dağılımının Belirlenmesi

Çalışmada, dalga karakteristiklerinin alansal dağılımlarını elde edebilmek için, SWAN analizi sonucunda oluşturulan 15 yıllık veri tabanı kullanılmıştır. 15 yıllık bir süre için elde edilen toplamda 21900 adet alansal dağılım kaydının ortalaması alınarak her dalga karakteristiğinin yıllık ortalama alansal dağılım haritaları üretilmiştir. Bu şekilde üretilen ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga gücünün ortalama yıllık alansal dağılımları, Şekil 2.29 ve 2.30'da bir dalga yüksekliği ve gücü kontur haritası şeklinde sunulmuştur.



Şekil 2.29. SWAN model sonuçlarına dayanan Karadeniz'in ortalama yıllık belirgin dalga yüksekliği dağılımı



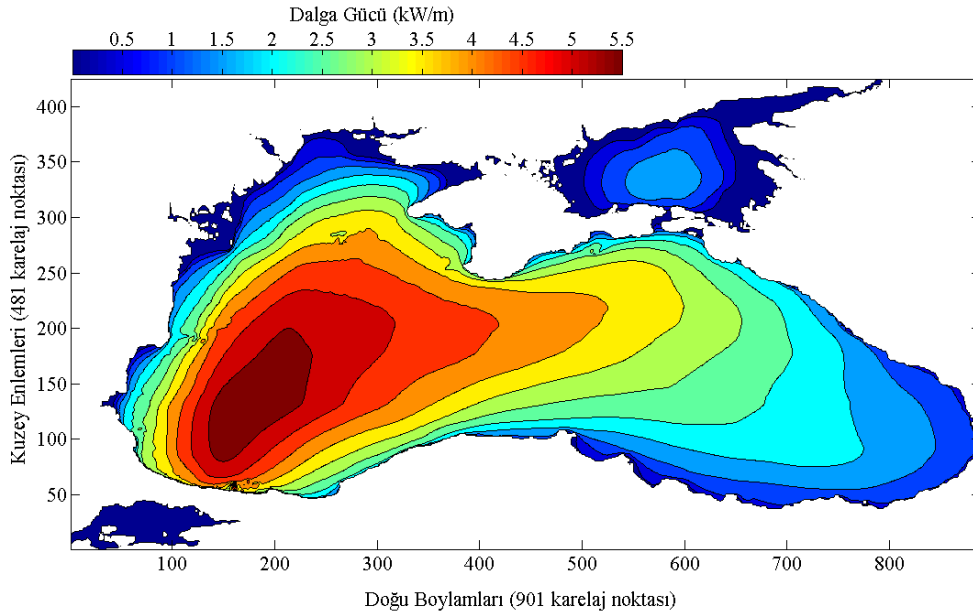
Şekil 2.30. SWAN model sonuçlarına dayanan Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı

Bu kontur haritalarından aşağıda sıralanan bazı önemli sonuçlar sunulmuştur:

- Karadeniz'in tümü dikkate alındığında, batı bölümünün (özellikle güneybatısının) doğu kesimine oranla, dalgalardan daha çok etkilendiği ve daha yüksek dalga gücünün olduğu belirlenmiştir.
- Türkiye'nin Karadeniz kıyıları göz önüne alındığında, ortalama dalga gücünün en yüksek Trakya kıyılarında olduğu görülmüştür.
- Karadeniz'in doğu kesiminde 1.5 kW/m dalga gücü kapasiteli 0.5 m belirgin dalga yüksekliğine sahip dalgaların olduğu gözlemlenmiştir. Karadeniz'in batısının 0.8 m yüksekliğinde ve 2.5 kW/m enerji kapasiteli dalgalara maruz kaldığı belirlenmiştir.
- Karadeniz'in batı kesiminde, doğusuna kıyasla daha yüksek dalga gücü kapasiteli (3 kW/m mertebesine kadar) ve daha büyük dalgaların olduğu görülmüştür.
- Karadeniz'in batı kesiminde dalga yükseklikleri ortalaması, Doğu Karadeniz'e oranla yaklaşık % 160 ve dalga gücü ortalaması yaklaşık % 250 daha büyüktür.
- Karadeniz'de dalga gücü kaynağı 0.1 kW/m'den 3 kW/m'ye değişim göstermektedir.

### 2.5.2. Ortalama Mevsimsel Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi

Dalga yüksekliği koşulları ve ilişkin dalga gücü, hava şartlarına bağlıdır. Bu yüzden, bu şartlar günden güne, mevsimden mevsime ve yıldan yıla farklılık gösterebilmektedir. Ortalama değerlerden sapmanın önemli bir bölümünün genelde mevsimsel değişimlerden kaynaklandığı bilinmektedir. Bundan dolayı, ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ve dalga gücünün alansal değişimleri, her mevsim için ayrı ayrı hesaplanmıştır. On beş yıllık periyotta, Karadeniz için dalga gücünün ortalama mevsimsel dağılımları, Şekil 2.31 - 2.34'te ve belirgin dalga yüksekliğinin ortalama mevsimsel dağılımları ise Ek Şekil 6.1'de sunulmuştur.



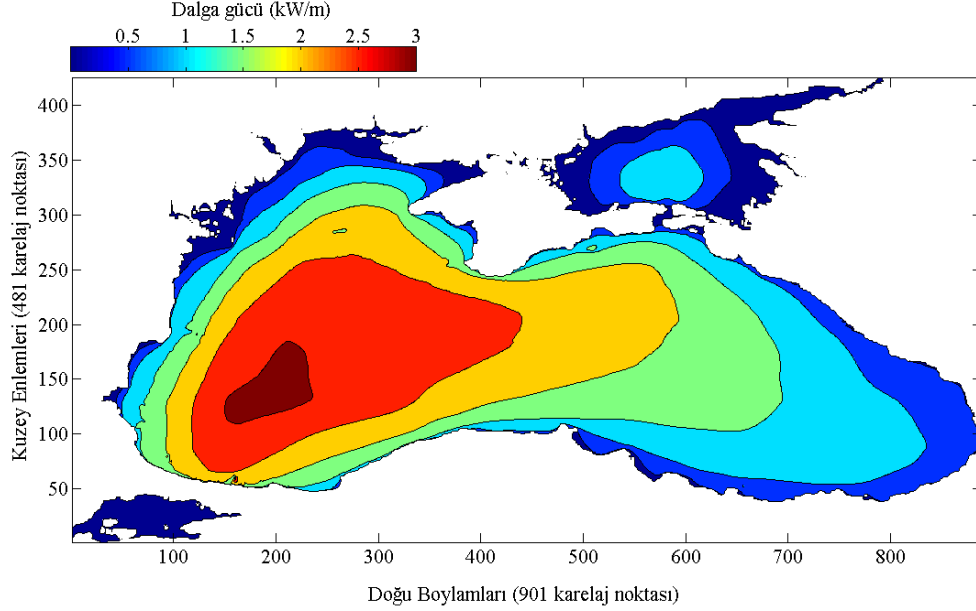
Şekil 2.31. SWAN model sonuçlarına dayanan kış mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı

Şekil 2.32 ve 2.33, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinin çok benzer ortalama dalga gücü dağılımlarına sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bir dalga gücü dönüşüm sistemi, bu mevsimler için tasarlanırsa yılın yarısı için optimum güç üretebilecektir. İlkbahar ve sonbahar mevsimleri için ortalama dalga gücü kaynağı 1.1 kW/m ve 1.5 kW/m arasında değişmektedir. Kış mevsiminin ortalama dalga gücü kaynağı ise 3 kW/m ve 5.5 kW/m arasındadır.

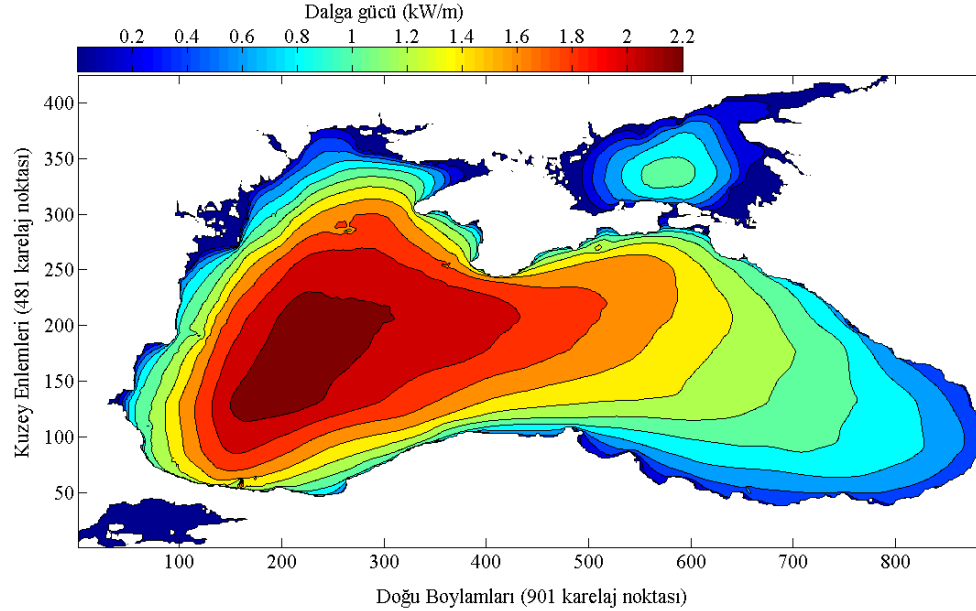
Karadeniz genelinde dalga yüksekliği ve gücü ortalamalarının beklenildiği gibi yaz mevsiminde en küçük oldukları, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimleri sıralamasıyla daha yüksek değerlere ulaştıkları görülmektedir. Yaz mevsimi için dalga gücü kontur haritası bu mevsimin



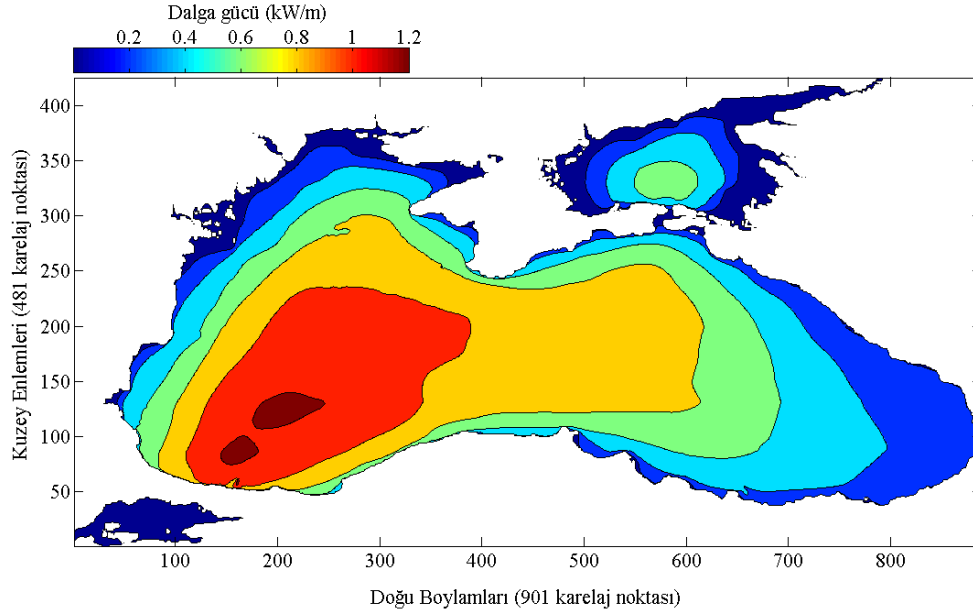
0.2 kW/m'den 1.2 kW/m'ye değişen deniz kaynaklı en düşük ortalama dalga gúcüne sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 2.34). Dalga enerji yoğunluğunun yaz ve kış mevsimleri ortalamaları karşılaştırıldığında yaklaşık 4.5 kat düzeyinde bir değişimin olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.32. SWAN model sonuçlarına dayanan sonbahar mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı



Şekil 2.33. SWAN benzeşim sonuçlarına dayanan ilkbahar mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı



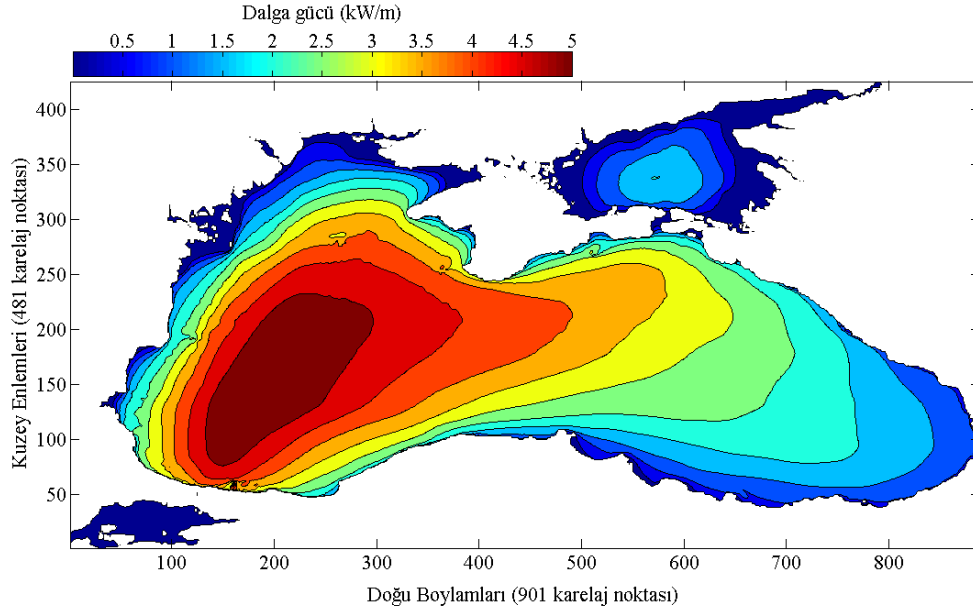
Şekil 2.34. SWAN model sonuçlarına dayanan yaz mevsimi için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı

### 2.5.3. Ortalama Aylık Dalga Gücünün Alansal Dağılımlarının Belirlenmesi

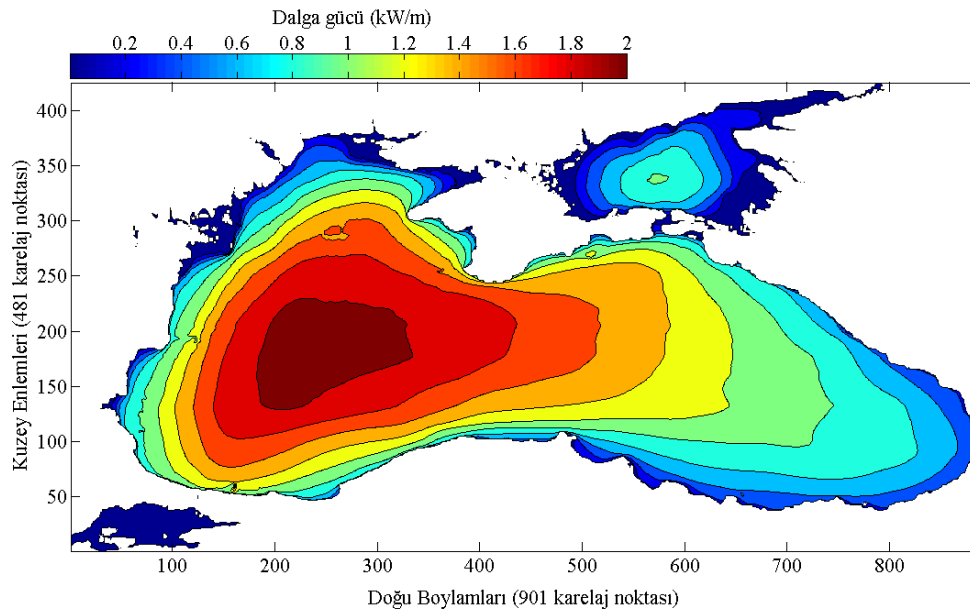
Bu çalışmada, yıllık ve mevsimlik ortalama alansal dağılım haritalarının elde edilmesinden sonra, çalışma bölgesinde dalga gücü potansiyelinin aylık olarak nasıl değiştiği de irdelenmiştir. SWAN analizi sonucunda oluşturulan 15 yıllık veri tabanı, aylık ortalama dalga karakteristiklerinin dağılım haritalarını üretmek için kullanılmıştır. Bu kapsamda, 15 yıl süre için her bir yıldaki her ayın verileri kullanılarak her ay için ortalama aylık belirgin dalga yüksekliği ve dalga gücü alansal dağılım haritaları (günde 4 kayıt ve 15 yıl söz konusu olduğundan toplamda her ay için 1800 kaydın ortalaması) üretilmiştir. Burada, aylık bazda genel bir değerlendirme yapabilmek için Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim ayları için ortalama dalga gücünün alansal dağılımları Şekil 2.35 - 2.38'de verilmiştir. Bu aylar sırasıyla kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerini temsil etmektedir.

Ortalama aylık alansal haritalar ve onların ilişkili oldukları ortalama mevsimlik alansal haritalar incelendiğinde, bu haritalar arasında benzerliğin olduğu belirlenmiştir. Karadeniz'de dalga enerji dönüştürücü sistemi kurmayı planlayacak özel sektör veya Devlet Kurumları için aylık, mevsimlik ve yıllık bazda oluşturulan bu haritalar, sistemin tasarımı için önemli bir veri kaynağı görevi üstlenebilecektir. Planlanacak sistemin kurulu gücü yine bu aylık alansal dağılım haritalarının değerlendirilmesi sonucunda rahatlıkla belirlenebilecektir. Ayrıca, bu çalışma, Karadeniz'de kurulması gündeme gelebilecek bir

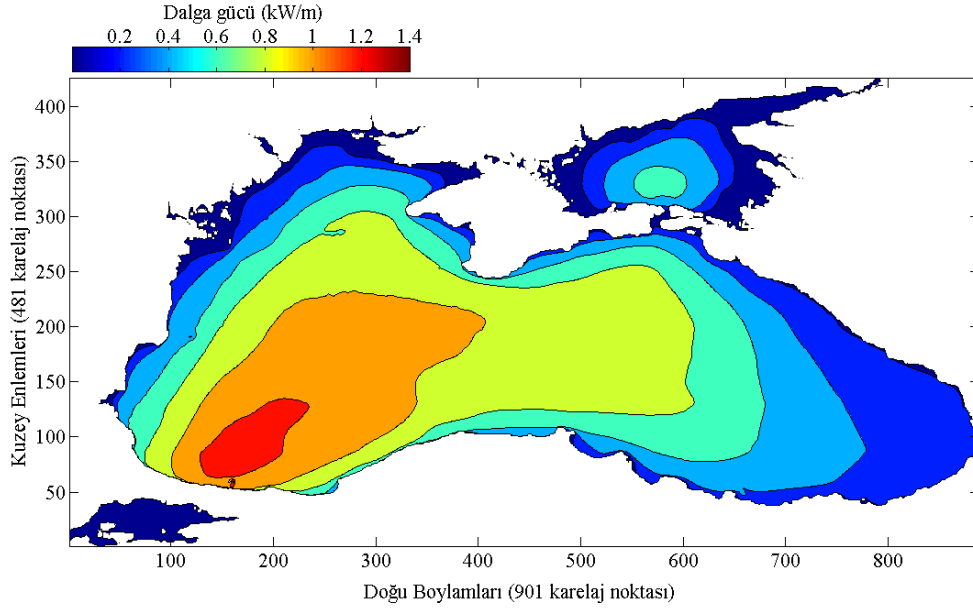
dalga enerji santralının öncelikle kurulması gereken bölgeler için de bir fizibilite çalışması niteliğindedir. On beş yıllık periyotta Karadeniz için belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga gücünün ortalama aylık alansal dağılımları tüm aylar için Ek Şekil 6.2 – 6.7’de sunulmuştur.



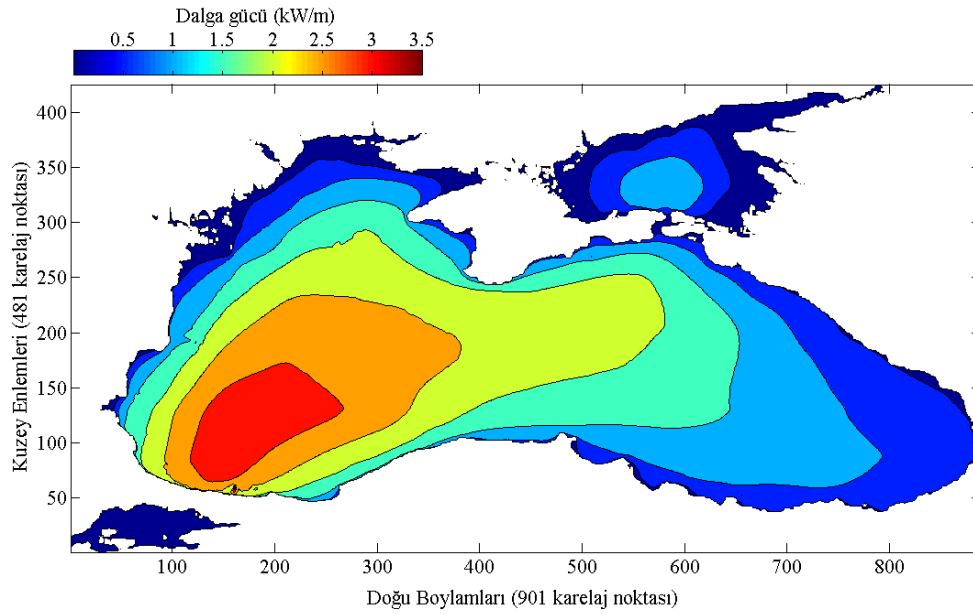
Şekil 2.35. SWAN model sonuçlarına dayanan Ocak ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı



Şekil 2.36. SWAN model sonuçlarına dayanan Nisan ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı



Şekil 2.37. SWAN model sonuçlarına dayanan Temmuz ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı



Şekil 2.38. SWAN model sonuçlarına dayanan Ekim ayı için Karadeniz'in ortalama yıllık dalga gücü dağılımı

## 2.6. Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Dalga Gücünün İrdelenmesi

### 2.6.1. Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Ortalama Yıllık ve Mevsimlik Dalga Gücü Değişiminin Kıyaslanması

Bu bölümde, dalga gücünün değişkenliliği Sinop'tan Hopa'ya (Sinop, Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa) kadar toplam yedi istasyonda detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu istasyonların yerleri ve genel karakteristikleri, Şekil 2.39 ve Tablo 2.13'te sunulmuştur.



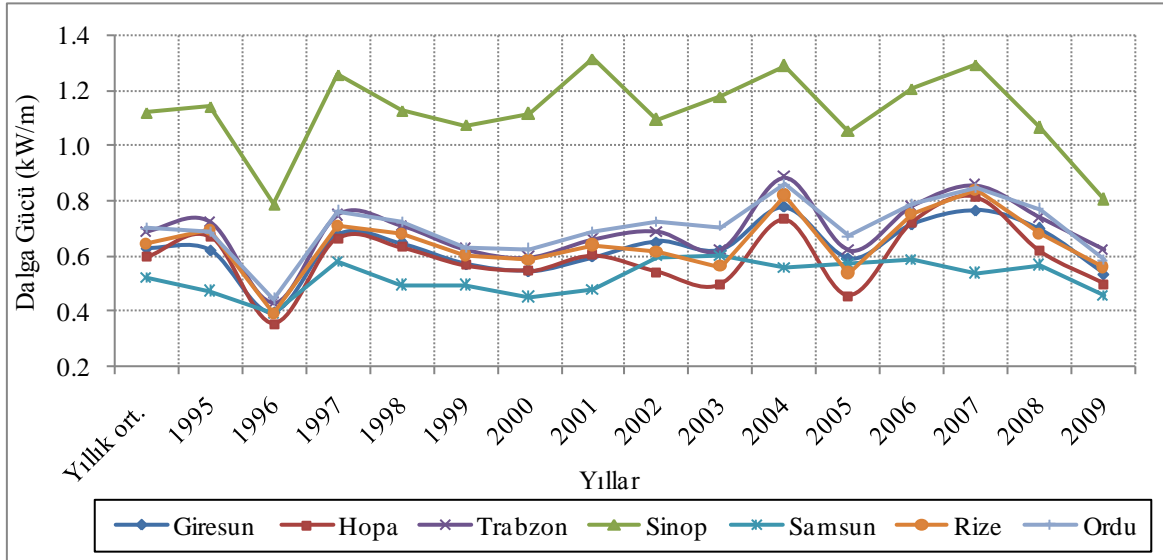
Şekil 2.39. Dalga gücünün değişiminin irdelendiği istasyonlar (URL-3, 2011)

Orta ve Doğu Karadeniz'de dalga gücünün değişkenliliğinin detaylı irdeleneceği istasyonların batıdan doğuya doğru birinci ve sonuncu istasyonlar, dalga ölçümü mevcut olan Sinop ve Hopa şamandıra istasyonları ile çakışacak şekilde seçilmiştir. Aynı zamanda, seçilen tüm istasyonlar derin deniz şartlarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bunun yanında, dalga enerji dönüşüm sistemlerinin kurulabileceği 50 – 250 m derinlikleri arasına denk düşmelerine dikkat edilmiş yalnızca bir istasyonda biraz daha derin noktada irdeleme yapılmıştır. Bunun amacı, gelişen teknolojiye paralel olarak bu derinlikte de dalga enerji dönüşüm sistemlerinin kurulmasının ekonomik olabileceğidir.

Tablo 2.13. Dalga gücü değişiminin irdelendiği istasyonların genel karakteristikleri

İstasyon Adı	Kuzey Enlemi	Doğu Boylamı	Derinlik (m)
Sinop	42°07'24''	35°05'12''	100
Samsun	41°30'00''	36°20'00''	85
Ordu	41°05'00''	38°00'00''	90
Giresun	41°00'00''	38°23'17''	245
Trabzon	41°05'00''	39°45'40''	330
Rize	41°05'00''	40°30'00''	185
Hopa	41°25'24''	41°23'00''	100

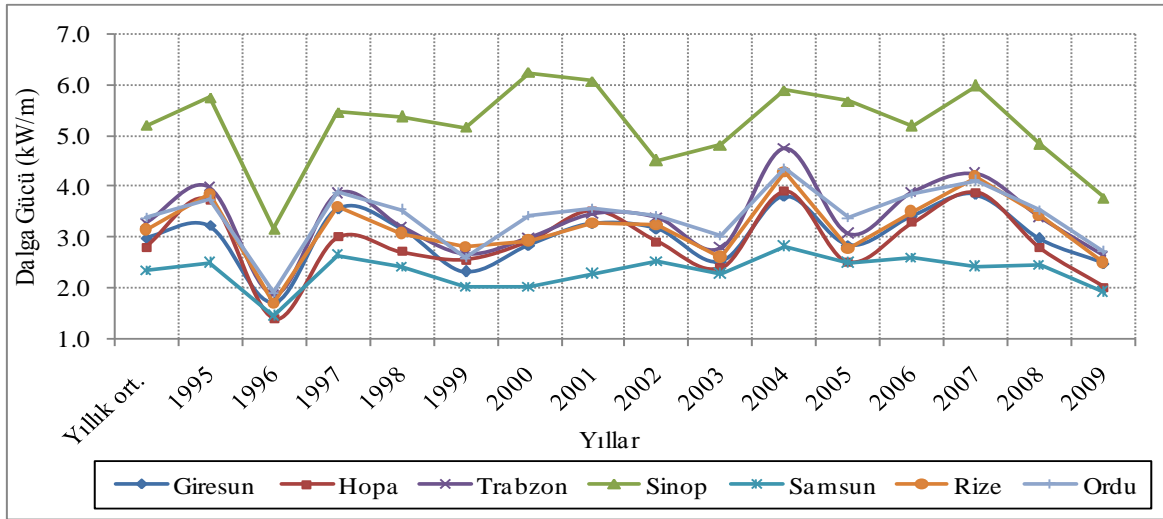
Belirlenen bu istasyonlarda yıllık dalga gücü değişkenliliği temel istatistiksel parametrelere dayanarak tanımlanmıştır. Bu parametreler; kayıt periyodundaki ortalama dalga gücü, dalga gücünün % 90 aşılma olasılığı (en düşük tahmini dalga gücü şartlarını sunmakta) ve dalga gücünün % 5 aşılma olasılığı (kaydedilmiş ekstrem dalga gücü olaylarını temsil etmekte)'dir. Şekil 2.40, 2.41 ve 2.42, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonun her biri için ayrı ayrı ortalama ve % 90 ve % 5 aşılma ihtimalli dalga gücünün o istasyondaki yıllık değişimlerini göstermektedir. Bu grafiklerden, her istasyon için yıllık dalga gücü dalgalanmasının nispeten küçük olduğu görülmektedir.



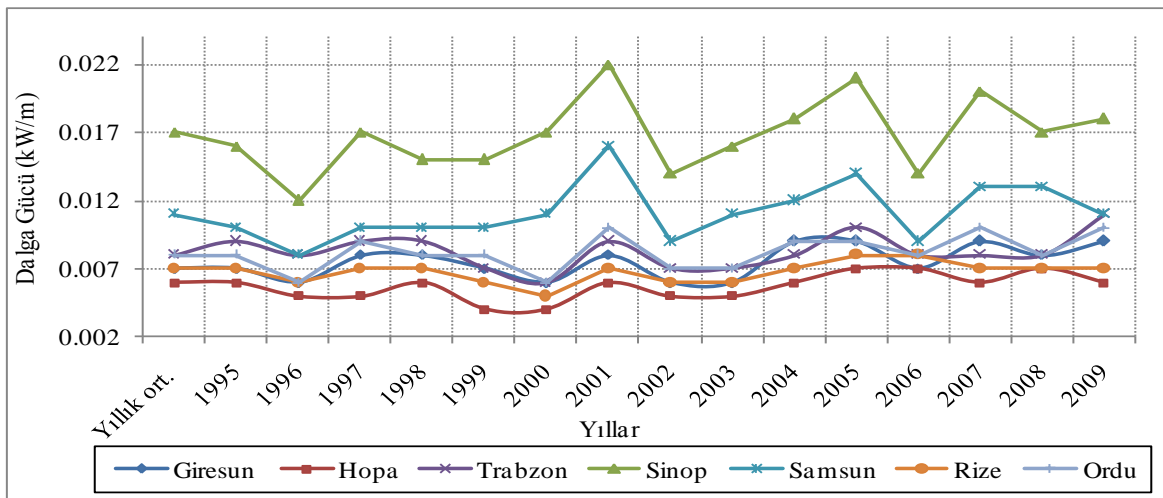
Şekil 2.40. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık ortalama dalga gücü değişimi (ortalama değerler için)

Bütün istasyonlarda ortalama dalga gücünün yıllık değişimlerinin çok az bir dalgalanma gösterdiği ve en düşük dalga gücü şartlarının olduğu değerlerin ise sıfıra çok

yakın olduğu gözlemlenirken, ekstrem dalga gücü şartlarında her istasyon için yaklaşık 2 kW/m’lik bir dalgalanmanın söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ekstrem dalga gücü şartlarının, en yüksek Sinop istasyonunda (yaklaşık 5.2 kW/m) ve en düşük Samsun istasyonunda (yaklaşık 2.3 kW/m) olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 3.2 kW/m) görülmektedir. Ortalama dalga gücü şartlarının ise, en yüksek Sinop istasyonunda yaklaşık yıllık ortalama 1 kW/m ve en düşük Samsun istasyonunda yaklaşık yıllık ortalama 0.5 kW/m civarında olduğu, genel bir eğilim olarak ortalama dalga gücü şartlarının Sinop istasyonundan Hopa istasyonuna doğru küçüğe olsa bir azalış eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır.



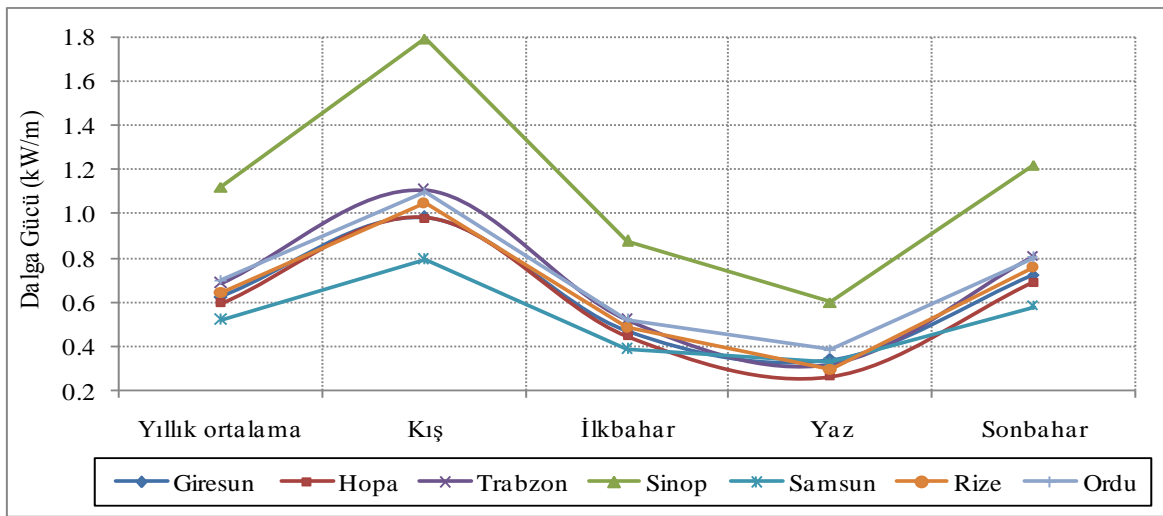
Şekil 2.41. Türkiye’nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık dalga gücü değişimi (%5 aşılma ihtimalli değerler için)



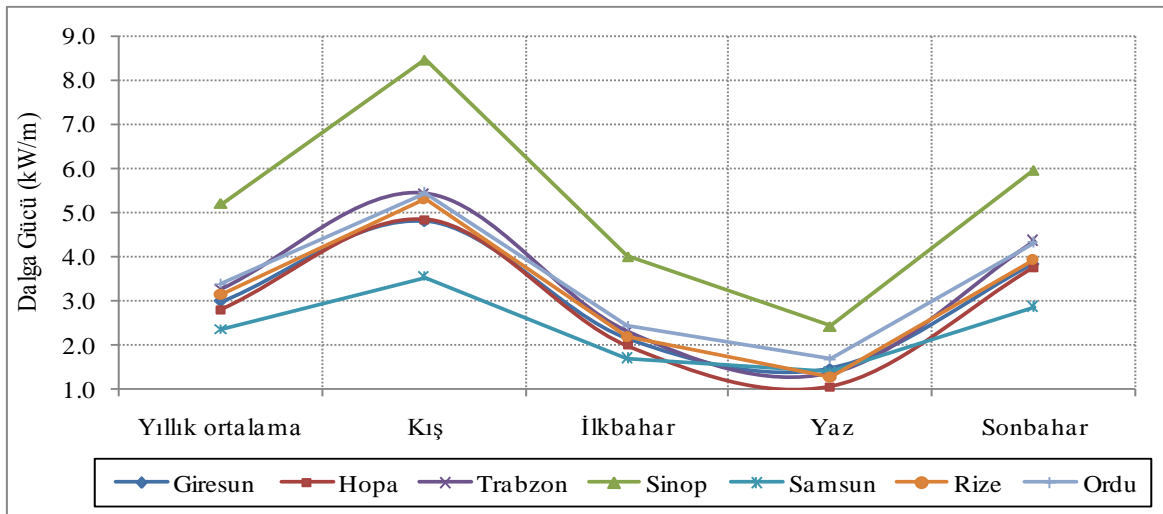
Şekil 2.42. Türkiye’nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda 1995-2009 yılları arası için yıllık dalga gücü değişimi (%90 aşılma ihtimalli değerler için)



Yıllık değişimlerde irdelenen istatistiksel parametreler, aynı zamanda her istasyon için, ortalama yıllık kayıt ve her mevsim için de ayrı ayrı belirlenmiş ve Şekil 2.43, 2.44 ve 2.45'te sunulmuştur. Bu şekillerden, her istasyonda tahmini maksimum dalga gücünün kış mevsiminde olduğu gözlenirken, aynı zamanda sonbahar mevsiminin de her istasyonda, yaz ve ilkbahar mevsimlerine kıyasla daha yüksek seviyelerde dalga gücüne maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, bütün istasyonlarda üç istatistiksel parametre için de kış ve sonbahar mevsimlerinde elde edilebilecek dalga gücü şartlarının yıllık ortalama dalga gücünden daha yüksek olduğu görülmektedir.

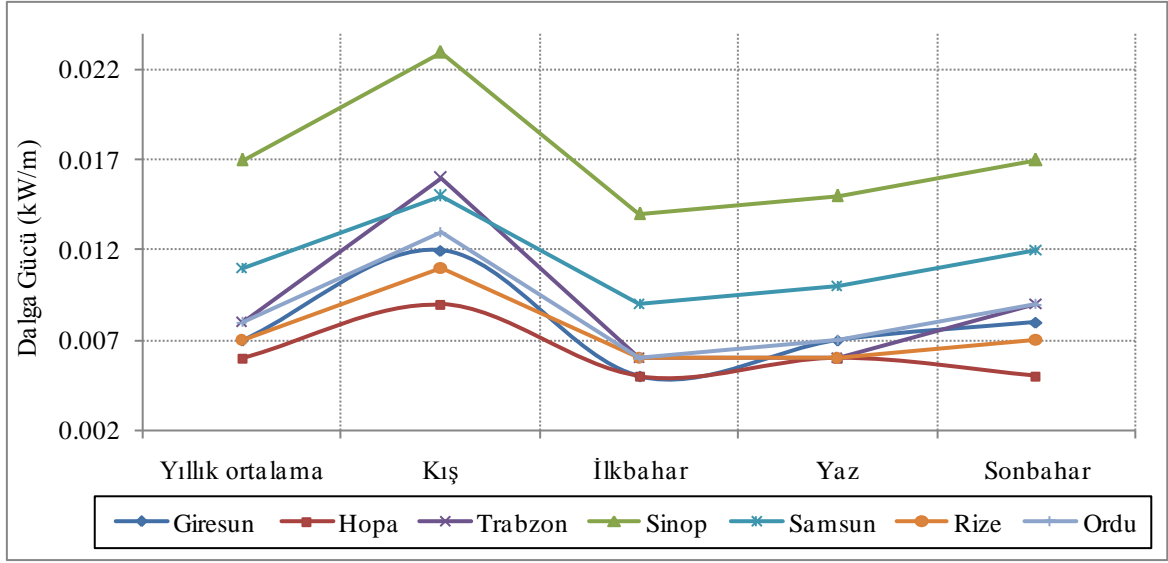


Şekil 2.43. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (ortalama değerler için)



Şekil 2.44. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (%5 aşılma ihtimali değerler için)





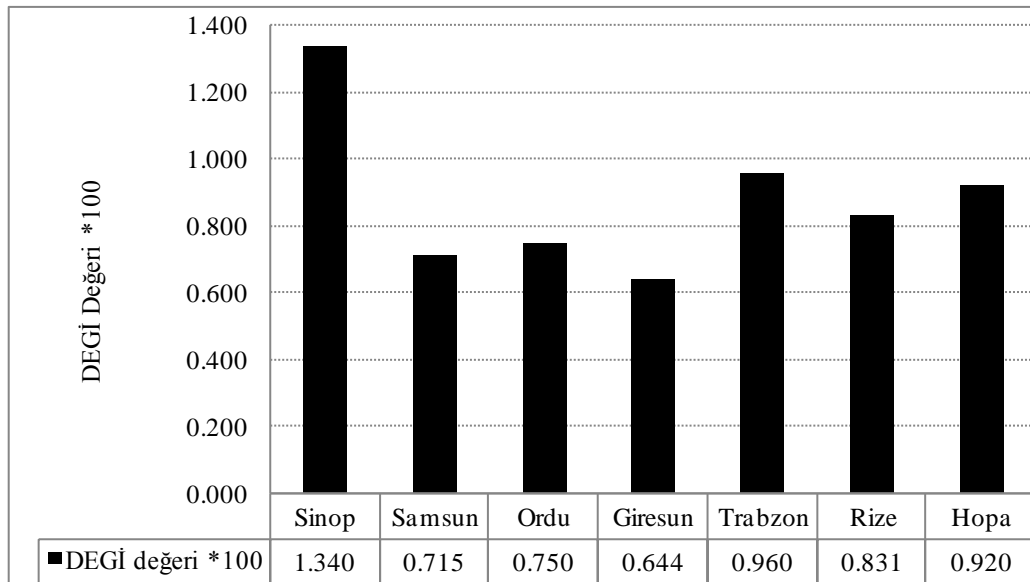
Şekil 2.45. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda mevsimsel dalga gücü değişimleri (%90 aşılma ihtimalli değerler için)

Bütün istasyonlarda ortalama dalga gücünün mevsimlik değişimlerinin yıllık değişimlerde olduğu gibi küçük bir dalgalanma gösterdiği ve en düşük dalga gücü şartlarının olduğu değerin ise yine sıfıra çok yakın olduğu gözlemlenirken, ekstrem dalga gücü şartlarında her istasyon için yaklaşık 4 kW/m'lik bir dalgalanmanın söz konusu olduğu anlaşılmaktadır. Bütün istasyonlarda en yüksek dalga gücünün olduğu kış mevsiminde, ekstrem dalga gücü şartlarının en yüksek Sinop istasyonunda (yaklaşık 8.5 kW/m) ve en düşük Samsun istasyonunda (yaklaşık 3.5 kW/m) olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 5.0 kW/m) görülmektedir. Ortalama dalga gücü şartlarının ise, yine kış mevsiminde en yüksek Sinop istasyonunda yaklaşık yıllık ortalama 1.8 kW/m ve en düşük Samsun istasyonunda yaklaşık yıllık ortalama 0.8 kW/m civarında olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 1.0 kW/m) anlaşılmaktadır. Dalga gücünün en düşük değerde olduğu yaz mevsiminde bütün istasyonlarda ortalama dalga gücü şartlarının 1 kW/m değerinin ve ekstrem dalga gücü şartlarının Sinop istasyonu hariç diğer istasyonlarda 2 kW/m'nin altında olduğu görülmektedir.

### 2.6.2. Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Seçilen Noktaların Dalga Enerjisi Gelişim İndekslerinin Kıyaslanması

Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen istasyonların DEĞİ değerleri, bu istasyonlarda kurulması muhtemel bir dalga gücü dönüşüm sisteminin tasarım

maliyetlerinin hangi istasyonda daha düşük olacağına yönelik bir değerlendirme yapabilmek amacıyla belirlenmiştir (Şekil 2.46). Bu şekilde de görülebileceği gibi, istasyonlarda dalga enerji dönüşüm sistemlerinin kurulmasının planlanması durumunda, bütün istasyonların genellikle birbirine yakın yatırım maliyeti getirecekleri anlaşılmaktadır. İstasyonların kendi içinde kıyaslanması durumunda ise, 1.34'lük DEĞİ değeri ile Sinop istasyonunun en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bu istasyonu sırasıyla Trabzon, Hopa ve Rize istasyonları izlemektedir. Tüm istasyonlar içinde düşük tasarım maliyeti getirecek istasyonlar ise Ordu, Samsun ve Giresun istasyonlarıdır. Diğer bir deyişle, Sinop istasyonunda kurulması muhtemel bir dalga güç istasyonunun ömrünün sürdürülebilirliğinin sağlanması için diğer istasyonlara kıyasla en fazla sermaye yatırımının gerekli olduğunu göstermektedir.



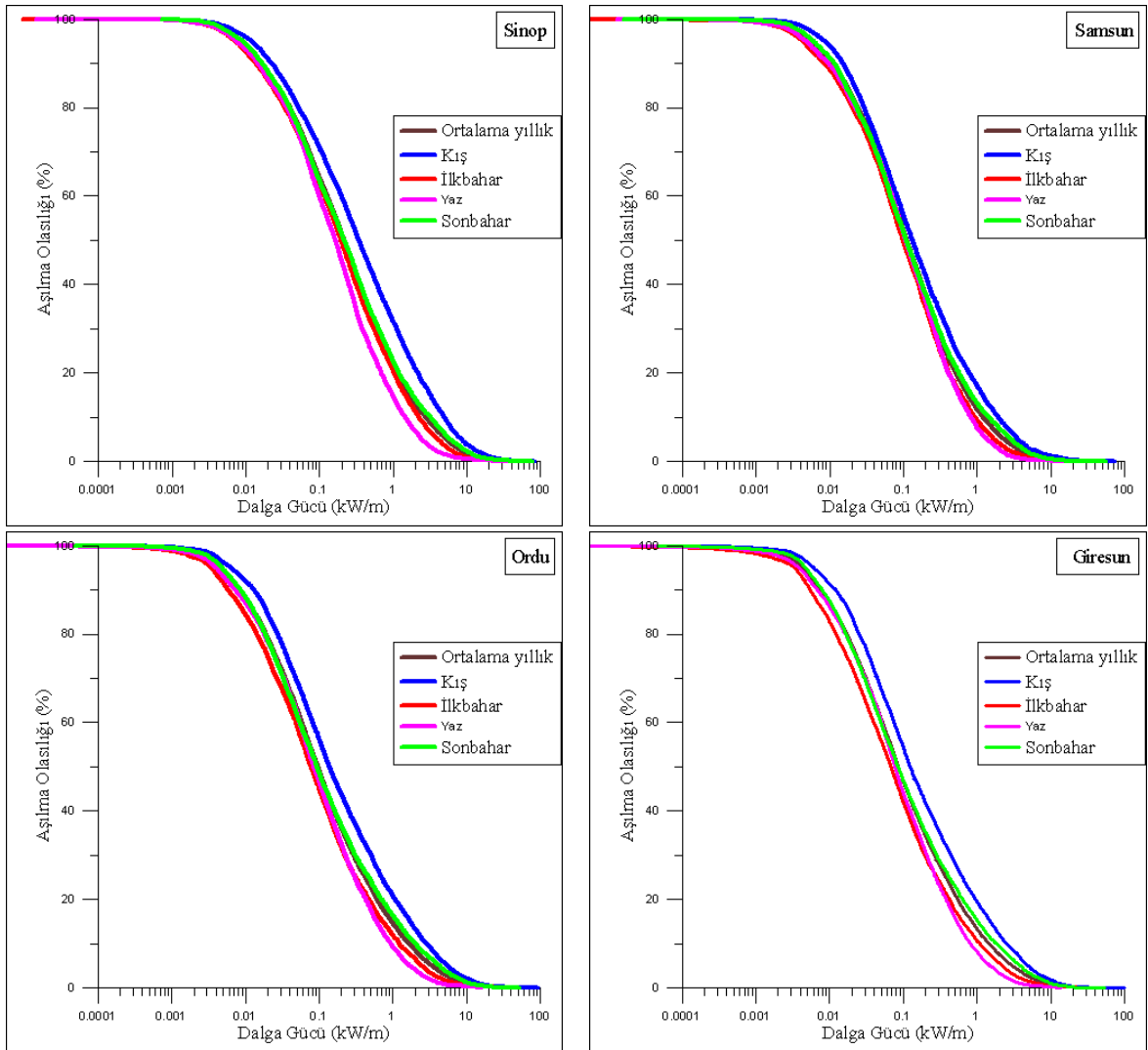
Şekil 2.46. Her istasyon için DEĞİ değerlerinin bir kıyaslaması

### 2.6.3. Seçilen İstasyonlarda Tahmini Dalga Gücü Süreklilik Eğrileri (Aşılma Olasılıkları)

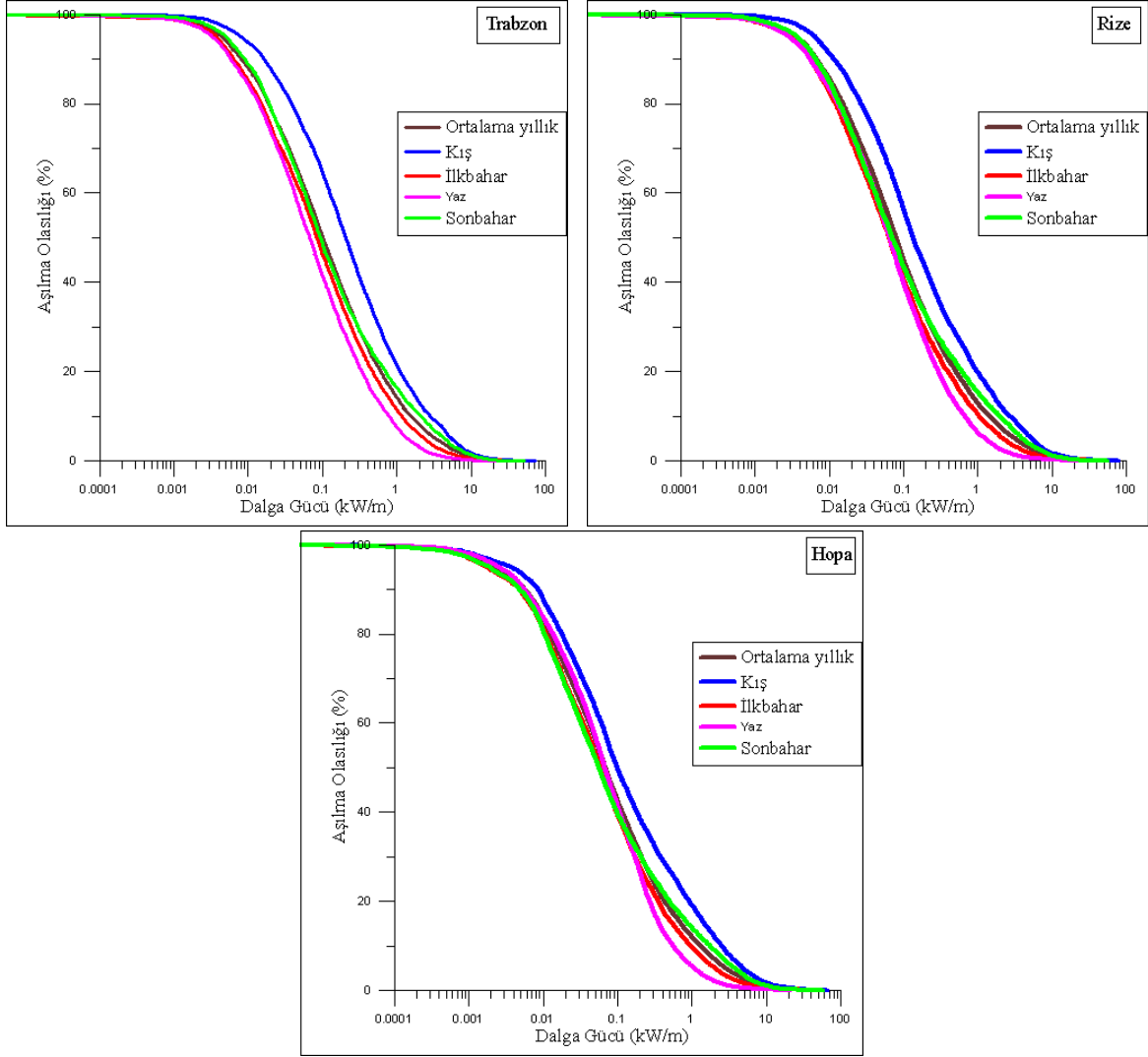
Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyıları boyunca seçilen istasyonlarda DEĞİ değerlerinin irdelenmesinden sonra, her bir istasyon için kurulması muhtemel bir dalga güç tesisinin tasarımında ihtiyaç duyulacak güvenilir gücün hesabında önem arz eden aşılma olasılıkları hesaplanmış ve Bölüm 1.10'da izah edildiği gibi dalga gücü süreklilik eğrileri çizilmiştir. Ancak, çizilen eğriler tam olarak birbirinden ayırt edilemediğinden ve her bir

eğrideki farkın daha iyi gözlenebilmesi için dalga gücü aşılma olasılıkları dikey eksen, dalga güçleri yatay eksen olacak şekilde ve yatay eksen logaritmik seçilerek çizilmiştir.

Bu çalışmada seçilen her bir istasyonun mevsimsel dalga gücü aşılma olasılığı diyagramları, Şekil 2.47 ve 2.48’de sunulmaktadır. Bu şekillerden bütün istasyonlar için beklenildiği gibi, kış mevsiminde oluşan dalga gücü aşılma olasılığının yaz mevsimininkine göre belirgin bir şekilde yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, bütün istasyonlarda, ortalama yıllık dalga gücü aşılma olasılığının sonbahar mevsimininkine benzer bir eğilim içinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.47. Sinop, Samsun, Ordu ve Giresun istasyonlarında farklı güç seviyelerinin mevsimlik aşılma olasılıkları

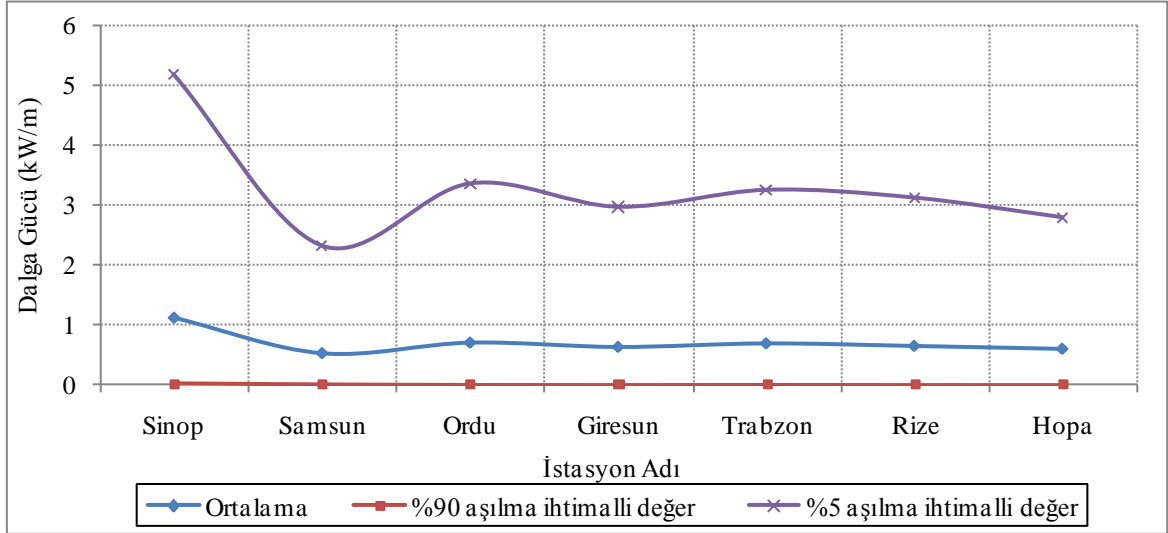


Şekil 2.48. Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında farklı güç seviyelerinin mevsimlik aşılma olasılıkları

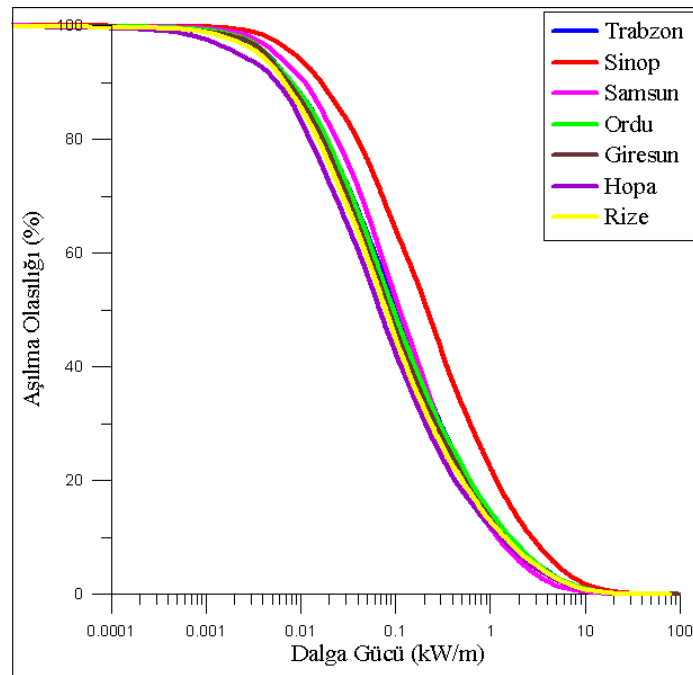
#### 2.6.4. Odaklanılan İstasyonlarda Dalga Gücü Değişimlerinin Kıyaslanması

Bu çalışmada odaklanılan her istasyonun mevsimsel ve yıllık dalga gücü değişimlerinin incelenip kendi içlerinde irdelenmesinden sonra, istasyonların kendi aralarında bir kıyaslanması da gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için, her istasyonun ortalama yıllık dalga gücünün istatistiksel parametreleri, Şekil 2.49'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Odaklanılan bütün istasyonlarda dalga gücünün aşılma olasılıkları ise, Şekil 2.50'de verilmektedir. Şekil 2.49, odaklanılan istasyonlardan Sinop istasyonunun en yüksek dalga gücü kaynağına sahip olduğunu ve bu istasyondan bir sonraki istasyonun ise en düşük dalga gücüne sahip olduğunu (seçilen nokta bir koy alanını temsil etmekte) göstermektedir. Diğer

istasyonların ise yıllık ortalama bazdaki bütün istatistiksel parametreler düşünülürken bile birbirine çok yakın dalga gücü potansiyeline sahip oldukları anlaşılmaktadır. Bu istasyonların ortalama yıllık ortalama dalga gücü yaklaşık 0.7 kW/m'dir. Sinop ve Samsun istasyonları ise sırasıyla yaklaşık 1.1 ve 0.5 kW/m'lik bir ortalama yıllık ortalama dalga gücüne sahiptir.



Şekil 2.49. İstasyonların ortalama yıllık dalga gücünün istatistiksel parametrelerinin bir kıyaslaması



Şekil 2.50. Odaklanılan bütün istasyonların aşılma olasılıklarının kıyaslanması

Giresun ve Ordu istasyonları ile Trabzon ve Rize istasyonlarının dalga gücü aşılma olasılık eğrileri birbirine çok benzerdir ve bu istasyonların benzer dalga gücü şartlarına sahip oldukları anlaşılmaktadır. Giresun ve Ordu istasyonlarının dalga gücü Trabzon ve Rize istasyonlarındakinden biraz daha fazladır. Aynı zamanda, Sinop istasyonunun dalga gücünün diğer istasyonlara göre daha yüksek olduğu da Şekil 2.50'den görülebilmektedir. Bununla birlikte, dalga gücünün Sinop istasyonundan Hopa istasyonuna doğru azalış eğiliminde olduğu da bu değerlendirmeler ışığında doğrulanmaktadır.

#### **2.6.5. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Boyunca Elde Edilebilecek Dalga Enerji Miktarının İrdelenmesi**

Bu çalışma kapsamında, SWAN modellemesi sonucunda oluşturulan 15 yıllık veri tabanından yararlanılarak Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyı şeridinde odaklanılan yedi istasyonda dalga enerjisinin ayrı ayrı belirlenebilmesi için, her bir istasyonun dalga karakteristikleri ( $H_s$  ve  $T_z$ ) gruplandırılmıştır. Her bir grubun toplam oluşma süreleri belirlenerek, Tablo 2.14 ve 2.15'te verilmiştir.

Her gruptaki tüm kayıtların birim boya gelen güçleri, oluşma süreleri (6 saat) ile çarpılarak kayıtların 15 yıllık toplamda birim boya gelen enerjileri kWh/m olarak belirlenmiş, sonra 15 yıllık süreye bölünerek yıllık ortalama dalga gücü enerjileri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2.16 ve 2.17'de verilmiştir. Bu tablolardan görülebileceği üzere Samsun ve Trabzon istasyonlarında kıyıya gelen dalga enerjisinin yaklaşık % 70'i 2 s ile 4 s arasında, diğer istasyonlarda ise yaklaşık ortalama % 85'i 2 s ile 5 s arasında ortalama dalga periyoduna sahip dalgalar tarafından taşınmaktadır (Şekil 2.51). Aynı zamanda, bu tablolardan, 0.5 m ile 2 m arasında belirgin dalga yüksekliğine sahip dalgaların oluşan dalga enerjisine katkılarının bütün istasyonlarda yaklaşık ortalama % 73 olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2.52). Bu değerler, şamandıra ölçümleri düşünüldüğünde, oluşması muhtemel ortalama dalga periyodundan daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum da, SWAN modelin ortalama dalga periyodunu literatürde (Moeini ve Etemad-Shahidi (2009); Lin vd. (2002)) de verildiği gibi düşük tahmin etmesinden kaynaklı olmaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada elde edilen dalga enerji potansiyelleri muhtemelen gerçek değerinden biraz daha düşüktür.

Sinop, Samsun, Giresun, Ordu, Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarındaki toplam yıllık ortalama dalga enerjisi değerleri sırasıyla yaklaşık 10, 5, 6, 6, 6 ve 5 MWh/m.yıl olarak

hesaplanmıştır. Buradan, Karadeniz'in güney batı kıyılarının güney doğu kıyılarına göre daha yüksek bir enerji potansiyeline sahip olduğu ve batıdan doğuya doğru gidildikçe üretilebilecek dalga enerji potansiyelinin azalış eğiliminde olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.53).

Tablo 2.14. Sinop, Samsun ve Ordu istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık toplam oluşma süreleri (saat)

İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>SİNOP</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1986	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1986
	<b>1-2</b>	71868	5664	0	0	0	0	0	0	0	0	77532
	<b>2-3</b>	6528	27078	4512	0	0	0	0	0	0	0	38118
	<b>3-4</b>	0	2082	5838	3462	366	0	0	0	0	0	11748
	<b>4-5</b>	0	0	240	414	810	390	120	6	0	0	1980
	<b>5-6</b>	0	0	0	6	0	36	60	12	6	6	126
	<b>Toplam</b>	80382	34824	10590	3882	1176	426	180	18	6	6	131490
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>SAMSUN</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	3132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3132
	<b>1-2</b>	87810	5772	0	0	0	0	0	0	0	0	93582
	<b>2-3</b>	7656	18126	3138	18	0	0	0	0	0	0	28938
	<b>3-4</b>	0	1878	2238	756	126	0	0	0	0	0	4998
	<b>4-5</b>	0	12	168	360	138	72	6	0	0	0	756
	<b>5-6</b>	0	0	0	6	48	18	0	6	6	0	84
	<b>Toplam</b>	98598	25788	5544	1140	312	90	6	6	6	0	131490
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>ORDU</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	4320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4320
	<b>1-2</b>	83268	1818	0	0	0	0	0	0	0	0	85086
	<b>2-3</b>	10722	18540	1320	0	0	0	0	0	0	0	30582
	<b>3-4</b>	6	3414	4788	1200	30	0	0	0	0	0	9438
	<b>4-5</b>	0	18	474	714	564	96	12	0	0	0	1878
	<b>5-6</b>	0	0	6	60	30	30	48	0	0	0	174
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	12
	<b>Toplam</b>	98316	23790	6588	1974	624	132	60	0	0	6	131490

Tablo 2.15. Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık toplam oluşma süreleri (saat)

İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>GİRESUN</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	5142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5142
	<b>1-2</b>	84378	1980	0	0	0	0	0	0	0	0	86358
	<b>2-3</b>	11106	17274	1278	0	0	0	0	0	0	0	29658
	<b>3-4</b>	6	3270	4212	972	36	0	0	0	0	0	8496
	<b>4-5</b>	0	0	510	708	414	60	0	0	0	0	1692
	<b>5-6</b>	0	0	6	30	18	30	48	0	0	0	132
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	12
	<b>Toplam</b>	100632	22524	6006	1710	468	96	48	0	0	6	131490
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>TRABZON</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	4260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4260
	<b>1-2</b>	85194	6378	0	0	0	0	0	0	0	0	91572
	<b>2-3</b>	6852	17196	3120	12	0	0	0	0	0	0	27180
	<b>3-4</b>	0	1866	3210	1974	198	0	0	0	0	0	7248
	<b>4-5</b>	0	54	276	258	342	132	24	0	0	0	1086
	<b>5-6</b>	0	0	12	48	12	18	42	6	6	0	144
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>Toplam</b>	96306	25494	6618	2292	552	150	66	6	6	0	131490
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>RİZE</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	6078	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6078
	<b>1-2</b>	86880	3450	0	0	0	0	0	0	0	0	90330
	<b>2-3</b>	8004	15750	1350	0	0	0	0	0	0	0	25104
	<b>3-4</b>	6	2652	3978	1380	12	0	0	0	0	0	8028
	<b>4-5</b>	0	66	552	576	390	96	6	0	0	0	1686
	<b>5-6</b>	0	0	12	60	54	48	36	0	0	0	210
	<b>6-7</b>	6	0	0	6	0	18	12	6	6	0	54
	<b>Toplam</b>	100974	21918	5892	2022	456	162	54	6	6	0	131490
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>HOPA</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	9132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9132
	<b>1-2</b>	85446	1920	0	0	0	0	0	0	0	0	87366
	<b>2-3</b>	9864	13836	756	0	0	0	0	0	0	0	24456
	<b>3-4</b>	18	3474	3912	972	6	0	0	0	0	0	8382
	<b>4-5</b>	0	54	732	612	300	102	0	0	0	0	1800
	<b>5-6</b>	0	0	12	126	60	60	36	6	0	0	300
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	12	24	12	6	0	0	54
	<b>Toplam</b>	104460	19284	5412	1710	378	186	48	12	0	0	131490

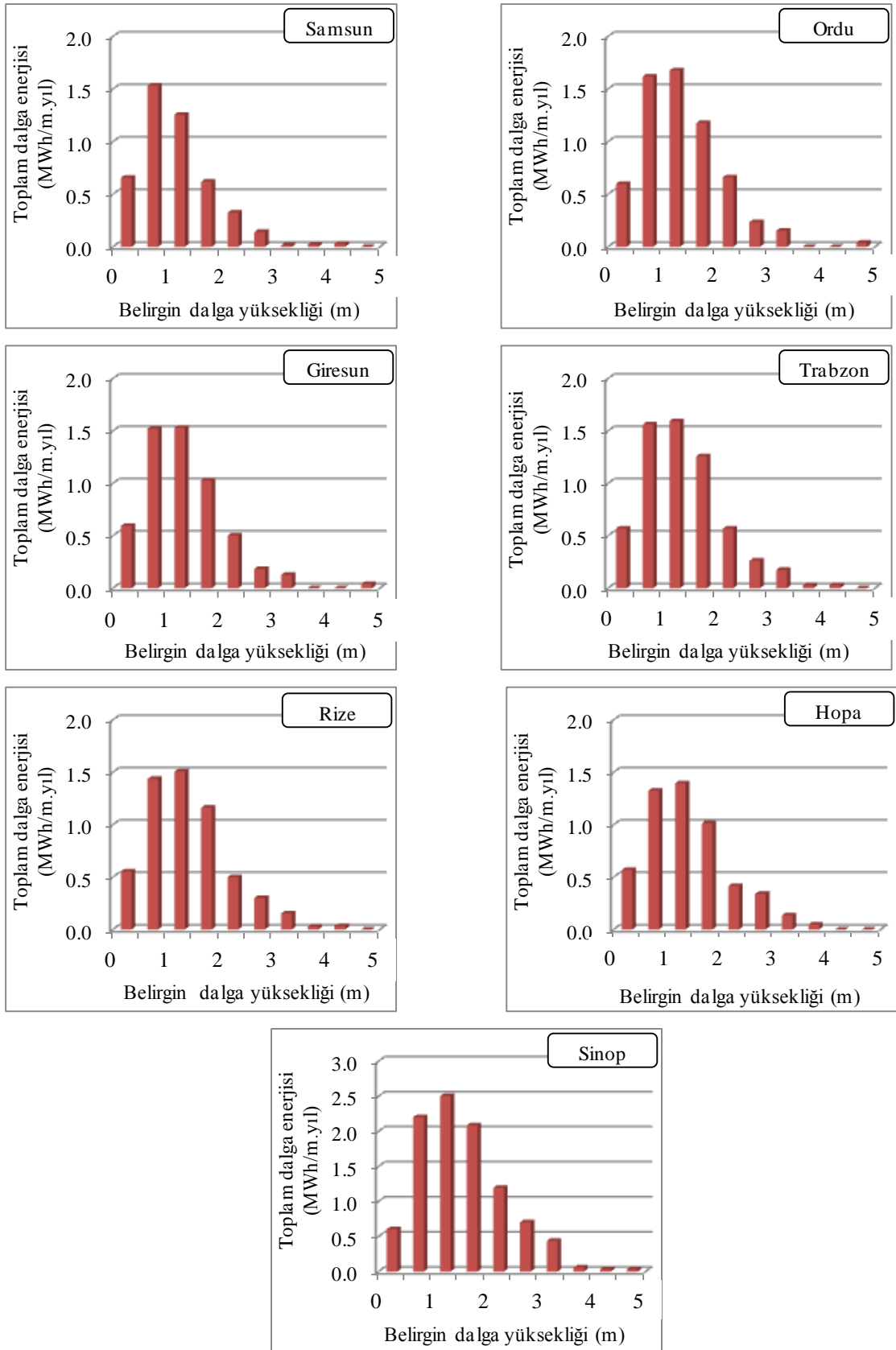


Tablo 2.16. Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık ortalama yıllık dalga enerjisi dağılımları (kWh/m.yıl)

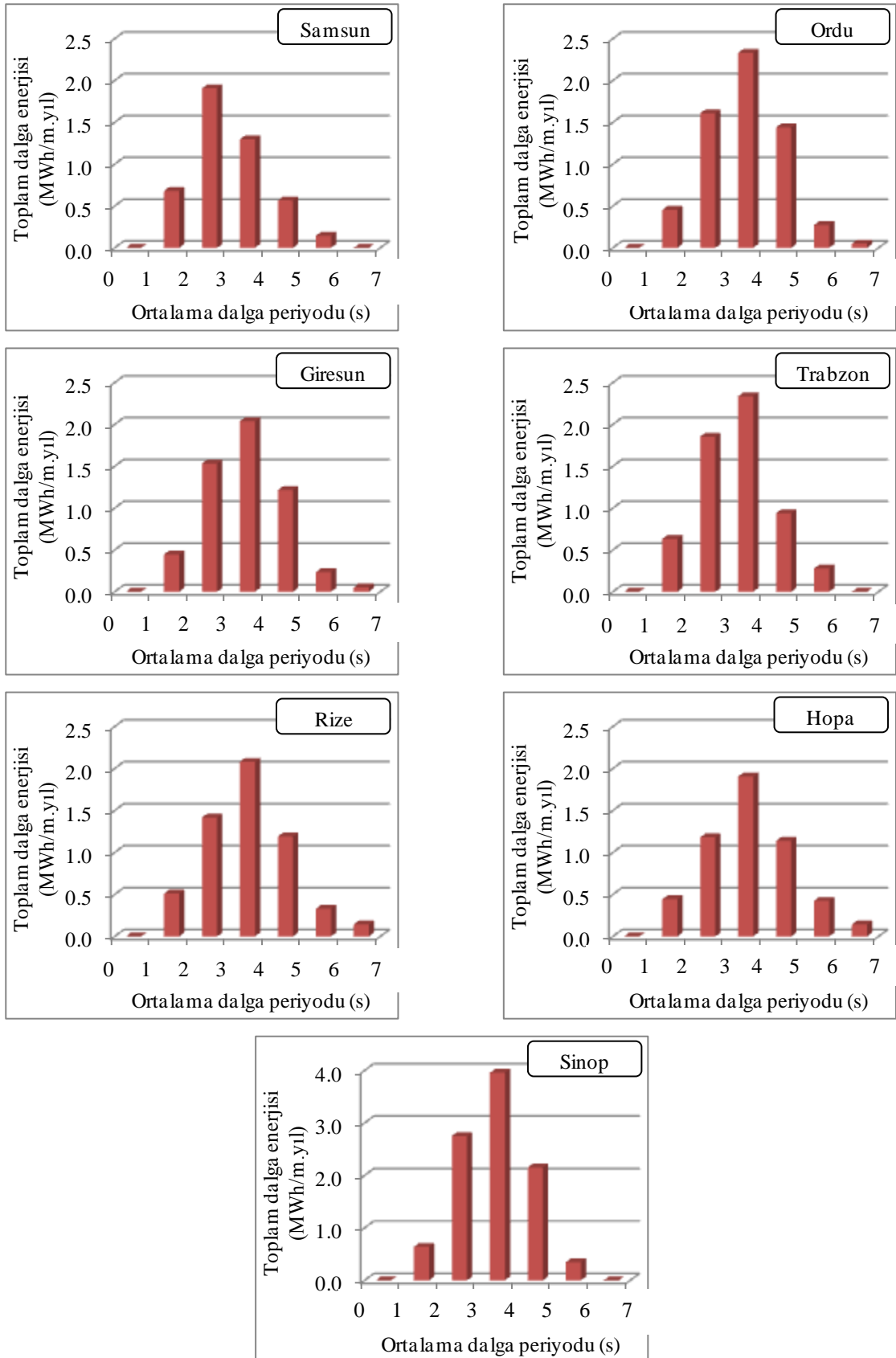
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>TRABZON</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<b>1-2</b>	443	190	0	0	0	0	0	0	0	0	632
	<b>2-3</b>	126	1157	565	4	0	0	0	0	0	0	1853
	<b>3-4</b>	0	204	928	1032	171	0	0	0	0	0	2336
	<b>4-5</b>	0	10	93	184	377	220	55	0	0	0	938
	<b>5-6</b>	0	0	6	36	20	42	118	26	29	0	277
	<b>Toplam</b>	569	1561	1593	1257	568	262	173	26	29	0	6036
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>RİZE</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<b>1-2</b>	405	105	0	0	0	0	0	0	0	0	510
	<b>2-3</b>	148	1024	242	0	0	0	0	0	0	0	1415
	<b>3-4</b>	< 1	295	1067	706	12	0	0	0	0	0	2079
	<b>4-5</b>	0	12	191	398	418	157	14	0	0	0	1190
	<b>5-6</b>	0	0	6	51	69	102	100	0	0	0	328
	<b>6-7</b>	< 1	0	0	6	0	40	38	27	31	0	142
<b>Toplam</b>	554	1436	1506	1161	499	299	153	27	31	0	5665	
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>HOPA</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	<b>1-2</b>	382	61	0	0	0	0	0	0	0	0	443
	<b>2-3</b>	183	867	129	0	0	0	0	0	0	0	1180
	<b>3-4</b>	1	385	1014	498	6	0	0	0	0	0	1903
	<b>4-5</b>	0	10	245	408	309	167	0	0	0	0	1139
	<b>5-6</b>	0	0	6	106	77	121	92	21	0	0	423
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	21	51	43	26	0	0	142
<b>Toplam</b>	567	1323	1394	1012	413	339	135	47	0	0	5231	

Tablo 2.17. Sinop, Samsun, Giresun ve Ordu istasyonlarında dalga özelliklerine göre gruplandırılmış dalga karakteristiklerinden elde edilen 15 yıllık ortalama yıllık dalga enerjisi dağılımları (kWh/m.yıl)

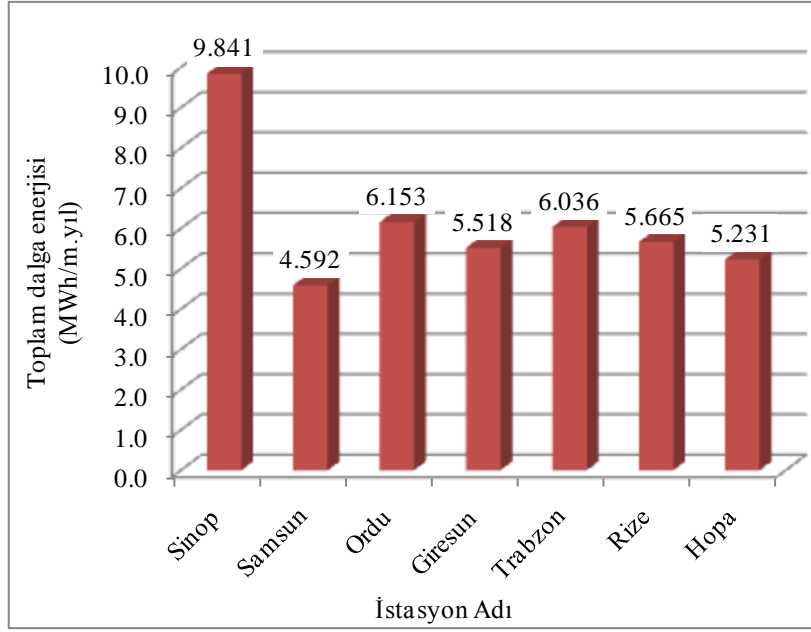
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>SİNOP</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	< 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1
	<b>1-2</b>	477	162	0	0	0	0	0	0	0	0	639
	<b>2-3</b>	125	1803	822	0	0	0	0	0	0	0	2750
	<b>3-4</b>	0	236	1601	1797	321	0	0	0	0	0	3955
	<b>4-5</b>	0	0	78	281	874	628	272	17	0	0	2151
	<b>5-6</b>	0	0	0	5	0	75	163	38	31	33	346
	<b>Toplam</b>	603	2201	2501	2083	1195	703	436	56	31	33	9841
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>SAMSUN</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<b>1-2</b>	513	167	0	0	0	0	0	0	0	0	680
	<b>2-3</b>	142	1158	601	6	0	0	0	0	0	0	1906
	<b>3-4</b>	0	206	595	379	115	0	0	0	0	0	1296
	<b>4-5</b>	0	2	58	228	152	110	15	0	0	0	566
	<b>5-6</b>	0	0	0	5	56	31	0	22	29	0	143
	<b>Toplam</b>	656	1533	1254	618	324	141	15	22	29	0	4592
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>ORDU</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<b>1-2</b>	397	56	0	0	0	0	0	0	0	0	453
	<b>2-3</b>	200	1171	237	0	0	0	0	0	0	0	1608
	<b>3-4</b>	0	390	1266	649	25	0	0	0	0	0	2329
	<b>4-5</b>	0	3	169	481	598	161	27	0	0	0	1439
	<b>5-6</b>	0	0	3	47	36	62	126	0	0	0	274
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	0	13	0	0	0	37	50
<b>Toplam</b>	598	1619	1675	1176	659	235	153	0	0	37	6153	
İstasyon Adı		H <sub>s</sub> (m)										
<b>GİRESUN</b>		<b>0.0-0.5</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>1.0-1.5</b>	<b>1.5-2.0</b>	<b>2.0-2.5</b>	<b>2.5-3.0</b>	<b>3.0-3.5</b>	<b>3.5-4.0</b>	<b>4.0-4.5</b>	<b>4.5-5.0</b>	<b>Toplam</b>
T <sub>z</sub> (s)	<b>0-1</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<b>1-2</b>	384	62	0	0	0	0	0	0	0	0	446
	<b>2-3</b>	209	1088	235	0	0	0	0	0	0	0	1532
	<b>3-4</b>	< 1	371	1109	528	30	0	0	0	0	0	2038
	<b>4-5</b>	0	0	181	476	449	109	0	0	0	0	1215
	<b>5-6</b>	0	0	3	23	22	59	126	0	0	0	233
	<b>6-7</b>	0	0	0	0	0	14	0	0	0	39	53
<b>Toplam</b>	594	1521	1528	1027	501	182	126	0	0	39	5518	



Şekil 2.51. Her bir istasyon için toplam elde edilebilecek ortalama yıllık dalga enerjisi belirgin dalga yüksekliğinin belli aralıklarında oluşma miktarlarının kıyaslaması



Şekil 2.52. Her bir istasyon için toplam elde edilebilecek ortalama yıllık dalga enerjisinin dalga periyodunun belli aralıklarında oluşma miktarlarının kıyaslaması



Şekil 2.53. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyısı boyunca seçilen 7 istasyonda elde edilebilecek toplam ortalama yıllık dalga enerji miktarlarının kıyaslanması

Günümüzdeki teknoloji ile dalga güç santrallerinin net verimlerinin % 50 civarında olduğu kabul edilmektedir (Hagerman ve Bedard, 2004; Kabdaşlı vd., 2007). Bu bağlamda, her bir istasyonda kurulacak 2100 m genişliğinde (30 MW kurulu kapasiteli 40 adet pelamis dalga enerji dönüştürücü sistemi için gerekli boy) bir dalga çiftliği ile Sinop istasyonunda yılda 10500 MWh, diğer istasyonların her birinde ise yılda 6300 MWh'lik bir enerji üretilebilecektir. Türkiye'de 2009 yılı için kişi başına düşen elektrik enerji tüketimi Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi tarafından (TEİAŞ, 2009) 2162 kWh olarak verilmiştir. Bu değere göre, Sinop ve diğer istasyonlarda 2100 m genişliğinde bir dalga güç santralının kurulması durumunda sırasıyla yaklaşık 4857 ve 2914 kişilik eşdeğer nüfusun enerji ihtiyacı karşılanabilecektir. Bu da, Karadeniz kıyı şeridi boyunca belde şeklinde görülen yerleşim yerlerinin aydınlatmasında veya sahil boyunca geçirilmiş olan Trabzon Sahil Yolu'nun aydınlatmasında dalga enerjisinin alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Ancak, bir önceki bölümde sunulan aşılma olasılık diyagramlarından da görülebileceği gibi, elde edilebilecek bu enerji kaynağı yıl içerisinde süreklilik gösterememektedir. Bundan dolayı dalga enerjisi, sadece alternatif bir enerji kaynağı olabilecek ve baz enerji üretimine katkıda bulunabilecektir.

### 3. SONUÇLAR

Bu bölümde; çalışma kapsamında gerçekleştirilen dalga tahmin ve modellemesine ve en iyi dalga tahmin modeli kullanılarak oluşturulan veri tabanı ile incelenen Karadeniz'in dalga gücü potansiyeline ilişkin elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Dalga tahmin ve modellemesine ilişkin elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

Çalışma kapsamında öncelikle üçüncü nesil bir sayısal dalga tahmin modeli (SWAN) geliştirilmiştir. Modelin uygulama aşamasında durgun ve durgun olmayan durumlar için iki aylık periyodu kapsayacak şekilde bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Durgun durum analizleri ölçülmüş dalga kaydında gözlenen pikleri ve çukurları durgun olmayan durum analizlerine göre belirgin bir şekilde daha iyi tahmin etmiş ve ölçülmüş zamansal dalga kaydına daha yakın sonuçlar vermiştir.

SWAN modelin dışında, dört farklı basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemi (Jonswap, SMB, CEM ve Wilson yöntemleri), iki farklı rüzgar veri kaynağı (ECMWF ve DMİ) kullanılarak oluşturulan sekiz farklı model de Karadeniz'e uygulanmıştır. Bu dalga tahmin çalışmasının sonuçları yeterli doğrulukta (en iyi model Hopa istasyonunda  $H_s$  için  $R = 0.399$  ve  $T_z$  için  $R = 0.163$ , Sinop istasyonunda  $H_s$  için  $R = 0.370$  ve  $T_z$  için  $R = 0.193$ ) çıkmamıştır. Bu durumun, yöntemlerin uygulamasında, fırtına belirlenmesinde kabul edilen kritik rüzgar yön değişim açısının dalga tahminlerini sınırlandırmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

DMİ verileri kullanılarak gerçekleştirilen dalga tahminlerinde hem Orta Karadeniz hem de Doğu Karadeniz'de kritik rüzgar yön değişim açısının, Batı Karadeniz'de olduğu gibi (Şahin vd., 2007),  $90^\circ$  kabulü yapılması durumunda en iyi dalga tahmininin elde edildiği görülmüştür. ECMWF verileri kullanılarak, Hopa ve Sinop şamandıra istasyonları için gerçekleştirilen dalga tahminlerinde ise kritik rüzgar yön değişim açılarının sırasıyla  $15^\circ$  ve  $45^\circ$  olması durumunda en iyi dalga tahmininin yapılacağı belirlenmiştir.

Belirlenen kritik rüzgar yön değişim açıları baz alınarak Karadeniz'e uygulanan basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinden uygulanan şekliyle dikkate alınan zaman dilimi için Sinop istasyonunda ECMWF ERA Interim rüzgar verilerini kullanarak uygulanan SPM yönteminin en iyi model ( $H_s$  için  $R = 0.576$  ve  $T_z$  için  $R = 0.066$ ) olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, Hopa istasyonunda ise DMİ rüzgar verilerini kullanarak

uygulanan Wilson yönteminin en iyi model ( $H_s$  için  $R = 0.442$  ve  $T_z$  için  $R = 0.078$ ) olduğu tespit edilmiştir.

Karadeniz’de mevcut en iyi dalga modelini belirlemek için, Karadeniz’de tahmini dalga verilerine sahip ECMWF’nin veri tabanlarının tahminleri de kendi içinde kıyaslanmıştır. Her iki uygulama noktası ve ele alınan zaman dilimi için ECMWF veri tabanlarından ECMWF ERA Interim dalga modelinin diğer ECMWF dalga tahmin modellerine göre daha başarılı ( $H_s$  için  $R = 0.776$  ve  $T_z$  için  $R = 0.639$ ) olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ECMWF’nin en iyi veri tabanı sonuçlarının, oluşturulan bütün basitleştirilmiş dalga tahmin modellerininkinden daha iyi olduğu da belirlenmiştir.

SWAN modelin analiz sonuçlarının şamandıra verileri ile basitleştirilmiş dalga tahmin modellerine göre çok daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, şamandıra verilerine kıyasla SWAN analiz sonuçlarının zamansal değişimlerinde ECMWF veri tabanlarının dalga tahminlerinin zamansal değişimlerinden daha iyi bir eğilim içinde oldukları da görülmüştür. Ayrıca, ECMWF veri tabanı yalnızca açık deniz şartları için geçerli bir veri tabanıdır ve alansal çözünürlüğü SWAN modelininkine göre oldukça kabadır. SWAN modeli ise hem açık deniz şartlarını hem de yakın kıyı dalga modellemesini kapsamaktadır. Bunların yanında, SWAN model sonuçları daha önceden gerçekleştirilmiş METU3 dalga tahmin sonuçları ile de kıyaslanmış ve dalga ölçüm verilerinin zamansal değişimlerini daha iyi temsil ettiği görülmüştür.

Karadeniz’in dalga gücü potansiyeline ilişkin elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

Karadeniz için en uygun dalga modelinin belirlenmesinden sonra, bu model kullanılarak Karadeniz’de çeşitli dalga karakteristiklerini içeren 15 yıllık bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı ile Karadeniz’in belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga gücünün alansal ve zamansal değişimleri haritalanmıştır. Elde edilen ortalama yıllık haritalardan, Karadeniz’in batı bölümünün (özellikle güneybatısının) doğu kesimine oranla, dalgalardan daha çok etkilendiği ve daha yüksek dalga gücüne maruz kaldığı belirlenmiştir. Karadeniz’in Türkiye kıyıları göz önüne alındığında, ortalama dalga gücünün en yüksek, Sinop’tan İğneada’ya kadar ki batı kıyıları (özellikle Trakya) olduğu tespit edilmiştir. Karadeniz’de ortalama dalga gücü kaynağının yıllık ortalama dikkate alındığında  $0.1 \text{ kW/m}^2$ ’den  $3 \text{ kW/m}^2$ ’ye değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Oluşturulan veri tabanı kullanılarak belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga gücünün mevsimsel haritaları incelendiğinde, Karadeniz genelinde dalga yüksekliği ve

gücü ortalamalarının beklenildiği gibi yaz mevsiminde en küçük oldukları, ilkbahar, sonbahar ve kış mevsimleri sıralamasıyla daha yüksek değerlere ulaştıkları görülmüştür. Dalga gücü yoğunluğunun yaz ve kış mevsimleri ortalamaları karşılaştırıldığında ise yaklaşık 4.5 kat düzeyinde bir değişimin olduğu gözlenmiştir. İlkbahar ve sonbahar mevsimleri için ortalama dalga gücü kaynağı 1.1 kW/m ve 1.5 kW/m arasında değişirken, kış mevsiminin ortalama dalga gücü kaynağının 3 kW/m ve 5.5 kW/m arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Karadeniz'in tümü için belirgin dalga yüksekliği ve dalga gücü haritalarının oluşturulmasının yanında, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz bölümünde yedi istasyona odaklanılarak bu bölge için daha detaylı sonuçlar elde edilmiştir. Belirlenen her istasyon için yıllık dalga gücü dalgalanmasının nispeten küçük olduğu görülmüştür. Bütün istasyonlarda ortalama dalga gücünün yıllık değişimleri çok az bir dalgalanma göstermiştir. En düşük dalga gücü şartlarının olduğu değerler sıfıra çok yakın olduğu gözlemlenirken, ekstrem dalga gücü şartlarında her istasyon için yaklaşık 2 kW/m'lik bir dalgalanmanın söz konusu olduğu anlaşılmıştır. Bunların yanında, ekstrem dalga gücü şartlarının, en yüksek Sinop istasyonunda (yaklaşık 5.2 kW/m) ve en düşük Samsun istasyonunda (yaklaşık 2.3 kW/m) olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 3.2 kW/m) görülmüştür. Ortalama dalga gücü şartlarının ise; en yüksek, yıllık ortalama 1 kW/m değeri ile Sinop istasyonunda ve en düşük, yıllık ortalama 0.5 kW/m değeri ile Samsun istasyonunda oluşmuştur. Genel bir eğilim olarak ortalama dalga gücü şartlarının Sinop istasyonundan Hopa istasyonuna doğru küçüğe olsa bir azalış gösterdiği belirlenmiştir. Bütün istasyonlarda en yüksek dalga gücünün olduğu kış mevsiminde, ekstrem dalga gücü şartlarının en yüksek Sinop istasyonunda (yaklaşık 8.5 kW/m) ve en düşük Samsun istasyonunda (yaklaşık 3.5 kW/m) olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 5.0 kW/m) belirlenmiştir. Ortalama dalga gücü şartlarının ise; yine kış mevsiminde en yüksek, yıllık ortalama 1.8 kW/m değeri ile Sinop istasyonunda ve en düşük, yıllık ortalama 0.8 kW/m değeri ile Samsun istasyonunda olduğu, diğer istasyonlarda ise birbirine yakın değerler aldığı (yaklaşık 1.0 kW/m) belirlenmiştir. İncelenen istasyonlarda en yüksek dalga gücü potansiyeline sahip Sinop istasyonu ve çevresi dikkate alındığında, dalga enerjisine ilaveten kurulması planlanan nükleer santral enerjisi ve rüzgar potansiyeli ile birlikte bölgenin bir enerji üssü olabileceği sonucuna varılmıştır.



İstasyonlarda dalga enerji dönüşüm sistemlerinin kurulmasının planlanması durumunda, istasyonlarda gerekli olacak yatırım maliyetlerine ilişkin bir değerlendirme yapabilmek için her bir istasyon için DEĞİ değeri hesaplanmıştır. Bu DEĞİ değerlerine göre, bütün istasyonların genellikle birbirine yakın yatırım maliyetleri getirecekleri tespit edilmiştir. İstasyonların kendi içinde kıyaslanması durumunda ise, 1.34'lük DEĞİ değeri ile Sinop istasyonunun en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu istasyonu sırasıyla Trabzon, Hopa ve Rize istasyonları izlemektedir. Tüm istasyonlar içinde düşük tasarım maliyeti getirecek istasyonlar ise Ordu, Samsun ve Giresun istasyonlarıdır. Diğer bir deyişle, Sinop istasyonunda kurulması muhtemel bir dalga güç istasyonunun ömrünün sürdürülebilirliğinin sağlanması için diğer istasyonlara kıyasla en fazla sermaye yatırımının gerekli olduğu belirlenmiştir.

Kurulması muhtemel bir dalga güç tesisinin tasarımında ihtiyaç duyulacak güvenilir gücün hesabında büyük öneme sahip olan dalga gücü süreklilik eğrileri de her istasyon için elde edilmiştir. Bütün istasyonlar için beklenildiği gibi, kış mevsiminde oluşan dalga gücü aşılma olasılığının yaz mevsimininkine göre belirgin bir şekilde yüksek olduğu ve aynı zamanda, bütün istasyonlarda ortalama yıllık dalga gücü aşılma olasılığının sonbahar mevsimininkine benzer bir eğilim içinde olduğu belirlenmiştir. Giresun ve Ordu istasyonları ile Trabzon ve Rize istasyonlarının dalga gücü aşılma olasılık eğrilerinin birbirine çok benzer olduğu ve bu istasyonların benzer dalga gücü şartlarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Aynı zamanda, Sinop istasyonunun bulunduğu bölgenin dalga gücünün diğer istasyonlara göre daha yüksek olduğu ve bununla birlikte, dalga gücünün Sinop istasyonundan Hopa istasyonuna doğru azalış eğiliminde olduğu da süreklilik eğrileri yardımıyla doğrulanmıştır.

Çalışma kapsamında, her bir istasyonda üretilebilecek dalga enerjisinin belirlenmesine ilişkin de bir irdeleme yapılmıştır. Bu bağlamda, Samsun ve Trabzon istasyonlarında kıyıya gelen dalga enerjisinin % 70'inin 2 s ile 4 s arasında, diğer istasyonlarda ise yaklaşık ortalama % 85'inin 2 s ile 5 s arasında ortalama dalga periyoduna sahip dalgalar tarafından taşındığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, 0.5 m ile 2 m arasında belirgin dalga yüksekliğine sahip dalgaların oluşan dalga enerjisine katkılarının bütün istasyonlarda ortalama % 73 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler, şamandıra ölçümleri düşünüldüğünde, oluşması muhtemel ortalama dalga periyodundan daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun, önceki çalışmalarda da (Moeini ve Etemad-Shahidi (2009); Lin vd. (2002)) belirtildiği gibi, SWAN modelin ortalama dalga periyodunu düşük

tahmin etmesinden kaynaklı olduđu belirlenmiřtir. Bundan dolayı, bu çalıřmada elde edilen dalga enerji potansiyellerinin gerçek deęerinden biraz daha dűřuk olduđu dűřünölmektedir.

Sinop, Samsun, Giresun, Ordu, Trabzon, Rize ve Hopa istasyonlarındaki yıllık ortalama dalga enerjisi değerleri sırasıyla yaklaşık 10, 5, 6, 6, 6, 6 ve 5 MWh/m.yıl olarak hesaplanmıştır. Buradan, Tűrkiye'nin Batı Karadeniz kıyılarının doęu kıyılarına gűre daha yűksek bir enerji potansiyeline sahip olduğu ve batıdan doğuya doğru gidildikçe ۆretilebilecek dalga enerji potansiyelinin azalış eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

İstasyonlarda kurulması planlanan ۆrnek bir dalga iftlięi baz alındıęında, her bir istasyonda kurulacak 2100 m geniřlięinde bir dalga iftlięi ile Sinop istasyonunda yılda 10500 MWh, dięer istasyonların her birinde ise yılda 6300 MWh'lik bir enerji ۆretilabileceęi tespit edilmiřtir. Sinop ve dięer istasyonlarda bu dalga gű santralinin kurulması durumunda sırasıyla yaklaşık 4857 ve 2914 kiřilik eřdeęer nűfusun enerji ihtiyacının karřılanabileceęi belirlenmiřtir. Bűlge için elde edilebilecek bu enerji kaynaęı yıl içerisinde sűreklilik gűsterememektedir. Bundan dolayı, dalga enerjisi bűlge için alternatif bir enerji kaynaęı olabilecek ve baz enerji ۆretimine katkıda bulunabilecektir.

#### 4. ÖNERİLER

Bu çalışmada, Karadeniz için en iyi dalga tahmini ve modellemesi irdelenmiş, Karadeniz'in dalga gücünün alansal ve zamansal değişimi incelenerek bölge için dalga enerjisinin elde edilebilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, dalga tahmin ve modelleme çalışmalarında mevcut iki rüzgar veri kaynağı kullanılmıştır. Dalga tahminlerini daha da iyileştirmek için dalga tahminlerinde kullanılan her iki rüzgar veri kaynağının bir katsayı ile düzeltilbilir veya Karadeniz'e özgü her iki rüzgar veri kaynağını kullanan farklı bir basitleştirilmiş dalga tahmin modeli geliştirilebilir. Bunların yanında, SWAN sayısal model sonuçlarını daha da iyileştirebilmek için, analizlerde kapsanan fiziksel süreçlere ilişkin kullanılan katsayılarda Karadeniz için en uygun değer araştırması veya sınırlı bir bölge seçilerek (sınır şartlarını iyi belirlemek şartıyla) SWAN modelinde iç içe geçmiş kareler kullanılarak daha küçük çözünürlüklü hesaplamalı alan tanımlaması yapılabilir.

Dalga tahminlerinin doğrulanmasında kullanılan verilerin çok sınırlı ve kesikli olmasından dolayı karşılaşılan güçlüklerin üstesinden gelinebilmesi, çok daha iyi dalga modellerinin geliştirilebilmesi ve ayrıca bu modellerin uygun bir şekilde doğrulanabilmesi için bölgede sistematik bir dalga ölçüm ağının kurulması gerekmektedir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, bölgede kurulması muhtemel dalga çiftliklerinin öncelikle Karadeniz'in güney batı kesiminde özellikle Trakya açıklarında planlanması daha uygun olacaktır. Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kıyıları için yapılan detaylı çalışmalar Sinop'tan İğneada'ya kadar ki kıyı şeridi için de yapılmalıdır. Ayrıca, bu dalga çiftliği ilkbahar ve sonbahar mevsimleri için elde edilen ortalama dalga gücü değişim haritalarına göre tasarlanırsa sistemin optimum güç elde etmesi sağlanabilecektir.

Karadeniz'de dalga enerji dönüştürücü sistemi kurmayı planlayacak özel sektör veya Devlet Kurumları için aylık, mevsimlik ve yıllık bazda oluşturulan dalga gücü haritaları, sistemin tasarımı için önemli bir veri kaynağı görevi üstlenebilecektir. Planlanacak sistemin kurulu gücü yine bu aylık alansal dağılım haritalarının değerlendirilmesi sonucunda rahatlıkla belirlenebilecektir. Ayrıca, bu çalışma, Karadeniz'de kurulması gündeme gelebilecek bir dalga enerji santralının öncelikle kurulması gereken bölgeler için de bir fizibilite çalışması niteliğindedir.

Dalga enerjisinin elde edilebileceği uygun bölgelerde kurulacak dalga çiftlikleri ile Karadeniz kıyı şeridi boyunca belde şeklinde görülen yerleşim yerlerinin aydınlatmasında

veya sahil boyunca geçirilmiş olan Trabzon Sahil Yolu'nun aydınlatmasında dalga enerjisi alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abdalla, S., 2010. Kişisel görüşme, 12 Temmuz 2010.
- Abdalla, S., Özhan, E., Seziş-Papila, S. ve Gülçağ, O., 1995. An Advanced Third Generation Wind Wave Model for Engineering Use: Application to the Black Sea and the Eastern Mediterranean, the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST'95), October, Tarragona, Spain, Proceedings: 1871-1884.
- ABPMERL, 2004. Atlas of UK marine renewable energy resources, ABP Marine Environmental Research Ltd. (ABPMERL), Technical Reports, Report No. R.1106, the UK Department of Trade and Industry, United Kingdom.
- Agrawal, J., D. ve Deo, M., C., 2002. On-line Wave Prediction, Marine Structures, 15, 57-74.
- Akpınar, A., Kömürcü, M., İ. ve Filiz, M., H., 2008. Türkiye'nin Enerji Kaynakları ve Çevre, Sürdürülebilir Kalkınma ve Temiz Enerji Kaynakları, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008), Aralık, İstanbul, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 12-24.
- Akpınar, A., Kömürcü, M., İ. ve Kankal, M., 2009. Türkiye'de Hidroelektrik Enerjinin Durumu ve Geleceği, Türkiye 11. Enerji Kongresi, Ekim, İzmir, Türkiye, Bildiriler Kitabı CD: 1-10.
- Akpınar, A., Özger, M. ve Kömürcü, M.İ., 2011. Karadeniz'de Kıyaslamalı Dalga Tahmini: Hopa Örneği, 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Kasım, Trabzon, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 281-292.
- Aldoğan, S., 2008. Wind and Wind Wave Climate for Turkish Coast and Application to Aegean and Mediterranean Sea, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Alves, J., H., G., M. ve Banner, M., L., 2003. Performance of a Saturation-based Dissipation-rate Source Term in Modeling the Fetch-limited Evolution of Wind Waves, Journal of Physical Oceanography, 33, 6, 1274-1298.
- Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J., R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J., M. ve Wittmann, P., 2007. Comparison of Wind and Wave Measurements and Models in the Western Mediterranean Sea, Ocean Engineering, 34, 526-541.
- Arıkan, Ş., E., 1998. Comparison of Two Different Sources of Wind Data for Wave Prediction in the Black Sea, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Arinaga, R., A. ve Cheung, K., F., 2011. Atlas of Global Wave Energy from 10 Years of Re-analyses and Hindcast Data, Renewable Energy, 39, 1, 49-64.

- Battjes, J., A. ve Janssen, J., P., F., 1978. Energy Loss and Set-up Due to Breaking of Random Waves, 16<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ASCE), Ekim, Hamburg, Germany, Proceedings: 569-587.
- Bayazıt, M., 2003. Hidroloji, Birsen Yayınevi, No. Y-0029, İstanbul, 219 s.
- Bedard, R., Hagerman, G., Presevic, M., Siddiqui, O., Thresher, R. ve Ram, B., 2005. Offshore Wave Power Feasibility Demonstration Project Final Summary Report, The Electric Power Research Institute (EPRI), Report No. E2I EPRI Global WP 009, U.S., 34 s.
- Berkün, U., 2007. Wind and Swell Wave Climate for the Southern Part of Black Sea, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Beyene, A. ve Wilson, J., H., 2006. Comparison of Wave Energy Flux for Northern, Central, and Southern Coast of California Based on Long-Term Statistical Wave Data, Energy, 31, 1856-1869.
- Beyene, A. ve Wilson, J., H., 2007. Digital Mapping of California Wave Energy Resource, International Journal of Energy Research, 31, 1156-1168.
- Bidlot, J., R., Holmes, D., J., Wittmann, P., A., Lalbeharry, R. ve Chen, H., S., 2002. Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data, Weather and Forecasting, 17, 2, 287-310.
- Bishop, C., T., Donelan, M., A. ve Kahma, K., K., 1992. Shore Protection Manual's Wave Prediction Reviewed, Coastal Engineering, 17, 25-48.
- Blackman, R., B. ve Tukey, J., W., 1959. The Measurement of Power Spectra, Dover Publications, New York, 190 s.
- Booij, N., Ris, R., C. ve Holthuisen, L., H., 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation, Journal of Geophysical Research, 104, C4, 7649-7666.
- Boud, R., 2003. Status and Research and Development Priorities, Wave and Marine Current Energy, the UK Department of Trade and Industry, Future Energy Solutions Publishing, FES-R-132, U.K., 85 s.
- Bretschneider, C., L., 1970. Wave Forecasting Relations for Wave Generation, Look Lab/Hawaii, 1, 3, 31-34.
- Carter, D., J., C., 1982. Prediction of Wave Height and Period for a Constant Wind Velocity using the JONSWAP Results, Ocean Engineering, 9, 1, 17-33.
- Cavaleri, L. ve Malanotte-Rizzoli, P., 1981. Wind Wave Prediction in Shallow Water: Theory and Applications, Journal of Geophysical Research, 86, C11, 10961-10973.

- Chakrabarti, S., K., 1987. Hydrodynamics of Offshore Structures, WIT Press, No. 9780905451664, Southampton, U.K., 464 s.
- Clancy, R., M., Kaitala, J., E. ve Zambreski, L., F., 1986. The Fleet Numerical Oceanography Center Global Spectral Ocean Wave Model, Bulletin of the American Meteorological Society, 67, 5, 498-512.
- Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M., T., Schild, P., Sjöström, B., O., Sorensen, H., C. ve Thorpe, T., 2002. Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 6, 405-431.
- Collins, J., I., 1972. Prediction of Shallow Water Spectra, Journal of Geophysical Research, 77, 15, 1693-2707.
- Cooley, J., M. ve Tukey, J., W., 1965. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Transforms, Mathematics and Computations, 12, 297-301.
- Cornett, A., M., 2008. A Global Wave Energy Resource Assessment, the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, July, Vancouver, Canada, Proceedings: 318-326.
- CRES, 2002. Wave Energy Utilization in Europe; Current Status and Perspectives, European Thematic Network on Wave Energy, Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Greece. <http://www.wave-energy.net/Library/WaveEnergyBrochure.pdf>
- Çaban, S., 2007. Wind and Wind Wave Climate Research Along the Southern Part of Black Sea, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Çevik, E., 2003. Kıyı Mühendisliğinde İstatistiksel Yöntemler (Ders Notları), Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Çevik, E., Yüksel, Y., Yalçın, A., C., Arı, H., A., Güler, I., Doğan, U., Aykut, N., O. ve Ata, E., 2006. Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi ve Kumlanma Problemi İçin Karaburun Örneği, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Mühendislik Araştırma Grubu, Proje No. 103I008, İstanbul, 71 s.
- de Jong, J., C., M., 1997. Verification of the Numerical Wave Model SWAN in the Petten Coastal Area, Master Thesis, The Delft University of Technology, National Institute for Coastal & Marine Management, Netherlands.
- Deo, M., C. ve Kiran Kumar, N., 2000. Interpolation of Wave Heights, Ocean Engineering, 27, 9, 907-919.
- Deo, M., C. ve Jagdale, S., S., 2003. Prediction of Breaking Waves with Neural Networks, Ocean Engineering, 30, 9, 1163-1178.

- Deo, M., C., Jha, A., Chaphekar, A., S. ve Ravikant, K., 2001. Neural Networks for Wave Forecasting, Ocean Engineering, 28, 7, 889-898.
- DHI, MIKE 21 Spectral Wave FM Module User Guide, Scientific documentation. [http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document\\_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21\\_SW.pdf](http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21_SW.pdf) 2 Kasım 2004.
- Donelan, M., A., 1980. Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods, and Directions, Canadian Coastal Conference, National Research Council of Canada, April, Canada, Proceedings: 47-61.
- Donelan, M., A., Hamilton, J. ve Hui, W., H., 1985. Directional Spectra of Wind-generated Waves. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 315, 509-562.
- Dragani, W., C., Garavento, E., Simionato, C., G., Nunez, M., N., Martin, P. ve Campos, M., I., 2008. Wave Simulation in the Outer Rio De La Plata Estuary: Evaluation of SWAN Model, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE), 134, 5, 299-305.
- Duman, Ç., 2010. Evaluation and Comparison of the Wave Energy Potential in Selected Coastal Regions in Turkey, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- ECMWF, 2008. ECMWF Wave Model. IFS Documentation – Cy33r1, Operational Implementation, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Shinfield Park, Reading, England.
- ECMWF, ECMWF Overview, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Shinfield Park, Reading, England. <http://www.ecmwf.int/about/overview/> 6 Aralık 2010.
- Eldeberky, Y., 1996. Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone, PhD. Thesis, The Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- Eldeberky, Y. ve Battjes, J., A., 1995. Parameterization of Triad Interactions in Wave Energy Models, Coastal Dynamics Conference '95, September, Gdansk, Poland, Proceedings: 140-148.
- Eldeberky, Y. ve Battjes, J., A., 1996. Spectral Modeling of Wave Breaking: Application to Boussinesq Equations, Journal of Geophysical Research, 101, 1253-1264.
- Ergin, A., 2009. Coastal Engineering, METU Press, No. 9789944344821, Ankara, 365 s.
- Etemad-Shahidi, A., Kazeminezhad, M., H. ve Mousavi, S., J., 2009. On the Prediction of Wave Parameters Using Simplified Methods, Journal of Coastal Research, Special Issue 56, 505-509.



- Fröhle, P. ve Fittschen, T., 1998. Analysis of Directional Wave Data for the Assessment of Sediment Transport Processes, 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydro-Science and Engineering, August, Cottbus/Berlin, Germany, Proceedings: 1-10.
- Gelci, R., Cazalé, H. ve Vassal, J., 1957. Prévion de la Houle, La Méthode des Densités Spectroangulaires (Prediction of Waves, the Method of Frequency-Directional Spectral Densities), Bulletin d'Information du Comité Central d'Océanographie et d'Etude des Côtes, 9, 416-435.
- Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures, Advanced Series on Ocean Engineering, 15, World Scientific Publishing Co., No. 9789810232566, Singapore, 451 s.
- Gülçağ, A., O., 1996. Verification Study of Third Generation Engineering Wave Model for the Turkish Black Sea and Mediterranean Coast, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Hagerman, G., 2001. Southern New England Wave Energy Resource Potential, Center for Energy and the Global Environment, No. 206, Washington, USA, 13 s.
- Hagerman, G. ve Bedard R., 2004. Offshore Wave Energy Conversion Devices, The Electric Power Research Institute (EPRI), Report No. E2I EPRI – WP – 004 - US – Rev1, U.S., 52 s.
- Hasselmann, K., 1962. On the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum, Part 1: General Theory, Journal of Fluid Mechanics, 12, 4, 481-500.
- Hasselmann, K., 1974. On the Spectral Dissipation of Ocean Waves due to Whitecapping, Boundary-layer Meteorology, 6, 1-2, 107-127.
- Hasselmann, K., Barnett, T., P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., E., Enke, K., Ewing, J., A., Gienapp, H., Hasselmann, D., E., Kruseman, P., Meerburg, A., Mller, P., Olbers, D., J., Richter, K., Sell, W. ve Walden, H., 1973. Measurements of Wind-wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Erganzungsheftzur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, Deutsches Hydrographisches Institute, Hamburg, Germany, 95 s.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., H. ve Barnett, T., P., 1985. Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum, Part II: Parameterizations of the Nonlinear Transfer for Application in Wave Models, Journal of Physical Oceanography, 15, 11, 1378-1391.
- Henfridsson, U., Neimane, V., Strand, K., Kapper, R., Bernhoff, H., Danielsson, O., Leijon, M., Sundberg, J., Thorburn, K., Ericsson, E. ve Bergman, K., 2007. Wave Energy Potential in the Baltic Sea and the Danish Part of the North Sea, with Reflections on the Skagerrak, Renewable Energy, 32, 2069-2084.
- Holthuijsen, L., H., 2000. Wind Waves (Lecture Notes). Collegehandleiding Ctwa 9991, Delft University of Technology, Netherlands.

- Holthuysen, L., H., Booij, N. ve Herbers, T., H., C., 1989. A Prediction Model for Stationary, Short-Crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents, Coastal Engineering, 13, 1, 23-54.
- Hsu, S., A., 1980. On the Correction of Land-based Wind Measurements for Oceanographic Applications, the 17<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ASCE), October, Sydney, Australia, Proceedings: 708-724.
- Hurdle, D., P. ve Van Vledder, G., Ph., 2004. Improved Spectral Wave Modeling of Whitecapping Dissipation in Swell Sea Systems, 23<sup>rd</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June, Vancouver, Canada, Proceedings: 539-544.
- Iglesias, G. ve Carballo, R., 2010. Wave Energy Resource in the Estaca De Bares Area (Spain), Renewable Energy, 35, 7, 1574-1584.
- Janssen, P., A., E., M., 1991. Quasi-linear Theory of Wind-wave Generation Applied to Wave Forecasting, Journal of Physical Oceanography, 21, 1631-1642.
- Janssen, P., Bidlot, J., R. ve Abdalla, S., 2005. Ocean Wave Products at ECMWF, the Seventh International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST'05), October, Kuşadası, Turkey, Proceedings: 1169-1178.
- Joubert, J., R., 2008. An Investigation of the Wave Energy Resource on the South African Coast, Focusing on the Spatial Distribution of the South West Coast, Master Thesis, The University of Stellenbosch, Department of Civil Engineering, South Africa.
- Kabdaşlı, S., Önöz, B., Yeğen, B., Yılmaz, A., Babaç, G., Varol, Ö., E. ve Albostan, A., 2007. Türkiye Kıyılarındaki Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi - Kumköy Örneği. VI. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Ekim, İzmir, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 445-452.
- Kazeminezhad, M., H., Etemad-Shahidi, A. ve Mousavi, S., J., 2005. Application of Fuzzy Inference System in the Prediction of Wave Parameters, Ocean Engineering, 32, 14-15, 1709-1725.
- Kim, G., Jeong, W., M., Lee, K., S., Jun, K. ve Lee, M., E., 2011. Offshore and Nearshore Wave Energy Assessment Around The Korean Peninsula, Energy, 36, 1460-1469.
- Komen, G., J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. ve Janssen, P., A., E., M., 1994. Dynamics and Modeling of Ocean Waves, Cambridge University Press, No. 9780521577816, USA, 532 s.
- Komen, G., J., Hasselmann, S. ve Hasselmann, K., 1984. On the Existence of a Fully Developed Wind-sea Spectrum, Journal of Physical Oceanography, 14, 1271-1285.
- Lin, W., Sanford, L., P. ve Suttles, S., E., 2002. Wave Measurement and Modeling in Cheasepeake Bay, Continental Shelf Research, 22, 2673-2686.

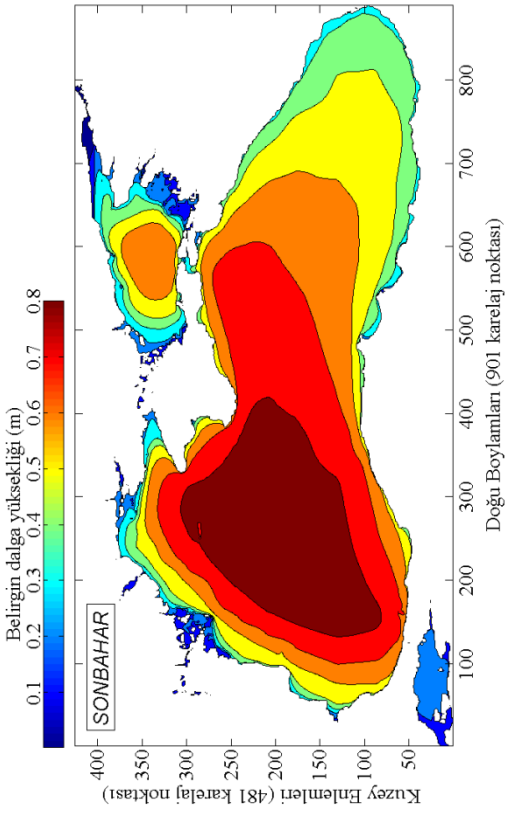
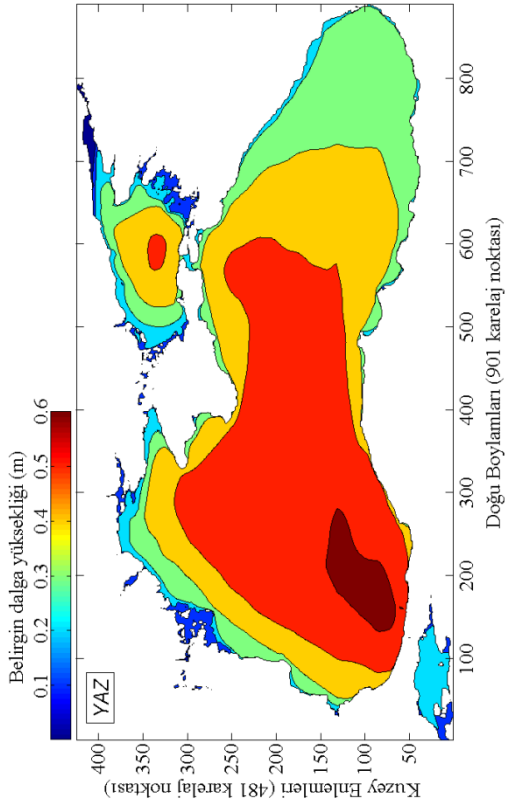
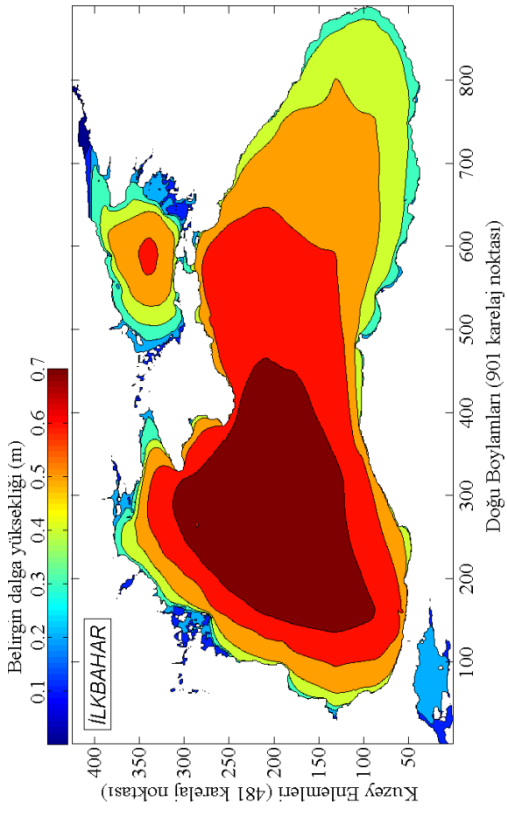
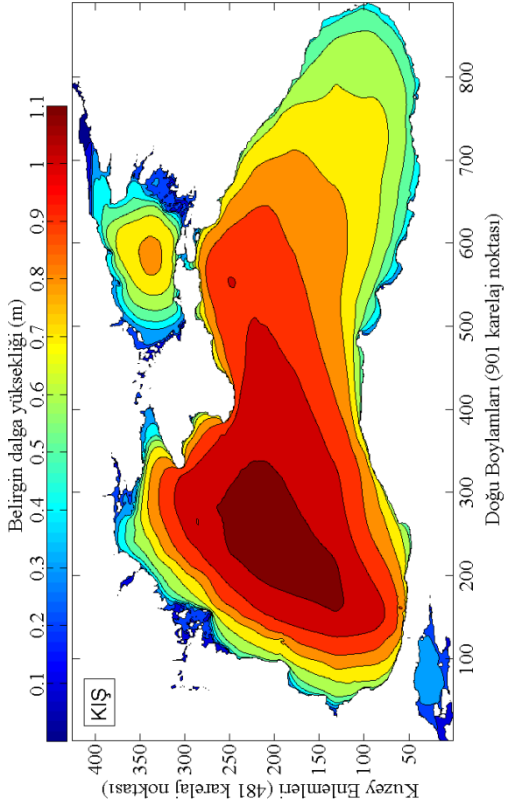
- Liu, Z. ve Frigaard, P., 2001. Generation and Analysis of Random Waves, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik, Aalborg Universitet, Denmark, 76 s.
- Madsen, O., S., Poon, Y., K. ve Graber, H., C., 1988. Spectral Wave Attenuation by Bottom Friction: Theory, 21<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ASCE), October, Spain, Proceedings: 849-857.
- Makarynskyy, O., 2004. Improving Wave Predictions with Artificial Neural Networks, Ocean Engineering, 31, 5-6, 709-724.
- Makarynskyy, O., Pires-Silva, A., A., Makarynska, D. ve Ventura-Soares, C., 2005. Artificial Neural Networks in Wave Predictions at the West Coast of Portugal, Computers & Geosciences, 31, 415-424.
- Massel, S., R., 1996. Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction, Advanced Series on Ocean Engineering, 11, World Scientific Publishing Co., No. 9810221096, Singapore, 508 s.
- Mei, C., C., 1983. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, Advanced Series on Ocean Engineering, 1, World Scientific Publishing Co., No. 9971507730, Singapore, 740s.
- Miles, J., W., 1957. On the Generation of Surface Waves by Shear Flows, Journal of Fluid Mechanics, 3, 2, 185-204.
- Moeini, M., H. ve Etemad-Shahidi, A., 2007. Application of Two Numerical Models for Wave Hindcasting in Lake Erie, Applied Ocean Research, 29, 137-145.
- Moeini, M., H. ve Etemad-Shahidi, A., 2009. Wave Parameter Hindcasting in a Lake using The SWAN Model, Transaction A: Civil Engineering, 16, 2, 156-164.
- NASA, Download PanoplyWin for Windows. National Aeronautics and Space Administration (NASA). [http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download\\_win.html](http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download_win.html) 15 Kasım 2010.
- Ozdamar, A., Gursel, K., T., Orer, G. ve Pekbey, Y., 2004. Investigation of the Potential of Wind-Waves as a Renewable Energy Resource: By the Example of Çeşme-Turkey. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 8, 581-592.
- Ozeren, Y. ve Wren, D., G., 2009. Predicting Wind-Driven Waves in Small Reservoirs, Technical Note, Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 52, 4, 1213-1221.
- Özger, M., 2007. Dalga Enerjisi Tahmini ve Stokastik Modelleme, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özger, M. ve Şen, Z., 2007. Prediction of Wave Parameters by using Fuzzy Logic Approach, Ocean Engineering, 34, 3-4, 460-469.

- Özhan, E. ve Abdalla, S., 1999. Turkish Coast Wind and Deep Water Wave Atlas, Applied Project Report, Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ocean Engineering Research Center, Ankara, Turkey.
- Özhan, E., Abdalla, S., Seziş-Papila, S. ve Turhan M., 1995. Measurements and Modeling of Wind-waves along the Turkish Mediterranean Coasts and the Black Sea, the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST'95), October, Tarragona, Spain, Proceedings: 1899-1910.
- Özhan, E. ve Yılmaz, N., 2004. Karadeniz'in Dalga Enerjisi, Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları V. Ulusal Konferansı, Mayıs, Adana, Bildiriler Kitabı: 585-596.
- Pelc, R. ve Fujita, R., M., 2002. Renewable Energy from the Ocean, Marine Policy, 26, 471-479.
- Phillips, O., M., 1957. On the Generation of Waves by Turbulent Wind, Journal of Fluid Mechanics, 2, 5, 417-445.
- Pierson, W., J. ve Moskowitz, L., 1964. A Proposed Spectral Form for Fully-developed Wind Sea based on the Similarity Law of S.A. Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research, 69, 5181-5202.
- Ris, R., C., 1997. Spectral Modeling of Wind Waves in Coastal Areas, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4. Delft University of Technology, Netherlands.
- Rogers, W., E., Kaihatu, J., M., Hsu, L., Jensen, R., E., Dykes, J., D. ve Holland, K., T., 2007. Forecasting and Hindcasting Waves with the SWAN Model in the Southern California Bight, Coastal Engineering, 54, 1-15.
- Rusu, E., 2009. Wave Energy Assessments in the Black Sea. Journal of Marine Science and Technology, 14, 359-372.
- Rusu, E. ve Soares, C., G., 2009. Numerical Modeling to Estimate the Spatial Distribution of the Wave Energy in the Portuguese Nearshore, Renewable Energy, 34, 1501-1516.
- Sağlam, M., 2004. Calculating the Technical Potential of Wave Energy in Turkey, Case Studies for Project Feasibility and Design, Master Thesis, Marmara University, Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, İstanbul.
- Sağlam, M. ve Uyar, T., S., 2005. Türk Suları İçin Dalga Enerjisi Örnek Proje Fizibilite Çalışması, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim, Mersin, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 1-6.
- Sağlam, M., Sulukan, E. ve Uyar, T., S., 2010. Wave Energy and Technical Potential of Turkey, Journal of Naval Science and Engineering, 6, 2, 34-50.
- Sebastiao, P., Soares, C., G. ve Booij, N., 2000. Wave Hindcasting off the Coast of Portugal, Coastal Engineering, 40, 411-425.

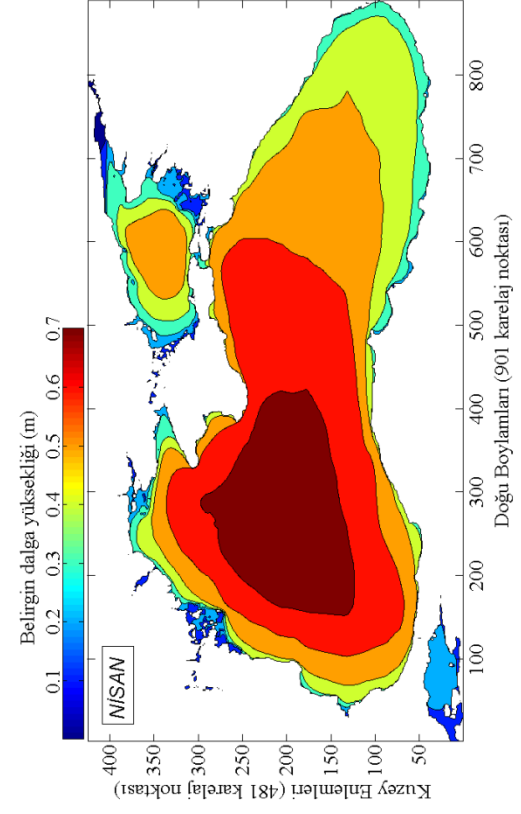
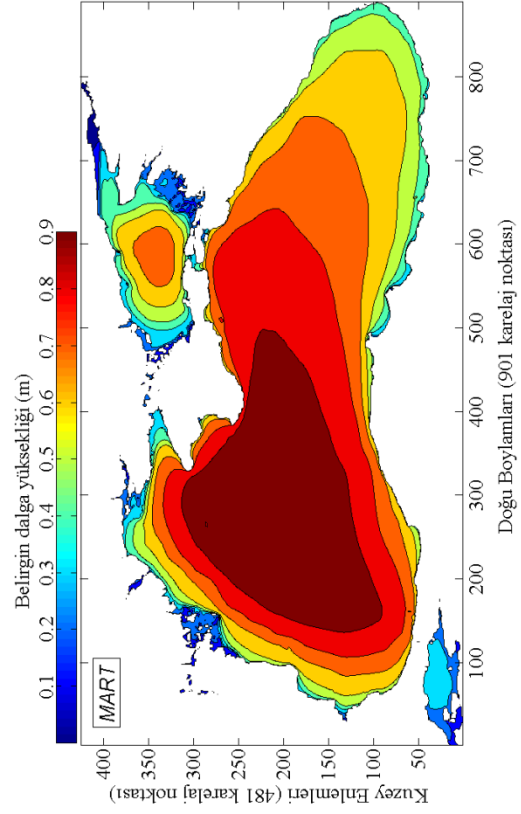
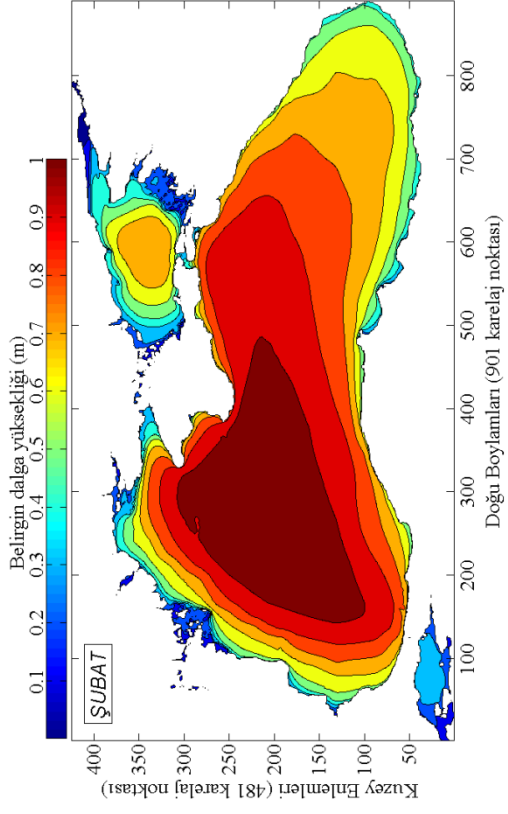
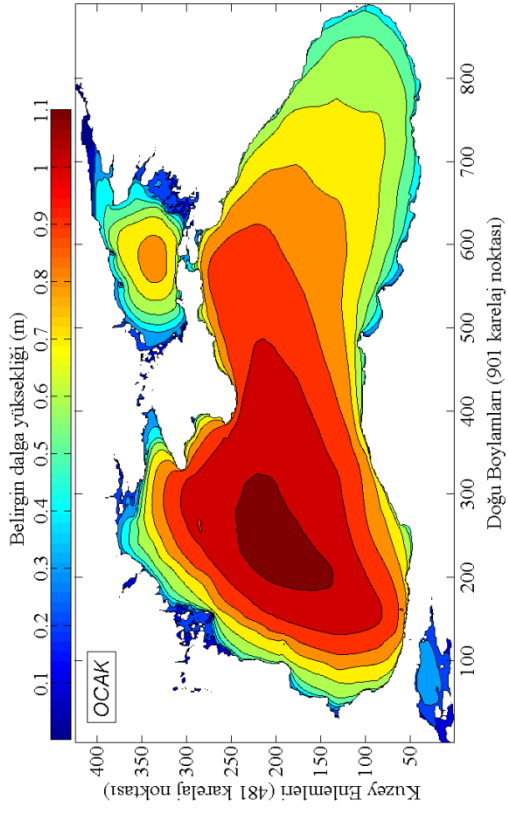
- Schwab, D., J., Bennett, J., R., Liu, P., C. ve Donelan, M., A., 1984. Application of a Simple Wave Prediction Model to Lake Erie, Journal of Geophysical Research, 89, C7, 3586-3592.
- Snyder, R., L., Dobson, F., W., Elliott, J., A. ve Long, R., B., 1981. Array Measurement of Atmospheric Pressure Fluctuations Above Surface Gravity Waves, Journal of Fluid Mechanics, 102, 1-59.
- SWAN, 2008. SWAN Cycle III Version 40.72 User Manual, SWAN Team, Delft University of Technology, Netherlands, 312 s.
- Şahin, C., Aydoğan, B., Çevik, E. ve Yüksel Y., 2007. Güneybatı Karadeniz Dalga Verileri ile Parametrik Dalga Modellemesi, VI. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Ekim, İzmir, Bildiriler Kitabı: 249-256.
- TEİAŞ, 2009. Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Ankara, Türkiye.
- Tolman, H., L., 1991. A Third Generation Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady and Inhomogeneous Depths and Currents, Journal of Physical Oceanography, 21, 6, 782-797.
- Tolman, H., L., 1992. Effects of Numerics on the Physics in a Third-generation Wind-wave Model, Journal of Physical Oceanography, 22, 10, 1095-1111.
- Tsai, C., P., Lin, C. ve Shen, J., N., 2002. Neural Networks for Wave Forecasting among Multi-stations, Ocean Engineering, 29, 13, 1683-1695.
- URL 1, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Karadeniz> Karadeniz. 1 Ekim 2011.
- URL 2, <http://www.haber10.com/makale/2298/> Karadeniz'in konumu ve önemi. 2 Ekim 2011.
- URL 3, <http://maps.google.com/>. 20 Ekim 2011.
- U.S. Army, 1984. Shore Protection Manual, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Fourth Edition – No. 20402, Washington (DC), USA, 652 s.
- U.S. Army, 2003. Coastal Engineering Manual, Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, No. EM 1110-2-1100, Washington (DC), USA, 77 s.
- Uygur, İ., Demirci, R., Saruhan, H., Özkan, A. ve Belenli, İ., 2006. Batı Karadeniz Bölgesindeki Dalga Enerjisi Potansiyelinin Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 1, 7-13.
- Uysal, K., 1995. Rüzgar Verileri Kullanarak Doğu Karadeniz'de Tasarım Dalgası Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Ün, Ü., T., 2003. Dalga Enerjisi, Teknolojisi, Ekonomisi, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu, II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim, İzmir, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 1-9.
- Van der westhuysen, A., J., 2002. The Application of the Numerical Wind-wave Model SWAN to a Selected Field Case on the South African Coast, Master Thesis, The University of Stellenbosch, Civil Engineering Department, South Africa.
- Van Vledder, G., 2011. Kişisel görüşme, 3 Ocak 2011.
- WAMDI group, 1988. The WAM Model: A Third Generation Ocean Wave Prediction Model, Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.
- Waters, R., Engström, J., Isberg, J. ve Leijon, M., 2009. Wave Climate off the Swedish West Coast, Renewable Energy, 34, 1600-1606.
- Wilson, B., W., 1965. Numerical Prediction of Ocean Waves in the North Atlantic for December, 1959, Ocean Dynamics, 18, 3, 114-130.
- WMO, 1998. Guide to Wave Analysis and Forecasting, World Meteorological Organization (WMO), WMO- No. 702, Geneva, Switzerland, 152 s.
- Young, I., R., 1999. Wind Generated Ocean Waves, Elsevier Ocean Engineering Book Series Volume 2, Elsevier Science, No. 0080433172, Australia, 307 s.
- Yüksel, Y. ve Çevik, E., Ö., 2009. Kıyı Mühendisliği, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., Deniz Mühendisliği Serisi – No. 1, Cağaloğlu, İstanbul, 732 s.
- Yüksek, Ö., 2010. Kıyı Mühendisliği Ders Notları (Yayınlanmamış), K.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- Zubier, K., M., 2002. Numerical Wave Simulations on Different Oceanic Scales, PhD. Thesis, The University of Maine, Department of Oceanography, Maine, United States.

## 6. EKLER

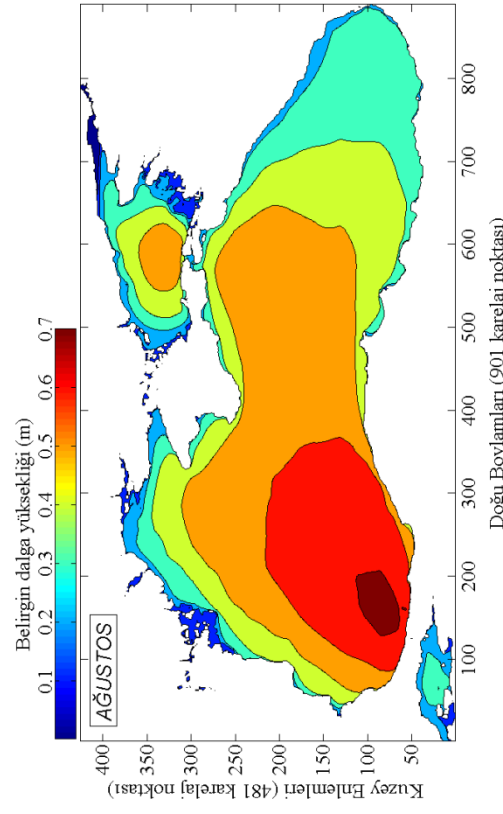
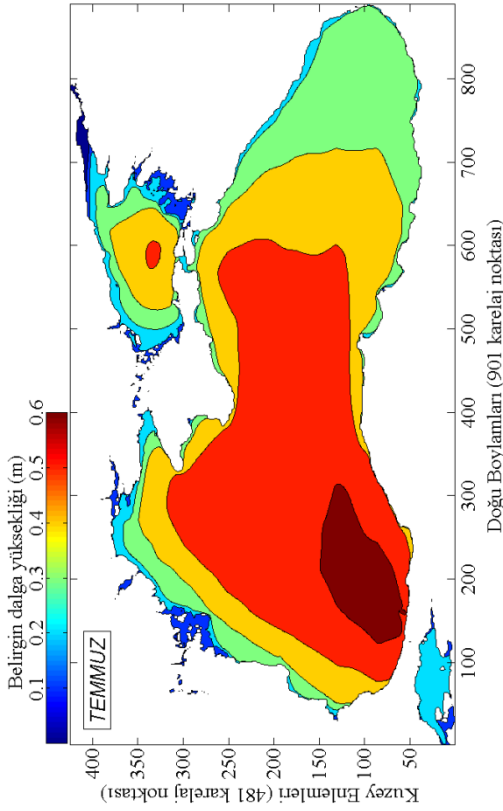
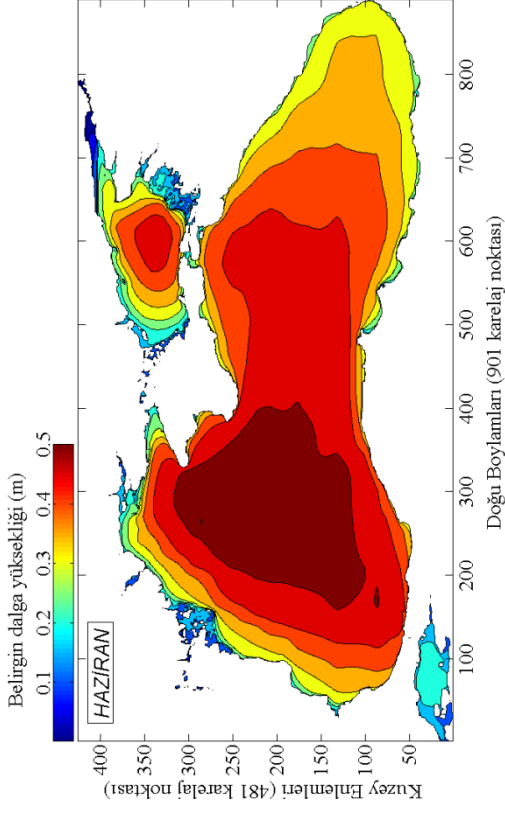
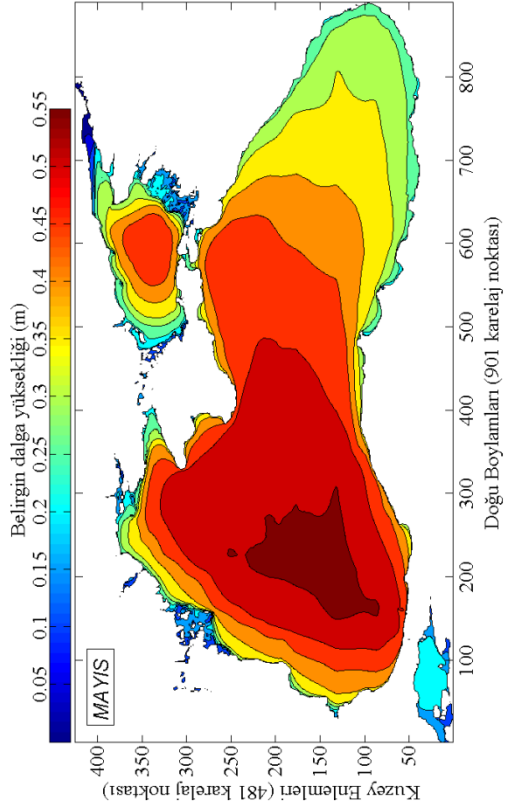


Ek Şekil 6.1. Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin SWAN model sonuçlarına dayanan mevsimlik dağılımları

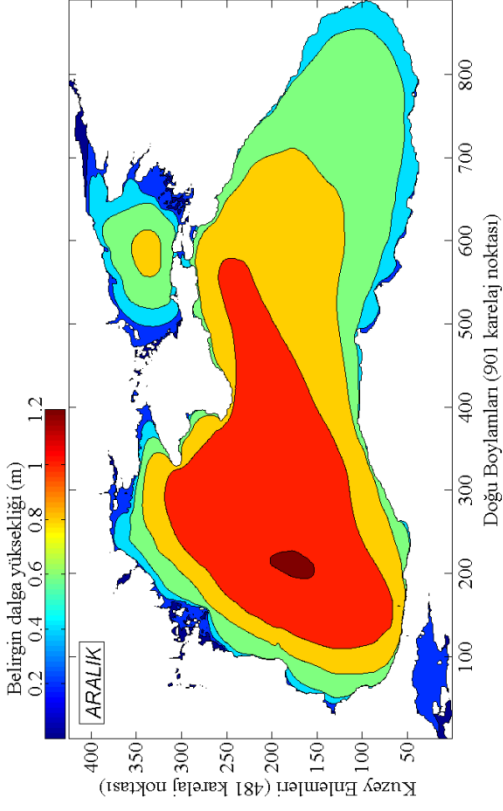
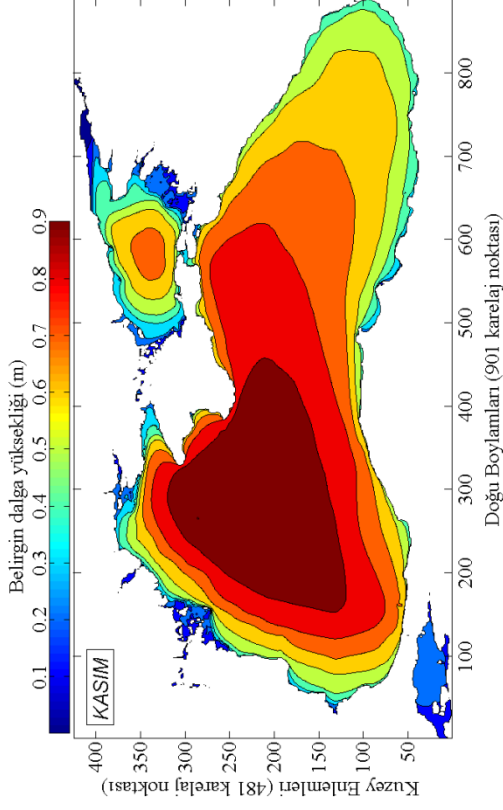
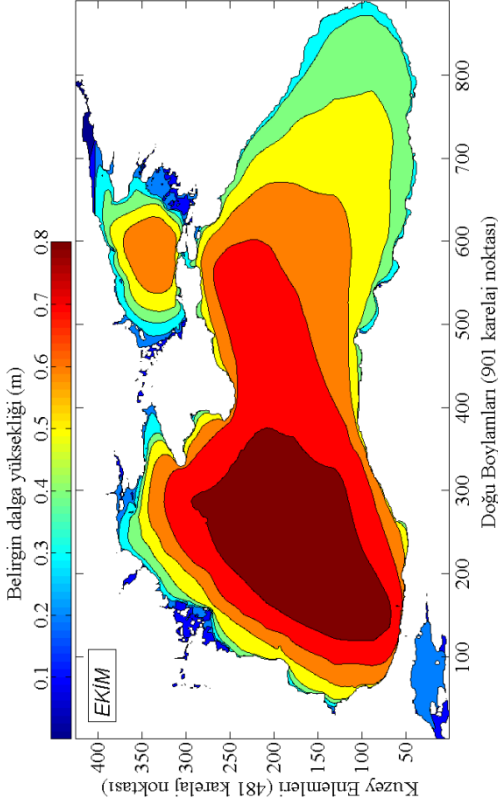
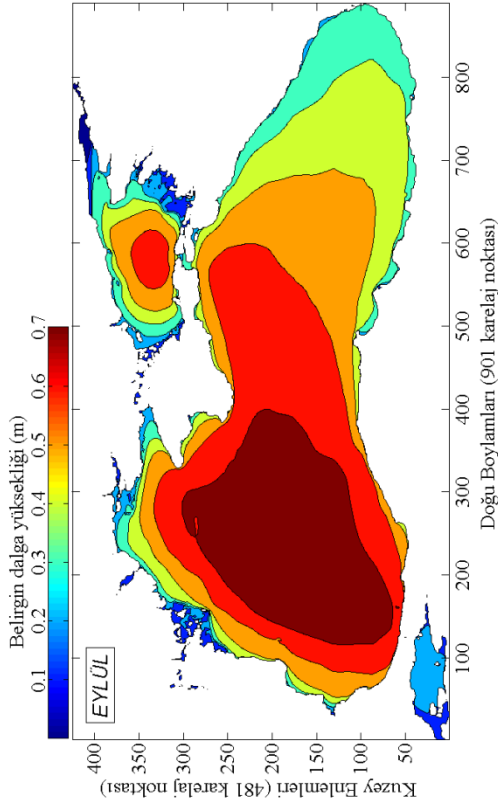


Ek Şekil 6.2. Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ocak, şubat, mart ve nisan ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları

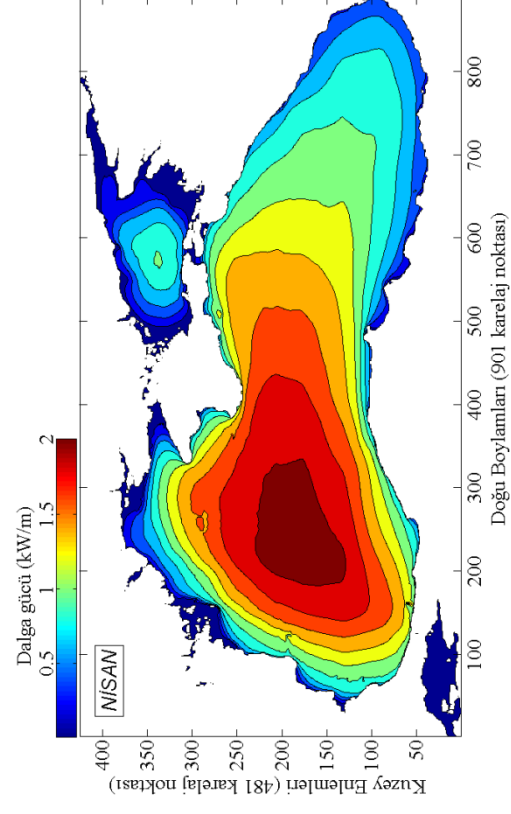
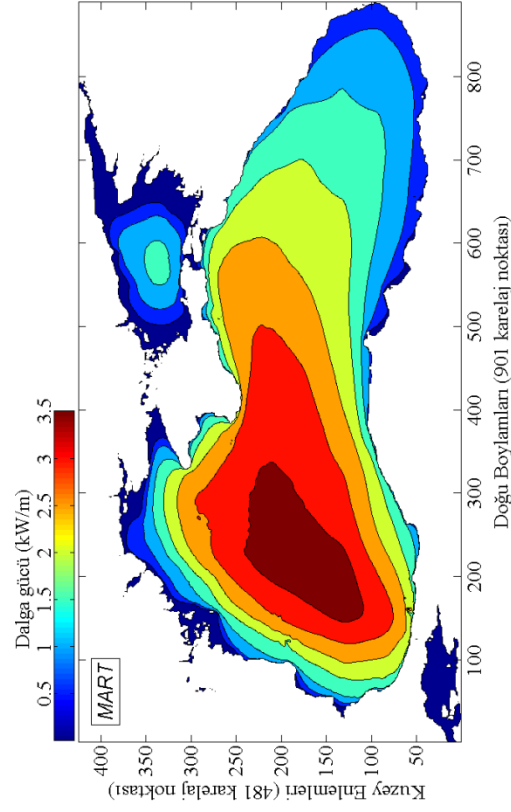
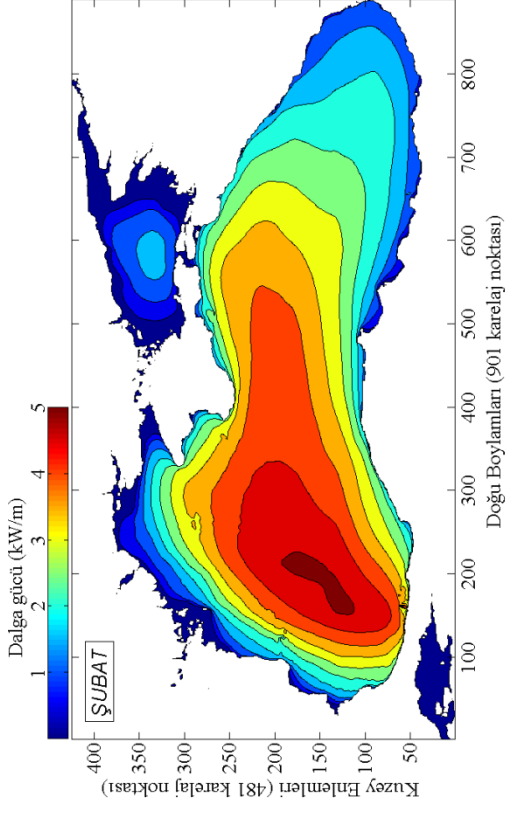
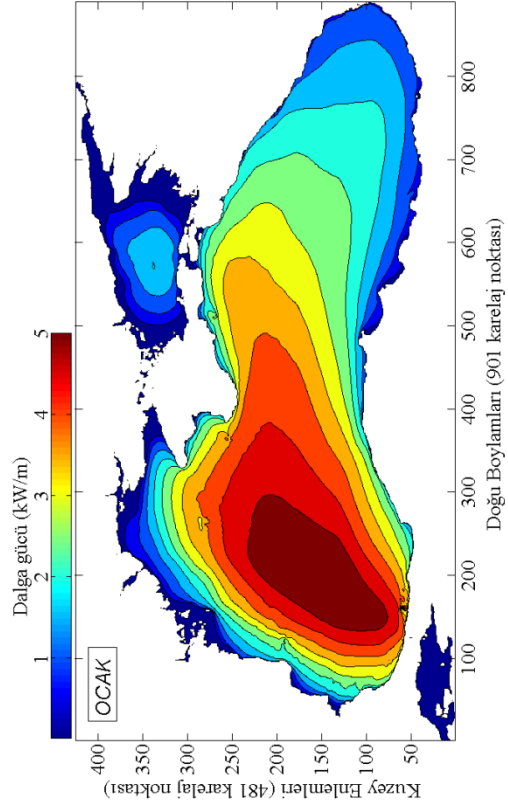




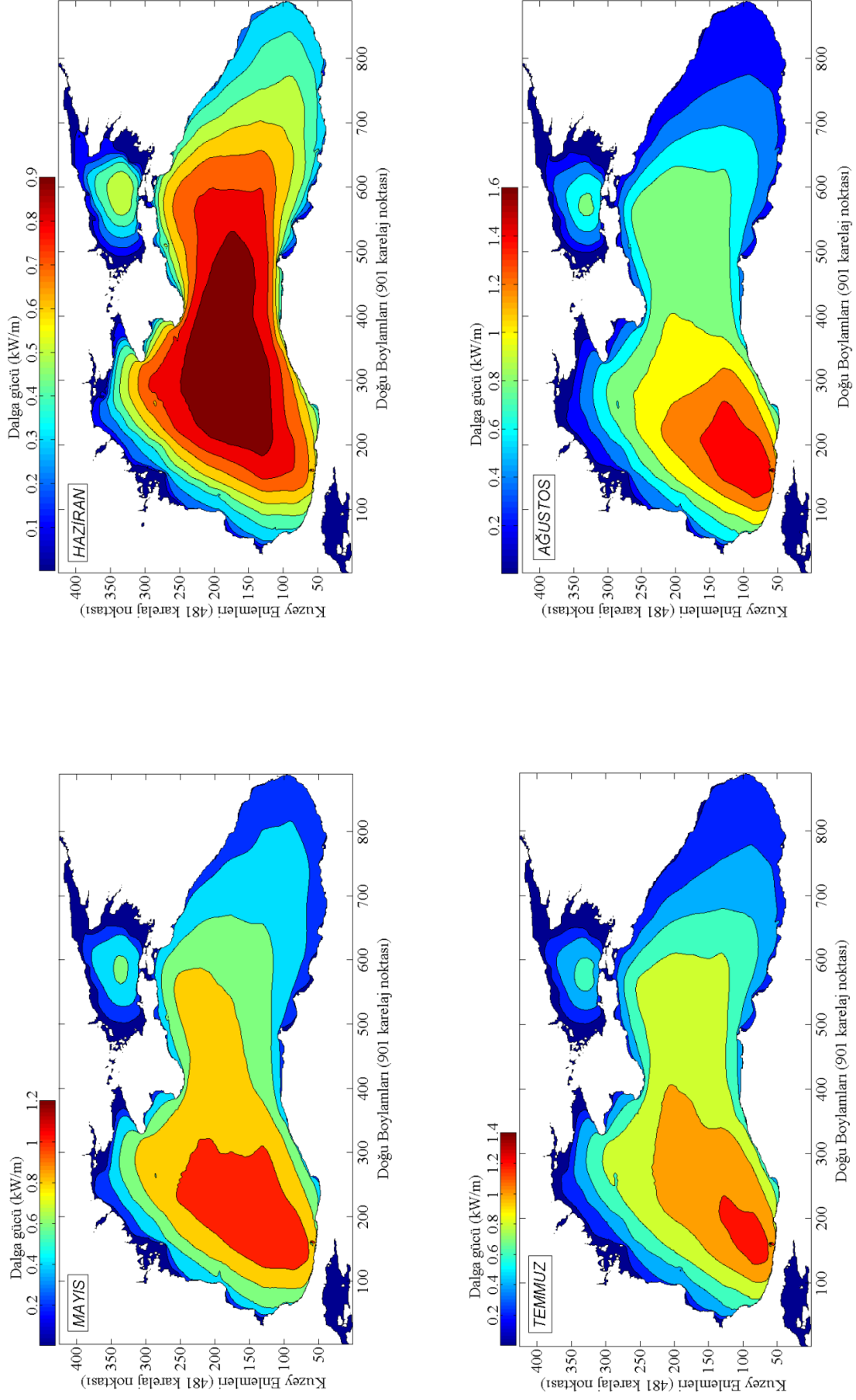
Ek Şekil 6.3. Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin mayıs, haziran, temmuz ve ağustos ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları



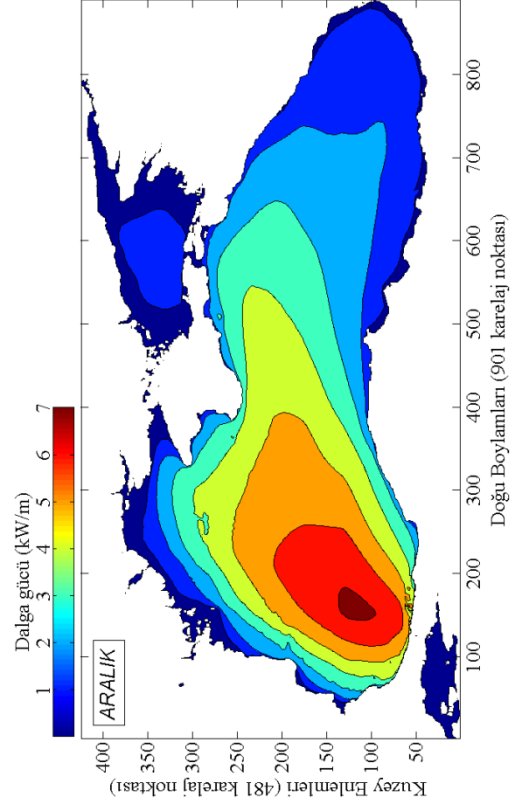
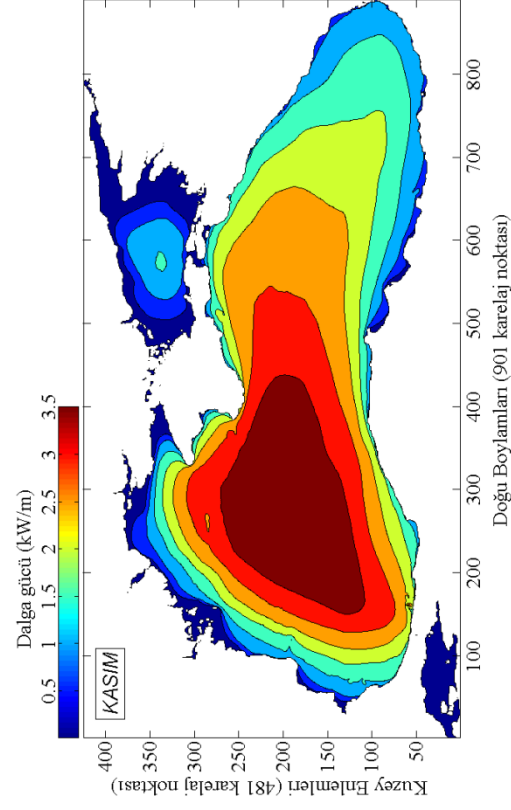
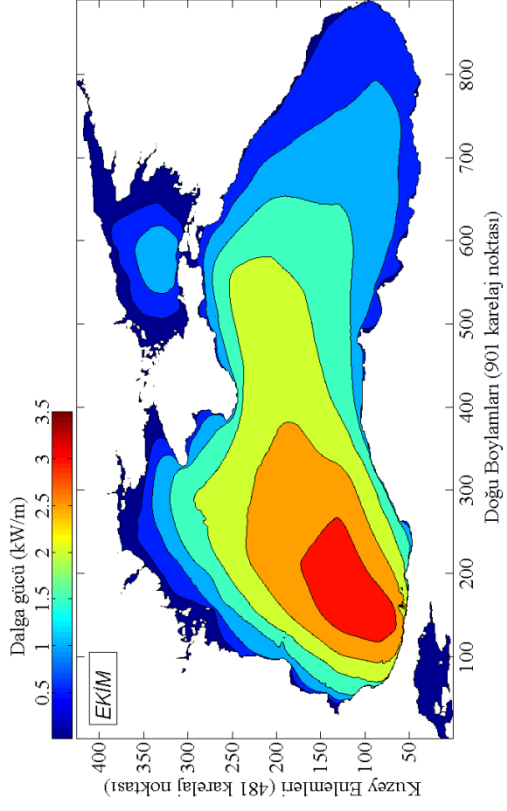
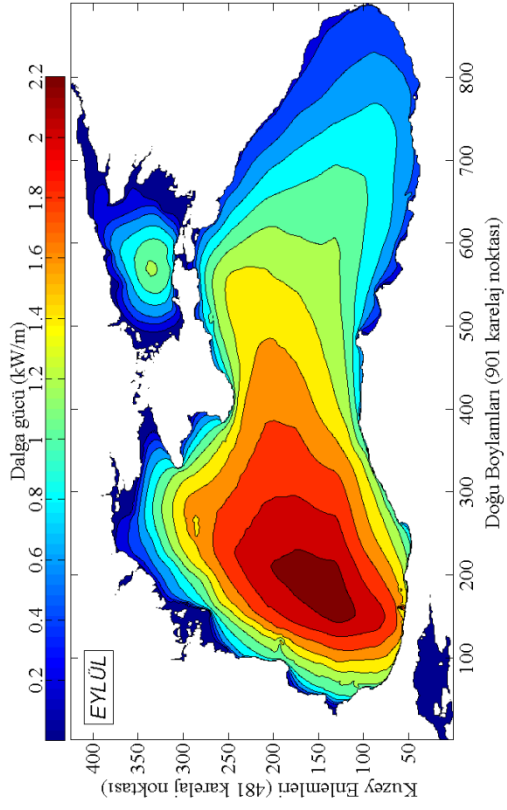
Ek Şekil 6.4. Yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin eylül, ekim, kasım ve aralık ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları



Ek Şekil 6.5. Yıllık ortalama dalga gücünün ocak, şubat, mart ve nisan ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları



Ek Şekil 6.6. Yıllık ortalama dalga gücünün mayıs, haziran, temmuz ve ağustos ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları



Ek Şekil 6.7. Yıllık ortalama dalga gücünün eylül, ekim, kasım ve aralık ayları için SWAN model sonuçlarına dayanan aylık dağılımları

## ÖZGEÇMİŞ

Adem AKPINAR 1982 yılında Trabzon ili Yomra ilçesi'nde doğdu. İlkokulu Yomra Merkez İlköğretim Okulu, ortaokulu Yomra Ortaokulu ve liseyi Yomra Lisesi'nde 1999 yılında tamamladı. 2000 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Bu bölümden 2004 yılında mezun oldu ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. Bir yıl süren İngilizce hazırlık programını bitirdikten sonra, Ocak 2007'de "Dünya, Avrupa Birliği ve Türkiye'nin Toplam Elektrik ve Hidroelektrik Enerji Üretim Projeksiyonu" adlı tez ile yüksek lisansını tamamlayarak yüksek mühendis unvanını aldı. Şubat 2007'de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmalarına başladı. 2006-2009 yılları arasında özel bir şirkette Trabzon Teknoloji Geliştirme Bölgesi (Trabzon TEKNOKENT) İnşaatının şantiye şefi olarak çalıştı. 2009 yılından itibaren Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Orta derecede İngilizce bilmektedir.