



**MARMARA DENİZİ'NDE CFSR VE ERA INTERİM  
RÜZGARLARI İLE ÇALIŞTIRILAN SWAN MODEL  
PERFORMANSLARI VE MODEL SONUÇLARININ UZUN  
DÖNEMLİ FARKLILIKLARI**

**Volkan KUTUPOĞLU**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MARMARA DENİZİ'NDE CFSR VE ERA İNTERİM RÜZGARLARI İLE  
ÇALIŞTIRILAN SWAN MODEL PERFORMANSLARI VE MODEL  
SONUÇLARININ UZUN DÖNEMLİ FARKLILIKLARI**

**Volkan KUTUPOĞLU**

Doç. Dr. Adem AKPINAR  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2017

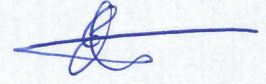
## TEZ ONAYI

Volkan KUTUPOĞLU tarafından hazırlanan “MARMARA DENİZİ’NDE CFSR VE ERA INTERİM RÜZGARLARI İLE ÇALIŞTIRILAN SWAN MODEL PERFORMANSLARI VE MODEL SONUÇLARININ UZUN DÖNEMLİ FARKLILIKLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Adem AKPINAR

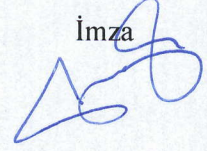
**Başkan** : Doç. Dr. Emre OTAY  
Boğaziçi Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



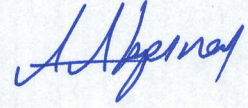
**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Cüneyt BAYKAL  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

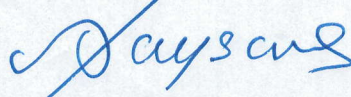


**Üye** : Doç. Dr. Adem AKPINAR  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü

11.../1/2018

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**21/12/2017**

**İmza**

**Volkan KUTUPOĞLU**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MARMARA DENİZİ'NDE CFSR VE ERA INTERİM RÜZGARLARI İLE ÇALIŞTIRILAN SWAN MODEL PERFORMANSLARI VE MODEL SONUÇLARININ UZUN DÖNEMLİ FARKLILIKLARI

**Volkan KUTUPOĞLU**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Doç. Dr. Adem AKPINAR**

Bu çalışmada, Marmara Denizi için yüksek çözünürlükte ve doğrulukta bir dalga tahmin modelinin geliştirilmesi ve bölgenin uzun dönemli rüzgar ve dalga karakteristiklerinin farklı açılardan analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla, öncelikle Marmara Denizi'ni kapsayan en son güncel re-analiz ürünleri olan CFSR ve ERA Interim rüzgar alanlarının Marmara Denizi özelinde kaliteleri, Marmara Denizi'nin kuzeyinde yer alan Silivri istasyonunun 2013 yılı ölçümleri ile test edilmiştir. Daha sonra, her iki rüzgar verisini girdi olarak kullanan üçüncü nesil bir dalga tahmin modeli olan SWAN modelin kalibrasyonu, özellikle modelin fiziksel sürecini etkileyen en duyarlı parametre olan köpüklenme formülleri ve bu formüllerdeki köpüklenme katsayısına odaklanılarak Silivri istasyonundaki 2013 yılı belirgin dalga yüksekliği ölçümlerine dayanarak yürütülmüştür. Geliştirilen modellerin doğrulanması, 1990 ve 2003 yıllarında ölçülmüş olan sırasıyla Marmara Ereğli ve Ambarlı istasyonu verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Marmara Denizi'nin yüzeysel dalgalarının benzeşimi, deniz şartlarını en iyi şekilde temsil edebilecek modellerin geliştirilmesinden sonra, her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modeller (toplamda 4 model) için 31 yıl boyunca ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve böylece, Marmara Denizi'nin uzun dönemli (1979- 2009) rüzgar ve dalga şartlarını içeren yüksek çözünürlüklü dört farklı veri seti türetilmiştir. Bu dört veri setinden, Marmara Denizi'nin tüm yüzeyi için, bazı dalga parametrelerinin ortalama ve maksimum şartları belirlenmiş ve dört farklı model sonuçları arasındaki farklılıklar tartışılmıştır.

Sonuçta, CFSR rüzgarlarının Marmara Denizi özelinde ERA Interim rüzgarlarına kıyasla daha kaliteli olduğu ve CFSR rüzgar veri seti için rüzgar girdi formülasyonu için Komen ve köpüklenme için  $C_{ds}=1,0$  olarak ayarlanmış Janssen formülasyonunu ve ERA Interim rüzgar veri seti için ise rüzgar girdi formülasyonu için Komen ve köpüklenme için  $C_{ds}=0,5e-5$  olarak ayarlanmış Komen formülasyonunu kullanan modellerin en iyi performansla sahip oldukları sonucuna varılmıştır. CFSR rüzgarları kullanarak kalibre edilen SWAN modelinin, normal dalga şartlarını ve farklı tekerrürlü ekstrem dalgaları tahmin etmede diğer modellere göre önemli bir üstünlük gösterdiği tespit edilmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin, Marmara Denizi'nin büyük bir bölümünde diğer 3 modele göre dalga parametrelerini daha yüksek tahmin ettiği, yalnızca Marmara Denizi'nin kuzey doğu bölgesinde adalar civarında ve güney batı bölgesinde Çanakkale boğazına doğru adaların güney batısında kalan bölümlerinde ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modele göre, daha düşük tahminlerde bulunduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Marmara Denizi, SWAN model, rüzgar dalgaları, dalga tahmini, CFSR, ERA Interim, 2017, xv+ 169 sayfa

**ABSTRACT**  
MSc Thesis

**LONG-TERM SPATIAL DIFFERENCES IN THE MODEL RESULTS AND  
PERFORMANCES OF SWAN MODELS FORCED WITH THE CFSR AND ERA  
INTERIM WINDS IN THE SEA OF MARMARA**

**Volkan KUTUPOĞLU**

Uludag University  
Graduate School of Natural Science and Applied Science  
Department of Civil Engineering

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adem AKPINAR**

The aim of this study is to develop a high resolution and high accuracy model to hindcast wave conditions in the Sea of Marmara, and to analyze long-term wind and wave characteristics of this area in different aspects. For this purpose, firstly qualities of the wind fields of CFSR and ERA Interim, which are the latest reanalyzed products involving the Sea of Marmara, are tested by comparing them with measurements performed in 2013 at the Silivri station which is in the north of the Sea of Marmara. Afterwards, calibration of the SWAN model, which is a third-generation wave prediction model forced with both wind data, is carried out on the basis of the wave height measurements at the Silivri station in 2013 especially by focusing on the whitecapping formulas, which are the most accurate parameters effecting the physical process of the model, and tuneable whitecapping parameters in these formulas. Verification of the developed models is carried out by using, respectively, the data of Marmara Ereğli and Ambarlı stations measured in 1990 and 2003. After the development of the models that represent the sea conditions best, the simulation of surface waves of the Sea of Marmara has been run separately for calibrated and default SWAN models forced with both of the wind data for 31 years. In this way, four different data sets containing long-term (1979 - 2009) wind and wave conditions of the Sea of Mamara are derived. From these four different data sets, average and maximum conditions of some wave parameters for the whole area of the Sea of Marmara are defined, and the differences between the results of the four different models are discussed.

Finally, it is concluded that CFSR winds have better quality for the Sea of Marmara in comparison to ERA Interim winds. Besides, it is concluded that when forced with CFSR wind, the best setting was the Komen formulation for the wind growth and the Janssen whitecapping formulation with  $C_{ds}=1,0$  and when forced with ERA Interim winds, the best setting was the Komen formulation for wind growth and Komen whitecapping formulation with  $C_{ds}=0,5e-5$ . It was identified that the calibrated SWAN model which uses CFSR winds give much better results compared to other models in predicting regular wave conditions and extreme waves for different return periods. It was concluded that in most parts of the Sea of Marmara, the calibrated SWAN model which uses CFSR winds gives higher results predicting wave parameters compared to other three models; and only in the northeast part around the islands and in the southwest towards the Dardanelles in the southwest of the islands the model gives lower results compared to the calibrated SWAN model which uses ERA Interim winds.

**Key Words:** The Sea of Marmara, SWAN model, wind waves, wave prediction, CFSR, ERA Interim, 2017, xv+ 169 page

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca sahip olduğum bilgiyi, tecrübeyi ve desteğini benden esirgemeyen, konu seçimi ile başlayarak bütün çalışma süreci içinde bizzat bulunan, ihtiyaç duyduğum her anda değerli bilgilerini ve zamanını benimle paylaşan tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Adem AKPINAR'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında ihtiyaç duyduğum her anda fikirlerini ve önerilerini aldığım, hiçbir zaman benden yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Recep Emre ÇAKMAK'a, İnşaat Mühendisi Bilal BİNGÖLBALİ'ye ve İnşaat Mühendisi Halid JAFALI'ya çok teşekkür ederim.

Sayısal analiz aşamasında karşılaşılan sorunların çözümündeki desteklerinden ve çalışma ile ilgili değerli yorumlarından dolayı Dr. Gerbrant Ph. Van VLEDDER'e, Marmara Ereğli ve Ambarlı istasyonlarındaki rüzgar ve dalga verilerinin temininde yardımlarından dolayı Prof. Dr. Adnan AKYARLI ve Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında kullandığım sayısal programın temininden dolayı Delft Üniversitesi SWAN araştırma grubuna, analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Laboratuvarını kullanmama izin veren Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Yönetimine, çalışma kapsamında kullandığım CFSR ve ERA Interim rüzgar alan verilerini paylaşmalarından dolayı NOAA (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)'ya ve ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi)'ye, Marmara Denizi'nin batimetrisini temin ettiğim GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)'ya, Silivri şamandırası verilerini sağlayan TPAO (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı)'ya ve ECMWF rüzgar alan verileri için gerekli izinlerin alımındaki yardımlarından dolayı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Bu uzun soluklu tez çalışmamda, desteği ve sevgisi ile her zaman yanımda olan ve hayatımın her anını birlikte yaşayacağım eşim Merve KUTUPOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Volkan KUTUPOĞLU  
21/12/2017

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Dalga Tahmin Yöntemleri.....	3
2.1.1. Dalga Tahmin Yöntemlerinin Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2. SWAN Üçüncü Kuşak Sayısal Dalga Tahmin Modeli .....	5
2.2.1. Hareket Denge Denklemi .....	6
2.2.2. Rüzgar Kaynaklı Dalga Üretimi veya Oluşumu .....	7
2.2.3. Dalga Enerjisinin Yayılımı ( $S_{ds}$ ) .....	9
2.2.4. Lineer Olmayan Dalga-Dalga Etkileşimleri.....	13
2.3 Literatür Özeti .....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	24
3.1. Çalışma Bölgesi .....	24
3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Veri Kaynakları .....	25
3.2.1 ECMWF Rüzgar Tahminleri.....	26
3.2.2. NOAA Rüzgar Tahminleri.....	27
3.2.3. Rüzgar ve Dalga Ölçümleri.....	29
3.2.4. Marmara Denizi'nin Batimetrisi .....	31
3.3. Rüzgar Veri Setlerinin Kalitelerinin Analiz Yöntemi .....	31
3.4. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler .....	34
3.4.1. Eş Zamanlı Analiz .....	35
3.4.2. Saçılım Diyagramları .....	36
3.4.3. Rüzgar ve Dalga Gülleri .....	37
3.4.4. Olasılık Dağılımları .....	38
3.4.5 Ekstrem Değer Analizi Yöntemi .....	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	42
4.1. Marmara Denizi İçin Dalga Tahmin Modelinin Geliştirilmesi .....	43
4.1.1. Rüzgar Veri Setlerinin Kalitelerinin Analizi .....	43
4.1.2. SWAN Modelin Marmara Denizine Uygulanması .....	49
4.1.3. SWAN Modelin Kalibrasyonu .....	50
4.1.4. SWAN Modelin Doğrulanması .....	63
4.1.5. SWAN Modelde Duyarlılık Analizi .....	69
4.1.6. Farklı Dalga Yükseklik Aralıklarında Modellerin Performansı .....	75
4.1.7 Geliştirilen Modellerin Yönel Performansları .....	77
4.1.8 Geliştirilen Modeller İçin Rüzgar Hızları ve Belirgin Dalga Yüksekliğinin Olasılık Dağılımlarının Kıyaslanması .....	89
4.1.9 Ekstrem Dalgaları Tahmin Edebilme Performansı .....	91
4.2. Marmara Denizi'nin Yüzey Dalgalarının Uzun Dönemli Analizi .....	95
4.2.1 Ortalama Rüzgar Hızları (U10) .....	96



4.2.2 Ortalama Belirgin Dalga Yükseklikleri (Hm0) .....	102
4.2.3 Ortalama Dalga Periyotları (Tm02) .....	110
4.2.4 Ortalama Dalga Enerji Periyotları (Tm-10) .....	117
4.2.5 Kritik Bir Dalga Yüksekliği Değerinden (0,5 m, 1 m ve 2 m) Belirgin Dalga Yüksekliğinin Daha Büyük Olma Olasılığı .....	126
4.2.6 %95 ve %99 Aşılmama İhtimalli Belirgin Dalga Yükseklikleri .....	130
4.2.7 Maksimum Belirgin Dalga Yükseklikleri (Hm0) .....	133
5.SONUÇ .....	137
KAYNAKLAR .....	145
EKLER .....	151
EK 1. Marmara Denizi'nin hesaplama ağı ile birlikte batimetrik haritası .....	152
EK 2. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri .....	153
EK 3. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri .....	157
EK 4. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri .....	161
EK 5. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri .....	165
ÖZGEÇMİŞ .....	169

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A, B$	Dalga frekans ve yönü ile rüzgar hızı ve yönüne bağlı katsayılar
$C$	Ölçek parametresi
$A$	Yer parametresini
$C_D$	Direnç katsayısı
$c_x, c_y$	Sırasıyla $x$ ve $y$ yönlerindeki dalga yayılma hızı
$c_\sigma, c_\theta$	Sırasıyla $\sigma$ ve $\theta$ yönlerindeki dalga yayılma hızı
$c_{g0}$	Akıntı hızı olmadan hesaplanan grup hızı
$c_{ph}$	Dalga ilerleme hızı
$C_{ds}, \delta$ ve $\rho$	Rüzgar girdisi için ayarlanabilir katsayılar
$C_{ds}$	Köpüklenme parametresi
$C_b$	Taban sürtünme katsayısı
$C_{nl4}$	Dörtlü lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi
$C_{fjon}$	Jonswap sürtüne katsayısı
$C_f$	Collins sürtünme katsayısı
$kn$	Madsen sürtünme katsayısı
$d$	Su derinliği
$D_{tot}$	Dalga kırılması nedeniyle toplam enerjide dağılmanın oranı
$D_x, D_y$	Sırasıyla noktalar arası yatay ve dikey uzaklık
$d_{xi}, d_{yi}$	Sırasıyla yatay ve dikey olarak istasyonla olan mesafe
$E(\sigma, \theta)$	Enerji yoğunluğu
$E_{tot}$	Toplam dalga enerjisi
$f_w$	Boyutsuz sürtünme faktörü
$f_w(V)$	Weibull yoğunluk fonksiyonu
$F_w(V)$	Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu
$f_R(V)$	Rayleigh yoğunluk fonksiyonu
$F_R(V)$	Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu
$G$	Yer çekimi ivmesi
$G_{(H)}$	Gumbel aşılması olasılığı fonksiyonu
$H$	Pierson and Moskowitz'e göre filtre terimi
$H_{max}$	Hesaplanan derinlikteki maksimum dalga yüksekliğini
$H_{m0}$	Belirgin dalga yükseklikleri
$i$	Azalan sırayla oluşturulan verilerden hesaplanan verinin sırasını
$k$	Şekil parametresini

$k$	Dalga sayısı
$\bar{k}$	Ortalama dalga sayısı
$N(\sigma, \theta)$	Hareket yoğunluğu
$n$	Veri sayısını
$N$	Toplam veri sayısını ifade etmektedir
$r_i$	En yakın karelej noktalarının ölçüm istasyonuna uzaklıkları
$R$	Korelasyon katsayısı
$S$	Dalga saçılması ve üretiminin bütün etkilerini temsil eden kaynak ifadesi
$S_{ds,w}$	Denizin köpüklenmesiyle oluşan dalga dağılımıyla enerji kaybı
$S_{ds,b}$	Taban sürtünmesi nedeniyle dalga dağılımıyla enerji kaybı
$S_{ds,br}$	Taban odaklı kırılma nedeniyle dalga dağılımıyla enerji kaybı
$S_{inp}$	Rüzgar girdisi nedeniyle oluşan dalga üretimi
$t$	Zaman
$T_{m02}$	Dalga Periyodu
$T_{m-10}$	Dalga Enerji Periyodu
$U_{10}$	10 m yükeklikteki rüzgar hızı
$U_*$	Sürtünme hızı
$U_{rms}$	Taban yörünge hareketi
$u, v$	Sırasıyla enlemsel ve boylamsal yönlerde su yüzeyinin 10 metre yukarısındaki rüzgar hızları
$u_i$	En yakın karelej noktalarındaki rüzgar hızları
$V$	Rüzgar hızı
$V_{ort}$	Rüzgar hızlarının ortalamasını
$w_i$	Alansal ağırlık
$x, y$	Kartezyen koordinat sistemindeki düzlemleri
$X_i$	Ölçülen değerleri
$X_{ort}$	Ölçümlerin ortalaması
$Y_i$	Tahmin değerleri
$Y_{ort}$	Tahminlerin ortalaması
$Z_e$	Efektif yüzey pürüzlülüğü
$Q_b$	Kırılan dalgaların fonksiyonu
$Q_{(H_s)}$	Gumbel aşılma olasılığı fonksiyonu
$\sigma$	Rölatif dalga frekansı
$\sigma$	Rüzgar hızlarının standart sapmasını
$\theta$	Dalga birleşenlerinin yayılma yönü

$\theta_w$	Rüzgar yönü
$\sigma_{PM}^*$	Pik periyot
$\rho_a, \rho_w$	Sırasıyla hava ve suyun öz kütlesi
$\lambda$	Boyutsuz kritik yükseklik
$\Gamma$	Bağımlı diklik katsayısı,
$\bar{\sigma}$	Ortalama frekans
$\bar{s}$	Genel dalga dikliği
$\bar{s}_{PM}$	Pierson-Moskowitz spektrumunda dalga dikliği
$\gamma$	Kırılma parametresi
$\beta$	Miles katsayısı
$\kappa$	Von Karman katsayısı

### Kısaltmalar

### Açıklama

AK	Avrupa Konseyi
Bias	Ortalamaların Farkı
CEM	Kıyı Mühendisliği El Kitabı
CFS	Climate Forecast System
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
D	Doğu
ECMWF	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi
EUMETSAT	Avrupa Meteoroloji Uyduları İşletme Teşkilatı
ESA	Avrupa Uzay Ajansı
GWT	Ağırlık Dalgaları Tablolarından
GRIB	Gridded Binary Uzantılı Dosya Formatı
GEBCO	Okyanusların Genel Batimetrik Grafikleri
JONSWAP	Kuzey Denizi Ortak Dalga Gözlem Projesi
K	Kuzey
MAE	Mutlak Ortalama Hata
MATLAB	Matrix Laboratory
MS-DOS	Disk İşletim Sistemi
NOAA	Ulusal Okyanus Ve Atmosfer Dairesi
NATO	Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
NASA	Ulusal Havacılık Ve Uzay Dairesi
NCEP	NOAA Rüzgar Tahmin Veri Tabanı
OECD	Ekonomik Kalkınma Ve İşbirliği Örgütü
RMSE	Hataların Ortalama Karekökü
R	Korelasyon Katsayısı
SI	Saçılım İndeksi
SPM	Kıyı Koruma el Kitabı
SWAN	Yakın Kıyı Dalga Benzeşim Modeli
TPAO	Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
US Army	Amerika Birleşik Devletleri Ordusu
WAMDI	Dalga Modeli Geliştirme ve Uygulama

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Çalışma alanı ve Marmara Denizinin batimetrisi .....	25
Şekil 3.2. Ölçüm İstasyonlarının Marmara Denizi üzerindeki konumları .....	29
Şekil 3.3. Silivri şamandıra istasyonu (sarı nokta), CFSR veri setinin en yakın karelej noktaları (yeşil noktalar) ve ERA Interim veri setinin en yakın karelej noktaları (kırmızı noktalar) .....	32
Şekil 4.1. CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından alansal ağırlıklı ortalama (ilk satır) ve uzaklık ağırlıklı ortalama (ikinci satır) yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon (üçüncü satır) için temin edilen ve SWAN model çıktılarında (dördüncü satır) türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızları ile Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin zaman serileri kıyaslaması .....	45
Şekil 4.2. CFSR (üstte) ve ERA Interim (altta) rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama (ilk sütun) ve alansal ağırlıklı ortalama (ikinci sütun) yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon (üçüncü sütun) için temin edilen ve SWAN model çıktılarında (dördüncü sütun) türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızları ile Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin saçılım diyagramları .....	46
Şekil 4.3. CFSR rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış ve en iyi performansa sahip SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı zaman serileri kıyaslaması .....	57
Şekil 4.4. ERA Interim rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış ve en iyi performansa sahip SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı zaman serileri kıyaslaması .....	58
Şekil 4.5. CFSR rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için [Komen&Janssen (ilk sütun), Janssen&Janssen (ikinci sütun), Janssen&Komen (üçüncü sütun), Komen&Komen (dördüncü sütun), Yan&Westhuysen (beşinci sütun)] varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış (üstte) ve en iyi performansa sahip (altta), SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı saçılım diyagramları .....	59
Şekil 4.6. ERA Interim rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için [Komen&Janssen (ilk sütun), Janssen&Janssen (ikinci sütun), Janssen&Komen (üçüncü sütun), Komen&Komen (dördüncü sütun), Yan&Westhuysen (beşinci sütun)] varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış (üstte) ve en iyi performansa sahip (altta) SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı saçılım diyagramları .....	60
Şekil 4.7. CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçüm istasyonu verilerine karşı zaman serileri kıyaslaması .....	62
Şekil 4.8. CFSR (üstte) ve ERA Interim (altta) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Silivri şamandıra istasyonundaki 2013 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliğinin saçılım diyagramları .....	63

Şekil 4.9. CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Ambarlı ölçüm istasyonu verilerine karşın zaman serileri kıyaslaması .....	65
Şekil 4.10. ERA Interim (altta) ve CFSR (üstte) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Ambarlı ölçüm istasyonundaki 2003 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliklerinin saçılım diyagramları .....	66
Şekil 4.11. ERA Interim (altta) ve CFSR (üstte) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Marmara Ereğli Ölçüm İstasyonundaki 1990 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliklerinin saçılım diyagramları .....	67
Şekil 4.12. CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Ereğli ölçüm istasyonu verilerine karşın zaman serileri kıyaslaması .....	68
Şekil 4.13. Silivri istasyonu için ölçülmüş rüzgar gülleri ve CFSR ve ERA Interim rüzgar hızlarından türetilen rüzgar gülleri (bütün veri için) .....	78
Şekil 4.14. Silivri istasyonunda kış mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri .....	78
Şekil 4.15. Silivri istasyonunda ilkbahar mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri .....	79
Şekil 4.16. Silivri istasyonunda yaz mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri .....	80
Şekil 4.17. Silivri istasyonunda sonbahar mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri .....	81
Şekil 4.18. Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (bütün veri için) .....	83
Şekil 4.19. Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (kış mevsimi için) .....	84
Şekil 4.20. Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (ilkbahar mevsimi için) .....	85
Şekil 4.21. Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (yaz mevsimi için) .....	86
Şekil 4.22. Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model	

sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (sonbahar mevsimi için) .....	87
Şekil 4.23. Rüzgar ölçümleri ile CFSR ve ERA Interim rüzgar tahminleri olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği .....	90
Şekil 4.24. Rüzgar ölçümleri İle CFSR ve ERA Interim rüzgar tahminleri kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği .....	90
Şekil 4.25. Silivri ölçüm istasyonu ile CFSR ve ERA Interim tahmin veri setlerinin dalga yüksekliği olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği .....	91
Şekil 4.26. Silivri ölçüm istasyonu ile CFSR ve ERA Interim tahmin veri setlerinin dalga yüksekliği kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği .....	91
Şekil 4.27. Silivri ölçüm istasyonu için aylık maksimum ölçülmüş belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri) .....	93
Şekil 4.28. Silivri istasyonu için CFSR kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri) .....	93
Şekil 4.29. Silivri istasyonu için CFSR varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri) .....	94
Şekil 4.30. Silivri istasyonu için ERA Interim kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri) .....	94
Şekil 4.31. Silivri istasyonu için ERA Interim varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri) .....	95
Şekil 4.32. CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama rüzgar hızlarının (ilk satır) ve CFSR ortalama rüzgar hızı-ERA Interim ortalama rüzgar hızı farklarının (ikinci satır) alansal dağılımları .....	97
Şekil 4.33. CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun) ve CFSR mevsimlik ortalama rüzgar hızları-ERA Interim mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları .....	100
Şekil 4.34. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliğinin (ilk satır, ilk sütun), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama $H_{m0}$ - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama $H_{m0}$ (ilk satır, ikinci sütun), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama $H_{m0}$ - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama $H_{m0}$ (ikinci satır, ilk sütun) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama $H_{m0}$ - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama $H_{m0}$ farklarının (ikinci satır, ikinci sütun) alansal dağılımları .....	104
Şekil 4.35. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama $H_{m0}$ farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları .....	108

Şekil 4.36. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama  $T_{m02}$  (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş swan ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları ..... 112

Şekil 4.37. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları .....114

Şekil 4.38. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları ..... 118

Şekil 4.39. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları .....123

Şekil 4.40. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m (ilk sütun), 1 m (ikinci sütun) ve 2 m'lik (üçüncü sütun) dalgaların aşılma ihtimallerinin (ilk satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları ..... 129

Şekil 4.41. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 (ilk sütun) ve %99 (ikinci sütun) aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - ERA



Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $h_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları ..... 132  
Şekil 4.42. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliğinin maksimum değerlerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN maksimum  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN maksimum  $H_{m0}$  (ikinci satır), ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN maksimum  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN maksimum  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları ..... 134



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Dalga ölçüm istasyonlarının koordinatları, kıyıdan uzaklıkları ve derinlikleri .....	30
Çizelge 3.2. Ölçüm istasyonlarındaki rüzgar hızı (V) ve belirgin dalga yüksekliğinin ( $H_{m0}$ ) istatistiği .....	31
Çizelge 3.3. Karelaj noktalarının koordinatları ve şamandıraya olan uzaklıkları .....	32
Çizelge 4.1. CFSR rüzgar veri setlerinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları	44
Çizelge 4.2. ERA Interim rüzgar veri setlerinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları .....	44
Çizelge 4.3. Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 0 m/sn ile 4 m/sn arasındaki rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarında türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları .....	47
Çizelge 4.4. Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 4 m/sn ile 8 m/sn arasındaki rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarında türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları .....	48
Çizelge 4.5. Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 8 m/sn den büyük rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarında türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları .....	49
Çizelge 4.6. CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN tahmin sonuçlarının (dalga yüksekliği) Silivri ölçümü verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları .....	53
Çizelge 4.7. ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN tahmin sonuçlarının (dalga yüksekliği) Silivri ölçümü verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları .....	54
Çizelge 4.8. CFSR ve ERA Interim en iyi model sonuçları ve varsayılan ayarlamalı model sonuçlarının Silivri dalga yüksekliği ölçüm verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları .....	61
Çizelge 4.9. 2003 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin ( $H_{m0}$ ) Ambarlı ölçümleri ile eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata istatistikleri .....	64
Çizelge 4.10. 1990 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Ereğli ölçümleri ile eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata istatistikleri .....	67
Çizelge 4.11. CFSR ve ERA Interim rüzgarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve farklı hesaplama zaman aralıklı SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı analiz sonuçları .....	72
Çizelge 4.12. CFSR ve ERA Interim rüzgarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve girdi olarak kullanılan her iki rüzgar veri setinin değerleri belli oranda artırılarak ayarlanmış SWAN tahmin modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı analiz sonuçları .....	74
Çizelge 4.13. Farklı dalga yüksekliği aralıklarında SWAN tahmin model sonuçlarının Silivri istasyonu ölçümlerine karşı eş zamanlı hata analiz sonuçları .....	76

Çizelge 4.14. Silivri istasyonu için ölçülmüş ve tahmin edilmiş maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak belirlenen farklı yinleme periyotlu ekstrem değer istatistiği .....92



## 1.GİRİŞ

Kıyı ve liman yapılarının tasarımı, dalga enerjisi potansiyelin belirlenmesi, kıyılarda erozyon, denizel kirlilik ve sediment taşınımı gibi birçok Kıyı Mühendisliği probleminin çözümünde dalgaların uzun dönemli istatistiki bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dalgaların uzun dönemli ölçülmesi hem çok zaman hem de yüksek maliyet gerektirdiği için dalga karakteristikleri farklı metotlar kullanılarak tahmin edilmektedir. Rüzgar dalgalarının tahmini / modellenmesi, sınırların doğal oluşu ve süreci etkileyen çok fazla parametre olmasından dolayı zordur. Ancak, bilgisayar teknolojisi ve dalga modelleme bilgilerinin geliştirilmesi sayesinde sayısal modeller oluşturarak istenilen havzada dalga modellemesi yapmak mümkündür. Bu sayısal modeller hem maliyet hem de zaman bakımından büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, rüzgar dalgalarının üretilmesindeki karmaşık fiziksel süreçler ve dalgaların taşınım mekanizmaları bu modeller sayesinde hesaplanabilmektedir. Günümüzde, SWAN üçüncü nesil spektral dalga modeli, kıyı mühendislik uygulamalarında en yaygın uygulanan spektral dalga modellerinden biridir. Araştırma ve danışmanlık çalışmaları için ücretsiz temin edilebilmektedir. Bu model, özellikle kıyı uygulamaları için tasarlanmış ve laboratuvar şartlarında ve okyanus ölçeğinde de kullanılabilmektedir (Moeini ve Etemad-Shahidi 2009).

Rüzgar dalgalarının modellenmesinde, rüzgar alanlarının zamansal ve mekansal çözünürlükleri ve modeldeki fiziksel parametreler model performansını etkilemektedir (Ardhuin ve Roland 2013). Ayrıca, sınırlı feç mesafesi ve batimetrisinin yapısından dolayı dalga modellemesi küçük ve kapalı havzalarda daha zor olmaktadır. Ülkemizde, rüzgar verileri DMİ Genel Müdürlüğü tarafından sunulan iki kaynaktan temin edilebilmektedir. Bunlardan ilki, günün her saatindeki saatlik ortalama rüzgar hızları (m/s) ve rüzgar yönlerini içeren saatlik rüzgar cetvelleridir. Diğer kaynak ise, 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 sinoptik yer basınç haritalarıdır (Akpınar 2012). Ancak, yerel rüzgar ölçümleri kullanılarak her zaman doğru sonuçlar elde edilememektedir. Örneğin, bölgede bulunan bir meteoroloji istasyonunun kıyıdan kara tarafına doğru uzakta konumlandırılması,

istasyonun çalışma bölgesine uzak konumlanmış olması ve istasyonun karada konumlanması gibi sebeplerden dolayı, rüzgar kaynaklı dalga karakteristikleri doğayla uyumlu olmayabilmektedir (Arı ve ark. 2007). DMİ istasyonlarından alınan ölçümler, ancak çeşitli ampirik yöntemlerle açık deniz verisi haline dönüştürülerek kullanılabilir. Ayrıca, ölçüm istasyonlarının oluşturduğu ağın çözünürlüğünün düşük olması da doğruluğu etkileyen önemli bir faktördür (Akpınar 2012). Bu sebeplerden dolayı, bu çalışmada, Türkiye tarafından kaydı gerçekleştirilmeyen ancak Türkiye'yi kapsayan yüksek alansal çözünürlüklere sahip iki farklı rüzgar alanının (CFSR ve ERA Interim) performansları tartışılmış ve dalga modelleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Marmara Denizi için günümüze kadar rüzgar-dalga modellemesi üzerine gerçekleştirilen 3 çalışma (Özhan ve Abdalla 1999; Saraçoğlu 2011; Abdollahzadeh moradi ve ark. 2014) mevcuttur. Bu çalışmalar, model geliştirilmesinde veya kalibrasyonunda ya hiç dalga ölçümü kullanmamış ya da yeterli uzunlukta olmayan dalga ölçümleri kullanmıştır. Şu anki çalışmada ise 1 yıllık (2013) rüzgar ve dalga ölçüm verisi bulunan TPAO Silivri şamandıra verileri kullanılarak model kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, modellerde girdi olarak hem daha önceki çalışmalarda da kullanılan ECMWF ERA Interim veri setleri hem de daha önce Marmara Denizi'ndeki dalga modelleme çalışmalarında kullanılmamış olan CFSR veri setleri tanımlanmıştır.

Ayrıca, her iki rüzgarı kullanan SWAN modeller için, en etkin fiziksel parametre olan köpüklenme katsayısının uygun değerleri araştırılmıştır. Böylece, her iki rüzgar için en iyi ayarlamalı SWAN modeller oluşturulabilmiştir. Ayrıca, SWAN modeller varsayılan ayarlamalı olarak da çalıştırılmış ve en iyi ayarlamalı model ile sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, her iki rüzgar veri kaynağı ile dört farklı model kullanılarak farklı dalga parametrelerini içeren 31 yıllık veri setleri üretilmiş ve bu dört farklı veri setinin dalga tahminleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak pek çok farklı açıdan analiz edilmiştir.

## **2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI**

Bu bölümde, dalgaların tahmin edilme yöntemlerinin anlaşılabilmesi amacıyla, öncelikle dalga tahmin yöntemlerinin tarihsel gelişim süreci genel olarak anlatılmış ve bu tez kapsamında ilgilenilen üçüncü nesil bir sayısal dalga tahmin modeli olan SWAN (Simulating WAve Nearshore)'ın dalgaları hesaplama sürecindeki denklemler ayrıntılı olarak sunulmuştur. Son olarak, tez çalışması kapsamında konuyla ilgili literatür taraması özet bilgileri verilerek, yapılan çalışmanın diğer çalışmalara göre üstünlükleri belirtilmiştir.

### **2.1. Dalga Tahmin Yöntemleri**

Dalga parametrelerinin uzun dönemli ölçülmesi oldukça zor ve pahalıdır ve çok fazla zaman gerektirmektedir. Çoğu ölçülmüş mevcut dalga verileri de çok kısa periyotludur. Böylece, ölçülmüş mevcut veriler kullanılarak bunlardan daha uzun süreli dalga parametreleri elde etme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Uzun dönemli rüzgar verilerine ulaşmak genellikle dalga verilerine ulaşmaktan daha kolaydır. Bundan dolayı, geçmişten günümüze dalga parametreleri temini daha kolay olan rüzgar ve basınç verileri kullanılarak birçok yöntemle tahmin edilmeye çalışılmıştır (Akpınar 2012).

#### **2.1.1. Dalga Tahmin Yöntemlerinin Tarihsel Gelişimi**

Kıyı mühendisliği çalışmalarının bir bilim dalı olarak tanınmasında II. Dünya Savaşı başlangıç tarihi olarak anılmaktadır. Bu savaş sırasında müttefik askeri birliklerin Normandiya kıyılarına çıkartma yapması askeri bir proje olarak ortaya konulmuştur. Bu projede askeri teçhizatın sağlanabilmesi için bir limana ihtiyaç duyulmuştur. Kısıtlı sürede çıkarmanın başarılı olmasının anahtarı prefabrike bir limandır. Projenin hayata geçirilebilmesi için günümüz kıyı mühendisliği temel araştırma konuları olan kıyı özellikleri, rüzgar ve dalga iklimi, dalga tahmini, akıntılar, zemin araştırmaları konularında bölgenin tüm verileri derlenmiştir. Bu veriler ışığında, liman projelendirilmiş ve limanın parçaları olan büyük dubalar, iskeleler, köprü dubaları ve bağlantılar İngiltere'de 1942-1944 yılları arasında inşa edilmiştir. Çıkartma gününden

bir gün sonra limanın parçaları denizden taşınarak çok kısa sürede yerlerine monte edilmiştir (Ergin 2002). Böylece, rüzgar dalgaları ile ilgili modern çalışmalar bu savaş sürecinde yapılan dalga tahmin çalışmalarından sonra başlamıştır.

Tarihsel süreç içerisinde dalga parametrelerinin tahmin edilebilmesi için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bunlar; basitleştirilmiş dalga tahmin modelleri ve sayısal dalga tahmin modelleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bütün sayısal dalga modellerinin temeli enerji kaynak terimlerinin çözümüne dayanmaktadır. Bu yaklaşımların dışında, boyut analizlerine dayanan ve daha basit olan yarı ampirik yöntemler de günümüzde hala kullanılmaya devam edilmektedir. Yarı ampirik yöntemlerle ilgili modern çalışmalar Sverdrup ve Munk (1947)'un İkinci dünya savaşı sırasında yaptığı dalga tahmin çalışmaları ile başlamıştır. Bu çalışmalar Bretschneider (1950, 1958) ve Wilson (1961, 1965) tarafından geliştirilerek SMB yöntemi olarak bilinen revize edilmiş dalga tahmin yöntemi sunulmuştur. Hasselman ve ark. (1973), 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. JONSWAP spektrumuna dayanan bir parametrik model kullanılarak SPM (US Army 1984) yöntemi ile açık deniz dalga tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, belirgin dalga yüksekliği ve pik periyot, rüzgar hızı, feç uzunluğu ve fırtına süresi ile ilişkilidir. SPM yöntemi, 2003 yılında güncellenerek kullanımı kolay ve pratik olan Coastal Engineering Manual (CEM) (US Army 2003) yöntemi geliştirilmiştir. Bir başka yöntem ise Donelan ve ark. tarafından geliştirilen ve sunulan özellikle feç limitli koşullar için uygun olan dalga tahmin yöntemidir (Donelan 1980, Donelan ve ark. 1985). Donelan yöntemi rüzgar ve dalga yönleri arasında bir tutarlılık olduğu kabulünü yapmamaktadır. Bu yöntemde, eğer rüzgar yönündeki feç mesafesi fazla ise, dalga yönünde daha uzun feçlere doğru eğilim göstereceği varsayılmaktadır. Basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri herkes tarafından kolayca kullanılabilir. Ancak, bu yöntemler bütün problemlere cevap verememekte olup bazı çalışmalarda dalga parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Yüksek hızlı bilgisayarların

gelişimiyle enerji taşınımı denklemine dayanan sayısal dalga tahmin modelleri tasarlanmıştır. Bu yöntemlerde modeller birinci, ikinci ve üçüncü nesil sayısal dalga tahmin yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. İlk model 1950'lerin sonunda Gelci ve ark. (1957) tarafından geliştirilmiştir. Ancak, bu modelde birçok kaynak fonksiyonuyla ilgili belirsizlikler mevcuttur. Phillips (1957) ile Miles (1957)'ın 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, Akpınar 2012). 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 WAVEWATCH III modeli (Tolman 1991), MIKE 21 SW (DHI 2007) ve bu çalışma kapsamında kullanılan SWAN modeli (Booij ve ark. 1999) gösterilebilmektedir (Çevik ve ark. 2006, Özger 2007, Şahin 2007, Akpınar 2012).

## **2.2. SWAN Üçüncü Kuşak Sayısal Dalga Tahmin Modeli**

SWAN, derin su dalga koşulları, rüzgâr, taban topografyası, akıntılar ve gel-gitleri (derin ve sığ sulardaki) esas alarak, yakın kıyıdaki düzensiz dalga hareketlerini hesaplamada kullanılan en yaygın bilgisayar modelidir. SWAN modelde rüzgar kaynaklı dalga üretimi, dalgaların ilerlemesi, dalga-dalga etkileşimleri, derinlik etkileşimli kırılma ve taban sürtünmesi sonucu enerji kaybı süreçlerinin tamamı hesaplanabilmektedir. Hollanda'da bulunan Delft University of Technology tarafından



geliştirilmiş olan SWAN model ülkemizde de Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü tarafından son yıllarda varsayılan modda kullanılmaya başlanmıştır.

### 2.2.1. Hareket Denge Denklemi

SWAN model, dalgaların gelişimini ifade etmek için hareket yoğunluğu denklemini kullanmaktadır. Ortam akısının varlığında enerji yoğunluğu korunmazken, hareket yoğunluğu korunmaktadır. Hareket yoğunluğu  $N(\sigma, \theta)$ , rölatif dalga frekansı ( $\sigma$ ) ile bölünmüş enerji yoğunluğuna  $E(\sigma, \theta)$  eşittir. SWAN tarafından kullanılan geçerli spektral hareket denge denklemi kartezyen koordinat sisteminde;

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;  $x$  ve  $y$  kartezyen koordinat sistemindeki düzlemleri,  $t$  zamanı,  $\theta$  her dalga birleşeninin yayılma yönünü,  $c_x, c_y, c_\sigma$  ve  $c_\theta$  ise sırasıyla  $x, y, \sigma$  ve  $\theta$  yönlerindeki dalga yayılma hızını ifade etmektedir.  $S$  dalga yayılımı ve üretiminin bütün etkilerini temsil eden kaynak ifadesidir. Denklem 2.1'in sol tarafındaki ilk ifade hareket yoğunluğunun zamanla değişimini, ikinci ve üçüncü ifadeler bir  $(x, y)$  coğrafik alandaki hareket yoğunluğunun yayılmasını temsil etmektedir. Dördüncü ve beşinci ifadeler sırasıyla derinlik ve akıntı değişimleri nedeniyle bağıl frekans kaymasını ve derinlik ve akıntı etkileşimli sapmayı ifade etmektedir.

Yayılma hızı lineer dalga teorisinden elde edilmektedir (Whitham 1974, Dingemans 1997, Qin ve ark. 2005). Rölatif frekans  $\sigma^2 = gk \tanh kd$  'ye dayanarak akıntı hızı olmadan hesaplanan grup hızı  $c_{g0} = \frac{\partial \sigma}{\partial k}$  formülasyonu ile belirlenmektedir. Burada;  $k$  dalga sayısı,  $d$  su derinliği,  $g$  yer çekimi ivmesidir. Ayrıca,  $c_{g0}$  parametresi  $x, y$

ve  $\sigma$  'ya bağlıdır. Aynı şekilde, derin su teorisine göre grup hızı  $c_{g0} = \frac{g}{2\sigma}$  formülü ile hesaplanırken, çok sığ suda ise grup hızı  $c_{g0} = \sqrt{gd}$  formülü ile hesaplanmaktadır.

### 2.2.2. Rüzgar Kaynaklı Dalga Üretimi veya Oluşumu

Bir rüzgar alanının sahip olduğu kinetik enerjinin, dalga enerjisine dönüştürülmesi  $S_{imp}$  kaynak ifadesi yardımıyla modellenmektedir.

$$S_{imp}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.2)$$

Burada;  $A$  ve  $B$ , dalga frekansı ve dalga yönü ile birlikte rüzgar hızı ve rüzgar yönüne bağlıdır.  $A$  katsayısı lineer büyümeyi tanımlarken,  $B$  katsayısı üstel büyümeyi ifade etmektedir. Lineer büyüme ifadesi  $A$  küçüktür ve yalnızca dalga artışının başlangıç safhasına katkıda bulunmaktadır (De Jong 1997). Rüzgar kaynaklı lineer büyüme terimi  $A$ , Cavaleri ve Malanotte-Rizzoli (1981) ifadeleriyle tanımlanmakla birlikte Pierson Moskowitz frekansından daha düşük frekanslarda dalga büyümesini ortadan kaldırmak için bir filtre ile kullanılmaktadır (Tolman 1992).

$$A = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{g^2 2\pi} \left[ U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)] \right]^4 H \quad (2.3)$$

$$H = \exp(-(\sigma / \sigma_{PM}^*)^{-4}) \quad (2.4)$$

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0,13g}{28U_*} 2\pi \quad (2.5)$$

Burada; tam gelişmiş durumda  $\theta_w$  rüzgar yönünü,  $H$  filtre terimini ve  $\sigma_{PM}^*$  ise pik periyodu tanımlamaktadır (Pierson ve Moskowitz 1964).

SWAN modelde, rüzgar kaynaklı üstel büyüme terimi  $B$  için iki farklı ifade bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, Komen ve ark. (1984)'e göre ifade edilmekle birlikte burada  $B$  ;  $U_*/c_{ph}$  'nin bir fonksiyonudur.

$$B = \max \left[ 0; 0,25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left[ 28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \right] \sigma \quad (2.6)$$

Burada;  $c_{ph}$  dalga ilerleme hızını ifade etmektedir.  $\rho_a$  ve  $\rho_w$  ise sırasıyla hava ve suyun öz kütlesidir. Rüzgar kaynaklı üstel büyüme terimi  $B$  'nin ikinci ifadesi Janssen (1989, 1991a)'e göre tanımlanmaktadır. Burada  $B$  yarı-lineer rüzgar-dalga teorisine göre

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \left[ \max [0; \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \right] \quad (2.7)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;  $\beta$  Miles katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayı, Janssen (1991a) teorisinde  $\lambda$  olarak ifade edilen boyutsuz kritik yüksekliğe göre aşağıdaki bağıntılara göre hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{1,2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda \quad \lambda \leq 1 \quad (2.8)$$

$$\beta = 0 \quad \lambda > 1$$

$$\lambda = \frac{gZ_e}{2c_{ph}} e^r \quad (2.9)$$

$$r = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (2.10)$$

Burada;  $\kappa$  Von Karman katsayısı ve  $\kappa = 0,41$  olarak alınmaktadır.  $Z_e$  ise efektif yüzey pürüzlülüğünü ifade etmektedir. SWAN’da belirlenmiş rüzgar hızı  $U_{10}$  olmasına rağmen, 10 metre yüksekliğindeki rüzgar hızı, sürtünme hızı ( $U_*$ ) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.11)$$

Burada;  $C_D$  direnç katsayısı olarak tanımlanmaktadır Wu (1982). Direnç katsayısı  $C_D$ ;

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1,2875 \times 10^{-3} & U_{10} < 7,5 (m/sn) \\ (0,8 + 0,065 \times U_{10}) \times 10^{-3} & U_{10} \geq 7,5 (m/sn) \end{cases} \quad (2.12)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır.

### 2.2.3. Dalga Enerjisinin Yayılımı ( $S_{ds}$ )

Dalga enerjisinin dağılımı veya kaybı terimi 3 farklı sürecin toplamı ile temsil edilmektedir. Bunlar; köpüklenme ( $S_{ds,w}$ ), taban sürtünmesi ( $S_{ds,b}$ ) ve derinlik etkileşimli dalga kırılması ( $S_{ds,br}$ ) olarak ifade edilmektedir.

#### Köpüklenme ( $S_{ds,w}$ )

Köpüklenme olayı, maksimum dalga dikliğinin ( $H_{max}/L = 0,14$ ) aşılması durumunda meydana gelmektedir. SWAN modelde köpüklenme süreci Hasselman (1974)’nin modeline dayanmaktadır. Formülasyon WAMDI grup (1988) tarafından sonlu su

derinliğinde uygulanabilmesi için frekans yerine dalga sayısına dayanarak yeniden formüle edilmiştir.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta) \quad (2.13)$$

Burada;  $\Gamma$  bağımlı diklik katsayısı,  $k$  dalga sayısı,  $\bar{\sigma}$  ve  $\bar{k}$  sırasıyla ortalama frekans ve ortalama dalga sayısını ifade etmektedir. Komen ve ark. (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 ve ark. (1984)'na ve ikincisi ise Janssen (1991a)'e dayanarak bu ifadenin uyarlanmasıdır. Burada; bağımlı diklik katsayısı Janssen (1991a)'e dayanarak adapte edilen Günther ve ark. (1992)'dan alınmıştır.

$$\Gamma = C_{ds} \left( (1 - \delta) + \delta \frac{k}{\bar{k}} \right) \left( \frac{\bar{s}}{\bar{s}_{PM}} \right)^\rho \quad (2.14)$$

Burada;  $C_{ds}$ ,  $\delta$  ve  $\rho$  ayarlanabilir katsayılar,  $\bar{s}$  genel dalga dikliği ve  $\bar{s}_{PM}$  ise Pierson-Moskowitz spektrumundan (1964) alınan  $\bar{s}$  değeridir.  $\bar{s}_{PM} = \sqrt{3,02 \times 10^{-3}}$  değerinde olmakla beraber genel dalga dikliği;

$$\bar{s} = \bar{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (2.15)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Ortalama frekans  $\bar{\sigma}$ , ortalama dalga sayısı  $\bar{k}$  ve toplam dalga enerjisi  $E_{tot}$  ise aşağıda gösterildiği gibi verilmektedir (WAMDI grup 1988).

$$\bar{\sigma} = \left( E_{tot}^{-1} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (2.16)$$

$$\bar{k} = \left( E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (2.17)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.18)$$

SWAN modeldeki  $C_{ds}$ ,  $\delta$  ve  $\rho$  ayarlanabilir katsayılar Komen ve ark. (1984) ve Janssen (1991a)'den derin sular için idealleştirilmiş dalga büyümesi koşullarında (hem büyüyen hem de tamamen gelişmiş rüzgar dalgaları için) elde edilmiştir. SWAN modelde, Komen ve ark. (1984) formülasyonun da rüzgar girdisi için ayarlanabilir değerler  $C_{ds} = 2,36 \times 10^{-5}$ ,  $\delta = 0$  ve  $\rho = 4$  olurken Janssen (1991a,b) ve Günther ve ark. (1992)'na göre  $\rho = 4$  olarak alınırsa  $C_{ds} = 4,10 \times 10^{-5}$  ve  $\delta = 0,5$  olarak kullanılmaktadır.

SWAN 'ın ortalama ya da pik dalga periyodunu %10 ile %20 civarında düşük tahmin ettiği SWAN (2014)'te belirtilmektedir. Ayrıca, Rogers ve ark. (2003)'ün araştırmalarında  $\delta$  parametresinin 0'dan 1'e ayarlanması ile düşük frekanslardaki dalga enerjisinin iyileştirilmiş tahminine yol açtığı belirtilmiştir. Bu sebeple, versiyon 40.91A'dan itibaren  $\delta = 1$  varsayılan olarak kullanılmaktadır. Ayrıca,  $C_{ds}$ 'in tekrar ayarlanmadan kullanılması feç sınırlı ve sınırsız feç durumlarında dalgaların olduğundan yüksek tahminine sebep olduğu belirtilmektedir (Pierson ve Moskowitz 1964).

SWAN' da köpüklenme için alternatif bir tanımlama Van der Westhuysen ve ark. (2007) ve Van der Westhuysen (2007) tarafından Alves ve Banner (2003)'ün ifadelerinden adapte edilerek yapılmıştır. Bu adaptasyon sonucunda bu formülasyonlar karışık deniz kabarması ve sığ sularda da uygulanabilmektedir.

## Taban Sürtünmesi ( $S_{ds,b}$ )

SWAN'da taban sürtünmesi modeli ampirik model olan JONSWAP (Hasselmann ve ark. 1973), sürüklenme kanunu modeli olan Collins (1972) ve türbülans-viskozitesi modeli olan Madsen ve ark. (1988) olmak üzere üç farklı ifadeyle tanımlanabilmektedir. SWAN modelin oluşturulmasında kullanıcı bu üç modelden herhangi birini isteğe bağlı olarak seçebilmektedir. SWAN modelde taban sürtünmesi

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (2.19)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Burada;  $C_b$  taban sürtünme katsayısı olmakla birlikte genellikle taban yörünge hareketi ( $U_{rms}$ )'ne göre değişmektedir.

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma^2}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (2.20)$$

Taban sürtünme katsayısı Hasselmann ve ark. (1973) tarafından ölüdeniz dalgası koşullarında  $C_b = C_{JON} = 0,038m^2s^{-3}$  ve rüzgar dalgası koşullarında  $C_b = C_{JON} = 0,067m^2s^{-3}$  olarak hesaplanırken, Collins (1972)'in sürüklenme kanununa göre  $C_b = C_f \times g \times U_{rms}$  olarak verilmiştir. Collins (1972) formülünde  $C_f = 0,015$  olarak alınmaktadır. Bir diğer taban sürtünme modeli olan Madsen ve ark. (1988)'a göre ise taban sürtünme katsayısı  $C_b = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$  olarak hesaplanmaktadır. Burada;  $f_w$  Madsen ve ark. (1988) tarafından tahmin edilmiş boyutsuz sürtünme faktörü olarak belirlenmektedir.

### Derinlik Etkileşimli Dalga Kırılması ( $S_{ds, br}$ )

SWAN'da derinlik etkileşimli dalga kırılması, Battjes ve Janssen (1978)'in dalga kırılma modelinin derinlik sınırlı bölümünün spektral versiyonu kullanılarak hesaba katılmaktadır. Bu modelde derinlik etkileşimli dalga kırılması  $S_{ds,br}$  ;

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (2.21)$$

denklemleri ile formüle edilmiştir. Burada;  $E_{tot}$  toplam dalga enerjisini ve  $D_{tot}$  ise Battjes ve Janssen (1978)'e göre dalga kırılması nedeniyle toplam enerjide dağılımın oranıdır.

$D_{tot}$  ;

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left( \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_{max}^2 \quad (2.22)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;  $H_{max}$  hesaplanan derinlikteki maksimum dalga yüksekliğini ifade etmekte ve su derinliğine ( $d$ ) göre  $H_{max} = \gamma d$  olarak hesaplanmaktadır. SWAN'da kırılma parametresi  $\gamma = 0,73$  olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, SWAN modelde  $\alpha_{BJ} = 1$  olarak alınmaktadır.  $Q_b$ , kırılan dalgaların oranı olarak tanımlanmakta ve

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{max}^2} \quad (2.23)$$

denkliği ile ifade edilmektedir.

#### 2.2.4 Lineer Olmayan Dalga-Dalga Etkileşimleri

Derin denizde dörtlü (quadruplet) dalga-dalga etkileşimleri spektrumun gelişiminde hakim rol üstlenmektedir. Dörtlü dalga dalga etkileşimleri, dalga enerjisini spektral



pikten daha düşük frekanslara ve daha yüksek frekanslara transfer etmektedir. SWAN, dörtlü dalga-dalga etkileşimini Ayrık Etkileşim Yaklaşımı kullanarak hesaba katmaktadır (Hasselmann ve ark. 1985). Derin ve orta derinlikli sularda, dörtlü dalga etkileşimleri önemli iken çok sığ sularda üçlü dalga etkileşimleri önemli olmaktadır. Bu çl dalga-dalga etkileşimleri çok sığ bölgelerde enerjiyi düşük frekanslardan daha yüksek frekanslara aktarmaktadır (Beji ve Battjes 1993). SWAN, çl dalga-dalga etkileşimlerini Eldeberky ve Battjes (1995)'in Yığışımlı çl Yaklaşımı (LTA)'nı kullanarak hesaba katmaktadır.

### 2.3 Literatür zeti

Tez alışması kapsamında konuyla ilgili literatür taramasının zet bilgileri aşağıda sunulmuştur;

Ou ve ark. (2002), Tayvan Adasını çevreleyen yakın kıyıdaki tayfun dalgalarının modellenmesi için SWAN dalga tahmin modelinin uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Modelde sayısal hesaplamalar dört adet temsili tayfunun geçişleri sırasında oluşan dalga yükseklikleri ve dalga periyotlarının gerçekleşmesi üzerine yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem doğu hem batı kıyılarındaki dalga istasyonlarından alınan ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, modele girilen bazı tayfunlara bağlı dalgaların doğu kıyılarında mantıklı bir şekilde üretilbildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, batı kıyı bölgeleri için üretilen sonuçlarda tutarsızlıkların olduğunu öne sürmüşlerdir. Bunun sebebi olarak adanın merkezindeki dağların geçmekte olan tayfunların siklonik yapılarına kısmen zarar vermesi olarak gösterilmektedir. Ayrıca, SWAN'daki i içe geçmiş kareyaj düzeninin kıyı sularındaki simülasyonların doğruluğunu artırabileceği de tespit edilmiştir.

Soomere (2005), Finlandiya Körfezinin güneyinde bulunan Tallinn körfezindeki rüzgar dalgası rejimini analiz etmiştir. Rüzgar verisi olarak Finlandiya körfezinde bulunan Kalbadagrund deniz fenerinden alınan 1991-2000 yılları verilerini kullanmıştır. Analizler, yüksek çözünürlüklü i içe geçmiş WAM modeline dayanan dalga alanlarının uzun dönemli hesaplamalarının basitleştirilmiş bir metodu kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Dalga yüksekliklerinin olasılık dağılımları, yıllık ve mevsimlik ortalama dalga yükseklikleri, dalga enerjisinin yoğunluğu, dalga gücü ve 1 yıllık yenilemeli dalga yüksekliği ile birlikte aşırı fırtınalarda dalga özellikleri hesaplanmıştır. Tallinn Körfezinin; anakara, onu çevreleyen adalar ve birçok sığ alan ile birlikte hakim yönlerden gelen dalgalardan korunduğu, ortalama dalga özelliklerinin önemli bir mevsimsel ve mekansal değişkenlik sergilediği ve belirgin dalga yüksekliğinin 2 metreyi aştığı ve kuzey-kuzeybatı fırtınası ile 4 metreyi aşan en yüksek dalgaların Tallinn-Helsinki gemi yoluna yakın alanda meydana geldiği belirtilmiştir.

Weisse ve Günther (2007), 1958-2002 yılları arasında Kuzey Denizi'ndeki ekstrem dalga koşullarının, bölgesel bir modelden elde edilen analizini sunmaktadır. Model, saatlik rüzgar verisi bulunan NCEP/NCAR verileri kullanılarak yürütülmüştür. Simülasyonlarda, Norveç Meteoroloji Enstitüsünde gözlemlenmiş olan deniz buzu koşulları da hesaplanmıştır. Modelin makul derecede bir yakınlıkla ekstrem dalga yüksekliği istatistiklerini üretebildiği belirtilmiştir. Analizlerde ekstrem dalgaların sayısının, çoğunlukla Kuzey Denizi'nin güneyinde, simülasyon döneminin başlangıcından (1958) itibaren arttığı, artışın daha sonra hafiflediği ve yaklaşık 1985 yılları civarında ise düzeldiği gözlemlenmiştir. Bir diğer yandan, ekstrem dalga yüksekliği olaylarının yoğunluğunun ve süresinin simülasyonun son birkaç yılı içinde azaldığı, böylece yıllık %99 aşılma ihtimali dalga yüksekliğinin, 1990-1995 yıllarından itibaren azaldığı tespit edilmiştir. Model süresi boyunca İngiltere'nin Kuzey Denizi kıyılarında aşırı dalga koşullarının azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Soukissian ve ark. (2008), Yunan denizinde ve komşu denizlerde kıyı ve açık deniz dalga ve rüzgar verilerini elde etmek amacıyla Yunan Denizlerinde Rüzgar ve Dalga Atlasını üretmişlerdir. Buradaki mevcut Atlasın 16 yıl için üretilmiş olması ve gözlemlere dayalı olması sebebi ile rüzgar ve dalga iklimi için güncellenmiş bir atlasla ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Bu amaçla üretilen yeni Atlas verileri, rüzgar ve dalga ikliminin ana karakteristik özelliklerini olabildiğince tam olarak gösterilebilmesi için, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte sayısal model oluşturularak elde edilmiştir. Elde edilen veriler, 10 yıllık bir periyodu (1995-2004) kapsamakta ve spesifik rüzgar ve dalga parametrelerinin mekânsal dağılım çizelgelerini mevsimsel ve yıllık bazda frekans

histogramları şeklinde sunmaktadır. Atlas sonuçlarına dayanarak, Yunan Denizlerinde rüzgar ve dalga ikliminin ana özellikleri ortaya konmuş ve atlasın çalışma bölgesinde yapılacak uzun dönemli uygulamalar için bir karar destek aracı olması amaçlanmıştır.

Rusu ve Soares (2009), Portekiz'in kıyısında, dalga enerjisinin mekansal dağılımının irdelenmesi amacıyla bazı ilgili modeller kullanarak analizler gerçekleştirmiştir. Hedeflenen bölgedeki dalga ikliminin orta vadeli bir analizi, 1994-2003 yılları arasındaki 10 yıllık dönemi kapsayan son şamandıra ölçümlerine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Dalga koşullarını değerlendirmek için en son teknolojiye dayanan iki spektral model olan WAM ve SWAN üzerine kurulu bir dalga tahmin sistemi kullanılmıştır. Daha iyi model yapılandırmaları tasarlamak için bu sistemlerle doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Derin su dalgası modellemesinde hassas parametre olarak kabul edilen köpüklenme işlemi üzerinde özellikle durulmuştur. Dalga enerjisinin mekansal dağılımları, üç farklı hesaplama alanında yüksek ve ortalama dalga koşulları için analiz edilmiştir. Dalga enerjisi değerlendirmeleri için dört durum üzerinde durulmuştur. Bunlardan birisi ortalama pik enerjiiyi, diğer üçü ise ortalama enerji koşullarının farklı durumlarını kapsamaktadır. Bu şekilde enerji açısından daha büyük potansiyele sahip bazı alanların tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Yang ve ark. (2011), Doğu Çin Denizi ve Kuzeybatı Pasifik Okyanusunda, 2009 yılına kadar olan 62 yıllık uzun dönemli tayfun dalgalarının değişkenliklerini ve eğilimlerini araştırmışlardır. Bu amaçla, bu bölgede bir tahmin modeli kurarak sayısal dalga modelindeki parametreleri kalibre etmeyi hedeflemişlerdir. SWAN dalga modelinin kaynak terimindeki parametrelerden hangilerinin daha hassas olduğunun belirlenmesi amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizlerinden sonra, SWAN dalga modelinin en hassas parametrelerinin optimum değerini bulmak amacıyla model sonuçları, Tayvan'ın kuzeydoğusu kıyılarında bulunan üç şamandıra istasyonundaki gözlem verileri ile karşılaştırılmış ve optimum değerler belirlenmiştir. Böylece, dalga simülasyonlarında optimum değerleri kullanan SWAN model tahmin performansının, üç şamandıra gözlem verisine dayanarak geliştiği sonucuna varılmıştır.

Chen ve ark. (2013), Doğu Çin Denizi'ndeki uzun vadeli dalga istatistiklerini çıkartabilmek maksadıyla 1950-2009 yıllarını kapsayan 60 yıllık bir süre için çalışma bölgesindeki dalga iklimini üçüncü nesil dalga tahmin modelleri kullanılarak benzeştirmiştir. Modelde, rüzgar girdisi olarak NCEP / NCAR'ın yeniden analiz rüzgâr veri seti kullanılmıştır. Sayısal sonuçların istatistiksel analizine dayanılarak, hesaplama alanında 100 yıllık ve 50 yıllık yenilemeli ortalama dalga alanları ve ekstrem dalga alanları tahmin edilmiştir. Dalga alanlarının mekansal değişimlerine dayanarak dalga yüksekliklerinin güneyden kuzeye ve açık denizden kıyıya doğru genel olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, Doğu Çin Denizi'nin yerel topografyasıyla ilişkilendirilmiştir. Mevsimsel değişimlere dayanarak kış ve sonbahar mevsimlerinde meydana gelen dalgaların ilkbahar ve yaz mevsiminde meydana gelen dalgalarından biraz daha büyük olduğu ve yaz aylarında meydana gelen ekstrem dalgaların diğer mevsimlerin dalgalarından çok daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, Muson rüzgarlarının mevsimsel değişimden ve yaz aylarında meydana gelen tayfunlardan kaynakladığı sonucuna varılmıştır.

Guillou ve Chapalain (2015), kıyı alanlarındaki yüksek mekansal çözünürlükte dalga enerjisi kaynağını değerlendirmek için SWAN dalga modelini (yapılandırılmamış bir versiyonu) İroise Denizi'nde (batı Avrupa) uygulamıştır. Sayısal model sonuçları, uzun dönemli açık deniz gözlemleri ve saha çalışması sırasında elde edilen ortalama verileri içeren dokuz istasyondaki belirgin dalga yüksekliği ve pik periyot ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. 8 yıllık (2004-2011) bir periyot için dalga enerjisinin orta vadeli değerlendirilmesi, Ushant ve Sein Adaları, Crozon Yarımadasındaki Audierne Körfezinin kıyı alanları ve kuzey kıyı şeridindeki yakın kıyı enerji modelleri kullanılarak yapılmıştır. Dalga gücü üretimindeki değişim, mevsimsel olarak belirgin olan Avrupa kıta sahanlığında ve İroise Denizinde gerçekleştirilen sayısal modellemeye uygun olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu değişiklikler özellikle kış döneminde göze çarpmakta ve aylık ortalama dalga enerjisi akış dağılımındaki zıt durumlar ile birlikte görüldüğü belirtilmektedir.

Özhan ve Abdalla (1999), tarafından tüm Türkiye kıyıları için bir rüzgar ve dalga iklim atlası üretilmiştir. Araştırma 1994-2000 yılları arasında Orta Doğu Teknik

Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Erdal Özhan tarafından yürütülmüştür. Çalışmada, ECMWF rüzgar alanları ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DMI) sinoptik haritaları kullanılmıştır. Çalışma, Karadeniz, Ege Denizi ve Akdeniz'de 30 km aralıklarda, Marmara Denizi'nde ise 10 km aralıklarda verilen rüzgar ve dalga iklimlerini sunmaktadır. ECMWF modelinden elde edilen veriler Akdeniz ve Karadeniz gibi büyükçe su alanları için rüzgar ve dalga iklimi hesaplarında kullanmak için yeterli düzeyde iyi rüzgar alanları sunmuştur. Ancak, ECMWF modeli küçük ölçekli yerel etkileşimleri hissedemediğinden Marmara Denizi gibi küçük su alanlarında kötü sonuçlar vermiştir. Çalışılan deniz alanlarında belirlenen her nokta için, yüzeysel rüzgar hızları ve gözlenen dalga yüksekliklerinin yıllık ve mevsimlik gülleri verilmiştir. Ayrıca, 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.

Rusu ve Ivan (2010), Karadeniz Batı kıyısında, SWAN modelin yakın kıyıda uygulanmasına odaklanmıştır. Daha önce, tüm Karadeniz havzası için kalibre edilen SWAN modelin küresel uygulaması bu çalışmada referans olarak kullanılmıştır. İlk önce, Karadeniz'in tüm batı sahillerini kapsayan orta çözünürlüklü bir ilk alan, küresel modelin içine yerleştirilmiştir. Bu bölgenin orta bölümünde bulunan Gloria sondaj ünitesinde yapılan dalga gözlemleri hem rüzgar girdisi hem de dalga modeli çıktısı için bir kontrol noktası olarak dikkate alınmıştır. Ardından sırasıyla, Romanya ve Bulgaristan kıyı alanlarını kapsayacak şekilde iki yüksek çözünürlüklü alan da modelin içine yerleştirilmiştir. Kıyı bölgesindeki rüzgar dalgası özelliklerinin doğru olarak tahmin edilmesinin petrol sızıntılarının yayılımını değerlendirmek ve kıyı ve deniz yapıları üzerindeki dalganın etkisini tahmin edebilmek için son derece önemli olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Alpli (2011), Ege Denizi ile Akdeniz için rüzgar ve derin deniz dalga iklimi arasındaki ilişkiyi 3. nesil dalga modeli olan DHI MIKE 21 SW (spektral dalga modeli) kullanarak modellemiştir. Modele rüzgar girdisi olarak ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) ERA Analiz veri setini kullanmıştır. Ege Denizi kıyılarında Bozcada, Akdeniz kıyılarında ise Dalaman ve Alanya ölçüm istasyonundan elde edilen

dalga parametreleri kullanılarak model kalibrasyonlarını gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon aşamasının ardından, 14 yıllık dönem için (1994-2008 yılları) model çalışmaları yapılmıştır. Model sonuçları kullanılarak, dalga gülleri, belirgin dalga yüksekliği-ortalama dalga periyodunun değişim grafikleri, derin deniz belirgin dalga yüksekliği eklenik aşılma olasılığı dağılımları ve denklemleri ile derin deniz en büyük belirgin dalga yüksekliği istatistikleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Türkiye Kıyıları için Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlasıyla (Özhan ve Abdalla 1999) karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, İskenderun Körfezinde küresel iklim değişikliği nedeniyle deniz suyu seviyesinde meydana gelecek değişimin dalga iklimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Körfez içinde su seviyesindeki artış 1 m'ye ulaşınca kadar 10 cm'lik artışlar olacak şekilde her bir su seviyesi değişimi için modeller koşturulmuş ve koşturulan modellerden dalga parametreleri elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kıyı alanlarında su seviyesinde görülecek 1 m artışın belirgin dalga yüksekliklerinde %15 maksimum dalga yüksekliğinde ise %23 artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Akpınar ve ark. (2012), Karadeniz sularında uzun dönemli dalga parametrelerine sahip olabilmek için dalga parametrelerinin tahmininde üçüncü nesil bir spektral dalga modeli olan SWAN (Simulated Wave Nearshore)'ın yeteneğini araştırmıştır. Modelde rüzgar girdisi olarak ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi) ERA Interim veri setinin rüzgar alanları kullanılmış ve NATO 'nun "Barış için Bilim" adlı birimi tarafından sponsorluğu yapılan NATO TU-WAVES projesi kapsamında temin edilen şamandıra ölçümleri ile (belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve yönü) modelin performansı test edilmiştir. Lineer ve üstel artışlı rüzgar girdisi, taban sürtünmesi, denizin köpüklenmesi, derinlik etkileşimli dalga kırılması, lineer olmayan dördü dalga-dalga etkileşimleri (derin sular için) ve lineer olmayan üçlü dalga-dalga etkileşimleri (sığ sular için) fiziksel olaylar olarak simülasyonlarda göz önünde bulundurulmuş ve model 1995 yılını kapsayacak şekilde durgun durumda icra edilmiştir. Çalışmanın, 1995 yılını kapsayan dalga parametrelerinin tahmininin birincil sonuçlarına göre, SWAN modelin doğruluğu dalga yüksekliğini simülasyonda araştırılan bölgede ve zaman diliminde saçılım diyagramlarına göre çok iyi gözükmemesine karşın parametrenin zamansal değişiminin önceki tahminlerle ve

şamandıra ölçümleri ile kıyaslamasına göre yeterince uygun olduğuna kanaat getirilmiştir.

Arkhipkin ve ark. (2014), Karadeniz’de istatistiksel dalga parametrelerinin tahmin edilmesi ve yıllık ve mevsimlik dalga parametrelerinin değişimlerinin değerlendirilmesi amacıyla rüzgar dalgası tahmini gerçekleştirmiştir. Çalışma bütün Karadeniz için uygulanmıştır. Dalga parametreleri 5 x 5 km’lik alansal çözünürlüklü bir karalejda SWAN dalga tahmin modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Modelde girdi olarak kullanılan 1949 ve 2010 yılları arasındaki rüzgar hızı ve rüzgar yönü verileri NCEP / NCAR analizlerinden elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, Karadeniz'deki ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri 0,7 m olarak hesaplanmıştır. Belirgin dalga yüksekliklerinin, dalga boylarının ve dalga periyotlarının mekânsal dağılımlarından buradaki en baskın deniz koşullarının denizin güneybatı ve kuzeydoğu kısımlarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, uzun dönemli analizleri sonucunda elde edilen dalga parametrelerinden yıllık fırtına sürelerinin ve miktarlarının doğrusal değişimlerinin tahmin süresi boyunca neredeyse sabit kaldığı, yalnız 1960-1970'lerde fırtına aktivitelerinin yoğunlaştığı tespit edilmiştir.

Raileanu ve ark. (2015), Karadeniz’in batı yakasının, Tuna, Main ve Ren nehirleri üzerinden Karadeniz’i Kuzey Denize bağlayan 7. Pan Avrupa koridoruna bağlı olması ve bundan dolayı bu bölgede artan bir gemi trafiğine sahip olmasından dolayı bu bölgede dalga koşullarının daha iyi tahmin edilmesi gerektiğinden bahsetmektedir. Bu amaçla, burada SWAN dalga tahmin modeline dayanan bir dalga tahmin sistemi geliştirilmiş ve Karadeniz havzasında kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Kıyıya doğru artan çözünürlükte bir hesaplama alanı göz önünde bulundurulmuş ve batı tarafında hesap ağı daha da yoğunlaştırılmıştır. Çalışmada, tüm Karadeniz ile birlikte Romanya kıyıları olmak üzere iki hesaplama karelağı üzerinde durulmuştur. Denizin batı yakasındaki dalga tahminlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, bölgesel hesaplama alanı için bir veri benzeşimi programı uygulanmıştır. Böylece, uydu verisini benzeştirmek için Ardışık Düzeltme Yöntemine dayalı bir yaklaşım uygulanmıştır. Model simülasyonları 10 yıllık bir zaman aralığı için (1999-2008) gerçekleştirilmiştir. Uygulanan benzeşim tekniğinin, uydu gözlemlerine daha iyi uyum sağlaması için model

tahminlerinde doğrusal regresyon uygulanarak düzeltmeler yapılmıştır. Böylece, istatistiksel olarak benzeşim yöntemleri ile model sonuçları önemli şekilde geliştirilmiştir.

Akpınar ve ark. (2016), Karadeniz’de 31 yıllık bir periyotta rüzgar ve dalga karakteristiğini ve uzun dönemli değişkenliğini araştırmışlardır. SWAN sayısal dalga tahmin modeli ilgi alanına 31 yıllık bir dalga tahminini işleyebilmek için uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, 1979-2009 periyodu boyunca Karadeniz’in rüzgar ve dalga iklimindeki yıllık değişkenlikleri ve uzun dönemli değişimlerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Model, CFSR rüzgarları ile çalıştırılmış ve 6 farklı açık deniz ve yakın kıyı şamandıra ölçümleri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Kalibrasyon, üç açık deniz şamandırasındaki (Gelendzhik, Hopa ve Sinop) 1996 yılındaki mevcut ölçümlere karşı köpüklenme ve rüzgar girdi formülasyonlarındaki ayarlanabilir parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Doğrulama, kalibrasyon sürecinde kullanılmayan veriler yardımıyla işlenmiştir. 31 yıllık simülasyon sonuçlarından ortalama rüzgar ve ortalama ve maksimum dalga karakteristiklerinin uzun dönemli alansal dağılımları ve yıllık değişkenlikleri belirlenmiştir.

Gippius ve ark. (2016), Karadeniz’de, 1979 yılından 2016 yılına kadar olan 37 yıllık bir süre için rüzgar dalga parametrelerinin belirlenmesi üzerine odaklanmışlardır. Rüzgar dalgası parametreleri, sığ suda ve açık denizde olmak üzere farklı mekansal ölçeklerde, 3. nesil sayısal spektral dalga modeli olan SWAN kullanılarak hesaplanmıştır. Modelde, rüzgar girdisi olarak NCEP (National Centers for Environmental Prediction)’den alınan CFSR rüzgar verileri kullanılmıştır. Hesaplamalar, Tüm Karadeniz ve kıyıları için sayısallaştırılmış deniz haritalarına dayanan orijinal yapılandırılmamış bir karelej kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar çeşitli sahil bölgelerinde rüzgar dalgalarının temel özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Saraçoğlu (2011), Karadeniz ile Marmara Denizi için rüzgar ve derin deniz dalga iklimini 3. nesil dalga modeli olan MIKE 21 SW yazılımını kullanarak elde etmiştir. Modelde, rüzgar girdisi olarak ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) ERA Analiz verileri kullanılmıştır. Bu rüzgar verisi kullanılarak modelleme



her iki deniz için de gerçekleştirilmiştir. Modellerin kalibrasyonu için Karadeniz kıyılarında Gelendzhik, Hopa, Sinop, Filyos ve Karaburun, Marmara Denizi kıyılarında ise sadece Ambarlı ölçüm istasyonundan elde edilen dalga parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki deniz için gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarının ardından yine her iki deniz için 12 yıllık bir dönem için (1996-2008) model simülasyonları yürütülmüştür. Model sonuçları ile belirlenen bazı istasyonlar için; dalga gülleri, belirgin dalga yüksekliğine karşı ortalama dalga periyodunun değişim grafikleri, eklenik aşılma olasılığı dağılım grafikleri ve denklemleri ile derin deniz en büyük belirgin dalga yüksekliği istatistikleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Türkiye Kıyıları için Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlasıyla (Özhan ve Abdalla 1999) karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan karşılaştırmalı analizler Karadeniz için uyumlu olsa da Marmara Denizi'ndeki sonuçlar ile yeterince uyumlu olmadığı sonucuna varılmıştır.

Abdollahzadeh moradi ve ark. (2014), Marmara Denizi'ndeki dalga enerjisi potansiyelini 3. nesil spektral dalga modeli olan MIKE 21 SW yazılımı kullanılarak hesaplamıştır. Modele rüzgar girdisi olarak ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) rüzgar verileri kullanılmış ve çalışma bölgesinin dalga özelliklerini belirlemek için 2012 yılı rüzgar dalga tahminleri yapılmıştır. Model kalibrasyonu iki aylık dalga ölçüm verisi bulunan Ambarlı istasyonu verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1998-2008 yılları arasındaki dönem için Saraçoğlu (2011) tarafından Marmara Denizi dalga özelliklerinin hesaplandığı daha önceki çalışma karşılaştırma için kullanılmıştır. Bu çalışmada, iki durum dikkate alınarak önceki çalışmanın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunlardan ilki, yeni ve daha iyi bir ağ oluşturulması ve ikincisi ise, bu çalışmada 2012 yılı için dalga parametrelerinin tahmin edilmesidir.

Literatür taramasından da görülebileceği gibi, bu çalışmanın ilgi alanı olan Marmara Denizi için günümüze kadar rüzgar-dalga modellemesi üzerine gerçekleştirilen 3 çalışma (Özhan ve Abdalla 1999; Saraçoğlu 2011; Abdollahzadeh moradi ve ark. 2014) mevcuttur. Bu çalışmalar, model geliştirilmesinde veya kalibrasyonunda ya hiç ölçüm verisi olmadan ya da yeterli uzunlukta olmayan dalga ölçümleri kullanılarak yürütülmüştür. Bundan dolayı, bu çalışmanın önceki çalışmalara kıyasla en önemli

üstünlüğü, şu anki çalışmada model kalibrasyonunda ve ayarlamasında 1 yıllık rüzgar ve dalga ölçümünün kullanılmasıdır. Ayrıca, şu anki çalışmanın ikinci üstünlüğü, çalışma kapsamında CFSR rüzgarlarının ilgi alanında ilk kez kullanılmasıdır. Bunların yanında, şu anki çalışma kapsamında her iki rüzgar veri kaynağı ve varsayılan ve kalibre edilen SWAN modeller ile 4 farklı 31 yıllık veri seti türetilmiştir. Dört farklı veri setinde dalga tahminleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak analiz edilmiştir.



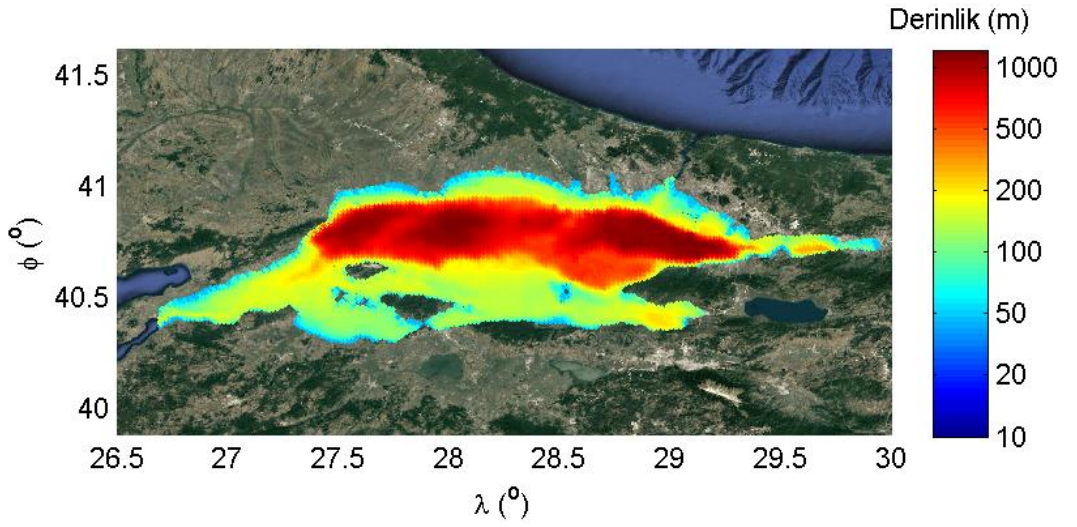
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde, SWAN modelde Marmara Denizi için uygun bir rüzgar-dalga modellemesi yapmak için kullanılan materyaller ve yöntemlerle ilgili bilgiler sunulmuştur. Bu amaçla, öncelikle çalışma bölgesinin fiziki şartları ve konumu hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra, çalışma kapsamında kullanılan veri kaynaklarının (ECMWF rüzgar tahminleri, NOAA rüzgar tahminleri, rüzgar ve dalga ölçümleri ve Marmara Denizi'nin batimetrisi) nasıl ve nereden elde edildiği ve SWAN modelde kullanılacak formatlara dönüştürebilmek için hangi işlemlerden geçtiği anlatılmıştır. Son olarak, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen rüzgar veri setlerinin kalitelerinin analiz edilmesinde ve model sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler (eş zamanlı analizler, saçılım diyagramları, rüzgar ve dalga gülleri, olasılık dağılımları ve ekstrem değer analizleri) açıklanmış ve bu yöntemlerin nasıl kullanılacağı, hangi yaklaşımların uygulandığı, bu yöntemlerde kullanılan formüllerin neler olduğu ve bu yöntemlerin hesaplamalarının hangi programlar kullanılarak yapıldığı ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

#### 3.1. Çalışma Bölgesi

Marmara Denizi, 40° - 41,25° kuzey enlemleri ve 26° - 30° doğu boylamları arasında yer alan İstanbul Boğazı ile Karadeniz'e ve Çanakkale Boğazı ile Ege Denizi'ne bağlanan bir iç denizdir. Türkiye'nin Asya ve Avrupa kısımlarını birbirinden ayırmaktadır. Bursa, Çanakkale, Yalova, Tekirdağ, Balıkesir ve Türkiye'nin en büyük şehirlerinden İstanbul ve İzmit bu denizin kıyısında bulunmaktadır. Yaklaşık olarak 240 km uzunluğa ve 70 km genişliğe sahip olan Marmara Denizi, 11 500 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip olmakla birlikte en derin yeri 1 270 metredir. Marmara Denizinin kuzey-doğusunda İzmit Körfezi, güney doğusunda Gemlik Körfezi, güneyinde Bandırma Körfezi ve güney-batısında ise Erdek Körfezleri bulunmaktadır. Ayrıca, Marmara Denizi'nde İmralı Adası, Marmara Adaları (Marmara Adası, Avşa Adası, Paşalimanı Adası, Ekinlik Adası ve yerleşim olmayan 10 adet ada) ve İstanbul Adaları (Büyükkada, Heybeliada, Burgazada, Kınalı ada, Sedef adası ve yerleşime açık olmayan 4 ada) olarak gruplandırılan adalar yer almaktadır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan çalışma bölgesi ve Marmara Denizi'nin batimetrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu şekilden görülebileceği gibi, Marmara Denizi sığ su etkisinin rol oynadığı, feç sınırlı şartların hakim olduğu, içinde adalar bulunduran nispeten küçük ve dar bir havzadır. Ayrıca, küçük bir havza olmasından dolayı bölgedeki kara-deniz etkisi kıyı bölgelerindeki rüzgar hızlarını önemli derecede etkileyebilmektedir. Bu etkiler hem fiziksel hem de sayısal model sonuçlarının kalitesini olumsuz yönde etkileyebileceğinden, Marmara Denizi'nde herhangi bir dalga modelinin uygulanmasında önemli derecede zorluklar oluşturabilmektedir.



**Şekil 3.1.** Çalışma alanı ve Marmara Denizi'nin batimetrisi

### 3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan Veri Kaynakları

Rüzgardan dalga tahmininde, tahminlerin doğruluğunu etkileyen en önemli parametre rüzgar veri girdisidir. Daha güvenilir dalga tahmini yapabilmek için yüksek doğrulukta rüzgar veri kaynağının temin edilmesi son derece önemlidir. Bu çalışma kapsamında Türkiye tarafından kaydı gerçekleştirilmeyen ancak Türkiye'yi kapsayan yüksek zamansal ve alansal çözünürlüğe sahip olan ECMWF ve NOAA hava tahmin merkezlerinin sırasıyla ERA Interim ve CFSR rüzgar veri setleri kullanılmıştır. Her iki rüzgar veri seti için SWAN modelin kalibrasyonu 2013 yılı verisi kullanılarak yapılmıştır. Uzun dönemli dalga parametrelerinin oluşturulması için ise 01.01.1979 ve 31.12.2009 tarihleri arasındaki 31 yıllık rüzgar verileri kullanılmıştır. Böylece, her iki

rüzgar veri setinden 32 yıllık rüzgar verisi ilgili tahmin merkezlerinin internet sitelerinden temin edilmiştir.

CFSR ve ERA Interim veri setlerine ait rüzgar alanlarının kalitelerinin test edilmesi ve her iki rüzgar verisini girdi olarak kullanan SWAN modellerin kalibrasyonu için Silivri şamandıra istasyonundaki rüzgar ve dalga ölçümleri kullanılmıştır. Modellerin doğrulanmasında ise Ambarlı ve Ereğli istasyonlarındaki dalga ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Rüzgar verileri ile sayısal dalga tahmini yapılmasında derinlik etkisinin hesaba katılabilmesi için ihtiyaç duyulan diğer girdi dosyası olan batimetri ise GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)' dan temin edilmiştir.

### **3.2.1 ECMWF Rüzgar Tahminleri**

ECMWF, 1975 yılında kurulan şu anda 34 ülke tarafından desteklenen bağımsız bir uluslararası kurumdur. Kurum, Türkiye'nin dahil olduğu 22 ülke ile üyelik antlaşmasına ve 12 ülke ile iş birliği antlaşmasına sahiptir. ECMWF, Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) dahil, Avrupa Konseyi (AK), Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü (OECD) ve Avrupa Meteoroloji Uyduları İşletme Teşkilatı'nın (EUMETSAT) bulunduğu altı kuruluştan biridir. Kurumun merkezi İngiltere'de Londra'nın batısında Reading kasabasında yer almaktadır (ECMWF 2016).

ECMWF verileri, ECMWF ve DMİ'den alınan özel izin ile internet üzerinden özel bir anahtar kart yardımıyla ECMWF'in veri arşivleme hizmeti kullanılarak indirilmiştir. Bu arşivleme hizmetinde veriler; Re-analiz veri tabanı (ERA Interim, ERA-15, ERA-40), Operasyonel veri tabanı ve bazı özel veri tabanları (MACC, YOTC vb.) olarak bulunmaktadır (ECMWF 2016). Bu çalışma kapsamında ECMWF'in en son ürünü olan ERA Interim olarak adlandırılan re-analiz veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanı, 1979 yılından günümüze kadar 6 saatlik zamansal çözünürlükte ve kullanıcı tarafından tanımlanabilecek bir alansal çözünürlükte rüzgar alanlarına sahiptir. ECMWF web adresi, anahtar kart ve talimatlar kullanılarak arşivlere kolaylıkla giriş yapılabilecek doğrudan bir bağlantıya sahiptir. 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 karelaj aralığı) seçilerek sipariş edilmiş, talebin ECMWF tarafından değerlendirilmesinden sonra, açılan bağlantı yardımıyla arzu edilen özellikte talep edilen dosyalar aylık periyotta ve GRIB (Gridded binary) formatında temin edilebilmiştir.

ECMWF veri tabanının atmosferik modelinden elde edilen ERA Interim verileri (10 m yükseklikte u ve v rüzgar bileşenleri sırasıyla enlemsel ve boylamsal yönlerde) su yüzeyinin 10 metre yukarısındaki rüzgar hızlarına karşılık gelmektedir. Rüzgar bileşenlerinin yönleri kartezyen koordinat sistemiyle aynı olmakla birlikte, u bileşeninin pozitif yönü doğuya, v bileşeninin pozitif yönü ise kuzeye doğrudur. Rüzgar bileşenlerinin alansal çözünürlüğü enlemde ve boylamda  $0,1^{\circ}$  olacak şekilde seçilmiştir. Temin edilen verilerin alansal çözünürlüğü  $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$  olduğundan tüm Marmara Denizi üzerinde bu şekilde karelajlara bölünen alanda, her bir karelajın kesişim noktaları veri kaydını temsil etmektedir. Bu karelajlama, tüm Marmara Denizi üzerinde  $22 \times 40'$ lık bir matrise karşılık gelmektedir. Böylelikle, tüm yüzey dikkate alındığında, anlık bir veri kaydında 880 adet veri bulunmaktadır. 1 günlük süreçte 4 kayıt alındığından 1 günlük veri dosyasında toplam 3520 adet, 1 yıllık süreçte 1 milyon 284 bin 800 adet ve çalışma süresi kapsamında indirilen 32 yıllık dosyalarda toplam 41 milyon 113 bin 600 adet veri bulunmaktadır.

### **3.2.2. NOAA Rüzgar Tahminleri**

Bu çalışma kapsamında kullanılan ikinci rüzgar veri kaynağı NOAA (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi)'nin tahmini rüzgar alanlarıdır. Amerika Birleşik Devletleri, 1807 yılında denizcilik topluluğuna deniz haritaları sağlamak amacıyla ABD Kıyı ve Jeodezik Araştırma (U.S. Coast and Geodetic Survey) Merkezini, 1870 yılında Hava Bürosu (The Weather Bureau)'nu, 1 yıl sonra da ABD Balık ve Balıkçılar Komisyonu (The U.S. Commission of Fish and Fisheries)'nu kurmuştur. Bu üç kurum, 1970'te Ticaret Bakanlığı bünyesindeki NOAA'nın kurulmasıyla bir araya getirilmiştir. NOAA; hava, deniz ve gökyüzündeki tehlikeleri araştırıp, okyanus ve kıyı kaynaklarının korunması konusunda araştırma ve geliştirme yapmaktadır (NOAA 2016).

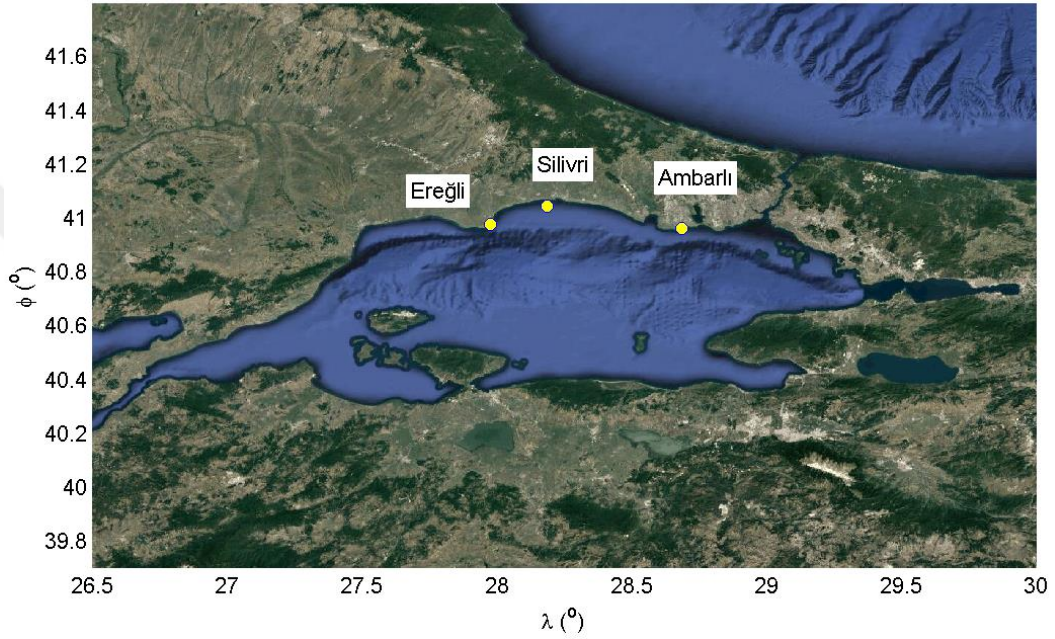
Bu çalışma kapsamında NOAA verileri CFS (Climate Forecast System) veri tabanından indirilmiştir. CFS veri tabanında Ocak 1979 tarihinden Mart 2011 tarihlerine kadar olan veri tahminleri CFSR (CFS re-analiz) olarak yer almaktadır. Mart 2011 tarihinde CFSR 2. sürüm faaliyete geçirilerek Nisan 2011 tarihinden itibaren veriler CFSR 2. sürüm veri tabanından elde edilebilmektedir. CFSR veri tabanında veriler 0,3125° alansal çözünürlükte bulunurken CFSR 2. sürümde tahmin verileri 0,2045° alansal çözünürlükte bulunmaktadır. Böylece, SWAN modelin kalibrasyonunda kullanılan 2013 yılı verileri CFSR 2. sürüm veri tabanından elde edilirken, uzun dönemli dalga parametrelerinin oluşturulmasında kullanılan 1979'dan 2009 yılına kadar olan veriler CFSR veri tabanından elde edilebilmiştir.

Bu veri tabanlarına NOAA web sitesinden ücretsiz olarak önceden herhangi bir izne tabi olmadan ulaşılabilmektedir. NOAA'dan temin edilen bütün veriler ERA Interim veri setinde olduğu gibi GRIB uzantılı dosya formatında temin edilebilmiştir. CFSR arşiv sisteminde veriler bütün dünyayı kapsayacak şekilde bulunmakta ve aylık olarak indirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan CFSR rüzgarlarının Marmara Denizi'ni kaplayan rüzgar alanları Ms-Dos ortamında hazırlanan bir kod yardımıyla bütün Dünyayı içeren veri dosyalarından tekrar GRIB dosya formatında olacak şekilde ayıklanmıştır. Bu veriler, 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Bu çözünürlük, tüm Marmara Denizi için temin edilen veri tabanında her bir noktada günde 24 kez veri kaydının olduğu, yani bir nokta için yılda 8760 adet veri kaydı alındığı anlamına gelmektedir. Toplam 32 yıllık veri tabanı söz konusu olduğundan bir noktadaki toplam veri kaydı 280 bin 320 adettir.

CFSR veri setinin alansal çözünürlüğü 0,3125° x 0,3125° olduğundan Marmara Denizi üzerinde bu çözünürlük dikkate alınarak bölünen alanda, her bir karelajın kesişim noktaları veri kaydını temsil edecek şekilde tüm Marmara Denizi üzerinde 8 x 13'lük bir matris oluşturulurken 0,2045° x 0,2045° alansal çözünürlüğe sahip CFSR 2. sürüm dikkate alındığında ise tüm Marmara Denizi üzerinde 12 x 24'lük bir matris elde edilmiştir.

### 3.2.3. Rüzgar ve Dalga Ölçümleri

Bu çalışma kapsamında her iki rüzgarı kullanan SWAN tahmin modellerinin kalibrasyonu, kalibre edilen modellerin doğrulanması ve duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla 3 farklı ölçüm istasyonu verisi kullanılmıştır. Ölçüm istasyonlarının Marmara Denizi üzerindeki konumları Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Ölçüm İstasyonlarının (sarı noktalar) Marmara Denizi üzerindeki konumları

Her iki rüzgar verisini girdi olarak kullanan SWAN modellerinin kalibrasyonu uzun dönemli veri ölçümü bulundurmasından dolayı TPAO (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı)’nın sahibi olduğu “ODAS 01TR” isimli Silivri şamandıra istasyonu verileri (dalga yüksekliği) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her iki rüzgar veri kaynağının kaliteleri de bu istasyondaki rüzgar ölçümleri kullanılarak irdelenmiştir. Bu veriler, TPAO’dan talep edilmiş daha sonra gizlilik sözleşmesi imzalanarak özel izinle temin edilmiştir. 41,043889° K ve 28,186944° D koordinatlarında konumlanmış olan Silivri şamandıra istasyonu İstanbul İline bağlı Silivri İlçesinde kıyından 3 km açıktaki ve 50 metre derinlikte bulunmaktadır (Çizelge 3.1). TPAO’dan temin edilen verilerde 01.02.2013 00:00 – 06.05.2013 23:30 tarihleri arasında 4560 adet, 07.05.2013 10:30- 05.11.2013 07:30 tarihleri arasında 8731 adet ve 05.11.2013 14:00- 23.01.2014 23:30



tarihleri arasında 3812 adet olmak üzere toplamda 17 103 adet dalga ölçüm verisi mevcuttur. Ayrıca, temin edilen verilerde 01.02.2013 00:00-31.12.2013 23:59 tarihleri arasında toplamda 479 996 adet 10 metre yüksekliğindeki rüzgar hızı verisi de bulunmaktadır. Rüzgar hızlarının zamansal çözünürlüğü 1 dakika iken dalga verilerinin zamansal çözünürlüğü ise 30 dakikadır.

**Çizelge 3.1.** Dalga ölçüm istasyonlarının koordinatları, kıyıdan uzaklıkları ve derinlikleri

Şamandıra	Enlem	Boylam	Kıyıdan Uzaklığı(m)	Derinliği(m)
Silivri	41.043889 ° N	28.186944° E	3000	50
Ereğli	40.976369 ° N	27.977285 °E	1000	17
Ambarlı	40.963100 ° N	28.684968 °E	500	17

Her iki rüzgar verisi kullanılarak kalibre edilen modellerin doğrulanması, kısa süreli ölçüm verisi bulunan Ambarlı ve Ereğli istasyonlarındaki belirgin dalga yükseklikleri ( $H_{m0}$ ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ereğli ölçüm istasyonu, Tekirdağ ili sınırları içinde 40,976369° K ve 27,977285° D koordinatlarında bulunmaktadır. Ölçüm istasyonu kıyıdan yaklaşık 1 km açıkta ve 17 metre derinlikte konumlandırılmıştır. Akyarlı ve Öner (1991) tarafından bir LNG istasyonunda toplanmış olan Ereğli istasyonu ölçüm verileri, Özhan ve Abdalla (1993)'nın çalışmasından dijitalleştirilerek elde edilmiştir. Bu istasyonda 14-17 Mart 1990 tarihleri arasında 66 adet, 21-31 Ağustos 1990 tarihleri arasında 156 adet ve 17-20 Aralık 1990 tarihleri arasında 76 adet olmak üzere toplam 298 adet veri mevcuttur. Bir diğer istasyon olan Ambarlı ölçüm istasyonu İstanbul ili sınırlarında bulunmaktadır. İstasyon kıyıdan 500 metre açıkta, 17 metre derinlikte ve 40,9631° K 28,684968° D koordinatlarında konumlanmıştır. Verileri Yüksel ve ark. (2004) tarafından sağlanan bu istasyonda 30 Ağustos 2003 – 26 Eylül 2003 tarihleri arasında 233 adet ölçüm verisi mevcuttur. Bütün istasyonlardaki ölçüm verilerine ilişkin rüzgar ve dalga istatistiği Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.2.** Ölçüm istasyonlarındaki rüzgar hızı (V) ve belirgin dalga yüksekliğinin ( $H_{m0}$ ) istatistiği

İstasyon Adı	Parametre	Ölçüm Zaman Aralığı	Veri Sayısı (n)	Min	Max	Ortalama
Silivri	$H_{m0}$ (m)	01.02.2013-06.05.2013	4560	0,04	1,95	0,33
		07.05.2013-05.11.2013	8731	0,00	1,60	0,31
		05.11.2013-23.01.2014	3812	0,04	1,88	0,35
	V (m/sn)	01.02.2013-31.12.2013	479 996	0,06	16,35	4,58
Ambarlı	$H_{m0}$ (m)	30.08.2003-26.09.2003	233	0,10	0,73	0,20
Marmara Ereğli	$H_{m0}$ (m)	14.03.1990-17.03.1990	66	0,12	1,62	1,06
		21.08.1990-31.08.1990	156	0,14	1,43	0,75
		17.12.1990-20.12.1990	76	0,28	1,23	0,83

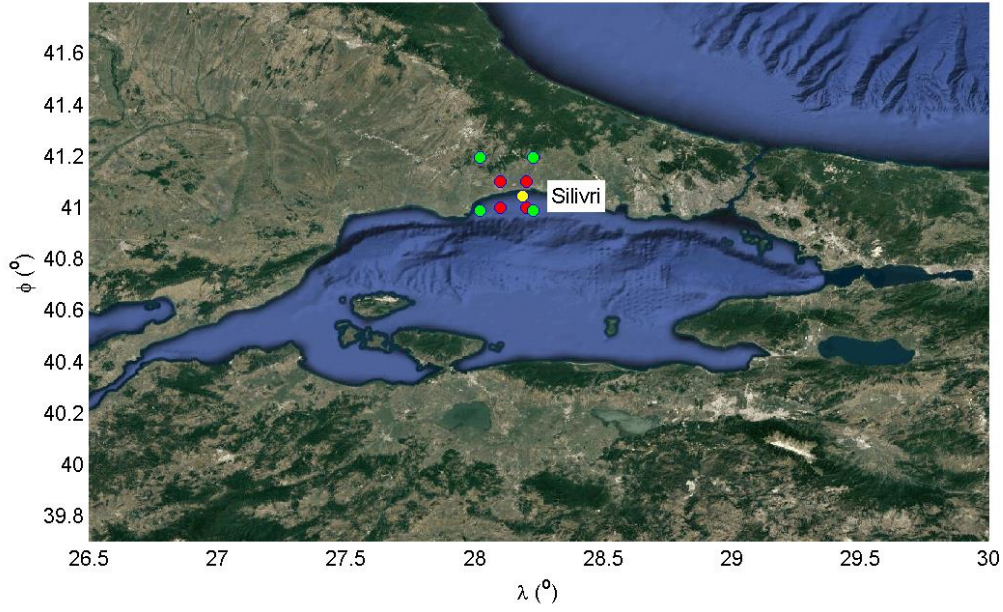
### 3.2.4. Marmara Denizi'nin Batimetrisi

Marmara Denizi'nin batimetrisi, GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)'nun internet sayfasından çalışma bölgesinin koordinatları ( $40,2042^{\circ}$ - $41,09587^{\circ}$  kuzey enlemleri ve  $26,6958^{\circ}$ -  $29,9958^{\circ}$  doğu boylamları) girilerek net-cdf formatında ücretsiz olarak temin edilmiştir (GEBCO 2014). SWAN model, bu formatı algılamadığından hazırlanan bir MATLAB kodu yardımı ile batimetrik veri düzenlenmiştir. Marmara Denizi'nin batimetrisi her iki yönde de  $0,008333^{\circ}$  alansal çözünürlükte elde edilmiştir. Marmara Denizi'nin batimetrik haritası üzerinde SWAN modelde tercih edilen hesaplama ağ yapısının görünüşü Ek 1'de sunulmuştur. Ek 1 incelendiğinde, Marmara Denizi'nin en derin bölgelerinin Marmara Denizinin ortaları ile kuzey-batı ve kuzey-doğu kıyıları arasında kalan alanlarda olduğu görülmektedir.

### 3.3. Rüzgar Veri Setlerinin Kalitelerinin Analiz Yöntemi

Her iki rüzgar veri kaynağının kaliteleri, Silivri ölçüm istasyonunda kaydedilen rüzgar hızı verileri kullanılarak test edilebilmiştir. Bu amaçla, ERA Interim ve CFSR rüzgar veri setlerinin karelej ağları incelenerek her veri kaynağı için Şekil 3.3'te Marmara Denizi üzerindeki yerleri gösterilen Silivri şamandıra istasyonunu kapsayacak en yakın dört karelej noktası belirlenmiştir. Belirlenen bu dört karelej noktasındaki rüzgar hızı değerleri ve Çizelge 3.3'te verilen ölçüm istasyonuna uzaklıkları kullanılarak her rüzgar veri seti için şamandıra istasyonu koordinatına denk gelen rüzgar hızlarının ağırlıklı ortalamaları hesaplanmıştır. Ayrıca, hesaplamalarda kullanılan bu dört karelej

noktasından şamandıra istasyonuna en yakın olan noktanın verileri analizlerde kullanılmak üzere ayıklanmıştır. Bu verilere ek olarak her iki rüzgarı kullanan SWAN tahmin modeli sonuçlarından Silivri ölçüm istasyonu koordinatlarında alınan rüzgar hızı bileşenleri kullanılarak bileşke rüzgar hızı değeri de hesaplanmıştır. Böylece, rüzgar kaynaklarının kaliteleri elde edilen bütün tahmin verilerine karşılık Silivri ölçüm istasyonu verilerinin karşılaştırılması ile test edilmiştir.



**Şekil 3.3.** Silivri şamandıra istasyonu (sarı nokta), CFSR veri setinin en yakın karelej noktaları (yeşil noktalar) ve ERA Interim veri setinin en yakın karelej noktaları (kırmızı noktalar)

**Çizelge 3.3.** Karelej noktalarının koordinatları ve şamandıraya olan uzaklıkları

Karelej Noktaları	Enlem	Boylam	Şamandıraya Olan Uzaklık (m)
Şamandıra	41.043889 ° N	28.186944° E	0
ERA Interim 1	41.000 ° N	28.100 ° E	8788
ERA Interim 2	41.000 ° N	28.200 ° E	4996
ERA Interim 3	41.100 ° N	28.200 ° E	6327
ERA Interim 4	41.100 ° N	28.100 ° E	9603
CFSR 1	40.989 ° N	28.022 ° E	15120
CFSR 2	40.989° N	28.227° E	6967
CFSR 3	41.194 ° N	28.227° E	21670
CFSR 4	41.194 ° N	28.022 ° E	17030

Burada; CFSR rüzgar veri setleri ile oluşturulan karelej noktalarının her birinde 1 yıllık süre için 1 saatlik zamansal çözünürlükte 8 760 adet veri bulunmaktadır. ERA Interim rüzgar veri setleri için oluşturulan karelej noktalarının her birinde ise 1 yıllık süre için 6 saatlik zamansal çözünürlükte 1 460 adet veri bulunmaktadır. Ağırlıklı ortalama değerleri oluşturulurken CFSR için her 1 saatlik zamansal çözünürlükte ve ERA Interim için 6 saatlik zamansal çözünürlükte hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda iki farklı enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan ilki, uzaklıkların karelerinin tersi kullanılarak hesaplanan uzaklık ağırlıklı ortalamalar yöntemidir. Uzaklık ağırlıklı ortalama rüzgar hızları;

$$V = \frac{\sum_{i=1}^4 (u_i / r_i^2)}{\sum_{i=1}^4 (1 / r_i^2)} \quad (3.1)$$

bağıntısına göre hesaplanmaktadır. Burada; V (m/sn) ortalama rüzgar hızını,  $u_i$  (m/sn) karelej noktalarındaki rüzgar hızlarını,  $r_i$  (m) noktaların istasyona uzaklıklarını göstermektedir. Diğer yöntem ise, alansal ağırlıklı ortalamalar yöntemidir. Alansal ağırlıklı ortalama rüzgar hızları ise;

$$V = \frac{\sum_{i=1}^4 (u_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (3.2)$$

denklemine göre hesaplanmaktadır. Bu denklemde,  $w_i$  ( $m^2$ ) alansal ağırlıkları göstermektedir. Alansal ağırlıklar;

$$w_i = (D_x - d_{xi}) \times (D_y - d_{yi}) \quad (3.3)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada,  $D_x$  ve  $D_y$  sırasıyla noktalar arası yatay ve düşey uzaklığı,  $d_{xi}$  ve  $d_{yi}$  ise hesaba katılan noktanın sırasıyla yatay ve düşey olarak istasyonla olan mesafesini göstermektedir (Çakmak 2015).

Şamandıra istasyonuna en yakın karelej noktaları, her iki rüzgar için karelej noktalarının şamandıra istasyonuna dik uzaklıkları dikkate alınarak belirlenmiş, böylece her iki rüzgar için oluşturulan karelej noktalarından 2 no'lu nokta en yakın istasyon olarak belirlenmiştir.

SWAN tahmin sonuçlarının değerlendirilmesi için ise her iki rüzgar verisini girdi olarak kullanan SWAN tahmin modeli sonuçlarının şamandıra istasyonu koordinatlarındaki  $u$  (m/sn) ve  $v$  (m/sn) rüzgar hızı bileşenleri çekilerek bu iki bileşenden bileşke rüzgar hızları ( $V$ ) aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$V = (u^2 + v^2)^{0.5} \quad (3.4)$$

SWAN tahmin modelinden veriler 30 dakikalık zamansal çözünürlükte sonuç verecek şekilde ayarlanmış böylece ölçüm istasyonu koordinatlarında ERA Interim rüzgar veri setini kullanan SWAN tahmin sonuçlarından 17 509 veri ve CFSR rüzgar veri setini kullanan SWAN tahmin sonuçlarından 17 519 veri temin edilmiştir.

#### **3.4. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler**

Bu çalışma kapsamında rüzgar verisi olarak kullanılan CFSR ve ERA Interim rüzgar alanlarının kalitelerinin test edilmesinde, SWAN tahmin modellerinin kalibrasyonunun yapılmasında, kalibre edilmiş modellerin doğrulanmasında ve duyarlılık analizlerinin yapılmasında, tahmin verilerinin ölçüm verilerine karşın eş zamanlı analizleri sonucunda elde edilen hata parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca, zaman serileri ve saçılım diyagramları çizilerek sonuçlardan türetilen bu parametreler ve görsel grafikler kullanılarak model sonuçları değerlendirilmiştir. Rüzgar hızları ve belirgin dalga yüksekliklerinin, ölçüm verilerine karşın yönsel performanslarının değerlendirilebilmesi

amacıyla ise rüzgar ve dalga gülleri oluşturulmuştur. Ayrıca, elde edilen rüzgar hızı ve belirgin dalga yüksekliklerinin, Silivri istasyonunda ölçülmüş olan tahmin verilerine uygunluğu olasılık dağılım fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu grafikleri çizilerek de irdelenmiştir. Bunlara ek olarak, her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modellerden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerinin, Silivri istasyonunda ölçülmüş olan dalga yükseklikleri ile uyumlulukları ekstrem değer analizi yapılarak da araştırılmıştır.

### 3.4.1. Eş Zamanlı Analiz

Eş zamanlı analizler ile istatistiksel hata değerleri hesaplanırken; rüzgar hızlarının kalitelerinin belirlenmesinde ölçüm ve tahmin veri setlerinden elde edilen rüzgar hızları kullanılırken SWAN tahmin modellerinin kalibrasyonunda, kalibre edilen modellerin doğrulanmasında ve duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilmesinde ise belirgin dalga yüksekliği ( $H_{m0}$ ) değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bu hata parametrelerine dayanarak en düşük hataya ve en yüksek korelasyona sahip olan en iyi modele karar verilmiştir. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan istatistiksel hata parametreleri aşağıda sunulmuştur.

Dikkate alınan hata değerlerinden ilki mutlak ortalama hata (MAE) değeridir. Mutlak ortalama hata;

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad (3.5)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bu bağıntıda;  $Y_i$  tahmin değerlerini,  $X_i$  ölçülen değerleri ve  $n$  veri sayısını temsil etmektedir. Bir diğer hata değeri olan hataların ortalama karekökü (RMSE);

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (3.6)$$

bağıntısına göre hesaplanmıştır. Ortalamaların farkı (Bias) ise;

$$Bias = (X_{ort} - Y_{ort}) \quad (3.7)$$

bağıntısıyla bulunmuştur. Bu bağıntıda,  $X_{ort}$  ölçümlerin ortalamasını,  $Y_{ort}$  ise tahminlerin ortalamasını temsil etmektedir. Hata değerlerinin elde edilmesinde sonra saçılım indeksi (SI) değerleri;

$$SI = \frac{RMSE}{X_{ort}} \quad (3.8)$$

formülüyle hesaplanmıştır. Son olarak ölçüm ve tahmin veri setleri arasındaki ilişkinin derecesi hakkında bilgi veren korelasyon katsayısı (r) ise;

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ort})(Y_i - Y_{ort})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ort})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{ort})^2}} \quad (3.9)$$

bağıntısıyla elde edilmiştir. Mutlak ortalama hata (MAE), hataların ortalama karekökü (RMSE), ortalamaların farkı (Bias) ve saçılım indeksi (SI) değeri sıfıra ne kadar yakınsa model sonuçlarının o derece doğru olduğu sonucuna varılmaktadır. Korelasyon katsayısı ise -1 ile +1 arasında değerler almakta ve sonucun pozitif çıkması ilişkinin pozitif, negatif çıkması ilişkinin negatif olduğunu göstermektedir. Eğer korelasyon katsayısı sıfıra yakın değer alırsa iki değişken arasında ilişkinin çok zayıf olduğu sıfır olması durumunda ise değişkenler arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığı sonucuna varılmaktadır. Korelasyon katsayısının işareti ilişkinin yönünü, değeri ise gücünü göstermektedir. Mutlak değer olarak 1'e yakın değerler ilişkinin güçlü olduğunu ifade etmektedir.

### 3.4.2. Saçılım Diyagramları

Saçılım diyagramı, iki farklı değişkenin arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılmaktadır. Bu diyagramlarda ilgili iki değişkenin arasındaki ilişkinin sebebi

görülemesede, bunlar arasında direk olarak bir ilişkinin bulunup bulunmadığı ve bu ilişkinin ne derece güçlü olduğu görülebilmektedir. Aralarında çok yüksek bir ilişki bulunan iki değişkenin değerleri diyagramda her iki eksenini  $45^\circ$  'lık açı ile kesen doğru boyunca uzanacaktır. Birbirine karşılık gelen değerler bu çizgiye yaklaştıkça aralarındaki ilişkinin güçlendiği anlaşılır.

### 3.4.3. Rüzgar ve Dalga Gülleri

CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN tahmin modellerinden elde edilen rüzgar hızları ve belirgin dalga yüksekliklerinin, ölçüm verilerine karşın yönel performanslarının değerlendirilebilmesi için rüzgar ve dalga gülleri oluşturulmuştur. Güller kutupsal koordinat sistemi üzerinde çizilen açısal histogramlar olarak ifade edilebilmektedir. Bir merkeze gelen rüzgar ve rüzgar dalgalarının coğrafi alandaki dağılımları bu güller yardımı ile belirlenebilmektedir. Rüzgarlar ve rüzgar dalgalarının yönel dağılımları güller üzerinde belirlenen yüzde cinsinden bir ölçekle gösterilebilmektedir. Aynı zamanda, rüzgar veya rüzgar dalgaları için kullanıcı tarafından belirlenen bir büyüklük ölçeği bulunur ve bu ölçekte aralıklar renklerle de ifade edilebilirler. Belirlenen büyüklük aralığındaki veriler ait olduğu yönde ve veri sayının yüzdesi oranında histogramlar üzerinde gösterilmektedir. Aynı yönde ancak farklı büyüklükteki veriler ise histogram üzerinde bir önceki veriye eklenerek gösterilmektedir. Böylece hangi yönden hangi büyüklük aralığında yüzde olarak hangi oranda rüzgar veya rüzgar dalgasının geldiği tespit edilebilmektedir.

Bu çalışmada, rüzgar gülleri için açısal histogram  $22.5^\circ$  lik aralıklara bölünerek oluşturulmuştur. Rüzgar hızları için büyüklük aralıkları 3-5, 5-7,5, 7,5-10, 10-12,5, 12,5-15, 15-17,5 m/sn aralığında olacak şekilde hazırlanmıştır. Böylece, rüzgar hızları farklı yönlerde yüzde cinsinden bu 6 aralıkta sunulmuştur. 3 m/sn'nin altındaki rüzgar hızı değerleri ise sakin dönemi yansıttığından güller üzerinde bu rüzgar değerleri gösterilmemiş ancak diyagramların üst kısımlarında yüzde cinsinden değerleri verilmiştir. Rüzgar dalgalarına ait dalga gülleri de rüzgar gülleri ile aynı yöntem ile elde edilmiştir. Dalgalar için büyüklük aralıkları 0,5-0,7, 0,7-0,9, 0,9-1,1 metre ve 1,1 metreden büyük olacak şekilde seçilmiştir. Böylece, dalgaların farklı yönlerdeki



yüzdeleri bu 4 aralığa göre sunulmuştur. 0,5 m'den daha küçük dalga yükseklikleri sakin dönemi yansıttığı için güllerde 0-0,5 m aralığındaki dalga yükseklikleri gösterilmemiş ancak bu aralıktaki dalgaların toplam içerisindeki payı diyagramların üst kısmında yüzde cinsinden verilmiştir.

Silivri ölçüm istasyonunda veriler dalga yüksekliği ve bileşke rüzgar hızı olacak şekilde ve her iki verinin yön dilimi meteorolojik yön dilim sisteminde (Kuzey  $0^\circ$  ve saat yönünde artan yön dilimi) bulunmaktadır. SWAN modellerden elde edilen tahmin verilerinde ise dalga yönleri kartezyen koordinat sisteminde (Doğu  $0^\circ$  ve saat yönünün tersinde artan) verilmektedir. Ancak, SWAN modelde tahmini rüzgar hızları u ve v bileşenleri olacak şekilde vektörel olarak elde edilmektedir. Bu sebeple, rüzgar hızlarının yönleri u ve v vektörel hızları kullanılarak hesaplanmıştır. Tahmin veri setlerinden elde edilen vektörel hızların kuzey ve doğu yönlü bileşenleri pozitif, güney ve batı yönlü bileşenleri ise negatif değerler almaktadır. Bundan dolayı, öncelikle vektörel hızlardan rüzgar yönü kartezyen koordinat sistemine göre hesaplanmış, açı radyandan dereceye çevrilmiş ve daha sonra meteorolojik koordinat sistemine dönüştürülmüştür.

#### **3.4.4. Olasılık Dağılımları**

Her iki rüzgar verisini kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen rüzgar hızı ve belirgin dalga yüksekliklerinin, Silivri istasyonunda ölçülmüş olan tahmin verilerine uygunluğu olasılık dağılım fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu grafikleri çizilerek de irdelenmiştir. Rüzgar hızı frekans eğrisini tanımlamak için çeşitli olasılık yoğunluk fonksiyonları mevcuttur. En yaygın olasılık yoğunluk fonksiyonları Weibull, Rayleigh ve Log-normal fonksiyonlarıdır. Weibull dağılımı oldukça esnek ve basit olmasının yanında gerçek verilere iyi bir şekilde uyum sağlamaktadır. Böylece, Weibull dağılımı rüzgar hızı olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak kabul gören ve en yaygın kullanılan dağılımdır (Akpınar ve Akpınar 2005, Ucar ve Balo 2009, Gülersoy ve Çetin 2010, Akpınar 2012). Bu sebeple, bu çalışmada rüzgar hızlarının analizi için iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Weibull dağılım fonksiyonu en genel halde;

$$f_w(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{(k-1)} e^{-(V/c)^k} \quad (3.10)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada  $f_w(V)$  rüzgar hızının olasılık yoğunluğunu,  $k$  şekil parametresini,  $c$  ise ölçek parametresini simgelemektedir. Weibull dağılımının ölçek parametresi olan  $c$ , aynı zamanda rüzgar verilerinde referans bir değere sahiptir. Ayrıca,  $k$  şekil parametresinin, genellikle 1,5 ile 3 değerleri arasında olması beklenmektedir (Akpınar ve Akpınar 2004, Kurban ve ark. 2007). Bu parametreleri elde etmek için çeşitli analitik ve ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Burada, ölçek ve şekil parametreleri Justus formülüne göre belirlenmiştir (Manwell ve ark. 2002, Mirhosseini ve ark. 2011, Akpınar 2012).

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_{ort}}\right)^{-1,086} \quad (3.11)$$

$$c = \frac{V_{ort} k^{2,6674}}{0,184 + 0,816 k^{2,73855}} \quad (3.12)$$

Burada;  $V_{ort}$  rüzgar hızlarının ortalamasını ve  $\sigma$  ise rüzgar hızlarının standart sapmasını ifade etmekte olup aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$V_{ort} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N V_i\right) \quad (3.13)$$

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_{ort})^2}{N - 1}\right)^{0,5} \quad (3.14)$$

Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir  $V$  değerinden küçük ya da eşit gerçekleşme olasılığını vermektedir. Böylece, kümülatif dağılım fonksiyonu

$[F_w(V)]$ , olasılık yoğunluk fonksiyonunun  $[f_w(V)]$  integrali olarak ifade edilmektedir (Fyrrippis ve ark. 2010, Akpınar 2012).

$$F_w(V) = 1 - e^{-(V/c)^k} \quad (3.15)$$

Her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modellerinden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri istasyonunda ölçülen dalga yükseklikleri ile uyumluluğu ise literatürde kabul gören Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur (Longuet- Higgins 1952, Goda 1979, Tayfun 1980, Yüksek ve ark. 2000). Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu, Weibull olasılık dağılım fonksiyonunun şekil parametresinin 2'ye eşit olması halindeki özel durumudur. Rayleigh yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$f_R(V) = \frac{2V}{c^2} e^{-(V/c)^2} \quad (3.16)$$

Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu ise

$$F_R(V) = 1 - e^{-(V/c)^2} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu dağılımın en büyük avantajı, sadece ortalama dalga yüksekliği ile dağılımın belirlenebilmesidir.

### 3.4.5 Ekstrem Değer Analizi Yöntemi

Her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modellerden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerinin, Silivri istasyonunda ölçülmüş olan dalga yükseklikleri ile uyumlulukları ekstrem değer analizi yapılarak da irdelenmiştir. Ekstrem değer teorisinde ekstrapolasyon yardımı ile mevcut veri süresinden daha uzun sürede maksimum değerlerin görülme olasılıkları irdelenebilmektedir. Ekstrem değer analizleri genel olarak Gumbel, Weibull ve

Genelleştirilmiş Pareto dağılımları kullanılarak oluşturulmaktadır (Neelamani ve ark. 2007, Muzathik ve ark. 2011). Bu çalışmada, ekstrem değer analizleri literatürde kabul gören Gumbel dağılımı kullanılarak elde edilmiş ve grafikler oluşturulmuştur (Liu ve Ma 1980, Persson ve Rydén 2010). Bu çalışmada ekstrem değer analizi, 2013 yılı verileri için gerçekleştirilmiştir. Bütün veri setlerinin 2013 yılı verilerinden her ayın maksimum değerleri belirlendikten sonra, aylık maksimum değerlere Gumbel dağılımı uygulanarak farklı yineleme periyotlu dalga yükseklikleri tahmin edilmiştir. Gumbel dağılımının genel formülasyonu aşağıda verilmektedir.

$$G_{(H)} = e \left[ -e \left\{ - \left( \frac{H-a}{c} \right) \right\} \right] \quad (3.18)$$

Burada;  $G_{(H)}$  aşılma olasılığını vermekte olup,  $a$  yer parametresini,  $c$  ise ölçek parametresini ifade etmektedir. Aşılma olasılığı  $Q_{(H)} = 1 - G_{(H)}$  olarak ifade edilmekte ve  $Q_{(H)}$  ;

$$Q_{(H)} = (i - d_1) / (N + d_2) \quad (3.19)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;  $i$  azalan sırayla oluşturulan verilerden hesaplanan verinin sırasını ve  $N$  toplam veri sayını ifade etmektedir. Gumbel dağılımında  $d_1 = 0,44$  ve  $d_2 = 0,12$  olarak alınabilmektedir (Neelamani ve ark. 2007).

Gumbel dağılımında  $y$  eksenini her ayın maksimum değerini,  $x$  eksenini ise Gumbel dağılımına göre hesaplanmış olasılığı ifade etmektedir. Dağılım grafiği üzerinde maksimum değerlere karşılık gelen olasılık değerleri işaretlenerek belirlenen noktalardan en uygun doğru geçirilmektedir.  $x$  ekseninin üst satırı yineleme aralığını yıllık olarak vermektedir. Yineleme aralığında seçilen bir yılın bu doğru ile kesiştirilmesi ile o yıla ait yinelemeli maksimum dalga yüksekliği değeri elde edilebilmektedir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Marmara Denizi için uygun bir dalga tahmin modelinin geliştirilmesi ve dört farklı model ayarlamasına dayanan modellerle 31 yıllık uzun dönemli simülasyon sonuçlarının kıyaslanarak bölgenin uzun dönemli rüzgar ve dalga karakteristiğinin ortaya çıkartılması hedeflenmiştir. Bu maksatla, model geliştirilmesinde öncelikle sayısal dalga modellerinde girdi olarak kullanılan rüzgar veri setlerinin kaliteleri Marmara Denizi özelinde analiz edilmiştir. Daha sonra, SWAN modelin Marmara Denizi'ne uygulanması için modelin sayısal ayarlamalarında kullanılan parametreler ve modelin fiziksel süreçleri için tanımlanan formülasyonlar ve bu formülasyonlardaki parametreler değiştirilerek oluşturulan SWAN modellerin simülasyonları yürütülmüş ve Silivri ölçümleri kullanılarak kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Her iki rüzgarı girdi olarak kullanan SWAN modellerin kalibrasyonu sonucu her iki model içinde en iyi ayarlamalı modeller eş zamanlı analizler, saçılım diyagramları ve zaman serileri oluşturularak tespit edilmiştir. Kalibrasyon sonucu elde edilen modellerin doğrulanması Marmara Ereğli ve Ambarlı ölçüm verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kalibre edilmiş modellerin duyarlılık analizleri sayısal ayarlamadaki parametrelerin model performansına etkisi, fiziksel süreçler için tanımlanan formülasyonların ve bu formülasyonlardaki ayarlanabilir parametrelerin model performansına etkisi ve SWAN modellerde girdi olarak kullanılan rüzgar veri setlerinin sabit bir katsayı ile çarpılarak artırılması durumunda model performanslarının nasıl etkileneceği araştırılarak irdelenmiştir. Ayrıca, farklı dalga yükseklik aralıklarında modellerin nasıl performans sergilediği, geliştirilen modellerin yönsel olarak performanslarının analizi ve bu modellerin olasılık dağılımlarının kıyaslanması yürütülmüştür. Model geliştirilmesinde son olarak, 2013 yılı Silivri ölçüm verileri ve 2013 yılı rüzgar alanlarını girdi olarak kullanan SWAN modellerden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerinin aylık maksimum değerleri kullanılarak ekstrem dalgaların tahmin edilme performansları irdelenmiştir.

Marmara Denizi yüzeysel dalgalarının benzeşimini iyi bir şekilde temsil edecek modellerin geliştirilmesinden sonra, her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modeller 31 yıl boyunca çalıştırılmış ve Marmara Denizi

rüzgar ve dalga şartlarını içeren yüksek çözünürlüklü dört farklı veri seti üretilmiştir. Bu dört veri setinden Marmara Denizi'nin tüm yüzeyi için ortalama belirgin dalga yükseklikleri, ortalama dalga periyodları, ortalama dalga enerji periyodları ve ortalama rüzgar hızlarının aylık, mevsimsel ve yıllık alansal dağılımları ayrıca 31 yıllık ortalama %95 ve %99 aşılıma ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri, 31 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliği tahminlerinden 0,5m, 1m ve 2m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri ve 31 yıllık maksimum dalga yükseklikleri üretilmiştir. Burada, CFSS rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçları olduğu gibi sunulmuş diğer 3 model sonuçlarının ise CFSS rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından farkları alınarak irdelenmiştir.

#### **4.1. Marmara Denizi İçin Dalga Tahmin Modelinin Geliştirilmesi**

##### **4.1.1. Rüzgar Veri Setlerinin Kalitelerinin Analizi**

Rüzgar veri setlerinin kalitelerinin test edilebilmesi için CFSS ve ERA Interim rüzgar veri setlerinin Silivri istasyonuna en yakın dört karelej noktasındaki rüzgar hızı değerleri ile iki farklı yöntemle (alansal ağırlıklı ortalama ve uzaklık ağırlıklı ortalama) göre ağırlıklı ortalamalar alınarak Silivri istasyonunu temsil eden her iki rüzgar için 2 farklı veri seti üretilmiştir. Ayrıca, her iki rüzgar veri seti SWAN modele girdi olarak tanımlanarak Silivri istasyonu için birer tahmin veri seti daha oluşturulmuştur. Bunların haricinde, her iki rüzgar veri kaynağı için bu istasyona en yakın karelej noktasının değerlerini içeren birer veri seti de elde edilmiştir. Sonuçta, her iki rüzgar için ayrı ayrı 4 farklı veri seti oluşturulmuştur. Daha sonra, Silivri istasyonu koordinatlarında her iki rüzgar kaynağından elde edilen bu dört veri setinin Silivri ölçüm verileri (rüzgar hızı) ile eş zamanlı verileri tüm veri setinden ayıklanmıştır. Silivri istasyonunda ölçümler 2013 yılında kaydedilmiş olduğundan rüzgar verilerinin kaliteleri her iki veri kaynağının 2013 yılı rüzgar hızı tahminleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

CFSS rüzgarları için zamansal olarak karşılaştırılan bu tahmin verileri ve ölçüm verileri kullanılarak gerçekleştirilen eş zamanlı analizler sonucunda bulunan istatistiksel hata

değerleri ile ölçümlerin ortalamaları ( $X_{ort}$ ) ve tahminlerin ortalamaları ( $Y_{ort}$ ) Çizelge 4.1’de sunulmaktadır.

**Çizelge 4.1.** CFSR rüzgar veri setlerinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları

Hata parametresi	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları
MAE (m/sn)	1,61	1,56	1,75	1,52
RMSE (m/sn)	2,07	2,01	2,23	1,96
Bias (m/sn)	-0,71	-0,62	-0,93	-0,52
SI	0,47	0,46	0,51	0,44
R	0,72	0,72	0,72	0,73
$Y_{ort}$ (m/sn)	5,12	5,03	5,33	5,01
$X_{ort}$ (m/sn)	4,41	4,41	4,41	4,49

Bu çizelgede sunulan eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, korelasyon katsayıları ve saçılım indekslerine göre en yüksek korelasyona ve en düşük hataya sahip en iyi sonuçların SWAN tahmin model sonuçlarından ( $R=0,73$  ve  $SI=0,44$ ) elde edildiği anlaşılmaktadır.

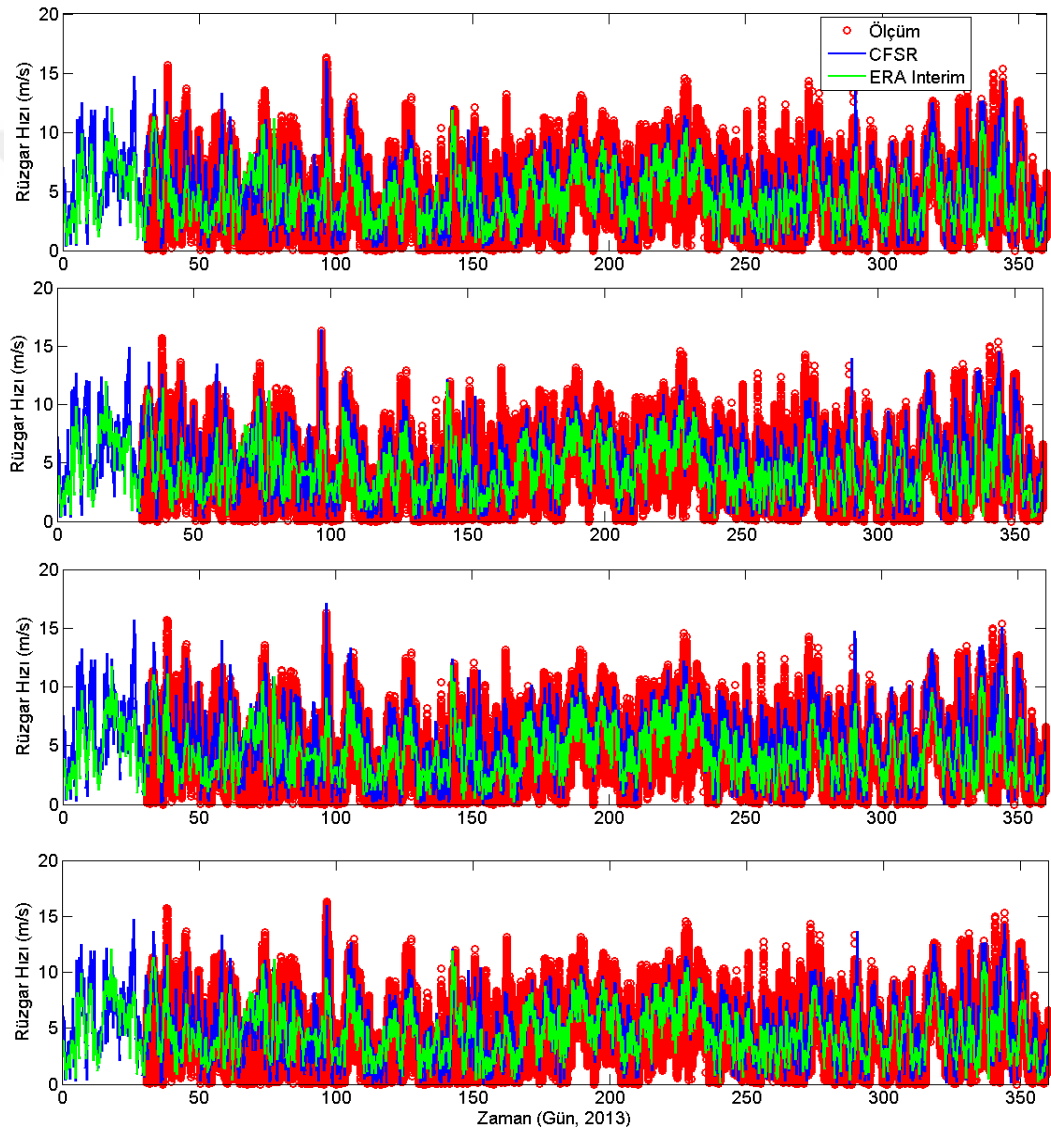
ERA Interim verileri kullanılarak oluşturulan dört farklı tahmin veri setinin ölçümlerle eş zamanlı analizleri sonucunda bulunan istatistiksel hata değerleri ile ölçümlerin ortalamaları ( $X_{ort}$ ) ve tahminlerin ortalamaları ( $Y_{ort}$ ) ise, Çizelge 4.2’de sunulmaktadır.

**Çizelge 4.2.** ERA Interim rüzgar veri setlerinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları

Hata Parametresi	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları
MAE (m/sn)	1,55	1,55	1,56	1,52
RMSE (m/sn)	2,06	2,06	2,08	1,97
Bias (m/sn)	0,09	0,07	0,20	0,16
SI	0,47	0,47	0,47	0,44
R	0,63	0,63	0,62	0,65
$Y_{ort}$ (m/sn)	4,30	4,32	4,19	4,33
$X_{ort}$ (m/sn)	4,39	4,39	4,39	4,49

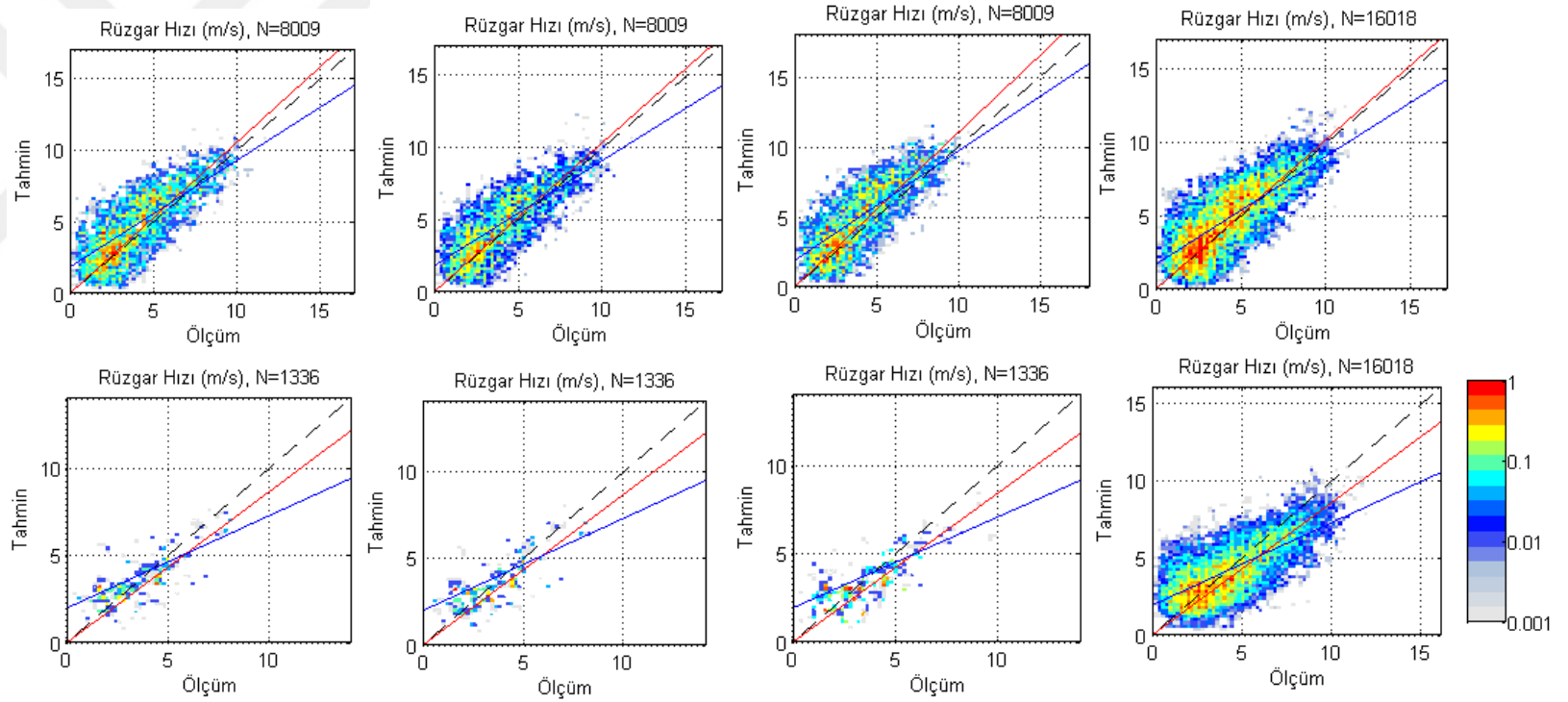
Bu çizelgede sunulan eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde ise, korelasyon katsayıları ( $R=0,65$ ) ve saçılım indeksine göre ( $SI=0,44$ ) en iyi sonuçların SWAN tahmin modelinden elde edildiği gözlemlenebilmektedir. Böylece, her iki rüzgar için 4 farklı şekilde oluşturulan rüzgar veri setleri ile Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin eş

zamanlı analizlerinden en iyi sonuçların SWAN tahmin modeli sonuçlarının verdiği anlaşılmaktadır. Bu, SWAN modelin kullandığı bi-lineer interpolasyon yönteminin burada dikkate alınan diğer iki yönteme göre daha iyi işlediğini göstermektedir. Hata istatistiği sonuçlarına göre, her iki rüzgar veri kaynağı da ölçüm verilerine yakın sonuçlar üretmiştir. Ancak, oluşturulan zaman serileri (Şekil 4.1) ve saçılım diyagramları (Şekil 4.2) birlikte değerlendirildiğinde CFSR rüzgarlarının daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 4.1.** CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından alansal ağırlıklı ortalama (ilk satır) ve uzaklık ağırlıklı ortalama (ikinci satır) yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon (üçüncü satır) için temin edilen ve SWAN model çıktılarında (dördüncü satır) türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızları ile Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin zaman serileri kıyaslaması





**Şekil 4.2.** CFSR (üstte) ve ERA Interim (altta) rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama (ilk sütun) ve alansal ağırlıklı ortalama (ikinci sütun) yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon (üçüncü sütun) için temin edilen ve SWAN model çıktılarında (dördüncü sütun) türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızları ile Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin saçılım diyagramları

Silivri ölçüm istasyonunda kaydedilen 1 yıllık 2013 yılı verisi ile kaliteleri test edilen CFSR ve ERA Interim rüzgar veri setlerinin, ölçüm istasyonundaki farklı hız aralığındaki kaliteleri de her iki rüzgar için türetilen dört farklı rüzgar veri seti için ayrı ayrı test edilmiştir. Bu amaçla, zamansal olarak karşılaştırılmış Silivri ölçüm istasyonu verilerine üç farklı rüzgar hız grubu (0-4 m/sn, 4-8 m/sn ve 8 m/sn den büyük) oluşturulacak şekilde filtreleme işlemi uygulanmıştır. Filtreleme işleminde bu hız aralıklarındaki ölçüm değerlerine karşılık her iki rüzgar kaynağı için ve her iki yöntemeye dayanan ağırlıklı ortalamalar ile elde edilen, en yakın istasyon için türetilmiş olan ve SWAN tahmin modelinden üretilen toplam dört farklı veri seti için değerler ayıklanmıştır. Farklı hız aralıkları için oluşturulan karşılaştırılmış veriler ayrı ayrı eş zamanlı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.3 – 4.5'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.3.** Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 0 m/sn ile 4 m/sn arasındaki rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarında türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları

Hata Parametresi	CFSR Rüzgar Veri Setleri				ERA Interim Rüzgar Veri Setleri			
	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları
MAE (m/sn)	1,69	1,64	1,82	1,59	1,50	1,51	1,45	1,41
RMSE (m/sn)	2,20	2,14	2,36	2,06	2,03	2,04	1,97	1,86
Bias (m/sn)	-1,17	-1,11	-1,30	-1,00	-0,90	-0,91	-0,82	-0,82
SI	0,95	0,92	1,02	0,87	0,89	0,89	0,86	0,79
R	0,27	0,27	0,28	0,27	0,09	0,09	0,09	0,12
Y <sub>ort</sub> (m/sn)	3,49	3,43	3,62	3,38	3,18	3,20	3,11	3,19
X <sub>ort</sub> (m/sn)	2,32	2,32	2,32	2,37	2,28	2,28	2,28	2,37

0 m/sn ile 4 m/sn arasındaki rüzgar hızları için oluşturulan eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde (Çizelge 4.3), saçılım indeksine (SI) göre düşük hızlardaki rüzgarları ERA Interim rüzgar veri alanlarının CFSR rüzgar veri alanlarına göre dört farklı veri seti için de daha iyi tahmin ettiği (örneğin CFSR & SWAN model sonuçları için SI = 0,87 iken ERA Interim & SWAN model sonuçları için SI = 0,79) anlaşılmaktadır. Her iki rüzgar kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, SWAN tahmin sonuçlarının diğer veri setlerine göre en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

**Çizelge 4.4.** Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 4 m/sn ile 8 m/sn arasındaki rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarında türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları

Hata Parametresi	CFSR Rüzgar Veri Setleri				ERA Interim Rüzgar Veri Setleri			
	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları
MAE (m/sn)	1,53	1,47	1,71	1,44	1,45	1,44	1,49	1,43
RMSE (m/sn)	1,91	1,84	2,10	1,81	1,88	1,88	1,93	1,81
Bias (m/sn)	-0,45	-0,33	-0,74	-0,26	0,79	0,76	0,91	0,79
SI	0,33	0,32	0,37	0,32	0,33	0,33	0,34	0,32
R	0,42	0,43	0,40	0,44	0,41	0,41	0,41	0,44
Y <sub>ort</sub> (m/sn)	6,18	6,06	6,47	5,99	4,92	4,95	4,80	4,93
X <sub>ort</sub> (m/sn)	5,73	5,73	5,73	5,72	5,71	5,71	5,71	5,72

4 m/sn ile 8 m/sn arasındaki rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları (Çizelge 4.4) irdelendiğinde, saçılım indeksine göre değerlerin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenebilmektedir. Ancak, her iki rüzgar içinde bu rüzgar hızı aralığındaki (4 m/s – 8 m/s) değerlerin hata durumları ile daha düşük rüzgar hız aralığındaki (0 – 4 m/s) değerlerin hata durumları birlikte değerlendirildiğinde, 4 m/s – 8 m/s rüzgar hızı aralıklarında tahminlerin daha iyi olduğu (0 – 4 m/s aralığında min SI = 0,79 ve 4 – 8 m/s aralığında max SI = 0,37) belirlenmiştir.

Son olarak 8 m/sn'den daha büyük hız değerlerine sahip rüzgarlar için oluşturulan eş zamanlı analiz sonuçları (Çizelge 4.5) değerlendirildiğinde ise, saçılım indeksine göre CFSR rüzgar veri setlerinin daha iyi sonuçlar verdiği (CFSR için max SI = 0,22 ve ERA Interim için min SI = 0,30) gözlemlenmiştir. Her iki rüzgar veri seti için 8 m/sn den büyük rüzgar hızları ile oluşturulan eş zamanlı analiz sonuçları kendi içinde değerlendirildiğinde ise sonuçların birbirine çok yakın değerler verdiği görülmektedir.

Bütün eş zamanlı analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, CFSR rüzgar veri setlerinin 8 m/sn'den büyük rüzgarları daha iyi tahmin ettiği, rüzgar hızları düştükçe bu rüzgar veri kaynağı için tahminlerin kötüleştiği görülmektedir. Örneğin; 0 – 4 m/s hız aralığında SWAN model sonuçları için belirlenen SI değeri 0,87 iken, 4 – 8 m/s hız aralığında 0,32 ve 8 m/s den büyük hız aralığında ise 0,21 değerindedir. ERA Interim rüzgar veri setlerinde ise düşük hızlardaki rüzgarların yüksek hızlı rüzgarlara kıyasla

kötü tahmin edildiği buna karşılık rüzgar hızı değeri 4 m/sn ile 8 m/sn arasında değerlendirildiğinde tahminlerin iyileştiği ancak daha yüksek hızlarda ise tahminde gelişmenin olmadığı gözlemlenebilmektedir. Örneğin; 0 – 4 m/s hız aralığında SWAN model sonuçları için belirlenen SI değeri 0,79 iken, 4 – 8 m/s hız aralığında 0,32 ve 8 m/s den büyük hız aralığında ise 0,31 değerindedir.

**Çizelge 4.5.** Silivri istasyonu rüzgar ölçümlerinin 8 m/sn den büyük rüzgar hızları ile CFSR ve ERA Interim rüzgar veri kaynaklarından uzaklık ağırlıklı ortalama ve alansal ağırlıklı ortalama yöntemleri ile elde edilen, en yakın istasyon için temin edilen ve SWAN model çıktılarından türetilen dört farklı veri setinin rüzgar hızlarının eş zamanlı analiz sonuçları

Hata Parametresi	CFSR Rüzgar Veri Setleri				ERA Interim Rüzgar Veri Setleri			
	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları	Uzaklık Ağırlıklı Ortalama	Alansal Ağırlıklı Ortalama	En Yakın İstasyon	SWAN Model Sonuçları
MAE (m/sn)	1,51	1,50	1,57	1,51	2,24	2,21	2,40	2,34
RMSE (m/sn)	2,00	1,99	2,07	2,00	2,81	2,78	2,97	2,84
Bias (m/sn)	0,48	0,63	0,14	0,68	2,07	2,03	2,27	2,16
SI	0,21	0,21	0,22	0,21	0,30	0,30	0,32	0,31
R	0,32	0,32	0,30	0,35	0,31	0,31	0,30	0,27
Y <sub>ort</sub> (m/sn)	8,84	8,70	9,19	8,63	7,26	7,30	7,06	7,16
X <sub>ort</sub> (m/sn)	9,33	9,33	9,33	9,32	9,33	9,33	9,33	9,32

#### 4.1.2. SWAN Modelin Marmara Denizine Uygulanması

Marmara Denizi'nde rüzgar dalga modellemesi, SWAN tahmin modelinin 41.10 versiyonu (Booij ve ark. 1999) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model, üçüncü nesil ve durgun olmayan modda hesaplama zaman aralığı 30 dakika olacak şekilde çalıştırılmıştır. Ayrıca, model Marmara Denizi'ni kapsayacak şekilde 26,6958° ve 29,9958° doğu boylamları ile 40,2042° ve 41,0942° kuzey enlemleri arasında uygulanmıştır. Bu alan, karelej çözünürlüğü 0,0066° olacak şekilde 500 x 135 karelej noktasından oluşan bir düzenli ağ üzerine kurulmuştur. Hesaplamalar, yönsel dalga enerji yoğunluk spektrumunun frekans aralığı 0,04 Hz ve 1,0 Hz arasında olacak şekilde ve 36 eşit yönsel çözünürlükte ve 35 eşit frekans çözünürlüğünde yürütülmüştür. Modelde hesaplamalar için rüzgar kaynaklı dalga büyümesi ve köpüklenme için farklı formülasyonlar kullanılmış ve ayarlanabilen  $C_{ds}$  köpüklenme parametresi kullanılarak model kalibre edilmiştir. SWAN tahmin modelinin varsayılan ayarlamalarında rüzgar kaynaklı dalga büyümesi ve köpüklenme formülasyonu Komen ve ark. (1994)'e

dayanmaktadır. Rogers ve ark. (2003), köpüklenme formülasyonunda  $\delta = 1$  olarak alınmasının daha doğru sonuçlar ürettiğini kanıtlamıştır. SWAN modelin varsayılan ayarlamasında, dörtlü dalga-dalga etkileşimi Hasselman ve ark. (1985) tarafından bulunan  $\lambda = 0,25$  ve  $C_{nl4} = 3 \times 10^7$  olarak ayarlanan Ayrık Etkileşim Yaklaşımına dayandırılmaktadır. Taban sürtünmesi için JONSWAP formülasyonu kullanılmakta ve Zijlema ve ark. (2012)'e göre  $C_{fjon} = 0,038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  olarak alınmaktadır. Derinlik etkileşimli dalga kırılmasında ise alfa= 1 ve gamma=0,73 olarak ayarlanan Battjes ve Janssen (1978) yaklaşımı kullanılmaktadır. Modelde, üçlü dalga-dalga etkileşimi Eldeberky ve Battjes (1995) yaklaşımı kullanarak hesaba katılmaktadır.

#### 4.1.3. SWAN Modelin Kalibrasyonu

SWAN tahmin modeli ile ilgili yapılan literatür taramasında (Moeini ve Shahidi 2007, Appendini ve ark. 2013) modelin fiziksel sürecini etkileyen en duyarlı parametrenin köpüklenme parametresi olduğu anlaşılmaktadır. Böylece, her iki rüzgar verisini kullanan SWAN tahmin modelin kalibrasyonu köpüklenme formüllerinde bulunan köpüklenme parametresinin deneme yanılma yoluyla ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle varsayılan ayarlamalı SWAN modellerde rüzgar kaynaklı dalga büyümesi ve köpüklenme formülasyonları için farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Bununla birlikte, üçlü dalga-dalga etkileşimi de aktif hale getirilmiştir. SWAN modelde rüzgar kaynaklı dalga büyümesi için 3 seçenek (KOMEN (Komen ve ark. 1994), JANSSEN (Janssen 1991a,b) ve YAN (Yan 1987)) ve köpüklenme ile ilgili olarak da bunlarla bağlantılı 3 seçenek (KOMEN (Komen ve ark. 1994), JANSSEN (Janssen 1991a,b) ve WESTHUYSEN (Van der Westhuysen 2007) mevcuttur. Köpüklenme formülasyonlarında, köpüklenme katsayısının ( $C_{ds}$ ) varsayılan değerleri JANSSEN için  $C_{ds}=4,5$  iken KOMEN için  $C_{ds}=2,36 \times 10^{-5}$  ve WESTHUYSEN için  $C_{ds}=5,00 \times 10^{-5}$  olarak tanımlanmaktadır.

Modellerin kalibrasyonu için öncelikle her iki rüzgar için yukarıda rüzgar girdisi ve köpüklenme süreçleri için tanımlanan formülasyonlardan 5 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar sırasıyla rüzgar kaynaklı dalga büyümesi ve köpüklenme için; Komen & Komen, Komen & Janssen, Janssen & Janssen, Janssen &

Komen ve Yan & Westhuysen olacak şekilde ayarlanmıştır. Her kombinasyon için diğer fiziksel süreçler varsayılan olarak ayarlanmıştır.

Her iki rüzgar ve her kombinasyon için köpüklenme katsayısı için varsayılan köpüklenme katsayısı kullanılarak (JANSSEN için  $C_{ds}=4,5$ , KOMEN için  $C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$  ve WESTHUYSEN için  $C_{ds}=5 \times 10^{-5}$ ) oluşturulan ana komut (swn) dosyaları ayrı ayrı klasörlerde sayısal simülasyonlarda ihtiyaç duyulan batimetri ve rüzgar alanları dosyaları ile birlikte arşivlenmiştir. Her iki rüzgarı kullanan SWAN modeller için hazırlanan bu girdi dosyaları Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bilgisayar Laboratuvarında bulunan 24 bilgisayara aktarılarak her iki rüzgar ve her kombinasyon için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda Silivri şamandıra istasyonu koordinatlarında noktasal olarak 30 dakikalık zamansal çözünürlükte belirgin dalga yüksekliği, soluğan dalga yüksekliği, mutlak ortalama dalga periyodu, pik periyod, ortalama dalga yönü, dalgaların yayılma yönü, frekans spektrumunun normalize genişliği, rüzgar hızı bileşenleri ve boyutsuz benjamin-feir indeksi olarak da tanımlanan dalga dikliğinin rastgelelik oranı parametreleri elde edilmiştir.

Her iki rüzgar ve her kombinasyon için varsayılan köpüklenme katsayısı kullanılarak oluşturulan SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliği ( $H_{m0}$ ) verilerinin, Silivri ölçüm verilerine karşın eş zamanlı olarak analizleri yapılarak hata parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra, her iki rüzgar için oluşturulan kombinasyonlardaki köpüklenme katsayısı azaltılıp artırılarak simülasyonlar gerçekleştirilmeye devam edilmiştir. Bu simülasyonlar sonucu elde edilen SWAN model sonuçları da yine Silivri ölçümleri ile eş zamanlı olarak analiz edilerek hata değerleri belirlenmiştir. Her kombinasyon için oluşturulan eş zamanlı analiz sonuçları kendi içinde değerlendirildiğinde her kombinasyon için en iyi performansa sahip SWAN model, en az hataya ve en yüksek korelasyona sahip model olarak tespit edilmiştir. Böylece, toplamda CFSR veri seti için 40 adet, ERA Interim veri seti için ise 39 adet toplamda 79 adet test simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tamamlanan simülasyonların eş zamanlı analizleri CFSR rüzgar veri seti için Çizelge 4.6'da ve ERA Interim rüzgar veri seti için Çizelge 4.7'te sunulmaktadır.

CFSR rüzgar veri setini kullanan SWAN model sonuçlarının eşzamanlı hata analizleri incelendiğinde (Çizelge 4.6), Janssen&Janssen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin 8,5 değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha yüksek  $C_{ds}$  değerleri kullanan SWAN modellerde ise, RMSE, MAE ve SI değerlerine göre iyileşmenin devam ettiği ancak Bias ve tahminlerin ortalamasına bakıldığında hataların yüksek çıktığı anlaşılmaktadır. Bundan dolayı, Janssen&Janssen kombinasyonu için en düşük hataya ve en yüksek korelasyona sahip en iyi durumun  $C_{ds}=8,5$  (Bias=0,00 m; SI=0,52 ve R=0,76) olarak ayarlandığında ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Janssen&Komen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değeri hem artırıldığında hem azaltıldığında bütün hataların yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, Janssen&Komen kombinasyonu için en iyi durumun varsayılan köpüklenme katsayısı olan  $C_{ds}=2,36e-5$  olarak ayarlandığında olduğuna karar verilmiştir. Komen&Janssen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin 1,0 değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise, bütün hataların yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, Komen&Janssen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}=1,0$  (Bias=0,03 m; SI=0,48 ve R=0,76) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir. Komen&Komen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin  $1,0e-5$  değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları RMSE hariç bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. RMSE parametresine göre ise herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise bütün hataların yüksek çıktığı anlaşılmıştır. Bundan dolayı, Komen&Komen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}=1,00e-5$  (Bias=0,02 m; SI=0,47 ve R=0,76) olarak ayarlandığında olduğuna karar verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN tahmin sonuçlarının (dalga yüksekliği) Silivri ölçümü verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları

Rüzgar Büyümesi & Köpüklenme	$C_{ds}$	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI	$X_{ort}$ (m)	$Y_{ort}$ (m)
Janssen&Janssen (N =15 998)	4	0,72	-0,35	0,49	0,37	1,48	0,33	0,68
	4,5	0,73	-0,27	0,41	0,30	1,23	0,33	0,60
	5	0,74	-0,22	0,36	0,26	1,09	0,33	0,55
	5,5	0,75	-0,17	0,31	0,22	0,94	0,33	0,50
	6	0,75	-0,13	0,27	0,19	0,82	0,33	0,46
	6,5	0,75	-0,10	0,24	0,17	0,74	0,33	0,43
	7	0,76	-0,07	0,21	0,15	0,65	0,33	0,40
	7,5	0,76	-0,04	0,20	0,14	0,59	0,33	0,37
	8	0,76	-0,02	0,18	0,13	0,55	0,33	0,35
	8,5	0,76	0,00	0,17	0,13	0,52	0,33	0,33
	9	0,76	0,01	0,16	0,12	0,50	0,33	0,32
Janssen&Komen (N = 15 998)	2,26e-5	0,69	-0,63	0,78	0,64	2,38	0,33	0,96
	2,36e-5	0,73	-0,27	0,41	0,30	1,23	0,33	0,60
	2,46e-5	0,69	-0,57	0,72	0,58	2,19	0,33	0,90
Komen&Janssen (N = 15 998)	0,25	0,76	-0,05	0,20	0,15	0,60	0,33	0,38
	0,5	0,76	-0,01	0,17	0,13	0,52	0,33	0,34
	1	0,76	0,03	0,16	0,12	0,48	0,33	0,30
	1,5	0,77	0,05	0,16	0,12	0,48	0,33	0,27
	2	0,77	0,07	0,16	0,12	0,48	0,33	0,26
	2,5	0,77	0,08	0,16	0,12	0,49	0,33	0,25
	3	0,77	0,09	0,17	0,12	0,50	0,33	0,24
	4	0,77	0,11	0,17	0,13	0,53	0,33	0,22
	4,5	0,77	0,12	0,18	0,13	0,54	0,33	0,21
	5	0,77	0,12	0,18	0,14	0,55	0,33	0,21
Komen&Komen (N = 15 998)	0,25e-5	0,76	-0,09	0,21	0,16	0,64	0,33	0,42
	0,50e-5	0,76	-0,03	0,17	0,13	0,53	0,33	0,36
	1,00e-5	0,76	0,02	0,16	0,11	0,47	0,33	0,31
	1,50e-5	0,76	0,05	0,16	0,11	0,47	0,33	0,28
	2,00e-5	0,77	0,07	0,16	0,11	0,48	0,33	0,26
	2,26e-5	0,77	0,08	0,16	0,12	0,48	0,33	0,25
	2,36e-5	0,77	0,08	0,16	0,12	0,49	0,33	0,25
	2,46e-5	0,77	0,08	0,16	0,12	0,49	0,33	0,25
2,56e-5	0,77	0,09	0,16	0,12	0,49	0,33	0,24	
Yan&Westhuysen (N = 15 998)	1,0e-5	0,76	-0,01	0,17	0,12	0,52	0,33	0,34
	1,5e-5	0,76	0,02	0,16	0,11	0,49	0,33	0,31
	2,0e-5	0,76	0,04	0,16	0,11	0,48	0,33	0,29
	3,0e-5	0,77	0,07	0,16	0,11	0,48	0,33	0,26
	4,0e-5	0,77	0,09	0,16	0,12	0,50	0,33	0,24
	5,0e-5	0,77	0,10	0,17	0,12	0,52	0,33	0,23
6,0e-5	0,77	0,11	0,18	0,13	0,53	0,33	0,21	

Çizelge 4.6’ da sunulan Yan&Westhuysen kombinasyonunda ise,  $C_{ds}$  değerinin  $2,0e-5$  değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise SI hariç diğer hata parametrelerinde iyileşmenin devam ettiği ancak SI değerine bakıldığında hataların yüksek çıktığı anlaşılmaktadır. Bundan dolayı,



Yan&Westhuysen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}= 2,0e-5$  (Bias=0,04 m; SI=0,48 ve R=0,76) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN tahmin sonuçlarının (dalga yüksekliği) Silivri ölçümü verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları

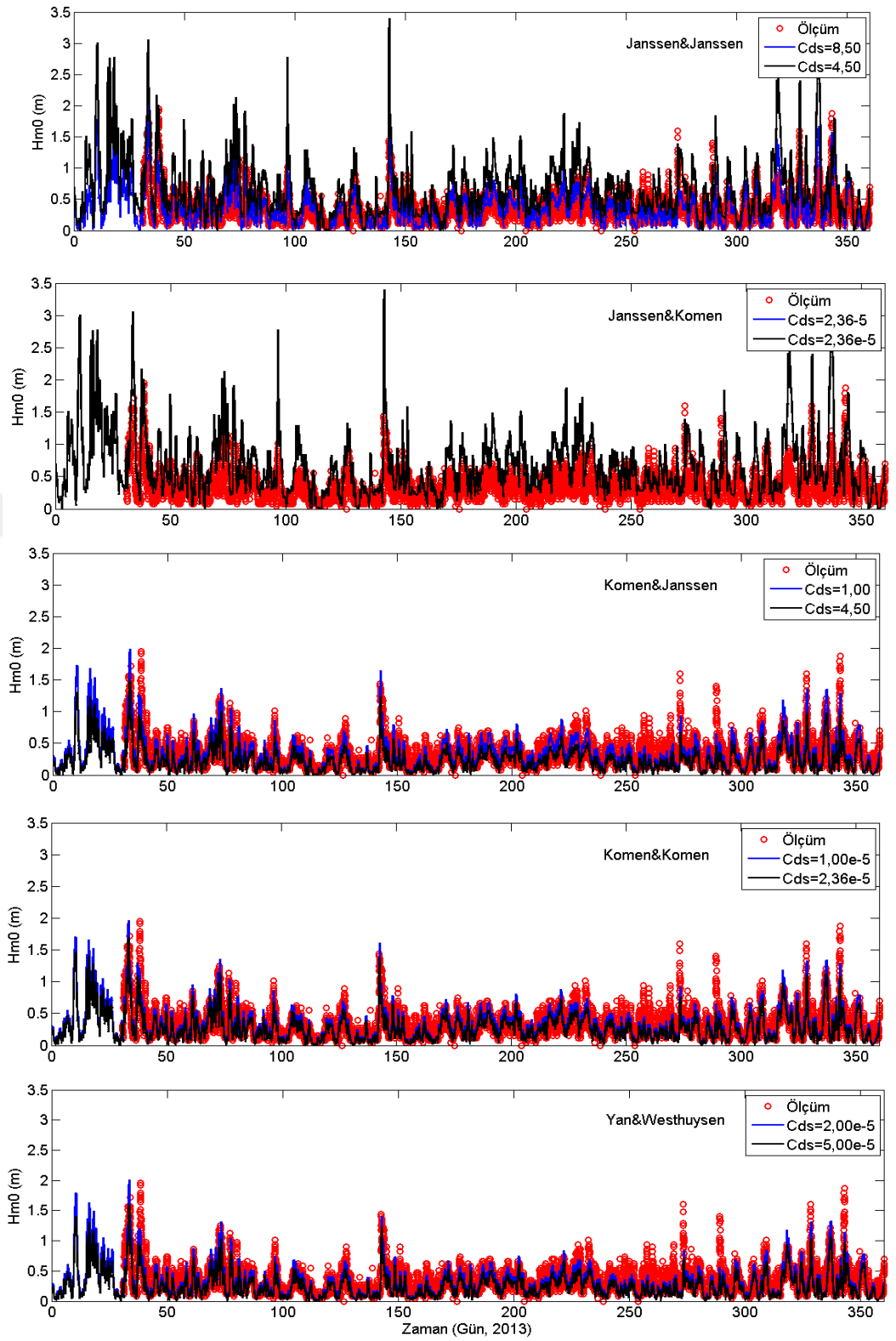
Rüzgar Büyümesi & Köpüklenme	$C_{ds}$	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI	$X_{ort}$ (m)	$Y_{ort}$ (m)
Janssen&Janssen (N = 15 988)	4	0,70	-0,19	0,32	0,23	0,96	0,33	0,52
	4,5	0,70	-0,13	0,28	0,20	0,84	0,33	0,46
	5	0,70	-0,09	0,25	0,18	0,75	0,33	0,42
	5,5	0,72	-0,06	0,22	0,16	0,66	0,33	0,39
	6	0,73	-0,03	0,19	0,14	0,59	0,33	0,36
	6,5	0,73	0,00	0,18	0,13	0,56	0,33	0,33
	7	0,73	0,02	0,18	0,13	0,54	0,33	0,31
	7,5	0,73	0,04	0,18	0,13	0,53	0,33	0,29
Janssen&Komen (N = 15 988)	2,26e-5	0,67	-0,44	0,55	0,45	1,66	0,33	0,77
	2,36e-5	0,70	-0,13	0,28	0,20	0,84	0,33	0,46
	2,46e-5	0,68	-0,39	0,49	0,40	1,50	0,33	0,72
Komen&Janssen (N = 15 988)	0,25	0,73	0,06	0,19	0,14	0,56	0,33	0,27
	0,5	0,73	0,08	0,18	0,14	0,56	0,33	0,24
	1	0,74	0,11	0,19	0,14	0,57	0,33	0,22
	1,5	0,74	0,13	0,19	0,15	0,59	0,33	0,20
	2	0,74	0,14	0,20	0,16	0,60	0,33	0,19
	2,5	0,74	0,15	0,20	0,16	0,62	0,33	0,18
	3	0,74	0,15	0,21	0,17	0,63	0,33	0,18
	4	0,74	0,16	0,22	0,17	0,66	0,33	0,17
	4,5	0,74	0,17	0,22	0,18	0,67	0,33	0,16
	5	0,74	0,17	0,22	0,18	0,68	0,33	0,16
Komen&Komen (N = 15 988)	0,25e-5	0,73	0,02	0,18	0,13	0,54	0,33	0,31
	0,50e-5	0,73	0,06	0,17	0,13	0,52	0,33	0,27
	1,00e-5	0,74	0,10	0,18	0,13	0,54	0,33	0,23
	1,50e-5	0,74	0,12	0,19	0,14	0,57	0,33	0,21
	2,00e-5	0,74	0,13	0,19	0,15	0,59	0,33	0,20
	2,26e-5	0,74	0,14	0,20	0,16	0,60	0,33	0,19
	2,36e-5	0,74	0,14	0,20	0,16	0,61	0,33	0,19
	2,46e-5	0,74	0,14	0,20	0,16	0,61	0,33	0,19
2,56e-5	0,74	0,14	0,20	0,16	0,61	0,33	0,19	
Yan& Westhuysen (N = 15 988)	0,25e-5	0,62	-0,11	0,25	0,18	0,76	0,33	0,44
	0,5e-5	0,69	0,00	0,18	0,13	0,55	0,33	0,32
	1,0e-5	0,73	0,07	0,17	0,13	0,53	0,33	0,26
	1,5e-5	0,73	0,09	0,18	0,13	0,54	0,33	0,24
	2,0e-5	0,73	0,11	0,18	0,14	0,56	0,33	0,22
	3,0e-5	0,74	0,13	0,19	0,15	0,59	0,33	0,20
	4,0e-5	0,74	0,14	0,20	0,16	0,61	0,33	0,19
	5,0e-5	0,74	0,15	0,21	0,17	0,64	0,33	0,18
6,0e-5	0,74	0,16	0,22	0,17	0,66	0,33	0,17	

ERA Interim rüzgar veri setini kullanan SWAN model sonuçlarının eşzamanlı hata analiz sonuçları incelediğinde ise (Çizelge 4.7), Janssen&Janssen kombinasyonunda  $C_{ds}$

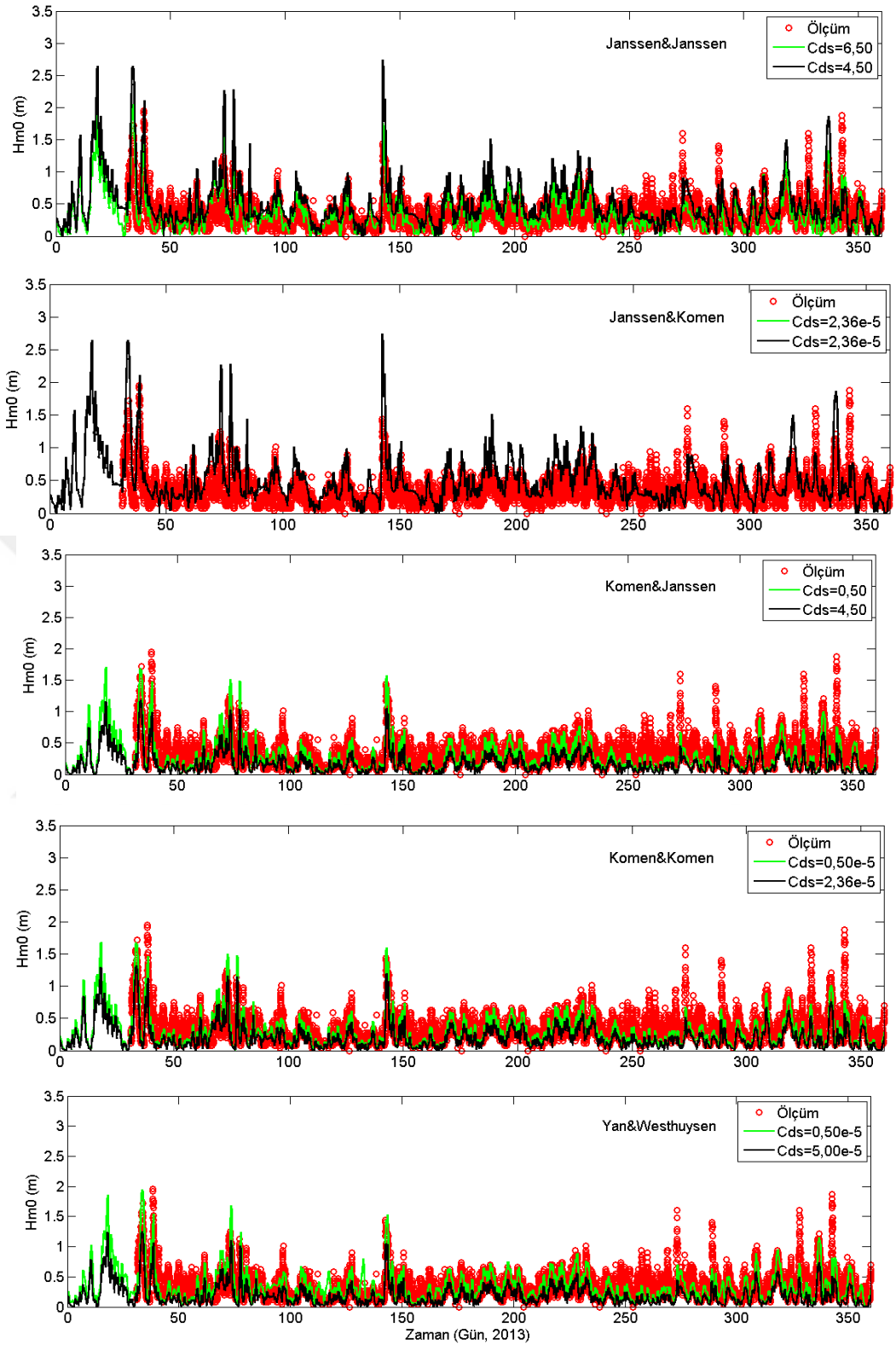
değerinin 6,5 değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha yüksek  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise, RMSE ve MAE değerlerine göre model sonuçlarında değişim olmazken SI değerine göre iyileşmenin devam ettiği görülmüştür. Ancak, Bias ve tahminlerin ortalamasına göre hataların yüksek çıktığı anlaşılmıştır. Bundan dolayı, Janssen&Janssen kombinasyonu için en düşük hataya ve en yüksek korelasyona sahip en iyi durumun  $C_{ds}=6,5$  (Bias=0,00 m; SI=0,56 ve R=0,73) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir. Janssen&Komen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin hem artırıldığında hem de azaltıldığında bütün hataların yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, Janssen&Komen kombinasyonu için en iyi durumun varsayılan ayarlama ( $C_{ds}=2,36e-5$ ) durumunda gerçekleştiğine karar verilmiştir. Komen&Janssen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin 0,5 değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise, Bias ve tahminlerin ortalamasına göre model sonuçlarında iyileşmenin devam ettiği ancak RMSE değerine bakıldığından hataların yüksek çıktığı anlaşılmaktadır. Bundan dolayı, Komen&Janssen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}=0,50$  (Bias=0,08 m; SI=0,56 ve R=0,73) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir. Komen&Komen kombinasyonunda  $C_{ds}$  değerinin  $0,5e-5$  değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise, Bias ve tahminlerin ortalamasına göre model sonuçlarında iyileşme devam ederken SI ve RMSE değerlerine göre hataların yüksek çıktığı anlaşılmıştır. Bunlardan dolayı, Komen&Komen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}=0,5e-5$  (Bias=0,06 m; SI=0,52 ve R=0,73) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir. Yan&Westhuysen kombinasyonunda ise  $C_{ds}$  değerinin  $0,5e-5$  değerine kadar ayarlanması sonucunda elde edilen model sonuçları bütün hata parametrelerine göre iyileşme göstermiştir. Daha düşük  $C_{ds}$  değerlerini kullanan SWAN modellerde ise, bütün hataların yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, Yan&Westhuysen kombinasyonu için en iyi durumun  $C_{ds}=0,5e-5$  (Bias=0,00 m; SI=0,55 ve R=0,69) olarak ayarlandığında gerçekleştiğine karar verilmiştir.

Her iki rüzgar verisi ve her kombinasyon için yukarıda belirlenen en iyi durum ayarlamalı SWAN modellerden hangisinin Marmara Denizi'nde yapılacak rüzgar dalga modellemesi çalışmalarında kullanılmasının uygun olacağını belirlemek amacıyla, eş zamanlı analizler sonucu belirlenen hata değerlerine ek olarak her kombinasyon için belirlenen en iyi durum ayarlamalı SWAN model sonuçları kullanılarak zaman serileri ve saçılım diyagramları da oluşturulmuş ve Şekil 4.3 – 4.6'de sunulmuştur.

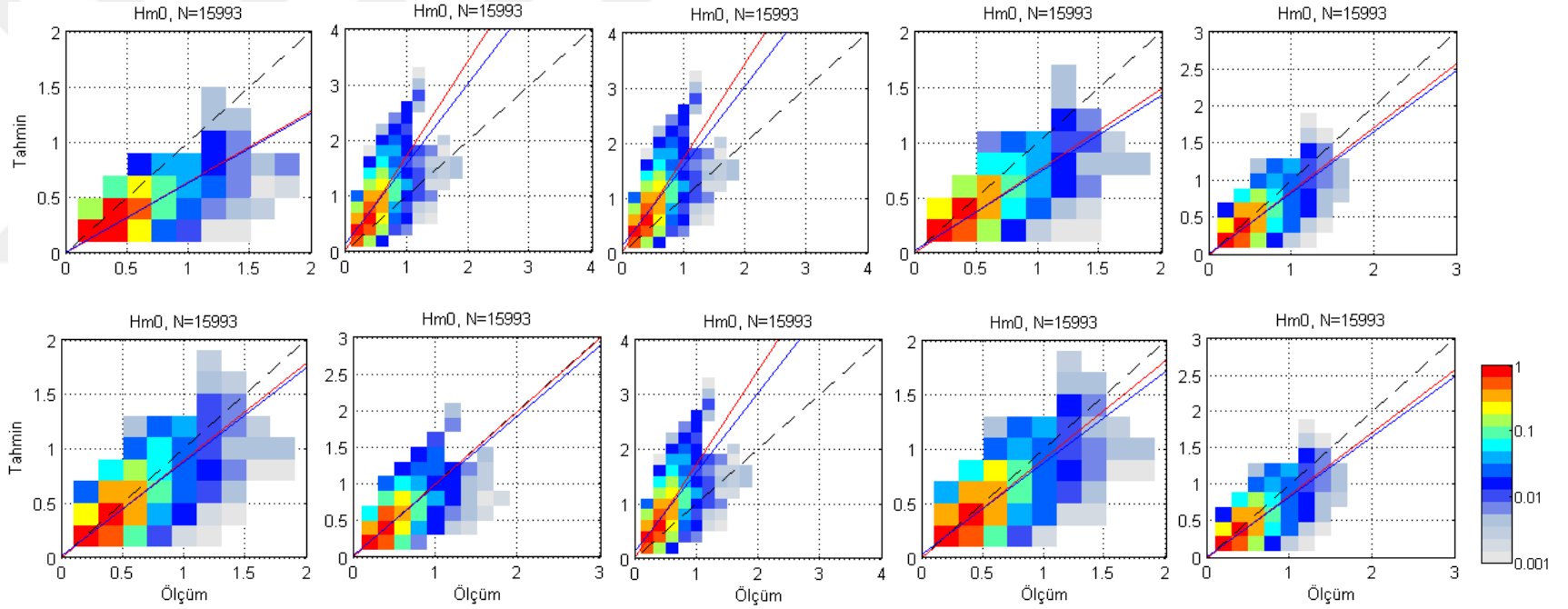
Her iki rüzgar veri seti için oluşturulan eş zamanlı analizler, zaman serileri ve saçılım diyagramları birlikte değerlendirildiğinde, CFSR rüzgar veri seti için rüzgar kaynaklı dalga büyümesi formülasyonu Komen ve köpüklenme için  $C_{ds}=1,0$  olarak ayarlanmış Janssen formülasyonunun ve ERA Interim rüzgar veri seti için ise rüzgar kaynaklı dalga büyümesi formülasyonu Komen ve köpüklenme için  $C_{ds}=0,5e-5$  olarak ayarlanmış Komen formülasyonlarını kullanan modellerin en iyi performansa (en düşük hataya ve en yüksek korelasyona) sahip oldukları anlaşılmıştır.



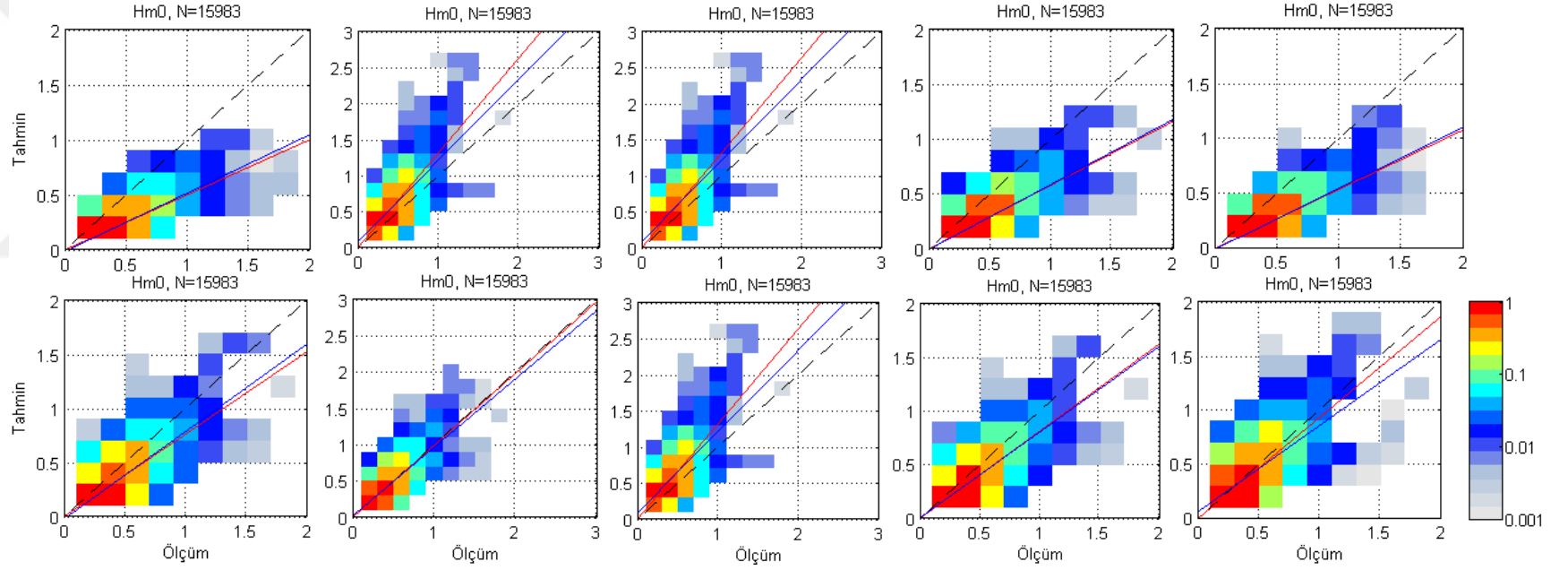
**Şekil 4.3.** CFSR rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış ve en iyi performansa sahip SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı zaman serileri kıyaslaması



**Şekil 4.4.** ERA Interim rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış ve en iyi performansa sahip SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı zaman serileri kıyaslaması



**Şekil 4.5.** CFSR rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için [Komen&Janssen (ilk sütun), Janssen&Janssen (ikinci sütun), Janssen&Komen (üçüncü sütun), Komen&Komen (dördüncü sütun), Yan&Westhuysen (beşinci sütun)] varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış (üstte) ve en iyi performansa sahip (altta), SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı saçılım diyagramları



**Şekil 4.6.** ERA Interim rüzgarlarını kullanan farklı kombinasyonlar için [Komen&Janssen (ilk sütun), Janssen&Janssen (ikinci sütun), Janssen&Komen (üçüncü sütun), Komen&Komen (dördüncü sütun), Yan&Westhuysen (beşinci sütun)] varsayılan köpüklenme katsayısı ile ayarlanmış (üstte) ve en iyi performansa sahip (altta) SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri şamandıra ölçümlerine karşı saçılım diyagramları

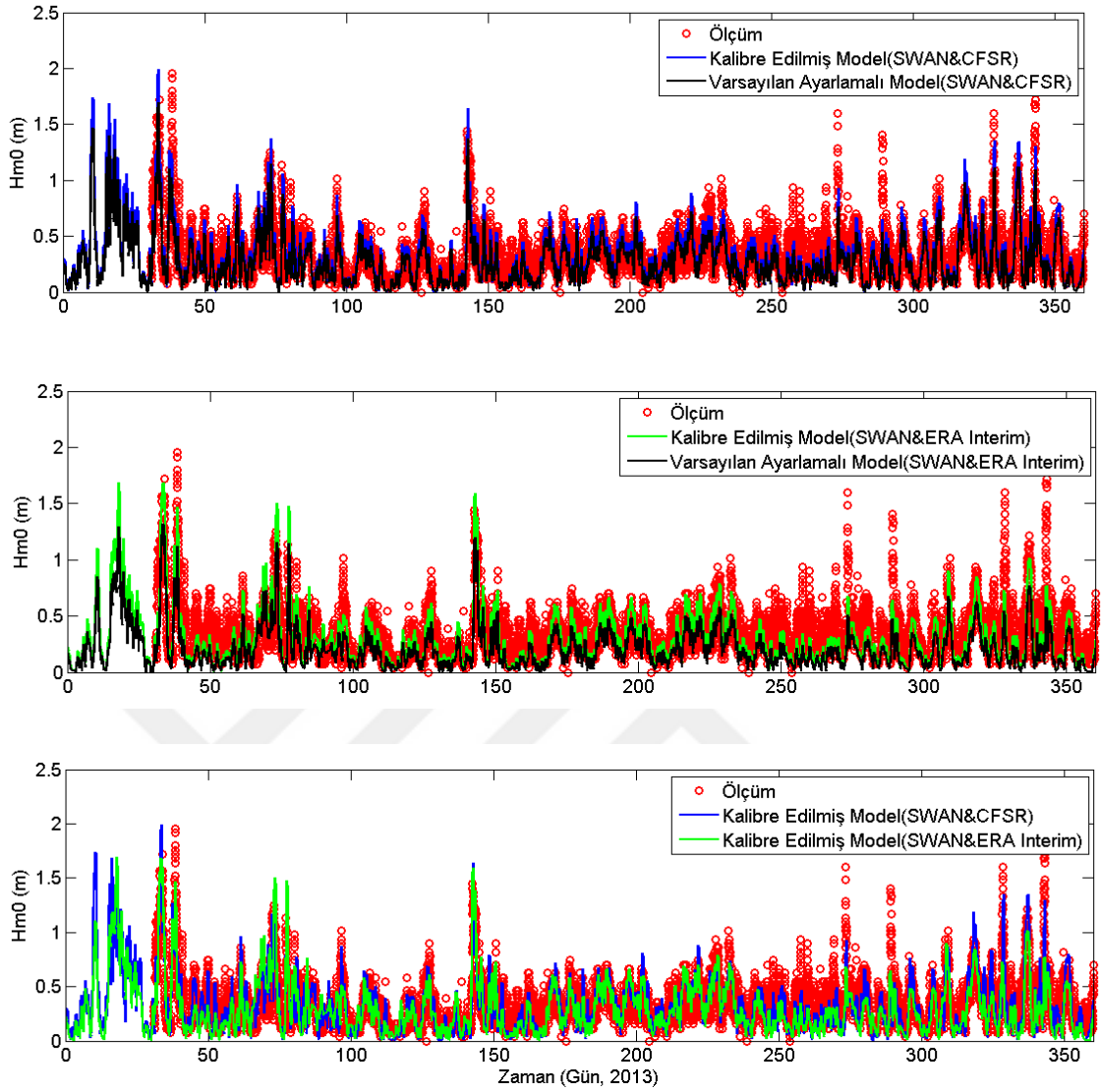
Köpüklenme parametresinin ayarlanmasından sonra, modelin performansının gerçekten iyileşip iyileşmediğini görmek için SWAN modelin varsayılan ayarlamalı (rüzgar kaynaklı dalga üretmesi ve köpüklenme için Komen ve ark. (1994) formülasyonu,  $C_{ds}=2,36e-5$  ve üçlü dalga dalga etkileşimleri pasif) simülasyonları her iki rüzgar için de yürütülmüş ve sonuçlar yukarıda belirlenen en iyi performansa sahip model sonuçları ile kıyaslanmıştır. En iyi tahmin modelleri ile varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarının ölçümlere kıyasla hata parametrelerinin özeti Çizelge 4.8’te verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** CFSR ve ERA Interim en iyi model sonuçları ve varsayılan ayarlamalı model sonuçlarının Silivri dalga yüksekliği ölçüm verileri ile eş zamanlı analiz sonuçları

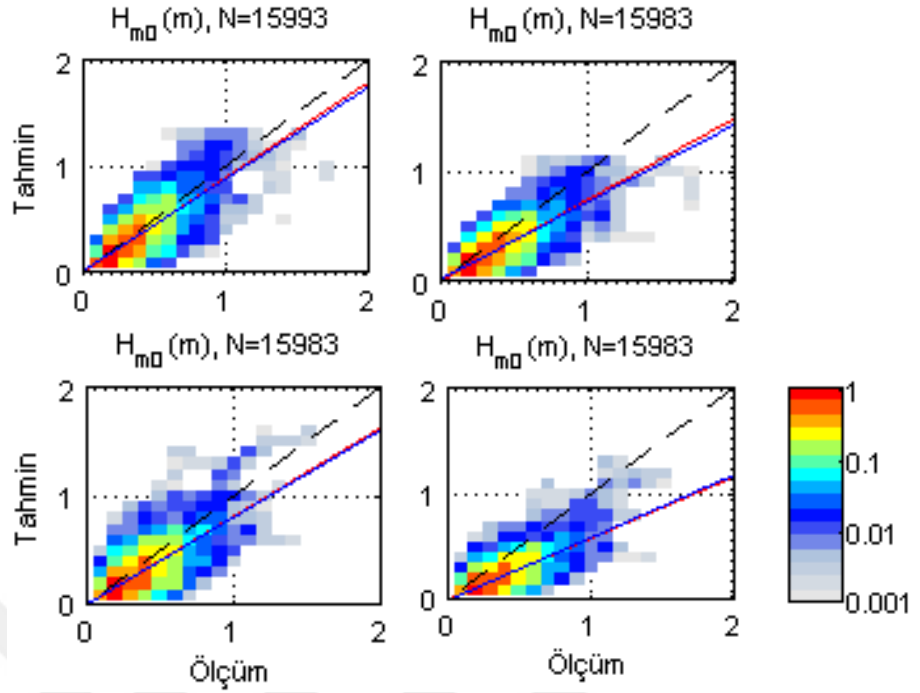
SWAN Model Sonuçları $H_{m0}$ (m)				
Silivri (2013 Yılı Verileri)				
Hata parametresi	CFSR &En İyi Model	CFSR &Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model	ERA Interim & En İyi Model	ERA Interim & Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model
MAE (m)	0,12	0,12	0,13	0,16
RMSE (m)	0,16	0,16	0,17	0,20
Bias (m)	0,03	0,08	0,06	0,14
SI	0,48	0,49	0,52	0,61
R	0,76	0,77	0,73	0,74
$Y_{ort}$ (m)	0,30	0,25	0,27	0,19
$X_{ort}$ (m)	0,33	0,33	0,33	0,33

Yukarıdaki çizelgede sunulan eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, saçılım indeksine göre CFSR rüzgar veri setlerini kullanan en iyi performansa sahip (kalibre edilmiş) SWAN modelin, varsayılan ayarlamalı SWAN modele göre %1 iyileşme gösterdiği, buna karşılık ERA Interim rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin varsayılan ayarlamalı SWAN modele kıyasla %9’luk bir gelişme gösterdiği gözlemlenmiştir. CFSR ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminlerinin Silivri şamandıra istasyonundaki 2013 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliğinin saçılım diyagramları ve zaman seri kıyaslamaları Şekil 4.7-4.8’de verilmiştir. Bütün bu sonuçlara dayanarak Marmara Denizi’nde yapılacak rüzgar-dalga modellemesi için CFSR rüzgar veri setlerini kullanmanın daha doğru sonuçlara ulaşılmasına katkı yapacağı sonucuna varılmaktadır.





**Şekil 4.7.** CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçüm istasyonu verilerine karşı zaman serileri kıyaslaması



**Şekil 4.8.** CFSR (üstte) ve ERA Interim (altta) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Silivri şamandıra istasyonundaki 2013 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliğinin saçılım diyagramları

#### 4.1.4. SWAN Modelin Doğrulanması

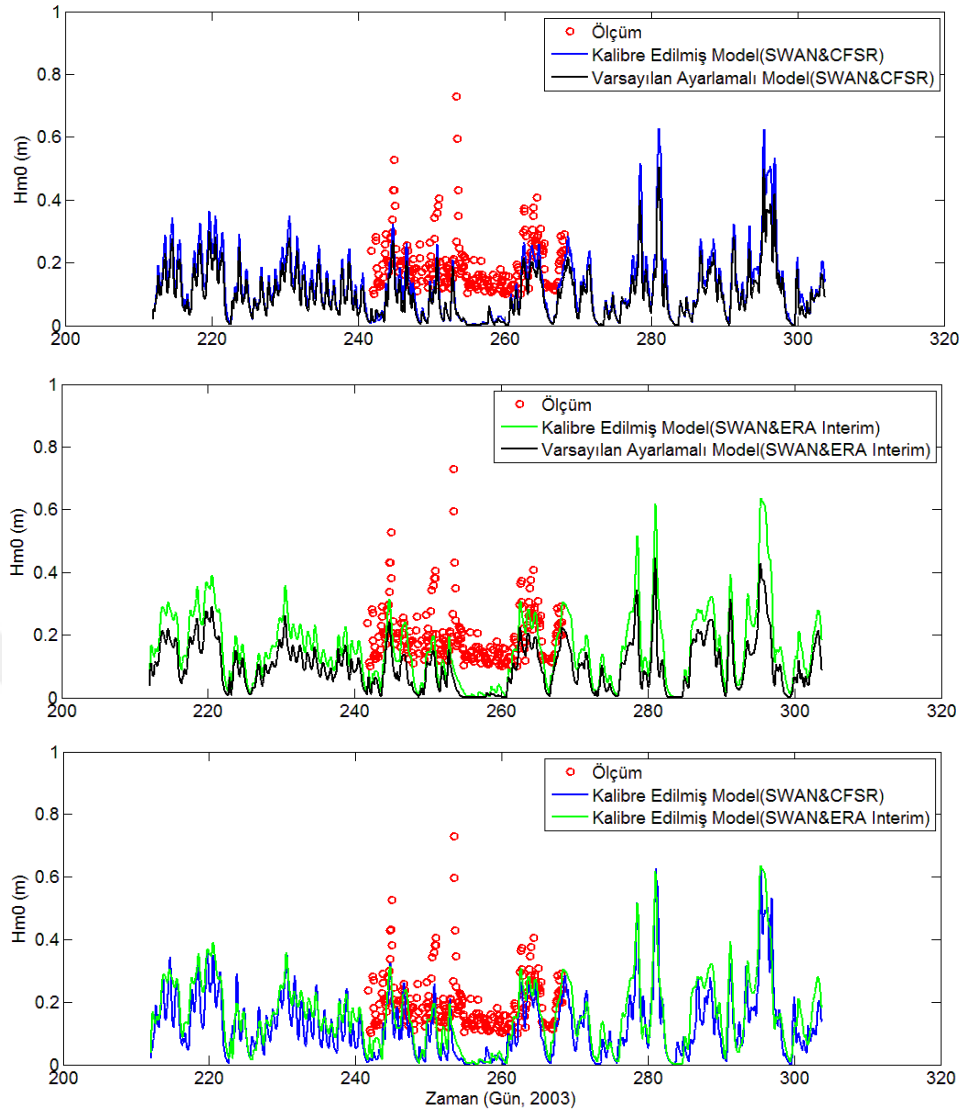
2013 yılı Silivri ölçüm istasyonu verileri ile kalibre edilerek elde edilen en iyi performansa sahip SWAN modellerin doğrulanması Marmara Denizi'nde 1990 yılında ölçülmüş olan Marmara Ereğli istasyonu verileri ile 2003 yılında ölçülmüş olan Ambarlı istasyonu verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ERA Interim ve CFSR rüzgar alanlarının 1990 ve 2003 yılı rüzgar verilerini girdi olarak kullanan SWAN model simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar da SWAN modellerin fiziksel süreçleri için tanımlanan formülasyonlar ve bu formülasyonlardaki ayarlanabilir parametreler ile sayısal ayarlamadaki parametreler hem kalibre edilmiş model ayarlamaları ve hem de varsayılan model ayarlamaları için ayrı ayrı yürütülmüştür. Böylece, her iki veri seti için 1990 ve 2003 yılı verileri ile kalibre edilmiş model ve varsayılan ayarlamalı model olmak üzere toplamda 8 adet simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda modellerin doğrulanması için, 1990 yılı için yürütülen SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği verileri ( $H_{m0}$ ) Marmara Ereğli ölçümleri ile eş zamanlı olarak analiz edilirken, 2003 yılı için

yürütülen SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği verileri ( $H_{m0}$ ) ise Ambarlı ölçümleri ile eş zamanlı olarak analiz edilmiştir. 2003 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN model sonuçlarının ( $H_{m0}$ ) eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata parametreleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** 2003 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin ( $H_{m0}$ ) Ambarlı ölçümleri ile eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata istatistikleri

		SWAN Model Sonuçları $H_{m0}$ (m)			
		Ambarlı (2003 Yılı Verileri)			
Hata parametresi		CFSR & Kalibre Edilmiş Model	CFSR & Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model	ERA Interim & Kalibre Edilmiş Model	ERA Interim & Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model
MAE (m)		0,11	0,12	0,09	0,12
RMSE (m)		0,13	0,14	0,12	0,14
Bias (m)		0,11	0,12	0,08	0,12
SI		0,67	0,72	0,59	0,72
R		0,55	0,55	0,53	0,53
$Y_{ort}$ (m)		0,09	0,08	0,12	0,08
$X_{ort}$ (m)		0,20	0,20	0,20	0,20

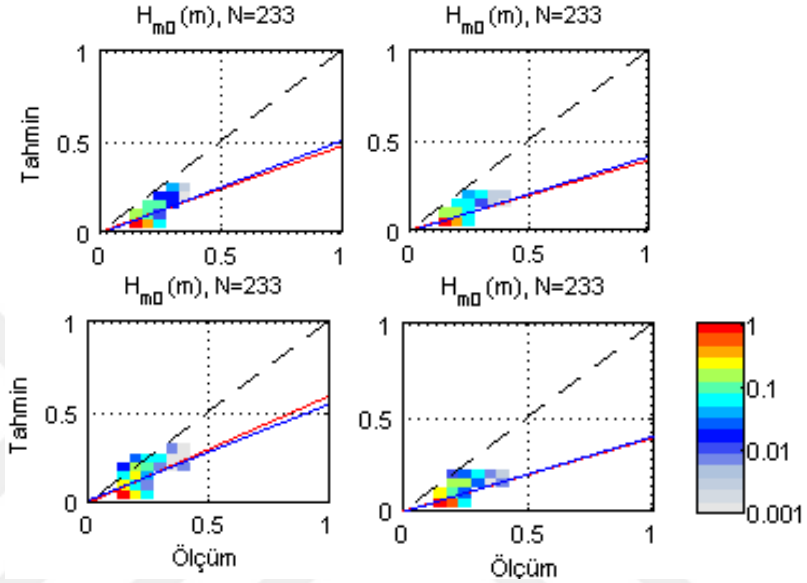
Çizelge 4.9’da verilen hata istatistikleri irdelendiğinde, saçılım indeksine göre CFSR rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin, varsayılan ayarlamalı SWAN modele göre %5 iyileşme gösterdiği, buna karşılık ERA Interim rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin varsayılan ayarlamalı SWAN modele kıyasla %13’lük bir gelişme gösterdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ERA Interim rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı model sonuçlarının ( $SI=59$ ) CFSR rüzgarını kullanan kalibre edilmiş model sonuçlarına ( $SI=67$ ) göre daha doğru tahminlere sahip olduğu anlaşılmıştır. CFSR ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminlerinin Ambarlı şamandıra istasyonundaki 2003 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliğinin zaman serileri ve saçılım diyagramları Şekil 4.9 ve 4.10’de verilmiştir.



**Şekil 4.9.** CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Ambarlı ölçüm istasyonu verilerine karşın zaman serileri kıyaslaması

Şekil 4.9'da verilen zaman serileri, Şekil 4.10'da verilen saçılım diyagramları ve yukarıda verilen hata istatistiği sonuçları irdelendiğinde, Ambarlı istasyonu verileri ile elde edilen sonuçlar ile kalibrasyon sürecinde varılan sonuçların (Marmara Denizi'nde bir rüzgar-dalga modellemesi yapmak için CFSR rüzgar veri setlerini kullanmanın daha doğru tahminler yapılmasına katkı yapacağı) örtüşmediği tespit edilmiştir. Ambarlı ölçüm istasyonunda 2003 yılında kaydedilmiş belirgin dalga yüksekliği verileri,

Saraçoğlu (2011) tarafından gerçekleştirilen Marmara Denizi'ne ait dalga iklimi konulu tez kapsamında da kullanılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında Marmara Denizi'nde geliştirilen model tahminlerinin Ambarlı ölçümleri ile yeterince uyumlu olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ölçüm verilerinin yetersiz olduğu, sakin bir dönemi yansıttığı ve oldukça küçük değerlere sahip olduğu belirtilmiştir.



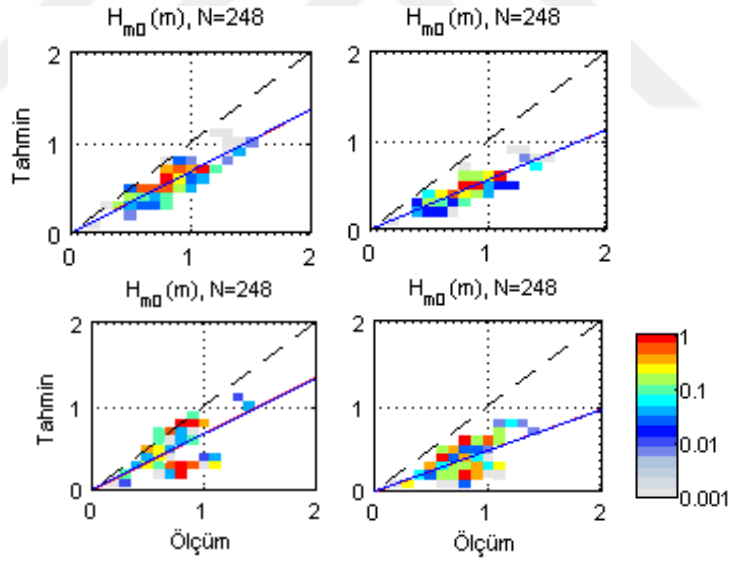
**Şekil 4.10.** ERA Interim (altta) ve CFSR (üstte) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Ambarlı ölçüm istasyonundaki 2003 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliklerinin saçılım diyagramları

1990 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN model sonuçlarının eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata parametreleri Çizelge 4.10'de verilmiştir. Bu eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, saçılım indeksine göre CFSR rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin, varsayılan ayarlamalı SWAN modele göre %6 iyileşme gösterdiği, buna karşılık ERA Interim rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin varsayılan ayarlamalı SWAN modele kıyasla %14'lük bir gelişme gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, SI değerine göre ERA Interim veri setlerini kullanan kalibre edilmiş modelin CFSR veri setlerini kullanan kalibre edilmiş modele göre daha fazla gelişme göstermesine karşın, CFSR rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı model sonuçlarının (SI=%43) ERA Interim rüzgarını kullanan kalibre edilmiş model sonuçlarına (SI=%44) göre daha doğru tahminlere sahip olduğu anlaşılmıştır.

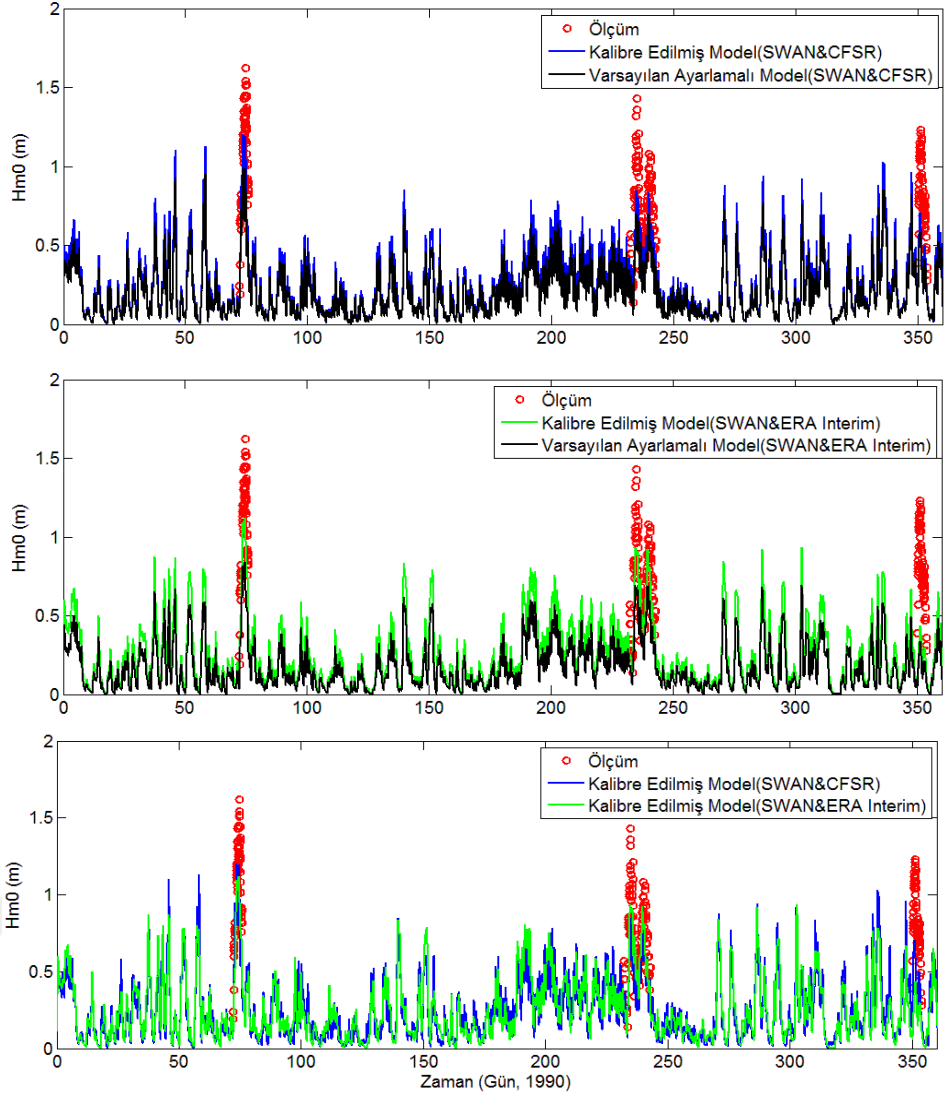
**Çizelge 4.10.** 1990 yılı rüzgar verilerini kullanan SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Ereğli ölçümleri ile eş zamanlı analizleri sonucu elde edilen hata istatistikleri

SWAN Model Sonuçları $H_{m0}$ (m)				
Marmara Ereğli (1990 Yılı Verileri)				
Hata Parametreleri	CFRS & Kalibre Edilmiş Model	CFRS & Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model	ERA Interim & Kalibre Edilmiş Model	ERA Interim & Varsayılan Ayarlamalı SWAN Model
MAE (m)	0,31	0,36	0,28	0,43
RMSE (m)	0,35	0,41	0,37	0,48
Bias (m)	0,31	0,36	0,27	0,43
SI	0,43	0,49	0,44	0,58
R	0,81	0,80	0,65	0,65
$Y_{ort}$ (m)	0,52	0,46	0,56	0,40
$X_{ort}$ (m)	0,83	0,83	0,83	0,83

Her iki rüzgar veri setinin 1990 yılı verilerini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modeller ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Ereğli ölçümlerine karşı oluşturulan saçılım diyagramları ve zaman serileri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



**Şekil 4.11.** ERA Interim (altta) ve CFRS (üstte) rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş (solda) ve varsayılan ayarlamalı (sağda) SWAN model tahminlerinin Marmara Ereğli Ölçüm İstasyonundaki 1990 yılı ölçümlerine karşı belirgin dalga yüksekliklerinin saçılım diyagramları



**Şekil 4.12.** CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (üstte), ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model tahminleri (ortada) ve CFSR rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tahminleri (altta) ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Ereğli ölçüm istasyonu verilerine karşın zaman serileri kıyaslaması

Burada, ERA Interim rüzgar veri setlerini kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin varsayılan ayarlamalı SWAN modele kıyasla daha fazla gelişme göstermesine karşın hata değerleri, saçılım indeksi ve zaman serileri birlikte incelendiğinde, CFSR rüzgar veri setlerini kullanmanın daha doğru sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacağı sonucuna varılmaktadır.

#### **4.1.5. SWAN Modelde Duyarlılık Analizi**

Bu bölümde, modelin fiziksel sürecinde bulunan köpüklenme formülasyonu ve köpüklenme parametresi ile kalibre edilmiş SWAN modellerin, modelin fiziksel ve sayısal ayarlamalarında bulunan diğer parametrelere karşı duyarlılıkları incelenmiştir. Bu bağlamda, bu çalışmanın ikinci bölümünde ifade edilen SWAN modelin kapsadığı her bir fiziksel süreç için mevcut formülasyonların hangisinin çalışılan bölgenin dalga karakteristiklerini tahmin etmede daha iyi olduğu, bu süreçlerin formülasyonlarındaki ayarlanabilir parametrelerin model performansına etkisi ve SWAN modelin sayısal ayarlamasındaki bazı parametrelerin model performansına etkileri ayrı ayrı araştırılmıştır. Her bir etki araştırılırken her iki rüzgar için yukarıda belirlenen kalibre edilmiş SWAN model ayarlamalarındaki bütün parametreler aynı kabul edilmiş, yalnızca irdelenen süreç veya parametre değiştirilerek swn dosyaları düzenlenmiş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını girdi olarak kullanan SWAN model tahminleri ile elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile Silivri ölçümleri eş zamanlı olarak analiz edilmiş ve her bir parametrenin veya süreçteki formülasyonların model performansına nasıl etki ettiği ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca, küresel olarak üretilmiş re-analiz veri setlerinden Marmara Denizi için ayıklanmış rüzgar hızı alanlarının çalışma bölgesinin küçük bir havza olmasından dolayı düşük tahmin edilebileceği düşüncesi ile bu rüzgar hızlarının daha yüksek olması durumunda tahminlerin iyileşebileceği öngörülmüştür. Bu durumu irdeleyebilmek için, mevcut rüzgar alanları sabit bir katsayı ile çarpılarak yükseltilmiş ve bu şekilde üretilen yeni rüzgar alanları SWAN modele girdi olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucunda, Silivri istasyonu için üretilen belirgin dalga yüksekliklerinin ölçümlerle eş zamanlı hata analizleri gerçekleştirilmiş ve rüzgarların sabit bir katsayı ile yükseltilmesi sonucunda model performansının iyileşip iyileşmediği irdelenmiştir.

#### **Sayısal Ayarlamadaki Parametrelerin Model Performansına Etkisi**

SWAN modelde bulunan sayısal ayarlamadaki hesaplamanın zaman aralığı, hesaplamalı karelajın çözünürlüğü, frekans aralığı ve frekans çözünürlüğü gibi parametrelerin model performansına etkisinin araştırılması amacıyla kalibre edilmiş model ayarlamaları



kullanılmış ve bu parametrelerin modelde kapsanan varsayılan değerleri değiştirilerek elde edilen sonuçlar ayrı ayrı irdelenmiştir. Bunun için, diğer bütün ayarlamalar aynı tutulmuş yalnızca irdelenen parametre değeri değiştirilerek oluşturulan swn dosyaları ile SWAN model simülasyonları yürütülmüştür. Sonuçta, Silivri istasyonu için üretilen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile ölçümlerin eş zamanlı analizleri sonucunda hata parametreleri belirlenmiş ve model performansının iyileşip iyileşmediği irdelenmiştir.

Sayısal ayarlamadaki parametrelerin model performansına etkisinin araştırılması için ilk olarak SWAN modelin hesaplamalı karelajının çözünürlüğü irdelenmiştir. Hesap karelajının çözünürlüğünün tahminlere etkisinin araştırılması için her iki rüzgarı girdi olarak kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modelde hesap karelajının çözünürlüğü x ve y yönlerinde eşit  $0,0066^\circ$ ,  $0,0044^\circ$ ,  $0,0033^\circ$  ve 1 km olacak şekilde 4 farklı durumda ayarlanarak swn dosyaları ayrı ayrı oluşturulmuş ve bu dört farklı ayarlama için simülasyonlar yürütülmüştür. Hesaplamalı karelajın çözünürlüğü her iki yönde eşit olacak şekilde  $0,0066^\circ$  olarak ayarlanması durumunda hesap alanı x ve y yönlerinde sırasıyla 500 x 135,  $0,0044^\circ$  olarak ayarlanması durumunda 750 x 203,  $0,0033^\circ$  olarak ayarlanması durumunda 1000 x 270 ve 1 km olarak ayarlanması durumunda ise 275 x 103 karelej noktası ile sınırlanmaktadır. Her iki rüzgar ile kalibre edilmiş ayarlamalı ve farklı hesaplamalı karelej çözünürlükleri ile yürütülen SWAN model simülasyonlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri sonuçları ile Silivri ölçüm verileri eş zamanlı olarak analiz edilerek hata parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, hesaplamalı karelej çözünürlüklerinin değiştirilmesi ile model performanslarında herhangi bir değişikliğin oluşmadığı görülmüştür.

Sayısal ayarlamadaki parametrelerin model performansına etkisinin olup olmadığının araştırılması için irdelenen diğer parametre frekans aralığıdır. SWAN modelde frekans aralığının 0,04 Hz ile 1 Hz arasında kullanılması önerilmektedir (SWAN, 2014). Farklı frekans aralıklarının model performansına etkisinin bulunup bulunmadığının araştırılması için her iki rüzgarı kullanan kalibre edilmiş SWAN modelde frekans aralığı 0,04 Hz - 1 Hz, 0,01 Hz - 1 Hz ve 0,04 Hz - 1,2 Hz arasında olacak şekilde swn dosyaları 3 farklı durum için oluşturulmuştur. Bu farklı frekans aralıkları için

oluşturulan SWAN model simülasyonları yürütülmüş ve elde edilen belirgin dalga yüksekliği tahminleri ile Silivri ölçümlerinin eş zamanlı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, her iki rüzgarı girdi olarak kullanan SWAN model içinde frekans aralığının değiştirilmesi ile model performanslarının değişmediği belirlenmiştir.

Sayısal ayarlamadaki parametrelerin model performansına etkisinin araştırıldığı diğer bir parametre ise frekans çözünürlüğüdür. Frekans çözünürlüğünün model performanslarına etkisinin araştırılması için frekans çözünürlüğü her iki rüzgarı girdi olarak kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modellerde 18, 24, 35 ve 36 olarak ayrı ayrı girilerek modellerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda her iki rüzgarı kullanan SWAN modeller için tahmin edilen belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı olarak analizleri yapılmıştır. Elde edilen eş zamanlı analiz sonuçlarına bakıldığında, frekans çözünürlüklerinin değiştirilmesi ile her iki rüzgarı kullanan SWAN modellerin performanslarında değişimin olmadığı görülmüştür.

Sayısal ayarlamadaki parametrelerin model performansına etkisinin araştırılması için son olarak hesaplamamanın zaman aralığının etkisi araştırılmıştır. Hesaplamanın zaman aralığının (time step) daha düşük bir çözünürlükte yürütülmesinin model performansına etkisinin araştırılması amacıyla hesap aralığı 30 dakika, 20 dakika, 15 dakika, 10 dakika ve 5 dakika olarak ayarlanan SWAN model simülasyonları her iki rüzgar verisi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucu elde edilen SWAN model sonuçları ile tahmin edilen belirgin dalga yüksekliği ile Silivri ölçümlerinin eş zamanlı olarak analizleri gerçekleştirilmiştir ve Çizelge 4.11'de sunulmuştur. Eşzamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, saçılım indeksine göre CFSR rüzgarını kullanan ve hesaplama zaman aralığı 20 dakika olarak ayarlanan modelde, 30 dakika olarak ayarlanan modele göre %1'lik bir iyileşmenin olduğu; 15 dakika, 10 dakika ve 5 dakika olarak ayarlanan modellerin performanslarında ise daha fazla gelişme olmadığı gözlemlenmiştir. ERA Interim rüzgarını kullanan SWAN model sonuçları incelendiğinde ise saçılım indeksine göre hesaplama zaman aralığı 30 dakikadan daha düşük seçilmesinin model

performansında herhangi bir iyileşmeye (daha düşük hata ve daha yüksek korelasyon) neden olmadığı görülmüştür.

**Çizelge 4.11.** CFSR ve ERA Interim rüzgarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve farklı hesaplama zaman aralıklı SWAN modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı analiz sonuçları

Silivri Ölçüm İstasyonu 2013 Yılı Verileri İle ( $H_{m0}$ )										
	CFSR SWAN Model Sonuçları					ERA Interim SWAN Model Sonuçları				
Zaman Aralığı	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI
30 dk	0,76	0,03	0,16	0,12	0,48	0,73	0,06	0,17	0,13	0,52
20 dk	0,78	0,03	0,16	0,12	0,47	0,73	0,06	0,17	0,13	0,52
15 dk	0,78	0,02	0,16	0,11	0,47	0,73	0,06	0,17	0,13	0,53
10 dk	0,79	0,02	0,15	0,11	0,47	0,73	0,06	0,17	0,13	0,53
5 dk	0,79	0,02	0,15	0,11	0,47	0,74	0,06	0,17	0,13	0,53

SWAN modellerde hesaplamının zaman aralığı düşürüldükçe çözünürlük artmakta ancak zaman aralığı düşürüldükçe daha fazla veri ile işlem yapılacağından dolayı simülasyonların tamamlanma süreleri uzamaktadır. Bundan dolayı, bu tez çalışması kapsamında yapılacak 31 yıllık uzun dönemli analizlerin daha hızlı gerçekleştirilebilmesi için her iki rüzgar veri setlerini kullanan SWAN modellerde hesaplamının zaman aralığı 30 dakika olarak seçilmiştir.

### **Fiziksel Süreçler İçin Tanımlanan Formülasyonların ve Bu Formülasyonlardaki Ayarlanabilir Parametrelerin Model Performansına Etkisi**

Bu bölümde, SWAN modelin fiziksel sürecinde mevcut olan köpüklenme dışındaki diğer formülasyonların hangisinin çalışılan bölgenin dalga karakteristiklerini tahmin etmede daha iyi olduğu ve bu süreçlerin formülasyonlarındaki ayarlanabilir parametrelerin model performansına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, SWAN modelin fiziksel sürecinde bulunan taban sürtünmesi ve üçlü dalga-dalga etkileşimi süreçleri irdelenmiştir. Bunun için, diğer bütün ayarlamalar aynı tutularak yalnızca irdelenen parametre değeri değiştirilerek oluşturulan swn dosyaları ile SWAN model simülasyonları yürütülmüştür. SWAN modelde taban sürtünmesi süreci için üç farklı formülasyon tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki, Hasselmann ve ark. (1973)'nın

JONSWAP formülasyonudur. Bu modelin varsayılan ayarlarında kabarmış deniz durumu için sürtünme katsayısı  $C_{fjon} = 0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  olarak tanımlanmaktadır. Taban sürtünmesi sürecinde bulunan diğer bir formülasyon, Collins (1972) tarafından tanımlanmıştır. Bu modelin varsayılan ayarlamalarında sürtünme katsayısı  $C_{fw} = 0,015$  olarak kullanılmaktadır. Taban sürtünmesi sürecini ifade eden diğer formülasyon ise Madsen ve ark. (1988) tarafından tanımlanmıştır. Madsen formülasyonunun varsayılan ayarlamalarında sürtünme katsayısı  $kn = 0,05$  olarak tanımlanmaktadır. Taban sürtünmesinin model performansına etkisinin araştırılması amacıyla her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş SWAN model ayarlamalarında sadece taban sürtünme formülasyonu değiştirilerek swn dosyaları hazırlanmış ve simülasyonlar yürütülmüştür. Simülasyonlar sonucu elde edilen belirgin dalga yüksekliği tahminleri ile Silivri ölçümlerinin eş zamanlı analizleri yapılarak hata parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde modelin fiziksel sürecinde bulunan taban sürtünmesi için denenen farklı formülasyonlar sonucu model performansında herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür.

Modelin fiziksel sürecinde bulunan formülasyonların model performansına etkilerinin araştırılması için irdelenen bir diğer süreç ise üçlü dalga-dalga etkileşimidir. SWAN varsayılan ayarlamalarında üçlü dalga-dalga etkileşimi hesaba katılmamaktadır. Üçlü dalga-dalga etkileşiminin SWAN modelde tanımlanması ise çok sığ sularda Eldeberky ve Battjes (1995) yaklaşımı kullanarak yapılmaktadır. Bu sürecin model performansına etkisinin araştırılması için üçlü dalga-dalga etkileşimi aktif ve pasif olacak şekilde model simülasyonları her iki rüzgar için kalibre edilen SWAN model ayarlamaları kullanılarak yürütülmüştür. Simülasyonlar sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği tahminlerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı olarak analizler yapılmış ve eş zamanlı analizler sonucunda hata parametreleri elde edilmiştir. Bu hata parametreleri incelendiğinde, üçlü dalga-dalga etkileşiminin aktif veya pasif olması durumunda model performansında herhangi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir.

## Artırılmış Rüzgarların Model Performansına Etkisi

Bu bölümde, SWAN modeller de girdi olarak kullanılan rüzgar hızlarının sabit bir katsayı ile çarpılarak artırılması durumunda model performanslarının nasıl etkileneceği araştırılmıştır. Bu çalışmanın 3'üncü bölümünde ayrıntılı bir şekilde anlatılan CFSR ve ERA Interim rüzgar veri setleri, küresel olarak üretilmiş veri setlerinden Marmara Denizi'ni kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Marmara Denizi'nin kapsandığı çalışma bölgesinin küçük bir havza olması dolayısıyla rüzgar verilerinin düşük tahmin edilebileceği bu nedenle bu rüzgar hızlarının daha yüksek olması durumunda tahminlerin iyileşebileceği öngörülmüştür. Bunun irdelenebilmesi için bütün Marmara Denizi'ni kaplayan her iki rüzgar alanları %5, %10, %15 ve %20 büyütülmüş ve elde edilen yeni rüzgar alanları kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modellerde girdi olarak kullanılarak simülasyonlar yürütülmüştür. Simülasyonlar sonucu elde edilen belirgin dalga yüksekliği tahminleri Silivri ölçümleri ile eş zamanlı olarak analiz edilerek hata parametreleri elde edilmiş ve Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.12.** CFSR ve ERA Interim rüzgarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve girdi olarak kullanılan her iki rüzgar veri setinin değerleri belli oranda artırılarak ayarlanmış SWAN tahmin modeller ile tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin Silivri ölçümleri ile eş zamanlı analiz sonuçları

Silivri Ölçüm İstasyonu 2013 Yılı Verileri İle ( $H_{m0}$ )										
	CFSR SWAN Model Sonuçları					ERA Interim SWAN Model Sonuçları				
Rüzgar Girdisini Arttırma Oranı	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI
%0	0,76	0,03	0,16	0,12	0,48	0,73	0,06	0,17	0,13	0,52
%5	0,77	0,00	0,17	0,12	0,50	0,73	0,03	0,17	0,13	0,53
%10	0,77	-0,02	0,18	0,13	0,55	0,73	0,01	0,18	0,13	0,55
%15	0,77	-0,05	0,20	0,14	0,60	0,73	-0,02	0,19	0,14	0,59
%20	0,77	-0,08	0,22	0,16	0,67	0,73	-0,04	0,21	0,15	0,64

Bu eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde, CFSR rüzgar veri setleri için rüzgar hızı artırıldığında bütün hata parametrelerine göre tahminlerin kötüleştiği, ERA Interim veri seti için oluşturulan eş zamanlı analiz sonuçları incelendiğinde ise Bias değerine göre tahminlerin iyileştiği ancak SI değerine bakıldığında rüzgar hızları artırıldıkça

tahminlerin kötüleştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kullanılan rüzgar alanlarında herhangi bir düzeltme yapılmamış ve doğrudan orijinal rüzgar alanları kullanılarak simülasyonlar yürütülmüştür.

#### 4.1.6. Farklı Dalga Yükseklik Aralıklarında Modellerin Performansı

Bu bölümde, kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modellerinin farklı yükseklikteki dalgaları tahmin etme performansı irdelenmiştir. Bu amaçla, Silivri ölçüm istasyonu verileri ile zamansal olarak karşılaştırılmış olan varsayılan ayarlamalı ve kalibre edilmiş ayarlamalı model sonuçları kullanılmıştır. Bunun için önce, Silivri ölçüm istasyonunda kaydedilmiş belirgin dalga yükseklikleri dört farklı aralıkta ( $0 \leq H_{m0} < 0,5$  m;  $0,5 \text{ m} \leq H_{m0} < 1$  m;  $1 \text{ m} \leq H_{m0} < 1,5$  m ve  $1,5 \leq H_{m0}$  olacak şekilde) filtrelenmiştir. Böylece, belirlenen dalga yüksekliği aralıklarındaki ölçüm verilerine karşılık zamansal olarak karşılaştırılmış SWAN tahmin model sonuçları da elde edilmiştir. Daha sonra, her bir yükseklik aralığı için eş zamanlı analizler ayrı ayrı yapılarak hata parametreleri elde edilmiştir. Bu dört farklı dalga yüksekliği için elde edilen hata değerleri Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Bu eş zamanlı analiz sonuçları göre, SI değerine göre 0,5 m'den düşük dalga yüksekliklerini CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN modelin daha iyi tahmin ettiği görülmüştür. 0,5 m ile 1 m arasındaki dalgaları ise CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin daha iyi tahmin ettiği anlaşılmıştır. 1 m ile 1,5 m arasındaki dalgaların eş zamanlı analizlerine bakıldığında, SI ve RMSE değerleri dikkate alındığında her iki rüzgar için de kalibre edilmiş SWAN modellerin dalgaları daha iyi tahmin ettiği, MAE değerine bakıldığında ise en iyi tahmini CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin verdiği, ancak Bias değeri dikkate alındığında ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin en iyi tahmini yaptığı belirlenmiştir. 1,5 m ve daha büyük dalgaların eş zamanlı analizlerinden elde edilen hata parametrelerine göre ise, en iyi tahminleri ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının verdiği gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.13.** Farklı dalga yüksekliği aralıklarında SWAN tahmin model sonuçlarının Silivri istasyonu ölçümlerine karşı eş zamanlı hata analiz sonuçları

Dalga Yüksekliği Aralığı	SWAN Model	N	R	Bias (m)	RMSE (m)	MAE (m)	SI
$H_{m0} < 0,5$ m	CFSR Kalibre Edilmiş Model	13 330	0,67	0,04	0,12	0,10	0,48
	CFSR Varsayılan Ayarlamalı Model	13 330	0,67	0,06	0,12	0,09	0,46
	ERA Interim Kalibre Edilmiş Model	13 330	0,55	0,07	0,15	0,12	0,57
	ERA Interim Varsayılan Ayarlamalı Model	13 330	0,56	0,11	0,15	0,13	0,59
$0,5 \text{ m} \leq H_{m0} < 1,0$ m	CFSR Kalibre Edilmiş Model	2 411	0,48	0,11	0,23	0,18	0,37
	CFSR Varsayılan Ayarlamalı Model	2 411	0,48	0,17	0,25	0,20	0,39
	ERA Interim Kalibre Edilmiş Model	2 411	0,48	0,15	0,28	0,22	0,44
	ERA Interim Varsayılan Ayarlamalı Model	2 411	0,48	0,27	0,32	0,29	0,51
$1,0 \text{ m} \leq H_{m0} < 1,5$ m	CFSR Kalibre Edilmiş Model	217	0,07	0,22	0,44	0,36	0,38
	CFSR Varsayılan Ayarlamalı Model	217	0,06	0,32	0,47	0,39	0,40
	ERA Interim Kalibre Edilmiş Model	217	0,15	0,11	0,44	0,38	0,38
	ERA Interim Varsayılan Ayarlamalı Model	217	0,13	0,37	0,50	0,42	0,43
$1,5 \leq H_{m0}$	CFSR Kalibre Edilmiş Model	30	-0,19	0,76	0,80	0,76	0,47
	CFSR Varsayılan Ayarlamalı Model	30	-0,22	0,86	0,89	0,86	0,53
	ERA Interim Kalibre Edilmiş Model	30	-0,18	0,58	0,70	0,59	0,42
	ERA Interim Varsayılan Ayarlamalı Model	30	-0,15	0,85	0,91	0,85	0,53

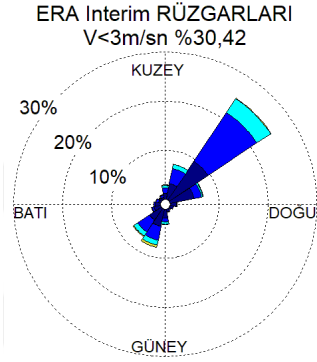
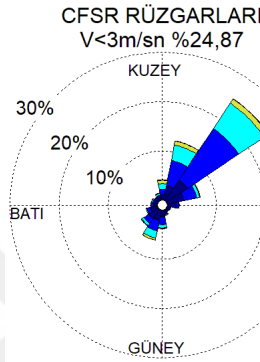
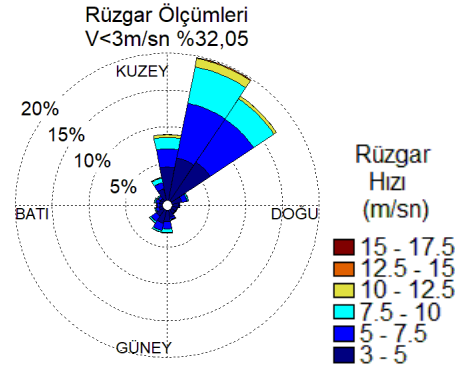
#### 4.1.7 Geliştirilen Modellerin Yönsel Performansları

Bu bölümde, geliştirilmiş olan modellerin yönsel performanslarını irdelemek için, ölçüm verileri ve SWAN tahmin modeli verileri kullanılarak rüzgar ve dalga gülleri oluşturulmuştur. Rüzgar güllerinin oluşturulabilmesi için her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN tahmin modelinin sonuçlarından Silivri koordinatlarında elde edilen rüzgar hızı bileşenleri kullanılarak bu çalışmanın üçüncü bölümünde anlatıldığı gibi bileşke rüzgar hızı ve rüzgar yönleri elde edilmiştir. Böylece, bu hız bileşeni ve yönleri kullanılarak SWAN modeller için rüzgar gülleri elde edilmiştir. Dalga gülleri ise, her iki rüzgar verisini kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modelinin sonuçlarından Silivri ölçüm istasyonu için elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve bunlara ait yönler kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçta, tahmin verileri kullanılarak elde edilen güller, Silivri istasyonunda ölçülmüş rüzgar ve dalga gülleri ile kıyaslanmıştır.

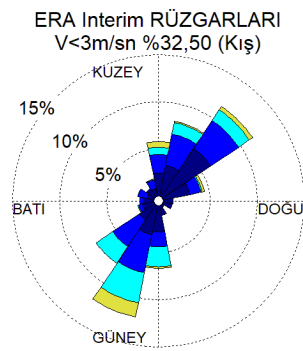
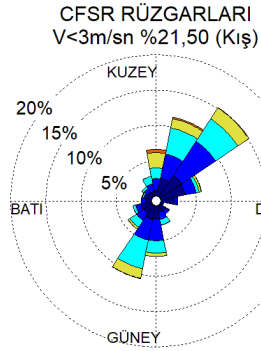
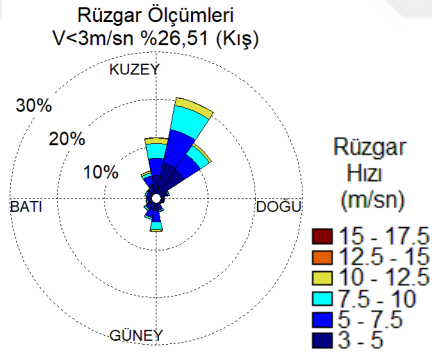
#### Rüzgar Gülleri

Bütün 2013 yılı ölçüm ve tahmin verilerinden Silivri istasyonu için elde edilen rüzgar gülleri Şekil 4.13'te sunulmuştur. Bu güllere göre; rüzgar ölçümleri ile oluşturulan güllerde frekans bakımından hakim yönün kuzey-doğu olduğu, aynı zamanda fırtınalarında kuzey-doğu yönlerinden geldiği görülmektedir. CFSR rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında hem frekans olarak hakim yönlerin hem de fırtınaların ölçümlerle örtüştüğü tespit edilmiştir. ERA Interim rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında ise frekans olarak hakim yönün ölçümlerle örtüştüğü, ancak fırtınaların iyi bir şekilde tahmin edilemediği görülmüştür. Hem rüzgar ölçümleri hem de model sonuçları ile elde edilen rüzgar güllerine göre, ikincil yön güney-batı olmaktadır. Ayrıca, sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının ( $V < 3$  m/s) bütün veri içindeki oranları ölçüm verilerinde %32,05 iken CFSR verilerinde %24,87 ve ERA Interim verilerinde ise %30,42'dir. Burada ayrıca, farklı dönemlerdeki rüzgar güllerinin performanslarının irdelenebilmesi için mevsimsel güller de oluşturulmuş ve Şekil 4.14-4.17'de sunulmuştur.



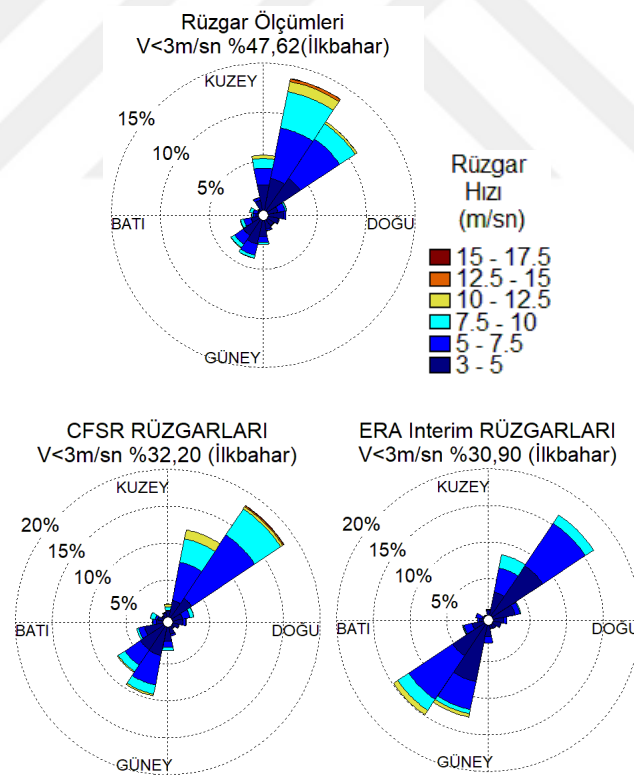


Şekil 4.13. Silivri istasyonu için ölçülmüş rüzgar gülleri ve CFSR ve ERA Interim rüzgar hızlarından türetilen rüzgar gülleri (bütün veri için)



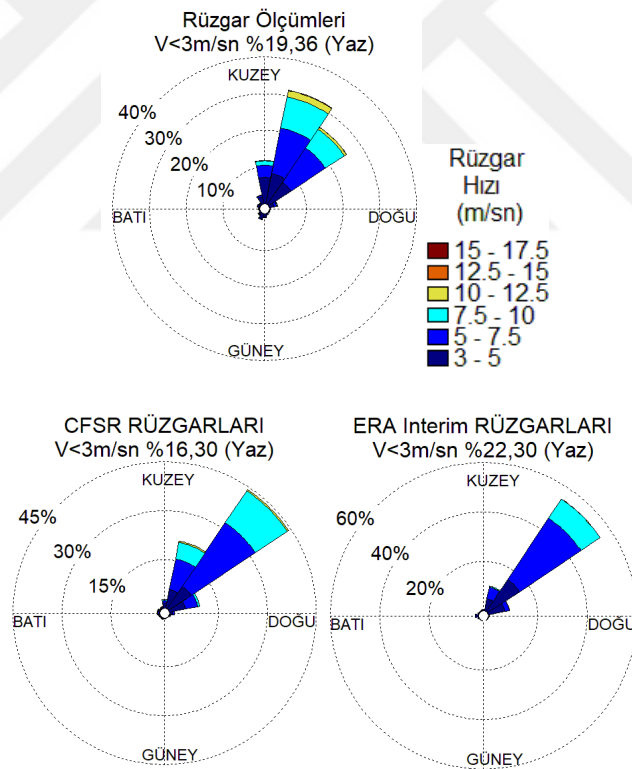
Şekil 4.14. Silivri istasyonunda kış mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri

Kış mevsimi verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülleri incelendiğinde; rüzgar ölçümleri ile oluşturulan güllerde frekans bakımından hakim yönlerin kuzey-doğu, ikincil yönün ise güney olduğu, bununla beraber fırtınaların kuzey, kuzey-doğu ve güney yönlerinden geldiği görülmektedir. CFSR rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında, frekans bakımından hakim yönlerin ve fırtınaların ölçümlerle örtüşmekte olduğu görülmekte olup ikincil yönün 22,5° lik bir sapma yaparak güney-batı yönlü tahmin edildiği anlaşılmaktadır. ERA Interim rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında, frekans olarak hakim yönün ölçümlerle örtüşmediği ve güney-batı olduğu, kuzey ve kuzey-doğu yönlü fırtınaların yakalandığı ancak güney yönlü fırtınaların tahmin edilemediği görülmüştür. Sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının bütün veriler içindeki oranlarına bakıldığında, ölçüm verilerinin %26,51'inin, CFSR verilerinin %21,50'sinin ve ERA Interim verilerinin ise %32,50'sinin sakin dönemi yansıttığı görülmektedir.



**Şekil 4.15.** Silivri istasyonunda ilkbahar mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri

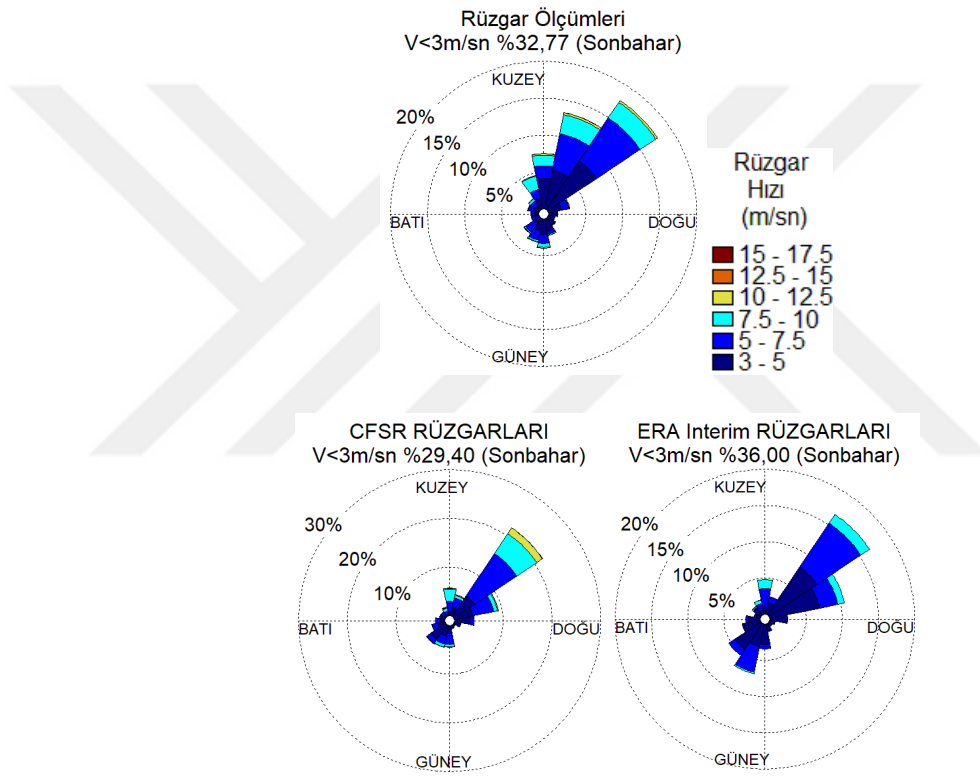
İlkbahar mevsimi verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülleri incelendiğinde; rüzgar ölçümleri ile oluşturulan güllerde frekans bakımından hakim yönlerin kuzey-doğu olduğu, ikincil yönün ise güney-batı olduğu görülmüştür. Fırtınaların ise kuzey-doğu yönlerinden geldiği gözlemlenmektedir. CFSR rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında, frekans bakımından hakim ve ikincil yönlerin ve fırtınaların ölçümlerle örtüştüğü görülmektedir. ERA Interim rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında ise, hem hakim yönlerin hem de fırtınaların ölçümlerle uyumlu bir şekilde tahmin edilemediği görülmüştür. ERA Interim rüzgarlarında frekans bakımından hakim yönün güney batı olduğu ve fırtınaların da bu yönden geldiği gözlemlenmiştir. Sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının bütün veriler içindeki oranlarına bakıldığında, ölçüm verilerinin %47,62'sinin, CFSR verilerinin %32,20'sinin ve ERA Interim verilerinin ise %30,90'mın sakin dönemi yansıttığı görülmektedir.



**Şekil 4.16.** Silivri istasyonunda yaz mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri

Yaz mevsimi verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülleri incelendiğinde (Şekil 4.16); rüzgar ölçümleri ile oluşturulan güllerde frekans bakımından hakim yönlerin kuzey-

doğu olduğu, aynı zamanda fırtınalarında bu yönlerden geldiği görülmektedir. CFSR rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında, frekans bakımından hakim yönlerin ve fırtınaların yönlerinin ölçümlerle örtüştüğü görülmektedir. ERA Interim rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerine bakıldığında ise, frekans olarak hakim yönün ölçümlerle örtüştüğü, ancak fırtınaların tahmin edilemediği görülmektedir. Sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının bütün veriler içindeki oranlarına bakıldığında, ölçüm verilerinin %19,36'sının, CFSR verilerinin %16,30'unun ve ERA Interim verilerinin ise %22,30'unun sakın dönemi yansıttığı görülmektedir.



**Şekil 4.17.** Silivri istasyonunda sonbahar mevsimi için ölçülmüş ve CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile oluşturulan rüzgar gülleri

Son olarak sonbahar mevsimi verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülleri incelendiğinde (Şekil 4.17); rüzgar ölçümleri ile oluşturulan güllerde frekans bakımından hakim yönün kuzey-doğu, ikincil yönün ise güney olduğu, bununla birlikte fırtınaların kuzey-doğu yönünden geldiği gözlemlenmiştir. CFSR rüzgarları ile üretilen rüzgar güllerinin, frekans bakımından hakim ve ikincil yönleri yakaladığı ve ayrıca fırtınaların yönlerini de doğru olarak tahmin ettiği anlaşılmıştır. ERA Interim rüzgarları

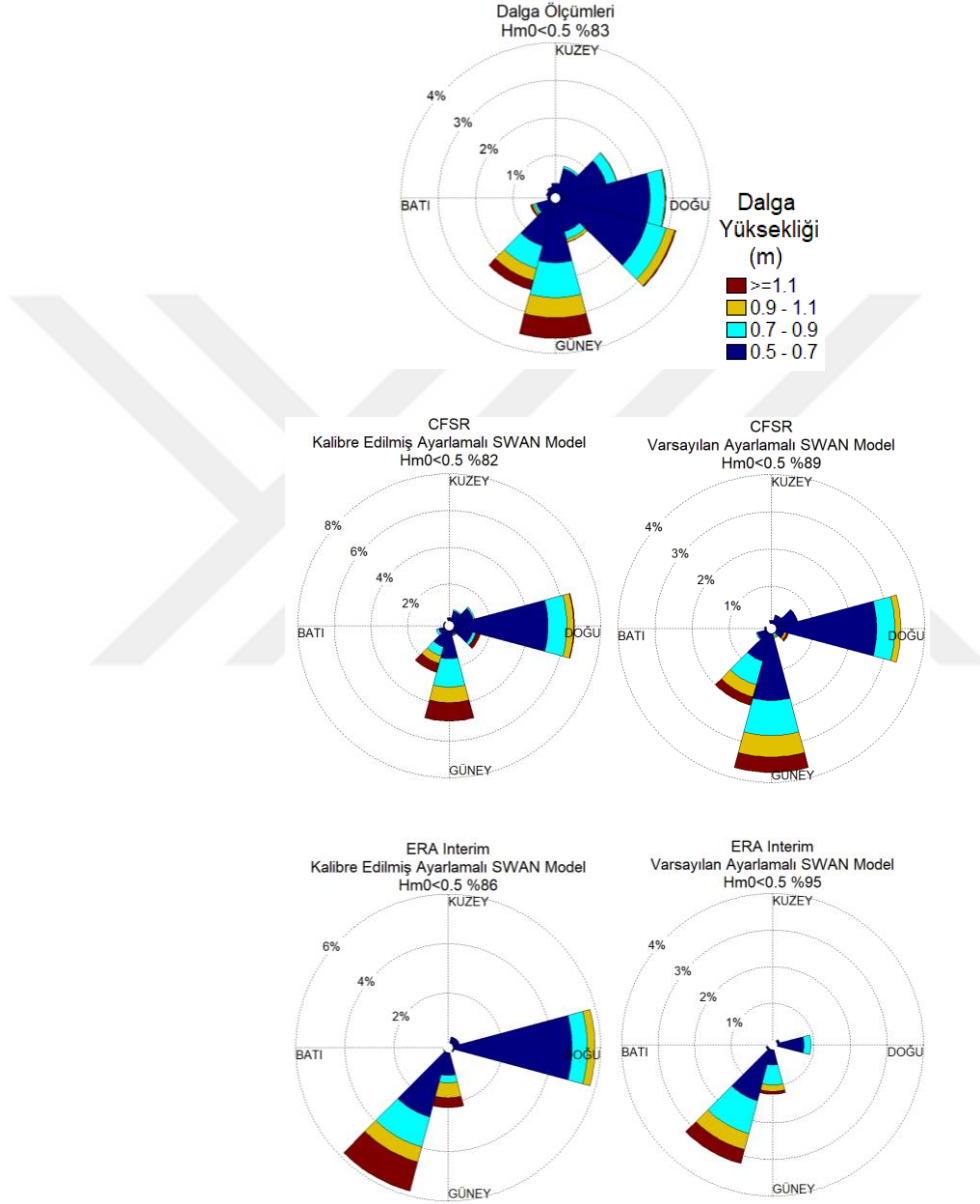
ile üretilen rüzgar güllerinde ise frekans olarak hakim yönün yakaladığı, ancak fırtınaların yönlerinin tahmin edilemediği görülmüştür. Ayrıca, ikincil yönün 22,5° lik bir sapma ile güney-batı olarak tahmin edildiği görülmüştür. Sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının bütün veriler içindeki oranları ölçüm verileri, CFSR ve ERA Interim rüzgarları için sırasıyla yaklaşık %33, %30 ve %36 olduğu belirlenmiştir.

Bütün rüzgar gülleri birlikte değerlendirildiğinde, CFSR rüzgarlarının hakim yönleri ve fırtınaların yönlerini ERA Interim rüzgarlarına kıyasla daha iyi tahmin ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, sakin dönemi yansıtan rüzgar hızlarının bütün veri içerisindeki oranları açısından CFSR rüzgarlarının ERA Interim rüzgarlarına göre ölçüm verilerine daha yakın tahminler yaptığı gözlemlenmiştir.

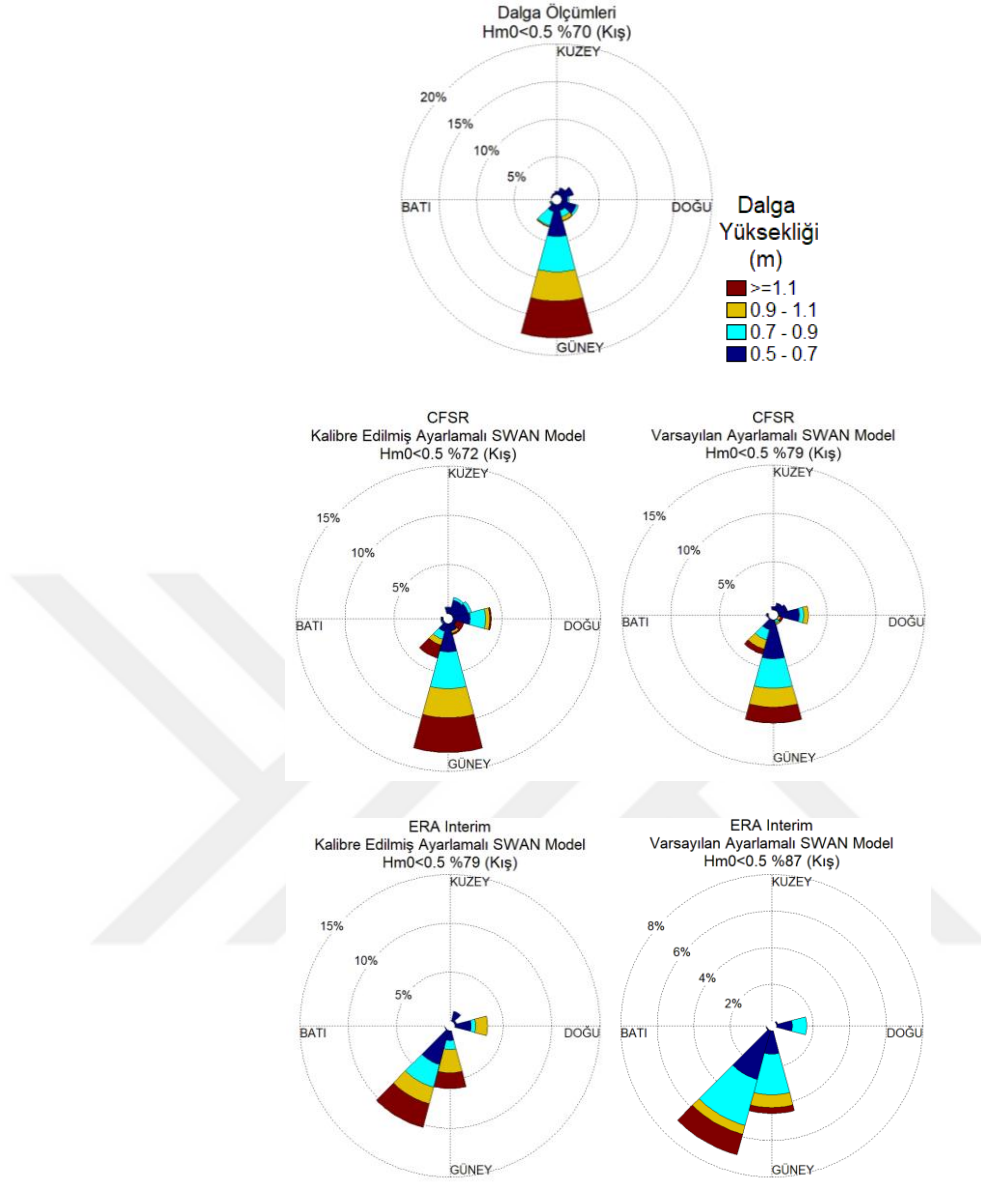
### **Dalga Gülleri**

Dalga gülleri, ölçülmüş olan ve model sonuçlarından üretilen bütün yılın (2013) verileri ve bütün yıl verisinden ayıklanan mevsimlik veriler kullanılarak ayrı ayrı oluşturulmuştur. Hem bütün yıl için hem de mevsimsel olarak elde edilen dalga gülleri Şekil 4.18-4.22'de sunulmuştur. Dalga ölçümleri için bütün veriler dikkate alınarak oluşturulan dalga gülleri incelendiğinde (Şekil 4.18, 1. satır, 1. sütun), sakin dönemi yansıtan dalgaların oranının %83 olduğu, bununla beraber frekans olarak hakim dalgaların güney-doğu yönünden geldiği ikincil hakim yönün ise güney-batı olduğu görülmektedir. Ayrıca, güney, güney-batı ve güney-doğu yönlerinden 1,1 m'den daha büyük dalgaların geldiği de gözlemlenmektedir. Her iki rüzgar verisini kullanan her iki ayarlamalı SWAN model sonuçları ile üretilen dalga güllerine göre, bütün modellerin güney-batı yönlü frekans olarak ikincil hakim yönlü dalgaları doğru tahmin edebildiği ancak güney-doğu yönlü hakim dalgaları 22,5° lik sapma ile doğu yönlü olarak tahmin ettiği görülmektedir. Ayrıca, bütün SWAN modeller ile güney ve güney-batı yönlerinden gelen şiddetli dalgalarda tahmin edilebilmiştir. Güney-doğu yönünden gelen şiddetli dalgalar ise sadece CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçları ile tahmin edilebilmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçları ile üretilen dalga güllerinde, sakin dönemi yansıtan dalgaların oranının %82 olduğu görülmektedir. Bu oran, diğer model sonuçlarına göre ölçümlerin oranına

en yakın sonuçları vermektedir. Diğer modellerde ise, sakin dönemi yansıtan dalga oranlarının ölçüm verilerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek oran (%95) ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı model sonuçlarından elde edilmiştir.



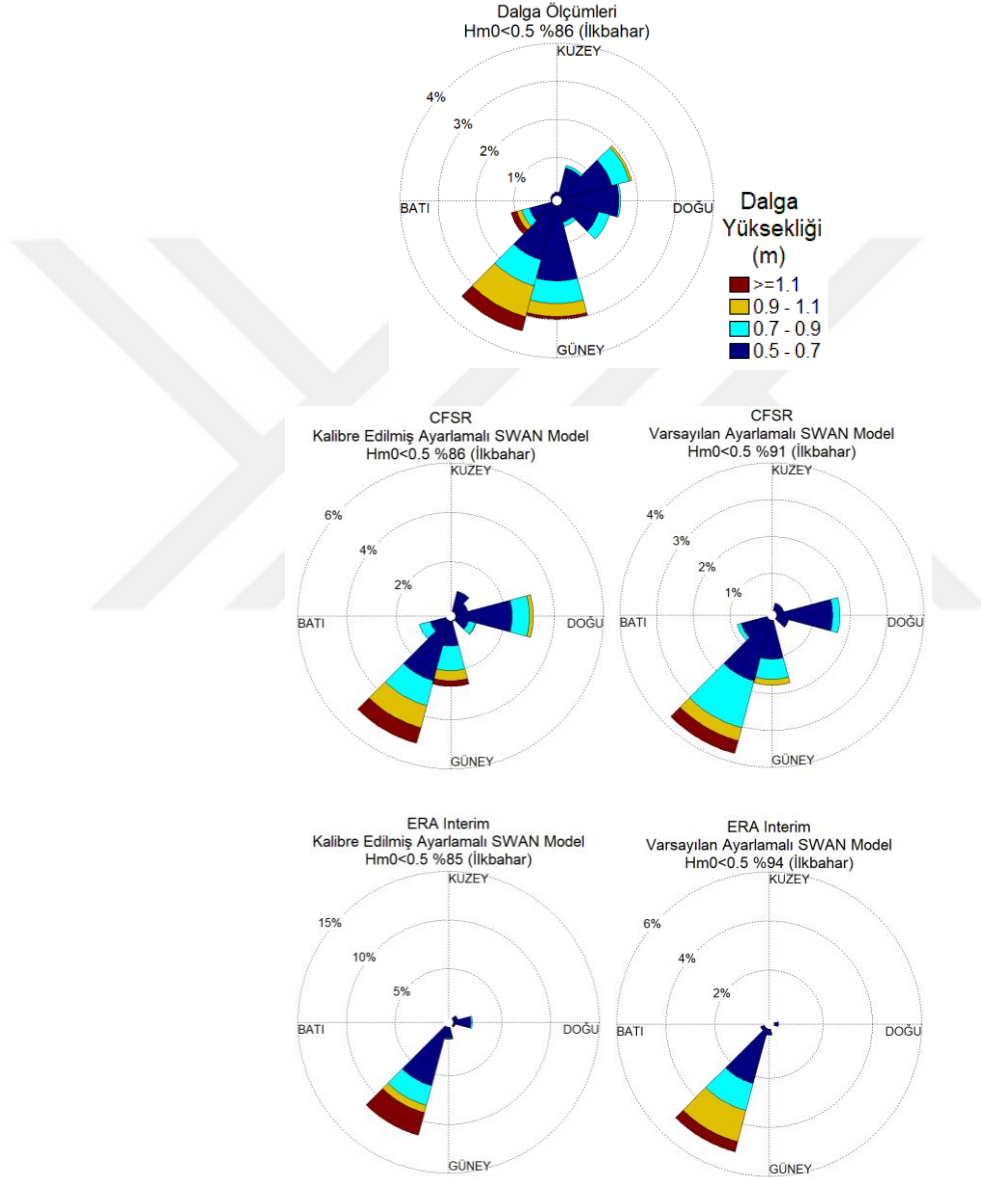
**Şekil 4.18.** Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (bütün veri için)



**Şekil 4.19.** Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (kış mevsimi için)

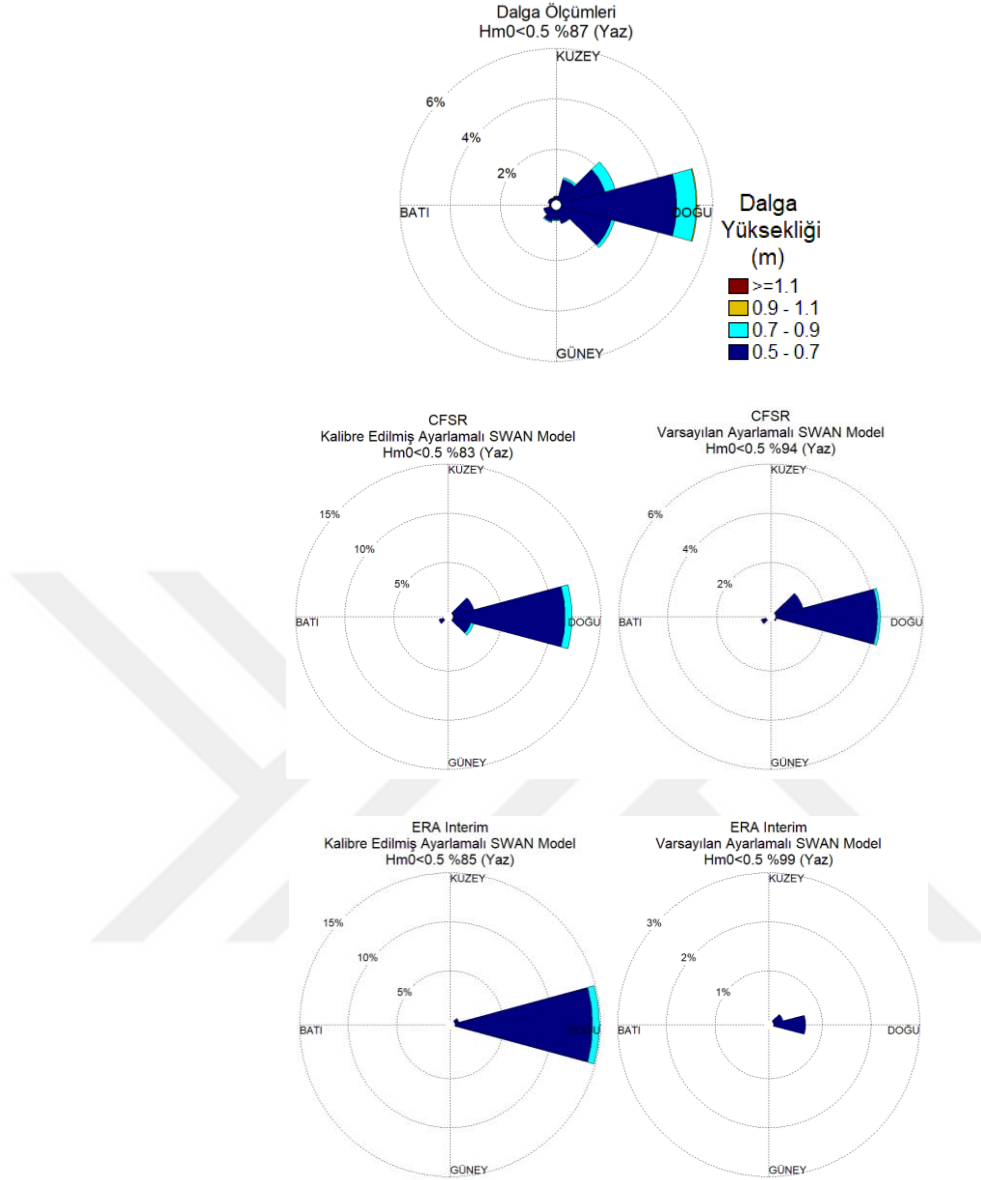
Dalgaların yönsel performanslarının mevsimsel olarak irdelenmesi amacıyla ilk olarak kış mevsimi verileri kullanılarak dalga gülleri oluşturulmuştur (Şekil 4.19). Burada, dalga ölçüm verileri ile oluşturulan güllerde sakin dönemi yansıtan dalgaların oranı %70'tir. Bu oran, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçları ile yaklaşık olarak yakalanmış (%72) ancak diğer modeller ile daha yüksek tahmin edilmiştir. Ölçüm verileri ile kış mevsimi için oluşturulan güllerde, frekans

olarak hakim yönün güney olduğu görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan her iki ayarlamalı SWAN model sonuçları ile oluşturulan dalga güllerin de frekans olarak hakim yönlerin yakalandığı ancak ERA Interim rüzgarlarını kullanan her iki ayarlamalı SWAN modeller ile frekans olarak hakim yönlerin 22,5° lik bir sapma yaparak güney-batı olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.20.** Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (İlkbahar mevsimi için)

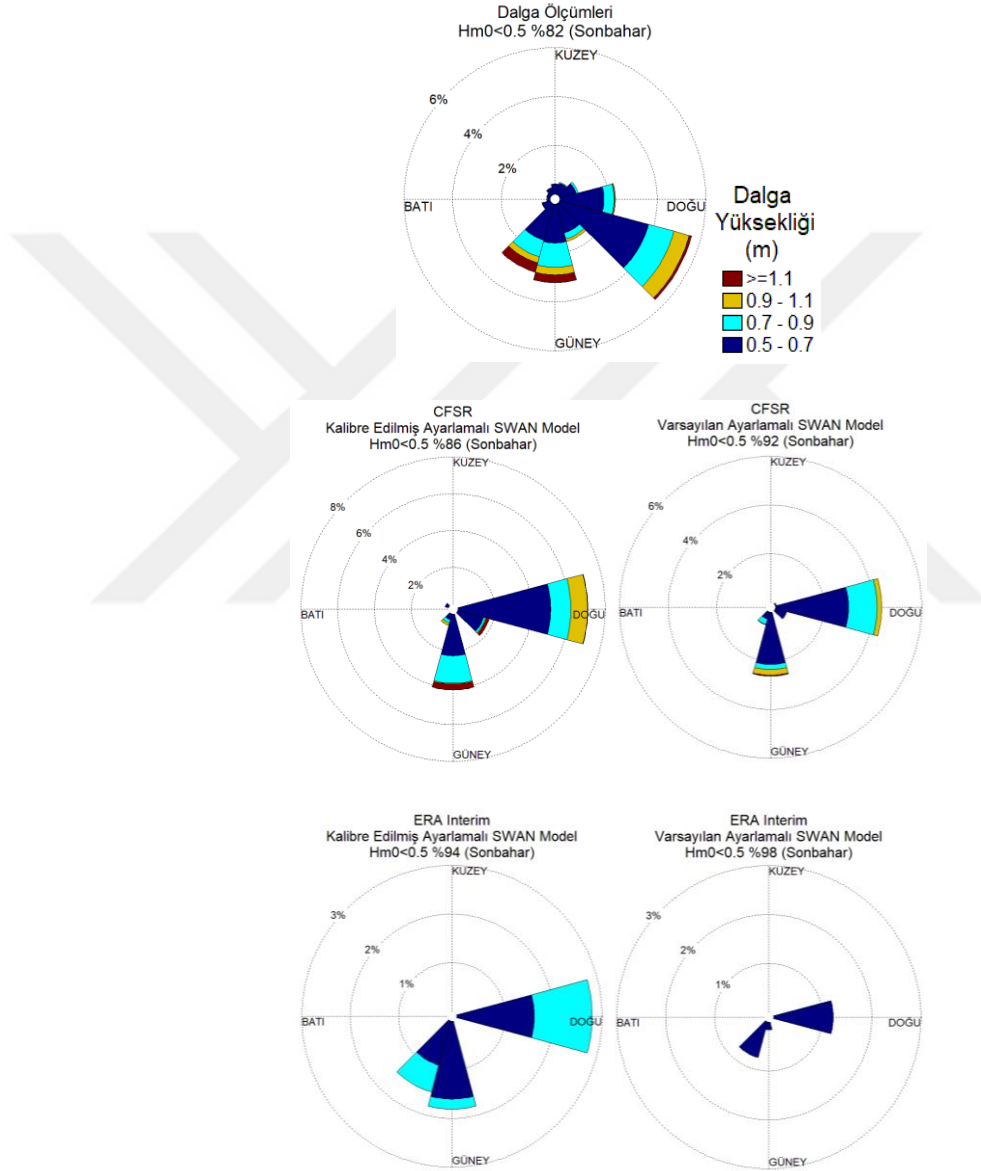




**Şekil 4.21.** Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (yaz mevsimi için)

İlkbahar mevsimi verileri kullanılarak oluşturulan dalga gülleri incelendiğinde (Şekil 4.20); dalga ölçümleri ile oluşturulan güllerde sakin dönemi yansıtan dalgaların oranının %86 olduğu, frekans olarak hakim dalgaların bölgeyi güney-batı yönünden zorladığı ve ikincil hakim yönün ise kuzey-doğu olduğu görülmektedir. CFSR rüzgarları ile kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçları ile sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içerisindeki payı ölçümlerin payı ile bire bir örtüşürken bu oran CFSR rüzgarlarını

kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarında %91, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modellerin sonuçlarında sırasıyla %85 ve %91 olarak belirlenmiştir. Bütün modellerde güney-batı yönlü frekans olarak hakim dalgalar tahmin edilebilirken ikincil hakim yön, hiçbir modelde ölçümlerinki ile uyumlu bir şekilde elde edilememiştir.



**Şekil 4.22.** Silivri istasyonunda ölçülmüş olan ve CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yükseklikleri ile oluşturulan dalga gülleri (sonbahar mevsimi için)

Yaz mevsimi verileri kullanılarak oluşturulan dalga gülleri incelendiğinde (Şekil 4.21); dalga ölçümleri ile oluşturulan güllerde sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içindeki oranının %87 olduğu ve frekans olarak hakim dalga yönünün doğu olduğu gözlemlenmektedir. CFSR rüzgarları ile kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modellerin sonuçları ile üretilen dalga güllerinde; sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içerisindeki oranlarının sırasıyla %83 ve %94 olduğu görülmektedir. ERA Interim rüzgarları ile kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarında ise sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içerisindeki oranının sırasıyla %85 ve %99 olduğu tespit edilmiştir. Sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içerisindeki oranlarına bakıldığında, ölçüm verileri ile en uyumlu sonuçların ERA Interim rüzgarları ile kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edildiği görülmektedir. Dalga ölçüm verisi ile yaz mevsimi için oluşturulan dalga güllerine bakıldığında 1,1 m ve üzerinde dalga ölçümünün bulunmadığı aynı şekilde bütün tahmin modellerinde de yaz mevsiminde 1,1 m ve üzeri dalgaların tahmin edilmediği tespit edilmiştir.

Dalgaların yönsel performanslarının mevsimsel olarak değerlendirilmesi için son olarak sonbahar mevsimi verileri kullanılarak oluşturulan dalga gülleri irdelenmiştir. Bu dalga güllerine göre, dalga ölçümlerinde sakin dönem %82 ile toplam içerisinde temsil edilirken, frekans olarak hakim dalgaların güney-doğu yönünden bölgeyi zorladığı ve ikincil hakim yönün de güney-batı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ölçümlerde 1,1 m ve üzeri büyüklükteki dalgaların güney ve güney-batı yönünden geldiği de gözlemlenmiştir. Tahmin model sonuçlarında ölçümlerin sahip olduğu sakin dönem oranına en yakın sonuca (%86) CFSR rüzgarları ile kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçları ile ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Diğer tahmin model sonuçlarında bu oran %90 değerinin üzerinde çıkmaktadır. ERA Interim rüzgarları ile kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen dalga güllerine göre frekans olarak hakim dalgalar bölgeyi güney-batı yönünden zorlarken diğer modellerde hakim dalgalar, dalga ölçümlerine göre 22.5°'lik bir sapma yaparak doğu yönünden gelmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan her iki ayarlamalı SWAN modelde de güney yönünden gelen 1,1 m ve daha büyük dalgalar tahmin edilebilirken ERA Interim

rüzgarlarını kullanan SWAN modellerde şiddetli dalgaların tahmin edilemediği görülmektedir.

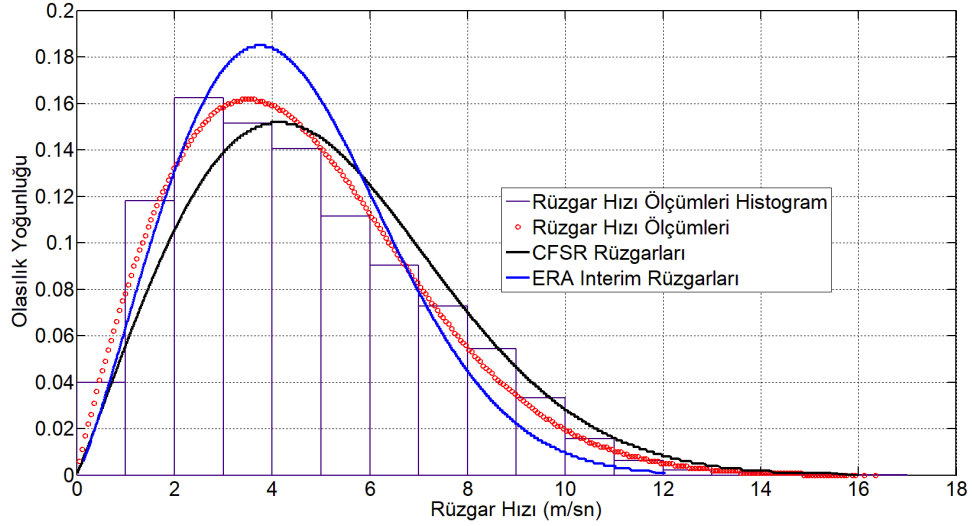
#### **4.1.8 Geliştirilen Modeller İçin Rüzgar Hızları ve Belirgin Dalga Yüksekliğinin Olasılık Dağılımlarının Kıyaslanması**

Geliştirilmiş olan modellerin performansları farklı rüzgar hızı ve dalga yüksekliklerinin oluşma olasılıklarını veren olasılık dağılım ve kümülatif dağılım grafikleri oluşturularak da irdelenmiştir. Burada, grafikler ölçüm verileri ile birlikte hem her iki rüzgar hızı verisi için hem de bu rüzgarlarla oluşturulan varsayılan ve kalibre edilmiş ayarlamalı modellerden üretilen dalga yükseklikleri için oluşturulmuştur. Böylece, ölçüm verileri kullanılarak oluşturulan dağılımlara, tahmin modellerinden hangisinin daha yakın bir eğilim gösterdiği tespit edilerek en iyi rüzgar verisi ve en iyi dalga tahmin modeli belirlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle ölçülmüş ve tahmin edilmiş rüzgar hızlarının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.23 ve 4.24'te sunulmuştur. Elde edilen bu dağılım grafiklerine göre; 2 m/s'den daha düşük rüzgarları ERA Interim veri setleri CFSR veri setlerine göre daha başarılı tahmin etmiştir. Bu hız aralığı CFSR rüzgarları tarafından daha düşük olasılıkta tahmin edilmiştir. ERA Interim rüzgarları 2 – 6 m/s arasındaki rüzgarları daha yüksek olasılıkta tahmin ederken CFSR rüzgarları bu aralıktaki rüzgarları da düşük olasılıkta tahmin etmiştir. Ancak, bu grafiklerdeki en önemli bulgu, ERA Interim rüzgarları şiddetli rüzgarları tahmin edemezken (maksimum 12 m/s) CFSR rüzgarlarının şiddetli rüzgarları (yaklaşık 16,3 m/s) iyi bir olasılıkta doğru tahmin ettiğiidir.

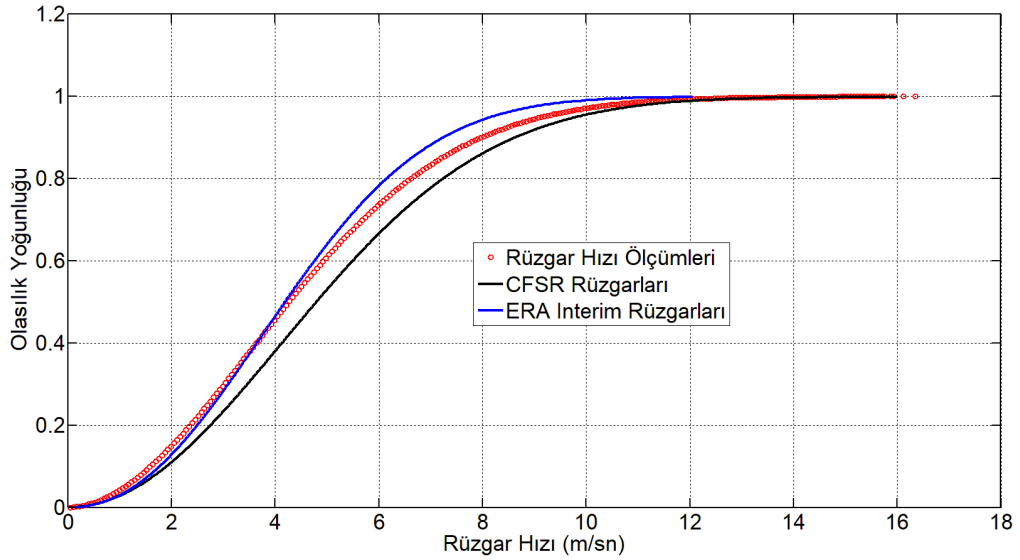
Burada, tahmini ve ölçülmüş belirgin dalga yüksekliklerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları ve kümülatif dağılım fonksiyonlarının grafikleri de oluşturulmuş ve Şekil 4.25 ve 4.26'da sunulmuştur.

Bu grafiklere göre, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model hariç diğer tahmin modellerinin 0,3 m'den küçük yükseklikteki dalgaları yüksek tahmin ettiği ve 0,3- 1 m aralığındaki dalgaları ise düşük tahmin ettiği görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçları ile ölçümlerin neredeyse

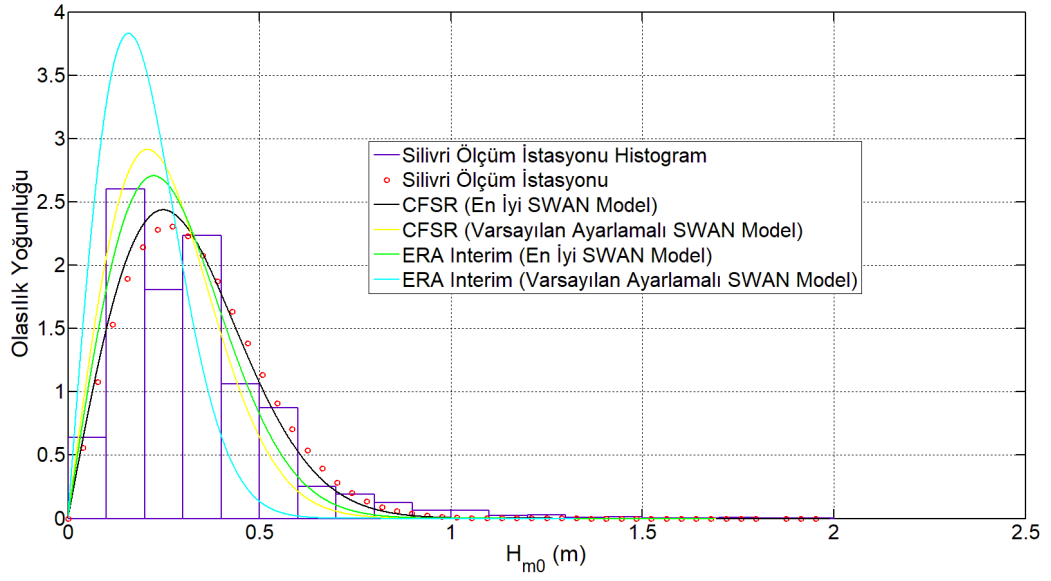
üst üste çakıştığı ve birbiri ile çok iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 4.25 ve 4.26'da görülebileceği gibi, 2 m yüksekliğinde gözlemlenen en büyük dalga yüksekliği değerleri yalnızca CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçları ile yakalanabilmiştir. Diğer model sonuçları büyük dalga yüksekliği değerlerini oldukça düşük tahmin etmiştir.



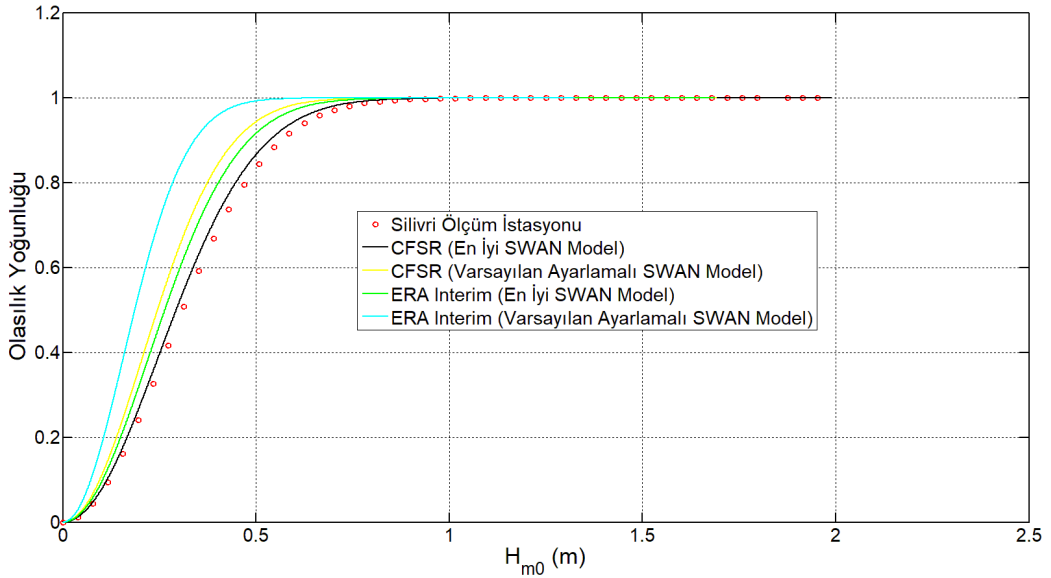
**Şekil 4.23.** Rüzgar ölçümleri ile CFSR ve ERA Interim rüzgar tahminleri olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği



**Şekil 4.24.** Rüzgar ölçümleri ile CFSR ve ERA Interim rüzgar tahminleri kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği



**Şekil 4.25.** Silivri ölçüm istasyonu ile CFSR ve ERA Interim tahmin veri setlerinin dalga yüksekliği olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği



**Şekil 4.26.** Silivri ölçüm istasyonu ile CFSR ve ERA Interim tahmin veri setlerinin dalga yüksekliği kümülatif dağılım fonksiyonu grafiği

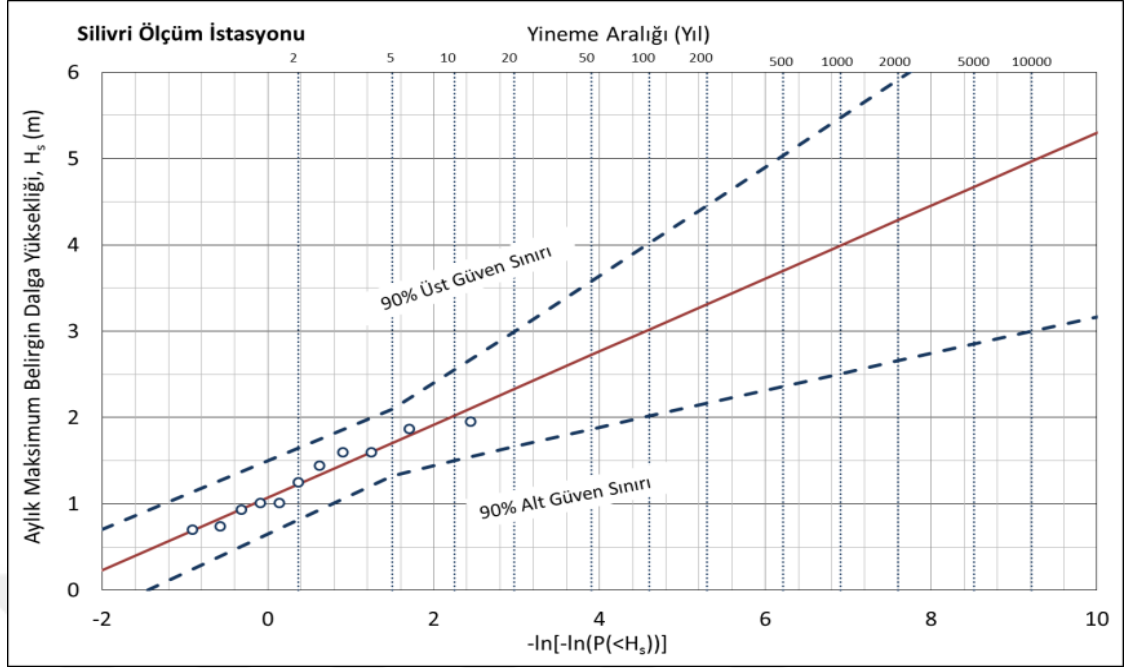
#### 4.1.9 Ekstrem Dalgaları Tahmin Edebilme Performansı

Her iki rüzgarı kullanan SWAN tahmin modellerinin farklı tekerrürlü ekstrem değerleri tahmin edebilme performansları da irdelenmiştir. Bu amaçla, ölçüm ve tahmin verilerinin 1 yıllık verilerinden elde edilen aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği

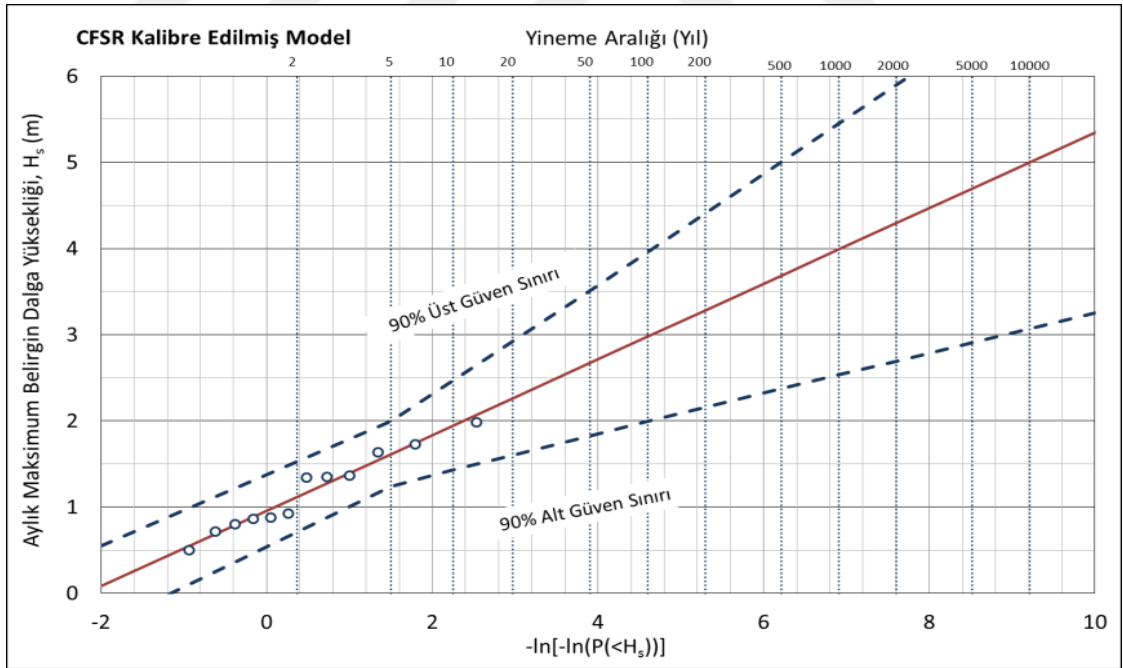
değerleri kullanılmıştır. Bu aylık maksimum değerlere Gumbel dağılımı uygulanarak farklı tekerrürlü ekstrem dalgaların tahmini için oluşturulan ekstrem değer istatistiği sonuçları Şekil 4.27- 4.31’de ve Çizelge 4.14’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre; ölçüm değerlerine en yakın sonuçları CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modelin verdiği buna karşılık diğer SWAN modellerin farklı tekerrürlü ekstrem dalgaları daha düşük yükseklikte tahmin ettiği görülmektedir. Örneğin; 100 yıl yineleme periyotlu ekstrem dalga yüksekliği değerleri ölçüm istasyonu verileri ve CFSR rüzgarları ile kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modelin sonuçları ile yaklaşık 3 m olarak tahmin edilirken, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçları ile yaklaşık 2,5 m, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modellerin sonuçları ile sırasıyla 2,8 m ve 2,2 m olarak tahmin edilmiştir.

**Çizelge 4.14.** Silivri istasyonu için ölçülmüş ve tahmin edilmiş maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak belirlenen farklı yineleme periyotlu ekstrem değer istatistiği

Yineleme Aralığı	Ölçüm İstasyonu	CFSR& Kalibre Edilmiş Model	CFSR& Varsayılan Ayarlamalı Model	ERA Interim& Kalibre Edilmiş Model	ERA Interim& Varsayılan Ayarlamalı Model)
H2	1,23	1,12	0,93	0,95	0,71
H5	1,71	1,62	1,36	1,45	1,11
H10	2,02	1,95	1,64	1,79	1,38
H20	2,33	2,26	1,91	2,11	1,64
H50	2,72	2,67	2,27	2,52	1,97
H100	3,02	2,98	2,53	2,83	2,22
H200	3,31	3,28	2,79	3,14	2,46
H500	3,70	3,69	3,14	3,55	2,79
H1000	3,99	3,99	3,40	3,86	3,04
H2000	4,28	4,29	3,67	4,17	3,28
H5000	4,67	4,70	4,01	4,58	3,61
H10000	4,96	5,00	4,27	4,89	3,85

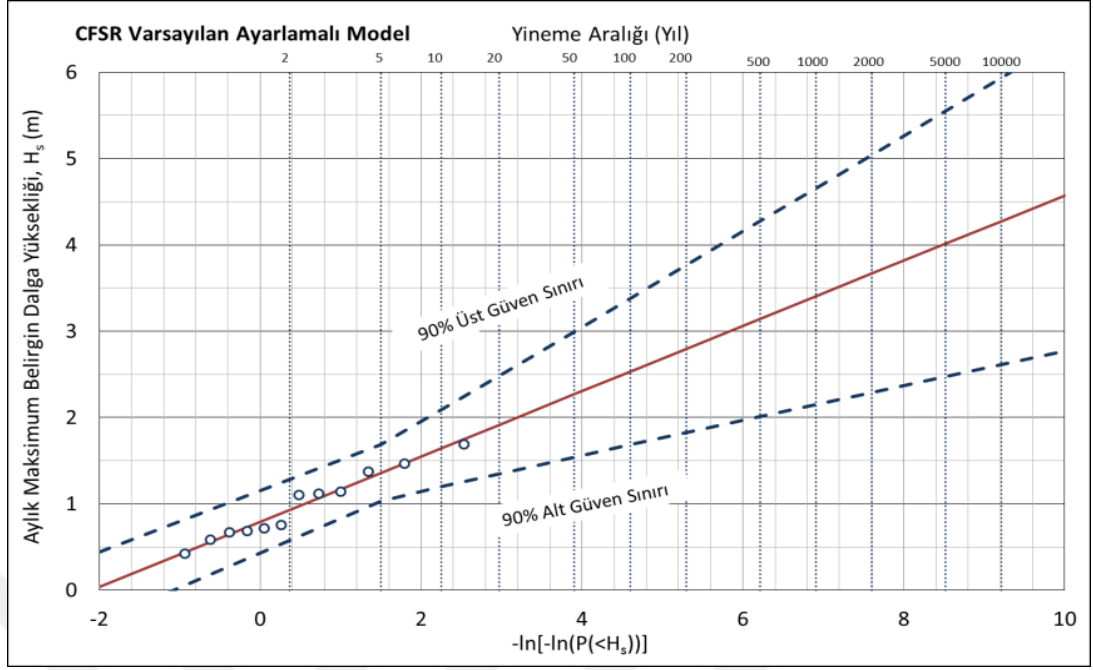


**Şekil 4.27.** Silivri ölçüm istasyonu için aylık maksimum ölçülmüş belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri)

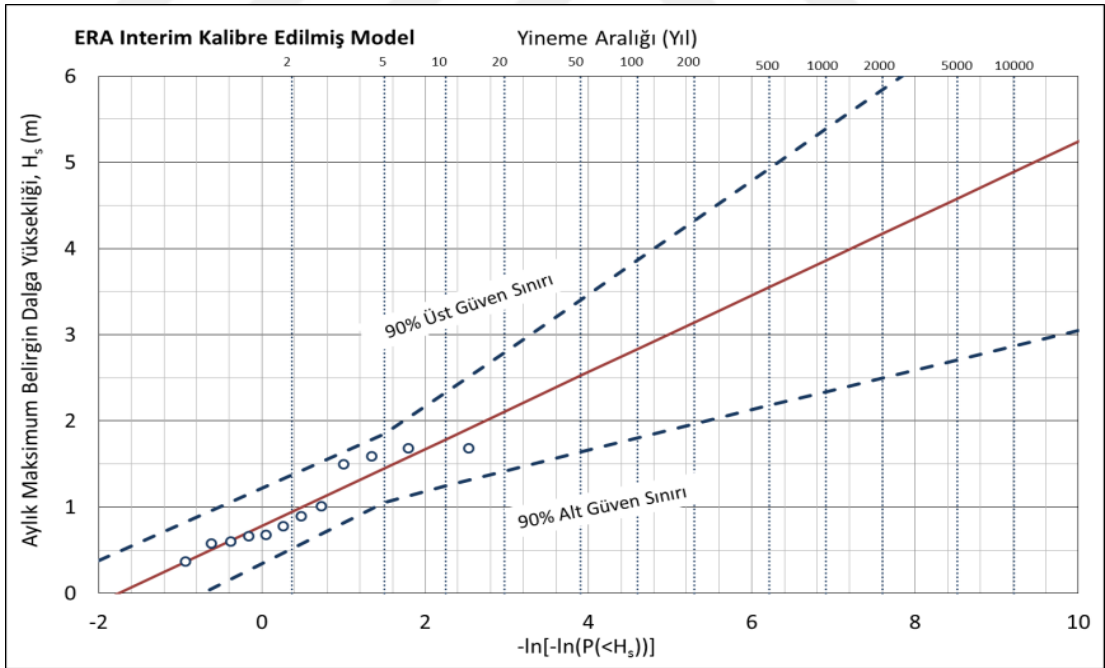


**Şekil 4.28.** Silivri istasyonu için CFSR kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri)

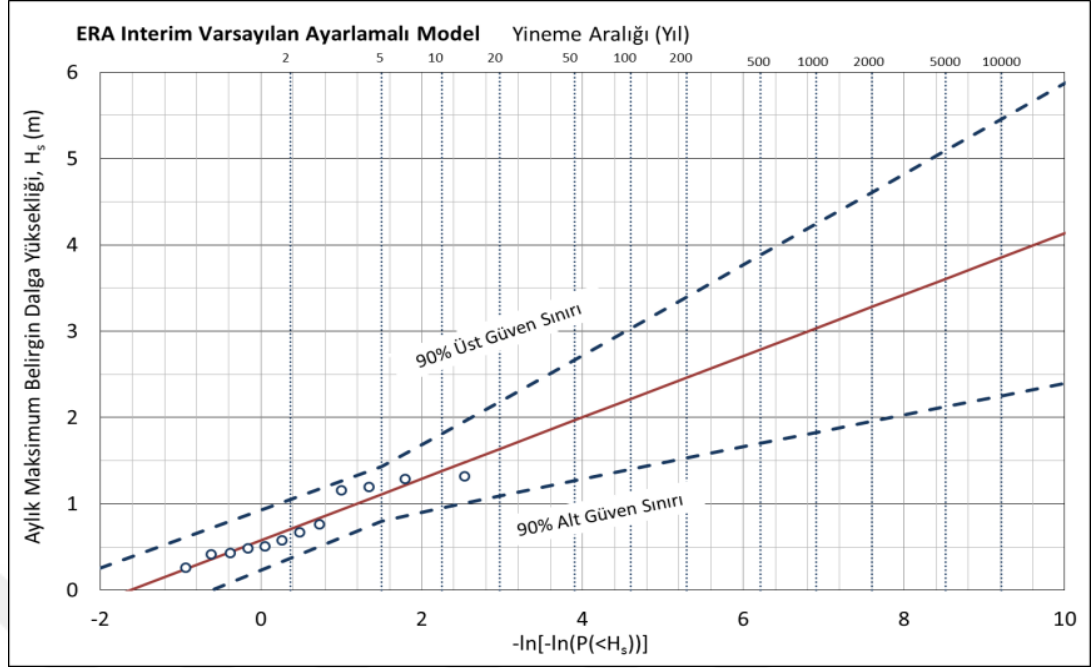




**Şekil 4.29.** Silivri istasyonu için CFSR varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yinleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri)



**Şekil 4.30.** Silivri istasyonu için ERA Interim kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yinleme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri)



**Şekil 4.31.** Silivri istasyonu için ERA Interim varsayılan ayarlamalı SWAN tahmin modeli aylık maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerine dayanarak oluşturulan farklı yineme periyotlu ekstrem değer istatistiği grafiği (2013 yılı verileri)

#### 4.2. Marmara Denizi'nin Yüzey Dalgalarının Uzun Dönemli Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, CFSR ve ERA Interim rüzgar alanlarını kullanan varsayılan ayarlamalı ve kalibre edilmiş ayarlamalı SWAN modeller yardımıyla gerçekleştirilen uzun dönemli analizler sonucunda biriktirilen rüzgar ve dalga parametre değerlerinin birbiri ile kıyaslamalı analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki rüzgar ve iki farklı ayarlama ile kurulan dört farklı model 1979-2009 yılları arası için 31 yıl boyunca çalıştırılmış ve istenilen rüzgar ve dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği  $H_{m0}$ , rüzgar hız bileşenleri  $Wind_x$  ve  $Wind_y$ , dalga enerji periyodu  $T_{m_{10}}$ , ortalama dalga periyodu  $T_{m02}$  ve ortalama dalga yönü  $Dir$ ) 2 saatlik zamansal çözünürlükte ve tüm Marmara Denizi'ni kapsayacak şekilde alansal olarak biriktirilmiştir. Bütün dikkate alınan rüzgar ve dalga parametreleri için ortalama değer hesaplamaları önce her yıl için ayrı ayrı her yılın 2 saatlik biriktirilmiş verilerinden yararlanılarak belirlenmiş ve o yıla ait bütün değerlerin ortalaması, o yıla ait mevsimlik ortalama ve o yıla ait aylık ortalama değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, her yıl için ayrı ayrı elde edilen aylık, mevsimlik ve yıllık ortalama değerler kullanılarak bütün yılların (31 yıllık) ortalama değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak bütün modeller için, her ayın 31 yıllık ortalama değerleri, her mevsimin

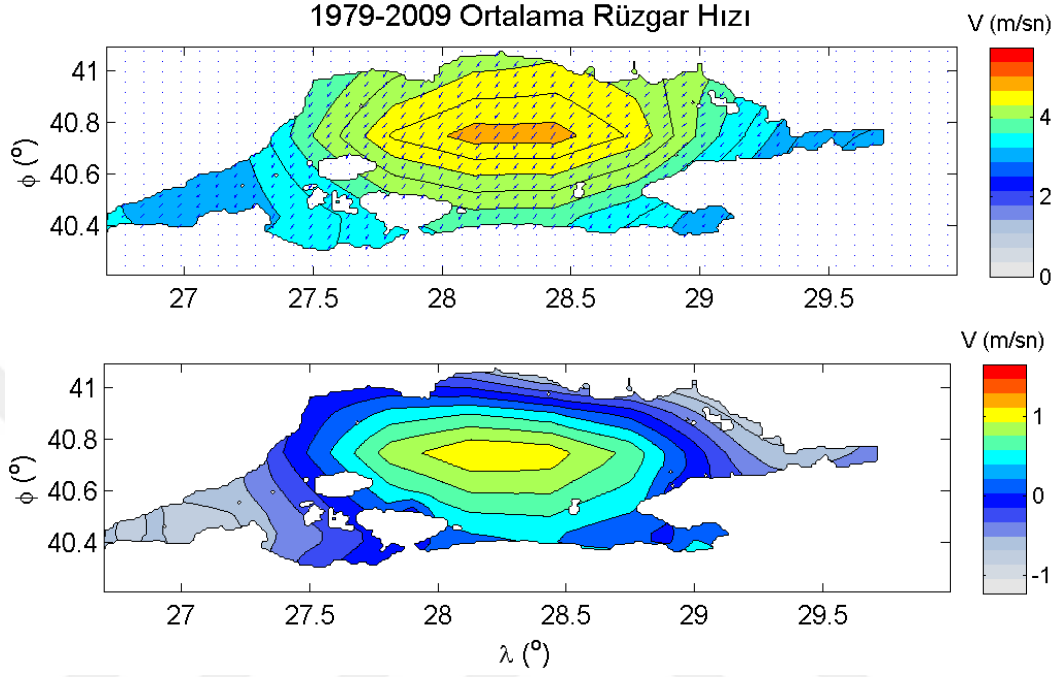
31 yıllık ortalama değerleri ve bütün 31 yılın ortalama değerleri dikkate alınan parametreler için alansal olarak elde edilmiştir. Ayrıca, 31 yıl boyunca 2 saatlik çözünürlükte biriktirilmiş uzun dönemli belirgin dalga yüksekliği tahminlerinden her yıl için %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin ve 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşıma ihtimallerinin alansal dağılımları hesaplanmış ve yıllık belirlenen bu değerlerin ortalamaları alınarak 31 yıl boyunca ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin ve 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşıma ihtimallerinin alansal dağılımları tespit edilmiştir. Bunlara ilave olarak, 31 yıl boyunca 2 saatlik çözünürlükte biriktirilmiş veri setinden yararlanılarak Marmara Denizi üzerindeki her bir grid noktalarında 31 yıl boyunca tahmin edilmiş maksimum belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılımları belirlenmiş ve sonuçlar birbiri ile kıyaslanarak irdelenmiştir.

Bu çalışmanın 4.1. Bölümü'nde Marmara Denizi'nde yapılacak rüzgar-dalga modellemesi için CFSR rüzgar veri setlerini kullanmanın daha doğru sonuçlara ulaşılmasına katkı yapacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı model sonuçlarından elde edilen alansal değerler olduğu gibi sunulmuştur. Diğer 3 model için ise, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş model sonuçlarından, bu 3 model ile elde edilen sonuçların farkları alınarak elde edilen fark değerlerinin alansal dağılım grafikleri sunulmuştur. Böylece, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı modelle üretilen alansal değerlerin Marmara Denizi'nde nasıl sonuçlar verdiği irdelenirken, diğer 3 model sonuçlarının farkı alınarak elde edilen alansal değerler ile bu üç modelin CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş ayarlamalı model sonuçlarına göre hangi bölgelerde nasıl farklılıklar gösterdiği irdelenebilmiştir.

#### **4.2.1 Ortalama Rüzgar Hızları ( $U_{10}$ )**

31 yıllık uzun dönemli olarak elde edilen ortalama rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimlerinin irdelenmesi amacıyla, CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama rüzgar hızlarının ve CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31

yıllık ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama rüzgar hızları farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.32’de sunulmuştur.



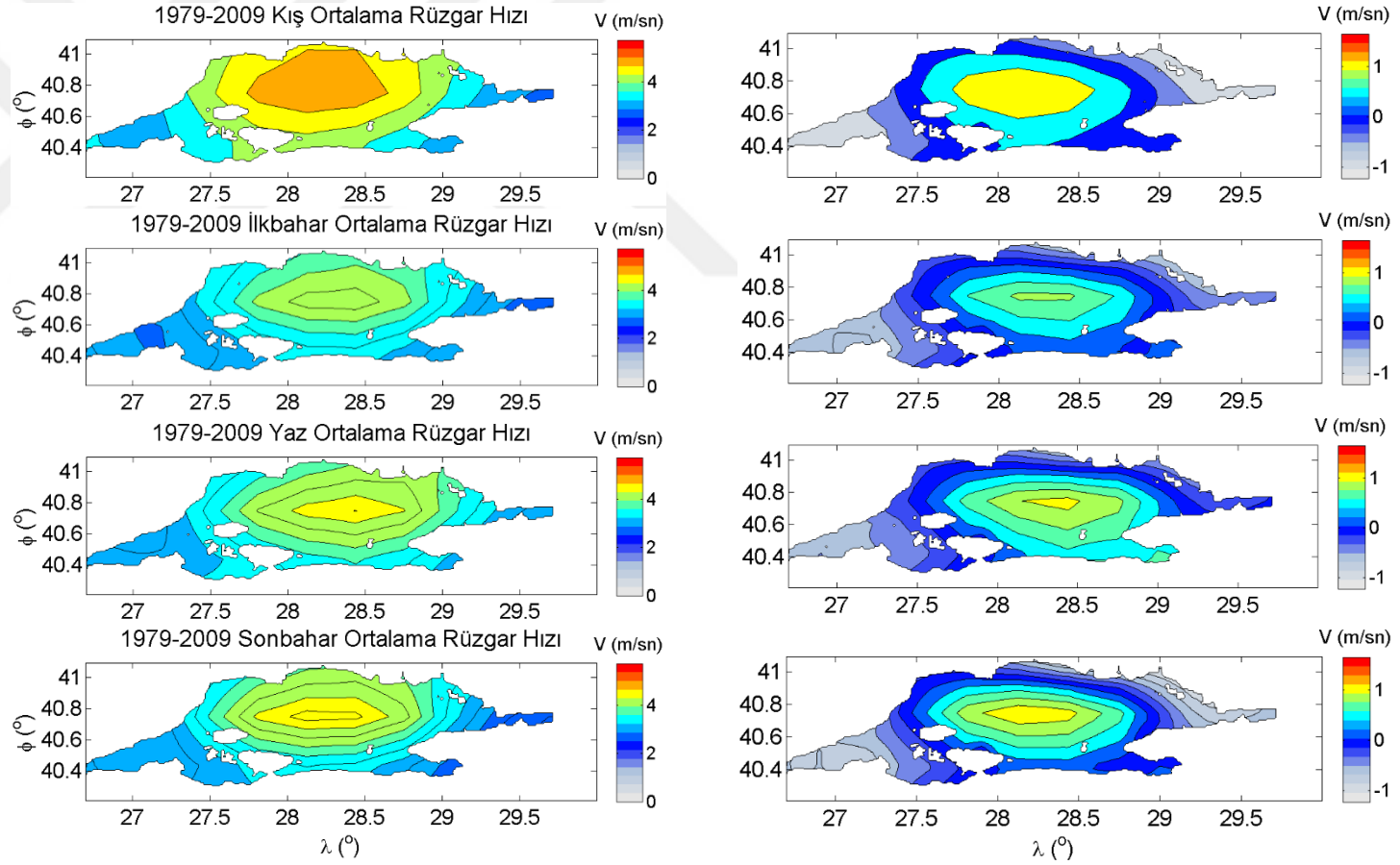
**Şekil 4.32.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama rüzgar hızlarının ve ortalama rüzgar yönünün (ilk satır) ve CFSR ortalama rüzgar hızı- ERA Interim ortalama rüzgar hızı farklarının (ikinci satır) alansal dağılımları

CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama rüzgar hızları (5 m/sn) Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmektedir. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe ve ada ve körfez etkileri ile ortalama rüzgar hızları azalmaktadır. Böylece, en düşük ortalama rüzgar hızları (3 m/sn) İzmit Körfezi, Gemlik Körfezi ve Marmara Denizi'nin güney-batısında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda tespit edilmiştir. Kıyılarda esen en yüksek ortalama rüzgar hızları (4 m/sn- 5 m/sn arasında) ise, körfez ve ada etkilerine maruz kalmayan kuzey kıyılarında tahmin edilmiştir. Bursa ili kıyılarındaki en yüksek ortalama rüzgar hızları ise batı kıyılarında görülmekte olup 4 m/sn civarındadır. Ayrıca, ortalama rüzgar hızları Bursa İlinin doğu kıyılarına doğru azalmaktadır. Böylece, Bursa ilinin doğu kıyılarındaki ortalama rüzgar hızları batı kıyılarına göre 0,5-1 m/sn arasında daha düşük tahmin edilmiştir.

CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama rüzgar hızlarının farklarının alansal dağılım grafiklerine (Şekil 4.32’de ikinci satır) bakıldığında ise, en yüksek ortalama rüzgar hızı farkları ( $\pm 1$  m/sn) Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde, Marmara Denizi’nin kuzey doğu kıyılarında ve Marmara Denizi’nin güney-batısında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda elde edilmiştir. Ayrıca, ortalama rüzgar hızı farklarının Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde 0,5 m/sn - 1 m/sn arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu alanlarda, CFSR rüzgarlarının, ERA Interim rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı gözlemlenmiştir. Marmara Denizi’nin orta bölgelerinden kuzey-doğu ve güney-batı kıyılarına doğru giderken ortalama rüzgar hızı farkları önce azalarak sifira yaklaşmakta daha sonra tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarının, CFSR rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Bursa ilinin batı kıyılarında ortalama rüzgar hızı farkları yaklaşık 0,4 m/sn civarındadır. Bursa ilinin batı kıyılarından doğu kıyılarına giderken farklar önce azalarak Gemlik körfezinin girişinde sifira yaklaşmaktadır. Daha sonra, körfezin doğusuna doğru farklar tekrar artmaktadır. Ayrıca, Gemlik Körfezinin güney-doğu kıyılarında farkların yine 0,4 m/sn civarında tahmin edildiği görülmektedir.

Uzun dönemli rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimlerinin mevsimsel olarak değerlendirmesi de yapılmış olup, bu amaçla hazırlanan CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının ve CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının farklarının alansal dağılım grafikleri Şekil 4.33’de sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık süre için mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılım grafiklerine göre (Şekil 4.33, ilk sütun), bütün mevsimlerde en yüksek ortalama rüzgar hızları Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde görülmektedir. Ayrıca, bütün mevsimler dikkate alındığında en yüksek ortalama rüzgar hızları kış mevsiminde görülmekte olup 5 m/sn civarındadır. En düşük ortalama rüzgar hızları ise (2,5 m/sn) kış mevsiminde İzmit Körfezinde, sonbahar mevsiminde İzmit ve Gemlik Körfezlerinde,

İlkbahar mevsiminde ise İzmit Körfezinde ve Marmara Denizi'nin güney-batısında Çanakkale Boğazında görülmektedir. Yaz mevsiminde esen en düşük ortalama rüzgar hızı ise 3 m/sn dir. Bu değerdeki rüzgar hızları İzmit ve Gemlik Körfezi ile birlikte Marmara Denizi'nin güney-batısında tahmin edilmiştir. Kıyılardaki en yüksek ortalama rüzgar hızları bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin kuzey kıyılarında elde edilmiştir. Bu alanlarda kış mevsiminde ortalama rüzgar hızları 4,5 m/sn civarında olurken diğer mevsimlerde yaklaşık 4 m/sn civarındadır. Bursa İli kıyılarında ise en yüksek ortalama rüzgar hızları (4 m/sn) kış mevsiminde Bursa ilinin batı kıyılarında elde edilmiştir. Ayrıca, kış mevsiminde Bursa İlinin doğu kıyılarında, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde Bursa İlinin batı kıyılarında, yaz mevsiminde ise bütün Bursa İli kıyılarında ortalama rüzgar hızı değerleri 3,5 m/sn civarındadır. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde Bursa ilinin doğu kıyılarına gidildiğinde ise ortalama rüzgar hızları azalarak 3 m/sn değerine düşmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının farklarının alansal değişimleri irdelendiğinde (Şekil 4.33, ikinci sütun) ise, bütün mevsimlerde en yüksek ortalama rüzgar hızı farkları ( $\pm 1$  m/sn) Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Marmara Denizi'nin kuzey-doğu kıyılarında ve güney-batısında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda görülmektedir. CFSR rüzgarları bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, kış mevsiminde Bursa ilinin batı kıyılarında ve yaz mevsiminde ise bütün Bursa ili kıyılarında ERA Interim rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yapmıştır. Ayrıca, bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin ortalarından kuzey-doğu ve güney-batı kıyılarına giderken önce ortalama rüzgar hızı farkları azalarak sıfır değerini almış daha sonra farklar tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarının CFSR rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmüştür. Bursa ili kıyılarında en yüksek ortalama rüzgar hızı farkları yaz mevsiminde doğu kıyılarında ve Gemlik Körfezinin güney-doğusunda görülmekte olup 0,6 m/sn civarındadır. Ayrıca, yaz mevsiminde bütün Bursa ili kıyılarında, kış mevsiminde ise Bursa ilinin batı kıyılarında farkların 0,3 m/sn civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu alanlar haricinde bütün mevsimlerde Bursa ili kıyılarındaki ortalama rüzgar hızı farkları sıfıra yakın değerler almaktadır.



**Şekil 4.33.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun) ve (birinci satır: kış mevsimi, ikinci satır: ilkbahar mevsimi, üçüncü satır: yaz mevsimi ve dördüncü satır: sonbahar mevsimi) CFSR mevsimlik ortalama rüzgar hızları - ERA Interim mevsimlik ortalama rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları

Uzun dönemli olarak elde edilen rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimleri son olarak her ay için ayrı ayrı irdelenmiştir. Bu amaçla, CFSSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık ortalama rüzgar hızlarının ve CFSSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarının farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Ek Şekil 2.1-2.4'te sunulmuştur.

CFSSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık süre için aylık ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılım grafiklerine göre, her ay için en yüksek ortalama rüzgar hızları Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmektedir. Bütün aylar içinde gözlemlenen en yüksek ortalama rüzgar hızı yaklaşık 5,7 m/sn değerinde olup aralık, ocak ve şubat aylarında görülmektedir. Bütün aylarda Marmara Denizi'nin ortalarından kıyılara yaklaşırken ortalama rüzgar hızı değerleri azalmaktadır. Ancak, aralık, ocak, nisan, mayıs ve ekim aylarında Marmara Denizi'nin güney batısında Çanakkale boğazının Ege Denizi çıkışına yakın bölgesinde ortalama rüzgar hızının Çanakkale Boğazının içerisindeki ortalama rüzgar hızına göre bir miktar arttığı görülmektedir. Kıyı alanlarında esen en yüksek ortalama rüzgar hızı yaklaşık 5 m/sn değerindedir. Bu hızdaki rüzgarlar kış mevsimi aylarında (aralık, ocak, şubat) Marmara Denizi'nin kuzeyinde İstanbul ili kıyılarında tahmin edilmiştir. Bütün aylarda esen en küçük ortalama rüzgar hızı değeri 2,5 m/sn civarındadır. Bu hızdaki rüzgarlar nisan, mayıs, haziran ve sonbahar mevsimi aylarında (eylül, ekim, kasım) görülmektedir. Bursa İli kıyılarında görülen en yüksek ortalama rüzgar hızları 4 m/sn civarındadır. Bu hızdaki rüzgarlar Bursa ilinin batı kıyılarında aralık, ocak, şubat, mart, temmuz ve ağustos aylarında görülmektedir. Diğer aylarda, Bursa ilinin batı kıyılarında esen ortalama rüzgar hızları ise 3-4 m/sn arasındadır. Bütün aylarda Bursa kıyılarında gözlemlenen en düşük ortalama rüzgar hızı (2,5 m/sn) ise ekim ve kasım aylarında Gemlik Körfezinde tahmin edilmiştir. Ayrıca, bütün aylarda Bursa İlinin batı kıyılarındaki ortalama rüzgar hızları doğu kıyılarındaki ortalama rüzgar hızlarına göre daha yüksek değerdedir.



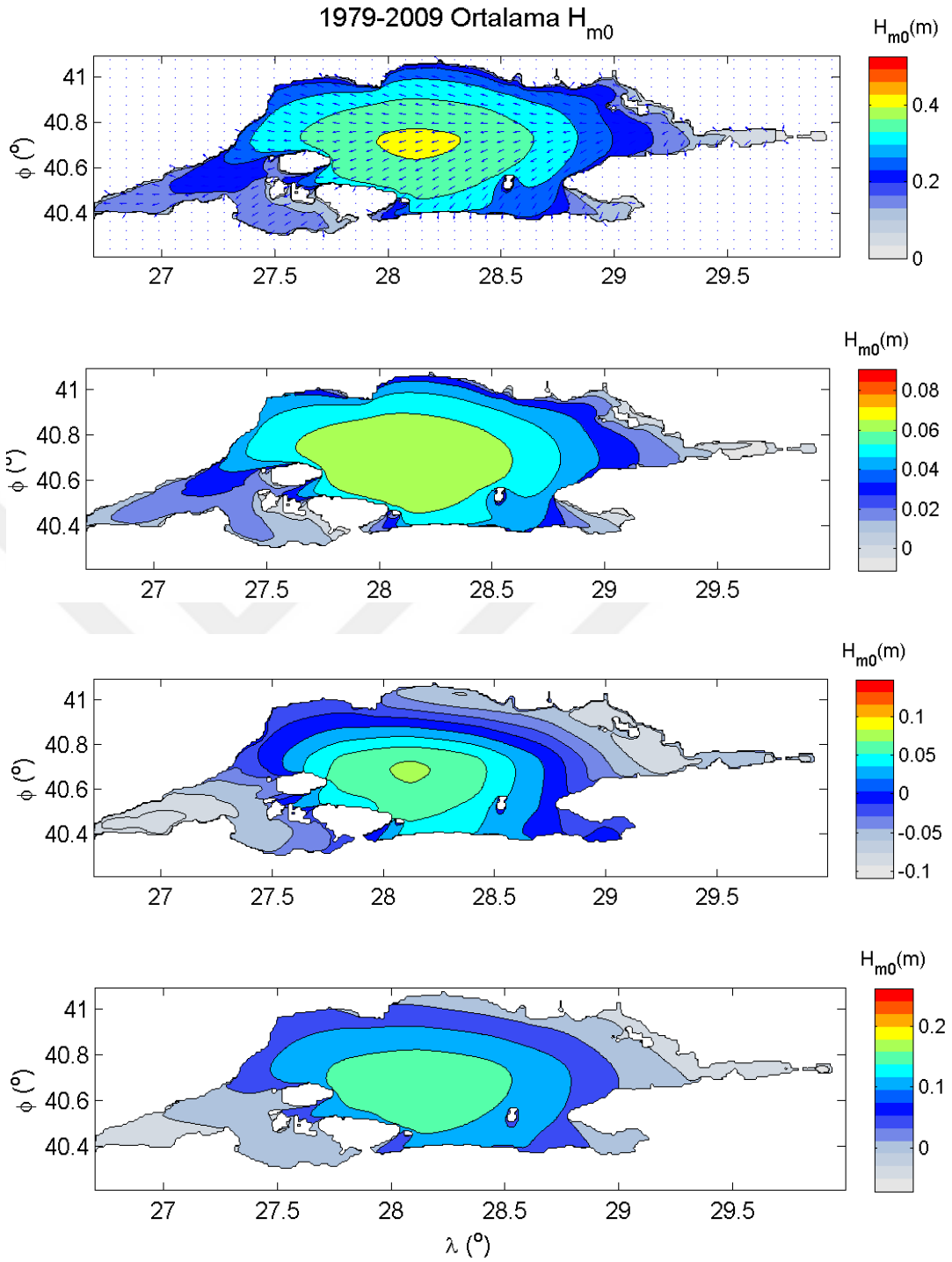
CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarının farklarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama rüzgar hızı farkları aralık ve ocak aylarında Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmektedir. Bu alanlarda farklar 1,6 m/sn civarındadır. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde en düşük farklar nisan ayında gözlemlenmekte olup yaklaşık 0,6 m/sn değerindedir. Bütün aylarda Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde CFSR rüzgarlarının ERA Interim rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmüştür. Ayrıca, bütün aylarda Marmara Denizi'nin ortalarından kıyılara doğru giderken ortalama rüzgar hızı farkları azalmaktadır. Ancak, kuzey-doğu ve güney-batı kıyılarına yaklaşırken önce farklar sifıra yaklaşmakta, daha sonra tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarının CFSR rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Kış mevsimi aylarında (aralık, ocak ve şubat) Bursa ilinin batı kıyılarında, yaz mevsimi aylarında (haziran, temmuz ve ağustos) bütün Bursa ili kıyılarında ayrıca mayıs ayında Gemlik Körfezinin güney-doğusunda CFSR rüzgarının ERA Interim rüzgarlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Bu alanlarda farklar 0,5 m/sn- 0,8 m/sn arasında değerler almaktadır. Bütün aylarda bu alanlar haricinde kalan Bursa kıyılarında ise ortalama rüzgar hızı farkları yaklaşık sıfır değerindedir.

#### **4.2.2 Ortalama Belirgin Dalga Yükseklikleri ( $H_{m0}$ )**

Marmara Denizi üzerinde belirgin dalga yüksekliklerinin uzun dönemli analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama belirgin dalga yükseklikleri ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımları oluşturulmuş ve Şekil 4.34'de sunulmuştur.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ( $H_{m0}$ ) alansal dağılımlarına göre (Şekil 4.34, ilk satır), en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği 0,4 m civarındadır. Bu yükseklikteki dalgalar, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmekte olup Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara yaklaştıkça ortalama belirgin dalga yükseklikleri azalmaktadır. Bu grafiklerde, ada ve körfezlerin dalga yüksekliklerine etkileri de açıkça görülmekte olup Marmara Denizi'nin ortalarından kıyılara yaklaşırken dalga yüksekliklerinde düzgün bir azalma gözlemlenirken, ada ve körfez etkileşimi sonucunda dalga yüksekliklerindeki azalmaların daha fazla olduğu görülmüştür. Kapıdağ Yarımadası, Marmara Adası ve İmralı Adası'nın kuzeyinde ortalama belirgin dalga yükseklikleri 0,3 m'nin üzerinde gözlemlenirken bu adaların arkasında kalan alanlarda ise ortalama belirgin dalga yükseklikleri 0,2 m'nin altına düşmektedir. Ancak, adalarla etkileşim içinde olmayan Bursa Karacabey kıyılarında ise ortalama belirgin dalga yükseklikleri 0,2-0,3 m aralığındadır. Körfezlerde ise, ortalama belirgin dalga yükseklikleri Gemlik Körfezi, İzmit Körfezi ve Bandırma Körfezi girişlerinde 0,1-0,2 m aralığında değerler alırken körfez içlerinde bu değer 0-0,1 metre aralığına düşmektedir. Erdek Körfezi'ndeki ortalama belirgin dalga yükseklikleri ise hem adalardan daha fazla etkilenmesi hem de körfezin etkisi ile sifıra daha yakın değerler almaktadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımlarına bakıldığında; en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği farkı, Marmara Denizi'nin orta bölgesinde görülmekte ve yaklaşık 0,06 m değerindedir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin varsayılan modele göre tüm Marmara Denizi üzerinde daha yüksek sonuçlar ürettiği de tespit edilmiştir.



**Şekil 4.34.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga yönünün (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımlarına göre, en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları 0,08 m civarındadır. Burada, Çanakkale Boğazı'na doğru Marmara Adası ve Erdek Körfezinin batısı ile birlikte Gemlik Körfezi'ne doğru ve kuzey doğu kıyıları boyunca ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı gözlemlenmiştir. Marmara Denizi'nin orta bölgesinde, Bursa ili Karacabey ilçesi kıyılarında ve Balıkesir ili Bandırma ilçesinin doğu kıyılarında ise CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler verdiği de anlaşılmaktadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımları irdelendiğinde ise, ortalama belirgin dalga yüksekliği farklarının Marmara Denizi'nin ortalarında, Bursa kıyıları ve Tekirdağ kıyılarında diğer iki modele göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklar, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde yaklaşık 0,16 m, Bursa ili kıyılarında yaklaşık 0,10 m ve Tekirdağ kıyılarında ise yaklaşık 0,07 m değerindedir.

Bu üç model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, Marmara Denizi'nin ortalarında CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin diğer 3 model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı, orta bölgelerden kıyılara doğru gidildikçe ise farkların azaldığı görülmüştür. Ancak, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelde Marmara Denizi'nin güney batısında Çanakkale boğazına doğru olan alan ile birlikte Marmara Denizi'nin kuzey doğu kıyılarında

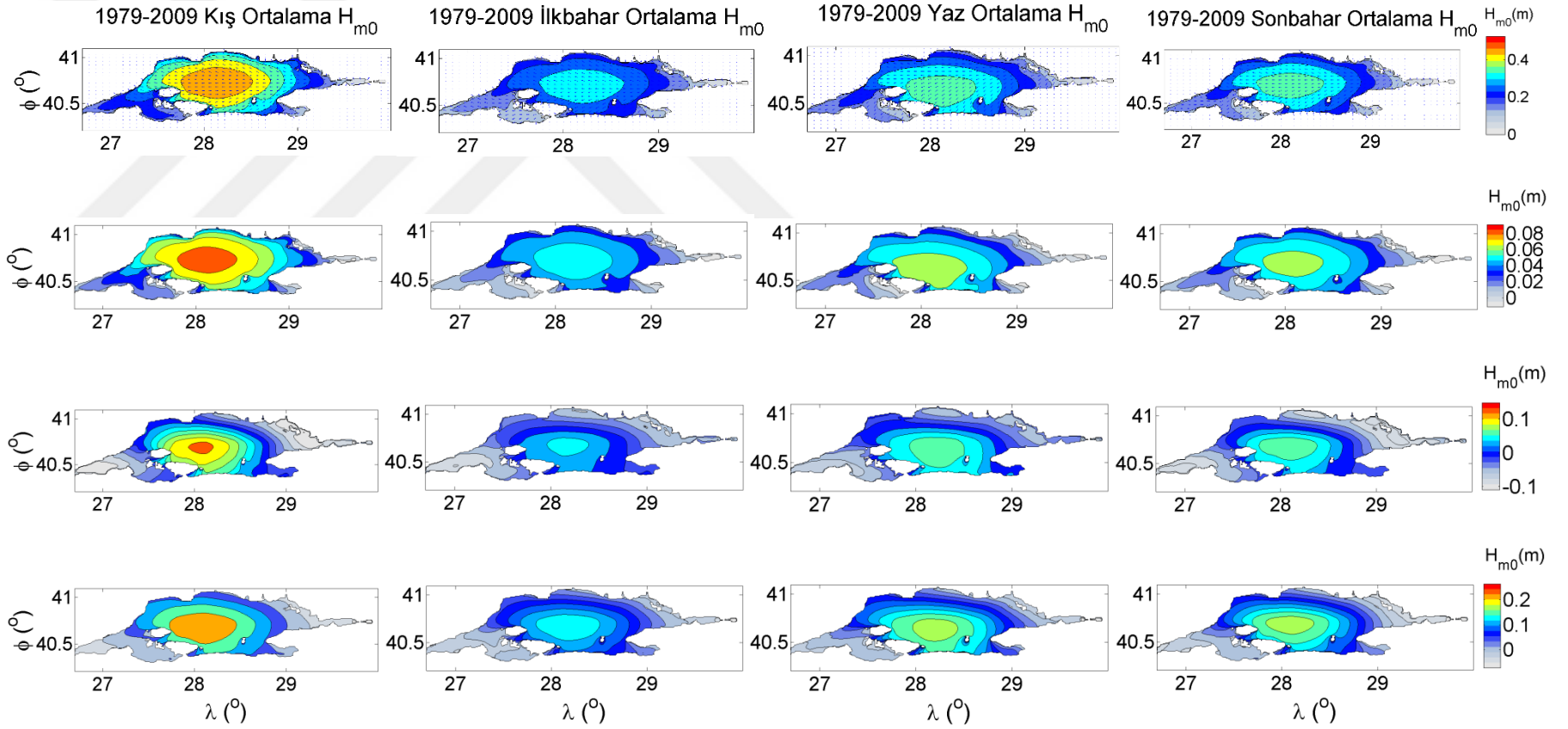
farkların tekrar negatif yönde arttığı böylelikle CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN tahminlere göre daha yüksek tahminlerin yapıldığı görülmektedir. CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarına göre ise, kıyı bölgelerindeki en yüksek farklar Bursa İlinin batı kıyılarında tespit edilmiştir.

31 yıllık uzun dönemli ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin mevsimsel olarak değerlendirilmesi amacıyla CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden, diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.35'te sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama belirgin dalga yükseklikleri kış mevsiminde Marmara Denizi'nin ortalarında görülmekte olup 0,45 m civarındadır. İlkbahar mevsiminde de en büyük ortalama belirgin dalga yüksekliği 0,3 m civarında olup yine Marmara Denizi'nin ortalarında görülmektedir. Ayrıca, ilkbahar mevsiminde diğer mevsimlere kıyasla daha düşük yükseklikte dalgalar tahmin edilmiştir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılımlarına göre, bütün modellerde en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları kış mevsiminde Marmara Denizi'nin ortalarında görülmektedir. Bu alanda, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına en yakın sonuçlar CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından (0,08 m) elde edilirken en yüksek farkları (0,2 m) ise, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilmiştir. CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan

varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen en düşük mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları körfezlerde ve adalar ile etkileşime giren alanlarda tahmin edilmiştir. Bu alanlardaki ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları sifıra yakın değerler almaktadır.

Bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Bursa ili, Kapıdağ Yarımadası ve Marmara Adası kıyılarında CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Bu alanlar haricinde, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe dalga yüksekliği farkları önce sifıra yaklaşmakta daha sonra Marmara Denizi'nin kuzey-doğu ve güney batı kıyılarında farklar tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Bu alanlarda, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının, ortalama belirgin dalga yüksekliklerini CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre 0,10 metre civarında daha yüksek tahmin ettiği tespit edilmiştir. Bursa İli kıyılarında en düşük dalga yüksekliği farkları ilkbahar mevsiminde ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından Bursa İlinin doğu kıyılarında elde edilmiştir. Bu alanlarda dalga yüksekliği farkları yaklaşık sifırdır. Bursa kıyılarındaki en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları ise (0,15 m) kış ve yaz mevsimlerinde ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından Bursa İlinin batı kıyılarında tahmin edilmiştir.



**Şekil 4.35.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

Bu çalışmada, 31 yıllık uzun dönemli ortalama belirgin dalga yükseklikleri aylık olarak da irdelenmiştir. Bu amaçla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yükseklikleri farklarının alansal dağılımları oluşturulmuş ve Ek Şekil 3.1 - 3.4'te sunulmuştur.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılımlarına göre, en yüksek ortalama belirgin dalga yükseklikleri (0,5 m) aralık, ocak ve şubat aylarında Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmektedir. Marmara Denizi'nin orta bölgelerindeki en düşük ortalama dalga yükseklikleri ise mayıs ve haziran aylarında görülmekte olup 0,25 m'nin altındadır. Bütün aylarda Marmara Denizi'nin ortalarından kıyılara gidildikçe ortalama belirgin dalga yükseklikleri azalmaktadır. Ayrıca, bütün aylarda İzmit ve Gemlik körfezlerinin doğusunda dalga yüksekliklerinin sıfıra çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Bursa kıyılarındaki en yüksek ortalama dalga yükseklikleri temmuz ve ağustos aylarında görülmekte olup bu aylarda Bursa İlinin batı kıyılarında yaklaşık 0,35 m yüksekliğinde dalgalar tahmin edilmiştir. Bursa kıyılarındaki en düşük ortalama belirgin dalga yükseklikleri ise Mayıs, Haziran ve Kasım aylarında gözlemlenmiş olup bu aylarda dalga yükseklikleri 0,2 m civarındadır.

Bu bölümde son olarak, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yükseklikleri farklarının alansal grafikleri irdelenmiştir. Bu grafiklere göre, en büyük farklar bütün modeller ve bütün aylar için Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde tahmin edilmiştir. Bu modeller içinde en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği farkları ise (0,25 m) ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından aralık ayında elde



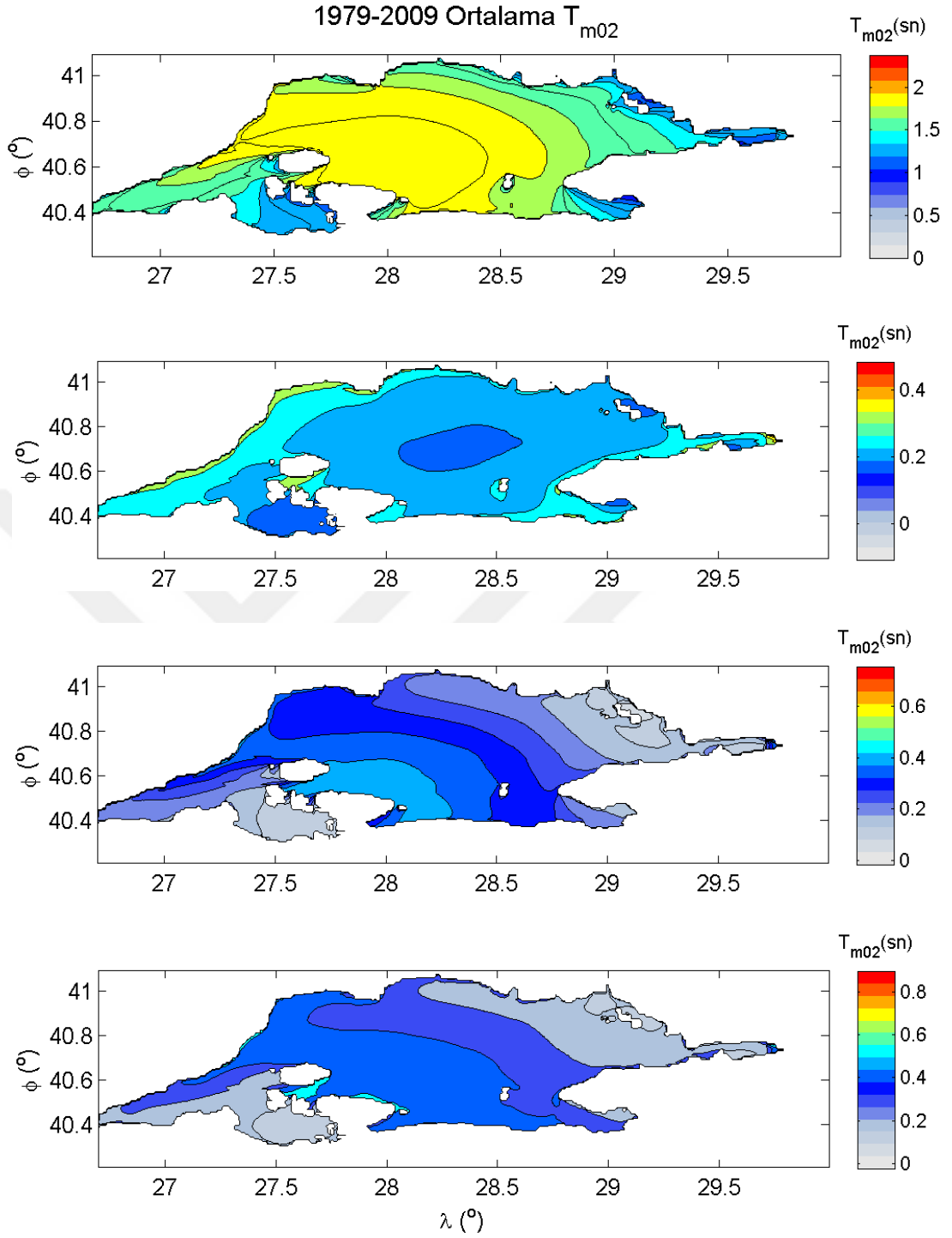
edilmiştir. Ayrıca, ocak ve şubat aylarında ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 0,2 m'nin üzerinde dalga yüksekliği farkları da tahmin edilmiştir. Bütün aylarda, CFSR ve ERA Interim varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarına göre, körfezlerde ve adalar ile etkileşime giren alanlarda farklar sıfıra çok yakın değerler almaktadır. Ortalama ve mevsimlik verilere benzer olarak bütün aylarda da Marmara Denizi'nin ortalarında ve Bursa ilinin batı kıyılarında CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı, Marmara Denizi'nin ortalarında kıyılara yaklaşırken ise farkların önce sıfırlandığı daha sonra özellikle kuzey-doğu ve güney-batı kıyılarında tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı tespit edilmiştir. Bursa kıyılarında ise en yüksek farklar ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından aralık, ocak, şubat, temmuz ve ağustos aylarında elde edilmiştir. Bursa kıyılarında, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına en yakın değerler genel olarak CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilirken sadece nisan ayında CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına en yakın değerlerin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edildiği gözlemlenmiştir.

#### **4.2.3 Ortalama Dalga Periyotları ( $T_{m02}$ )**

31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga periyotlarının Marmara Denizi üzerinde alansal olarak değişimlerinin irdelenmesi amacıyla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga periyotlarının ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama dalga periyotlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama dalga periyotlarının farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.36'da sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga periyotlarının alansal dağılım grafiklerine göre (Şekil 4.36'da ilk satır),

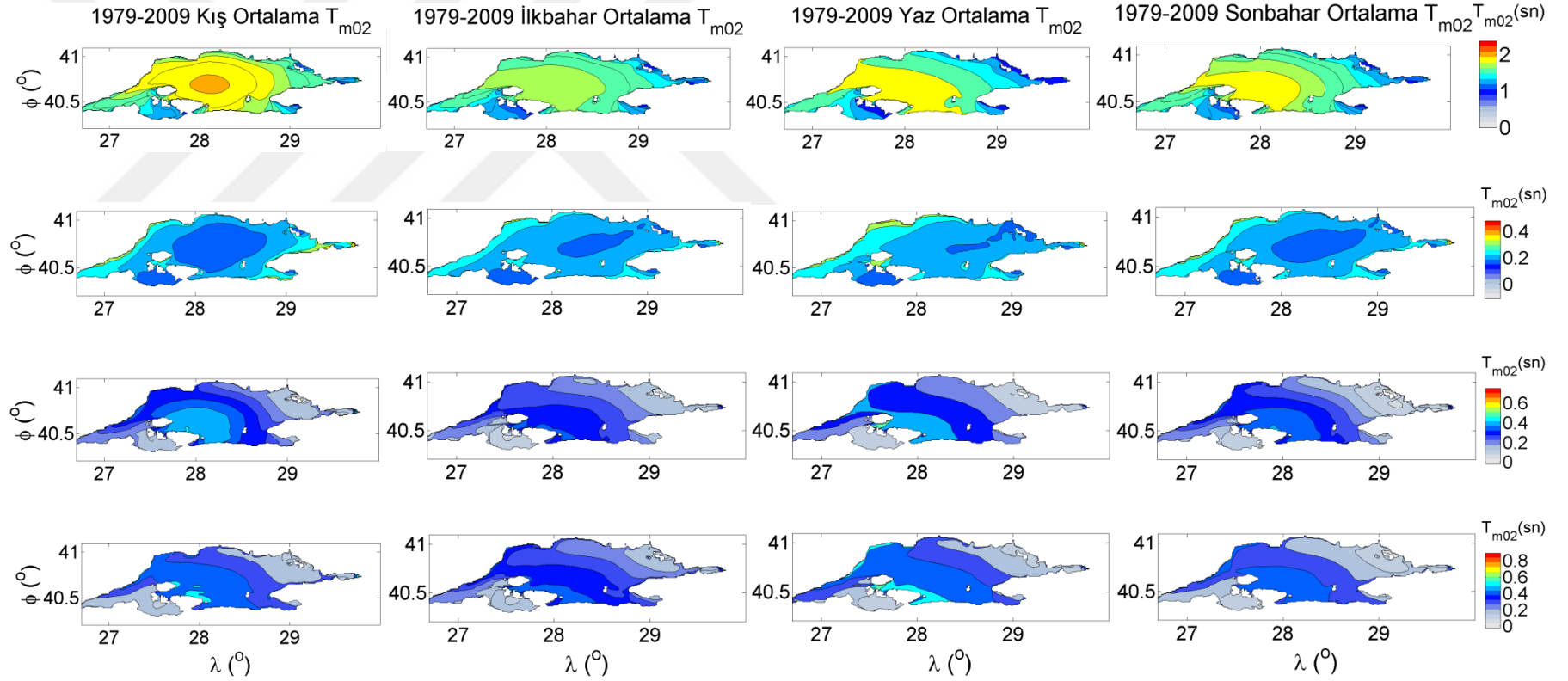
en yüksek ortalama dalga periyodu 1,8 sn civarındadır. Bu değerdeki ortalama dalga periyotları, Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Tekirdağ İli ve Bursa İli kıyılarında görölmektedir. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına doğru yaklaşırken ayrıca adalar ve körfezler ile etkileşime giren alanlarda ortalama dalga periyotları azalmaktadır. Ancak, İzmit Körfezi'nin doğu kıyılarına doğru gidildikçe ortalama dalga periyodunun tekrar yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. Bu model sonuçlarından en düşük ortalama dalga periyodu ise, Gemlik körfezinin kuzey doğusunda, Erdek Körfezinin kuzeyinde, İstanbul Adalarının kuzey doğu kıyılarında ve İzmit Körfezi'nin güney kıyılarında tahmin edilmiş olup 1 sn civarındadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş ortalama dalga periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş ortalama dalga periyodu farklarının alansal dağılımları incelendiğinde ise, bütün modeller için en yüksek ortalama dalga periyodu farkları, İzmit Körfezi'nin kuzey doğu kıyılarında elde edilmiştir. Bu değer, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen ortalama dalga periyodlarına göre 0,4 sn değerinde olurken, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen ortalama dalga periyodlarına göre 0,4-0,6 sn aralığında ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen ortalama dalga periyodlarına göre ise yaklaşık 0,6 sn değerindedir. ERA Interim rüzgarlarını kullanan hem kalibre edilmiş hem de varsayılan ayarlamalı SWAN modeller içinde Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına doğru gidildikçe ve ada ve körfez etkileri ile ortalama dalga periyodu farkları azalmaktadır. Ayrıca, bu farkların alansal dağılım grafiklerinde göröldüğü gibi, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçları, ERA Interim rüzgarlarını kullanan her iki model sonuçlarına kıyasla tüm deniz üzerinde daha yüksek değerler sunmuştur. Bursa İli kıyılarında her üç model sonuçlarından da elde edilen farklar ise 0,2-0,4 sn arasında değerler almaktadır.



**Şekil 4.36.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama  $T_{m02}$  (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş swan ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal dağılımlarının mevsimsel olarak değerlendirilmesi amacıyla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık süre için mevsimlik ortalama dalga periyodları ile CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodlarının farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.37’de sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık süre için mevsimlik ortalama dalga periyodlarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga periyodları kış mevsiminde Marmara Denizi’nin ortalarında, yaz mevsiminde ise Tekirdağ ilinin güney kıyılarında ve Kapıdağ Yarımadasının kuzey kıyılarında görülmekte olup 2 sn değerindedir. Ayrıca, kış, yaz ve sonbahar mevsimlerinde Marmara Denizi’nin orta bölgeleri ile birlikte Tekirdağ İli ve Bursa İli kıyılarında ve Kapıdağ Yarımadası ile Marmara Adası arasında kalan alanda ortalama dalga periyodu değerinin 1,8 sn olduğu görülmektedir. İlkbahar mevsiminde gözlemlenen en yüksek ortalama dalga periyodu değeri ise yaklaşık 1,6 sn değerinde olup Tekirdağ İlinin güney kıyılarında Bursa İlinin batı kıyılarına uzanan bir bölgede görülmektedir. Bütün mevsimlerde Marmara Denizi’nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına doğru gidildikçe ve ada ve körfez etkileri ile ortalama dalga periyodu değerleri azalmaktadır. Ancak, İzmit Körfezi’nin doğu kıyılarında ortalama dalga periyodu değeri tekrar yükselmektedir. Bütün mevsimlerde en düşük ortalama dalga periyodu Gemlik Körfezinin kuzey doğusunda, İzmit Körfezinin güney kıyılarında, İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında görülmekte olup 1 sn civarındadır. Bu model sonuçlarından Bursa İli kıyılarında elde edilen ortalama dalga periyodları ise bütün mevsimlerde 1,5-2 sn arasında değerler almaktadır. Ayrıca, bütün mevsimlerde Bursa İlinin batı kıyılarındaki ortalama dalga periyodunun doğu kıyılarındaki ortalama dalga periyoduna göre daha yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir.



**Şekil 4.37.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodlarından, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodu farklarının alansal değişimlerine göre (Şekil 4.37'de ikinci satır), en yüksek ortalama dalga periyodu farkları (0,4 sn) kış ve sonbahar mevsiminde İzmit Körfezinin doğusunda görülmektedir. Bu model sonuçlarından elde edilmiş en düşük mevsimlik ortalama dalga periyodu farkları ise bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Gemlik Körfezinin kuzey doğu kıyılarında, İstanbul Adaların kuzey kıyılarında, İzmit körfezinin güney kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında görülmektedir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan her iki ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga periyodu farklarının alansal dağılımları incelendiğinde (Şekil 4.37'de üçüncü ve dördüncü satırlar), en yüksek ortalama dalga periyodu farklarının kış mevsiminde İzmit Körfezinin kuzey doğu kıyılarında elde edildiği tespit edilmiştir. Burada, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen en yüksek ortalama dalga periyodu farkları 0,6 sn olurken ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen en yüksek ortalama dalga periyodu farkları ise 0,7 sn değerindedir. Bu iki model sonuçlarından elde edilen en düşük ortalama dalga periyodu farkları bütün mevsimlerde Marmara Denizi'nin kuzey doğu kıyılarında, İzmit Körfezinde, Gemlik Körfezinin kuzey doğu kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında görülmektedir. Ayrıca, her iki model içinde Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına gidildikçe ve ada ve körfez etkileri ile ortalama dalga periyodu farklarının azalmakta olduğu sadece İzmit Körfezinin doğusunda ortalama dalga periyodu farklarının tekrar arttığı görülmektedir.

Marmara Denizi üzerinde 31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga periyodlarının aylık olarak değişimleri de irdelenmiştir. Bu amaçla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilen aylık ortalama dalga

periyodları ile CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının farklarının alansal dağılım grafikleri elde edilmiş ve Ek Şekil 4.1 – 4.4'te sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık süre için aylık ortalama dalga periyodlarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga periyodu ağustos ayında Kapıdağ Yarımadası'nın kuzey kıyılarında ve Tekirdağ İlinin güney kıyılarında görülmekte olup yaklaşık 2,3 sn değerindedir. Bütün aylarda Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde ortalama dalga periyodu 1,5-2 sn arasında değerler almakta olup bütün aylarda Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına gidildikçe ve ada ve körfezlerin etkileri ile ortalama dalga periyodu değerleri azalmaktadır. Ancak, sadece İzmit Körfezinin kuzey doğu kıyılarına doğru ortalama dalga periyodu farklarının tekrar yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu model sonuçlarından bütün aylarda üretilen en düşük ortalama dalga periyodu değerleri Erdek Körfezinde, Gemlik Körfezinin kuzey doğu kıyılarında, İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında ve İzmit Körfezinin güney kıyılarında görülmekte olup 1 sn civarındadır. Bütün aylarda, Bursa İli kıyılarındaki ortalama dalga periyodlarının 1,5-2 sn arasında değerler aldığı görülmektedir. Bununla birlikte bütün aylarda Bursa İlinin batı kıyılarındaki ortalama dalga periyodu değerlerinin doğu kıyılarındaki ortalama dalga periyodu değerlerine kıyasla eşit ya da büyük olduğu görülmüştür. Bursa kıyılarındaki en büyük ortalama dalga periyodları ise temmuz ve ağustos aylarında batı kıyılarında görülmekte olup yaklaşık 2 sn değerindedir.

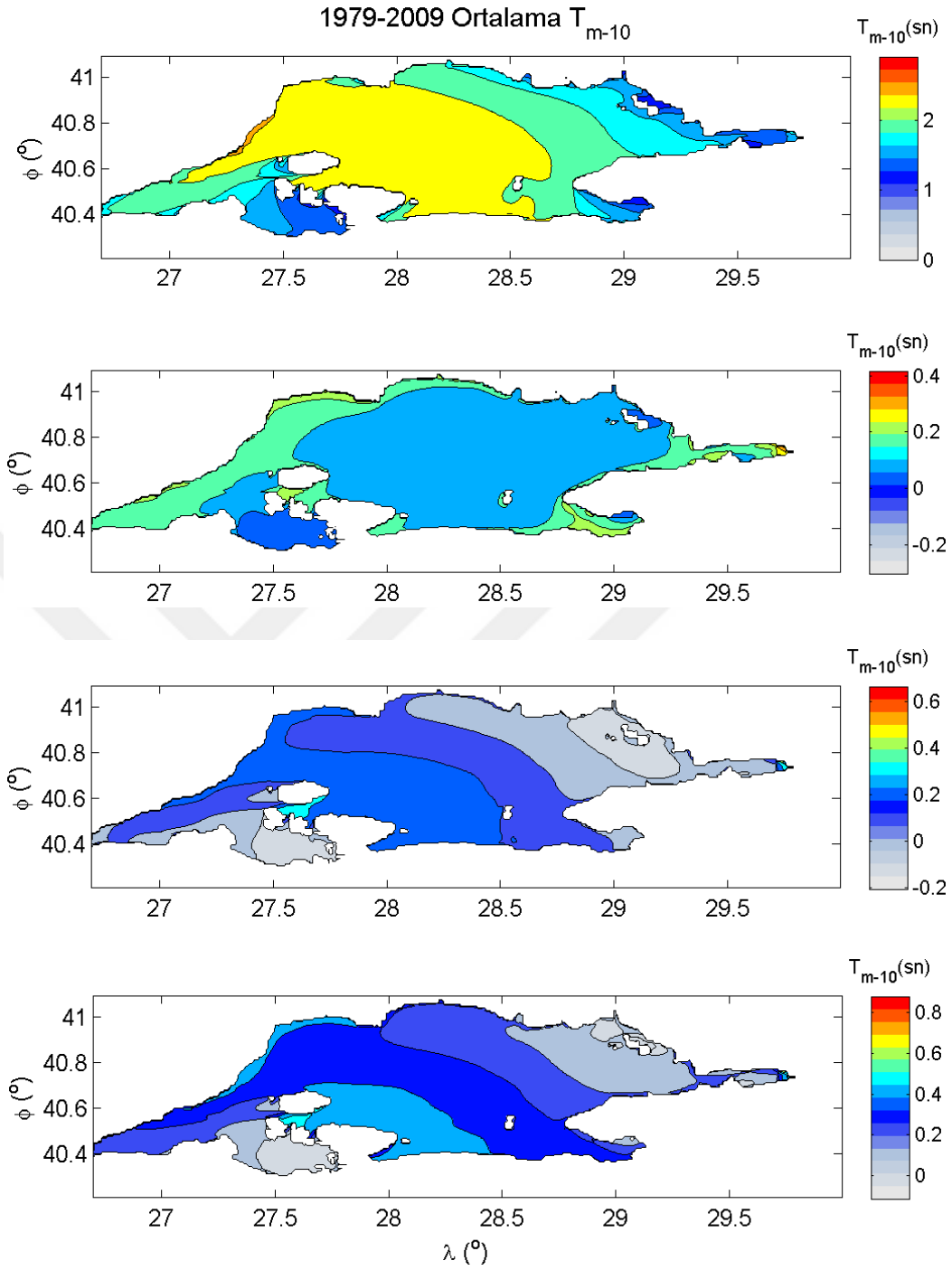
CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarından, diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının farklarının alansal dağılımları incelendiğinde, bütün modeller için en yüksek ortalama dalga periyodu farkları İzmit Körfezinin kuzey doğu kıyılarında elde edilmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen en yüksek ortalama dalga periyodu farkları (0,45 sn) ocak, şubat ve ekim aylarında görülürken, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen en yüksek ortalama dalga periyodu farkları (0,6 sn) ocak ve ağustos aylarında,

ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen en yüksek ortalama dalga periyodu farkları ise (0,7 sn) aralık, ocak, şubat, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarından, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının farklarının en düşük olduğu bölgeler bütün aylarda Gemlik Körfezinin kuzey doğusunda, İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında, İzmit Körfezinin güney kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek körfezinin batısında görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen aylık ortalama dalga periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan her iki ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının farklarının alansal değişimlerine göre, en düşük ortalama dalga periyodu farkları bütün aylarda Marmara Denizi'nin kuzey doğusu ile birlikte Gemlik Körfezinin kuzey doğusunda, Marmara Adasının güney batısında, İzmit Körfezinde ayrıca Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında görülmektedir. Bu iki model sonuçlarından üretilen ortalama dalga periyodu farkları bütün aylarda Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu kıyılarına gidildikçe ve ada ve körfez etkileri ile azalmaktadır. Yine, bütün aylarda İzmit Körfezinin doğu kıyılarındaki ortalama dalga periyodu farklarının tekrar yüksek değerler aldığı görülmüştür.

#### **4.2.4 Ortalama Dalga Enerji Periyotları ( $T_{m-10}$ )**

31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga enerji periyotlarının Marmara Denizi üzerinde alansal olarak dağılımının irdelenmesi amacıyla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarının ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama dalga enerji periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.38'de sunulmuştur.





**Şekil 4.38.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) ortalama dalga enerji periyodlarının alansal dağılım grafiklerine göre, maksimum ortalama dalga enerji periyodları, Tekirdağ ilinin güney kıyılarında elde edilmiş olup 2,5 sn civarındadır. Marmara Denizi'nin orta kısımları ile birlikte Bursa ilinin batı kıyılarında, Tekirdağ ilinin güney kıyılarında ve Marmara Adası ile Kapıdağ Yarımadası arasında kalan alanda ortalama dalga enerji periyodlarının 2,3 sn civarında olduğu görülmektedir. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey kıyılarına yaklaştıkça ve körfezler ve adalar ile etkileşimde olan alanlarda ise ortalama dalga enerji periyodlarının azaldığı görülmektedir. Örneğin Gemlik körfezinin girişinde ortalama dalga enerji periyodu 1,5-2 sn arasında değerler alırken körfezin kuzey kıyılarına doğru ortalama dalga enerji periyodunun yaklaşık 1 sn değerinde olduğu tahmin edilmiştir. Ancak, bu durum sadece İzmit Körfezinde farklılık göstermektedir. İzmit Körfezi'nin girişinde ortalama dalga enerji periyodu 1-1,5 sn arasında değer alırken körfezin kuzey kıyılarına doğru gidildikçe artarak 1,5 sn üzerinde değerler almaktadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş ortalama dalga enerji periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılımları değerlendirildiğinde, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen farkların alansal dağılım grafiklerine göre, en büyük ortalama dalga enerji periyodu farkları İzmit Körfezi'nin doğusunda gözlemlenmekte olup bu değer 0,3 sn civarındadır. Ayrıca, Gemlik körfezinin kuzey kıyılarında, Erdek Körfezinde, Balıkesir ilinin batı kıyılarında ve İstanbul adalarının kuzeyinde ortalama dalga enerji periyotlarının sıfıra yakın değerler aldığı görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu farkları İzmit Körfezi'nin kuzey doğu kıyılarında görülmektedir. Bu alanda farklar 0,4 sn civarındadır. İzmit Körfezi'nin kuzeyinde ve Marmara Adası ile Kapıdağ Yarımadası arasında kalan alanda ortalama dalga enerji periyodu farkları 0,3 sn civarında olurken,

Marmara Denizi'nin diğer bölgelerinde bu farklar  $\pm 0,2$  sn ve altında değerler almaktadır. Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Bursa ve Tekirdağ İli kıyılarında, Bandırma Körfezi'nde, Marmara Adası ile Kapıdağ Yarımadası arasında kalan alanda ve Marmara adasının batısında Çanakkale boğazına doğru olan alanda CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler verdiği görülmektedir. Ayrıca, Marmara Denizi'nin kuzey doğu alanlarında, Gemlik körfezinin kuzey doğu kıyılarında, Erdek körfezinde ve Balıkesir İlinin batı kıyılarında ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı gözlemlenmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal grafikleri değerlendirildiğinde ise, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu farkları İzmit Körfezi'nin kuzey doğu kıyılarında gözlemlenmiş olup 0,6 sn civarındadır. Ayrıca, İzmit körfezinin kuzey-doğu kıyıları ile birlikte Marmara Adası ile Kapıdağ Yarımadası arasında kalan alanda ortalama dalga enerji periyodu farkları 0,5 sn civarındadır. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde farklar 0,2-0,4 sn arasında değerler alırken Marmara Denizi'nin ortalarından kuzey kıyılarına doğru gidildikçe farklar azalmakta, İstanbul kıyılarında ise sifıra yakın değerler almaktadır. Ayrıca, Erdek körfezinde ve Erdek körfezinin batısı ile birlikte Gemlik körfezinin kuzey doğu kıyılarında ve İzmit Körfezi'nde ortalama dalga enerji periyodu farklarının sifıra yakın değerler aldığı alanlar tespit edilmiştir.

31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga enerji periyodlarının mevsimsel olarak değerlendirilmesi amacıyla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga enerji periyodları ile CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılım

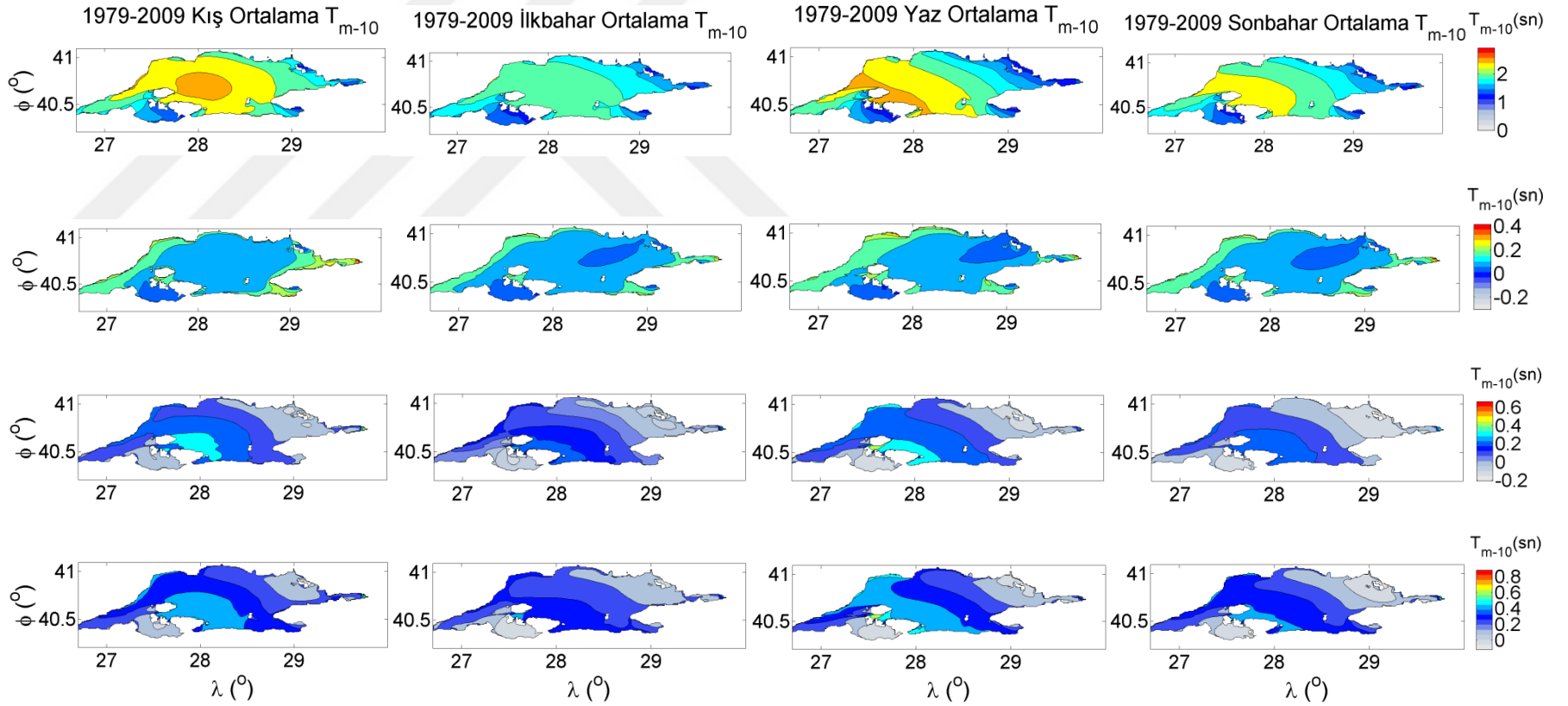
grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.39'da sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu kış ve yaz mevsimlerinde gözlemlenmiş olup 2,5 sn değerindedir. Bu ortalama dalga enerji periyodu değeri, kış mevsiminde Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, Tekirdağ İli kıyılarında ve Kapıdağ Yarımadası ile Marmara Adasının kuzey kıyılarında görülmüştür. Yaz mevsiminde ise, Tekirdağ İli kıyılarında, Marmara adası ve Kapıdağ yarımadasının kuzey kıyıları ile birlikte bu iki ada arasında kalan alanda ve Bandırma İlçesinin batı kıyılarında görülmektedir. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde ise, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değerinin yaklaşık 2,3 sn olduğu görülmüştür. Bu ortalama dalga enerji periyodu değeri, ilkbahar mevsiminde Tekirdağ ilinin güney kıyılarında gözlemlenirken, sonbahar mevsiminde ise Marmara Denizi'nin orta bölümlerinde, Tekirdağ İli kıyılarında, Bursa İlinin batı kıyılarında, Kapıdağ Yarımadası ve Marmara Adasının kuzey kıyılarında ve bu iki ada arasında kalan alan da görülmektedir. Bu grafiklere bakıldığında, ortalama dalga enerji periyodunun Marmara Denizi'nin ortalarından kuzey doğu ve güney batı doğrultusunda kıyılara doğru gidildikçe ve adalar ve körfezler ile etkileşimde olan alanlarda azaldığı görülmektedir. Ancak, bütün mevsimlerde İzmit körfezinin kuzey doğu kıyılarında ortalama dalga enerji periyodunun körfez içindeki dalga periyoduna göre daha yüksek bir değer aldığı görülmüştür.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarından, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal değişimlerine göre, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu farkı kış mevsiminde İzmit körfezinin kuzey doğu kıyılarında görülmekte olup yaklaşık 0,4 sn değerindedir. Bütün mevsimlerde, İstanbul Adalarının kuzey kıyıları ile birlikte Gemlik Körfezinin kuzey doğu kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Bandırma İlçesinin batı kıyılarında farkların sıfıra çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Bunlarla birlikte, ilkbahar ve sonbahar mevsiminde Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile İstanbul Adalarının arasında kalan alanda ve İzmit Körfezinin güneyinde, yaz mevsiminde ise Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile

İstanbul ilinin Asya kıyıları arasında kalan alanlarda ortalama dalga enerji periyodu farklarının sıfıra çok yakın değerler aldığı görülmektedir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu farkı kış mevsiminde İzmit Körfezinin kuzey doğu kıyısında görülmekte olup 0,4-0,6 sn civarındadır. Bütün mevsimlerde, Gemlik körfezinin doğusu, Marmara Denizi'nin kuzey doğusu, Erdek Körfezi, Balıkesir İlinin batısı, Marmara Adası, Avşa Adası ve Paşalimanı adasının güney batısı ve Çanakkale Boğazına doğru uzanan bölgede ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı gözlemlenmiştir. Bu alanların dışındaki diğer alanlarda ise, bütün mevsimlerde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler verdiği anlaşılmaktadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal değişimleri irdelendiğinde ise, en yüksek farkların kış mevsiminde İzmit Körfezinin kuzey doğusunda üretildiği tespit edilmiştir. Diğer model sonuçlarına göre, en yüksek farklar da bu model sonuçlarından bu alanda tahmin edilmiş olup yaklaşık 0,7 sn değerindedir. Ayrıca, bu model sonuçlarından kış mevsiminde İzmit Körfezinin doğusunda, yaz mevsiminde ise İzmit Körfezinin kuzey doğusunda ve Avşa Adası ile Paşa Limanı adasının kuzeyinde ortalama dalga enerji periyodu farklarının 0,6 sn değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bütün mevsimlerde, Gemlik körfezinin kuzey doğusunda, Erdek Körfezinde ve körfezin batısında ayrıca Marmara Adasının güney batısı ile birlikte Marmara Denizi'nin kuzey doğusunda ve İzmit körfezinde ortalama dalga enerji periyodu farklarının sıfıra çok yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.39.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için mevsimlik ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN mevsimlik ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga enerji periyodlarının aylık olarak değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık ortalama dalga enerji periyodlarının ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarından diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılımları Ek Şekil 5.1 - 5.4'de sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık ortalama dalga enerji periyodlarının alansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu ağustos ayında Tekirdağ kıyısında gözlenmiş olup 3 sn civarındadır. Ayrıca, aralık, temmuz ve ağustos aylarında ortalama dalga enerji periyodu değerinin 2,7 sn olduğu alanlar görülmektedir. Bu değer, aralık ayında Tekirdağ ili kıyılarında gözlemlenirken temmuz ayında Tekirdağ ili kıyıları ile birlikte Marmara adasının güney doğu kıyıları ile Bandırma ilçesinin doğu kıyıları arasında olan alanda görülmektedir. Ağustos ayında ise, Tekirdağ kıyılarında ve Tekirdağ İlinin güney kıyıları ile Bandırma İlçesinin doğu kıyıları arasında kalan alanda gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu grafiklerde ocak, şubat, mart, eylül ve ekim aylarında en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değeri 2,5 sn olarak tespit edilmiştir. Bu değerdeki dalga enerji periyodu, ocak ve şubat aylarında Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, Tekirdağ İli kıyılarında ve Bursa ilinin batı kıyılarında gözlemlenirken mart ayında ise sadece Tekirdağ ili kıyılarında gözlemlenmiştir. Eylül ve ekim aylarında ise, Tekirdağ İli kıyılarında ve Marmara Adası ve Kapıdağ Yarımadasının kuzey kıyıları ile birlikte bu iki ada arasında kalan alanda gözlemlenmiştir. Bütün aylarda, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey kıyılarına doğru gidildikçe ve ada ve körfezlerle etkileşime giren alanlarda ortalama dalga enerji periyodu değerinin azaldığı gözlemlenmiş olup sadece İzmit körfezinin doğusunda ortalama dalga enerji periyodunun körfezin içinde gözlemlenen dalga periyodu değerine göre arttığı görülmüştür.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarından, diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının

farklarının alansal dağılımları incelendiğinde, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilen farkların alansal grafiklerine göre, en büyük ortalama dalga enerji periyodu farkları eylül ve kasım aylarında görülmekte olup 0,4 sn değerindedir. Ayrıca, bütün aylarda ortalama dalga enerji periyodu farkları Gemlik Körfezinin kuzey-doğusunda, İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında sifira çok yakın değerler almaktadır. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılım grafiklerine bakıldığında, en yüksek ortalama dalga enerji periyodu farklarının yaklaşık 0,5 sn değerinde olduğu görülmekte olup bu değer aralık, ocak, şubat ve ağustos aylarında İzmit Körfezinin doğusunda temmuz ayında ise İzmit Körfezinin kuzey doğusu ile birlikte Marmara Adası İle Avşa Adası arasında kalan alanda gözlemlenmiştir. Bütün aylarda, Gemlik körfezinin kuzey doğu kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Marmara Denizi'nin kuzey doğusunda ve İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bütün aylarda, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, İzmit Körfezinin doğusunda, Tekirdağ ile ve Bursa İli kıyılarında CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmüştür.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarından, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının farklarının alansal dağılım grafiklerine göre, bu model sonuçlarından üretilen en büyük ortalama dalga enerji periyodu farkı yaklaşık olarak 0,7 sn değerindedir. Bu değerdeki ortalama dalga enerji periyodu farkları aralık, ocak, şubat ve ağustos aylarında İzmit Körfezinin doğusunda gözlemlenirken, temmuz ayında ise, İzmit Körfezinin kuzey doğusu ile Avşa Adasının kuzey doğusunda ve Avşa Adası ile Marmara Adası arasında kalan alanda



gözlemlenmiştir. Ayrıca, nisan ve haziran ayı hariç bütün aylarda İzmit Körfezinin doğusu, temmuz ve ağustos aylarında Tekirdağ İlinin kuzey kıyılarında ve Marmara adası ile Avşa Adası ve Paşalimanı Adası arasında kalan alan ile birlikte yine temmuz ayında Bandırma Körfezinde ortalama dalga enerji periyodu farkının yaklaşık 0,6 sn olduğu alanlar gözlemlenmiştir. Bu grafiklere bakıldığında, bütün aylarda ortalama dalga enerji periyodu farklarının Gemlik Körfezinin kuzey doğusunda, Marmara Denizinin kuzey doğusunda, İstanbul kıyısında bulunan adaların kuzey kıyılarında, Erdek Körfezinde ve Erdek Körfezinin batısında sıfıra çok yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir.

#### **4.2.5 Kritik Bir Dalga Yüksekliği Değerinden (0,5 m, 1 m ve 2 m) Belirgin Dalga Yüksekliğinin Daha Büyük Olma Olasılığı**

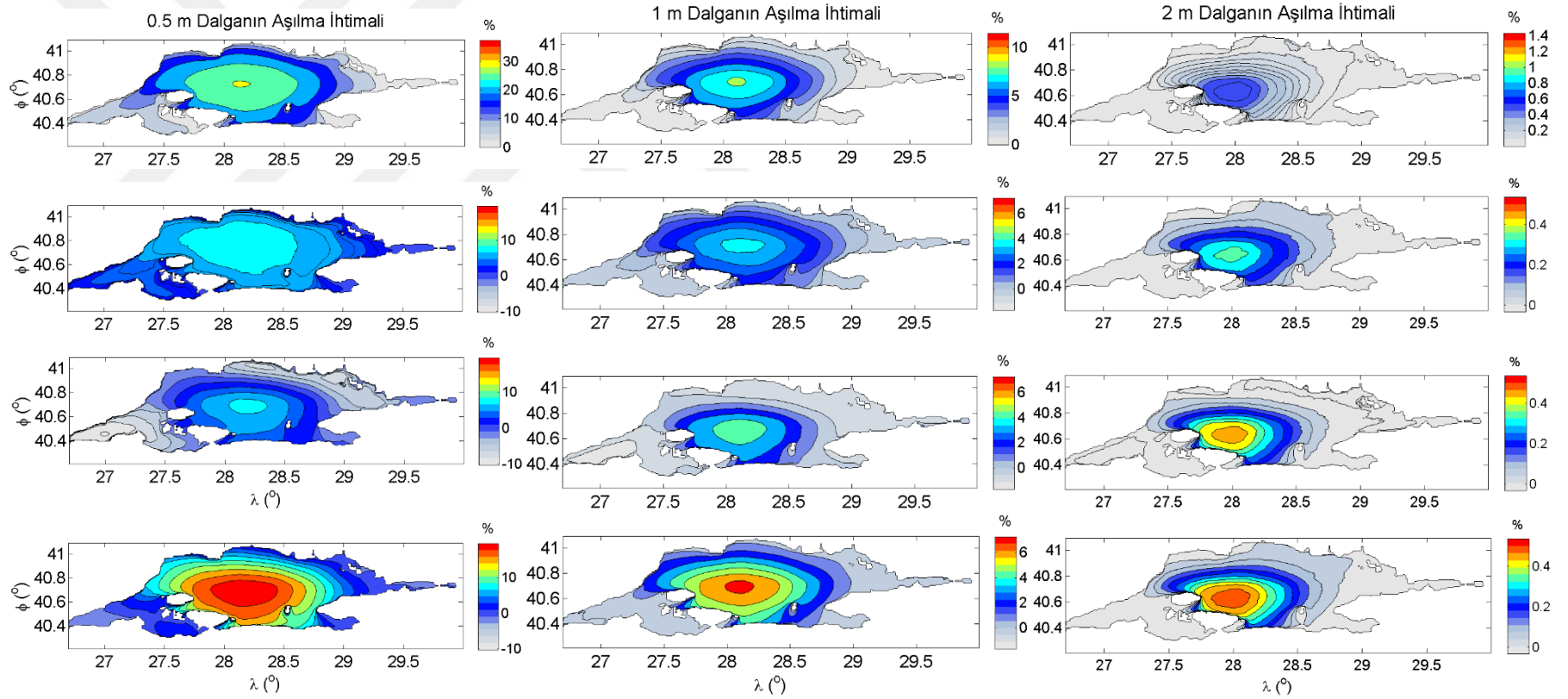
Bu bölümde, geliştirilen modellerin uzun dönemli analizleri 31 yıllık 2 saatlik çözünürlükte biriktirilmiş belirgin dalga yüksekliği tahminlerinden 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimleri elde edilerek irdelenmiştir. Bu amaçla, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş 2 saatlik belirgin dalga yüksekliği tahminlerinden elde edilen yıllık ortalama 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinden diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri farklarının alansal dağılım grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.40'da sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin alansal dağılım grafiklerine göre (Şekil 4.40, ilk sütun), 0,5 m ve 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin en büyük değerleri (0,5 m'lik dalgalar için %30, 1m'lik dalgalar için %8) Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülürken 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin en büyük değerleri ise (%0,4-%0,6 arasında) Kapıdağ Yarımadası ve Marmara Adasının kuzey kıyılarına yakın alanlarda görülmektedir. Bütün dalga yükseklikleri için aşılma ihtimalleri Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe azalmaktadır. Marmara Denizi'nin kuzey doğu kıyılarında, körfezlerde ve Marmara Denizi'nin güney-batısında Çanakkale

boğazına doğru olan alanda bütün yükseklikler için aşılma ihtimalleri sıfıra yakın değerler almaktadır. Bursa İlinin batı kıyılarında 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri %15 olurken Bursa ilinin doğu kıyılarında ise bu değer %10'dur. 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri ise, Bursa ilinin batı kıyılarında %4 civarında iken doğu kıyılarında sıfır değerindedir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinden, diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farklarının alansal değişim grafiklerine göre, en büyük farklar ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından üretilmiş olup Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde %15 civarındadır. Bütün modellerde, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri azalmaktadır. Ancak, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından üretilen 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri farkları, Marmara Denizi'nin ortalarından kıyılara doğru giderken önce azalmakta daha sonra Marmara Denizi'nin kuzey-doğu kıyılarında, körfezlerde ve Marmara Denizi'nin güney batısında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modele göre daha yüksek ihtimalli tahminler yaptığı görülmektedir. Bu alanlar dışında kalan bölgelerde ise, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek ihtimalli tahminler verdiği de anlaşılmaktadır. 0,5 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri farklarının Bursa kıyılarındaki en düşük değerleri (%0-%5) ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından üretilirken en yüksek farklar (%5-%15) ise ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edilmiştir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinden, diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farklarının alansal değişim grafiklerine bakıldığında ise, en yüksek farklar (%7) yine ERA Interim rüzgarlarını kullanan

varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde üretilmiştir. 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farkları da bütün modellerde Marmara Denizi'nin kuzey doğusunda, güney batısında ve körfezlerde sıfıra yakın değerler almaktadır. Ayrıca, Marmara Denizi'nin güney batısında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek ihtimalli tahminler yaptığı görülmektedir. CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından Bursa İlinin batı kıyılarında üretilen farklar %2 civarında değerler alırken ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından ise yaklaşık %5'lik farklar tahmin edilmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinden, diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farklarının alansal değişim grafiklerine göre, bütün modeller için farkların çok küçük değerler aldığı görülmektedir. Elde edilen en yüksek fark değerleri ise, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından Marmara Denizi'nin orta bölgesinde Kapıdağ Yarımadasının kuzeyine yakın bir alanda elde edilmiş olup % 0,5 civarındadır.



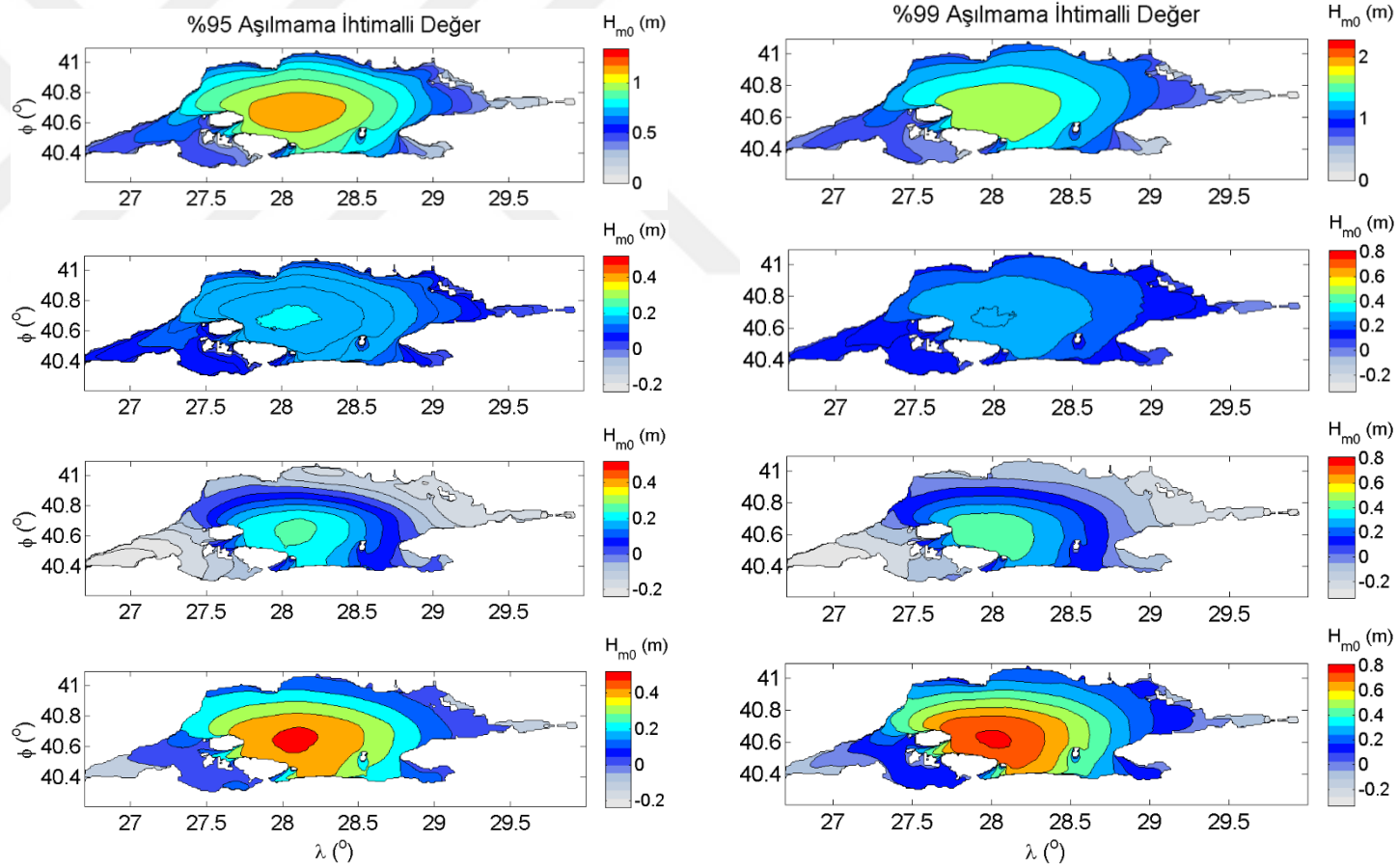
**Şekil 4.40.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m (ilk sütun), 1 m (ikinci sütun) ve 2 m'lik (üçüncü sütun) dalgaların aşılma ihtimallerinin (ilk satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimalleri - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN 0,5 m, 1 m ve 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

#### 4.2.6 %95 ve %99 Aşılmama İhtimalli Belirgin Dalga Yükseklikleri

Geliştirilen modellerin uzun dönemli analizleri, %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimleri elde edilerek de irdelenmiştir. Bu amaçla üretilen, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılım grafikleri Şekil 4.41’de sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılım grafiklerine göre (Şekil 4.41, İlk Sütun), Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde %95 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri 1 m - 1,2 m arasında değerler alırken %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri ise 1,5 m – 2 m arasında değerler almıştır. Ayrıca, Kapıdağ Yarımadasının ve Marmara Adasının kuzey-doğu kıyılarında %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri de 1,5 m – 2 m arasındadır. Her iki aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri Marmara Denizi’nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe azalmakta olup İzmit, Gemlik ve Erdek Körfezleri ile birlikte İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında sıfıra çok yakın değerler almaktadır. Bursa ilinin batı kıyılarında %95 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri 0,8 m- 1,0 m arasında değerler alırken %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yükseklikleri ise 1 m - 1,5 m arasındadır. Bursa İlinin doğu kıyılarında ise her iki aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin batı kıyılarına göre daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin farklarının alansal dağılım grafiklerine bakıldığında, her iki aşılmama ihtimalli değer içinde, en büyük farklar ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN modellerden Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde üretilmiştir. Burada, %95

aşılmama ihtimali belirgin dalga yüksekliği farkları yaklaşık 0,5 m, %99 aşılmama ihtimali belirgin dalga yüksekliği farkları ise 0,8 m civarındadır. Her iki aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliği farklarına göre Körfezlerde, Marmara Denizi'nin kuzey-doğusunda ve Marmara Denizi'nin güney-batısında ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Diğer bölgelerde ise, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler verdiği de anlaşılmaktadır. Ayrıca, her iki aşılmama ihtimalli değer içinde İzmit körfezinde, İstanbul Adalarının kuzey kıyılarında ve Marmara Denizi'nin güney-batı kıyılarında Çanakkale Boğazına doğru olan alanda ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir. Bu grafiklere göre, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına en yakın tahminlerin CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçları ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Bursa İli kıyılarında %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliği farklarının en yüksek değerleri ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından (%95 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliği farkları için 0.4 m, %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliği farkları için 0,6 m - 0,8 m arasında) Bursa İlinin batı kıyılarında üretilirken en düşük farklar ise ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından Bursa ilinin doğu kıyılarında elde edilmiştir. Doğu kıyılarında her iki aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliği farkları yaklaşık sıfırdır.

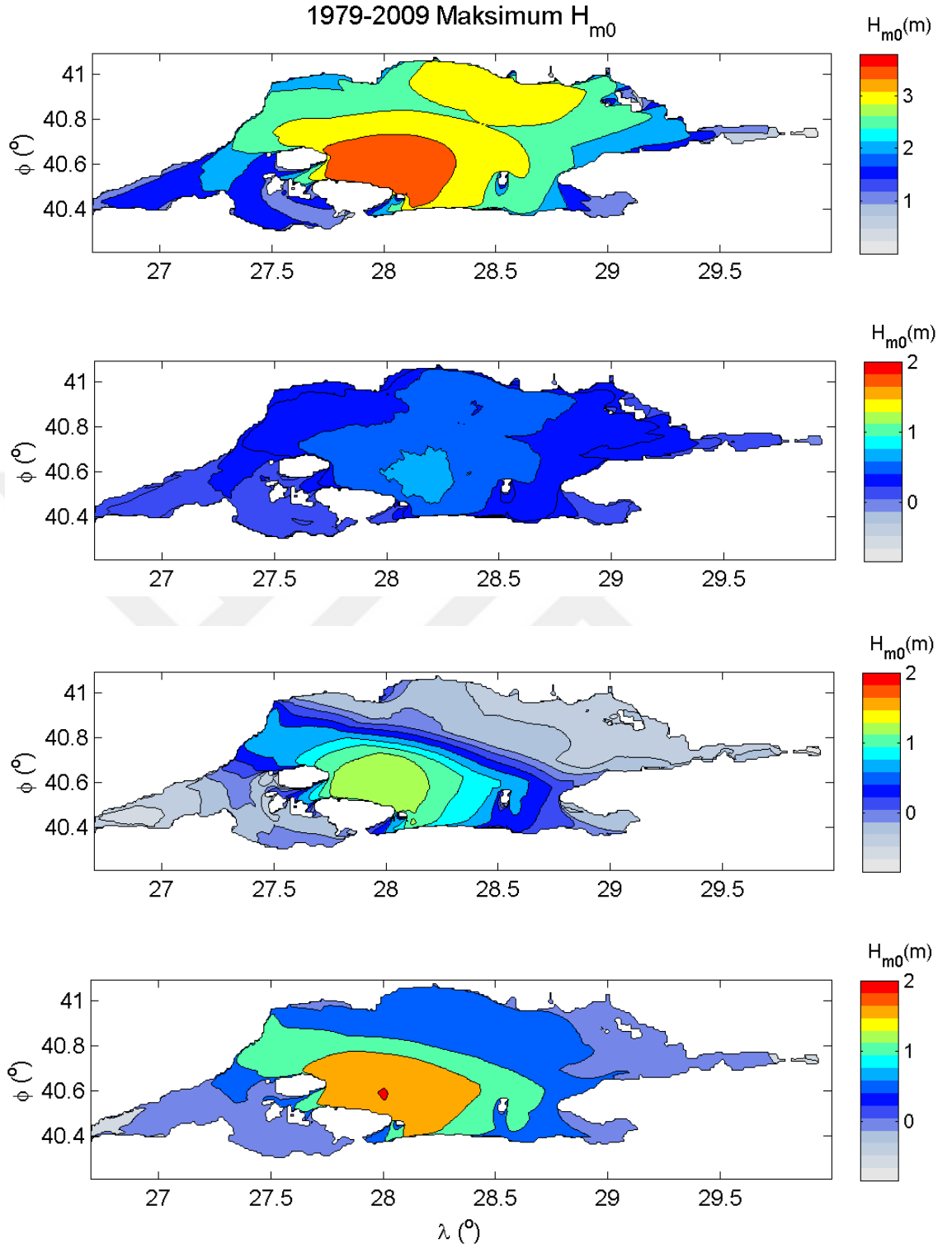


**Şekil 4.41.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 (ilk sütun) ve %99 (ikinci sütun) aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN %95 ve %99 aşılmama ihtimalli  $h_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

#### 4.2.7 Maksimum Belirgin Dalga Yükseklikleri ( $H_{m0}$ )

Geliştirilen modellerin uzun dönemli analizleri son olarak, 2 saatlik zamansal çözünürlükte uzun dönemli biriktirilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin 31 yıl boyunca tahmin edilmiş maksimum değerlerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişimleri elde edilerek irdelenmiştir. Bu amaçla üretilen, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık (1979-2009) süre için elde edilmiş maksimum belirgin dalga yüksekliklerinin ve CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş maksimum belirgin dalga yüksekliklerinden diğer 3 model sonuçlarından 31 yıllık süre için elde edilmiş maksimum belirgin dalga yükseklikleri farklarının alansal dağılım grafikleri Şekil 4.42’de sunulmuştur. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) maksimum belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılım grafiklerine göre (Şekil 4.42, ilk satır), 31 yıl boyunca en büyük maksimum belirgin dalga yükseklikleri 3,79 m civarında Marmara Denizi’nin orta bölgelerinde, Marmara Adası’nın doğu kıyılarında ve Kapıdağ Yarımadası’nın kuzey ve doğu kıyılarında oluşmuştur. Ayrıca, yine Marmara Denizi’nin orta bölgeleri ile birlikte İstanbul’un güney kıyılarında Silivri açıkları ve kıyı şeridinde ve Bursa İlinin batı kıyılarında 3 m’lik maksimum belirgin dalga yükseklikleri tahmin edilmiştir. Marmara Denizi’nin orta bölgelerinden kıyılara doğru gidildikçe maksimum dalga yüksekliklerinin azaldığı da görülmüştür. Ayrıca, kıyıya yaklaşırken ada ve körfezler ile etkileşime girilen alanlarda maksimum dalga yüksekliklerinde azalmaların daha da fazla olduğu da görülmektedir. Böylece, en düşük maksimum dalgalar İzmit, Erdek ve Gemlik körfezlerinin doğusu ile birlikte İstanbul adalarının kuzey kıyılarında Çanakkale Boğazına doğru adalar arkasında kalan alanda, Marmara adalarının güneyinde ve batısında kalan alanlarda maksimum dalga yükseklikleri küçük değerler almıştır. Bu model sonuçlarından, Bursa ili kıyılarında tahmin edilen maksimum belirgin dalga yüksekliklerinin batı tarafında 3 m gibi yüksek değerlerden doğuya doğru azalarak 1,5 m olduğu da görülmektedir.





**Şekil 4.42.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliğinin maksimum değerlerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN max  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN max  $H_{m0}$  (ikinci satır), ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN max  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN max  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinden, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinin farklarının alansal dağılımlarına göre (Şekil 4.42, ikinci satır); en büyük maksimum dalga yüksekliği farkları, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde görülmekte olup 0,6 m civarındadır. Ayrıca, İstanbul İlinin batı kıyılarından, Bursa İlinin batı kıyılarına (Marmara Denizi'nin orta bölgesinden) uzanan alanda maksimum dalga yüksekliği farkları 0,5 m olarak tahmin edilmiştir. Bu alanlar haricinde bütün Marmara Denizinde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler üretmiştir. Bu model sonuçlarından Bursa ilinin batı kıyılarında tahmin edilen maksimum dalga yüksekliği farkları 0,6 m civarında olurken doğu kıyılarında ise 0,3 m civarındadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinden, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model ile 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinin farklarının alansal dağılımlarına göre (Şekil 4.42, üçüncü satır); en büyük maksimum dalga yüksekliği farkları, Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Kapıdağ Yarımadasının kuzey kıyılarında 1,2 m civarında oluşmuştur. Ayrıca, Tekirdağ ilinin güney-doğu kıyılarından Bursa ilinin batı kıyılarına uzanan alanda maksimum dalga yüksekliği farkları 0,5-1,2 m arasında değerler almaktadır. Bu alanda, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre, daha yüksek tahminler verdiği de anlaşılmaktadır. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kuzey-doğu ve güney-batı kıyılarına doğru giderken maksimum dalga yükseklikleri önce azalarak sifira yakın değerler almakta daha sonra tekrar artarak ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı anlaşılmaktadır.

CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinden, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model ile 31 yıl boyunca tahmin edilmiş belirgin dalga yüksekliklerinin maksimum değerlerinin farklarının alansal dağılımları irdelendiğinde ise (Şekil 4.42, dördüncü satır); Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde en büyük maksimum dalga yüksekliği farklarının 2 m civarında olduğu ve bunun da diğer 2 model kıyaslamasında elde edilen farklardan daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Kapıdağ Yarımadası'nın kuzey kıyılarında, Marmara Adası'nın kuzey-doğu kıyılarında ve Balıkesir İlinin doğu kıyılarında maksimum dalga yüksekliği farklarının 1,5 m olduğu görülmektedir. Ayrıca, İzmit Körfezinin doğusunda ve Marmara Denizi'nin güneybatısında Çanakkale boğazında doğru olan alanda, ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarının, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre 0,6 m civarında daha yüksek tahminler yaptığı görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, Marmara Denizi için yüksek çözünürlüklü ve doğrulukta bir rüzgar dalga tahmin modeli geliştirilmiştir. Bunun için, ECMWF ve NOAA'nın en güncel iki yeniden analiz veri seti (ERA Interim ve CFSR) dalga tahmin modeline girdi olarak tanımlanmıştır. Modeller, her bir rüzgar için, en etkin fiziksel parametre olan köpüklenme katsayısının uygun değerleri araştırılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyonlarda Silivri istasyonunda ölçülmüş dalga yüksekliği verileri kullanılmıştır. Ayrıca, bu rüzgar veri setlerinin kaliteleri de Silivri istasyonunda ölçülmüş rüzgar hızı verileri kullanılarak test edilmiştir. Modellerin doğrulanması 2003 yılındaki Ambarlı ve 1990 yılındaki Ereğli dalga yükseklik ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ardından model ayarları üzerinde birçok test yapılmıştır. Son olarak iki rüzgar veri kaynağı ile varsayılan ve kalibre edilen SWAN modeller ile 4 farklı 31 yıllık veri seti türetilmiştir. Türetilen bu veri setleri yardımıyla, tüm Marmara Denizi üzerinde ortalama rüzgar hızı, belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga enerji periyodunun uzun dönemli alansal değişimleri, kritik bir değerden daha büyük olma olasılıklarının yıllık ortalama alansal dağılımları, %95 ve %99 aşılma ihtimali belirgin dalga yüksekliklerinin yıllık ortalama alansal dağılımları ve son olarak uzun dönemli maksimum belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımları belirlenmiş ve kıyaslamalı olarak irdelenmiştir.

Marmara Denizi'nde yüksek çözünürlüklü ve doğrulukta bir rüzgar dalga tahmin modeli geliştirilmesine ilişkin çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- Silivri ölçüm istasyonuna CFSR ve ERA Interim tahmin veri setlerinin rüzgar verilerinin indirgenmesinde kullanılan interpolasyon yöntemlerinden bu çalışmada dikkate alınanların performansının, SWAN'ın kullandığı bi-lineer interpolasyon metodunun performansından daha kötü olduğu ve böylece SWAN'ın interpolasyon yönteminin tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.
- Dikkate alınan yıllar boyunca bütün veriler dikkate alındığında, CFSR rüzgarlarının ölçümlerle ERA Interim rüzgarlarına kıyasla daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

- ERA Interim, düşük şiddetteki rüzgarları ( $U < 4$  m/sn) CFSR veri setine kıyasla daha iyi tahmin ettiği belirlenmiştir. Orta şiddetteki rüzgarlar (4 m/sn - 8 m/sn) her iki rüzgar kaynağı tarafından birbirine yakın bir doğrulukta tahmin edildiği sonucuna varılmıştır. Şiddetli rüzgarların ( $U > 8$  m/sn) ise, CFSR tarafından, ERA Interim rüzgarlarına kıyasla daha iyi tahmin edildiği belirlenmiştir.
- Ölçüm istasyonunda gözlemlenen hakim rüzgar yönlerinin hem ERA Interim hem de CFSR rüzgarları ile uyum içerisinde olduğu, ancak fırtına yönlerinin CFSR veri seti ile daha doğru tahmin edildiği, ERA Interim veri seti tarafından fırtına yönlerinin yakalanamadığı sonucuna varılmıştır.
- Rüzgar dalga modellemesinde kullanılan sayısal dalga tahmin modelinin kapsadığı süreçlerden köpüklenmenin ve bu sürecin ayarlanabilir parametresinin ( $C_{ds}$ ) model performansı üzerine önemli derecede etki ettiği tespit edilmiştir. Ölçüm istasyonunun bulunduğu konum itibari ile derin denizde olması sebebiyle diğer fiziksel süreçler ve onların ayarlanabilir parametrelerinin model performansına etkisi olmamıştır.
- Hesaplamalı karelej çözünürlüğü, kullanılan rüzgarların artırılması ve bazı sayısal parametrelerin model performansına olumlu yönde bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model için rüzgar kaynaklı dalga büyümesi KOMEN, köpüklenme formülasyonu JANSSEN ve köpüklenme katsayısı  $C_{ds}=1.0$  olarak ayarlanan kombinasyonun diğerlerine kıyasla daha düşük hataya ve daha yüksek korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir.
- ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model için ise rüzgar kaynaklı dalga büyümesi KOMEN, köpüklenme formülasyonu KOMEN ve köpüklenme katsayısı  $C_{ds}=0.5e-5$  olarak ayarlanan kombinasyonun diğerlerine kıyasla ölçümlerle daha fazla uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki rüzgarı kullanan SWAN model için de, Marmara Denizi'nde oluşturulan modelde daha düşük köpüklenme katsayısının daha doğru sonuçlara erişmeye katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.
- CFSR ve ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modellerin performanslarının, varsayılan ayarlamalı SWAN modele göre sırasıyla yaklaşık 1% ve 9% oranında geliştiği belirlenmiştir. Bu oran, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilen SWAN modelin daha fazla geliştiğini göstermektedir. Ancak, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model, sahip olduğu daha düşük hata ve daha yüksek

kolerasyon ile ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN modele göre daha iyi bir performans göstermiştir.

- ERA Interim rüzgarlarını kullanan SWAN model, hesaplama zaman aralığının 30 dakikadan daha düşük değerlerine karşı duyarlı değilken, CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN modelin çok düşük bir hassasiyetinin olduğu belirlenmiştir.
- Sakin dalgalar (<0,5 m) sınıfına giren dalga yüksekliklerini CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN modelin, 0,5 m ile 1 m arasındaki yükseklikli dalgaları CFSR rüzgarlarını kullanan en iyi ayarlamalı (kalibre edilmiş) SWAN modelin ve 1,5 m'den daha büyük yükseklikteki dalgaları ise, ERA Interim rüzgarlarını kullanan en iyi ayarlamalı (kalibre edilmiş) SWAN modelin diğerlerine kıyasla daha iyi tahmin ettiği tespit edilmiştir.
- Rüzgar güllerinde ölçümlerin frekans bakımından hakim yönünün ve aynı zamanda bireysel fırtınaların yönlerinin kuzey-doğu olduğu, CFSR ve ERA Interim rüzgarları ile frekans bakımından dikkate alınan hakim yönün ölçümlerle uyumlu olduğu, ancak bireysel fırtınaların yönlerinin CFSR rüzgarları ile yakalanabildiği görülmüştür.
- Dalga güllerindeki frekans açısından baskın yönler ve bireysel fırtınaların yönleri, CFSR rüzgarlarını kullanan en iyi ayarlamalı SWAN model tarafından diğerlerine kıyasla ölçüm verileri ile daha uyumlu tahmin edilmiştir.
- Sakin dönemi yansıtan dalgaların toplam içerisindeki oranları, CFSR rüzgarlarını kullanan en iyi ayarlamalı SWAN modeller ile hem bütün veri hem de her mevsim için ölçüm verileri ile daha uyumlu tahmin edilmiştir. Diğer modellerde ise bu oran daha yüksek bulunmuştur.
- Her iki rüzgar ile SWAN modelin kalibre edilmesi durumunda sakın dönemlerin toplam içindeki paylarının ölçümlerinkine yaklaşmakta olduğu ve varsayılan modellerin dalga yüksekliklerini gerçektekenden çok daha düşük tahmin ettiği belirlenmiştir.
- Düşük şiddetli rüzgarların (<2 m/s) ERA Interim veri setinde CFSR veri setine göre daha başarılı tahmin edilmişken, orta şiddetteki rüzgarlar (2 – 6 m/s) ERA Interim tarafından biraz yüksek ve CFSR tarafından ise biraz düşük tahmin edilmiştir. Şiddetli rüzgarlar ise, ERA Interim tarafından tahmin edilemezken (maksimum 12 m/s) CFSR tarafından (yaklaşık 16,3 m/s) iyi bir şekilde doğru tahmin edilmiştir. Bununla birlikte, 2 m yüksekliğinde gözlemlenen en büyük dalga yüksekliği değerleri yalnızca CFSR

rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tarafından yakalanabilmiş, diğer modeller bu değeri oldukça düşük tahmin etmiştir.

- Farklı yinelenme sürelerine sahip ekstrem tasarım dalgaları, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilen SWAN model tarafından ölçümlerinkine daha yakın tahmin edilmektedir. Ayrıca, her iki rüzgarı kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN modeller ile daha düşük tasarım dalgaları elde edilmektedir.
- Bütün kıyaslama sonuçlarına dayanarak CFSR rüzgarlarını kullanan en iyi ayarlamalı SWAN modelin (rüzgar kaynaklı dalga büyümesi KOMEN & köpüklenme formülasyonu JANSEN ve  $C_{ds} = 1.0$ ), Marmara Denizi'nde dalgaların modellenmesinde ve ekstrem dalgaların tahmininde önerilmektedir.
- Şu anki model ayarlaması yalnızca Silivri istasyonundaki belirgin dalga yüksekliklerine dayanarak yürütülmüştür. Modelin, Marmara Denizi'nin diğer bölgelerinde de doğruluğunun ispat edilebilmesi ve diğer istasyon ölçümlerine göre de ayarlamaların kontrol edilmesi ve gerekirse düzeltilmesi için bölgede daha fazla ölçüm istasyonunun kurulmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Model ayarlamasında dikkate alınan bazı süreçler, belirgin dalga yüksekliğinden ziyade dalga periyodu üzerine daha fazla etkin olabilmektedir. Bundan dolayı, ölçüm istasyonlarında belirgin dalga yüksekliği dışında diğer parametrelerin de ölçümüne ihtiyaç duyulmaktadır.
- Model tahminleri, bölgenin yapısı gereği çok fazla etki olan parametre ve/veya durumun (feç sınırlı şartlar, deniz kara etkileşimi, hava-deniz etkileşimi vb.) mevcut olması nedeniyle özellikle rüzgarların kalitelerine çok fazla duyarlıdır. Daha yüksek zamansal çözünürlükteki CFSR rüzgarlarının daha kaba zamansal çözünürlüklü ERA Interim rüzgarlarına göre, rüzgarları daha iyi tahmin ettiği ve bunun da dalga tahminlerine yansıdığı görülmektedir. Bundan dolayı, bu rüzgarlardan daha kaliteli rüzgarlar model tahminlerini iyileştirebilecektir. Bunun için, WRF gibi hava tahmin modelleri kullanılarak yerel rüzgarların daha doğru tahmin edilmesi tavsiye edilmektedir.

Marmara Denizi'nde 31 yıllık uzun dönemli yıllık, mevsimlik ve aylık ortalama rüzgar ve dalga parametrelerinin ve maksimum dalga şartlarının alansal değişimlerinin irdelenmesine ilişkin çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- CFJR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama rüzgar hızlarının en yüksek 5 m/sn civarında Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara yaklaştıkça ortalama rüzgar hızlarının azaldığı ve kıyılara yaklaşırken adalar ve körfezler ile etkileşime giren alanlarda rüzgar hızlarındaki azalmanın büyüdüğü ve Gemlik, İzmit ve Erdek Körfezleri ve Çanakkale Boğazına doğru olan bölgede minimum değere ulaşarak 3 m/s civarında olduğu tespit edilmiştir.
- Ortalama rüzgar hızı açısından, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde CFJR rüzgarları, ERA Interim rüzgarlarına göre 1 m/sn daha yüksek tahminler yaparken, Marmara Denizi'nin kuzey-doğusunda ve güney-batısında ERA Interim rüzgarları, CFJR rüzgarlarına göre 1 m/sn daha yüksek tahminler üretmiştir.
- Marmara Denizi üzerinde kış mevsiminde en yüksek ve ilkbahar mevsiminde en düşük ortalama rüzgar hızları gözlemlenirken, diğer mevsimlerde ortalama şartların birbirine yakın olduğu ve mevsimsel ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılımlarının uzun dönemli ortalama rüzgar hızının alansal dağılımları ile şiddetleri farklı olsa da benzerlik gösterdiği görülmüştür.
- CFJR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen uzun dönemli ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılımları, ortalama rüzgar hızlarının alansal dağılımları ile uyumludur. En yüksek ortalama belirgin dalga yükseklikleri, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde yaklaşık 0,4 m olarak tahmin edilmiş ve Marmara Denizi'nin orta bölgelerinden kıyılara yaklaştıkça ve ada ve körfez etkileri ile ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin azaldığı görülmüştür.
- Ortalama belirgin dalga yüksekliklerini, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, CFJR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarının diğerlerine kıyasla daha yüksek tahmin ettiği ve en yakın tahminlerin CFJR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model sonuçlarından elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, Marmara Denizi'nin kuzey doğu ve güney batı kıyı bölgelerinde ERA Interim rüzgarları ile çalıştırılan SWAN modellerin CFJR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modele göre daha yüksek tahminde bulunduğu da tespit edilmiştir.
- Ortalama rüzgar hızlarında olduğu gibi, Marmara Denizi üzerinde kış mevsiminde en yüksek ve ilkbahar mevsiminde en düşük ortalama belirgin dalga yükseklikleri gözlemlenirken, diğer mevsimlerde ortalama şartların birbirine yakın olduğu ve



mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılımlarının uzun dönemli ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin alansal dağılımları ile şiddetleri farklı olsa da benzerlik gösterdiği görülmüştür.

- CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga periyodlarının en yüksek değerleri Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, Bursa ili ve Tekirdağ ili kıyılarında 1,8 sn civarında belirlenmiştir. Genel olarak, ortalama dalga periyotları kıyılara yaklaşırken, adalarla karşılaşılan alanlarda ve körfez içlerinde azalırken sadece İzmit körfezinin doğu kıyılarına doğru gidildikçe tekrardan artış göstermiştir.
- Ortalama dalga periyodu açısından, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçları, ERA Interim rüzgarlarını kullanan her iki model sonuçlarına kıyasla tüm deniz üzerinde daha yüksek değerler ortaya çıkarmıştır.
- CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerji periyodlarının en yüksek değerleri Tekirdağ ilinin güney kıyılarında 2,5 sn olarak tahmin edilmiştir. CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen ortalama dalga enerji periyodlarının alansal dağılımı, ortalama dalga periyodlarının alansal dağılımları ile benzerlik göstermektedir.
- 31 yıllık uzun dönemli ortalama dalga enerji periyotlarının alansal dağılımlarına göre, Marmara Denizi'nin orta bölgeleri ile birlikte Bursa ve Tekirdağ İli kıyılarında, Bandırma Körfezi'nde, Marmara Adası ile Kapıdağ Yarımadası arasında kalan alanda ve Marmara adasının batısında Çanakkale boğazına doğru olan alanda CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Marmara Denizi'nin kuzey doğu alanlarında, Gemlik körfezinin kuzey doğu kıyılarında, Erdek körfezinde ve Balıkesir İlının batı kıyılarında ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelin CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarına göre daha yüksek tahminler yaptığı da gözlemlenmiştir.
- Ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga enerji periyodunun mevsimlik değişimleri, rüzgar hızında ve dalga yüksekliğinde gözlemlendiği gibi, en yüksek kış mevsiminde, onu takiben ilkbahar ve daha sonrasında yaz ve sonbahar mevsimlerinde değerler almıştır.

- CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama 0,5 m ve 1 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin en yüksek değerleri (0,5 m'lik dalgalar için %30, 1 m'lik dalgalar için %8) Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde tespit edilmiştir. 2 m'lik dalgaların aşılma ihtimallerinin en büyük değerleri ise (%0,4-%0,6 arasında) Kapıdağ Yarımadası ve Marmara Adasının kuzey kıyılarında elde edilmiştir.
- CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden üretilmiş yıllık ortalama %95 ve %99 aşılmama ihtimalli belirgin dalga yüksekliklerinin en büyük değerleri sırasıyla 1,17 m ve 1,76 m olarak Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde tahmin edilmiştir.
- 31 yıl boyunca Marmara Denizi üzerinde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model tarafından tahmin edilmiş en büyük maksimum belirgin dalga yükseklikleri, Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde, Marmara Adası'nın doğu kıyılarında ve Kapıdağ Yarımadası'nın kuzey ve doğu kıyılarında 3,79 m civarında tespit edilmiştir.
- CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model, CFSR rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN modele göre maksimum dalga yüksekliğini en çok 0,6 metre civarında daha yüksek tahmin ederken ERA Interim kalibre edilmiş ve varsayılan ayarlamalı SWAN modeller göre ise sırasıyla en çok 1,2 metre ve 2 metre civarında daha yüksek tahmin etmiştir.
- 31 yıl boyunca tahmin edilmiş maksimum değerleri, ERA Interim rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model Çanakkale Boğazına doğru olan alanda ve Marmara Denizi'nin kuzey doğu kıyılarında, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden en fazla 0,8 m civarında daha yüksek tahmin ederken ERA Interim rüzgarlarını kullanan varsayılan ayarlamalı SWAN model ise İzmit Körfezinin doğusunda ve Marmara Denizi'nin güney-batısında Çanakkale boğazında doğru olan alanda, CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN modelden en fazla 0,6 m civarında daha yüksek tahmin etmiştir. Bu alanlar haricinde CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model diğer 3 modele göre daha yüksek tahminler üretmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, Marmara Denizi kıyılarında herhangi bir yapının tasarımında ve/veya herhangi bir faaliyetin sürdürülmesinde (örneğin gemi seyahati, liman işletmesi vb.) kullanılabilecek yüksek çözünürlükte ve doğrulukta dört farklı 31

yıllık veri seti üretilmiştir. Bu veri setlerinin bu faaliyetlerin sürdürülebilmesinde kullanılması tavsiye edilmektedir. Bundan sonraki süreçte, fırtınaların bireysel olarak analizleri, dalgaların spektral özelliklerinin analizi ve farklı yinelemeli periyotlu ekstrem dalgaların tahmini üzerine çalışmalar bu veri setleri yardımıyla yürütülebilecektir.



## KAYNAKLAR

- Abdollahzadeh, Y., Erdik, T., Özger, M., Altunkaynak, A. 2014.** Application of MIKE 21 SW for Wave Hindcasting in Marmara Sea Basin for The Year 2012. 11th International Congress on Advances in Civil Engineering- ACE 2014, 21-25 October 2014, İstanbul, Turkey.
- Akpınar, E. K., Akpınar, S. 2004.** Determination of The Wind Energy Potential for Maden-Elazığ, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 45(18): 2901-2914.
- Akpınar, E. K., Akpınar, S. 2005.** A Statistical Analysis of Wind Speed Data Used in Installation of Wind Energy Conversion Systems. *Energy Conversion and Management*, 46 (4): 515-532.
- Akpınar, A. 2012.** Karadeniz’de Dalga Modellemesi Ve Dalga Gücü Potansiyelinin Belirlenmesi. *Doktora Tezi*, KATÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Akpınar, A., Van Vledder, G.Ph., Kömürcü, M.İ., Özger M. 2012.** Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*, 50-51: 80-99.
- Akpınar, A., Bingölbali B., Van Vledder G. 2016.** Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*, 2016 (126): 276-298.
- Akyarlı, A., Öner, D. 1991.** Wave, current and meteorological measurements for LNG terminal near Marmara Ereğlisi, Turkey (final report). Report, Institute of Marine Sciences and Technology, İzmir; Turkey.
- Alpli, R. 2011.** Ege Denizi-Akdeniz Dalga Atlası Ve Küresel İklim Değişiminin Dalga İklimine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Alves, J. H. G., Banner, M. L. 2003.** Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modelling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(6): 1274-1298.
- Appendini, C.M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., Lopez, J., Mendoza, E.T. 2013.** Wave Modelling Performance in The Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind Reanalysis Assessment. *Applied Ocean Research*, 2012(39): 20–30.
- Ardhuin, F., Roland, A. 2013.** The Development of Spectral Wave Models: Coastal and Coupled Aspects. 7th International Congress on Coastal Dynamics, 24-28 June 2013, Arcachon Convention Centre, France.
- Arı, H.A., Yüksel Y., Çevik E. 2007.** Rüzgar-Dalga İklimi Analizi ve Dalga Modellemesi Üzerine Bir Çalışma. 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 25-28 Ekim 2007, İzmir.
- Arkhipkin, V. S., Gippius, F. N., Koltermann, K. P., Surkova, G. V. 2014.** Wind Waves in The Black Sea: Results of a Hindcast Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 2883.
- Battjes, J.A, Janssen, J.P.F.M. 1978.** Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering, 1958, Gainesville, USA.
- Beji, S., Battjes, J.A., 1993.** Experimental investigation of wave propagation over a bar, *Coastal Engineering*, 19: 151-162.

- Booij, N., Ris, R. C., Holthuysen, L. H. 1999.** A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, 1.Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7649-7666.
- Bretschneider, C.L. 1958.** Revisions in Wave Forecasting; Deep and Shallow Water. Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering, 1958, Gainesville, USA.
- Cavaleri, L., Malanotte-Rizzoli, P. 1981.** Wind Wave Prediction in Shallow Water: Theory and Applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86 (C11): 10961-10973.
- Chen, Y., Xie, D., Zhang, C., Qian, X. 2013.** Estimation of Long-Term Wave Statistics in The East China Sea. *Journal of Coastal Research*, 65(1):177-182.
- Collins, J. I. 1972.** Prediction of Shallow-Water Spectra. *Journal of Geophysical Research*, 77(15): 2693-2707.
- Çakmak, R.E. 2015.** Karadeniz’de Rüzgar Veri Kaynaklarının Kıyaslamalı Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- 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, National Institute for Coastal & Marine Management, The Delft University of Technology, Netherlands.
- DHI, 2007.** MIKE 21 SW. Spectral Wave FM Model User Module.[http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/COURSES/MANUALS/DHI\\_water\\_resources\\_software/MIKE21-River\\_hydraulics\\_and\\_morphology/MIKE21\\_SW.pdf](http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/COURSES/MANUALS/DHI_water_resources_software/MIKE21-River_hydraulics_and_morphology/MIKE21_SW.pdf)
- Dingemans, M.W. 1997.** Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms. Part 1 Linear Wave Propagation. Advanced Series on Ocean Engineering Vol:13, World Scientific, Singapore, 471 pp.
- Donelan, M.A. 1980.** Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods, and Directions. Canadian Coastal Conference, National Research Council of Canada, 1980, Canada.
- 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, Physical and Engineering Sciences*, 315(1534), 509-562.
- ECMWF, 2016.** ECMWF Overview. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <http://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are/> 14 Mart 2016.
- Eldeberky, Y., Battjes, J.A. 1995.** Parameterization of Triad Interactions in Wave Energy Models. Proceedings of Coastal Dynamics Conference, 1995, Gdansk, Poland.
- Ergin, A. 2002.** Kıyı Mühendisliği. Türkiye Mühendislik Haberleri, 2012 (420-421-422): 60-64.
- Fyrippis, I., Axaopoulos, P. J., Panayiotou, G. 2010.** Wind Energy Potential Assessment in Naxos Island, Greece, *Applied Energy*, 87(2): 577-586.
- GEBCO, 2014.** GEBCO Overview. General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)
- Gelci, R., Cazalé, H. ve Vassal, J. 1957.** Prévission 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(1957): 416-435.

**Gippius, F., Myslenkov, S.A., Stoliarova E., Arkhipkin V. 2016.** Wave Climate of The Black Sea's Coastal Waters During The Last Three Decades. Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World, EMECS'11, SeaCoasts XXVI, 22-27 August 2016, Peterburg, Russia.

**Goda, Y. 1979.** A Review on Statistical Interpretation of Wave Data. Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, 1979 (18): 5-32.

**Guillou, N., Chapalain, G. 2015.** Numerical modelling of nearshore wave energy resource in the Sea of Iroise. *Renewable Energy*, 83, 942-953.

**Gülersoy T., Çetin N.S. 2010.** Menemen Bölgesinde Rüzgar Türbinleri için Rayleigh ve Weibull Dağılımlarının Kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 13(3): 209-213.

**Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P. A. 1992.** The WAM Model Cycle 4.0. Deutsches Klimarechenzentrum Techn. Report No:4, Hamburg, Germany

**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 white capping. *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., Miller, P., Olbers, D., J., Richter, K., Sell, W. ve Walden, H. 1973.** Measurements of Windwave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe*, Deutsches Hydrographisches Institute, Hamburg, Germany, 95 pp.

**Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H., Barnett, T. P. 1985.** Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11): 1378-1391.

**Janssen, P.A. 1989.** Wave-Induced Stress and The Drag of Air Flow Over Sea Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 19(6): 745-754.

**Janssen, P. A. 1991a.** Quasi-Linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(11), 1631-1642.

**Janssen, P.A. 1991b.** Consequences of The Effect Of Surface Gravity Waves on the Mean Air Flow. International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM), Sydney, Australia, 193-198.

**Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., 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., Hasselmann, K. 1984.** On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8): 1271-1285.

**Kurban, M., Hocaoğlu F.O., Kantar Y. M. 2007.** Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmininde Kullanılan İki Farklı İstatistiksel Dağılımın Karşılaştırmalı Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi: Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1): 103-109.

**Liu, T. F., Ma, F. S. 1980.** Prediction of Extreme Wave Heights and Wind Velocities. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 106(4): 469-479.

**Longuet-Higgins, M. S. 1952.** On The Statistical Distributions of The Heights of Sea Waves. *Journal of Marine Research*, 11(3): 245-265.

- Madsen, O. S., Poon, Y. K., Graber, H. C. 1988.** Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(21): 492-504.
- Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers, A. L. 2002.** Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. John Wiley & Sons, Amherst, USA.
- Massel, S.R. 1996.** Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. World Scientific Publishing Co., No. 9810221096, Singapore, 508 pp.
- Miles, J. W. 1957.** On the Generation of Surface Waves by Shear Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(2): 185-204.
- Mirhosseini, M., Sharifi, F., Sedaghat, A. 2011.** Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1): 449-459.
- Moeini, M.H., Etemad-Shahidi, A. 2007.** Application of Two Numerical Models for Wave Hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29(3): 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.
- Muzathik, A. M., Nik, W. W., Samo, K. B., Ibrahim, M. Z. 2011.** Ocean Wave Measurement and Wave Climate Prediction of Peninsular Malaysia. *Journal of Physical Science*, 22(1): 77-92.
- Neelamani, S., Al-Salem, K., Rakha, K. 2007.** Extreme Waves for Kuwaiti Territorial Waters. *Ocean Engineering*, 34(10), 1496-1504.
- NOAA, 2016.** NOAA Overview, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <http://www.noaa.gov/about-our-agency/> 14 Mart 2015
- Ou, S. H., Liau, J. M., Hsu, T. W., Tzang, S. Y. 2002.** Simulating Typhoon Waves by SWAN Wave Model in Coastal Waters of Taiwan. *Ocean Engineering*, 29(8), 947-971.
- Özhan, E., Abdalla, S. 1993.** Wave Climatology of the Turkish Coast: NATO TU-WAVES Project. In Proceedings of the 1st International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 93, 2-5 November 1993, Antalya, Turkey.
- Özhan, E., 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.
- Özger, M. 2007.** Dalga Enerjisi Tahmini ve Stokastik Modelleme. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Persson, K., Rydén, J. 2010.** Exponentiated Gumbel Distribution for Estimation of Return Levels of Significant Wave Height. *Journal of Environmental Statistics*, 1(3): 1-12.
- Phillips, O. M. 1957.** On the Generation of Waves by Turbulent Wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2 (5): 417-445.
- Pierson, W.J., 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(24): 5181-5202.
- Qin, W., Kirby, J. T., Badiéy, M. 2005.** Application of the spectral wave model SWAN in Delaware Bay. Research Report No CACR-05-09, Delaware, USA.
- Raileanu, A., Rusu, L., Rusu, E. 2015.** Wave modelling with data assimilation in the Romanian nearshore. In *Proceedings of 16th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, IMAM 2015-Towards Green Marine Technology and Transport, 21-24 September*.

- Rogers, W.E., Hwang P.A., Wang D.W. 2003.** Investigation of Wave Growth and Decay in The SWAN Model: Three Regional-Scale Applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2): 366-389.
- Rusu, E., Soares, C. G. 2009.** Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore. *Renewable Energy*, 34(6), 1501-1516.
- Rusu, L., Ivan, A. 2010.** Modelling Wind Waves in The Romanian Coastal Environment. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9(4):547-552.
- Saraçoğlu, K. E. 2011.** Karadeniz ile Marmara Denizi Dalga Modellemesi ve Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Soomere, T. 2005.** Wind Wave Statistics in Tallinn Bay. *Boreal Environment Research*, 10(2):103-118.
- Soukissian, T., Prospathopoulos, A., Korres, G., Papadopoulos, A., Hatzinaki, M., Kambouridou, M. 2008.** A New Wind and Wave Atlas of The Hellenic Seas. In *ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, 791-799
- SWAN, 2014.** SWAN Cycle III Version 40.91ABC User Manual. SWAN Team, Delft University of Technology, Netherlands, 131 pp.
- Sverdrup, H. U., Munk W. H. 1947.** Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting. US Navy Hydrographic Office, Washington, D.C., 44 pp.
- Şahin C. 2007.** Parametrik Rüzgar Dalgası Modellemesi ve Batı Karadeniz Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Tayfun, M. A. 1980.** Narrow-band Nonlinear Sea Waves. *Journal of Geophysical Research*, 85(C3): 1548-1552.
- 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.
- Ucar, A., Balo, F. 2009.** Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation at Six Locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10): 1864-1872.
- U.S. Army. 1984.** Shore Protection Manual. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington (DC), USA, 652 pp.
- U.S. Army, 2003.** Coastal Engineering Manual. Meteorology and Wave Climate, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S. Government Printing Office, Washington (DC), USA, 77pp.
- Van der Westhuysen, A.J. 2007.** Advances in The Spectral Modelling of Wind Waves in The Nearshore. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- Van der Westhuysen, A.J., Zijlema M., Battjes J.A. 2007.** Nonlinear Saturation Based Whiting Dissipation in SWAN for Deep and Shallow Water. *Coastal Engineering*, 54(2):151-170.
- WAMDI group 1988.** The WAM Model: A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12): 1775-1810.
- Weisse, R., Günther, H. 2007.** Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002. *Ocean Dynamics*, 57(3), 161-172.



- Wilson, B. W. 1965.** Numerical Prediction of Ocean Waves in The North Atlantic for December, 1959. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 18(3): 114-130.
- Whitham, G.B. 1974.** Linear and Nonlinear Waves. John Wiley&Sons, NY, USA, 636 pp.
- Wu, J. 1982.** Wind-stress Coefficients Over Sea Surface from Breeze to Hurricane. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C12): 9704-9706.
- Yan, L. 1987.** An Improved Wind Input Source Term for Third Generation Ocean Wave Modelling. Scientific Report WR-No 87-8, De Bilt, The Netherlands.
- Yang, T. C., Fan, Y. M., Lee, B. C., Kao, C. C. 2011.** Long-term Variability And Trends of Wave Climate In the Southern East China Sea And Northwestern Pacific Ocean From 1958 to 2009, Wave Modeling Validation. In *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Yüksel Y., Bilyay E., Unal A., Yerli U., Özmen H., Çevik E., Arı A., Güler I., Yalçın A. C. 2004.** Ambarlı Dalga Ölçüm Verileri. Ulusal Su Günleri 2004, 6-7-8 Ekim 2004, İnciraltı, İzmir.
- Yüksek Ö., Gürses M., Kukul İ. B., Tokgöz A. 2000.** Doğu Karadeniz’de Ölçülen Dalgaların Bazı Özellikleri. 3. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 5-6-7 Ekim 2000, Çanakkale.
- Zijlema, M., Van Vledder, G.P., Holthuijsen, L.H. 2012.** Bottom Friction and Wind Drag for Wave Models. *Coastal Engineering*, 2012(65): 19-26.

## **EKLER**

**EK 1.** Marmara Denizi'nin model hesaplama ağı ile birlikte batimetrik haritası

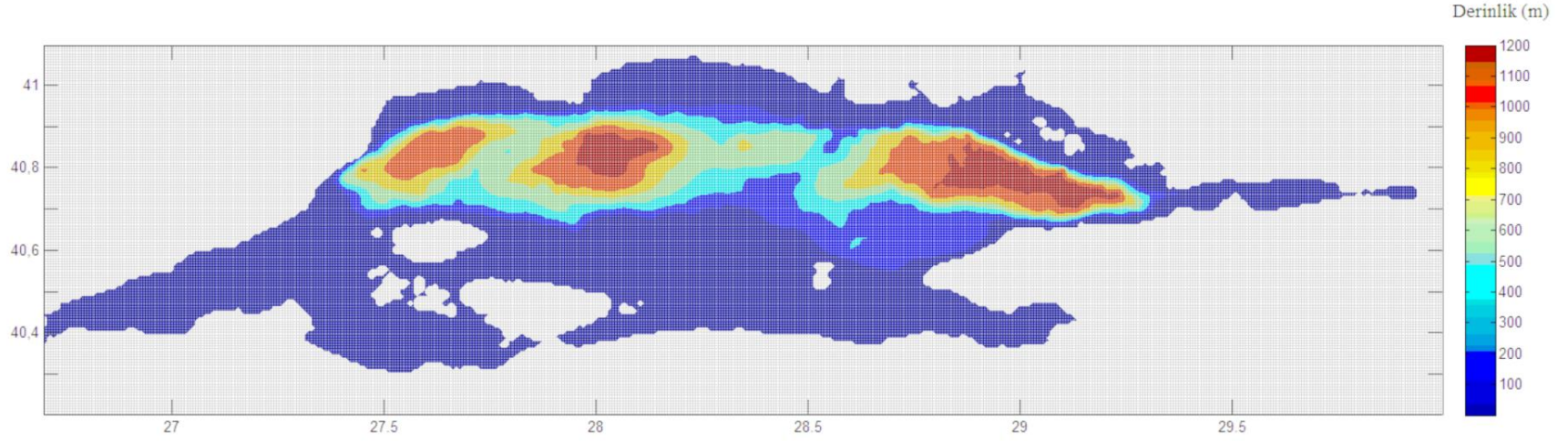
**EK 2.31** yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri

**EK 3.31** yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri

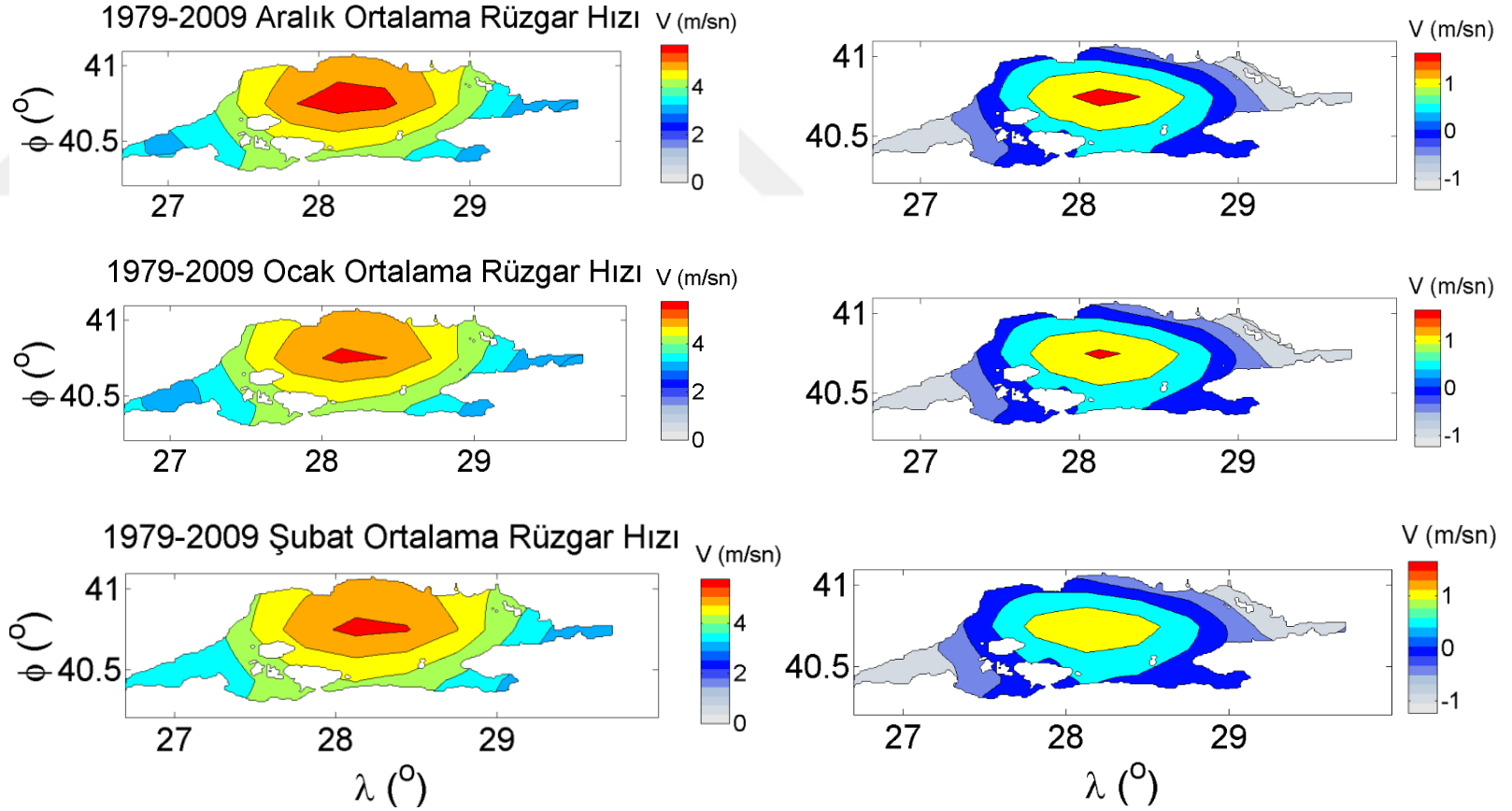
**EK 4.31** yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri

**EK 5.31** yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri

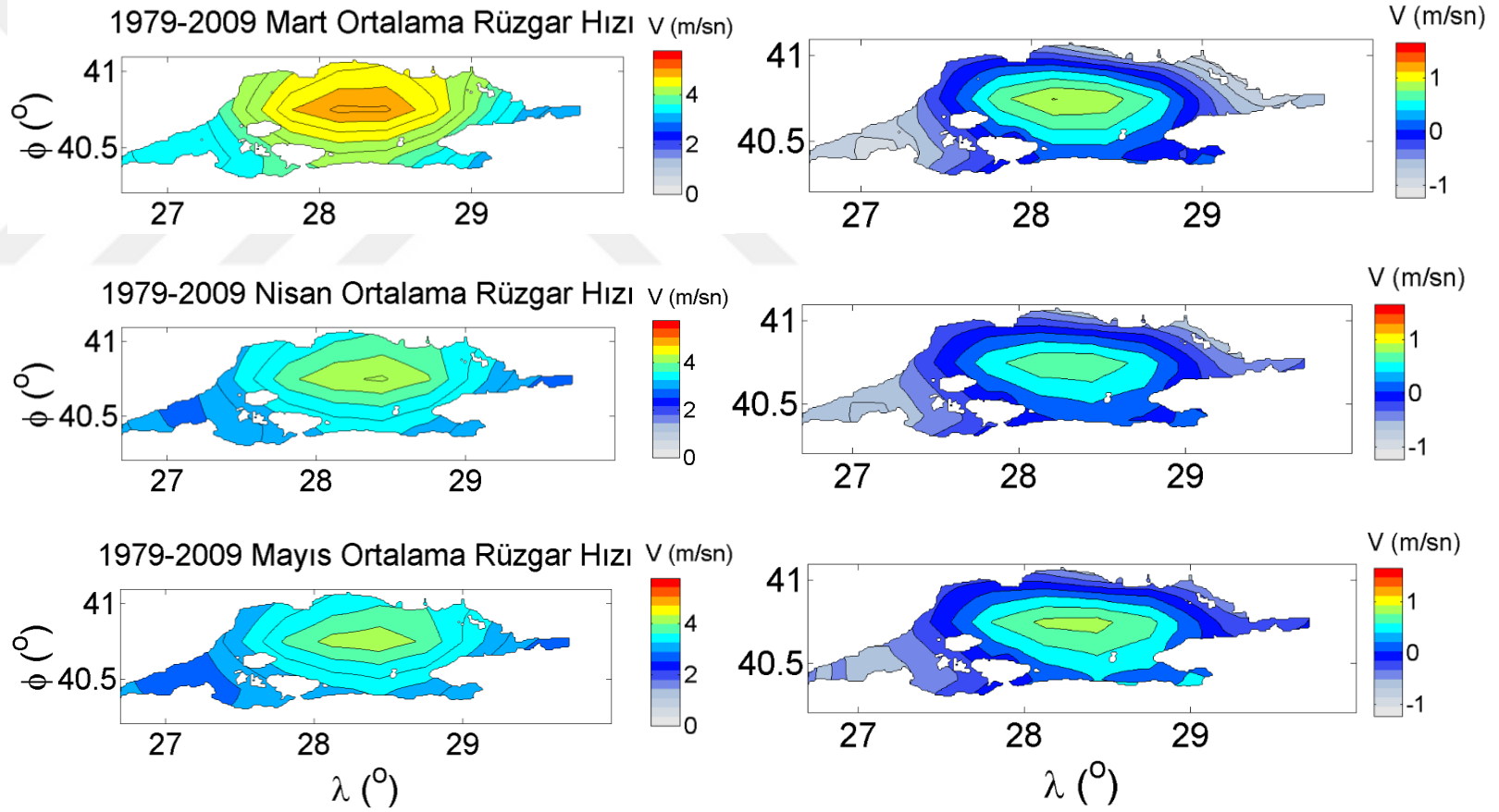
**EK 1. Marmara Denizi'nin model hesaplama ağı ile birlikte batimetrik haritası**



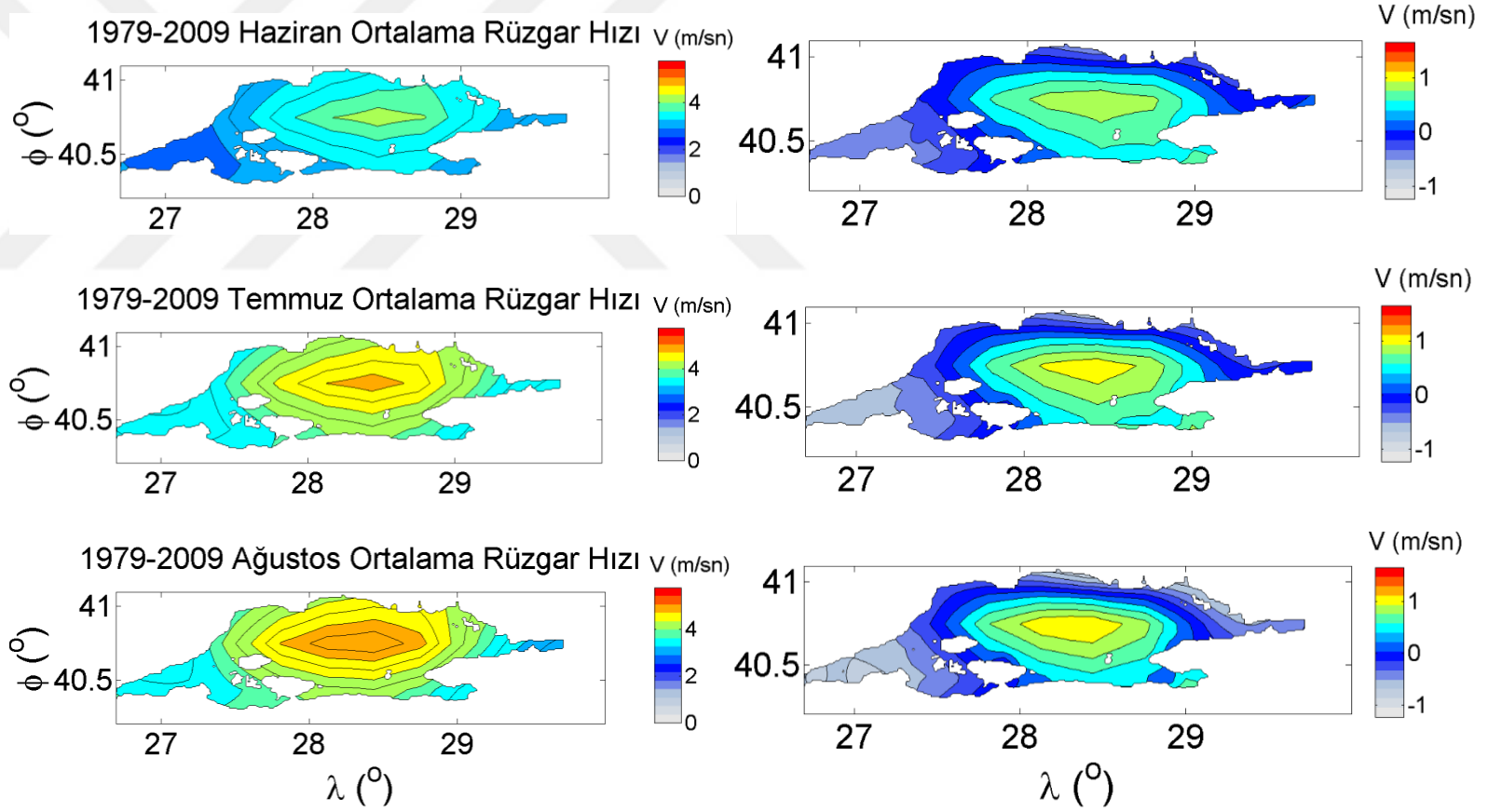
**EK 2. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama rüzgar hızlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri**



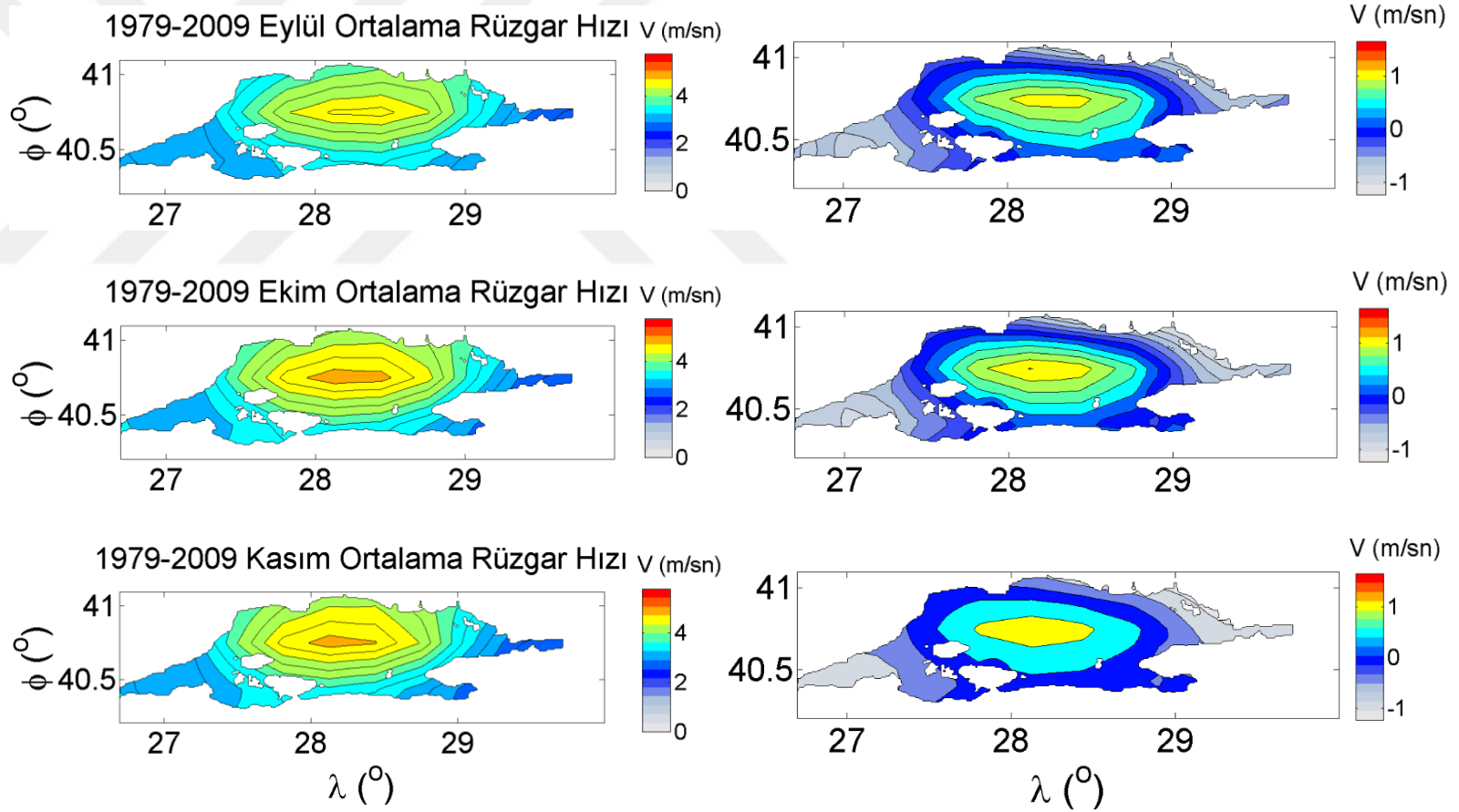
**Ek Şekil 2.1.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (birinci satır:aralık, ikinci satır:ocak ve üçüncü satır: şubat) ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun), CFSR & SWAN aylık ortalama rüzgar hızları - ERA Interim & SWAN aylık rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları



**Ek Şekil 2.2.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (birinci satır:mart, ikinci satır:nisan ve üçüncü satır:mayıs) ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun), CFSR & SWAN aylık ortalama rüzgar hızları - ERA Interim & SWAN aylık rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları

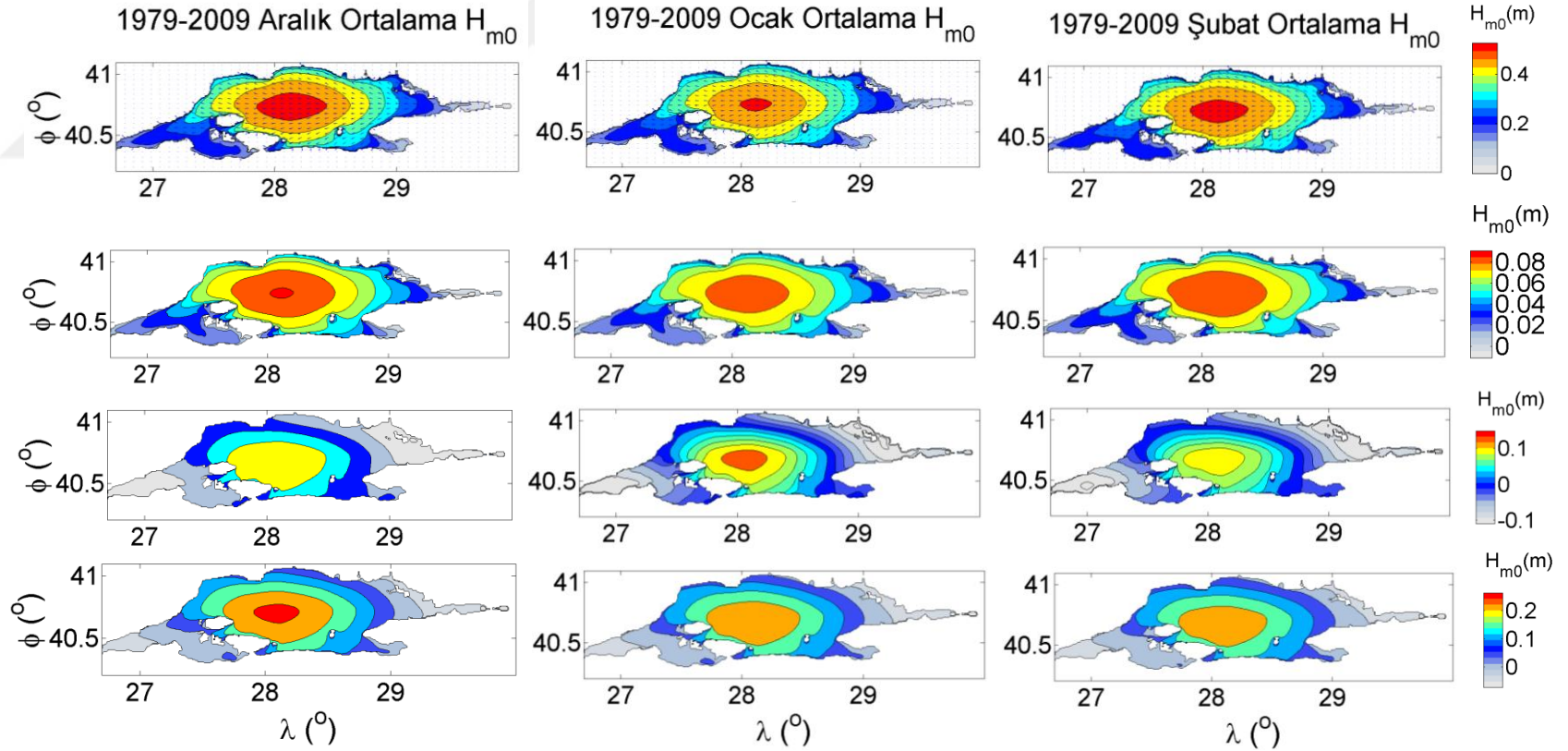


**Ek Şekil 2.3.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (birinci satır:haziran, ikinci satır:temmuz ve üçüncü satır:ağustos) ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun), CFSR & SWAN aylık ortalama rüzgar hızları - ERA Interim & SWAN aylık rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları



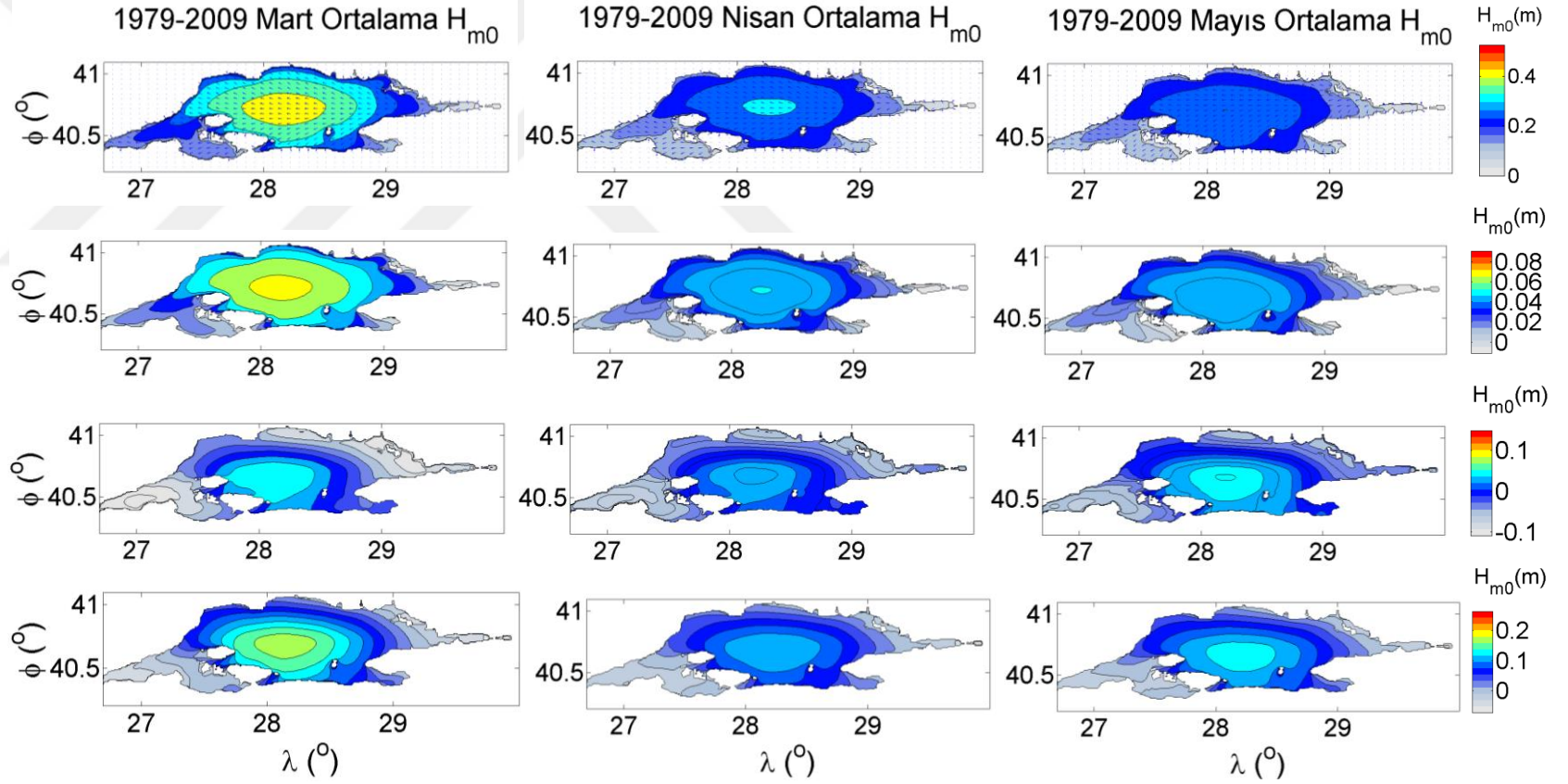
**Ek Şekil 2.4.** CFSR rüzgarlarını kullanan SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (birinci satır:eylül, ikinci satır:ekim ve üçüncü satır:kasım) ortalama rüzgar hızlarının (ilk sütun), CFSR & SWAN aylık ortalama rüzgar hızları - ERA Interim & SWAN aylık rüzgar hızlarının farklarının (ikinci sütun) alansal dağılımları

### EK 3. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri

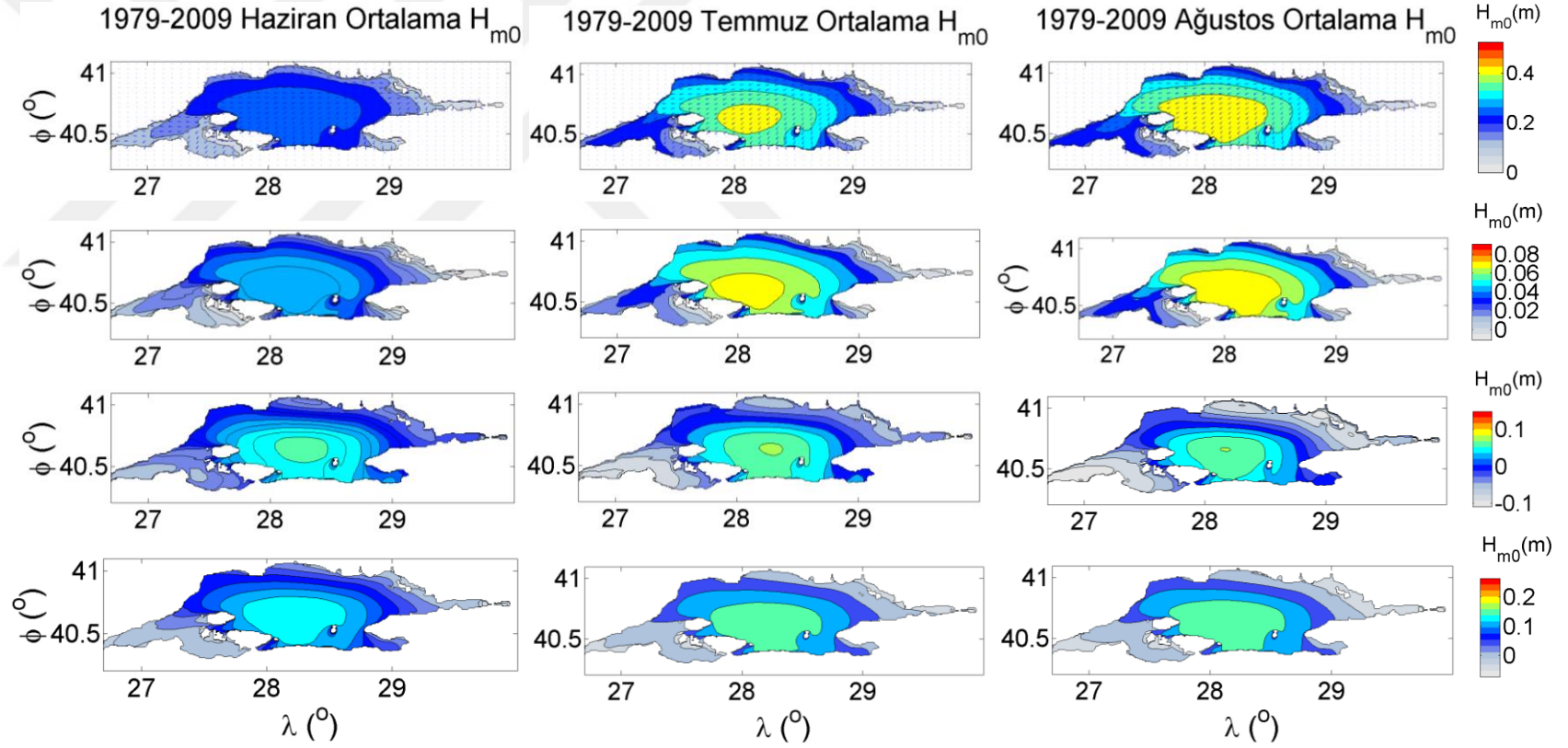


**Ek Şekil 3.1.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (aralık, ocak ve şubat) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

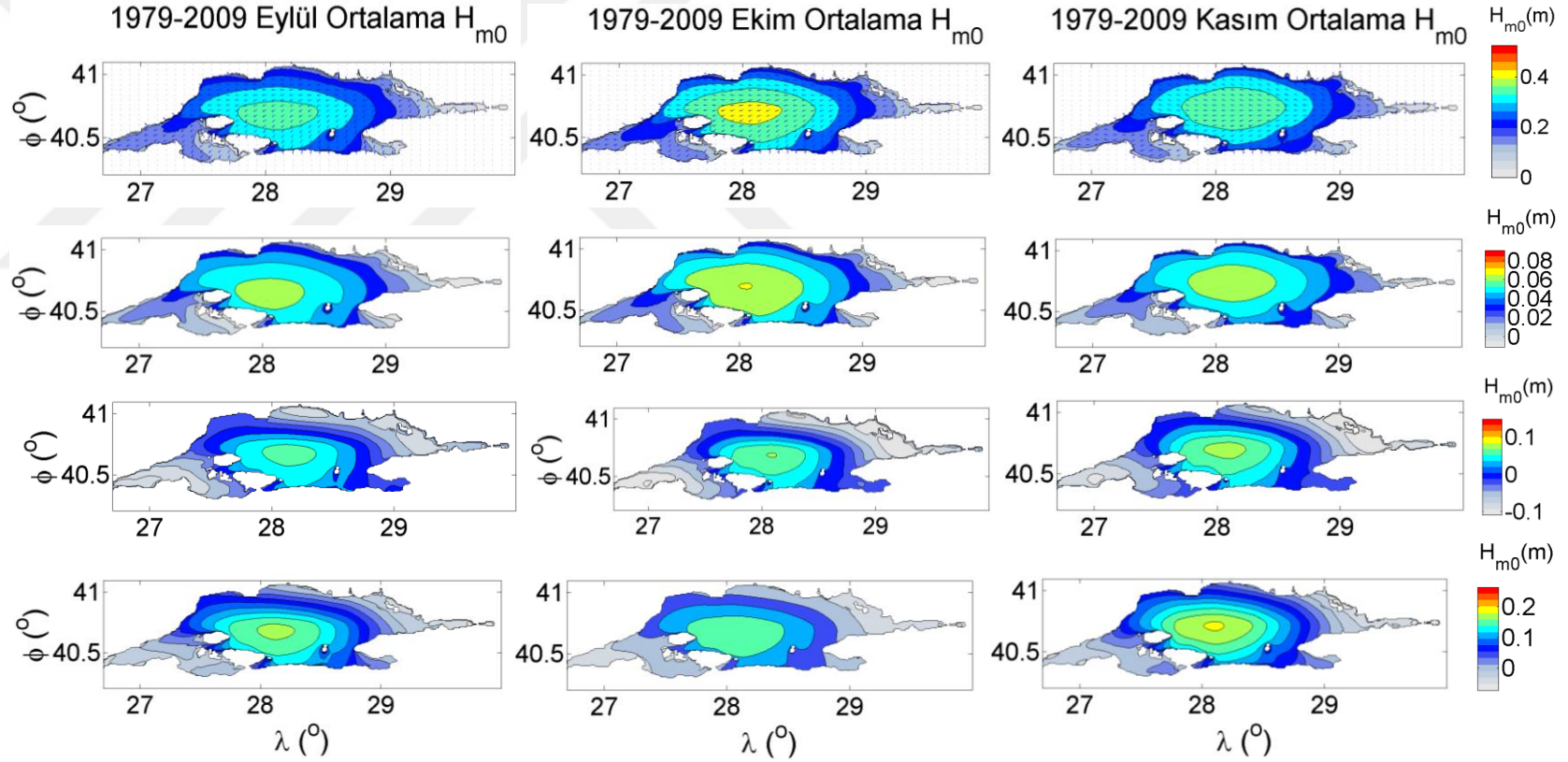




**Ek Şekil 3.2.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (mart, nisan ve mayıs) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

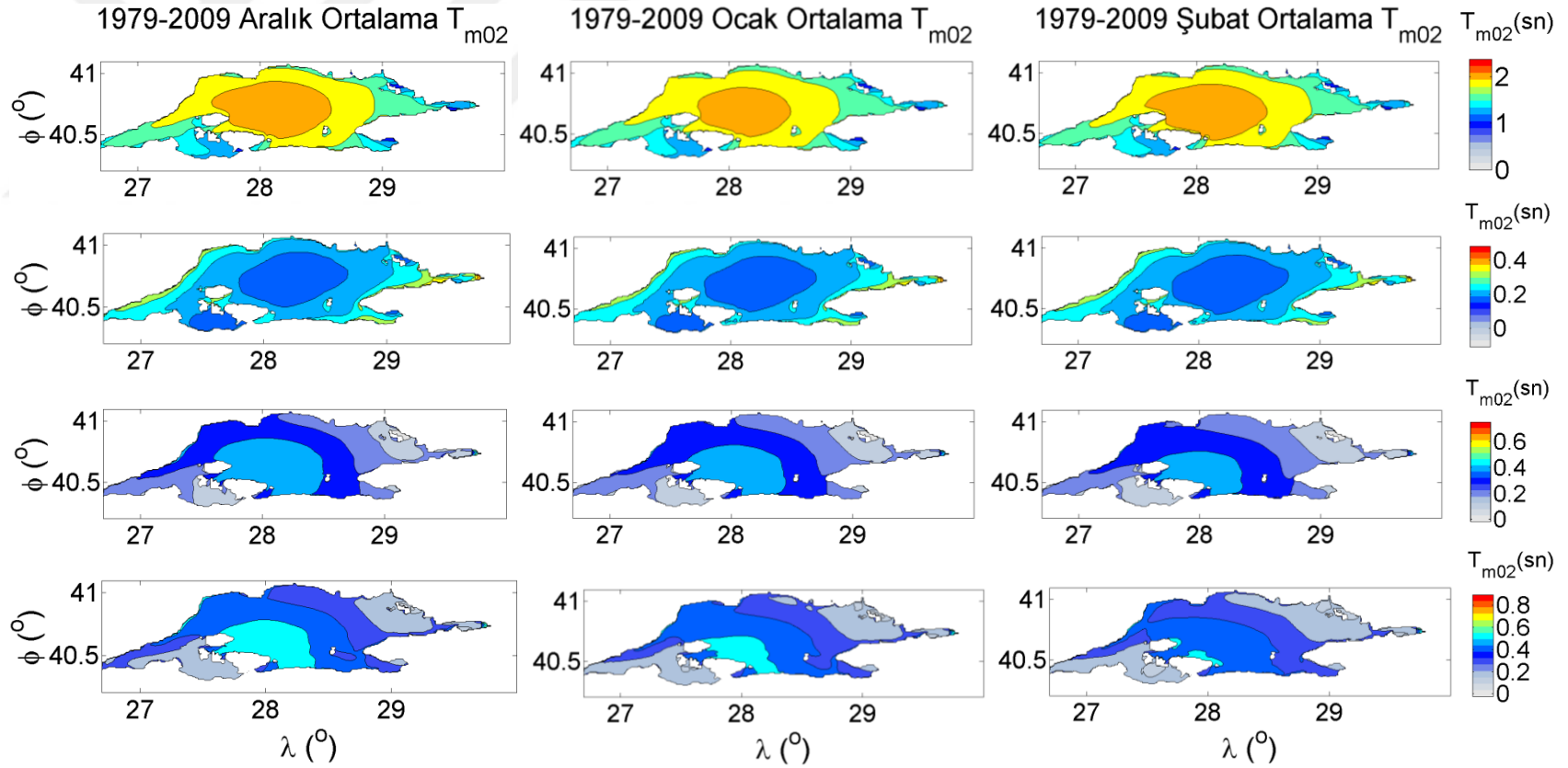


**Ek Şekil 3.3.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (haziran, temmuz ve ağustos) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

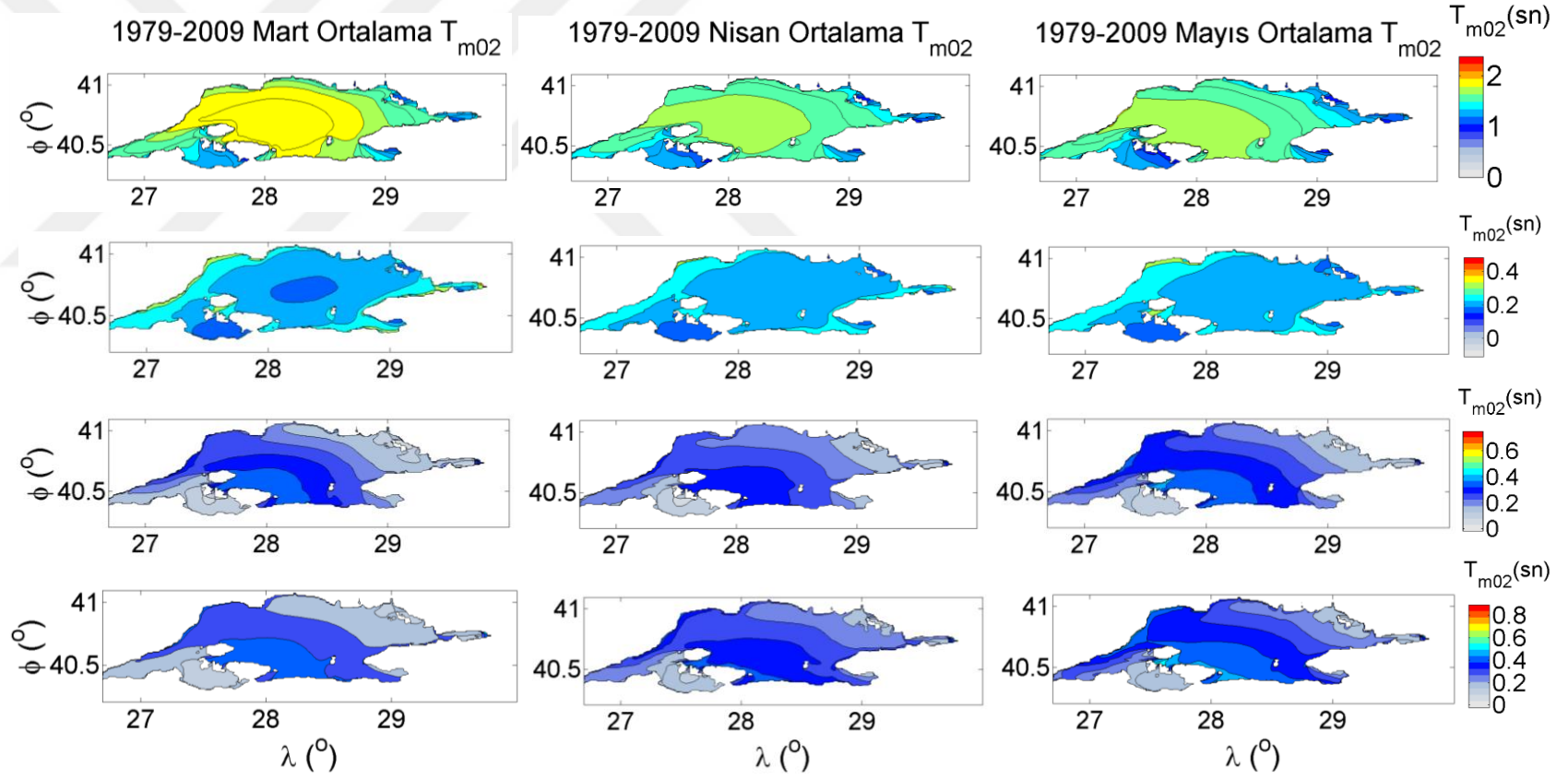


**Ek Şekil 3.4.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (eylül, ekim ve kasım) ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $H_{m0}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

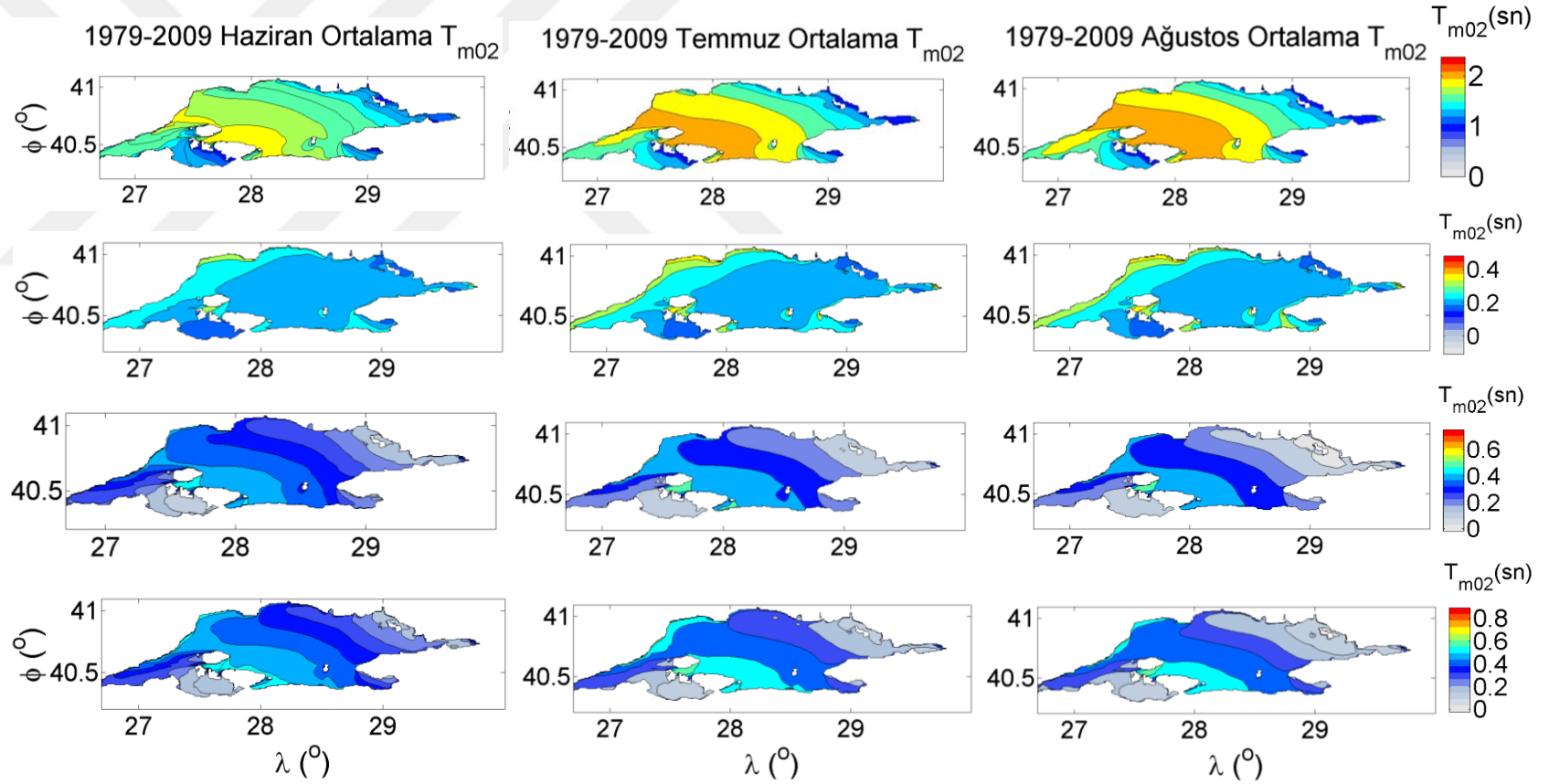
**EK 4. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri**



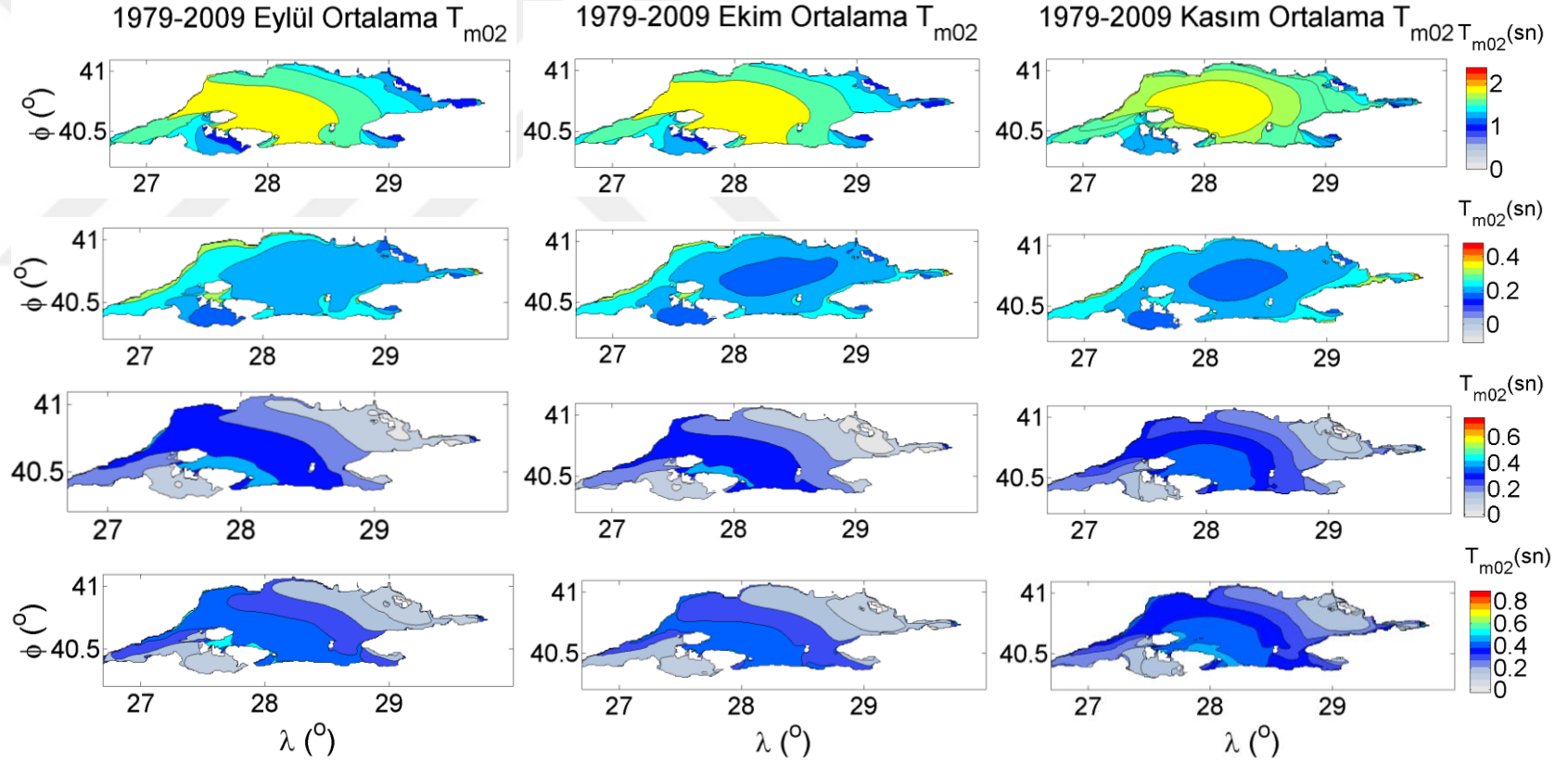
**Ek Şekil 4.1.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (aralık, ocak ve şubat) ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları



**Ek Şekil 4.2.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (mart, nisan ve mayıs) ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

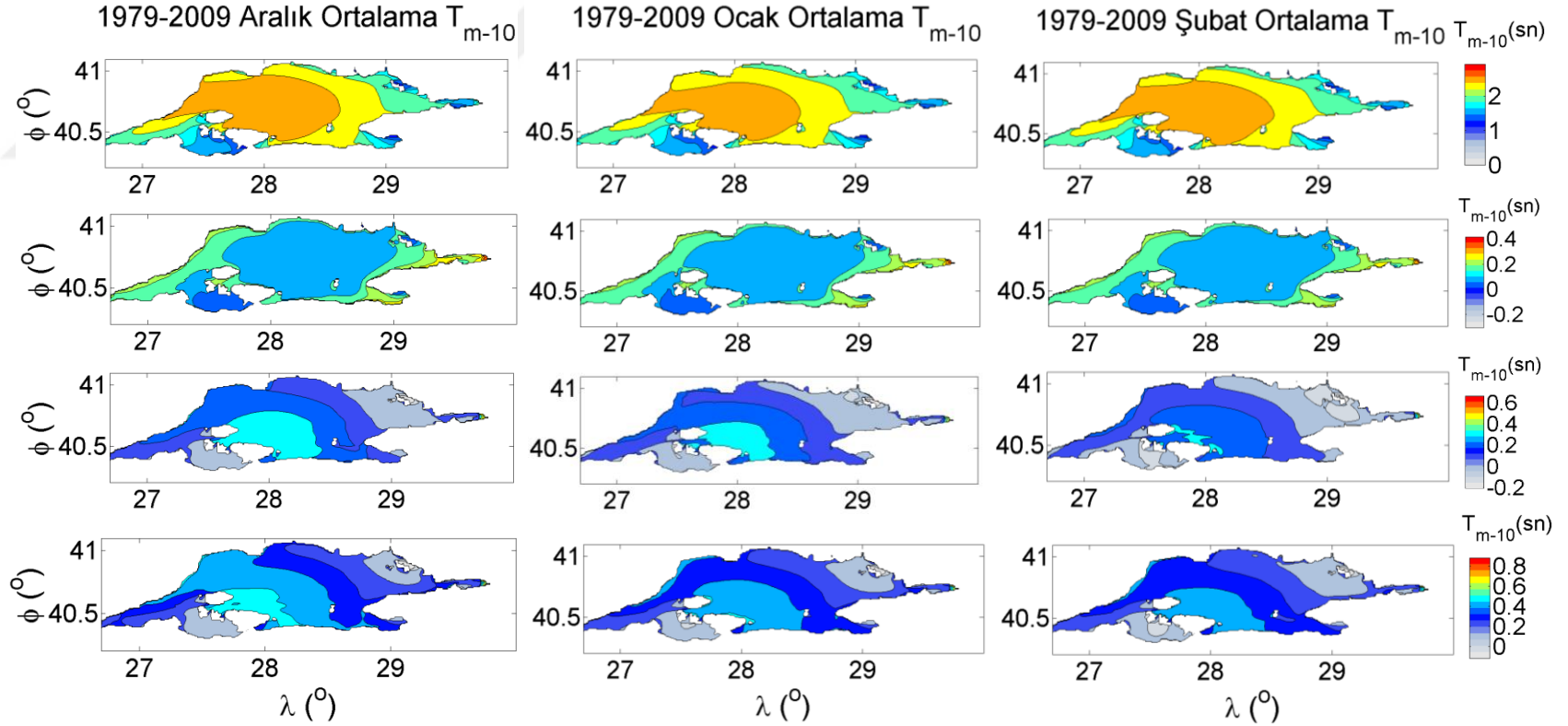


**Ek Şekil 4.3.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (haziran, temmuz ve ağustos) ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları



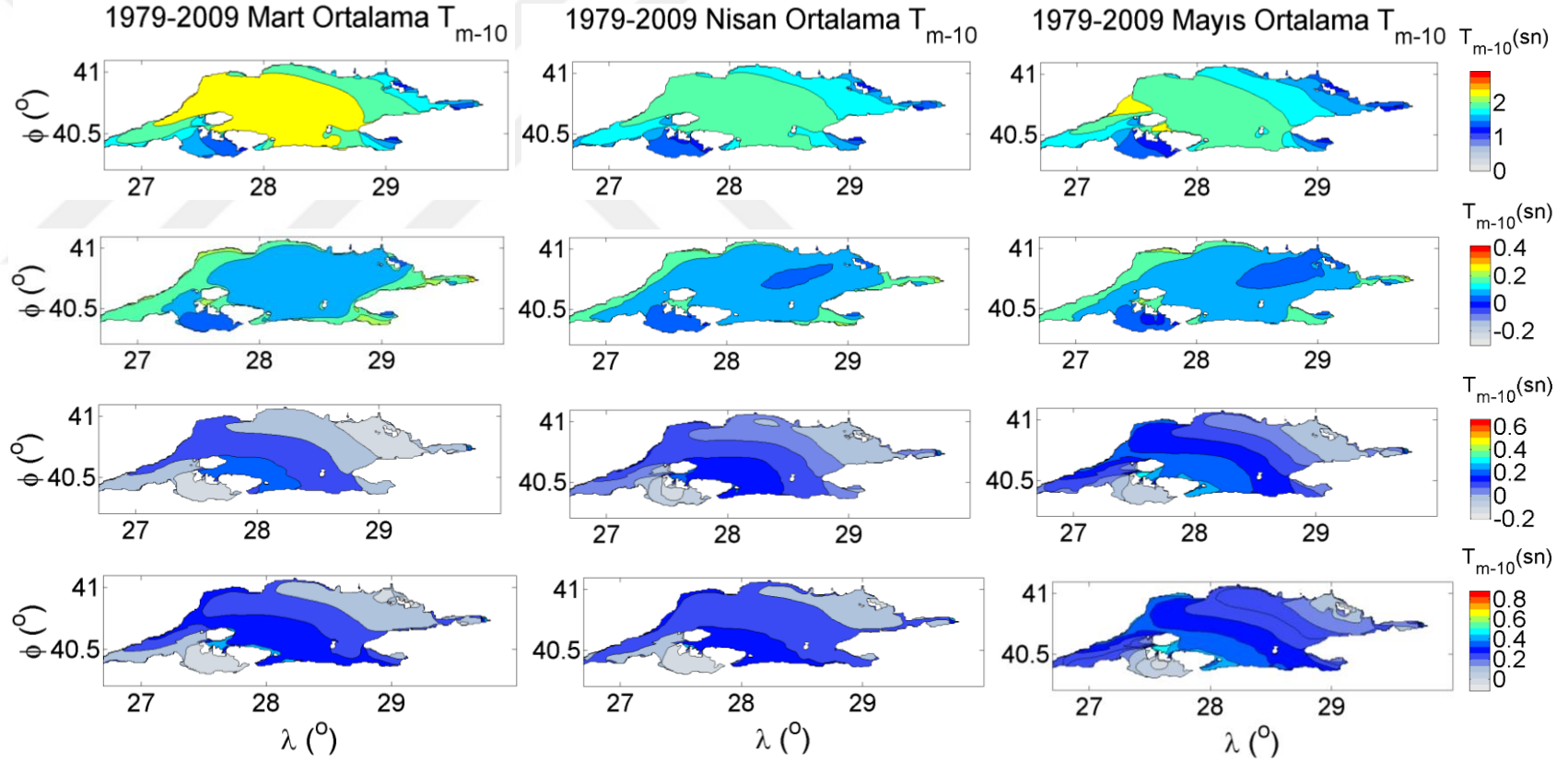
**Ek Şekil 4.4.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (eylül, ekim ve kasım) ortalama dalga periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m02}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

**EK 5. 31 yıllık süre için elde edilmiş aylık ortalama dalga enerji periyodlarının Marmara Denizi üzerindeki alansal değişim grafikleri**

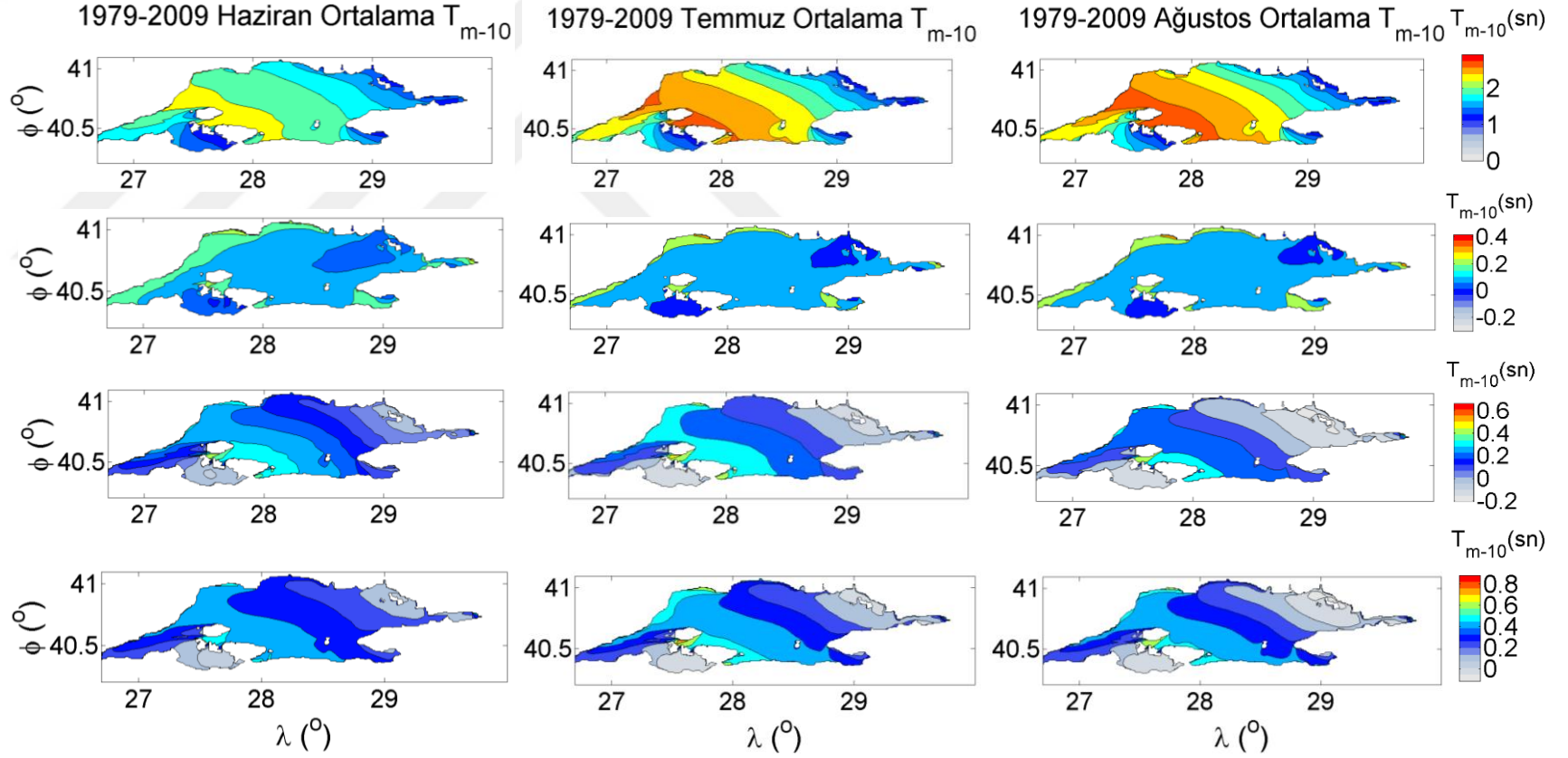


**Ek Şekil 5.1.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (aralık, ocak ve şubat) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

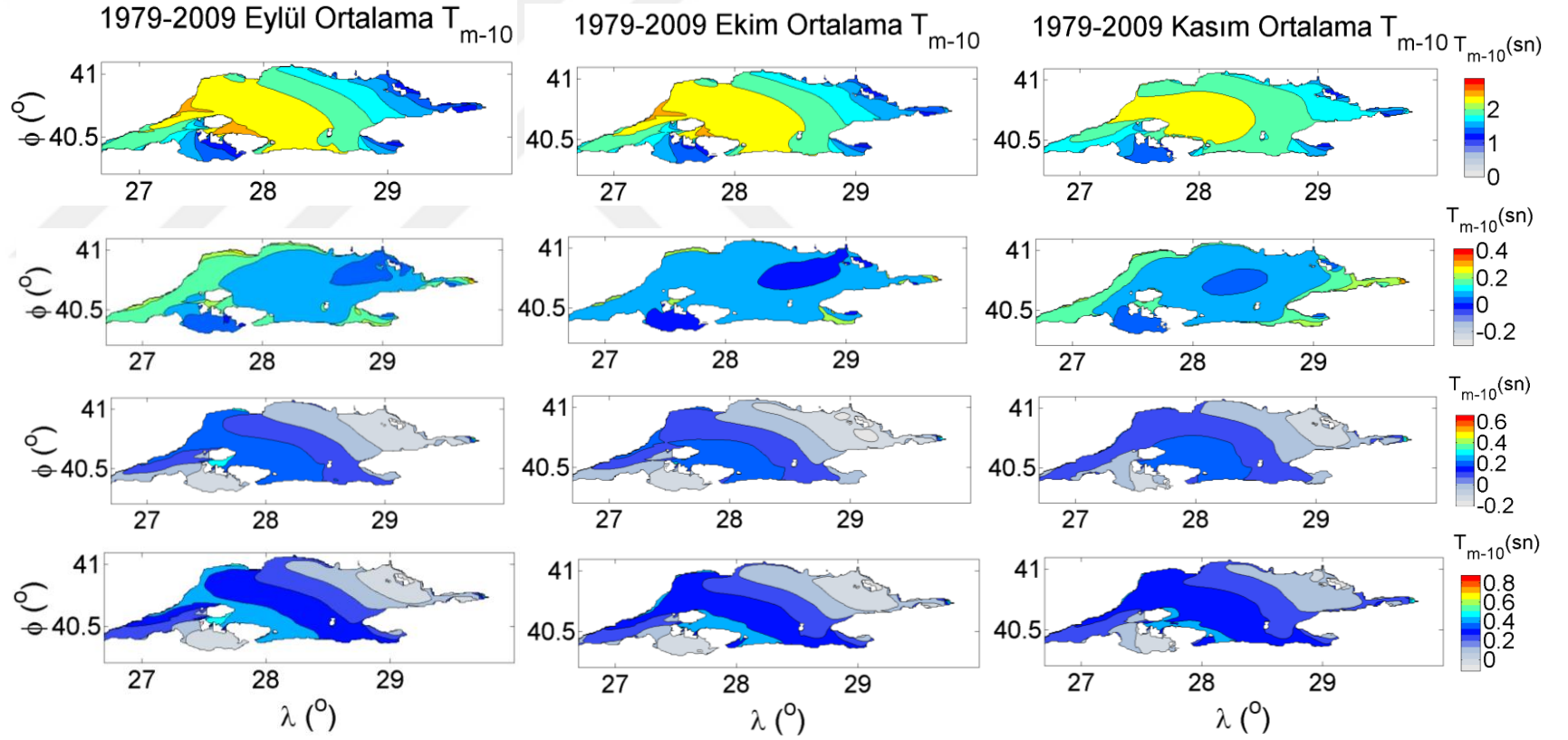




**Ek Şekil 5.2.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (mart, nisan ve mayıs) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları



**Ek Şekil 5.3.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (haziran, temmuz ve ağustos) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları



**Ek Şekil 5.4.** CFSR rüzgarlarını kullanan kalibre edilmiş SWAN model sonuçlarından elde edilen 31 yıllık (1979-2009) süre için aylık (eylül, ekim ve kasım) ortalama dalga enerji periyodlarının (ilk satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - CFSR & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (ikinci satır), CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  (üçüncü satır) ve CFSR & kalibre edilmiş SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  - ERA Interim & varsayılan ayarlamalı SWAN aylık ortalama  $T_{m-10}$  farklarının (dördüncü satır) alansal dağılımları

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Volkan KUTUPOĞLU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Gölköy/ORDU, 1985  
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)  
Lise : Ulubey Anadolu Lisesi, 2003  
Lisans : Pamukkale Üniversitesi, 2008

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :  
T.C. BAYINDIRLIK VE İSKAN BAKANLIĞI  
Düzce Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü 2010-  
Mühendis  
T.C. KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI  
Bursa Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü 2011-  
Mühendis

İletişim (e-posta) : kutupoglu@gmail.com

Yayınları :

**Kutupoğlu, V., Akpınar, A., Van Vledder G. 2016.** Modelling Of Wind Waves In The Sea Of The Marmara: The Sea Of Marmara; Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation And Governance, Editörler: Özsoy, E., Çağatay, M. N., Balkıs, N., Balkıs, N., Öztürk, B., Turkish Marine Research Foundation (TUDAV), Istanbul, TURKEY, pp:105-117.

**Kutupoğlu, V., Bingölbali, B., Çakmak, R. E., Akpınar, A., 2017.** Marmara Denizi'nin 2014 yılı deniz dalga durumunun analizi. Ulusal Çevre, Deniz ve Kıyı Kirliliği Sempozyumu, 10-12 Ekim 2017, Gemlik, BURSA.