T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MARMARA DENİZİ DALGA ENERJİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Muhammed Emre ULUSAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Programı

Danışman

Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER

Haziran, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MARMARA DENİZİ DALGA ENERJİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Muhammed Emre ULUSAN tarafından hazırlanan tez çalışması 04.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Marmara Denizi Dalga Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Emre ULUSAN

İmza

Anneme

ve

tüm sevenlerime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince ihtiyaç duyduğum her anda tüm bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan, tez çalışmasında geçirmiş olduğum zorlu süreçte bana olan desteğini ve inancını her zaman yanımda hissettiğim, her türlü tavsiye ve deneyimine her zaman ihtiyaç duyacağım tez danışmanım, sayın hocam Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER'e vermiş olduğu emek, ayırmış olduğu zaman ve göstermiş olduğu anlayış için sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmada kullanılan rüzgâr ve dalga verilerinin teminindeki katkılarından ve Hidrolik Anabilim Dalı içerisinde sağlamış olduğu akademik çalışma ortamından dolayı anabilim dalı başkanımız, sayın hocam Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim sırasında Kıyı Mühendisliği alanında kendisinden almış olduğum derslerdeki eşsiz anlatımından ve aktarmış olduğu değerli bilgilerden ötürü sayın hocam Prof. Dr. Esin ÇEVİK'e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince verdikleri katkılardan dolayı tüm Hidrolik Anabilim Dalı öğretim üyelerine ve elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana vermiş oldukları destek, duymuş oldukları inanç ve göstermiş oldukları sevgi için başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme ve sevenlerime sonsuz teşekkür ederim.

Muhammed Emre ULUSAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xvi
ABSTRACT xviii
1 GİRİŞ 20
1.1 Literatür Özeti 20
1.2 Tezin Amacı 28
1.3 Hipotez 30
2 DALGA ENERJİSİ VE DALGA TAHMİN MODELLERİ 31
2.1 Giriş 31
2.2 Dalga Tahmin Modelleri 34
2.3 MIKE 21 Spektral Dalga Modeli 36
2.3.1 Giriş 36
2.3.2 Uygulama Alanları 37
2.3.3 Temel Denklemler 37
2.3.4 Kartezyen Koordinatlarda Dalga Hareketi Korunum Denklemi 38
2.3.5 Küresel Koordinatlarda Dalga Hareketi Korunum Denklemi 39
2.3.6 Kaynak Fonksiyonları 40
2.3.7 İntegral Dalga Parametreleri 41
3 SAYISAL DALGA MODELLEMESİ VE KALİBRASYON 42
3.1 Giriş 42
3.2 Sayısal Dalga Modellemesi 42
3.2.1 Hesaplama Alanı ve Batimetri 42
3.2.2 Zaman Parametreleri ve Kullanılan Veriler 43
3.2.3 Temel Denklemler, Spektral Ayrıklaştırma ve Çözüm Tekniği 44
3.3 Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması 46
3.3.1 Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyon 48
3.3.2 Model Alanı Ağ Sistemi Optimizasyonu 61
3.3.3 Modelin Doğrulanması 70

4 SAYISAL DALGA MODELİ SONUÇLARI VE DALGA ENERJİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ **82**

4.1 Giriş 82

4.2 Alansal Dağılımlar 83

4.2.1 Rüzgâr Hızı (W_s) Alansal Dağılımları 84

4.2.2 Belirgin Dalga Yüksekliği (H_s) Alansal Dağılımları 85

4.2.3 Dalga Enerji Periyodu (T_e) Alansal Dağılımları 90

4.2.4 Dalga Gücü (P) Alansal Dağılımları 93

4.2.5 Maksimum Değer, Standart Sapma, Değişkenlik Katsayısı ve WEDI Alansal Dağılımları 96

4.3 Noktasal Analizler 101

5 SONUÇ VE ÖNERİLER **125**

KAYNAKÇA **131**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **134**

SİMGE LİSTESİ

$\vec{U}$	Akım hızı vektörü
α	Alfa kırılma parametresi
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
λ	Boylam
z_{ch}	Charnock parametresi
E	Dalga enerjisi
T_e	Dalga enerji periyodu
$\overline{E}$	Dalga enerji yoğunluğu
c_g	Dalga grup hızı
n	Dalga grup hızının dalga hızına oranı
f	Dalga frekansı
P	Dalga gücü
c	Dalga hızı
k	Dalga numarası
T	Dalga periyodu
θ	Dalga yönü
H	Dalga yüksekliği
δ	Delta köpüklenme parametresi
z_0	Deniz pürüzlülüğü
ρ	Deniz suyunun özgül kütlesi
∇	Dört boyutlu diferansiyel operatör
R	Dünyanın yarıçapı
ϕ	Enlem
γ	Gama kırılma parametresi
N	Hareket yoğunluğu
S	Kaynak terimi
S_{in}	Kaynak teriminde rüzgâr ile enerji üretimi
S_{nl}	Kaynak teriminde lineer olmayan dalga enerji transferi
S_{ds}	Kaynak teriminde köpüklenmeden dolayı enerji kaybı
S_{bot}	Kaynak teriminde taban sürtünmesinden dolayı enerji kaybı
S_{surf}	Kaynak teriminde dalga kırılmasından dolayı enerji kaybı

σ_{kesme}	Kesme frekansı
C_{ds}	Köpüklenme parametresi
P_{maks}	Maksimum dalga gücü
σ_{maks}	Maksimum frekans
f_0	Minumum frekans
ω	Mutlak açısal frekans
k_N	Nikuradse pürüzlülüğü
P_{ort}	Ortalama dalga gücü
T_m	Ortalama dalga periyodu
U_{10}	Ortalama deniz seviyesinden 10 m yukarıda ölçülen rüzgâr hızı
$\overline{\sigma}$	Ortalama göreceli frekans
d_{50}	Ortalama tane boyutu
σ_{PM}	Pierson-Moskowitz pik frekansı
T_p	Pik dalga periyodu
W_s	Rüzgâr hızı
m_i	Spektral moment
σ	Standart sapma
f_w	Sürtünme faktörü
u_*	Sürtünme hızı
C_{fw}	Sürtünme katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

CCI-SS	Climate Change Initiative for Sea State
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
COV	Değişkenlik Katsayısı
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
DHI	Danimarka Hidrolik Enstitüsü
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
ECMWF	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi
ESA	European Space Agency
IFREMER	French Research Institute for Exploitation of the Sea
MRI	Meteorological Research Institute
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NDBC	National Data Buoy Center
NGDC	National Geophysical Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PDF	Oluşma Olasılığı
POE	Aşılma Olasılığı
RMSE	Ortalama Hataların Karekökü
SI	Saçılım İndeksi
SW	Spectral Waves
TPAO	Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
UTC	Eşgüdümlü Evrensel Zaman
WAM	Wave Model
WAMDI	Wave Model Development and Implementation Group
WAVCIS	Wave-Current-Surge Information System
WEDI	The Wave Energy Development Index

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Dalga enerjisi bileşenleri 32

Şekil 3.1 Model alanı ağ sistemi 43

Şekil 3.2 Model alanı batimetrisi 43

Şekil 3.3 Silivri istasyonunda ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin oluşma olasılıkları (2015) 49

Şekil 3.4 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile karşılaştırılması (2015) 51

Şekil 3.5 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile karşılaştırılması (Ocak, 2015) 53

Şekil 3.6 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri (Ocak, 2015) 54

Şekil 3.7 Farklı kalibrasyon değerleri için hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yükseklikleri (Ocak, 2015) 59

Şekil 3.8 Farklı kalibrasyon değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015) 60

Şekil 3.9 k18 ve farklı C_{ds} değerleri için hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015) 61

Şekil 3.10 m1 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....62

Şekil 3.11 m2 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....62

Şekil 3.12 m3 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....62

Şekil 3.13 m4 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....63

Şekil 3.14 m5 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....63

Şekil 3.15 m6 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....63

Şekil 3.16 m7 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....63

Şekil 3.17 m8 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....64

Şekil 3.18 m9 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı.....64

Şekil 3.19 Farklı model alanı ağ sistemleri için hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015).....66

Şekil 3.20 Ölçülen belirgin dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri (Ocak, 2015).....67

Şekil 3.21 Nihal model ve varsayılan model parametre değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015) 69

Şekil 3.22 Nihal model ve varsayılan parametre değerleri ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yükseklikleri (Ocak, 2015) 69

Şekil 3.23 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2013) 72

Şekil 3.24 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2014) 73

Şekil 3.25 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2015) 74

Şekil 3.26 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2016) 75

Şekil 3.27 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2017) 76

Şekil 3.28 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2018) 77

Şekil 3.29 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri 78

Şekil 3.29 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri (devamı) 79

Şekil 3.30 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (2003) 80

Şekil 3.31 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri 80

Şekil 3.32 Ölçülen ve hesaplanan pik dalga periyodu değerlerinin karşılaştırılması (2013-2016) 81

Şekil 4.1 Marmara Denizi üzerinde seçilen noktalar 83

Şekil 4.2 40 yıllık ortalama rüzgâr hızının alansal dağılımı 84

Şekil 4.3 Mevsimsel ortalama rüzgâr hızının alansal dağılımları 85

Şekil 4.4 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımı 85

Şekil 4.5 Hâkim dalga yönünün alansal dağılımı 86

Şekil 4.6 Mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımları 88

Şekil 4.7 Aylık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımları 89

Şekil 4.8 40 yıllık ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımı 90

Şekil 4.9 Mevsimsel ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımları 91

Şekil 4.10 Aylık ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımları 92

Şekil 4.11 40 yıllık ortalama dalga gücünün alansal dağılımı 93

Şekil 4.12 Mevsimsel ortalama dalga gücünün alansal dağılımları 94

Şekil 4.13 Aylık ortalama dalga gücünün alansal dağılımları 95

Şekil 4.14 Maksimum dalga gücü değerlerinin alansal dağılımı 96
Şekil 4.15 Maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerinin alansal dağılımı 96
Şekil 4.16 Maksimum dalga enerji periyodu değerlerinin alansal dağılımı 97
Şekil 4.17 Belirgin dalga yüksekliği için standart sapmanın alansal dağılımı.....97
Şekil 4.18 Dalga enerji periyodu için standart sapmanın alansal dağılımı 98
Şekil 4.19 Dalga gücü için standart sapmanın alansal dağılımı 98
Şekil 4.20 Belirgin dalga yüksekliği için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı 99
Şekil 4.21 Dalga enerji periyodu için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı ...99
Şekil 4.22 Dalga gücü için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı.....100
Şekil 4.23 Marmara Denizi için WEDI değerinin alansal dağılımı.....101
Şekil 4.24 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P1).....108
Şekil 4.25 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P2).....108
Şekil 4.26 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P3).....108
Şekil 4.27 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P4).....109
Şekil 4.28 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P5).....109
Şekil 4.29 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P6).....109
Şekil 4.30 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P7).....110
Şekil 4.31 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P1) 111
Şekil 4.32 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P2) 111
Şekil 4.33 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P3) 111
Şekil 4.34 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P4) 112
Şekil 4.35 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P5) 112
Şekil 4.36 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P6) 112
Şekil 4.37 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P7) 113

Şekil 4.38 Seçilen noktalarda dalga gücünün aşılma olasılığı 113
Şekil 4.39 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P1) 114
Şekil 4.40 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P2) 114
Şekil 4.41 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P3) 115
Şekil 4.42 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P4) 115
Şekil 4.43 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P5) 115
Şekil 4.44 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P6) 116
Şekil 4.45 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P7) 116
Şekil 4.46 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P1) 118
Şekil 4.47 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P2) 118
Şekil 4.48 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P3) 118
Şekil 4.49 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P4) 119
Şekil 4.50 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P5) 119
Şekil 4.51 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P6) 119
Şekil 4.52 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P7) 120
Şekil 4.53 Seçilen noktalarda aylık ortalama dalga gücü değerleri 120
Şekil 4.54 Seçilen noktalarda mevsimsel ortalama dalga gücü değerleri 121
Şekil 4.55 Seçilen noktalarda 10 yıllık ve 40 yıllık ortalama dalga gücü değerleri 121
Şekil 4.56 Seçilen noktalarda dalga gücü için dalga gülleri 123
Şekil 4.57 Yıllık dalga enerjisinin alansal dağılımı 124

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Hesaplama alanı koordinatları.....43

Tablo 3.2 Model simülasyonuna ait zaman parametreleri 44

Tablo 3.3 Temel denklemler, spektral ayrıklaştırma ve çözüm tekniği ile ilgili modelde kullanılan parametreler.....46

Tablo 3.4 Farklı C_{ds} değerleri için elde edilen istatistiksel sonuçlar (2015).....50

Tablo 3.5 Farklı C_{ds} değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015).....52

Tablo 3.6 Kalibrasyon çalışmasında kullanılan parametre değerleri 56

Tablo 3.7 Farklı kalibrasyon değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015).....57

Tablo 3.8 En başarılı kalibrasyon değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015) 58

Tablo 3.9 Model alanı ağ sistemleri için üçgen eleman ve düğüm noktası sayıları 64

Tablo 3.10 Farklı model alanı ağ sistemleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015).....65

Tablo 3.11 Varsayılan ve nihai model parametre değerleri.....68

Tablo 3.12 Varsayılan ve nihai model için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar 68

Tablo 3.13 Model değerleri ile belirgin dalga yüksekliği için elde edilen istatistiksel sonuçlar.....70

Tablo 3.14 Model değerleri ile elde edilen istatistiksel sonuçlar.....79

Tablo 4.1 Seçilen noktaların koordinatları 83

Tablo 4.2 Seçilen noktaların karakteristikleri 102

Tablo 4.3 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P1).....103

Tablo 4.4 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P2).....103

Tablo 4.5 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P3).....104

Tablo 4.6 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P4).....104

Tablo 4.7 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P5).....105

Tablo 4.8 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P6) 105

Tablo 4.9 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P7) 106

Tablo 4.10 Seçilen noktalarda 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimleri 117

Tablo 4.11 Seçilen noktalardaki ortalama dalga gücü ve yıllık dalga enerjileri..124

ÖZET

Marmara Denizi Dalga Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Muhammed Emre ULUSAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. H. Anıl ARI GÜNER

Bu çalışma, Marmara Denizi dalga enerji potansiyelinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla Danimarka Hidrolik Enstitüsü'nün 3. nesil Spektral Dalga Modeli (MIKE 21 SW) kullanılarak dalga parametreleri elde edilmiştir. Model, 1979-2018 yılları arasında ECMWF (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi) kaynaklı ERA-Interim rüzgâr verileri kullanılarak koşturulmuştur. Model ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri, 2013-2018 yılları arasında İstanbul, Silivri'de bulunan ölçüm istasyonundan alınan belirgin dalga yüksekliği ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Model üzerindeki hassasiyet analizi, kalibrasyon ve doğrulama işlemleri, MIKE 21 SW içerisinde bulunan kalibrasyon parametreleri ve istatistiksel hata parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga enerji potansiyeli, alansal ve zamansal değişimler açısından analiz edilmiştir. 40 yıllık ortalama alansal dağılımda en yüksek ortalama dalga gücü değeri açık denizde 0.40 kW/m'ye ulaşmaktadır. Kıyıya yakın bölgelerde en yüksek ortalama dalga gücü değeri batı kıyısında 0.28 kW/m'ye, kuzey-kuzey-batı kıyısında 0.30 kW/m'ye ve güney kıyısında 0.34 kW/m'ye ulaşmaktadır. Ayrıca belirgin dalga yüksekliği, dalga enerji periyodu ve verilerin değişkenliğine bağlı olarak Marmara Denizi dalga iklimini temsil edecek şekilde 7 nokta seçilmiştir. Seçilen noktalar

üzerinde noktasal analizler (iki ve üç değişkenli dağılımlar, oluşma ve aşılma olasılıkları, eğilim analizi, zamansal değişimler, dalga gülleri) gerçekleştirilmiştir. Marmara Denizi'ndeki bir noktadan 1 yılda elde edilebilecek en yüksek toplam dalga enerjisi değeri, uzun dalga enerji periyodu ve daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini temsil eden P1 noktasında 3.47 MWh/m olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen dalga gücü ve dalga enerjisi ile ilgili veriler, Marmara Denizi dalga enerji potansiyeli hakkında detaylı bilgi vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, dalga enerjisi, dalga modellemesi, MIKE 21 SW, Marmara Denizi.

ABSTRACT

Determination of the Wave Energy Potential of Marmara Sea

Muhammed Emre ULUSAN

Department of Civil Engineering

MSc Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. H. Anıl ARI GÜNER

This study aims to determine the wave energy potential of Marmara Sea. To that end, wave parameters were simulated by using the 3rd generation Spectral Wave Model (MIKE 21 SW) of Danish Hydraulic Institute. The model was run by using ERA-Interim wind data obtained from the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) between the years of 1979 and 2018. Significant wave height values calculated via the model were compared against significant wave height measurements obtained from the measurement station located at Istanbul, Silivri between the years of 2013 and 2018. Processes of sensitivity analysis, calibration and validation on the model were performed by using calibration parameters existing in MIKE 21 SW and statistical error parameters. The wave energy potential was analyzed in terms of the spatial and temporal variations. In 40-year average spatial distribution, the highest mean wave power value reaches up to 0.40 kW/m in the offshore. In the nearshore areas, the highest mean wave power value reaches up to 0.28 kW/m in the west coast, 0.30 kW/m in the north-north-west coast and 0.34 kW/m in the south coast. Besides, 7 points were selected to represent the Marmara Sea wave climate, depending on the significant wave height, wave energy period and variability of the data. Local analyzes

(bivariate and trivariate distributions, probabilities of occurrence and exceedance, trend analysis, temporal variations, wave roses) were carried out at the selected points. The highest total wave energy value that can be obtained in 1 year from a point in the Marmara Sea was determined as 3.47 MWh/m at P1, which represents the long wave energy period and higher significant wave height. The data concerning the wave power and wave energy obtained as a result of the study provides detailed information about the wave energy potential of Marmara Sea.

Keywords: Renewable energy, wave energy, wave modelling, MIKE 21 SW, Marmara Sea.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Dalga parametrelerinin tahmini ve dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi üzerine Türkiye denizlerinde ve dünyanın farklı bölgelerinde birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Marmara Denizi üzerinde yapılan çalışmalar diğer bölgelere göre daha az sayıdadır. Konu ile ilgili Marmara Denizi üzerinde yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Özhan ve Abdalla (1999), dalga ve rüzgâr parametrelerinin analizi üzerine tüm Türkiye kıyılarında bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Marmara Denizi üzerinde 68 noktada dalga ve rüzgâr parametreleri incelenmiştir. Dalga ve rüzgâr parametrelerinin elde edilmesi için WAMDI (Wave Model Development and Implementation Group) tarafından geliştirilen ve 3. nesil dalga modelleme yazılımı olan WAM (Wave Model) kullanılmıştır. Marmara Denizi için veri seti olarak 1991-1994 yılları arasındaki ECMWF kaynaklı rüzgâr verileri ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) sinoptik haritaları kullanılmıştır. Araştırmacılar başlangıçta tüm Türkiye kıyıları için ECMWF'nin T213 adlı meteorolojik modelini kullanmışlardır; fakat bu modelin küçük ölçekli yerel etkileşimleri hissedememesinden Marmara Denizi gibi küçük su alanlarında kötü sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple model Erkal (1997), Abdalla ve diğ. (1997) ve Özhan ve diğ. (1998) tarafından yapılan çalışmalar ile geliştirilerek Marmara Denizi için kullanılabilir hale getirilmiştir. Geliştirilen modeldeki mekansal çözünürlük Marmara Denizi için 0.12° boylam ve 0.09° enlem, zamansal çözünürlük 1 saat ve zaman adımı sayısı 5 dakika olarak belirlenmiştir. Böylece Karadeniz, Akdeniz ve Ege Denizi için 30 km aralığında kullanılan mekansal çözünürlük Marmara Denizi için 10 km aralığına kadar düşürülmüştür. Modelin doğrulanması rüzgâr ölçümleri ile yapılmıştır ve araştırmacılar model sonuçları ile ölçümlerin kabul edilebilir düzeyde uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Model

sonucundan elde edilen verilerle dalga ve rüzgâr gülleri, belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu saçılım grafikleri elde edilmiştir.

Yüksel ve diğ. (2011), belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu arasındaki ilişkiyi analiz etmek için tüm Türkiye denizlerinde bir çalışma gerçekleştirmişler. Özhan ve Abdalla (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da kullanılan Marmara Denizi üzerindeki 68 noktada dalga iklimi incelenmiştir. Araştırmacılar ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgâr verilerini kullanarak MIKE 21 SW ile bir dalga modeli oluşturmuşlardır. Mekansal çözünürlüğü 0.1° x 0.1° olan rüzgâr verileri kullanılarak 1996 - 2008 yılları arasında dalga modeli çalışması yapılmıştır. Modelde taban sürtünmesi Nikuradse için 0.04, kırılma parametreleri $\alpha = 1$ ve $\gamma = 0.8$, köpüklenme parametreleri $C_{ds} = 3$ ve $\delta = 0.5$ olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar model sonuçları üzerinde en etkili parametrenin köpüklenme parametresi olduğunu belirtmişlerdir. Ambarlı istasyonundan alınan ölçüm verileri ile modelin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda Marmara Denizi'nin belirgin dalga yüksekliği ile ortalama dalga periyodu arasındaki ilişki $T_m = 3.521 H_s^{0.3327}$ olarak elde edilmiştir. Araştırmacılar daha yeterli bir sayısal ağ ve veri seti kullanıldığından çalışma sonuçlarının Özhan ve Abdalla (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Saraçoğlu ve diğ. (2014), Marmara Denizi'nin dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar 0.1° x 0.1° mekansal ve 6 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgâr verilerini kullanarak MIKE 21 SW ile bir dalga modeli oluşturmuşlardır. 03.07.2003 - 24.09.2003 tarihleri arasında Ambarlı ölçüm istasyonundan alınan dalga yüksekliği ve dalga periyodu verileri ile modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Modelde Yüksel ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan farklı olarak taban sürtünmesi Nikuradse için 0.004 olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar ölçümlerden kaynaklı olarak belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu model sonuçlarının ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında yeterince uyumlu olmadığını belirtmişlerdir. Marmara Denizi üzerindeki 8 istasyon için dalga gülleri, dalga gücü değerleri ve belirgin dalga yüksekliği ile dalga enerji periyodunun dalga enerjisi üzerindeki yüzdesel olarak dağılımını elde etmişlerdir.

Belirgin dalga yüksekliği 0.75 m'nin altında ve dalga enerji periyodunun 2.50 - 3.50 s aralığında olan dalgaların dalga enerjisi üzerinde yüzdesel olarak en yüksek dağılıma sahip olduğunu ve Marmara Denizi'nin ortalama dalga gücü değerinin 2.50 kW/m'den düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Kutupoğlu (2017), 1979 - 2009 yılları arasında Marmara Denizi'nde iki farklı SWAN (Simulating Waves Nearshore) Modeli üzerinde bir karşılaştırma çalışması yürütmüştür. Çalışmada rüzgâr verisi olarak 0.1° x 0.1° mekansal çözünürlüklü ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgârları ve NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centers for Environmental Prediction) kaynaklı CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) rüzgârları kullanılmıştır. Modelin kalibrasyonu için TPAO (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı) tarafından Silivri ölçüm istasyonunda 41.043889° K ve 28.186944° D koordinatlarında 2013 yılına ait belirgin dalga yüksekliği ve rüzgâr hızı verilerini, modelin doğrulanması için Ambarlı ölçüm istasyonundan 2003 yılına ait ve Ereğli ölçüm istasyonundan 1990 yılına ait belirgin dalga yüksekliği verileri kullanılmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama çalışmalarında Bias, MAE, RMSE, SI ve r istatistiksel hata parametreleri kullanılmıştır. Araştırmacı, kalibrasyon için en etkili parametrenin daha önceki çalışmalarda (Moeini ve Shahidi (2007), Appendini ve diğ. (2013)) köpüklenme parametresi olarak belirlenmesinden dolayı köpüklenme parametresinde ayarlamalar yapıldığını belirtmiş ve SWAN Modeli'nde CFSR rüzgârlarının C_{ds} = 1.0 için ERA-Interim rüzgârlarının ise C_{ds} = 0.5e-5 için daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir. CFSR rüzgârları kullanılarak SWAN Modeli sonuçlarından elde edilen 31 yıllık mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin mekansal dağılım grafiklerine göre, en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin kış mevsiminde Marmara Denizi açıklarında yaklaşık 0.45 m olarak elde edildiği belirtilmiştir. 31 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin en yüksek değerinin Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde 0.40 m civarında olduğu tahmin edilmiştir. CFSR rüzgârlarını kullanan SWAN modeli sonuçlarından elde edilen 31 yıllık ortalama dalga enerjisi periyotlarının en yüksek değerleri Tekirdağ'ın güney kıyısında 2.50 saniye olarak tahmin edilmiştir.

Abdollahzadehmoradi (2018), MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'ni kullanarak dalga enerji potansiyelinin makro ve mikro ölçekte incelenmesi üzerine bir çalışma

gerçekleştirmiştir. Çalışmada Marmara Denizi için 0.125° x 0.125° mekansal çözünürlüğe sahip ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgâr verileri kullanılarak 1994 - 2014 yılları arasında MIKE 21 Spektral Dalga Modeli kullanılmıştır. Modelin kalibrasyonu için Ambarlı ölçüm istasyonunda 2003 yılına ait belirgin dalga yüksekliği ölçüm verileri ve 2013-2014 yılları arasında TPAO kaynaklı, 41°02'37.98" K ve 28°11'12.77" D koordinatlı belirgin dalga yüksekliği ölçüm verileri kullanılmıştır. Kalibrasyon, belirgin dalga yüksekliği için RMSE ve R^2 hata değerlerini en aza indirgemeye dayanarak gerçekleştirilmiştir. Modelde Charnock parametresi 0.008, $C_{ds} = 2$, $\delta = 0.1$, $\gamma = 1.59$ olarak belirlenmiş ve 4892 elemanlı ağ kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 20 yıllık mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliği değerleri en yüksek kış mevsiminde 0.36 m olarak, en düşük ise ilkbahar mevsiminde 0.22 m olarak elde edilmiştir. Ayrıca 20 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliği Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde 0.25 - 0.30 m aralığındadır. Maksimum aylık ortalama dalga gücünün Kasım (1.10 kW/m) ve en düşük ayların ise Mayıs ve Haziran (0.30 kW/m) olduğu belirtilmiştir. Mevsimsellik açısından ise en yüksek mevsimsel ortalama dalga gücünün 0.75 kW/m ile kış mevsiminde, en düşük mevsimsel ortalama gücü değerinin ise ilkbahar mevsiminde olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda 20 yıllık ortalama dalga gücündeki en yüksek değerin Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde 0.47 kW/m olduğu elde edilmiştir.

Akpınar ve diğ. (2021), Marmara Denizi üzerinde rüzgâr ve dalga özelliklerinin uzun dönemli değişkenliklerinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1979 - 2018 yılları arasındaki ERA-Interim ve CFSR kaynaklı rüzgâr ve dalga veri seti kullanılmıştır. Modelin performasını ölçmek için Silivri'de bulunan şamandıradan 2015 yılına ait dalga yüksekliği ölçüm verileri ile 1991 - 2018 yıllarına ait uydu verileri kullanılmıştır. Silivri'de bulunan şamandıra 41.043889° K ve 28.186944° D koordinatlarına aittir. Çalışmada kullanılan CFSR rüzgârlarının daha iyi bir performans ortaya koyduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda ortalama belirgin dalga yüksekliklerinin en yüksek değeri Marmara Denizi'nin orta bölgelerinde yaklaşık olarak 0.40 m, maksimum belirgin dalga yüksekliklerinin en yüksek değeri ise 4.70 m olarak tahmin edilmiştir.

Yüksel ve diğ. (2021), Marmara Denizi üzerinde rüzgâr ve dalga ikliminin uzun dönemli trendlerini analiz etmek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1979 - 2018 yılları arasındaki ECMWF kaynaklı ERA-Interim ve NCEP kaynaklı CFSR rüzgâr veri setleri kullanılmıştır. Model sonucunda elde edilen veriler ile 2015 - 2018 yılları arasında Yeşilköy ve Biga ölçüm istasyonlarından elde edilen veriler ile Bias, r, RMSE ve SI istatistiksel hata parametreleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar çalışmada kullanılan ERA-Interim ve CFSR rüzgâr veri setlerinin her ikisinin de iyi sonuçlar verdiği ve Marmara Denizi üzerinde yapılacak çalışmalarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda Marmara Denizi'nin kuzey kesimlerinde 2.50 m'ye kadar ulaşan yükseklikte dalgalar olduğunu ve 0.40 m'ye kadar ulaşan ortalama belirgin dalga yüksekliği değerlerinin bulunduğunu belirlemişlerdir. Belirgin dalga yüksekliğinin maksimum değerlerinin artma eğiliminde olduğunu, belirgin dalga yüksekliğinin ve ortalama dalga periyodunun ortalama değerlerinin ise azalma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir.

Akpınar ve diğ. (2021) ve Yüksel ve diğ. (2021) dışındaki çalışmalar rüzgâr ve ölçüm verileri yönünden sınırlıdır. Bu çalışma diğer çalışmalara göre daha uzun rüzgâr ve ölçüm verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Konu ile ilgili diğer bölgelerde MIKE 21 Spektral Dalga Modeli kullanılarak yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Jose ve Stone (2006), Meksika Körfezi'nin tamamında kıyı yakınında dalga parametrelerinin tahmin edilmesi için MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'ni kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kuzey körfez kıyısı boyunca ince bir ağ sistemi kullanılırken sınırın geri kalanı için daha kaba bir ağ sistemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler NGDC (National Geophysical Data Center) ve NOAA kurumlarından alınmıştır. Model için kullanılan tahmini rüzgâr verileri NOAA veritabanının NCEP biriminden elde edilmiştir. Dalga parametrelerinin hesaplanması için tam spektral bir yaklaşım kullanılmıştır. Model, tahmini rüzgâr verisi girişini kullanarak dalga parametrelerini hesaplamıştır. Belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga yönü vb. parametrelerin sinoptik haritaları oluşturulmuştur. Kalibrasyon amacıyla NDBC

(National Data Buoy Center) şamandıra konumları ve Louisiana sahilinde bulunan WAVCIS (Wave-Current-Surge Information System) istasyonları için de çıktı üretilmiştir. İyi hava koşulları sırasında tahmin edilen dalga parametreleri ölçülen dalga parametreleri ile güçlü bir korelasyon göstermiştir. Kasırgalar ve tropik fırtınalar gibi sert hava koşullarında ise tahmin edilen değerler genellikle ölçülen değerlerden daha düşük çıkmıştır. Araştırmacılar bu farklılığın rüzgâr verisi girdilerinin doğruluğuna ve ölçeğine bağlanabileceğini belirtmiştir.

Arı ve diğ. (2007), Karaburun kıyı alanının rüzgâr ve dalga iklimi analizi ve dalga modellemesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada parametrik SPM ile SMB yöntemleri ve MIKE 21 SW ile sayısal modelleme olmak üzere iki farklı dalga tahmin yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modelde 01.01.2003 - 31.12.2005 tarihleri arasında yer alan ECMWF kaynaklı rüzgâr alanları kullanılmıştır. Model üzerinde kalibrasyon ve doğrulama işlemleri yapılmıştır. Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile 27.03.2004 - 25.06.2004 tarihleri arasında ölçülen belirgin dalga yüksekliği ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar sayısal model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu ve yapılan diğer dalga tahmin yöntemlerine göre en uyumlu sonucu verdiğini belirtmişlerdir. Sayısal modelin üçüncü nesil dalga tahmin yöntemi olması ve üçüncü nesil dalga tahmin yöntemlerinin dalga gelişimini etkileyen fiziksel olayları detaylı olarak çözümlemesinden kaynaklı olarak uyumlu sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Moeini ve Etemad-Shahidi (2007), SWAN ve MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'ni kullanarak Kuzey Amerika'da bulunan Erie Gölü üzerinde dalga parametrelerinin tahmin edilmesi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 2002 ve 2005 yılları arasında Erie Gölü üzerindeki iki farklı istasyonda kaydedilen meteorolojik veriler ve dalga verileri kullanılmıştır. Çalışmada belirgin dalga yüksekliği, spektral pik periyot ve ortalama dalga yönü tahmin edilmiştir. Araştırmacılar kalibrasyon için ayarlanabilir parametre olarak köpüklenme parametresini kullanmıştır. Köpüklenme parametresini kullanmalarının sebebini ise ölçüm istasyonunun derin suda bulunmasından dolayı derinlik kaynaklı dalga kırılması ve taban sürtünmesi gibi diğer fiziksel parametrelerin dalga özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmaması şeklinde açıklamışlardır. Erie Gölü saha veri seti

modellerin performanslarını test etmek için kullanılmıştır. SWAN ve MIKE 21 SW kalibrasyonları Erie Gölü üzerindeki iki farklı istasyonda kaydedilen rüzgâr ve dalga verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar modellerin kalibrasyonunu spektral pik periyottan daha önemli olduğu için belirgin dalga yüksekliğindeki hatayı en aza indirmeye çalışarak gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'nin SWAN Modeli'ne göre belirgin dalga yüksekliği için daha doğru sonuç vermesine karşın spektral pik periyotu için SWAN Modeli'nin daha doğru sonuç verdiği, ortalama dalga yönü için her iki modelin de birbirine yakın sonuç verdiği ve MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'nin doğruluğunun SWAN Modeli'nden biraz daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Arı Güner ve diğ. (2013), Karadeniz'in güney batı kıyısında bulunan Karaburun bölgesinde yakın kıyı rüzgâr ve dalga etkileşimine bağlı olarak dalga parametrelerinin tahmini üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Ocak 2003 ile Aralık 2005 tarihleri arasında bulunan ECMWF kaynaklı rüzgâr alanları ile MIKE 21 SW kullanılarak bir sayısal model oluşturulmuştur. Modelin kalibrasyonu için Ağustos 2003 ile Mart 2005 tarihleri arasında yer alan dalga ölçümleri ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgâr verileri kullanılmıştır. Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu model ve ölçüm verilerinin karşılaştırılmasında MAE, RMSE, SI ve r istatistiksel hata parametreleri kullanılmıştır. Araştırmacılar köpüklenme parametresinin model üzerinde çok etkili olduğunu ve $C_{ds} = 4.5$ varsayılan değerinden kademeli olarak $C_{ds} = 0.5$ değerine düşürüldüğünü belirtmişlerdir.

Vannucchi ve Cappietti (2013), WaveWatch III MED-6MIN Modeli'ni ve MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'ni kullanarak Akdeniz'in tamamı ve İtalya üzerinde seçilmiş 4 bölgede dalga gücünün araştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma 2009-2012 yılları arasındaki dönemi kapsamaktadır. Çalışmada kullanılan veri seti IFREMER (French Research Institute for Exploitation of the Sea) tarafından 3 saatlik aralıklarla belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}), dalga enerji periyodu ($T_{m-1,0}$) ve ortalama dalga yönü parametreleri ile hazırlanmıştır. Ortalama dalga gücünün hesaplanmasında (1.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$P = \frac{1}{64}\frac{g^2}{\pi}\rho {H_{m0}}^2 T_{m-1,0} \quad (1.1)$$

ρ, deniz suyunun özgül kütlesi 1025 kg/m^3 olarak alınmıştır. Akdeniz'in tamamında kullanılan model sonucunda en yüksek ortalama dalga gücü Sardinya bölgesinde 2010 yılı için 15.8 kW/m, 2011 yılı için 12.8 kW/m olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar kıyılara doğru ilerledikçe dalgaları etkileyen süreçlerin dalga gücünde değişikliğe neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle İtalya kıyılarında seçilen 4 bölgede en enerjik yerleri belirlemek için MED-6MIN Modeli'nden elde edilen veriler ile MIKE 21 Spektral Dalga Modeli kullanılarak detaylı analiz yapılmıştır. Seçilen 4 bölgeden biri olan Sardinya bölgesinde ortalama dalga gücü değeri 2010 yılı için 12.16 kW/m, 2011 yılı için 8.45 kW/m olarak hesaplanmıştır.

Aydoğan ve diğ. (2014), MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'ni kullanarak Karadeniz'in dalga enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1996 - 2009 yılları arasındaki süre için ECMWF kaynaklı rüzgâr verileri ile dalga yükseklikleri, dalga periyotları ve ortalama dalga gücü değerleri elde edilmiştir. Model alanı oluşturulurken Karadeniz'in güney kıyıları boyunca hesap ağının çözünürlüğü diğer bölgelere göre artırılmıştır. Araştırmacılar modelde stabilite sorunu yaşamamak amacıyla 600 s'lik zaman adımı kullanıldığını belirtmişlerdir. Modelin kalibrasyonu için 5 farklı ölçüm istasyonu kullanılmıştır. Model sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu değerleri Ortalama Kare Hataların Karekökü ve Korelasyon Katsayısı ölçütleri ile ölçüm istasyonlarındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. Ortalama dalga gücü değerleri, (1.2) eşitliği ile kW/m cinsinden hesaplanmıştır.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} {H_s}^2 T_e \approx (0.49) {H_s}^2 T_e \quad (1.2)$$

Karadeniz kıyıları üzerinde en düşük ortalama dalga gücü değeri 2 kW/m olarak Doğu Karadeniz kıyıları, en yüksek ortalama dalga gücü değeri ise yaklaşık 5 - 6 kW/m olarak Güneybatı kıyılarında belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca Türkiye kıyıları üzerinde seçilmiş 6 noktada ortalama dalga gücünün, dalga yükseklikleri

ve dalga periyotlarına göre oluşma yüzdelerini elde etmişlerdir. Elde edilen yüzdelere göre enerjinin önemli bir kısmına yüksekliği 4 m'den daha küçük ve periyodu 5 - 6 s olan dalgaların sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Rusu ve Rusu (2021), Kuzey Denizi'nde dalga enerjisinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 1989-2018 yılları arasında bulunan ECMWF kaynaklı ERA5 rüzgâr ve dalga verileri ve 1992-2018 yılları arasında bulunan ESA (European Space Agency), CCI-SS (Climate Change Initiative for Sea State) tarafından sağlanan uydu verileri olmak üzere iki farklı veri seti kullanılmıştır. ERA5 veri seti 0.5° x 0.5° mekânsal ve 1 saatlik zamansal çözünürlüklü dalga parametrelerini içermektedir. Dalga parametrelerinden belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu kullanılarak dalga gücü değeri elde edilmiştir. ESA, CCI-SS L4 veri seti 1° x 1° mekânsal çözünürlüklü aylık belirgin dalga yüksekliği değerlerini içermektedir. Araştırmacılar dalga gücünün belirgin dalga yüksekliğinin karesi ile orantılı olmasından ve uydu veri setinin aylık belirgin dalga yüksekliği değerlerini içermesinden dolayı ERA5 veri setinden belirgin dalga yüksekliğinin karesi değerlerinin aylık ortalamasının alınıp karşılaştırmaların bu değerler üzerinden yapıldığını belirtmişlerdir. Çalışmada Kuzey Denizi üzerinden 10 farklı noktada karşılaştırma ve değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda iki farklı veri setinin genel olarak uyumlu sonuçlar verdiği ve en yüksek uyumsuzlukların ise %18 ve %28'lere kadar çıkan değer farklılıkları ile görüldüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca 10 nokta üzerinde yapılan trend analizinde düşüş eğilimi görülmüştür ve varyasyon katsayısı (CoV) değerlerine göre verilerin değişkenliğinin düşük olduğu belirtilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda ise Kuzey Denizi üzerinde 30 yıllık ortalama dalga gücü değerinin 20 kW/m'nin üzerine çıktığı elde edilmiştir. Mevsimsel ve aylık değerlendirmeler sonucunda ise ortalama dalga gücü değerinin sırasıyla 40 kW/m ve 45 kW/m'nin üzerine çıktığı belirlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Dünya genelinde yaygın olarak kullanılmakta olan yenilenemez enerji kaynakları (fosil yakıtlar ve nükleer enerji kaynakları), gittikçe artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların kısıtlı olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacın

artmasına neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan dalga enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin elde edilebilmesi için doğrudan ölçüm kayıtlarını kullanmak veya doğrudan ölçüm kayıtlarının yeterli olmadığı durumda sayısal dalga modeli oluşturarak tahmin yapılmaktadır. Dalga parametrelerinin tahmini ve dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi konularında dünyanın birçok farklı bölgesinde ve Türkiye'de çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmada, çalışma alanı olarak Marmara Denizi seçilmiştir. Marmara Denizi, Türkiye sınırları içerisinde 26°14'00" D - 30°10'00" D ve 40°00'00" K - 41°41'00" K koordinatları arasında yer almaktadır. Marmara Denizi, İstanbul, Kocaeli, Yalova, Bursa, Balıkesir, Çanakkale ve Tekirdağ illerinin kıyıları ile çevrili, Asya ile Avrupa arasında bir geçiş yolu olan çok önemli bir kapalı havzadır. Karadeniz ve Ege Denizi'ni İstanbul ve Çanakkale boğazları ile birbirine bağlamaktadır. Marmara Denizi, 11352 km^2 yüz ölçümüne, 1089 km kıyı şeridine sahip, sınırlı su değişimine sahip yarı kapalı bir iç denizdir. Marmara Denizi'nde batıdan doğuya doğru sırasıyla yaklaşık 1238, 1390 ve 1112 metre derinliğinde üç adet çukur bulunmaktadır (Artüz, 2007). Marmara Denizi gibi yarı kapalı ve sınırları birbirine uzak olmayan bir denizde gerçekleştirilen çalışmalar diğer bölgelere oranla daha az sayıda bulunmaktadır. Marmara Denizi üzerinde dalga parametrelerinin tahmini konusunda yeterli rüzgâr ve ölçüm verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar (Akpınar ve diğ., 2021; Yüksel ve diğ., 2021) mevcuttur; fakat dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi konusunda rüzgâr ve ölçüm verisi yönünden eksiklik bulunmaktadır. Marmara Denizi için doğrudan ölçüm kayıtları yeterli değildir. Bu sebeple sayısal dalga modeli oluşturulması gerekmektedir. Sayısal dalga modelinden elde edilen parametre değerleri ile dalga enerji potansiyeli belirlenerek yenilenebilir enerji çalışmalarında kullanılacaktır. Ayrıca 40 yıllık bir süreyi kapsayan uzun dönemli çalışma ile uzun dönemli eğilimler ve 10 yıllık dönemler üzerinden yapılan incelemeler sonucunda iklim değişikliği etkilerinin gözlemlenmesi de amaçlanmıştır. Bu amaçlarla hazırlanan tezin kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır:

Bölüm 1'de çalışmanın amacı ve çalışma kapsamında gerçekleştirilecek uygulamalar açıklanmıştır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bölüm 2'de dalga enerjisi ve dalga tahmin yöntemleri açıklanmıştır. Dalga enerjisinin içeriği ve dalga enerjisinin belirlenmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan MIKE 21 Spektral Dalga Modeli açıklanmıştır ve modelde kullanılan denklemler verilerek modelin bilimsel altyapısı incelenmiştir.

Bölüm 3'te sayısal dalga modellemesi ve kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal dalga modeli ile elde edilen sonuçlar mevcut ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca model alanı ağ sistemi optimizasyonu yapılmıştır.

Bölüm 4'te sayısal dalga modeli sonuçları verilerek dalga enerji potansiyeli değerlendirilmiştir. Sayısal dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri ile alansal dağılımlar ve noktasal analizler ile değerlendirmeler yapılmıştır.

Bölüm 5'te gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara dayanarak ileride yapılacak çalışmalar için öneriler verilmiştir.

1.3 Hipotez

Çalışmada, sayısal dalga modelinin bilimsel altyapısına ve çalışılacak bölgeye en uygun parametre değerleri belirlenerek modelin kurulumunun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple çalışmada kullanılan sayısal dalga modeli (MIKE 21 SW) ile kalibrasyon parametreleri üzerinde istatistiksel çalışmalar gerçekleştirilerek Marmara Denizi'ne en uygun dalga modellemesi uygulanması hedeflenmiştir. Dalga modellemesi ve istatistiksel değerlendirme çalışmalarında 1979-2018 yılları arasındaki ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgâr alanı verisi ve 2013-2018 yılları arasındaki belirgin dalga yüksekliği ölçüm kayıtları kullanılmıştır. Sayısal dalga modelinden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu parametreleri kullanılarak alansal dağılımlar ve noktasal analizler üzerinden dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma sonucunda sunulan veriler dalga enerjisi dönüşüm sistemleri uygulamalarında kullanılabilecek ve böylelikle yenilenebilir enerji çalışmalarına katkı sağlanacaktır. Bu çalışma, 40 yıllık rüzgâr verisi ve 6 yıllık dalga ölçüm verisi gibi uzun dönemli veriler kullanılarak Marmara Denizi gibi yarı kapalı bir iç denizde dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen bir çalışma olması yönünden önem taşımaktadır.

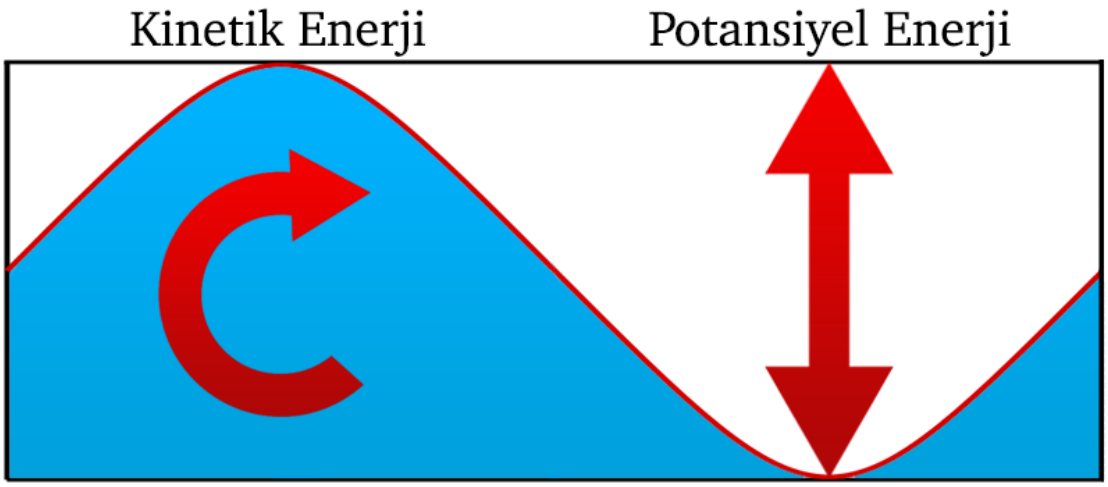
2
DALGA ENERJİSİ VE DALGA TAHMİN MODELLERİ

2.1 Giriş

Enerji kaynakları, yenilenebilirlik durumlarına göre yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yenilenemez enerji kaynakları, fosil yakıtlar (petrol, kömür, doğalgaz) ve nükleer enerji kaynakları olmak üzere dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır; fakat enerji kaynaklarının kullanımları incelendiğinde fosil yakıtların kısıtlı olması ve her geçen gün enerji ihtiyacının artması gibi sebeplerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, temel olarak enerji elde edilen kaynağın kendisini tükenmeyecek şekilde yenileyebilmesi ile tanımlanmaktadır. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisi gibi enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Dalga enerjisi, temel olarak okyanus ve denizlerde meydana gelen dalga hareketinden elde edilmektedir. Dalga enerjisi, içerisinde akışkan partiküllerinin hareketinden kaynaklı kinetik enerji ve dalganın su yüzeyi ile olan yükseklik farkından kaynaklı potansiyel enerji barındırmaktadır. Dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için çeşitli tiplerde dalga enerji dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Dalga enerjisi ile ilgili araştırmalar 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi sonrasında başlamıştır ve günümüze kadar uzanmıştır.

Belirli bir zamandaki dalga enerjisi (E) değerinin belirlenebilmesi için temel olarak (2.1) eşitliği ile verilen dalga gücü (P) değeri ile zaman (t) değeri arasındaki ilişki kullanılmaktadır.

$$E = P.t \tag{2.1}$$



Şekil 2.1 Dalga enerjisi bileşenleri

Dalga enerjisi değeri günlük, aylık veya yıllık gibi istenilen zaman aralığında belirlenebileceği için burada esas olarak elde edilmesi gereken parametre dalga gücü olmaktadır. Dalga gücü değerinin elde edilebilmesi için ise (2.2) ile verilen dalga enerji yoğunluğu ($\overline{E}$) ve dalga grup hızı (c_g) arasındaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$P = \overline{E}.c_g = \overline{E}.c.n \qquad (2.2)$$

Dalga grup hızı ise dalga hızı (c) ve dalga grup hızının dalga hızına oranı (n) ifadelerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Derin su durumunda n=0.5'tir ve c ifadesi (2.3) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$c = gT/2\pi \qquad (2.3)$$

burada g yer çekimi ivmesi ve T dalga periyodudur. Dalga enerjisi hesaplarında dalga periyodu olarak dalga enerji periyodu (T_e) parametresi kullanılmaktadır. Dalga enerji periyodu ile dalga periyodu ölçümleri arasındaki ilişki dalga bileşenlerinin spektral dağılımına bağlıdır. Spektral dağılım ise dalga bileşeni frekansının bir fonksiyonu olarak deniz halinin enerji yoğunluğunun bir tanımıdır ve belirli bir dalga frekansı için bir dalgada ne kadar enerji olabileceğine dair fikir vermektedir (Dunnett ve Wallace, 2009).

Dalga enerji yoğunluğu, kinetik enerji ve potansiyel enerjinin toplamından oluşmaktadır. Birim dalga tepesi genişliği başına dalga enerji yoğunluğu (2.4) eşitliği ile verilmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

$$\overline{E} = \frac{1}{8}\rho g H^2 \tag{2.4}$$

burada ρ deniz suyunun özgül kütlesi ve H dalga yüksekliğidir. Deniz durumunda ise dalga yüksekliği olarak mevcut dalga verisinde bulunan dalgaların en yüksek 1/3'lük dalga yüksekliklerinin ortalamasını ifade eden belirgin dalga yüksekliği (H_s) parametresi kullanılmaktadır. Belirgin dalga yüksekliği değeri standart sapmaya (σ) bağlı olarak Kamphuis (2000) tarafından yapılan çalışmada $H_s = 4\sigma$ eşitliği ile verilmiştir ve $H = \sqrt{2}H_s/2$ hâlini almaktadır. Buradaki H ifadesi (2.4) eşitliğinde yerine yazılarak dalga enerji yoğunluğu deniz durumunda (2.5) eşitliğine dönüşmektedir.

$$\overline{E} = \frac{1}{16}\rho g {H_s}^2 \tag{2.5}$$

(2.2) eşitliğindeki $\overline{E}$, c ve n ifadelerinin derin su durumundaki karşılıkları kullanılarak birim dalga tepesi genişliği için dalga gücü değeri kW/m cinsinden (2.6) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$P = \frac{1}{16}\rho g {H_s}^2 . \frac{g T_e}{2\pi} . (0.5) = \frac{\rho g^2}{64\pi} {H_s}^2 T_e \tag{2.6}$$

burada P dalga gücü, ρ deniz suyunun özgül kütlesi, g yer çekimi ivmesi, H_s belirgin dalga yüksekliği ve T_e dalga enerji periyodudur.

Dalga enerjisinin belirlenmesinde kullanılan dalga yüksekliği ve dalga periyodu gibi dalga parametrelerinin elde edilebilmesi için dalga kayıt cihazları ile doğrudan ölçüm ve rüzgâr verileri yardımıyla tahmin olmak üzere iki yöntem vardır. Dalga kayıt cihazları ile doğrudan ölçüm; basınç sensörü, yönsel dalga şamandırası ve uzaktan algılama yöntemleri ile yapılmaktadır. Doğrudan ölçüm kayıtları son yıllarda mevcut olmakla birlikte geçmiş yıllara ait veriler elde edilemeyebilmektedir. Bu durumda mevcut ölçüm kayıtları ve rüzgâr verileri

kullanılarak çeşitli dalga tahmin modeli yazılımları vasıtasıyla sayısal model oluşturularak geçmiş yıllara ait tahmin yapılmaktadır.

2.2 Dalga Tahmin Modelleri

Rüzgâr verisine bağlı olarak çalışan sayısal dalga tahmin modellerinin gemi rotası belirleme, açık deniz teknolojileri ve son olarak da iklim araştırmalarında kullanışlı olduğu belirlenmiştir. Gelci ve diğ. (1957) tarafından geliştirilen öncü modelden bu yana dalga oluşumu, yayılımı ve sönümlenmesi gibi dalga hareketlerinin açıklandığı birçok dalga modeli geliştirilmiştir (Massel, 1996).

Enerji transferi denklemine dayanan birinci, ikinci ve üçüncü nesil dalga tahmin modelleri bu modellerin başında gelmektedir. Birinci nesil dalga tahmin modellerine ait Gelci ve diğ. (1957) tarafından geliştirilen model kaynak fonksiyonu ile ilgili çok az bilgi barındırmaktadır. Philips (1957) ve Miles (1957) tarafından yapılan çalışmalarda dalga üretimi teorileri hakkında bilgi verilmesi ve Hasselmann (1962) tarafından yapılan çalışmada açıklanan dalga-dalga etkileşimine bağlı lineer olmayan enerji transferi ile birinci nesil dalga tahmin modellerine ait bir teorik altyapı oluşturulmuştur. 1960 ve 1970'li yıllarda geliştirilen yeni modeller ile kaynak terimi olarak rüzgâr verisi ve enerji kaybı terimleri kullanılmasına karşın lineer olmayan etkileşim terimi ihmal edilerek birinci nesil dalga tahmin modelleri geliştirilmiştir.

İkinci nesil dalga tahmin modelleri, Ayrık Spektral Modeller (DS), Parametrik Modeller (P) ve Hibrit Modeller (H) olmak üzere üç farklı şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller temel olarak birinci nesil dalga tahmin modellerinin geliştirilmesiyle oluşturulmuştur. SWAMP Grup (1985) tarafından yapılan çalışmada bu üç modele ait karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmaya göre, tüm ikinci nesil dalga tahmin modelleri lineer olmayan enerji transferinin parametreleştirilmesindeki sınırlamalardan etkilenmektedir. Temel olarak farklı bir spektral enerji dengesine dayanan Ayrık Spektral Modeller ve Hibrit Modeller bir rüzgâr-deniz gelişiminde zamansal ve mekansal değişiklikler açısından farklı bağlantılar sağlamaktadır. Ayrık Spektral Modeller sadece ortalama yönü değil yön dağılımını da vermektedir.

1980'li yılların ortalarında yapılan çalışmalar birinci ve ikinci nesil dalga tahmin modellerinin bazı ekstrem durumlar için uygulanamayacağını göstermiştir. Bu sebeple 1980'li yılların sonuna doğru üçüncü nesil dalga tahmin modelleri geliştirilmeye başlanmıştır. Üçüncü nesil dalga tahmin modeline ait ilk uygulama WAMDI Grup (1988) tarafından yapılmıştır. Bu uygulamaya göre, tam lineer olmayan transfer kaynak fonsiyonunun parametreleştirilmesi spektrumun kendisi ile eşit sayıda serbestlik derecesi içermesini sağlamaktadır. Uygulamada kullanılan modelde Hasselmann ve diğ. (1985) tarafından yapılan çalışmada yer alan ayrık etkileşim yaklaşımı dikkate alınmıştır (Massel, 1996).

Üçüncü nesil dalga tahmin modellerinin kullanılma sebeplerinden bir diğeri ise ikinci nesil dalga tahmin modellerinin kaynak terimleri dengesinin çözümünde yetersiz kaldığı durumlarda detaylı kaynak terimleri dengesinin doğrudan çözümü ile yönsel spektrum benzeşimlerinde daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi ile ilgilidir. İkinci ve üçüncü nesil dalga tahmin modelleri arasındaki temel fark bu modellerde kullanılan çözüm yöntemidir. İkinci nesil dalga tahmin modelleri dalga gelişimini benzeştirmek için spektral şekil üzerindeki kısıtlamalar ile birlikte lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi kaynak teriminin parametreleştirilmesini birleştirmektedir. Üçüncü nesil dalga tahmin modelleri ise lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi kaynak terimlerinin daha ayrıntılı bir şekilde parametreleştirilmesini kullanarak dalga gelişimini benzeştirirken spektral şekil üzerindeki kısıtlamaları hafifletmektedir (CERC, 2003).

Başlıca dalga tahmin modelleri: birinci nesil dalga tahmin modelleri için VENICE ve MRI (Meteorological Research Institute), ikinci nesil dalga tahmin modelleri için BMO (The UK Meteorological Office Wave Model), SAIL (Atlantic Oceanographic and Meteorological Lab. NOAA Model), DNS (Scripps Institution of Oceanography Model) ve HYPA (Hybrid Parametrical), üçüncü nesil dalga tahmin modelleri için WAM (Wave Model), HISWA (Hincasting of Waves in Shallow-Water), WAVEWATCH, SWAN (Simulating Waves Nearshore) ve MIKE 21 SW olarak bilinmektedir.

2.3 MIKE 21 Spektral Dalga Modeli

2.3.1 Giriş

MIKE 21 SW yapılandırılmamış ağ sistemine dayalı yeni üçüncü nesil bir spektral rüzgâr-dalga modelidir. Model, rüzgâr dalgası ve soluğan dalgalarının açık deniz ve kıyı bölgelerindeki gelişme, sönümlenme ve transformasyon gibi hareketlerini benzeştirmekte kullanılmaktadır (DHI, 2021).

Yönsel ayrılmış parametrik formül ve tam spektral formül olmak üzere iki farklı formül içermektedir. Tam spektral formül dalga hareketi korunum denklemine dayanmaktadır. Yönsel ayrılmış parametrik formül ise dalga hareketi korunum denkleminin parametreleştirilmesine dayanmaktadır.

MIKE 21 SW aşağıdaki fiziksel olayları içermektedir:

- Rüzgâr etkisiyle dalga gelişimi,
- Lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi,
- Köpüklenmeden dolayı enerji kaybı,
- Taban sürtünmesinden dolayı enerji kaybı,
- Derinlik kaynaklı dalga kırılmasından dolayı enerji kaybı,
- Derinlik değişimlerinden dolayı sapma ve sığlaşma,
- Dalga-akıntı etkileşimi,
- Zamanla değişen su derinliğinin etkisi.

MIKE Zero Ağ Üreticisi hesaplama alanını oluştururken yapılandırılmamış ağ sistemi kullanmaktadır. Geleneksel olarak üçüncü nesil dalga tahmin modelleri dikdörtgen olarak yapılandırılmış ağ sistemi kullanmaktadırlar. Fakat bu ağ sistemi oldukça uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir. Ayrıca ince çözüm ağına gerek duyulan bölgeleri dikdörtgen şeklinde yapılandırılmış ağ sistemiyle detaylı olarak çözmek mümkün olamamaktadır. Yeni üçüncü nesil spektral model ise yapılandırılmamış ağ sistemi kullanmaktadır. Yapılandırılmamış ağ sistemindeki yüksek derecedeki esneklik sebebiyle farklı ölçeklerdeki problemler oldukça rahat çözümlenebilmektedir. Üçgen elemanlardan oluşan yapılandırılmamış ağ sistemiyle istenilen bölgelerde çözünürlük artırılabilirken istenilen bölgelerde daha kaba ağ kullanılabilmektedir. Örneğin, açık deniz

bölgelerinde kaba ağ kullanılabilirken kıyı bölgelerinde ağ sisteminin inceltilebilmesi ile elde edilen sonuçlarda daha fazla doğruluk sağlanabilmektedir (Arı, 2009).

2.3.2 Uygulama Alanları

MIKE 21 SW açık deniz ve kıyı bölgelerindeki dalga iklimlerinin tahmin edilmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Önemli bir uygulama alanı açık deniz, kıyı ve liman yapılarının tasarımıdır. Bu yapıların tasarımında dalga yüklerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi emniyetli ve ekonomik bir tasarım açısından son derece önemlidir. Dalga yüklerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için gerekli olan dalga parametrelerinin benzeştirilmesinde MIKE 21 SW kullanılmaktadır. Ayrıca dalga koşulları ve dalga kaynaklı akımlar ile ilişkili olan katı madde taşınımının hesaplanmasında da MIKE 21 SW kullanılmaktadır.

2.3.3 Temel Denklemler

Ağırlık dalgalarının dinamiği dalga hareketi yoğunluğunun taşınım denklemi ile tanımlanmaktadır. Küçük ölçekli uygulamalarda temel taşınım genellikle kartezyen koordinatlarda formüle edilmektedir. Büyük ölçekli uygulamalarda ise kutupsal küresel koordinatlar kullanılmaktadır. Dalga hareketi yoğunluğu spektrumu zamana ve mekana bağlı olarak değişiklik göstermektedir ve iki dalga fazı parametresinin bir fonksiyonudur. Bu iki dalga fazı parametresi dalga numarası (k) ve dalga yönü (θ) olabileceği gibi alternatif olarak dalga yönü (θ) ve göreceli açısal frekans ($\sigma = 2\pi f_r$) veya mutlak açısal frekans ($\omega = 2\pi f_a$) da olabilmektedir (DHI, 2021). Hareket yoğunluğu N (σ, θ) ile enerji yoğunluğu E (σ, θ) arasındaki ilişki (2.7) eşitliği ile verilmektedir.

$$N = \frac{E}{\sigma} \tag{2.7}$$

Yavaş bir şekilde değişen su derinliği ve akımlarda dalga yayılımı için göreceli açısal frekans ve mutlak açısal frekans arasındaki ilişki lineer dispersiyon bağıntısı (2.8) eşitliği ile verilmektedir.

$$\sigma = \sqrt{gktanh(kd)} = \omega - \vec{k}\,\vec{U} \tag{2.8}$$

burada g yer çekimi ivmesi, k dalga numarası, d su derinliği ve $\vec{U}$ akım hızı vektörüdür.

Dalga enerjisinin grup hızının büyüklüğü (c_g) (2.9) eşitliği ile faz hızı (c) ise (2.10) eşitliği ile verilmektedir.

$$c_g = \frac{\partial\sigma}{\partial k} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(kd)}\right)\frac{\sigma}{k} \tag{2.9}$$

$$c = \frac{\sigma}{k} \tag{2.10}$$

Frekans spektrumu bir kesme frekansından daha düşük frekans değerleri için deterministik prognostik kısım olarak, kesme frekansından daha büyük frekans değerleri için ise analitik diagnostik kısım olarak ayrılmaktadır. Spektrumun deterministik kısmı sayısal yöntemler kullanılarak dalga hareketi yoğunluğunun taşınım denkleminin çözülmesiyle belirlenmektedir. Kesme frekansının üzerinde ise (2.11) eşitliği kullanılmaktadır.

$$E(\sigma,\theta) = E(\sigma_{maks},\theta)\left(\frac{\sigma}{\sigma_{maks}}\right)^{-m} \tag{2.11}$$

burada m = 5 olarak alınan bir sabittir. Maksimum prognostik frekans kesme frekansına bağlı olarak (2.12) eşitliği ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{kesme} = \min[\sigma_{maks}, maks(2.5\overline{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \tag{2.12}$$

burada σ_{maks} deterministik dalga modelinde kullanılan maksimum ayrık frekans, $\overline{\sigma}$ ortalama göreceli frekans ve $\sigma_{PM} = g/(28U_{10})$ tam gelişmiş deniz durumu için Pierson-Moskowitz pik frekansıdır. U_{10} ortalama deniz seviyesinden 10 m yukarıda ölçülen rüzgâr hızıdır.

2.3.4 Kartezyen Koordinatlarda Dalga Hareketi Korunum Denklemi

Kartezyen koordinatlarda dalga hareketi için korunum denklemi (2.13) eşitliği ile verilmektedir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla.(\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \tag{2.13}$$

burada $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ hareket yoğunluğu, $\vec{x} = (x, y)$ kartezyen koordinatlar, σ göreceli açısal frekans, θ dalga yönü, t zaman, ∇ dört boyutlu diferansiyel operatör, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ dört boyutlu faz alanındaki bir dalga grubunun yayılma hızı ve S enerji denge denklemi için kaynak terimdir. $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ karakteristik yayılım hızları sırasıyla (2.14), (2.15) ve (2.16) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \tag{2.14}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U}\nabla_{\vec{x}} d\right] - c_g \vec{k}\frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \tag{2.15}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k}\left[\frac{\partial \sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k}\frac{\partial \vec{U}}{\partial m}\right] \tag{2.16}$$

burada s dalga yönündeki alan koordinatı, m s'ye dik olan koordinat ve $\nabla_{\vec{x}}$ $\vec{x}$ alanındaki iki boyutlu diferansiyel operatördür.

2.3.5 Küresel Koordinatlarda Dalga Hareketi Denge Denklemi

Küresel kutupsal koordinatlarda dalga hareketi denge denklemi (2.17) eşitliği ile verilmektedir.

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi}c_\phi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda}c_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \tag{2.17}$$

burada $\hat{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ hareket yoğunluğudur ve normal hareket yoğunluğu (N) ile arasında (2.18) ve (2.19) eşitlikleri ile verilen bir ilişki bulunmaktadır. $\vec{x} = (\phi, \lambda)$ küresel koordinatlar, ϕ enlem, λ boylam, $\hat{S}(\vec{x}, \sigma, \theta, t) = SR^2\cos\phi$ olmak üzere kaynak ve kuyu fonksiyonu ve R dünyanın yarıçapıdır.

$$\hat{N}d\sigma d\theta d\phi d\lambda = Nd\sigma d\theta dxdy \tag{2.18}$$

$$\widehat{N} = NR^2\cos\phi = \frac{ER^2\cos\phi}{\sigma} \tag{2.19}$$

$c_\phi, c_\lambda, c_\sigma, c_\theta$ karakteristik yayılım hızları sırasıyla (2.20), (2.21), (2.22) ve (2.23) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$c_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g\cos\theta + u_\phi}{R} \tag{2.20}$$

$$c_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g\sin\theta + u_\lambda}{R\cos\theta} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned} c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} - \frac{d}{R}\left(\frac{1}{\cos\theta}\frac{du_\lambda}{\partial\lambda} + \frac{du_\phi}{\partial\phi} - u_\phi\tan u_\phi\right)\right] \\ - \frac{kc_g}{R}\left[\cos\theta\left(\sin\theta\frac{du_\lambda}{d\phi} + \cos\theta\frac{du_\phi}{d\phi}\right)\right. \\ + \frac{\sin\theta}{\cos\phi}\left(\sin\theta\frac{du_\lambda}{d\lambda} + \cos\theta\frac{du_\phi}{d\lambda}\right) \\ \left. - \cos\theta\tan\phi\left(u_\lambda\sin\phi + u_\phi\cos\theta\right)\right] \end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned} c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{c_g\sin\theta\tan\phi}{R} + \frac{1}{Rk}\frac{\partial\sigma}{\partial d}\left(\sin\theta\frac{\partial d}{\partial\phi} - \frac{\cos\theta}{\cos\phi}\frac{\partial d}{\partial\lambda}\right) \\ + \frac{\sin\theta}{R}\left(\sin\theta\frac{\partial u_\lambda}{\partial\phi} + \cos\theta\frac{\partial u_\phi}{\partial\phi}\right) \\ - \frac{\cos\theta}{R\cos\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial u_\lambda}{\partial\lambda} + \cos\theta\frac{\partial u_\phi}{\partial\lambda}\right) \end{aligned} \tag{2.23}$$

burada (u_ϕ, u_λ) coğrafik alandaki derinliğe göre ortalaması alınmış akım hızı vektörünün $(\vec{U})$ bileşenleridir.

2.3.6 Kaynak Fonksiyonları

Eşitlik (2.24) ile verilen enerji kaynak terimi (S) çeşitli fiziksel olayları tanımlayan kaynak fonksiyonlarının süperpozisyonunu temsil etmektedir.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \tag{2.24}$$

burada S_{in} rüzgâr ile enerji üretimi, S_{nl} lineer olmayan dalga-dalga etkileşiminden dolayı dalga enerji transferi, S_{ds} köpüklenmeden dolayı enerji kaybı, S_{bot} taban sürtünmesinden dolayı enerji kaybı ve S_{surf} derinlik kaynaklı dalga kırılmasından dolayı enerji kaybıdır (DHI, 2021).

2.3.7 İntegral Dalga Parametreleri

İntegral ve spektral dalga parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan spektral momentler (2.25) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$m_i = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(f,\theta) f^i df d\theta \tag{2.25}$$

burada E (f, θ) dalga frekansı (f) ve dalga yönüne (θ) bağlı yönsel dalga spektrumudur.

Belirgin dalga yüksekliği (H_s), dalga enerji periyodu (T_e) ve ortalama dalga periyodu (T_m) parametreleri sırasıyla (2.26), (2.27) ve (2.28) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$H_s\ (H_{m0}) = 4\sqrt{m_0} \tag{2.26}$$

$$T_e\ (T_{m-1,0}) = m_{-1}/m_0 \tag{2.27}$$

$$T_m\ (T_{01}) = m_0/m_1 \tag{2.28}$$

3
SAYISAL DALGA MODELLEMESİ VE KALİBRASYON

3.1 Giriş

Marmara Denizi sayısal dalga modeli kurulumu için Bölüm 2'de açıklanan yapılandırılmamış ağ sistemine dayalı yeni üçüncü nesil bir spektral rüzgâr-dalga modeli olan MIKE 21 Spektral Dalga Modeli kullanılmıştır. Model, rüzgâr dalgası ve soluğan dalgalarının açık deniz ve kıyı bölgelerindeki gelişme, sönümlenme ve transformasyon gibi hareketlerini benzeştirmekte kullanılmaktadır. Modelde spektral dalga momentleri kullanılarak dalga enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için gerekli olan belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gibi integral dalga parametreleri elde edilmektedir. Dalga parametrelerinin en doğru şekilde elde edilmesi için sayısal dalga modellemesi ve model üzerinde kalibrasyon çalışmaları hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.2 Sayısal Dalga Modellemesi

Sayısal dalga modellemesi temel olarak 3 adımdan meydana gelmektedir. Öncelikle çalışma alanı haritalar yardımıyla model üzerinde sayısallaştırılarak hesaplama alanı ve batimetri oluşturulmaktadır. Ardından modelin hangi zaman diliminde koşturulacağı belirlenerek bu zaman dilimine ait rüzgâr verileri çeşitli ölçüm ve tahmin kuruluşlarından alınmaktadır. Son olarak modelin bilimsel altyapısına ve çalışılacak bölgeye en uygun parametre değerleri belirlenerek modelin kurulumu gerçekleştirilmektedir.

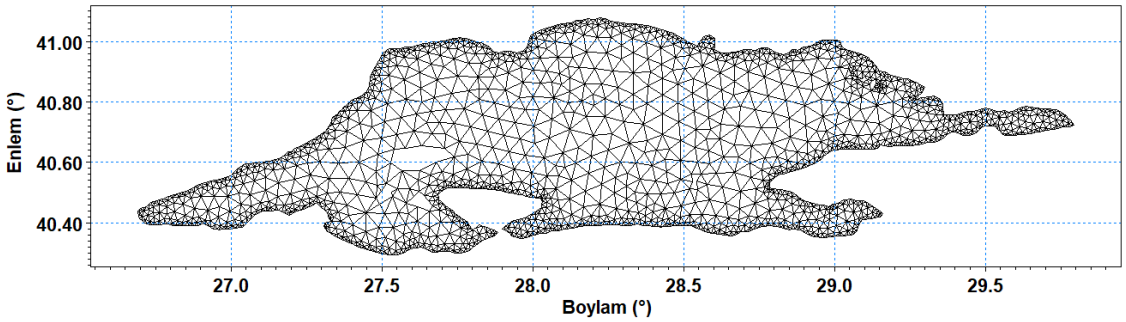
3.2.1 Hesaplama Alanı ve Batimetri

Marmara Denizi için model hesaplama alanı olarak Tablo 3.1 ile verilen ve Marmara Denizi'nin tamamını kapsayan koordinatlar kullanılmıştır. Model hesaplama alanı üzerinde Marmara Denizi'nin Karadeniz'e ve Ege Denizi'ne olan girişleri kapatılmıştır.

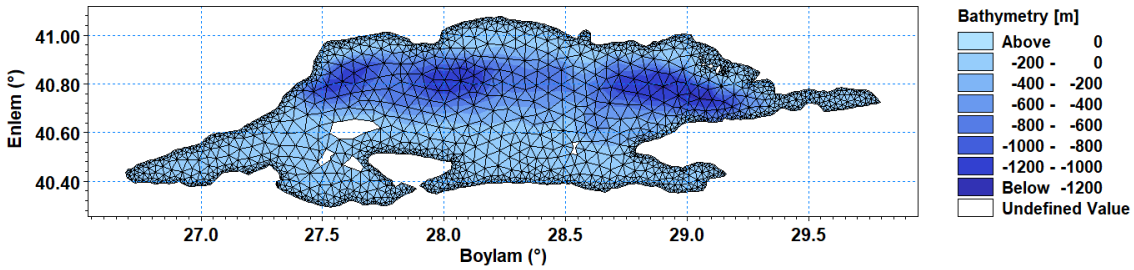
Tablo 3.1 Hesaplama alanı koordinatları

	x (Boylam)	y (Enlem)
Minimum Koordinat (°)	26.69	40.29
Maksimum Koordinat (°)	29.79	41.08

Şekil 3.1 ile verilen 3372 adet üçgen eleman ve 2141 adet düğüm noktalı model alanı ağ sistemi ile model hesaplama alanı oluşturulmuştur. Hesaplama alanının oluşturulmasında kullanılan üçgen elemanlar istenilen bölgelerde ince veya kaba olarak kullanılabilmektedir. Kıyıya yakın bölgelerde daha detaylı bir analiz yapabilmek amacıyla ince bir ağ yapısı kullanılırken açık denize doğru gidildikçe kaba bir ağ yapısı kullanılmıştır. Model alanı batimetrisi Şekil 3.2 ile verilmiştir. Model hesaplama alanı içerisindeki maksimum derinlik -1260 m'ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 3.1 Model alanı ağ sistemi



Şekil 3.2 Model alanı batimetrisi

3.2.2 Zaman Parametreleri ve Kullanılan Veriler

Model simülasyonuna ait zaman parametreleri Tablo 3.2 ile verilmiştir. Simülasyon başlangıç tarihi ve simülasyon bitiş tarihleri mevcut rüzgâr verilerine ait tarihleri kapsamaktadır. Modelin doğruluğu rüzgâr verilerinin doğruluğu ile

doğrudan ilişkili olduğundan kullanılan veri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında ECMWF'den alınan 1979 ve 2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönemi kapsayan ERA-Interim rüzgâr alanı verisi kullanılmıştır. Rüzgâr alanı verisi Eşgüdümlü Evrensel Zaman (UTC) diliminde günde dört adet veriden (00, 06, 12, 18) oluşmak üzere 6 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip rüzgâr hızlarını içermektedir. Verilerdeki enlemsel ve boylamsal yönlerdeki u ve v rüzgâr bileşenleri deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki rüzgâr hızına karşılık gelmektedir. Başlangıçta 0.70° x 0.70° alansal çözünürlüğe sahip olan ERA-Interim T255 rüzgâr alanı verisi, daha detaylı bir analiz yapabilmek ve daha doğru bir sonuç elde edebilmek amacıyla interpolasyon yöntemiyle sıklaştırılarak 0.25° x 0.25° alansal çözünürlüklü hale getirilmiştir. Modelde stabilite sorunu yaşamamak için 600 s'lik zaman adımı aralığı kullanılmıştır.

Tablo 3.2 Model simülasyonuna ait zaman parametreleri

Zaman Adımı Sayısı	2280960
Zaman Adımı Aralığı	600 s
Simülasyon Başlangıç Tarihi	01.12.1978 00.00
Simülasyon Bitiş Tarihi	31.12.2018 18.00

3.2.3 Temel Denklemler, Spektral Ayrıklaştırma ve Çözüm Tekniği

Temel denklemler, spektral ayrıklaştırma ve çözüm tekniği ile ilgili modelde kullanılan parametreler Tablo 3.3 ile verilmiştir. MIKE 21 Spekral Dalga Modeli Bölüm 2'de açıklandığı üzere spektrum formülü olarak yönsel ayrılmış parametrik formül ve tam spektral formül olmak üzere iki farklı formül içermektedir. Tam spektral formül dalga hareketi korunum denklemine dayanmaktadır. Yönsel ayrılmış parametrik formül ise dalga hareketi korunum denkleminin parametreleştirilmesine dayanmaktadır. Yönsel ayrılmış parametrik formül ile rüzgâr-dalga üretimi gerçekleştirilemediğinden dolayı Marmara Denizi sayısal modeli için spektral formül olarak tam spektral formül kullanılmıştır.

MIKE 21 Spektral Dalga Modeli zaman formülü olarak yarı kararlı formül ve kararlı olmayan formül olmak üzere iki farklı formül içermektedir. Marmara Denizi sayısal modeli için zaman formülü olarak kararlı olmayan formül

kullanılmıştır. Kararlı olmayan formülde zamandaki integrasyon kesirli adım yaklaşımına dayanmaktadır. Öncelikle, temel korunum denklemleri kaynak fonksiyonları olmadan çözülerek ve yeni zaman düzeyinde yaklaşık bir çözüm hesaplanarak bir taşınım adımı gerçekleştirilmektedir. Sonrasında ise sadece kaynak fonksiyonların etkisi dikkate alınarak tahmin edilen çözümden yeni bir çözüm hesaplanarak bir kaynak fonksiyon adımı gerçekleştirilmektedir.

Frekans ayrıklaştırması sadece tam spektrum formülünde kullanılmaktadır. Logaritmik ve eşit mesafeli dağılım olmak üzere iki tür frekans ayrıklaştırması mevcuttur. Eşitlik (3.1) ile verilen logaritmik ayrıklaştırmanın kullanılması tavsiye edilmektedir.

$$f_j = f_0\, c^j, \qquad j = 0,1,\dots,n-1 \tag{3.1}$$

burada f_j frekans, f_0 minumum frekans, c frekans faktörüdür (varsayılan değer 1.1'dir) ve n frekans sayısıdır.

360°'lik gül ve yönsel daire dilimi olmak üzere iki tür yönsel ayrıklaştırma mevcuttur. 360°'lik gül genellikle değişken rüzgâr/dalga/soluğan yönleri için seçilmektedir. Fakat, beklenen rüzgâr/dalga/soluğan yönleri önceden tanımlanmış bir yön aralığı içindeyse hesaplama süresini azalttığından dolayı yönsel daire dilimi seçilmesi tavsiye edilmektedir. Ayrık yönlerin sayısı ise dalgaların yönsel değişimini çözebilmek için yeterince büyük olmalıdır.

Taşınım adımı açık bir Euler şeması ile gerçekleştirilmektedir. Açık bir şema kullanarak ağır stabilite kısıtlamasının üstesinden gelebilmek için Vislmeier ve Hänel (1995) tarafından öne sürülen düşünceyi takip eden bir çoklu seri integrasyon şeması kullanılmaktadır. Kullanılan şemada adım sayısının elemandan elemana değişebileceği bir dizi integrasyon adımı yerel olarak kullanılarak maksimum zaman adımı artırılmaktadır. Taşınım hesabındaki maksimum zaman adımı sayısı 32'dir. Kaynak hesabındaki adım sayısı Komen ve diğ. (1994) ve Hersbach (1999) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kaynak hesabındaki zaman adımı sayısının 1 olarak ayarlanması tavsiye edilmektedir (DHI, 2021).

Tablo 3.3 Temel denklemler, spektral ayrıklaştırma ve çözüm tekniği ile ilgili modelde kullanılan parametreler

Temel Denklemler	Spektral Formül	Tam spektral formül	
	Zaman Formülü	Kararlı olmayan formül	
Spektral Ayrıklaştırma	Frekans Ayrıklaştırması	Ayrıklaştırma Tipi	Logaritmik
		Frekans Sayısı	25
		Minimum Frekans	0.055
		Frekans Faktörü	1.1
	Yönsel Ayrıklaştırma	Ayrıklaştırma Tipi	360°'lik gül
		Yön Sayısı	16
Çözüm Tekniği	Hesaplama Sınırları	Taşınım hesabındaki maksimum zaman adımı sayısı	32
		Kaynak hesabındaki adım sayısı	1

3.3 Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

Sayısal dalga modelinin kurulumu yapıldıktan sonra dalga parametrelerinin tahmini için model üzerinde hassasiyet analizi, kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizi modelin hangi kalibrasyon parametrelerine karşı hassas olduğunun belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Modelin hassas olduğu kalibrasyon parametreleri belirlendikten sonra model bu parametrelere göre kalibre edilmektedir. Hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmaları iç içe yapıldıktan sonra model farklı bir zaman aralığında doğrulanmaktadır. Modelin hassasiyet analizi, kalibrasyonu ve doğrulanması işlemleri, MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'nde bulunan taban sürtünmesi, kırılma parametreleri, köpüklenme parametresi, Charnock parametresi gibi kalibrasyon parametreleri ve sırasıyla (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.5) eşitlikleri ile hesaplanan

RMSE (Ortalama Hataların Karekökü), Bias, SI (Saçılım İndeksi) ve r (Korelasyon Katsayısı) istatistiksel hata parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)^2} \tag{3.2}$$

$$\mathrm{Bias} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i) \tag{3.3}$$

$$\mathrm{SI} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{x}} \tag{3.4}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}((y_i - \bar{y})\,(x_i - \bar{x}))}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2)(\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2)}} \tag{3.5}$$

burada n toplam veri sayısı, x ölçülen değer ve y ise hesaplanan değerdir. MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'nde bulunan kalibrasyon parametreleri (DHI, 2021):

- Taban sürtünmesi: Sığ su derinliklerinde taban sürtünme katsayısındaki bir artış genellikle enerji kaybının artmasına, dalga yüksekliğinin azalmasına ve dalga periyodunun artmasına neden olmaktadır. Derin suda ise dalgalar tabanı hissetmeyeceği için taban sürtünmesinin etkisi ihmal edilmektedir.
- Kırılma parametreleri: Kırılma parametrelerinden α parametresi kırılmadan sonra enerji kaybı oranını kontrol etmektedir. Derinlik kaynaklı γ parametresi ise derinliğe bağlı kırılma miktarını kontrol etmektedir. α parametresindeki bir artış enerji kaybı oranını artırmaktadır. γ parametresindeki artış ise derinliğe bağlı kırılma miktarını azaltmaktadır.
- Köpüklenme: Sadece tam spektrum formülünde kullanılan köpüklenme parametresinde çoğu uygulamada varsayılan değerler kullanılmaktadır. Bu varsayılan değerler Komen ve diğ. (1994) tarafından önerilen değerlerdir (C_{ds}=4.5 ve δ=0.5). Bir açık deniz modelinde derin suda hesaplanan dalga yükseklikleri ve dalga periyotları genellikle ölçülen dalga yükseklilerine ve dalga periyotlarına göre küçük çıkıyorsa model performansını iyileştirmek için C_{ds} katsayısı azaltılabilmektedir.

- Rüzgâr verisi: MIKE 21 Spektral Dalga Modeli'nin doğruluğu rüzgâr verilerinin doğruluğu ile yakından ilgilidir. Genellikle rüzgâr hızındaki %10'luk bir hata dalga yüksekliğinde %20'lik bir hataya neden olmaktadır.
- Akıntı ve su seviyesi verileri: Özellikle sığ su uygulamalarında akıntı ve su seviyesi değişimi verilerinin doğruluğu model sonuçları için önemli olabilmektedir.
- Sınır verisi, coğrafik ve spektral alanlardaki çözünürlük: Coğrafik ve spektral alanlardaki çözünürlüğün artırılması ile yeterli çözünürlük ayarlanarak modelin daha doğru sonuçlar vermesi ve daha detaylı çözümü mümkün olmaktadır.
- Charnock parametresi; hava-deniz etkileşimi ile ilgili bir parametredir ve varsayılan değeri 0.01'dir. Charnock parametresi (3.6) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$z_{ch} = g.z_0/u_*^2 \qquad (3.6)$$

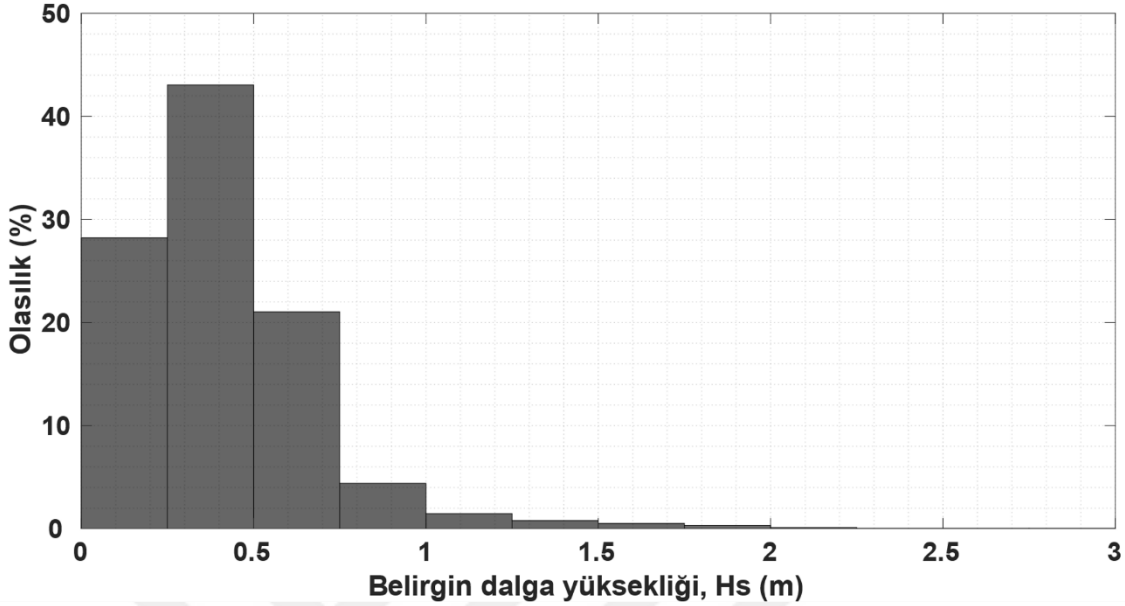
burada z_{ch} Charnock parametresi, g yer çekimi ivmesi, z_o deniz pürüzlülüğü ve u_* sürtünme hızıdır.

3.3.1 Hassasiyet Analizi ve Kalibrasyon

Modelin hangi kalibrasyon parametrelerine karşı hassas olduğunun belirlenmesi amacıyla hassasiyet analizi gerçekleştirilmektedir. Modelin hassas olduğu kalibrasyon parametreleri belirlenerek model bu parametrelere göre kalibre edilmektedir. Model ilk olarak yıllık bazda en çok ölçüm verisi bulunan 2015 yılı için varsayılan parametre değerleri (Köpüklenme Parametreleri $C_{ds} = 4.5$, $\delta = 0.5$, Kırılma Parametreleri $\alpha = 1$, $\gamma = 0.8$, Taban Sürtünmesi $f_w = 0.0212$ ve Charnock = 0.01) kullanılarak koşturulmuştur.

Daha önce yapılan çalışmalardan (Arı, 2009; Yüksel ve diğ., 2011) model üzerindeki en etkili parametrenin köpüklenme parametresi (C_{ds}) olduğu bilindiğinden dolayı bu parametre değeri 0.5-4.0 aralığında değiştirilerek 2015 yılı için model yeniden koşturulmuştur. 2015 yılı için hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri aynı dönemde İstanbul, Silivri'de 40.9742° K ve 28.2487° D koordinatlarında, 70 m derinlikte ve kıyıdan yaklaşık 10 km mesafede bulunan ölçüm istasyonundan elde edilen belirgin dalga yüksekliği ölçümleriyle

karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3 ile İstanbul, Silivri ölçüm istasyonunda 2015 yılında ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin oluşma olasılıkları verilmiştir.



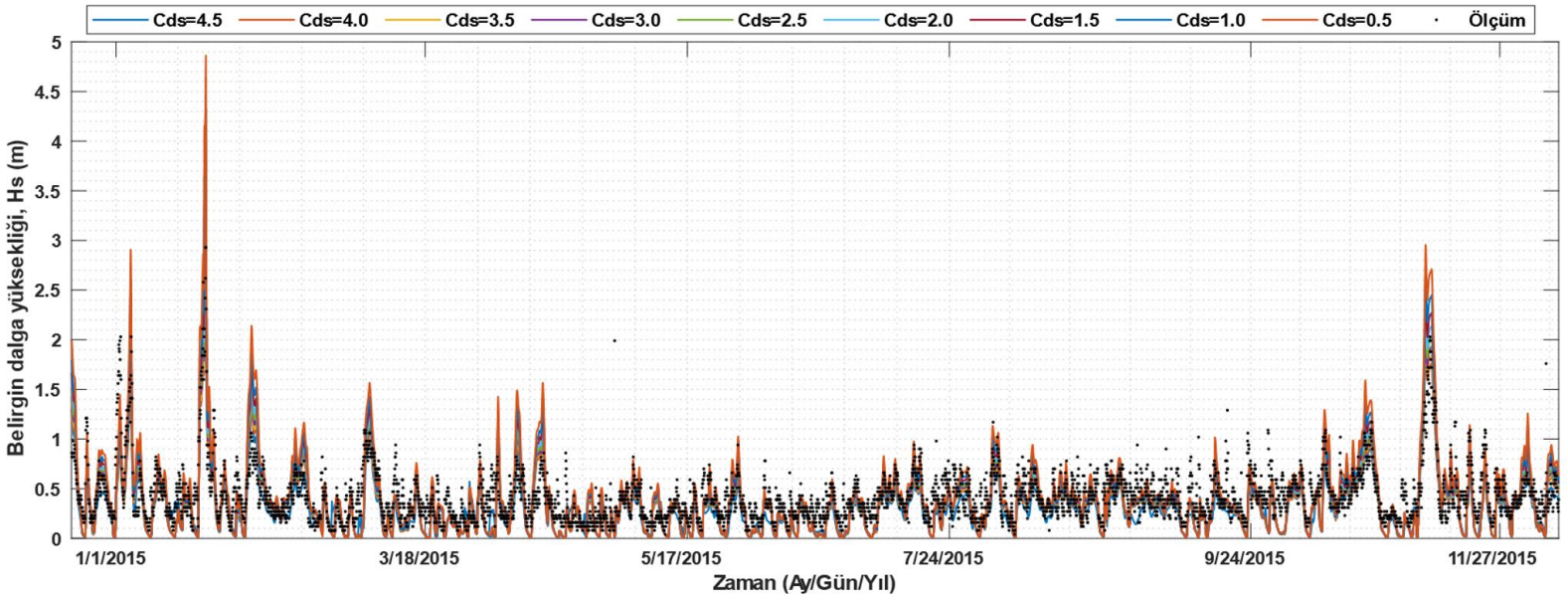
Şekil 3.3 Silivri istasyonunda ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin oluşma olasılıkları (2015)

Şekil 3.3 ile verilen histogram incelendiğinde 0.25 m'den küçük belirgin dalga yüksekliği oluşma olasılığının %28, 0.25 m ve 0.50 m aralığında belirgin dalga yüksekliği oluşma olasılığının %43, 0.50 m ve 0.75 m aralığında belirgin dalga yüksekliği oluşma olasılığının %21 ve 0.75 m'den büyük belirgin dalga yüksekliği oluşma olasılığının ise %8 olduğu görülmektedir. Karşılaştırma çalışmalarında daha yüksek oluşma olasılıkları daha fazla önem taşıdığından ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri 0.25 m'lik gruplara ayrılarak incelenmiştir. 0.5-4.5 aralığındaki C_{ds} değerleri kullanılarak hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri ve ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile elde edilen boyutsuz istatistiksel hata parametreleri (SI ve r) Tablo 3.4 ile verilmiştir. %43 ile en yüksek oluşma olasılığının görüldüğü 0.25 m $< H_s <$ 0.50 m aralığında en düşük SI değeri C_{ds}=4.5'te elde edilmekte ve C_{ds} değeri azaldıkça artmaktadır. Aynı aralıkta en yüksek r değeri ise C_{ds}=0.5'te elde edilmekte ve C_{ds} değeri arttıkça azalmaktadır. Buradan C_{ds} değerinin alt ve üst sınırındaki hata değerlerinin optimum sonuç vermediği, 0.5-4.5 aralığının ortasında bulunan C_{ds} değerlerinin ise alt ve üst sınıra göre daha iyi sonuç verdiği elde edilmektedir.

Tablo 3.4 Farklı C_{ds} değerleri için elde edilen istatistiksel sonuçlar (2015)

C_{ds}	$H_s < 0.25$ m		$0.25 \text{ m} < H_s < 0.50$		$0.50 \text{ m} < H_s < 0.75$		$H_s > 0.75$ m	
	SI	r	SI	r	SI	r	SI	r
4.5	0.706	0.259	0.474	0.311	0.442	0.261	0.391	0.663
4.0	0.715	0.256	0.475	0.313	0.438	0.262	0.388	0.663
3.5	0.724	0.257	0.478	0.314	0.436	0.264	0.388	0.664
3.0	0.736	0.254	0.483	0.316	0.436	0.264	0.392	0.666
2.5	0.752	0.255	0.490	0.318	0.438	0.265	0.402	0.666
2.0	0.770	0.254	0.501	0.320	0.444	0.266	0.421	0.667
1.5	0.797	0.257	0.518	0.322	0.454	0.267	0.453	0.667
1.0	0.831	0.258	0.543	0.324	0.475	0.268	0.506	0.668
0.5	0.881	0.257	0.587	0.327	0.518	0.270	0.602	0.668

Şekil 3.4, 0.5-4.5 aralığındaki C_{ds} değerleri kullanılarak 2015 yılı için hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil 3.4 incelendiğinde C_{ds} değeri azaltıldıkça hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerinde artış olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 3.4 ile elde edilen sonuçta da olduğu gibi Şekil 3.4 üzerinden de 0.5-4.5 aralığının ortasında bulunan C_{ds} değerlerinin alt ve üst sınır değerlerine göre zaman serisinde daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. 2015 yılı için yapılan ön değerlendirmenin ardından hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmaları aylık bazda yürütülmüştür.



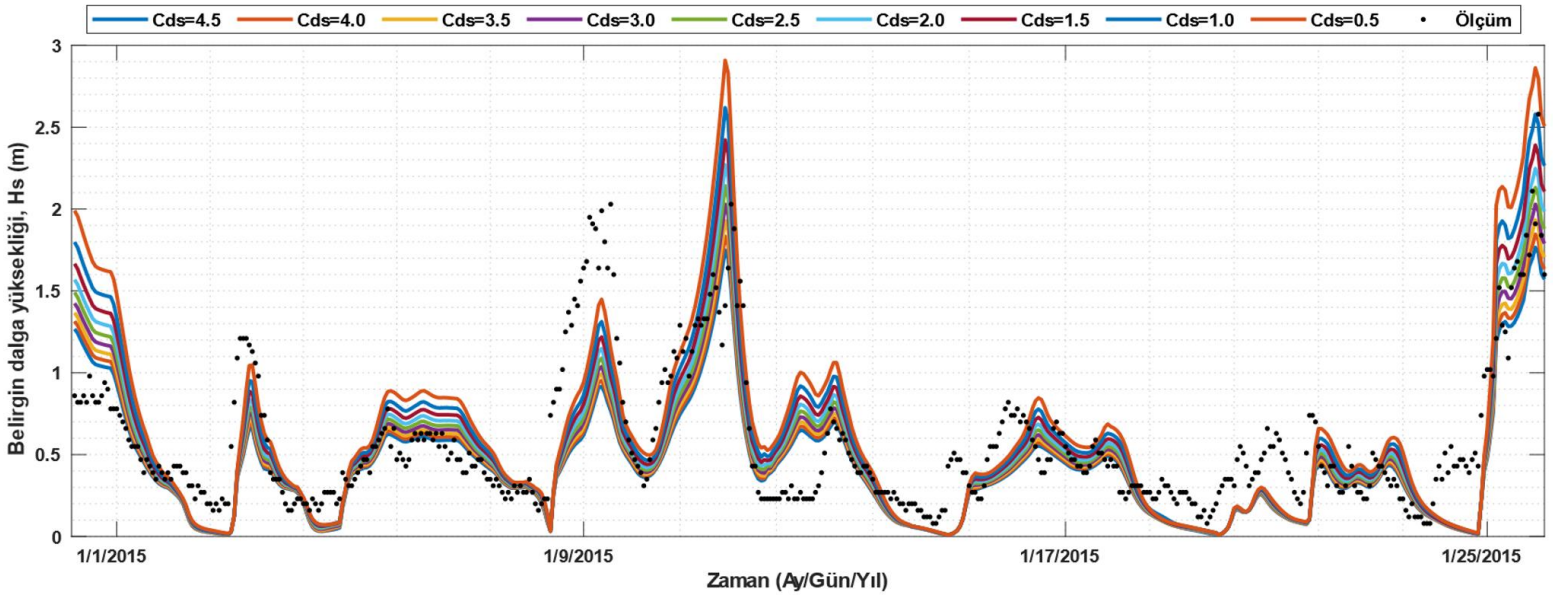
Şekil 3.4 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile karşılaştırılması (2015)

2015 yılı Ocak ayı için 0.5-4.5 aralığındaki C_{ds} değerleri kullanılarak hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri ve ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile elde edilen RMSE, Bias, SI ve r istatistiksel hata parametreleri Tablo 3.5 ile verilmiştir. Ayrıca 0.5-4.5 aralığındaki C_{ds} değerleri ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği karşılaştırmaları Şekil 3.5 ile zaman serisi ve Şekil 3.6 ile de saçılım grafiği şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Farklı C_{ds} değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015)

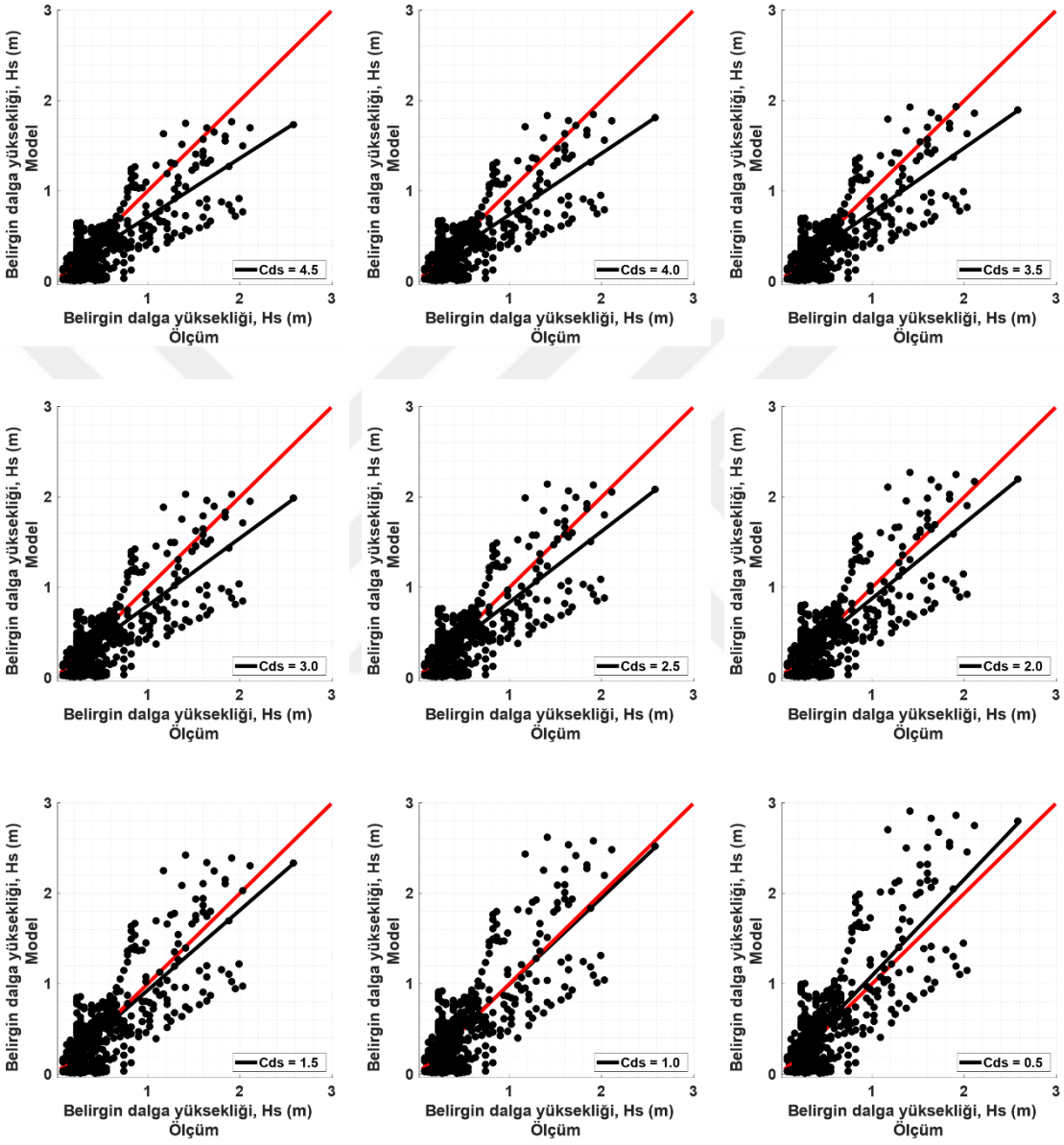
C_{ds}	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
4.5	0.467	0.330	0.301	-0.137	0.645	0.783
4.0	0.467	0.344	0.296	-0.123	0.634	0.783
3.5	0.467	0.360	0.293	-0.107	0.627	0.784
3.0	0.467	0.377	0.290	-0.090	0.621	0.784
2.5	0.467	0.397	0.290	-0.070	0.621	0.784
2.0	0.467	0.420	0.295	-0.047	0.632	0.784
1.5	0.467	0.447	0.304	-0.020	0.651	0.785
1.0	0.467	0.483	0.324	0.016	0.694	0.785
0.5	0.467	0.533	0.367	0.066	0.786	0.785

RMSE, Bias, SI ve r istatistiksel hata parametreleri ile değerlendirme yapılırken karşılaştırılan modeller içerisinde Bias parametresinin sıfıra daha yakın değerde olması, RMSE ve SI parametrelerinin daha düşük değerlerde olması istenirken r parametresinin ise daha yüksek değerde olması istenmektedir. Tablo 3.5 incelendiğinde en düşük RMSE değerinin (0.290 m) ve en düşük SI değerinin (0.621) C_{ds} = 3.0 ve C_{ds} = 2.5'te, sıfıra en yakın Bias değerinin (0.016 m) C_{ds} = 1.0'da) en yüksek r değerinin ise (0.785) 0.5-1.5 aralığındaki C_{ds} değerlerinde elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.5 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile karşılaştırılması (Ocak, 2015)

Tablo 3.5 üzerinde C_{ds} 1.5-3.0 aralığı önem taşımaktadır. Elde edilen RMSE ve SI değerlerinin $C_{ds} = 3.0$ ve $C_{ds} = 2.5$ değerlerine kadar azaldığı ve buradan sonra arttığı görülmektedir. Ayrıca C_{ds} değeri azaltıldıkça belirgin dalga yüksekliği için hesaplanan ortalama model değeri artmaktadır.



Şekil 3.6 Farklı C_{ds} değerleri ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri (Ocak, 2015)

Tablo 3.5 ile elde edilen C_{ds} değeri azaltıldıkça hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerinde artış olduğu sonucu Şekil 3.5 incelendiğinde de görülmektedir. Ayrıca belirgin dalga yüksekliği değeri düştükçe model ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluğun artması da dikkat çekmektedir. 0.5-4.5

aralığındaki C_{ds} değerleri arasında en uyumlu sonuçların 1.5-3.0 aralığında olduğu zaman serisinden belirlenebilmektedir.

Şekil 3.6 incelendiğinde 2015 yılı Ocak ayı için ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin 0-1 m aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. x=y doğrusuna en yakın eğilim çizgisi $C_{ds} = 1.0$ değerinde elde edilmektedir. C_{ds} değeri artırıldıkça eğilim çizgisinin x=y doğrusuna olan yakınlığı azalmaktadır.

Tablo 3.5, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 ayrı ayrı incelendiğinde, x=y doğrusuna daha yakın eğilim çizgisi, sıfıra daha yakın Bias ve daha yüksek r değerlerinin $C_{ds} = 1.0$ ve $C_{ds} = 0.5$'te elde edilmesine karşın bu değerler ile hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinden oldukça yüksek sonuçlar vermesi ve RMSE ve SI değerlerinin yüksek çıkması $C_{ds} = 1.0$ ve $C_{ds} = 0.5$ değerlerini optimum sonuç vermekten uzaklaştırmaktadır. Ayrıca 4.5-3.5 aralığındaki C_{ds} değerleri ile elde edilen hata parametrelerinin genel olarak daha kötü sonuç vermesi ve bu değerler ile hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinden oldukça düşük sonuçlar vermesinden dolayı bu aralıktaki C_{ds} değerlerinin de optimum sonuç elde edilememektedir.

En düşük RMSE ve en düşük SI değerinin $C_{ds} = 3.0$ ve $C_{ds} = 2.5$'te elde edilmesi, RMSE ve SI değerlerinin $C_{ds} = 3.0$ ve $C_{ds} = 2.5$ değerlerine kadar azalması ve buradan sonra artması ve zaman serilerin en uyumlu sonuçların 1.5-3.0 aralığında olması göz önünde bulundurularak $C_{ds} = 1.5$, $C_{ds} = 2.0$, $C_{ds} = 2.5$, $C_{ds} = 3.0$ değerlerinin optimum sonuç verdiği belirlenmiştir. Buradan elde edilen sonuç ile hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmaları bu bölge üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmaları köpüklenme parametresi, kırılma parametreleri, taban sürtünmesi ve Charnock parametresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.6 ile kalibrasyon çalışmasında kullanılan parametre değerleri, Tablo 3.7 ile de farklı kalibrasyon değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3.6 Kalibrasyon çalışmasında kullanılan parametre değerleri

No	Köpüklenme Parametreleri		Kırılma Parametreleri		Taban Sürtünmesi	Charnock
	C_{ds}	δ	γ	α		
k1	2.0	0.2	0.8	1	0.0212	0.01000
k2	2.0	0.8	0.8	1	0.0212	0.01000
k3	2.0	0.9	0.8	1	0.0212	0.01000
k4	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.01850
k5	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00900
k6	1.5	0.5	0.8	1	0.0212	0.00700
k7	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00700
k8	2.5	0.5	0.8	1	0.0212	0.00700
k9	3.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00700
k10	2.0	0.9	0.8	1	0.0212	0.00700
k11	2.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.00700
k12	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00500
k13	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00520
k14	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00530
k15	2.0	0.5	0.8	1	0.0212	0.00525
k16	1.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.00525
k17	2.0	0.9	0.8	1	0.0212	0.00525
k18	2.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.00525
k19	2.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.00500
k20	2.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.01000

Tablo 3.7 Farklı kalibrasyon değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015)

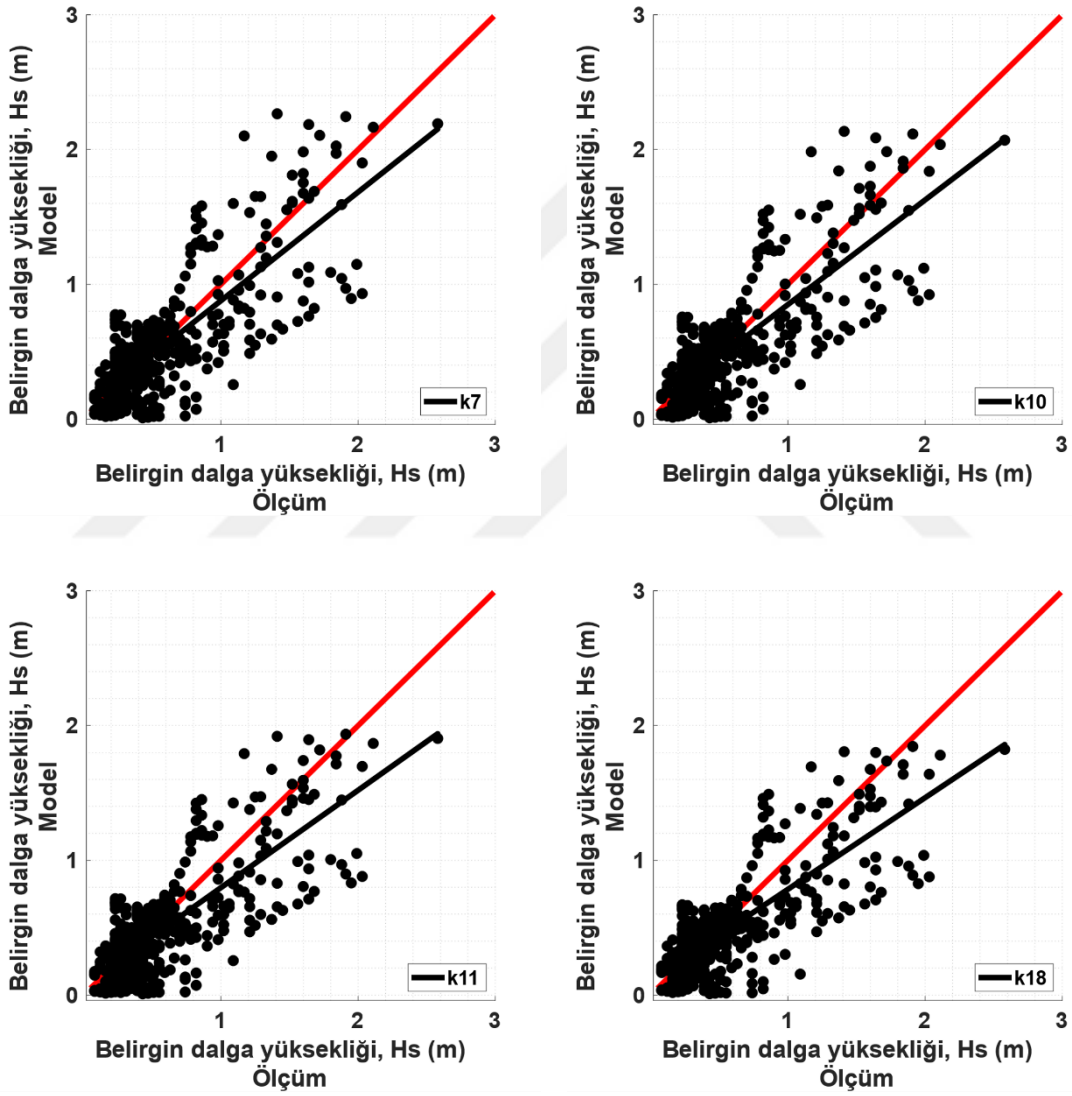
No	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
k1	0.467	0.423	0.295	-0.044	0.632	0.784
k2	0.467	0.415	0.293	-0.052	0.627	0.785
k3	0.467	0.411	0.291	-0.056	0.624	0.785
k4	0.467	0.415	0.303	-0.052	0.649	0.780
k5	0.467	0.421	0.293	-0.046	0.628	0.785
k6	0.467	0.457	0.298	-0.010	0.639	0.786
k7	0.467	0.430	0.288	-0.037	0.616	0.785
k8	0.467	0.401	0.289	-0.066	0.619	0.785
k9	0.467	0.380	0.289	-0.087	0.619	0.785
k10	0.467	0.414	0.285	-0.053	0.610	0.785
k11	0.467	0.384	0.285	-0.083	0.610	0.785
k12	0.467	4.268	5.092	3.801	10.904	0.443
k13	0.467	1.659	2.477	1.192	5.303	0.009
k14	0.467	0.522	0.422	0.055	0.904	0.676
k15	0.467	0.838	0.852	0.371	1.824	0.394
k16	0.467	0.512	0.416	0.045	0.891	0.677
k17	0.467	0.429	0.346	-0.038	0.742	0.715
k18	0.467	0.390	0.281	-0.077	0.602	0.783
k19	0.467	0.397	0.295	-0.070	0.633	0.758
k20	0.467	0.387	0.289	-0.080	0.619	0.784

C_{ds} değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmalarda belirgin dalga yüksekliği değeri düştükçe model ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluğun artması dikkat çektiğinden dolayı hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmalarında daha yüksek belirgin dalga yüksekliği değerleri hesaplanması amaçlanmıştır. Kırılma parametrelerinden α üzerindeki bir artışın enerji kaybı oranını artırdığı, γ üzerindeki bir artışın ise derinliğe bağlı kırılma miktarını azaltmasından dolayı daha yüksek belirgin dalga yüksekliği elde etmek amacıyla varsayılan α değeri azaltılıp, varsayılan γ değeri artırılmıştır. Ayrıca taban sürtünme katsayısındaki artışın enerji kaybını artırması ve dalga yüksekliğini azaltmasından dolayı taban sürtünmesi katsayı azaltılmış ve model C_{fw}=0.0775 m^2/s, k_N=0.04 m ve d_{50}=0.00025 m değerleri için de ayrıca koşturulmuştur. Hassasiyet analizi sonucunda taban sürtünmesinin ve kırılma parametrelerinin model üzerinde bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple modelde taban sürtünmesi ve kırılma parametrelerinin varsayılan değerleri (f_w=0.0212, γ=0.8 ve α=1) kullanılmıştır. Buna karşın köpüklenme parametreleri (C_{ds} ve δ) ve Charnock parametresinin model üzerinde oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Tablo 3.7 üzerinden 20 adet kalibrasyon arasında en başarılı sonucu veren 4 adet kalibrasyon, numara sırasına göre k7, k10, k11 ve k18 olarak belirlenmiştir. En başarılı kalibrasyon değerleri için elde edilen istatistiksel hata parametreleri Tablo 3.8 ile verilmiştir.

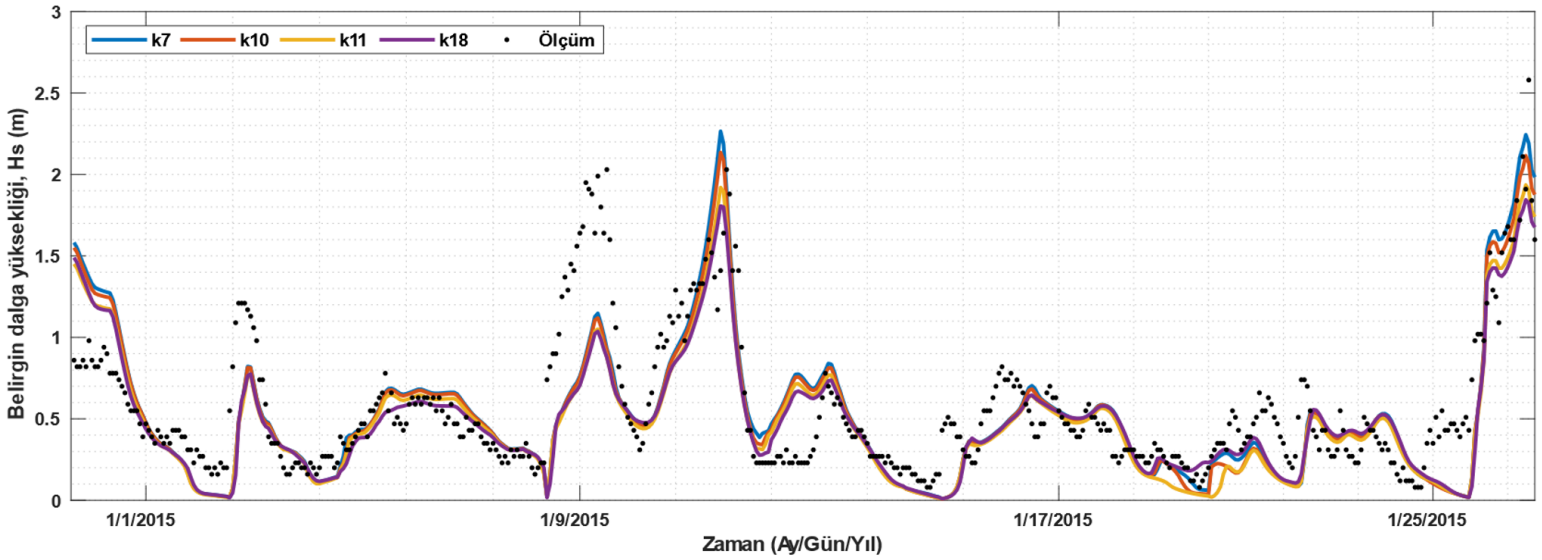
Tablo 3.8 En başarılı kalibrasyon değerleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015)

No	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
k7	0.467	0.430	0.288	-0.037	0.616	0.784
k10	0.467	0.414	0.285	-0.053	0.610	0.785
k11	0.467	0.384	0.285	-0.083	0.610	0.784
k18	0.467	0.390	0.281	-0.077	0.602	0.783

Tablo 3.8 üzerinden en düşük RMSE ve SI değerlerinin k18 ile, sıfıra en yakın Bias değerinin k7 ile ve en yüksek r değerinin ise k10 ile elde edildiği görülmektedir. Şekil 3.7 ile farklı kalibrasyon değerleri için ölçülen belirgin dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri verilmiştir. Buradan x=y doğrusuna en yakın eğilim çizgisinin k7'de ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 3.8 ile Tablo 3.8'de verilen 4 adet kalibrasyon için ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir.



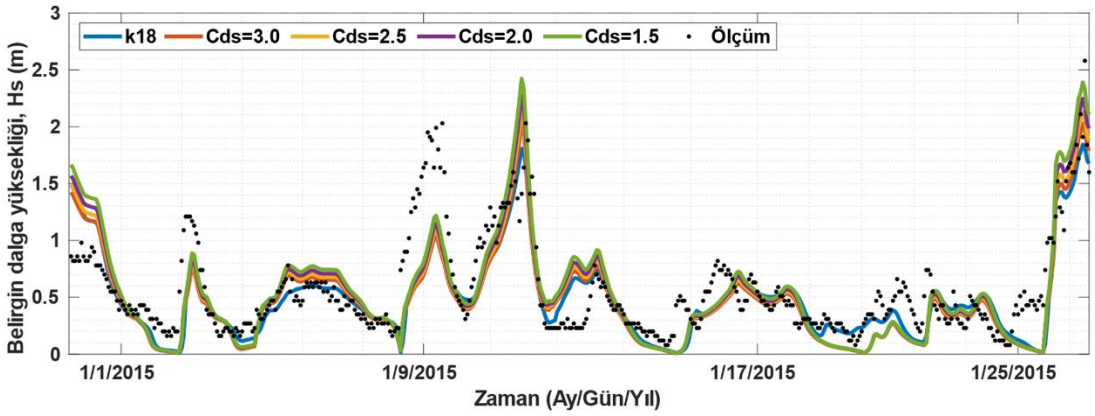
Şekil 3.7 Farklı kalibrasyon değerleri için hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yükseklikleri (Ocak, 2015)



Şekil 3.8 Farklı kalibrasyon değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015)

Şekil 3.8 incelendiğinde Tablo 3.8'den elde edilen hata parametrelerinde daha başarılı sonuç veren k7 ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin diğer kalibrasyonlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. k18 ile hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri k7, k10 ve k11'e kıyasla ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile daha uyumlu sonuç vermektedir. Tablo 3.8, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ayrı ayrı incelendiğinde, en düşük RMSE ve SI değerlerinin k18 ile elde edilmesi, x=y doğrusuna en yakın eğilim çizgisinin ve sıfıra en yakın Bias değerinin k7 ile ve en yüksek r değerinin k10 ile elde edilmesine karşın bu kalibrasyonlar ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile k18'e kıyasla daha uyumsuz sonuç vermesinden dolayı optimum sonucu k18'in verdiği belirlenmiştir.

Şekil 3.9 ile k18'in farklı C_{ds} değerleri ile ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri üzerinden karşılaştırılması verilmektedir. Buradan k18 ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile daha uyumlu bir sonuç verdiği görülmektedir.

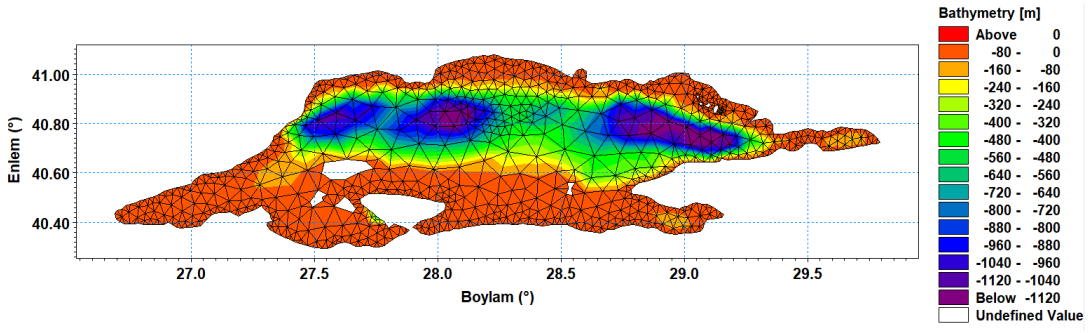


Şekil 3.9 k18 ve farklı C_{ds} değerleri için hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015)

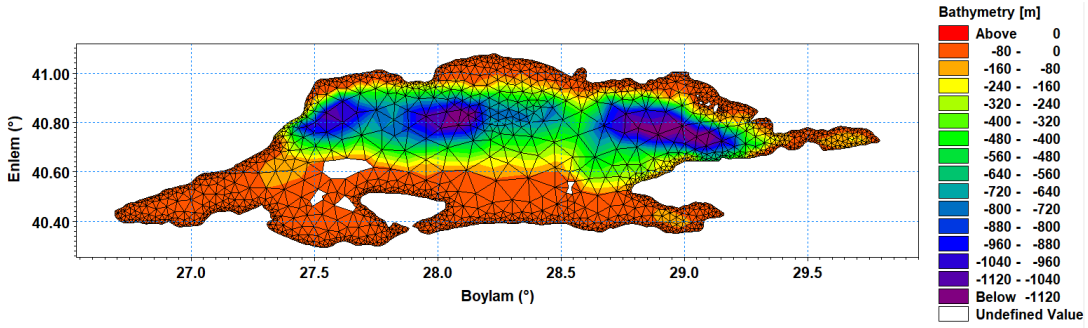
3.3.2 Model Alanı Ağ Sistemi Optimizasyonu

Marmara Denizi'nin tamamında daha detaylı bir değerlendirme yapabilmek amacıyla model üzerinde model alanı ağ sistemi optimizasyonu yapılmıştır. Başlangıçta kullanılan model alanı ağ sistemi (m1) yoğunlaştırılarak daha ince bir model alanı ağ sistemi elde edilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8 ve m9 model alanı ağ sistemlerine ait model hesaplama alanları sırasıyla Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil

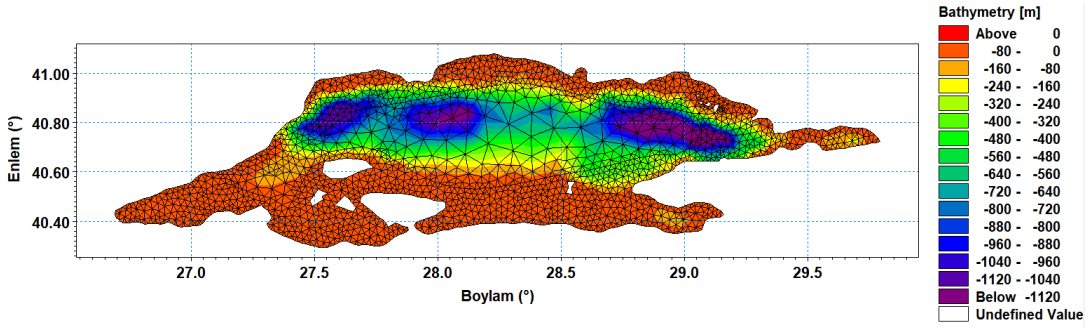
3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 ile gösterilmiştir. Ayrıca üçgen eleman ve düğüm noktası sayıları Tablo 3.9 verilmiştir.



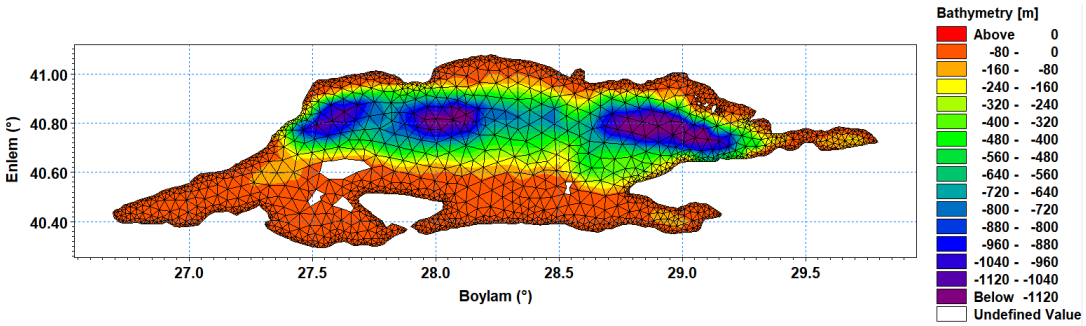
Şekil 3.10 m1 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



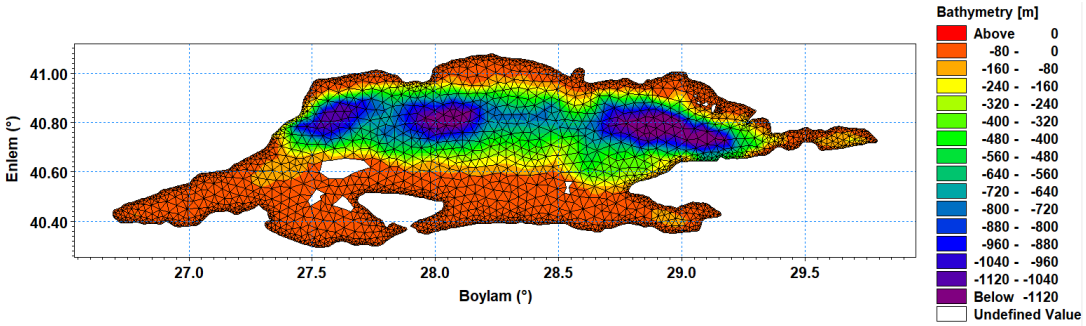
Şekil 3.11 m2 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



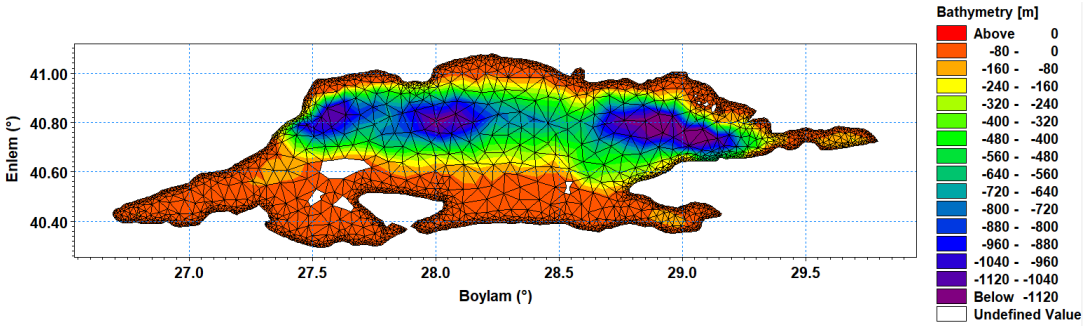
Şekil 3.12 m3 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



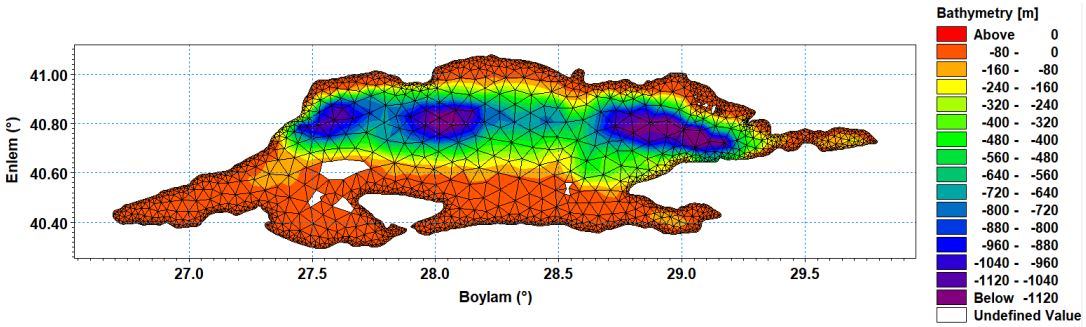
Şekil 3.13 m4 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



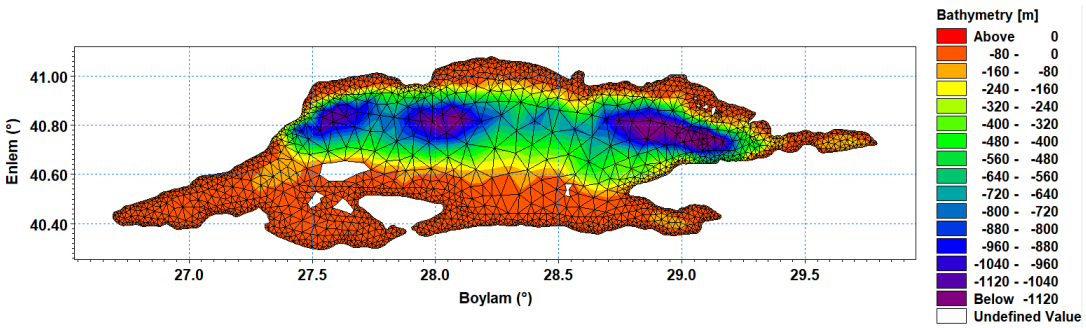
Şekil 3.14 m5 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



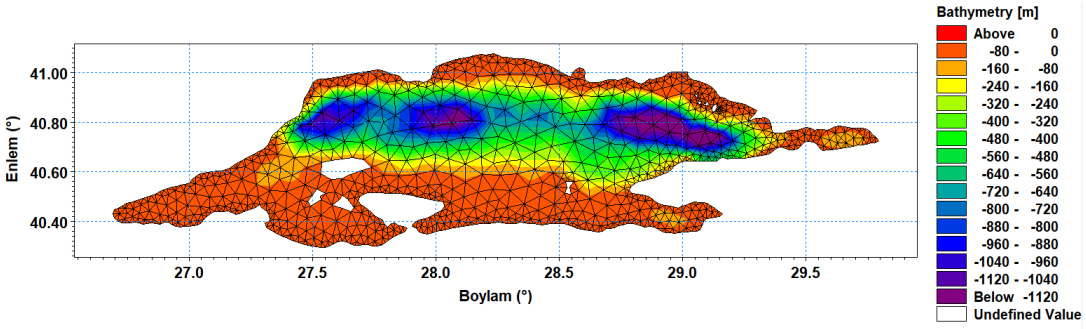
Şekil 3.15 m6 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



Şekil 3.16 m7 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



Şekil 3.17 m8 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı



Şekil 3.18 m9 model alanı ağ sistemi için model hesaplama alanı

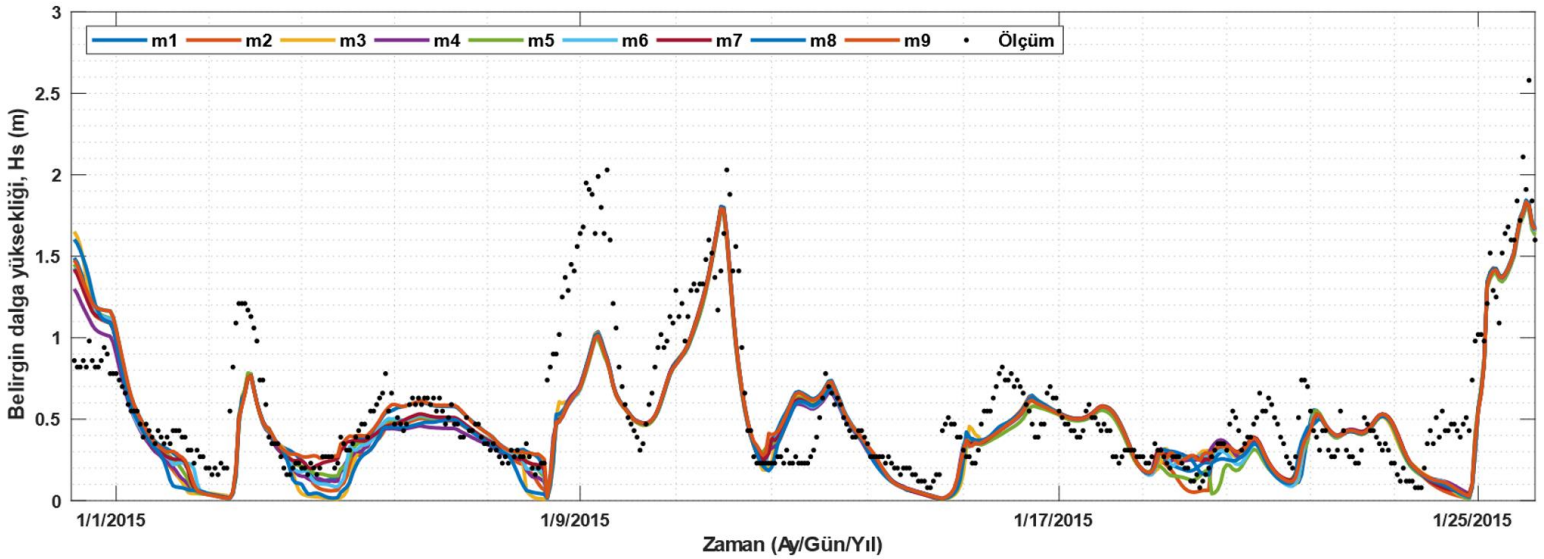
Tablo 3.9 Model alanı ağ sistemleri için üçgen eleman ve düğüm noktası sayıları

Model Alanı Ağ Sistemi	Üçgen Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
m1	1624	1048
m2	3407	2185
m3	3535	2061
m4	3372	2141
m5	4821	2981
m6	4861	3104
m7	3585	2295
m8	3853	2399
m9	1793	1163

Hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmaları sonucunda belirlenen k18 kalibrasyon değerleri kullanılarak, model alanı ağ sistemindeki üçgen eleman ve düğüm noktası sayıları değiştirilerek model 2015 yılı Ocak ayı için koşturulmuştur. Kullanılan üçgen eleman ve düğüm noktası sayıları ile elde edilen istatistiksel sonuçlar Tablo 3.10 ile verilmiştir. Tablo 3.10 üzerinden en düşük RMSE, en düşük SI ve en yüksek r değerlerinin m4 ile elde edildiği görülmektedir. Sıfıra en yakın Bias değeri ise m9 ile elde edilmesine karşın genel olarak her bir model alanı ağ sistemi için birbirine yakın Bias değerleri görülmektedir. Şekil 3.19 ile farklı model alanı ağ sistemleri için hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Buradan genel olarak birbirine yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

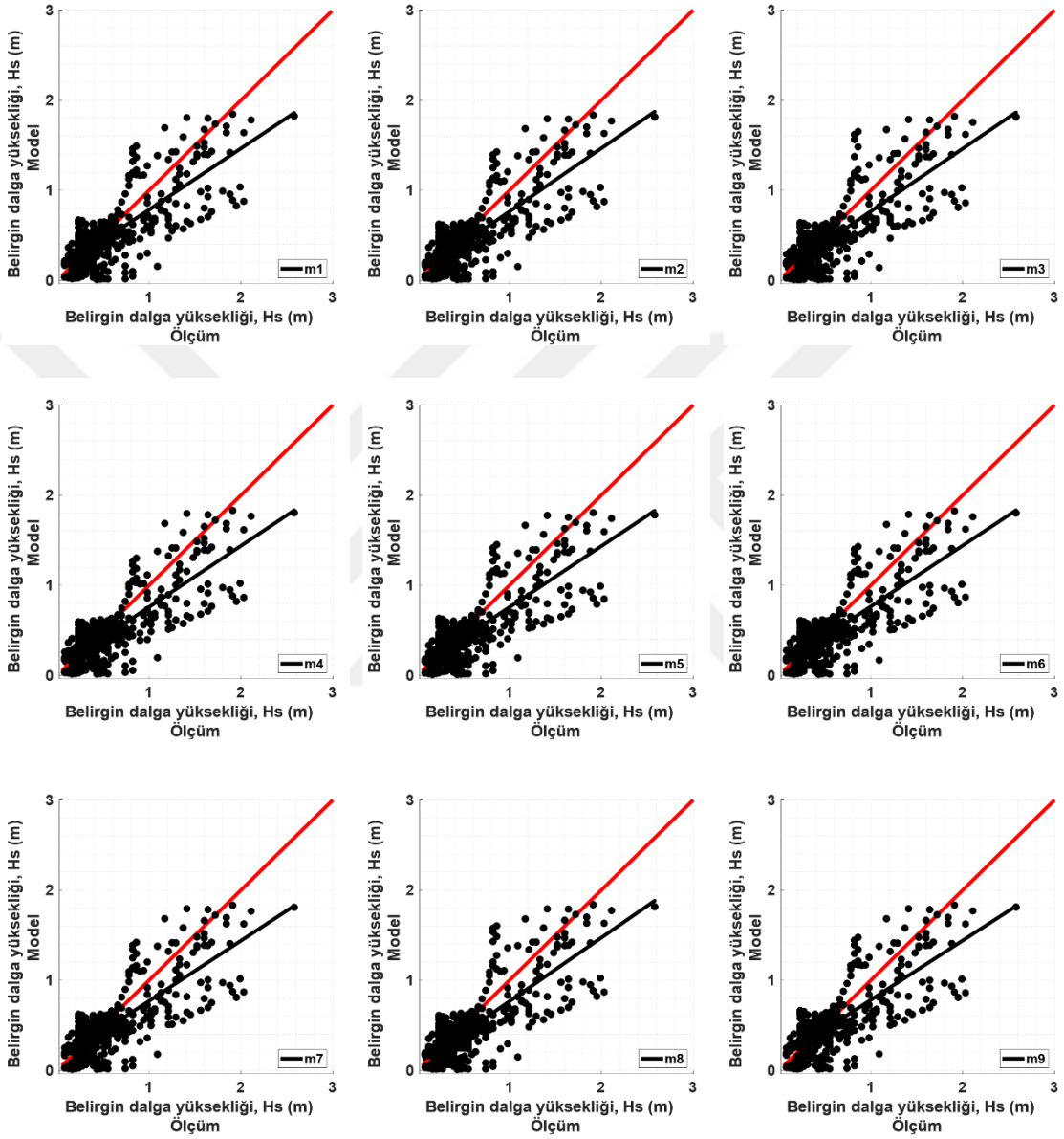
Tablo 3.10 Farklı model alanı ağ sistemleri için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (Ocak, 2015)

Model Alanı Ağ Sistemi	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
m1	0.467	0.390	0.281	-0.077	0.602	0.783
m2	0.467	0.362	0.282	-0.105	0.604	0.798
m3	0.467	0.365	0.289	-0.102	0.619	0.785
m4	0.467	0.363	0.273	-0.104	0.585	0.811
m5	0.467	0.363	0.282	-0.104	0.604	0.794
m6	0.467	0.372	0.279	-0.095	0.597	0.794
m7	0.467	0.381	0.275	-0.086	0.589	0.795
m8	0.467	0.360	0.288	-0.107	0.617	0.790
m9	0.467	0.397	0.279	-0.070	0.597	0.782



Şekil 3.19 Farklı model alanı ağ sistemleri için hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015)

Şekil 3.20 ile farklı model alanı ağ sistemleri için ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri gösterilmiştir. Buradan farklı model alanı ağ sistemleri için elde edilen eğilim çizgilerinin x=y doğrusuna yakınlıklarının genel olarak benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20 Ölçülen belirgin dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri (Ocak, 2015)

İstatistiksel hata parametre değerleri, ölçüm ve model karşılaştırmaları incelenerek yapılan değerlendirmeler sonucunda optimum sonucu m4'ün verdiği belirlenmiştir. Böylece başlangıçta 1624 olan üçgen eleman sayısı 3372'ye ve başlangıçta 1048 olan düğüm noktası sayısı 2141'e yükseltilmiştir. Kalibrasyon

çalışmasının sonucu olarak başlangıçta kullanılan varsayılan parametre değerleri ve belirlenen nihai model parametre değerleri Tablo 3.11 ile ve bu parametre değerleri ile elde edilen istatistiksel hata parametreleri sonuçları ise Tablo 3.12 ile özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.11 Varsayılan ve nihai model parametre değerleri

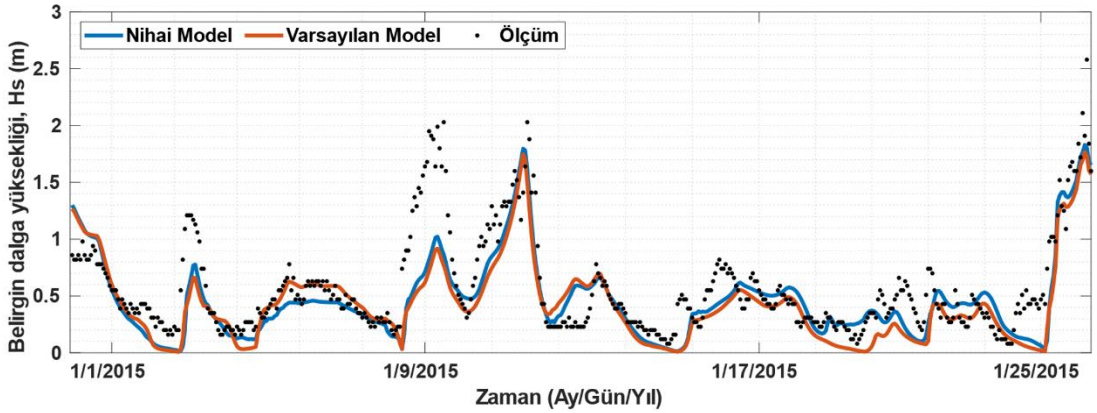
Model Adı	Köpüklenme Parametreleri		Kırılma Parametreleri		Taban Sürtünmesi	Charnock
	C_{ds}	δ	γ	α		
Varsayılan Model	4.5	0.5	0.8	1	0.0212	0.01000
Nihai Model	2.5	0.9	0.8	1	0.0212	0.00525

Tablo 3.12 Varsayılan ve nihai model için belirgin dalga yüksekliği ile elde edilen istatistiksel sonuçlar

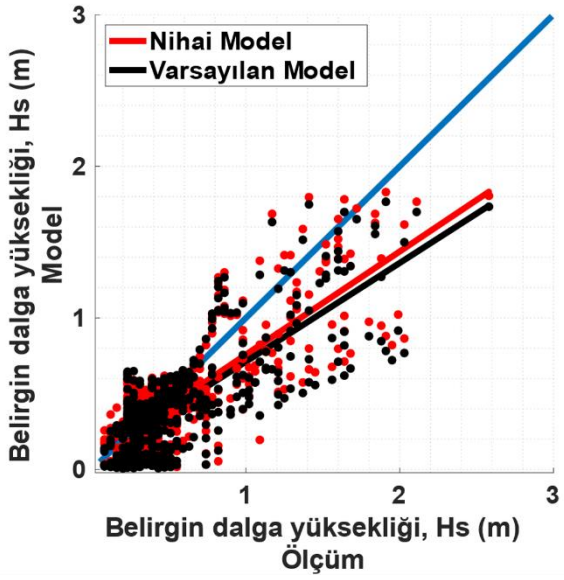
Model Adı	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
Varsayılan Model	0.467	0.330	0.301	-0.137	0.645	0.783
Nihai Model		0.363	0.273	-0.104	0.585	0.811

Tablo 3.11 incelendiğinde başlangıçta 4.5 olan C_{ds} parametresi değerinin 2.5'e ve başlangıçta 0.01 olan Charnock parametresi değerinin 0.00525'e düşürüldüğü, buna karşın başlangıçta 0.5 olan δ parametresinin ise 0.9'a yükseltildiği görülmektedir. Ayrıca Tablo 3.12 ile verilen istatistiksel sonuçlar incelendiğinde ise hassasiyet analizi, kalibrasyon ve mesh alanı ağ optimizasyonu sonucunda belirlenen nihai model ile hesaplanan ortalama belirgin dalga yüksekliği değerinin 0.363 m olduğu ve varsayılan model ile elde edilen 0.330 m değerine göre yaklaşık olarak %10'luk bir artış göstererek ölçülen ortalama belirgin dalga yüksekliği değerine (0.467 m) yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca nihai model ile elde edilen RMSE ve SI değerlerinin varsayılan model ile edilen değerlerden daha düşük olması, Bias değerinin sıfıra daha yakın olması ve r değerinin daha büyük olması nihai model ile elde edilen istatistiksel sonuçların varsayılan model ile elde edilen

sonuçlardan daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 ile nihai model ve varsayılan model parametre değerleri ile elde edilen zaman serileri ve saçılım grafikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.21 Nihal model ve varsayılan model parametre değerleri ile hesaplanan ve ölçülen belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (Ocak, 2015)



Şekil 3.22 Nihal model ve varsayılan parametre değerleri ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine karşı ölçülen belirgin dalga yükseklikleri (Ocak, 2015)

Şekil 3.21 ile verilen zaman serisi incelendiğinde nihai model ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin varsayılan model ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerine kıyasla ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.22 ile verilen saçılım grafiğinden nihai model ile elde edilen eğilim çizgisinin varsayılan model ile elde edilen eğilim çizgisine kıyasla x=y doğrusuna daha yakın olduğu görülmektedir.

3.3.3 Modelin Doğrulanması

Kalibrasyon çalışması sonucunda belirlenen k18 kalibrasyonu ve model alanı ağ sistemi optimizasyonu sonucunda belirlenen m4 model alanı ağ sistemi ile oluşturulan nihai model 2013-2018 yılları arasında koşturularak doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

2013-2018 yılları arasındaki her bir yıl için nihai model parametre değerleri için hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri ve ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri kullanılarak elde edilen RMSE, Bias, SI ve r istatistiksel hata parametreleri Tablo 3.13 ile verilmiştir.

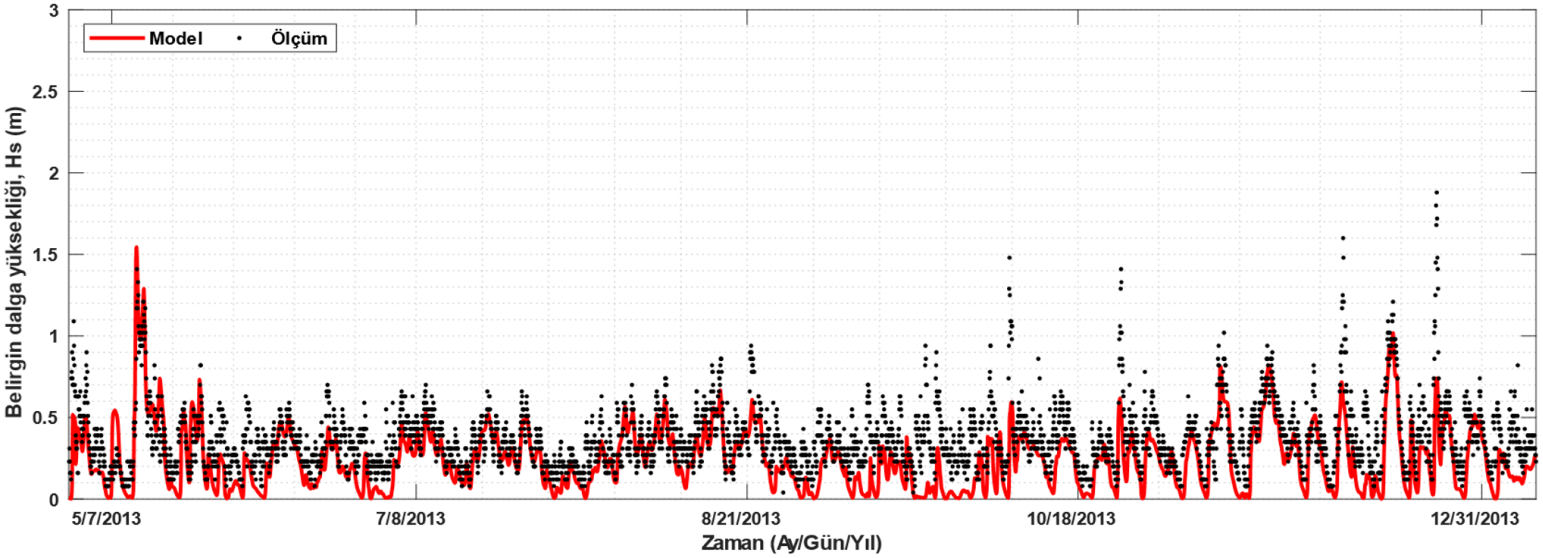
Tablo 3.13 Model değerleri ile belirgin dalga yüksekliği için elde edilen istatistiksel sonuçlar

Yıl	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
2013	0.330	0.237	0.194	-0.093	0.588	0.691
2014	0.288	0.257	0.205	-0.031	0.712	0.647
2015	0.346	0.270	0.219	-0.076	0.633	0.770
2016	0.399	0.356	0.232	-0.043	0.581	0.728
2017	0.252	0.263	0.164	0.011	0.651	0.715
2018	0.266	0.290	0.166	0.024	0.624	0.732
2013-2018	0.308	0.274	0.197	-0.034	0.640	0.715

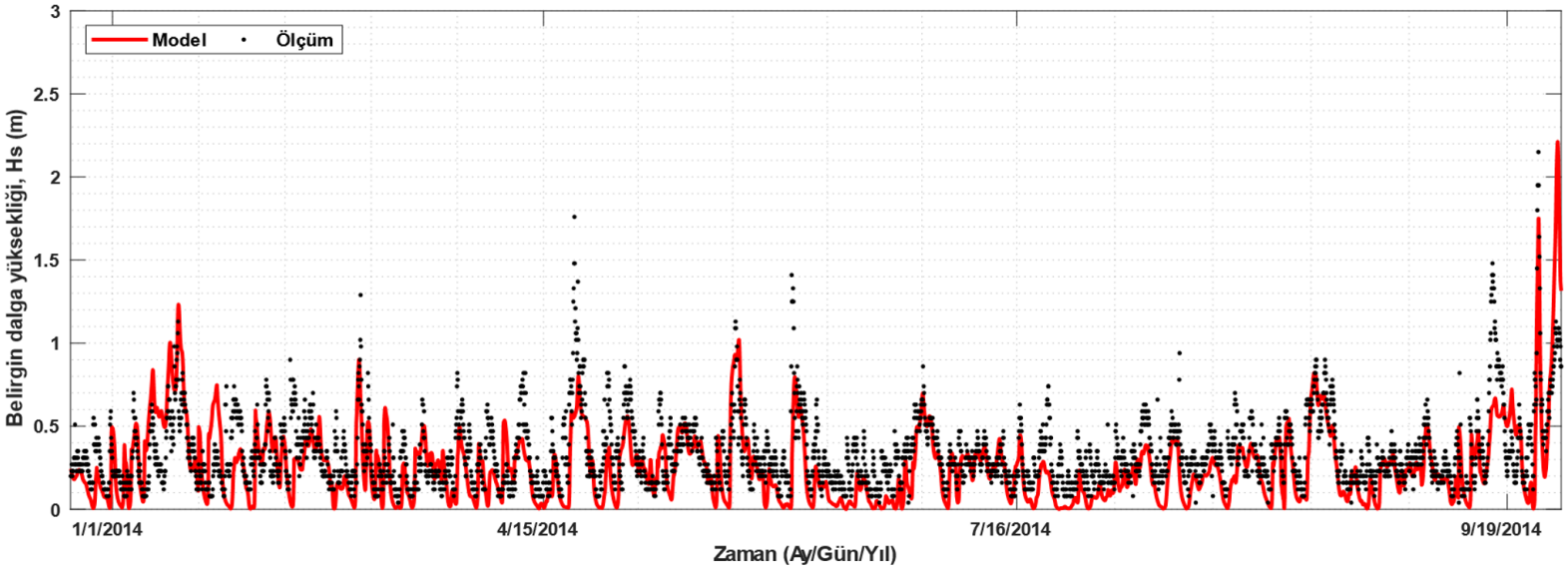
Tablo 3.13 üzerinden 2017 ve 2018 yıllarında RMSE ve Bias parametrelerinin daha iyi sonuç verdiği ve en düşük SI değerinin de 2018 yılında elde edildiği görülmektedir. Buna karşın en yüksek r değeri ise 2015 yılında elde edilmektedir. Ayrıca ölçülen ve hesaplanan en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği değerleri sırasıyla 0.399 m ve 0.356 m ile 2016 yılında, ölçülen en düşük ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri 0.252 m ile 2017 yılında ve hesaplanan en düşük ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri ise 0.237 m ile 2013 yılında meydana gelmektedir.

Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 sırasıyla 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 ve 2018 yıllarına ait ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile nihai model parametre değerleri kullanılarak hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekiller sırasıyla incelendiğinde nihai model ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ile her bir yıl için genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

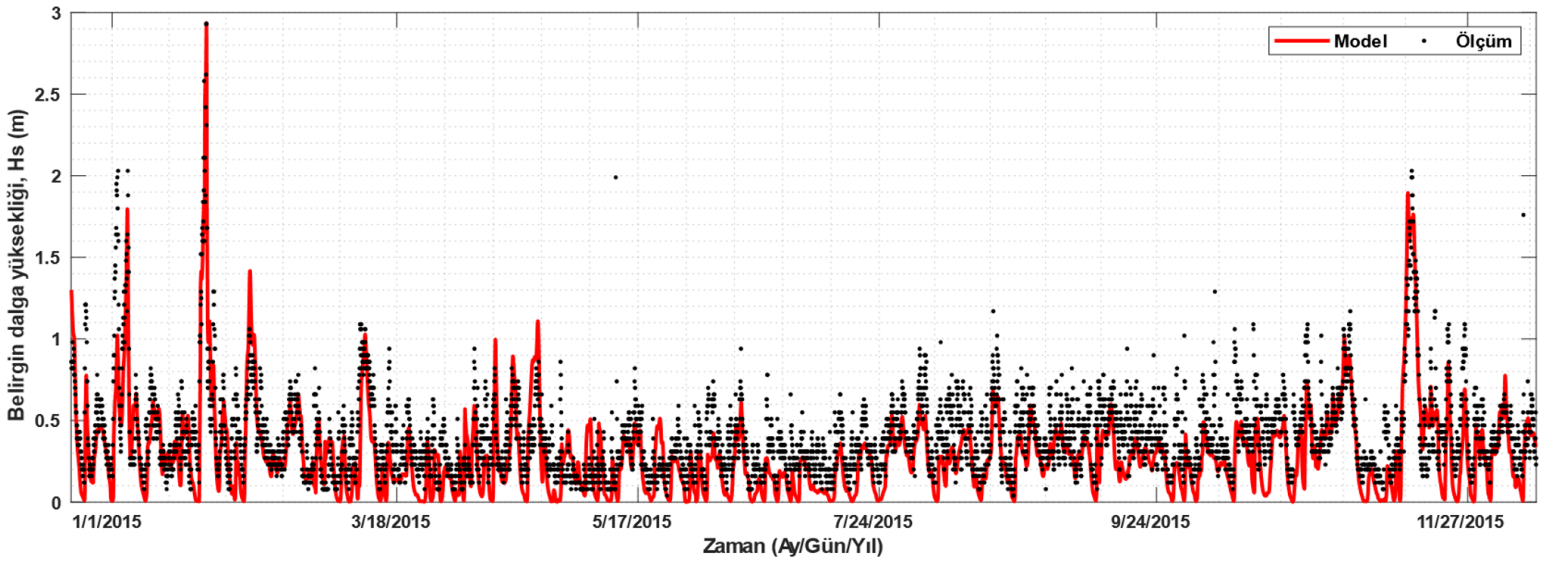
Şekil 3.29 ile 2013-2018 yılları arasında hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerine karşılık ölçülen belirgin dalga yüksekliği değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.29 üzerinden 2013-2018 yılları için elde edilen doğrunun (siyah çizgi) denklemi $y = 0.7747x + 0.0074$, r değeri ise 0.715'tir. Şekil 3.29 incelendiğinde 2013-2018 yıllları arasında ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin 0-1.5 m aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca x=y doğrusuna en yakın eğilim çizgisi 2018 yılında elde edilmektedir.



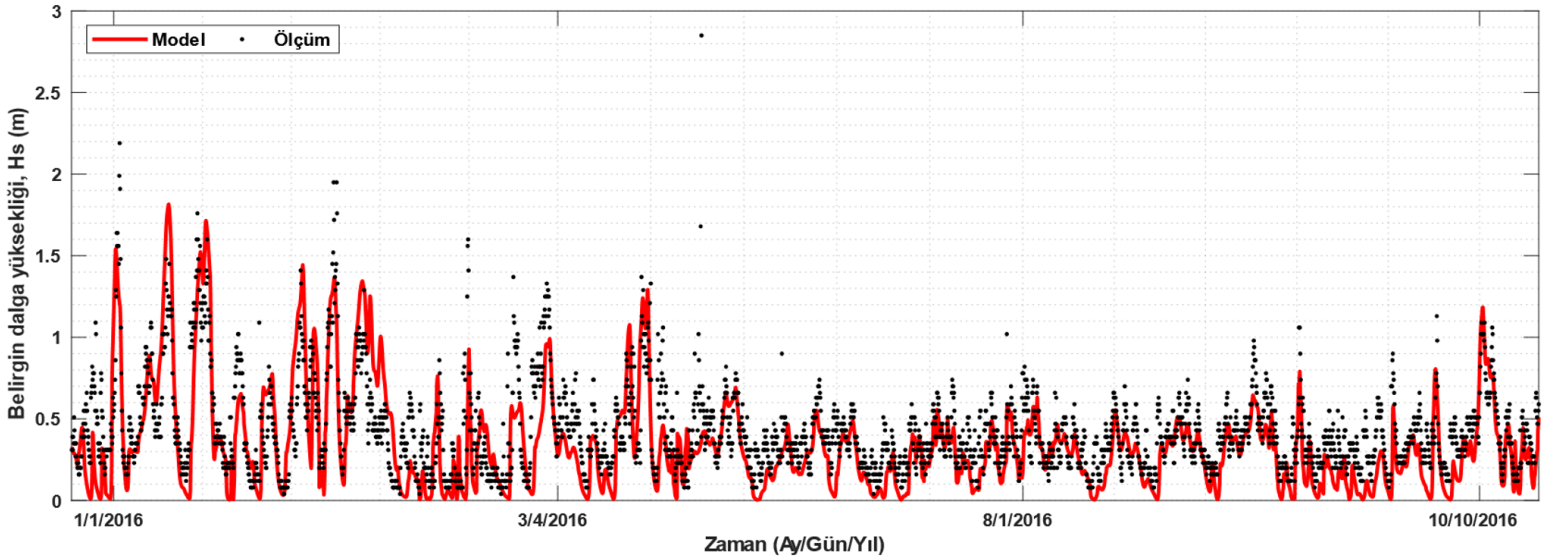
Şekil 3.23 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2013)



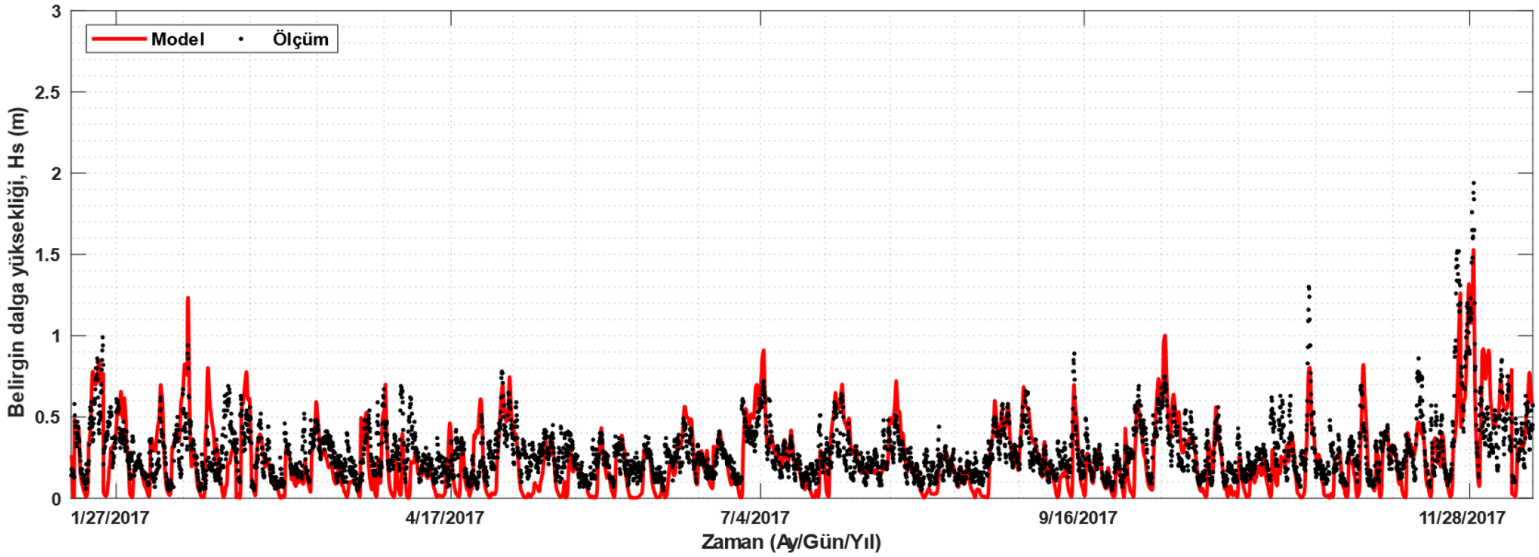
Şekil 3.24 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2014)



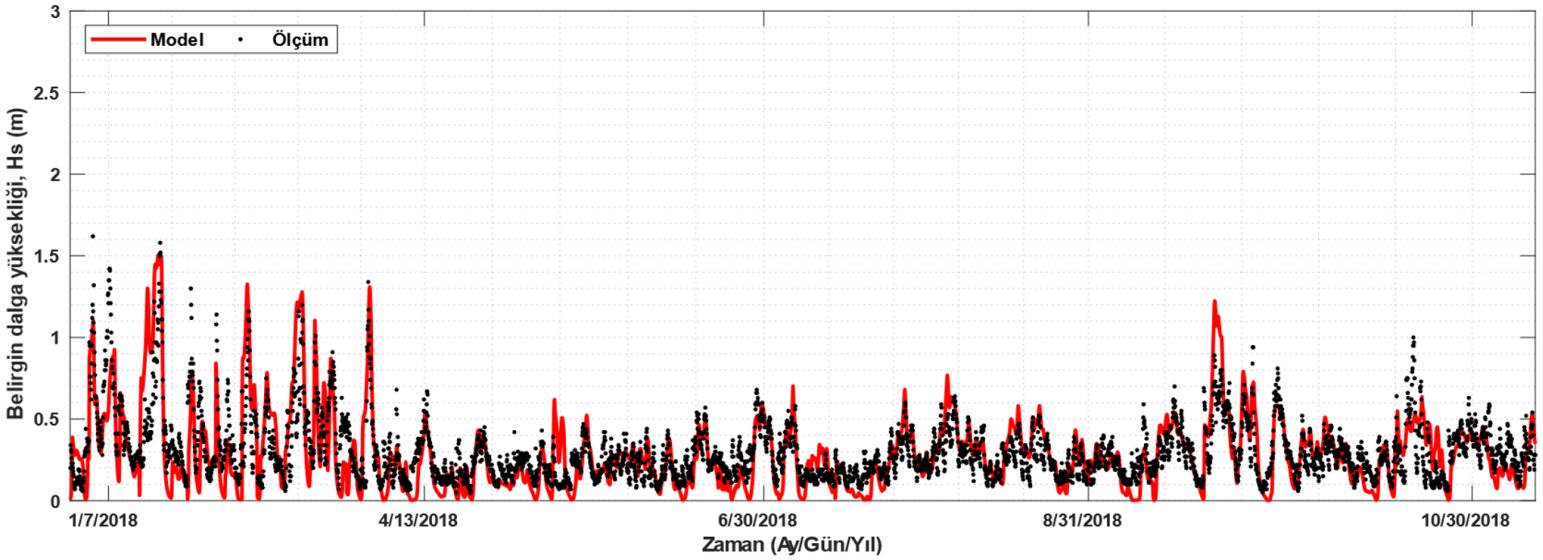
Şekil 3.25 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2015)



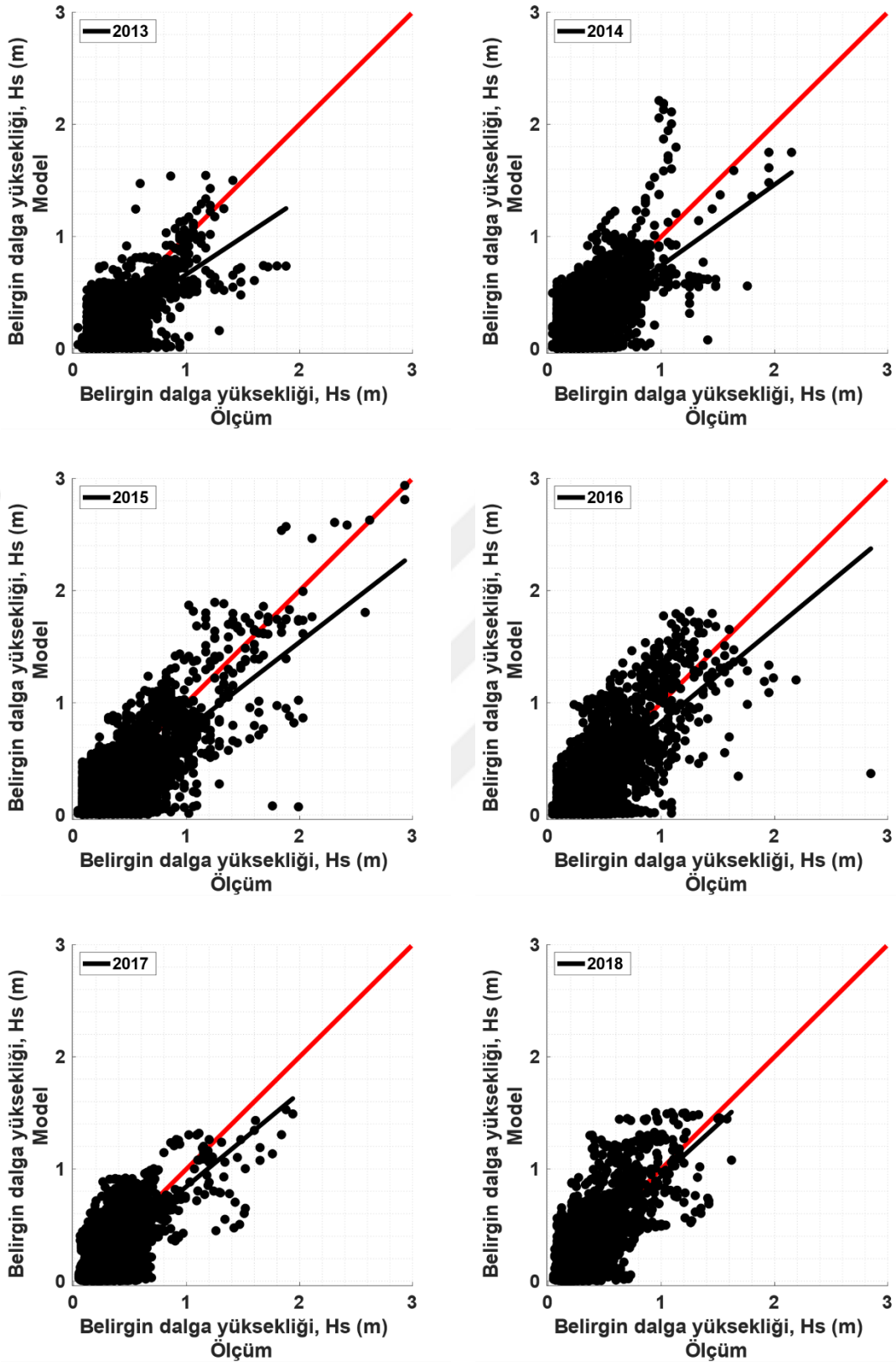
Şekil 3.26 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2016)



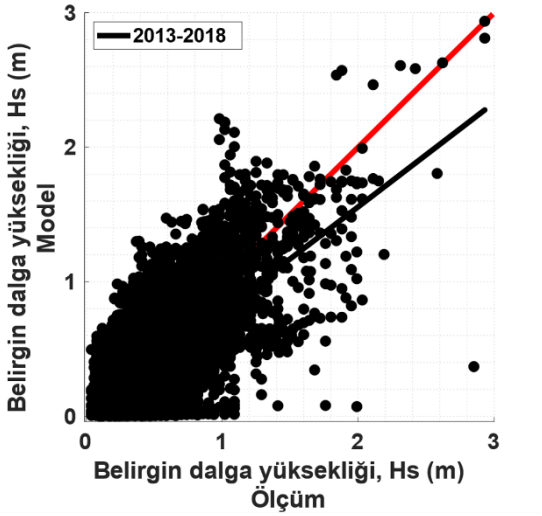
Şekil 3.27 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2017)



Şekil 3.28 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması (2018)



Şekil 3.29 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri

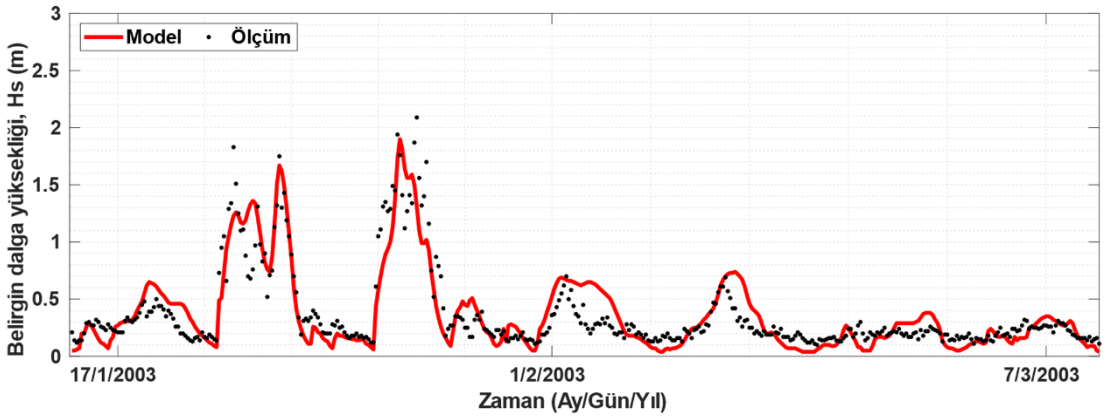


Şekil 3.29 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri (devamı)

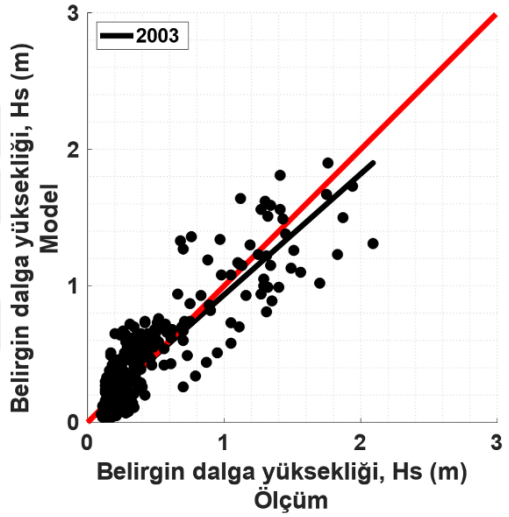
Modelin doğrulanmasında ayrıca 40.95° K ve 28.68° D koordinatlarında ve 17 m derinlikte bulunan İstanbul, Ambarlı ölçüm istasyonundan alınan 2003 yılı ocak, şubat ve mart aylarına ait belirgin dalga yüksekliği ölçümleri de kullanılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Tablo 3.14, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 ile verilmiştir. Tablo 3.14, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 incelendiğinde hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin ölçüm verileri ile genel olarak bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3.14 Model değerleri ile elde edilen istatistiksel sonuçlar

Yıl	Ortalama Ölçüm Değeri (m)	Ortalama Model Değeri (m)	RMSE (m)	Bias (m)	SI	r
2003	0.321	0.309	0.182	-0.012	0.567	0.869



Şekil 3.30 Ölçülen ve hesaplanan belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (2003)



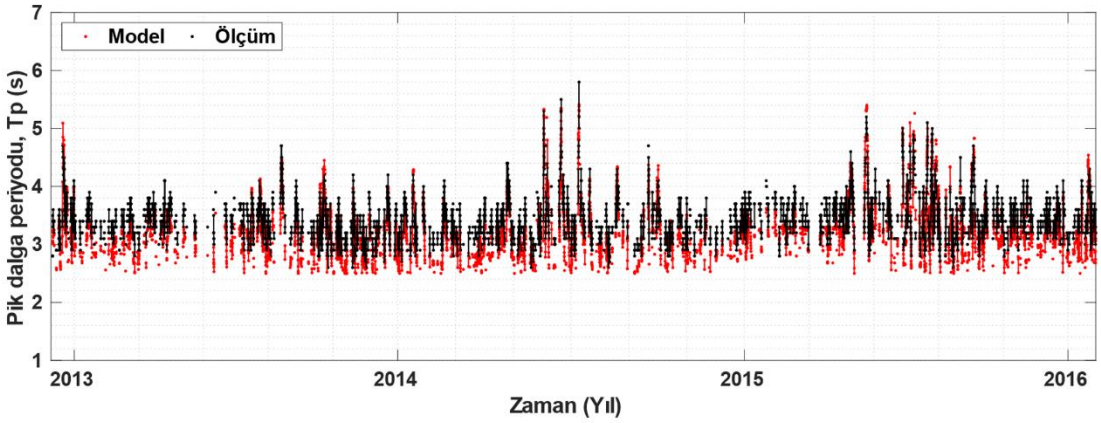
Şekil 3.31 Ölçülen belirgin dalga yükseklerine karşı hesaplanan belirgin dalga yüksekliği değerleri

Dalga gücünün hesaplanmasında belirgin dalga yüksekliği ile birlikte dalga enerji periyodunun da etkisi bulunmaktadır. Dolayısıyla dalga periyodu açısından da ölçüm ve model karşılaştırmaları yapmak gerekmektedir; fakat Marmara Denizi'nde dalga periyodu ölçümleri yetersizdir. Silivri ölçüm istasyonunda 2017 ve 2018 yıllarında dalga periyodu ölçümleri bulunmamaktadır. 2013-2016 yılları arasında ise aralıklı olarak ölçümler bulunmaktadır.

$$T_e = 0.9T_p \tag{3.7}$$

Dalga enerji periyodu ile pik dalga periyodu arasında (3.7) eşitliği ile verilen bir ilişki bulunmaktadır (Cornett, 2008). Bu sebeple ölçülen pik dalga periyodu ve

nihai model ile hesaplanan pik dalga periyodu değerleri arasında Şekil 3.32 ile verilen karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 3.32 Ölçülen ve hesaplanan pik dalga periyodu değerlerinin karşılaştırılması (2013-2016)

Şekil 3.32 incelendiğinde kullanılan veri setinin yetersiz olmasına karşın ölçülen ve hesaplanan değerlerin genel olarak birbiri ile uyumlu sonuç verdiği görülmektedir.

Marmara Denizi üzerindeki belirgin dalga yüksekliği değerlerinin genel olarak düşük olması ve belirgin dalga yüksekliği değeri düştükçe model ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluğun artması kalibrasyon çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Bu çalışma Marmara Denizi gibi yarı kapalı bir denizde yapılan dalga modellemesinin sığ suların kapladığı alanın fazla olması, kara ve orografik etkenlerin dalgayı sınırlaması gibi etkilerden dolayı açık denizde yapılan dalga modellemesine göre daha karmaşık olduğunu ortaya koymaktadır.

4
SAYISAL DALGA MODELİ SONUÇLARI VE DALGA ENERJİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Marmara Denizi sayısal dalga modellemesi ve kalibrasyon çalışmaları Bölüm 3'te açıklanmıştır. Sayısal dalga modeli üzerinde yapılan hassasiyet analizi, kalibrasyon, ve doğrulama çalışmalarının ardından belirlenen nihai model üzerinden 1979-2018 yılları arasındaki 40 yıllık uzun dönemi kapsayan rüzgâr verileri kullanılarak belirgin dalga yüksekliği (H_s), dalga enerji periyodu (T_e), rüzgâr hızı (W_s), ortalama dalga yönü ve rüzgâr yönü parametreleri elde edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar dalga enerji potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

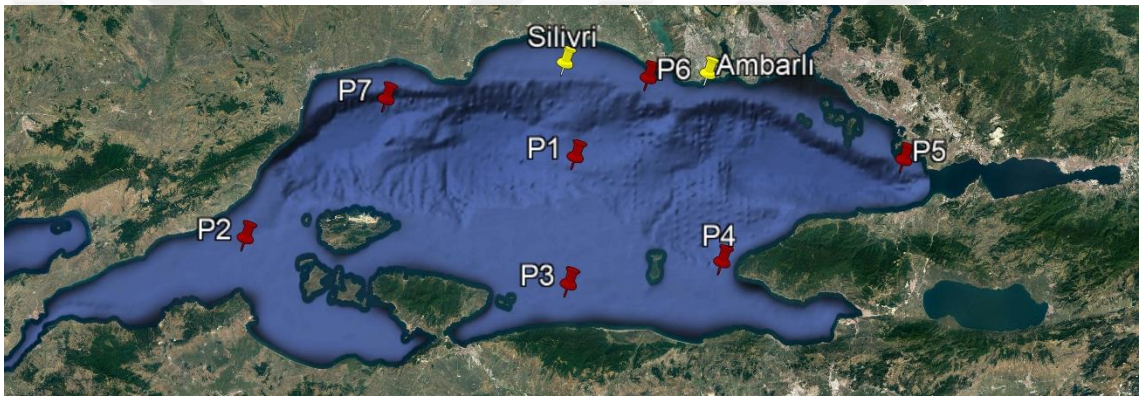
Uzun dönemli rüzgâr verileri ve dalga parametreleri kullanılarak Marmara Denizi dalga ikliminin en doğru şekilde belirlenmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen dalga iklimi yardımıyla çeşitli yükseklik, periyot ve yöne sahip dalgaların hangi dönemde ne sıklıkla meydana geldiği incelenebilmektedir. Sayısal dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri kullanılarak Marmara Denizi dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi amacıyla Marmara Denizi'nin tamamı üzerinde alansal dağılımlar ve Tablo 4.1 ile koordinatları, Şekil 4.1 ile de konumları verilen 7 nokta üzerinde noktasal analizler ile değerlendirmeler yapılmıştır.

Alansal dağılımlar aylık, mevsimsel ve 40 yıllık zaman periyotlarına ait değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiş olduğundan dalga enerji potansiyeli hem alansal hem zamansal açıdan analiz edilmiştir. Ayrıca zamandan bağımsız olarak anlık maksimum değerlerin yer aldığı alansal dağılımlar da gösterilmiştir.

Noktasal analizler ile belirgin dalga yüksekliği (H_s), dalga enerji periyodu (T_e) ve verilerin değişkenliğine bağlı olarak Marmara Denizi'ni temsil eden noktalar üzerinden çeşitli olasılık ve istatistik değerlendirmeleri yapılmıştır.

Tablo 4.1 Seçilen noktaların koordinatları

Nokta	Boylam (°)	Enlem (°)	Kıyıdan Uzaklık	Derinlik (m)
P1	28.28	40.76	33	571
P2	27.29	40.57	11	86
P3	28.26	40.47	8	54
P4	28.72	40.52	5	101
P5	29.27	40.75	7	412
P6	28.50	40.94	6	118
P7	27.71	40.89	12	792



Şekil 4.1 Marmara Denizi üzerinde seçilen noktalar

4.2 Alansal Dağılımlar

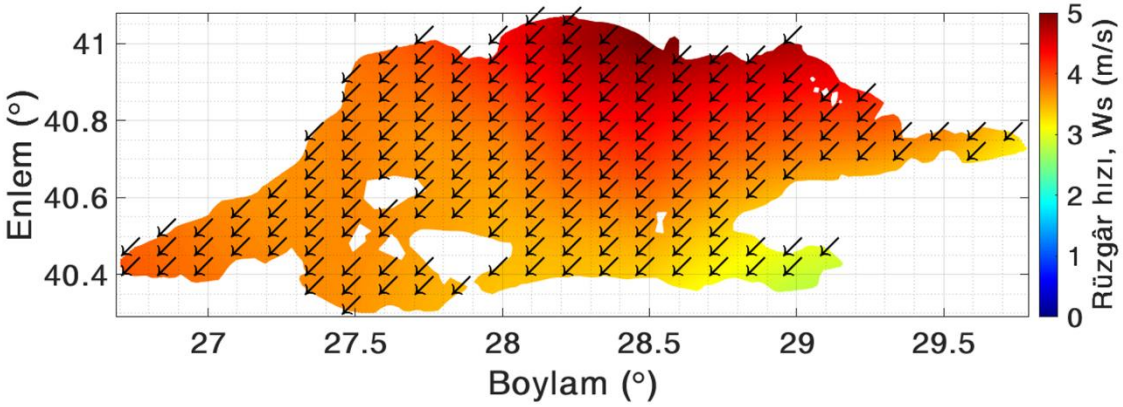
Marmara Denizi dalga enerji potansiyelinin detaylı olarak değerlendirilmesi için alansal dağılımlar elde edilmiştir. Alansal dağılımlar ile çalışma alanının tamamı üzerinde analiz yapabilmek mümkün olmaktadır. Böylece çalışma alanı üzerindeki herhangi bir noktadan elde edilebilecek değerlerin büyüklüğü, en yüksek değerlerin nerede meydana gelebileceği ve farklı zaman periyotlarında hangi yönde değişimler olabileceği belirlenmektedir. Dolayısıyla alansal dağılımlar dalga enerji potansiyelinin değerlendirilmesi açısından oldukça büyük önem taşımaktadır.

Marmara Denizi'nin tamamı üzerinde aylık, mevsimsel ve 40 yıllık ortalamalı alansal dağılımlar rüzgâr hızı (W_s), belirgin dalga yüksekliği (H_s), dalga enerji

periyodu (T_e) ve dalga gücü (P) parametreleri için verilmiştir. Hâkim rüzgâr yönü ve hâkim dalga yönleri de alansal dağılımlar üzerinde oklar ile gösterilmiştir.

4.2.1 Rüzgâr Hızı (W_s) Alansal Dağılımları

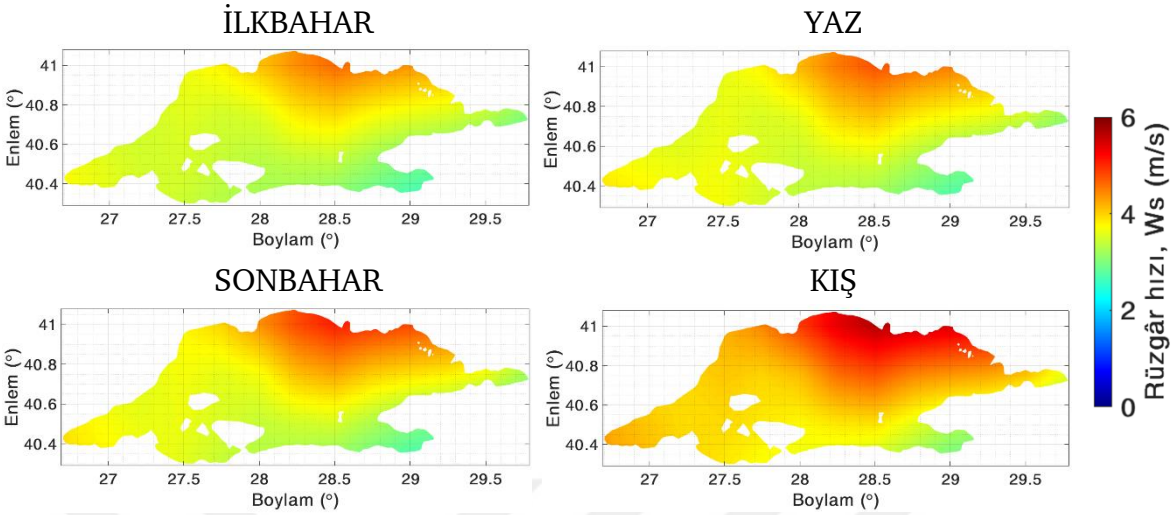
Şekil 4.2 40 yıllık ortalama rüzgâr hızı değerlerinin alansal dağılımını göstermektedir. 40 yıllık ortalama alansal dağılımda en yüksek ortalama rüzgâr hızı değeri Marmara Denizi'nin güneyinden kuzeyine doğru yaklaşık 3.5 m/s'den 5 m/s'ye kadar yükselmektedir. Dolayısıyla Marmara Denizi'nin güneyinden kuzeyine doğru gidildikçe rüzgâr hızı değeri yaklaşık olarak %43'lük bir artış göstermektedir. Rüzgâr hızı bölgede bulunan körfez ve 2543 m yüksekliğindeki Uludağ'ın da etkisiyle Bursa, Mudanya açıklarında 3 m/s'ye kadar düşerek Marmara Denizi üzerindeki en düşük değerine ulaşmaktadır. Marmara Denizi'nin kara ve orografik yapısı nedeniyle rüzgâr hızı Marmara Denizi'nin güneyine doğru azalmaktadır. Marmara Denizi için 40 yıllık hâkim rüzgâr yönü kuzeydoğudur.



Şekil 4.2 40 yıllık ortalama rüzgâr hızının alansal dağılımı

Şekil 4.3 mevsimsel ortalama rüzgâr hızı değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Mart, nisan ve mayıs ayları ilkbahar mevsimini, haziran, temmuz ve ağustos ayları yaz mevsimini, eylül, ekim ve kasım ayları sonbahar mevsimini ve aralık, ocak ve şubat ayları ise kış mevsimini temsil etmektedir. Mevsimsel alansal dağılımda en yüksek ortalama rüzgâr hızı değeri kış mevsiminde İstanbul kıyılarında 5.66 m/s'ye kadar ulaşmaktadır. Bu değer sonbahar, yaz ve ilkbahar mevsimlerinde sırasıyla 5.07 m/s, 4.75 m/s ve 4.61 m/s'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla Marmara Denizi'nde en güçlü rüzgârların kış mevsiminde, en zayıf rüzgârların ise ilkbahar mevsiminde görüldüğü söylenebilmektedir. Kış

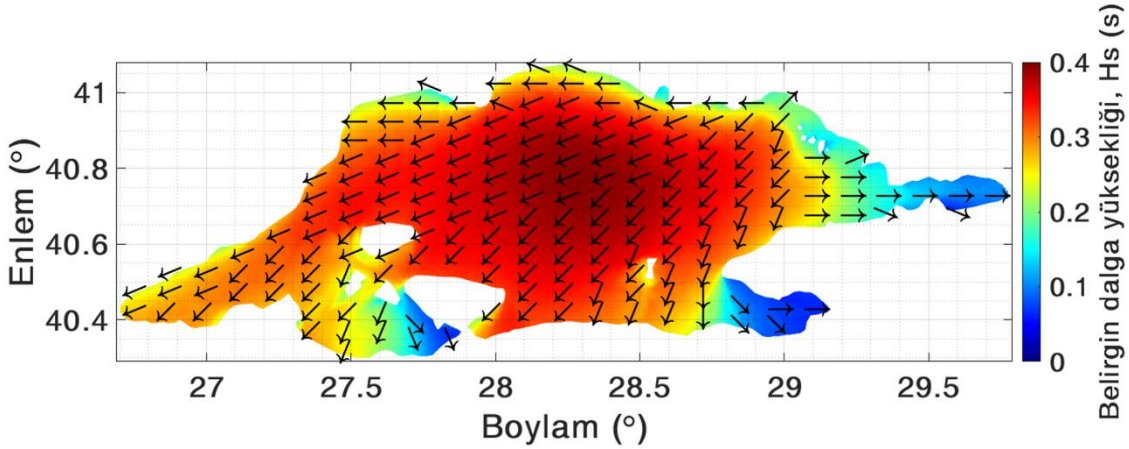
mevsiminde görülen rüzgâr hızı değerleri ilkbaharda görülen rüzgâr hızı değerlerine göre yaklaşık olarak %23'lük bir artış göstermektedir.



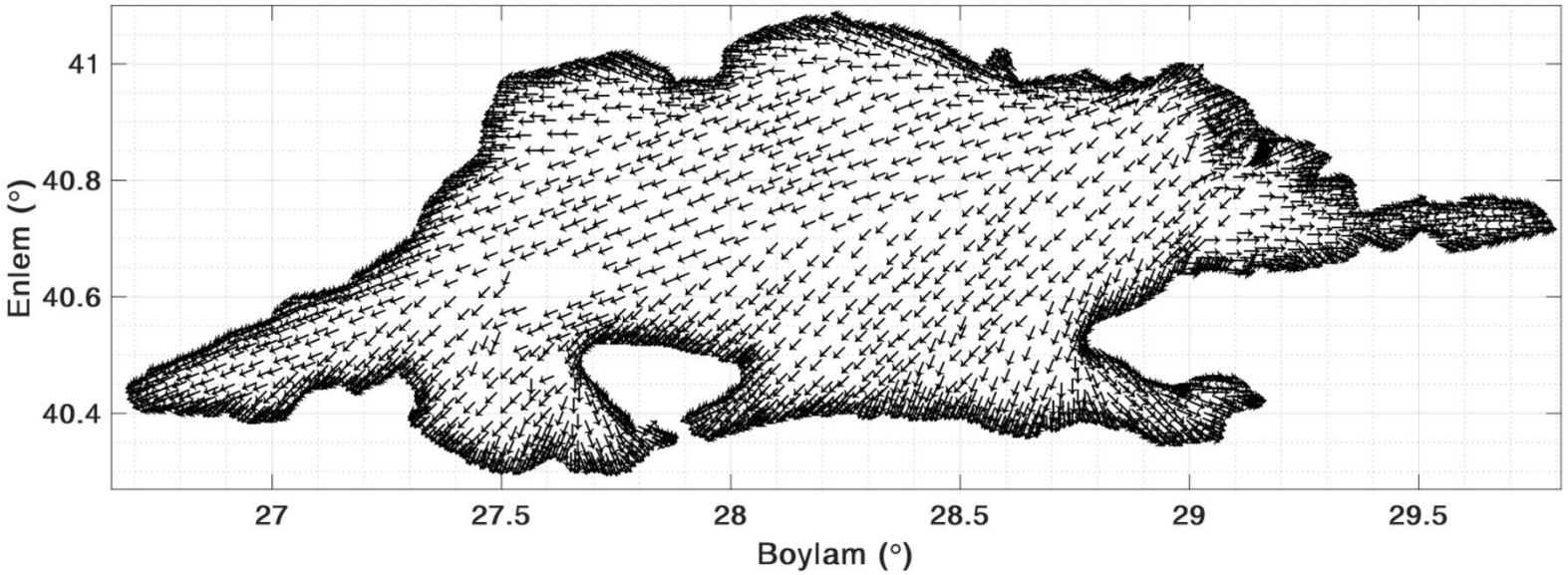
Şekil 4.3 Mevsimsel ortalama rüzgâr hızının alansal dağılımları

4.2.2 Belirgin Dalga Yüksekliği (H_s) Alansal Dağılımları

Şekil 4.4 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliği değerlerinin alansal dağılımını göstermektedir. 40 yıllık ortalama alansal dağılımda en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri açık denizde 0.40 m'ye kadar yükselmektedir. Ayrıca kıyıya yakın bölgelerde en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri batı kıyısında 0.32 m, kuzey-kuzey-batı kıyısında 0.33 m ve güney kıyısında 0.34 m'ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 4.4 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

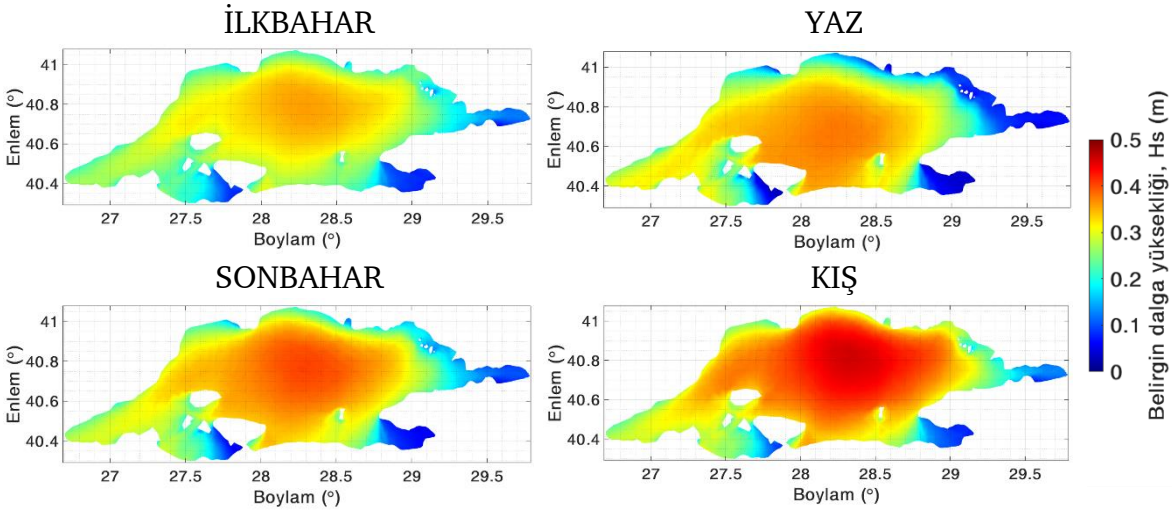


Şekil 4.5 Hâkim dalga yönünün alansal dağılımı

Kuzeydoğu-güneybatı doğrultusundaki rüzgârların etkisiyle Marmara Denizi üzerindeki en yüksek belirgin dalga yüksekliği değeri açık denizde aynı doğrultuda meydana gelmektedir. Ayrıca rüzgâr hızlarının düşük olduğu Marmara Denizi'nin güneyinde, ada çevrelerinde ve körfez bölgerinde belirgin dalga yüksekliği değeri de düşmektedir.

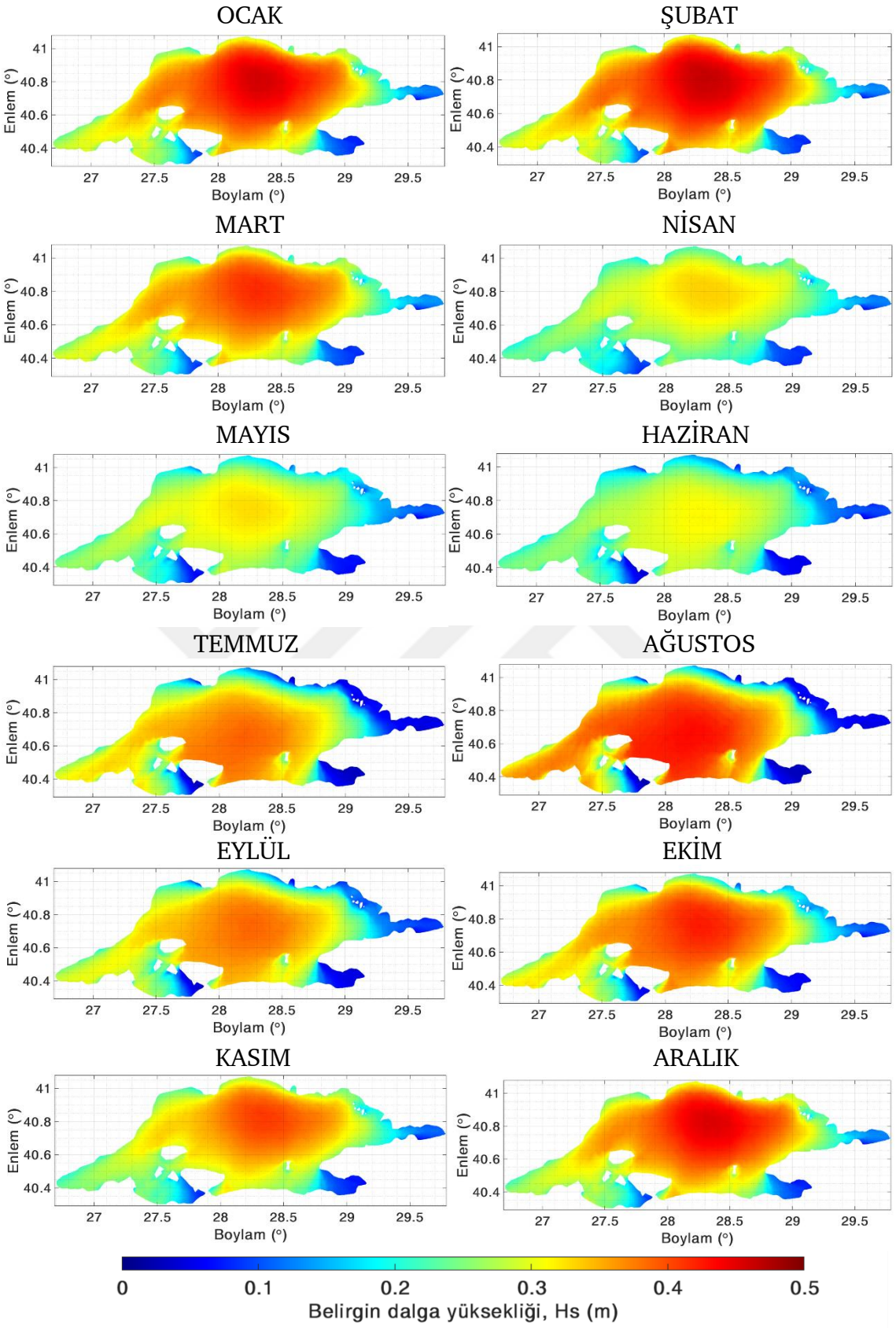
Marmara Denizi için 40 yıllık hâkim dalga yönü genellikle kuzeydoğudur; fakat kıyıya yakın bölgelerde ve körfez bölgelerinde kıyıya doğru kuzeydoğu yönünden kuzey, kuzeybatı, batı ve doğu yönüne doğru geçişler görülmektedir. Bu geçişlerin daha net olarak görülebilmesi için Şekil 4.5 ile tüm noktalara ait hâkim dalga yönleri ayrıca gösterilmiştir.

Şekil 4.6 mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliği değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Mevsimsel alansal dağılımda en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri kış mevsiminde açık denizde 0.45 m'ye kadar ulaşmaktadır. Ayrıca kıyıya yakın bölgelerde en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri kuzey-kuzey-batı kıyısında 0.38 m, güney kıyısında 0.36 m, batı kıyısında 0.35 m ve kuzey kıyısında 0.33 m'ye kadar ulaşmaktadır. Diğer mevsimlerde ise açık denizde ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri sonbaharda 0.41 m, yaz aylarında 0.38 m ve ilkbaharda 0.36 m'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla rüzgâr hızı değerlerinde olduğu gibi Marmara Denizi'nde en yüksek dalgaların kış mevsiminde ve en düşük dalgaların ise ilkbahar mevsiminde görüldüğü söylenebilmektedir. Kış mevsiminde görülen belirgin dalga yüksekliği değerleri ilkbaharda görülen belirgin dalga yüksekliği değerlerine göre yaklaşık olarak %25'lik bir artış göstermektedir.



Şekil 4.6 Mevsimsel ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımları

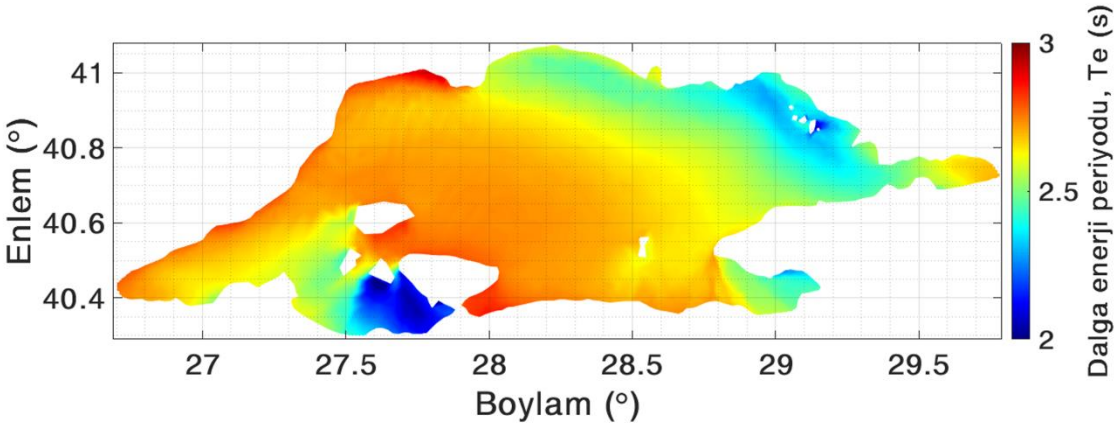
Şekil 4.7 aylık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Marmara Denizi'nde en yüksek ortalama belirgin dalga yüksekliğinin görüldüğü aylar sırasıyla şubat, ocak ve aralık olmasına karşın en düşük ortalama belirgin dalga yüksekliği ise sırasıyla haziran, mayıs ve nisan aylarındadır. Şubat ayında açık denizde ortalama belirgin dalga yüksekliği değeri 0.46 m'ye kadar yükselirken haziran ayında açık denizde bu değer 0.30 m'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla şubat ayında elde edilen değer haziran ayında elde edilen değerin yaklaşık 1.5 katına ulaşmaktadır.



Şekil 4.7 Aylık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımları

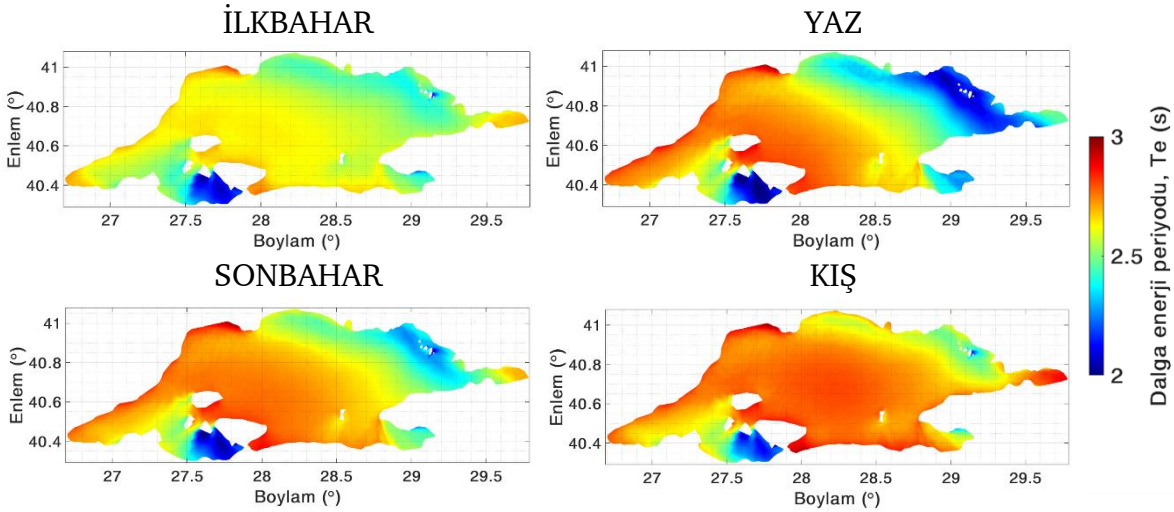
4.2.3 Dalga Enerji Periyodu (T_e) Alansal Dağılımları

Şekil 4.8 40 yıllık ortalama dalga enerji periyodu değerlerinin alansal dağılımını göstermektedir. 40 yıllık ortalama alansal dağılımda en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değeri kuzeybatı kıyı şeridi boyunca 2.7-2.9 s değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca Bandırma kıyısında ve Kapıdağ Yarımadası çevresinde de aynı değerlere kadar ulaşmaktadır.



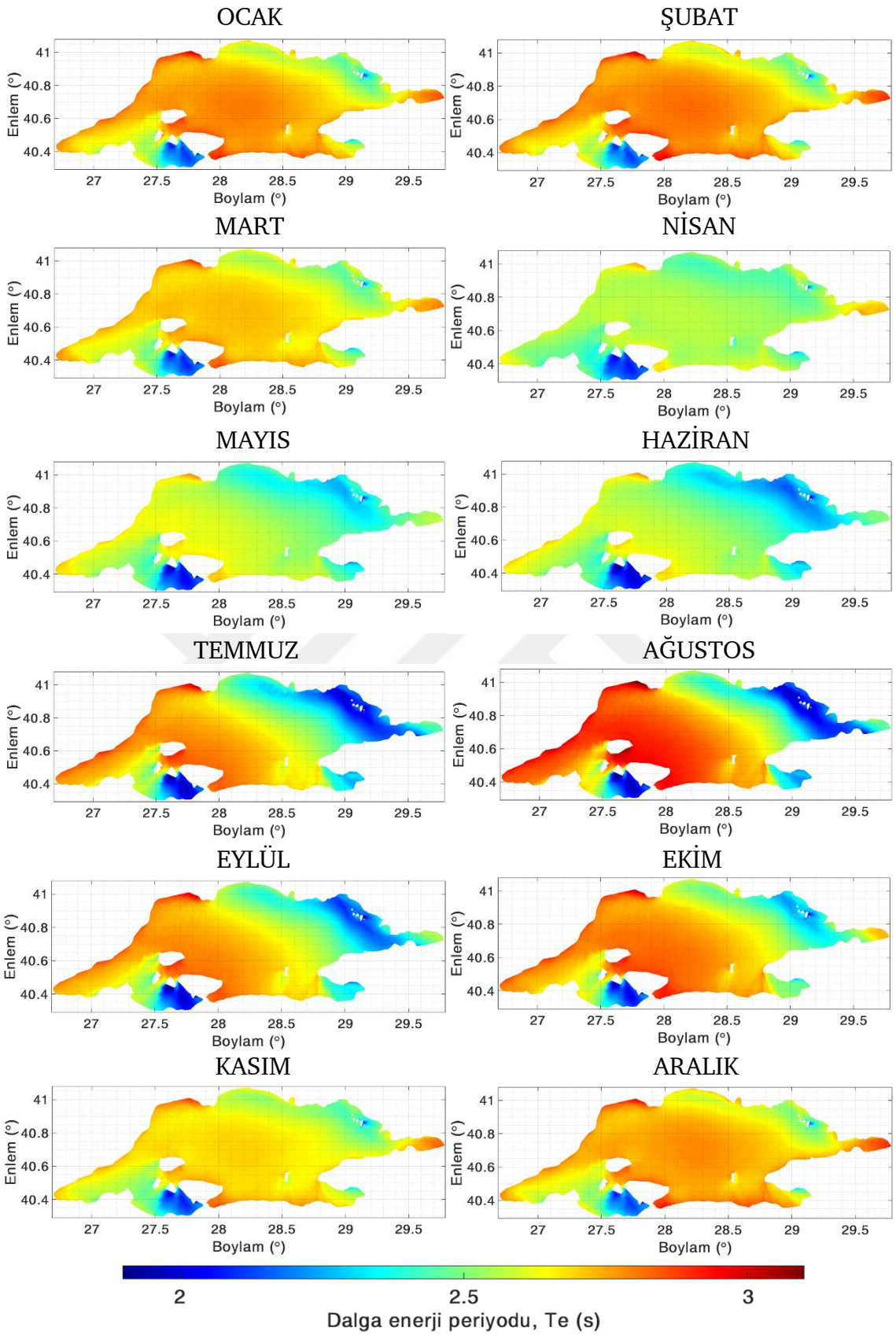
Şekil 4.8 40 yıllık ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımı

Şekil 4.9 mevsimsel ortalama dalga enerji periyodu değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Mevsimsel alansal dağılımda en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değeri Marmara Denizi'nin genelinde kış mevsiminde görülmektedir ve yaklaşık 2.97 s değerine kadar ulaşmaktadır. Sonbahar ve yaz mevsimlerinde ise kuzeybatı kıyı şeridinde, Bandırma kıyısında ve Kapıdağ Yarımadası çevresinde 2.95 s değerine kadar yükselmektedir. Buna karşın bu bölgelerde ilkbahar mevsiminde diğer mevsimlere göre daha düşük değerler görülmektedir.



Şekil 4.9 Mevsimsel ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımları

Şekil 4.10 aylık ortalama dalga enerji periyodu değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Marmara Denizi'nde bölgesel olarak en yüksek ortalama dalga enerji periyodunun görüldüğü aylar sırasıyla ağustos, ekim ve temmuz ayları olmasına karşın Marmara Denizi'nin genelinde ise en yüksek ortalama dalga enerji periyodunun görüldüğü aylar sırasıyla şubat, ocak ve aralık aylarıdır. Buna karşın en düşük ortalama dalga enerji periyodunun görüldüğü aylar ise sırasıyla haziran, mayıs ve nisan aylarıdır. Marmara Denizi üzerinden en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değeri ağustos ayında 3.10 s değeri ile kuzey-kuzey-batı kıyısında görülmektedir. Açık denizde ise en yüksek ortalama dalga enerji periyodu değeri şubat ayında 2.81 s değerine kadar yükselirken haziran ayında ise açık denizde bu değer 2.51 s'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla şubat ayında elde edilen değer ile haziran ayında elde edilen değer arasında yaklaşık %12'lik bir artış görülmektedir.



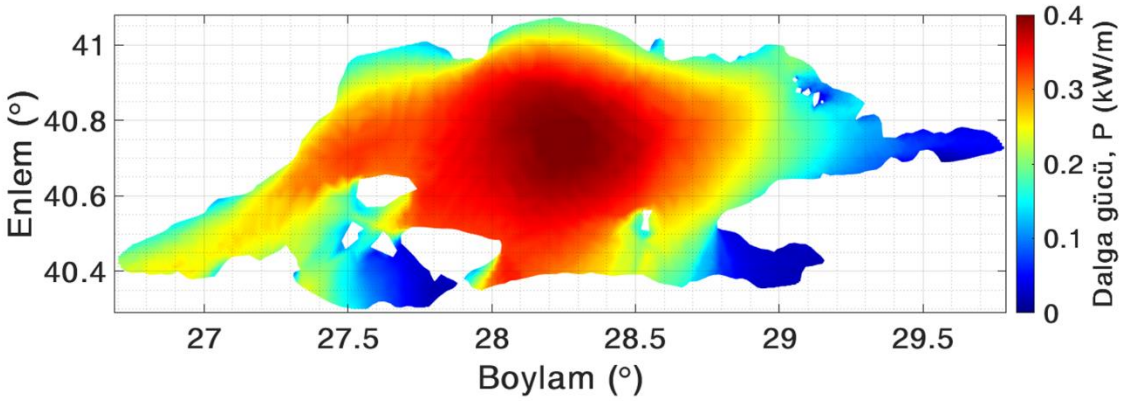
Şekil 4.10 Aylık ortalama dalga enerji periyodunun alansal dağılımları

4.2.4 Dalga Gücü (P) Alansal Dağılımları

Bölüm 2'de verilen (2.6) eşitliği kullanılarak belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu değerlerinden dalga gücü değeri elde edilmiştir. Marmara Denizi için deniz suyunun özgül kütlesi (ρ) 1025 kg/m^3 olarak alınmıştır. Dolayısıyla eşitlik (2.6), eşitlik (4.1) hâlini almıştır.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s{}^2 T_e \approx (0.491) H_s{}^2 T_e \qquad (4.1)$$

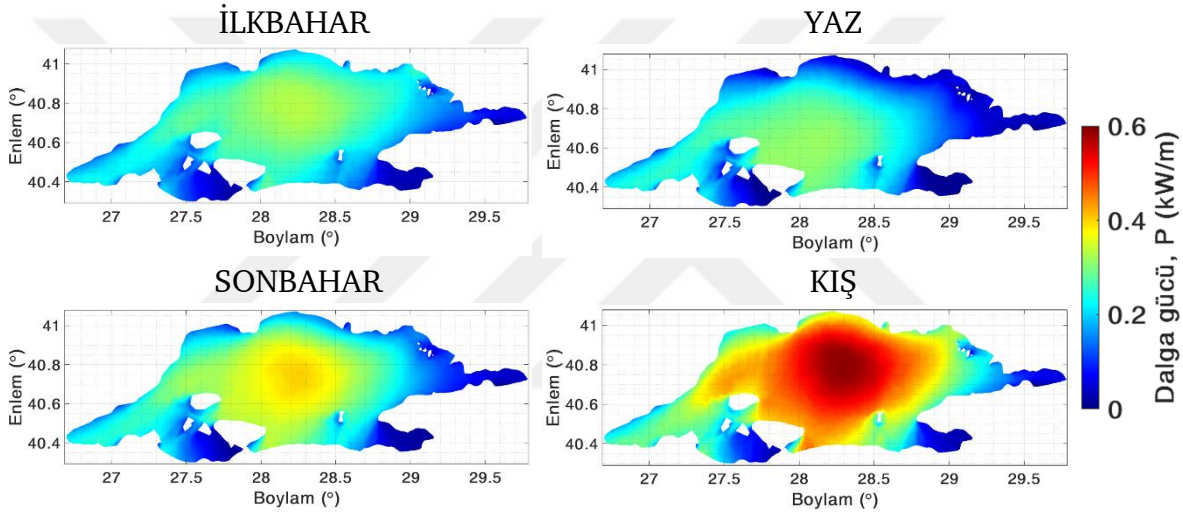
Şekil 4.11 40 yıllık ortalama dalga gücü değerlerinin alansal dağılımını göstermektedir. 40 yıllık ortalama alansal dağılımda en yüksek ortalama dalga gücü değeri açık denizde 0.40 kW/m'ye kadar ulaşmaktadır. Ayrıca kıyıya yakın bölgelerde en yüksek ortalama dalga gücü değeri batı kıyısında 0.28 kW/m, kuzey-kuzey-batı kıyısında 0.30 kW/m ve güney kıyısında 0.34 kW/m'ye kadar ulaşmaktadır. Dalga gücü, belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu parametreleri ile elde edildiğinden alansal dağılımında da bu iki parametre etkilidir. Belirgin dalga yüksekliğinin açık denizde en yüksek değere ulaşması, dalga enerji periyodunun ise kuzeybatı kıyı şeridi, Bandırma kıyısında ve Kapıdağ Yarımadası çevresinde en yüksek değere ulaşması nedeniyle dalga gücü de aynı bölgelerde yüksek değerler göstermektedir.



Şekil 4.11 40 yıllık ortalama dalga gücünün alansal dağılımı

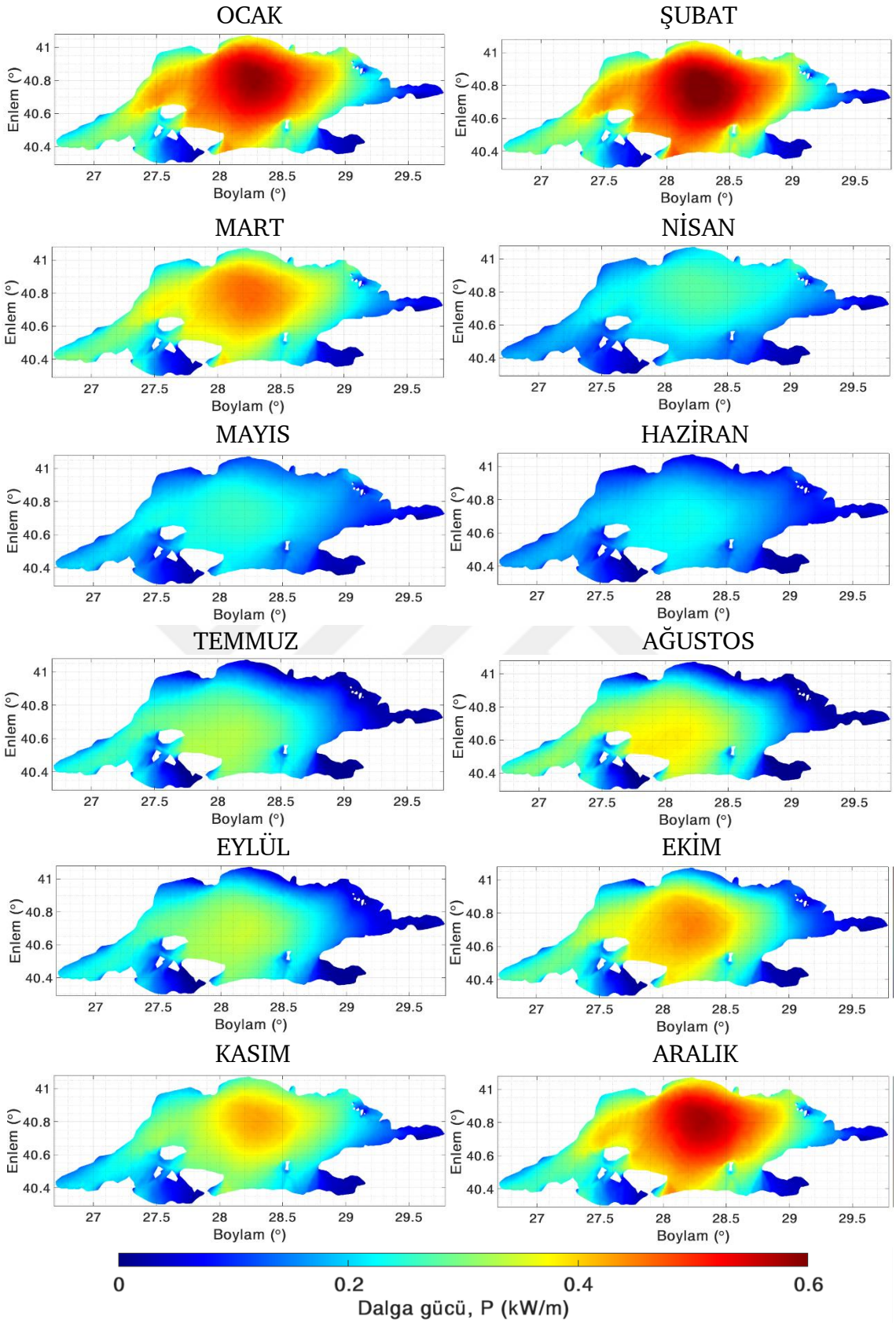
Şekil 4.12 mevsimsel ortalama dalga gücü değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Mevsimsel olarak Marmara Denizi'nde en yüksek dalga enerji potansiyeli kış mevsimindedir. Mevsimsel alansal dağılımda en yüksek ortalama dalga gücü değeri kış mevsiminde açık denizde 0.57 kW/m'ye kadar ulaşmaktadır.

Ayrıca kıyıya yakın bölgelerde en yüksek ortalama dalga gücü değeri batı kıyısında 0.35 kW/m, kuzey kıyısında 0.38 kW/m, kuzey-kuzey-batı kıyısında 0.43 kW/m ve güney kıyısında 0.46 kW/m'ye kadar ulaşmaktadır. Diğer mevsimlerde ise açık denizde ortalama dalga gücü değeri sonbaharda 0.39 kW/m, ilkbaharda 0.33 kW/m ve yaz mevsiminde 0.29 kW/m'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla yaz mevsiminde açık denizde görülen ortalama dalga gücü değeri kış mevsiminde yaklaşık olarak 2 katına ulaşmaktadır. Açık denizde yaz mevsimi en düşük değeri göstermesine karşın Kapıdağ Yarımadası çevresi başta olmak üzere bazı bölgelerde ilkbahar mevsiminden daha yüksek ve sonbahar mevsimine yaklaşık değerler göstermektedir.



Şekil 4.12 Mevsimsel ortalama dalga gücünün alansal dağılımları

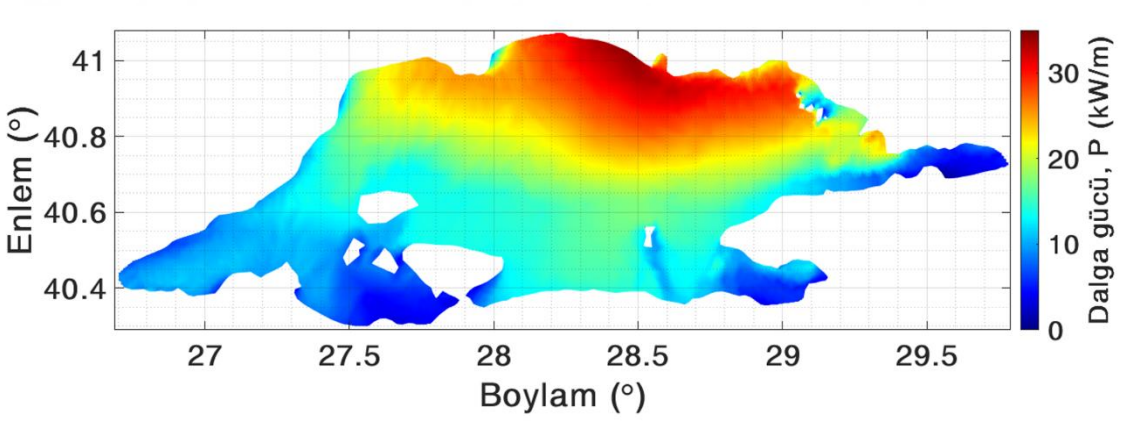
Şekil 4.13 aylık ortalama dalga gücü değerlerinin alansal dağılımlarını göstermektedir. Aylık olarak Marmara Denizi'nde en yüksek dalga enerji potansiyelinin olduğu aylar sırasıyla şubat, ocak ve aralık ayları olmasına karşın en düşük dalga enerji potansiyelinin olduğu aylar ise sırasıyla haziran, mayıs ve nisan aylarıdır. Şubat ayında açık denizde ortalama dalga gücü değeri 0.60 kW/m'ye kadar yükselirken haziran ayında açık denizde bu değer 0.23 kW/m'ye kadar düşmektedir. Dolayısıyla şubat ayında elde edilen değer haziran ayında elde edilen değerin yaklaşık 2.6 katına ulaşmaktadır.



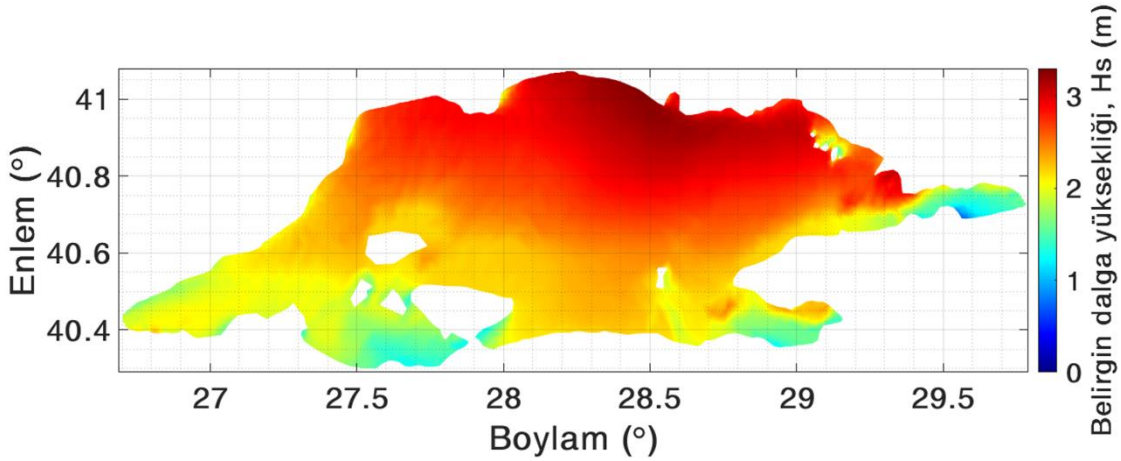
Şekil 4.13 Aylık ortalama dalga gücünün alansal dağılımları

4.2.5 Maksimum Değer, Standart Sapma, Değişkenlik Katsayısı ve WEDI Alansal Dağılımları

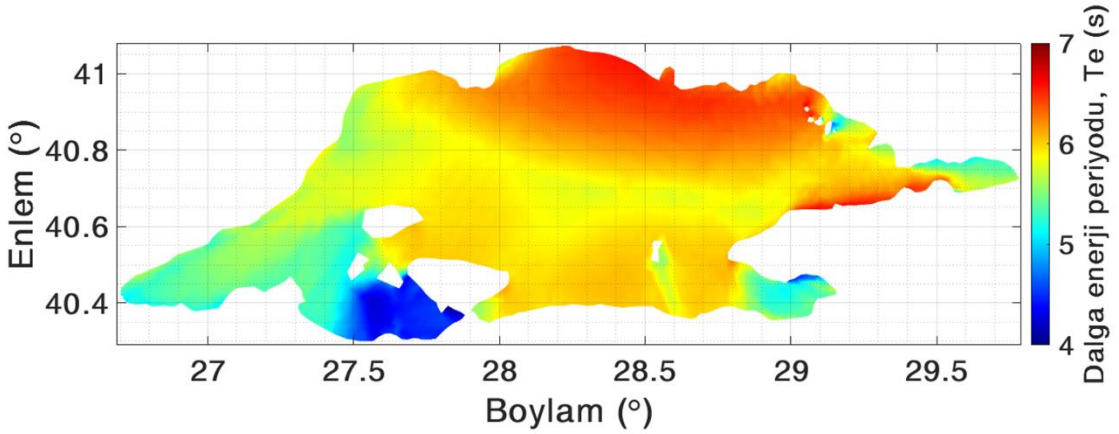
Marmara Denizi üzerinde görülen anlık maksimum dalga gücü, belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu değerleri elde edilmiştir. Bu değerler İstanbul kıyılarında görülmektedir ve sırasıyla 34.5 kW/m, 3.29 m ve 6.64 s değerlerine kadar yükselmektedir. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde anlık maksimum değerler ile elde edilen dalga gücü, belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu alansal dağılımlarının ortalama değerler ile elde edilen alansal dağılımlardan farklı olduğu ve rüzgâr hızı alansal dağılımına benzer oldukları görülmektedir.



Şekil 4.14 Maksimum dalga gücü değerlerinin alansal dağılımı



Şekil 4.15 Maksimum belirgin dalga yüksekliği değerlerinin alansal dağılımı

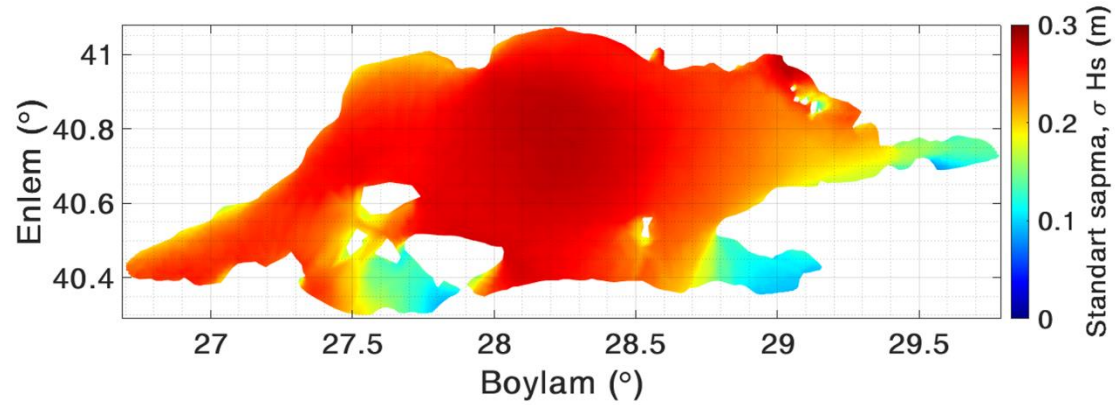


Şekil 4.16 Maksimum dalga enerji periyodu değerlerinin alansal dağılımı

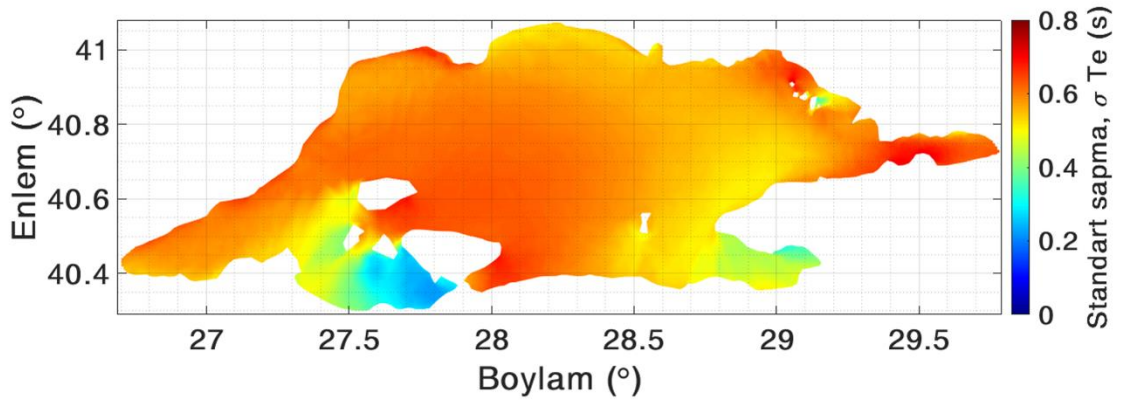
Veri setinin değişkenliğini değerlendirmek için standart sapma (σ) ve değişkenlik katsayısı (COV) istatistiksel değerleri belirgin dalga yüksekliği, dalga enerji periyodu ve dalga gücü parametreleri için elde edilmiştir. Standart sapma bir veri setinin ortalama değere göre dağılımını gösteren istatistiksel bir değerdir. Standart sapmanın (σ) hesaplanmasında (4.2) eşitliği kullanılmaktadır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{4.2}$$

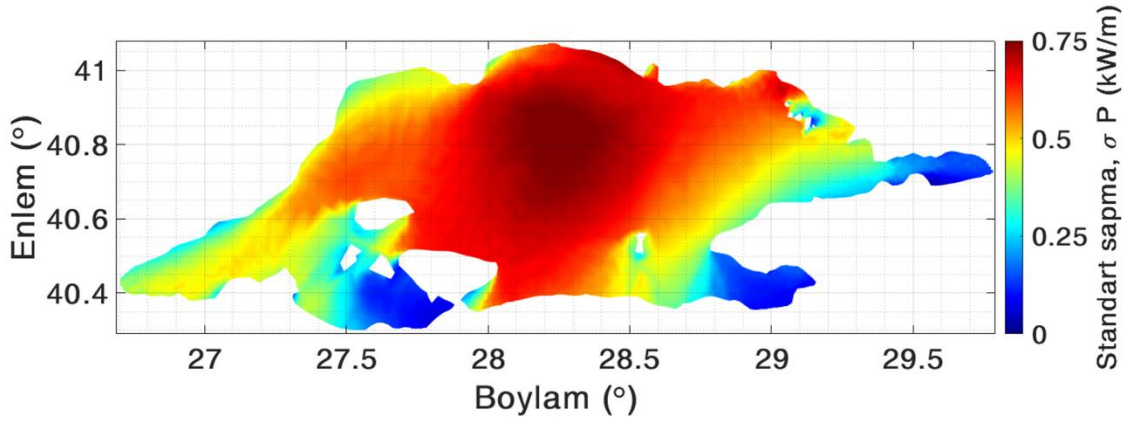
burada n toplam veri sayısı, x ise veri değeridir.



Şekil 4.17 Belirgin dalga yüksekliği için standart sapmanın alansal dağılımı



Şekil 4.18 Dalga enerji periyodu için standart sapmanın alansal dağılımı



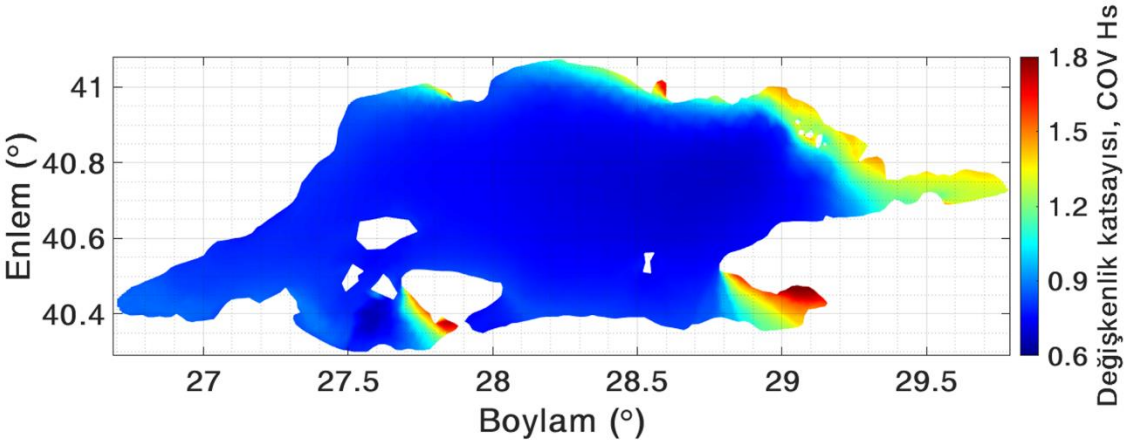
Şekil 4.19 Dalga gücü için standart sapmanın alansal dağılımı

1979-2018 yılları arasında belirgin dalga yüksekliği, dalga enerji periyodu ve dalga gücü için hesaplanan standart sapmanın alansal dağılımları sırasıyla Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 ile verilmiştir.

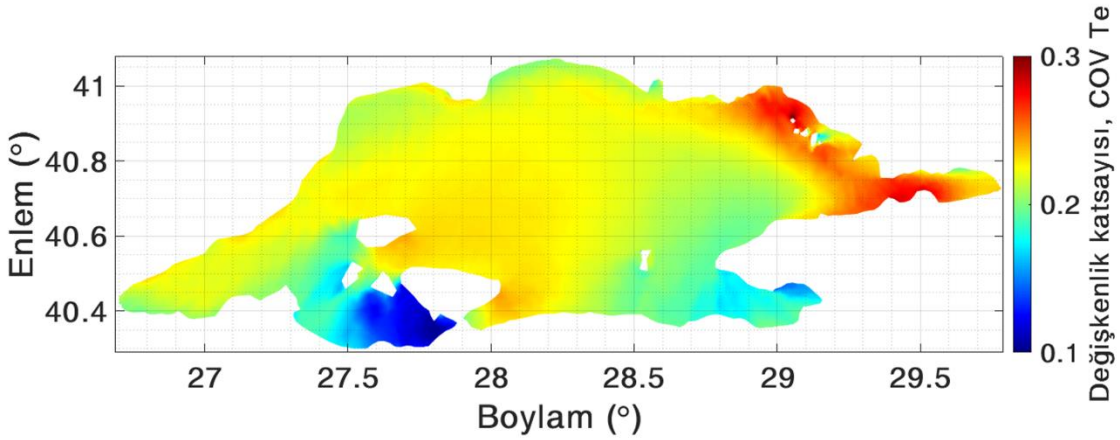
Şekil 4.17 incelendiğinde Marmara Denizi açıklarında standart sapma değerinin 0.3 m'ye kadar çıktığı görülmektedir. Körfez bölgelerinde ise bu değer yaklaşık olarak 0.1 m'dir. Şekil 4.4 ile verilen 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımı incelendiğinde Marmara Denizi açıklarında ortalama belirgin dalga yüksekliğinin 0.4 m'ye kadar çıktığı, körfez bölgelerinde ise 0.1 m'nin altına düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla standart sapmanın körfez bölgelerinde elde edilen değerinin açık denizde elde edilen değerinden daha düşük olması bu bölgelerdeki ortalama belirgin dalga yüksekliği değerleri ile bağlantılıdır. Aynı durum dalga enerji periyodu ve dalga gücü için de geçerli olmaktadır. Bu sebeple standart sapma veri setinin ortalama değere göre dağılımını göstermesine karşın veri setinin değişkenliği hakkında bilgi

edinebilmek için yeterli olamamaktadır. Veri setinin değişkenliğinin değerlendirebilmesi için (4.3) eşitliği ile verilen değişkenlik katsayısı (COV) kullanılmıştır. Değişkenlik katsayısı (COV) ise bir veri setindeki standart sapmanın (σ) ortalama değere ($\bar{x}$) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Dolayısıyla standart sapmanın ortalama değere göre değişkenliğini göstermektedir. Standart sapmadan farklı olarak değişkenlik katsayısı birimsiz olarak elde edilmektedir.

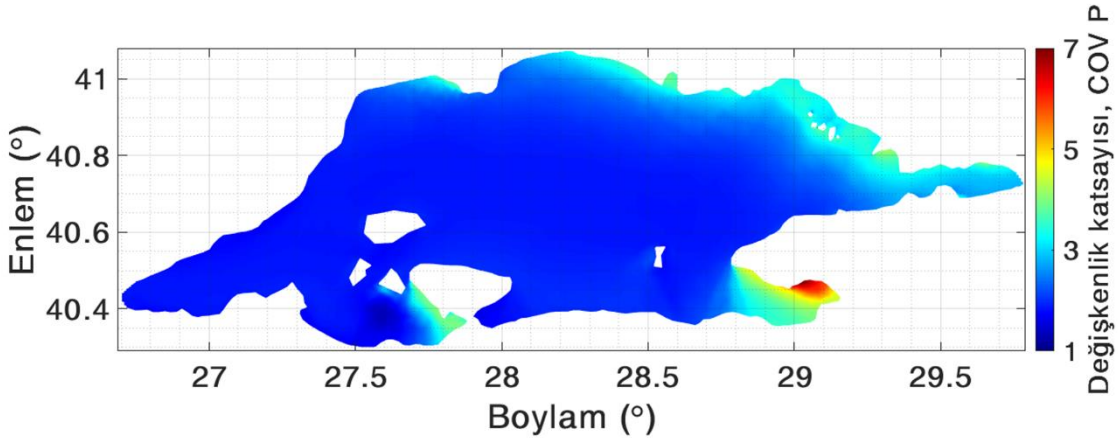
$$COV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{4.3}$$



Şekil 4.20 Belirgin dalga yüksekliği için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı



Şekil 4.21 Dalga enerji periyodu için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı



Şekil 4.22 Dalga gücü için değişkenlik katsayısının alansal dağılımı

1979-2018 yılları arasında belirgin dalga yüksekliği, dalga enerji periyodu ve dalga gücü için hesaplanan değişkenlik katsayısının alansal dağılımları sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ile verilmiştir.

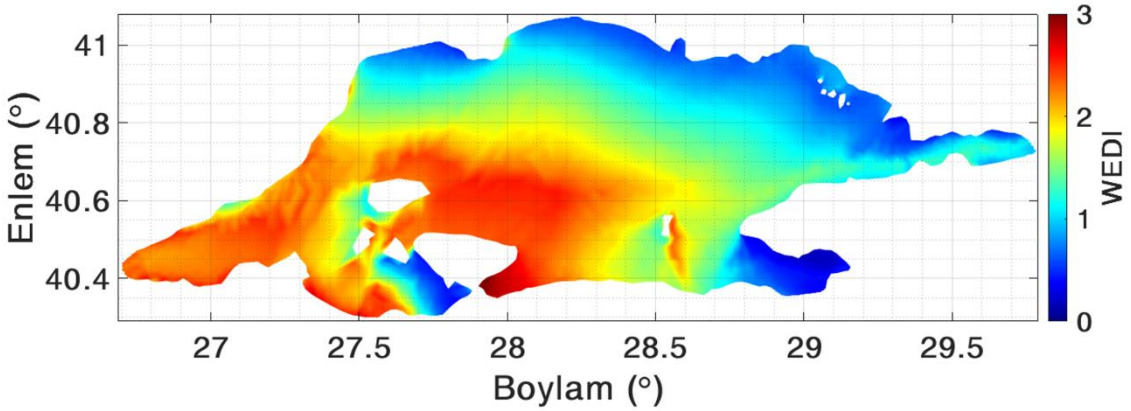
Şekil 4.20 incelendiğinde Marmara Denizi için belirgin dalga yüksekliği değişkenlik katsayısının Marmara Denizi açıklarında düşük olduğu, körfez bölgelerinde, kuzey ve kuzeydoğu kıyılarında ise arttığı görülmektedir. Şekil 4.4 ile verilen 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin alansal dağılımı ve Şekil 4.17 ile verilen belirgin dalga yüksekliği için standart sapmanın alansal dağılımı bu sonucu desteklemektedir. Kuzey ve kuzeydoğu kıyılarında değişkenlik katsayısının artmasının bir diğer sebebi de anlık maksimum değerlerin bu bölgelerde meydana gelmesine karşın ortalama değerlerin aynı bölgelerde daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Marmara Denizi'nin kara ve orografik karakteristiğine bağlı olarak verilerde meydana gelen değişkenliğin artması da değişkenlik katsayının körfez bölgelerinde artmasını desteklemektedir.

Dalga koşullarının şiddetini değerlendirmek için (4.4) eşitliği ile verilen WEDI (The Wave Energy Development Index) elde edilmiştir. WEDI, ortalama dalga gücünün (P_{ort}) maksimum dalga gücüne (P_{maks}) bölünmesiyle hesaplanmaktadır (Hagerman, 2001).

$$\text{WEDI} = \frac{P_{ort}}{P_{maks}} x100 \tag{4.4}$$

Daha düşük WEDI değerine sahip olan bölgeler dalga enerji dönüştürücüleri açısından daha cazip olarak değerlendirilmektedir. Çünkü daha düşük WEDI

değeri, ortalama dalga gücüne kıyasla daha yüksek maksimum dalga gücünün görüldüğü bölgelerde elde edilmektedir. Fakat bu durumun bölgede yapılacak projelendirme çalışmalarında fırtına koşullarından ötürü çeşitli zorluklar getireceği ve proje maliyetini artıracağının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



Şekil 4.23 Marmara Denizi için WEDI değerinin alansal dağılımı

Marmara Denizi için WEDI değerinin alansal dağılımı Şekil 4.23 ile verilmiştir. Buna göre kuzey, kuzey-kuzey-batı ve kuzeydoğu kıyıları projelendirme açısından uygun bölgeler olarak görülmektedir. Ayrıca kuzey-kuzey-batı kıyısında ortalama dalga gücü değeri 0.30 kW/m'ye ulaşmaktadır ve Marmara Denizi kıyılarında görülen en yüksek ortalama dalga gücü değerleri arasında yer almaktadır. Dolayısıyla kuzey-kuzey-batı kıyısı (Tekirdağ, Marmaraereğlisi kıyısı) WEDI değerinin düşük olması ve ortalama dalga gücü değerinin yüksek olması sebebiyle dalga enerji potansiyeli yönünden öne çıkmaktadır.

4.3 Noktasal Analizler

Marmara Denizi'ni temsil etmek üzere Şekil 4.1 ile gösterilen ve Tablo 4.2 ile karakteristikleri verilen 7 nokta seçilmiştir. Açık denizdeki P1 uzun dalga enerji periyodu, daha düşük değişkenlik ve daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini temsil etmektedir. Orta dalga enerji periyodu, yüksek değişkenlik ve orta derecede belirgin dalga yüksekliğini temsil eden P2 Tekirdağ, Şarköy ile Çanakkale açıkları arasında bulunmaktadır. Balıkesir-Bursa sınırı açıklarındaki P3 daha uzun dalga enerjisi periyodu, orta derecede değişkenlik ve yüksek belirgin dalga yüksekliğini temsil etmektedir. Orta dalga enerji periyodu, düşük değişkenlik ve düşük belirgin

dalga yüksekliğini temsil eden P4 Yalova, Armutlu açıklarında bulunmaktadır. Kocaeli, Darıca açıklarındaki P5 daha kısa dalga enerji periyodu, daha yüksek değişkenlik ve daha düşük belirgin dalga yüksekliğini temsil etmektedir. Kısa dalga enerji periyodu, yüksek değişkenlik ve orta derecede önemli dalga yüksekliğini temsil eden P6 İstanbul, Büyükçekmece açıklarında bulunmaktadır. P6 ayrıca anlık maksimum belirgin dalga yüksekliğini, anlık maksimum dalga enerji periyodunu, anlık maksimum dalga gücünü ve güçlü ortalama rüzgâr hızını da temsil etmektedir. Tekirdağ, Marmaraereğlisi'nin güneybatı açıklarındaki P7 ise orta dalga enerji periyodu, orta derecede değişkenlik ve orta derecede belirgin dalga yüksekliğini temsil etmektedir.

Tablo 4.2 Seçilen noktaların karakteristikleri

Nokta	Boylam (°)	Enlem (°)	H_s	T_e	COV
P1	28.28	40.76	Daha yüksek	Uzun	Daha düşük
P2	27.29	40.57	Orta	Orta	Yüksek
P3	28.26	40.47	Yüksek	Daha uzun	Orta
P4	28.72	40.52	Düşük	Orta	Düşük
P5	29.27	40.75	Daha düşük	Daha kısa	Daha yüksek
P6	28.50	40.94	Orta	Kısa	Yüksek
P7	27.71	40.89	Orta	Orta	Orta

Seçilen noktaların gruplandırılmış belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve dalga enerji periyodu (T_e) değerlerine karşılık gelen oluşma yüzdeleri elde edilmiştir. P1, P2, P3, P4, P5, P6 ve P7 noktaları için sırasıyla Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5, Tablo 4.6, Tablo 4.7, Tablo 4.8 ve Tablo 4.9 ile iki değişkenli dağılım şeklinde verilen oluşma yüzdeleri belirgin dalga yüksekliği için 0.50 m, dalga enerji periyodu için 1 s'lik aralıklar oluşturularak elde edilmiştir. Belirgin dalga yüksekliği 0.25 m'den küçük ve 1.25 m'den büyük dalgalar ile, dalga enerji periyodu 0.50 s'den küçük ve 4.50 s'den büyük dalgalar oluşma yüzdeleri daha düşük olduğu için ayrıca gruplandırılmıştır.

Tablo 4.3 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P1)

H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	1.7	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	2.4	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	26.8	5.9	0.0	0.0
2.50-3.50	2.3	49.9	1.9	0.0
3.50-4.50	0.0	0.5	7.4	0.5
> 4.50	0.0	0.0	0.0	0.6

Tablo 4.4 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P2)

H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	1.7	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	3.1	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	28.9	5.2	0.0	0.0
2.50-3.50	12.2	41.2	0.6	0.0
3.50-4.50	0.0	2.3	4.3	0.1
> 4.50	0.0	0.0	0.1	0.3

Tablo 4.5 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P3)

H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	1.7	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	2.9	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	28.7	3.7	0.0	0.0
2.50-3.50	10.5	43.1	0.2	0.0
3.50-4.50	0.0	3.3	5.0	0.0
> 4.50	0.0	0.0	0.3	0.6

Tablo 4.6 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P4)

H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	2.2	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	2.2	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	29.8	3.2	0.0	0.0
2.50-3.50	12.9	44.3	0.2	0.0
3.50-4.50	0.0	2.3	2.6	0.0
> 4.50	0.0	0.0	0.1	0.2

Tablo 4.7 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P5)

H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	3.3	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	13.4	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	45.5	6.3	0.0	0.0
2.50-3.50	10.0	16.0	0.1	0.0
3.50-4.50	0.1	3.4	1.4	0.0
> 4.50	0.0	0.1	0.2	0.1

Tablo 4.8 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P6)

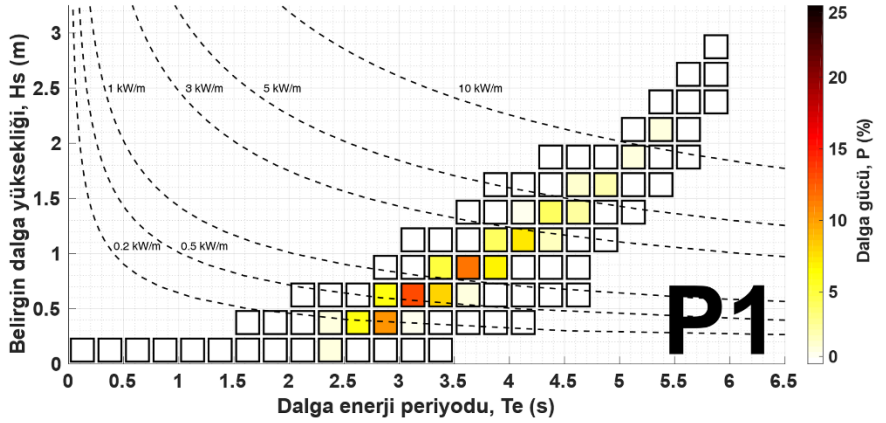
H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	2.5	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	3.9	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	37.7	13.6	0.0	0.0
2.50-3.50	2.5	33.0	1.5	0.0
3.50-4.50	0.0	0.5	3.6	0.4
> 4.50	0.0	0.0	0.1	0.5

Tablo 4.9 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdeleri (P7)

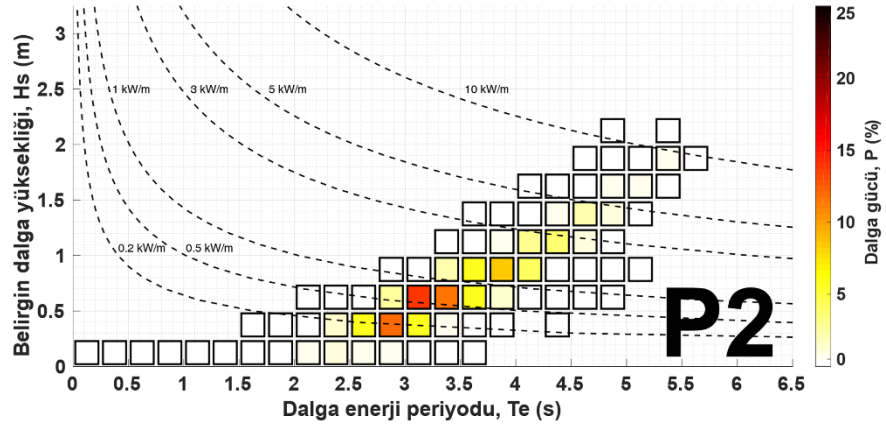
H_s (m) / T_e (s)	< 0.25	0.25-0.75	0.75-1.25	> 1.25
< 0.50	1.5	0.0	0.0	0.0
0.50-1.50	2.7	0.0	0.0	0.0
1.50-2.50	28.7	4.5	0.0	0.0
2.50-3.50	12.9	41.0	0.5	0.0
3.50-4.50	0.0	3.4	4.4	0.2
> 4.50	0.0	0.0	0.1	0.2

Tablo 4.3 incelendiğinde P1 noktasında 0.25-0.75 m belirgin dalga yüksekliği ve 2.50-3.50 s dalga enerji periyodu aralığında görülen dalgaların oluşma yüzdesi %49.9 olarak tüm gruplar içerisindeki en yüksek değere ulaşmaktadır. 0.25 m'den küçük ve 1.50-2.50 s aralığında görülen dalgaların oluşma yüzdesi ise %26.8 ile P1 noktası için ikinci sırayı almaktadır. Tüm noktalarda en yüksek oluşma yüzdelerinin görüldüğü ilk iki grup P1 noktasındaki ile aynıdır. P5 ve P6 noktasında ise bu iki grubun sıralaması değişmektedir. P5 noktasında ise en yüksek oluşma yüzdesinin görüldüğü grup 0.25 m'den küçük ve 1.50-2.50 s aralığındaki dalgalardan oluşmaktadır. Bu aralıkta görülen dalgaların oluşma yüzdesi %45.5'tir. P6 noktasında ise aynı aralıkta görülen dalgaların oluşma yüzdesi %37.7'dir. Daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini temsil eden P1 noktasında 0.75 m'den büyük dalgaların oluşma yüzdesinin diğer noktalardan daha fazla olduğu görülmektedir. Daha uzun dalga enerji periyodunu temsil eden P3 noktasında ise 3.50 s'den uzun dalgaların oluşma yüzdesi diğer noktalardan daha fazladır. Daha düşük belirgin dalga yüksekliği ve daha kısa dalga enerji periyodunu temsil eden P5 noktasında 0.25 m belirgin dalga yüksekliği ve 1.50 s dalga enerji periyodundan küçük dalgaların oluşma yüzdesi diğer noktalardan daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Buradan elde edilen bilgiler dalga iklimi ile ilgili bilgi vermektedir; fakat dalga enerjisi yönünden bakıldığında belirli aralıklardaki oluşma yüzdesi kadar bu aralıklarda elde edilecek dalga gücü değeri ve bu değerin toplam dalga gücü değeri içerisindeki yüzdesi de önem

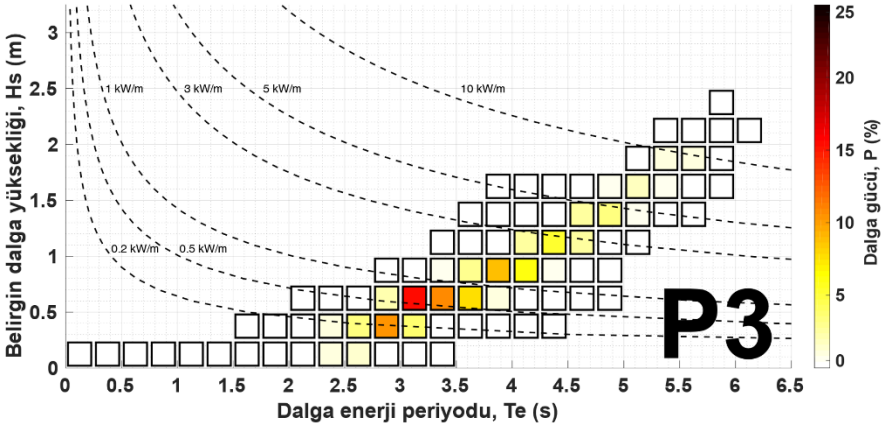
taşımaktadır. Bu amaçla seçilen noktalarda belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu değerlerine karşılık gelen dalga gücü değerinin o noktadaki toplam dalga gücü değeri içerisindeki yüzdesi her bir nokta için sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 ile üç değişkenli dağılım şeklinde sunulmuştur. Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu sırasıyla 0.25 m ve 0.25 s aralıklarla gruplandırılmıştır. Ayrıca her bir belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücü değerleri ile 0.2 kW/m, 0.5 kW/m, 1 kW/m, 3 kW/m, 5 kW/m ve 10 kW/m eşdeğer çizgileri oluşturulmuştur. En yüksek dalgaların ve en uzun periyotların meydana geldiği grup 3.00-3.25 m ve 6.25-6.50 s ile P6 noktasında görülmektedir. Çünkü P6 noktası daha önce de açıklandığı üzere anlık maksimum belirgin dalga yüksekliğini, anlık maksimum dalga enerji periyodunu, anlık maksimum dalga gücünü ve güçlü ortalama rüzgâr hızını temsil etmektedir. Örneğin, P1 noktasında 0.50-0.75 m belirgin dalga yüksekliği ve 3.00-3.25 s dalga enerji periyodu aralığında elde edilen dalga gücü değerinin P1 noktasındaki toplam dalga gücü değeri içerisindeki yüzdesi %13 ile en yüksek değeri göstermektedir. Bu değer tüm noktalar incelendiğinde, P4 noktasında 0.25-0.50 m belirgin dalga yüksekliği ve 2.75-3.00 s dalga enerji periyodu aralığında %22 ile en yüksek sonucu vermektedir. Yüksek belirgin dalga yüksekliğini ve uzun dalga enerji periyodunu temsil eden P1 ve P3 noktalarında 3 kW/m ve 10 kW/m eşdeğer çizgileri arasında yüzdesel dalga gücü değeri diğer noktalara göre daha fazla yoğunlaşmıştır. Buna karşın düşük belirgin dalga yüksekliğini ve kısa dalga enerji periyodunu temsil eden P5 noktasında ise 3 kW/m ve 10 kW/m eşdeğer çizgileri arasında yüzdesel dalga gücü değeri yoğunluğunun diğer noktalara göre daha az olduğu görülmektedir. Genel olarak her bir nokta için 0.2 kW/m ve 3 kW/m eşdeğer çizgileri arasında yoğunlaşma olduğu söylenebilmektedir.



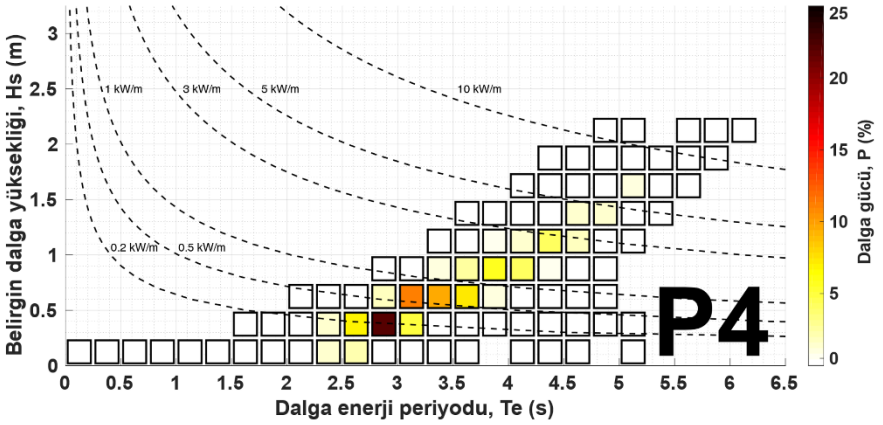
Şekil 4.24 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P1)



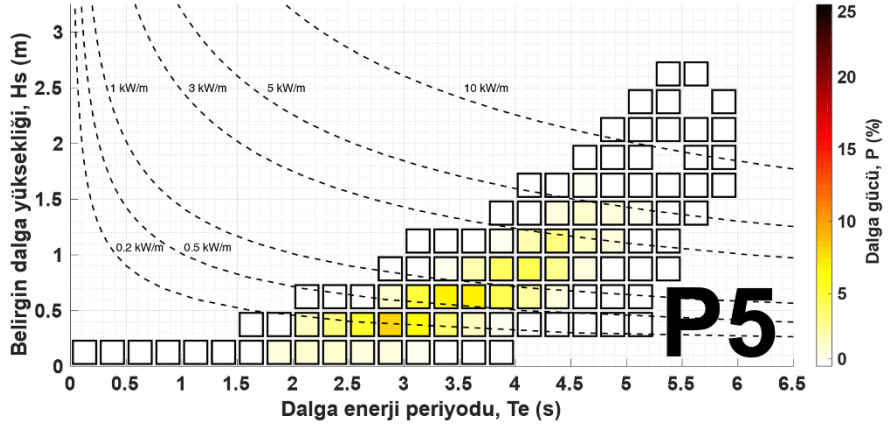
Şekil 4.25 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P2)



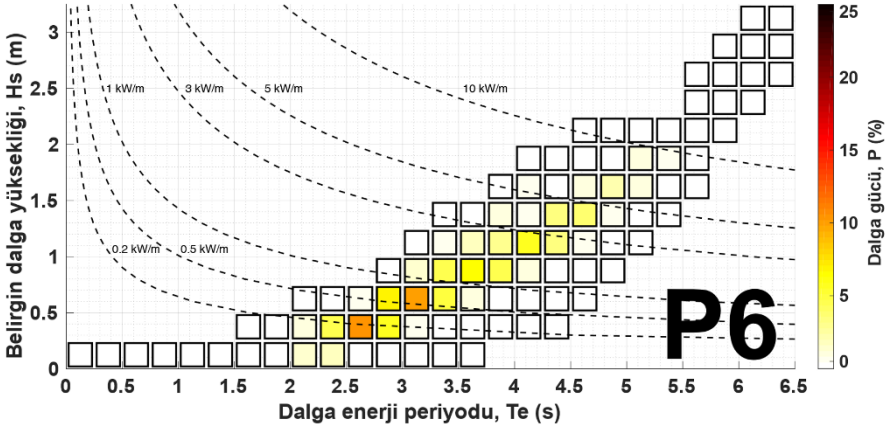
Şekil 4.26 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P3)



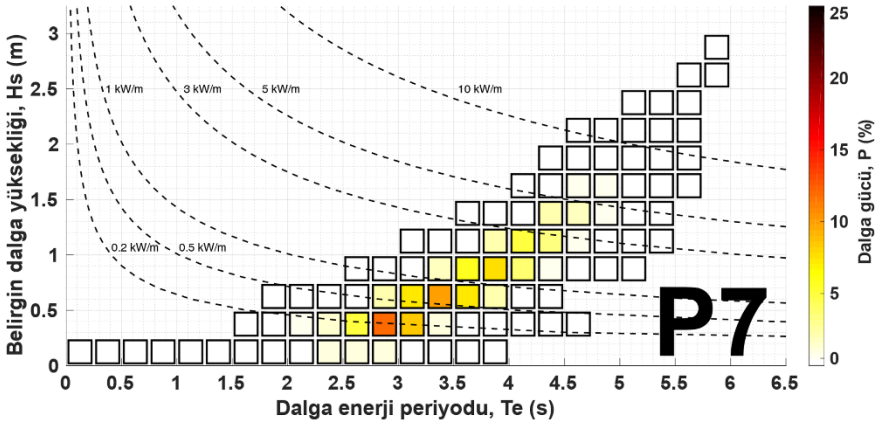
Şekil 4.27 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P4)



Şekil 4.28 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P5)

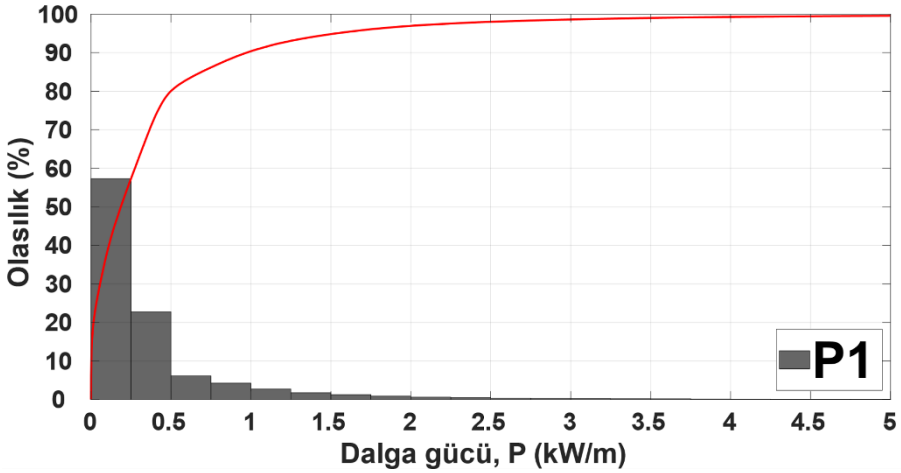


Şekil 4.29 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P6)

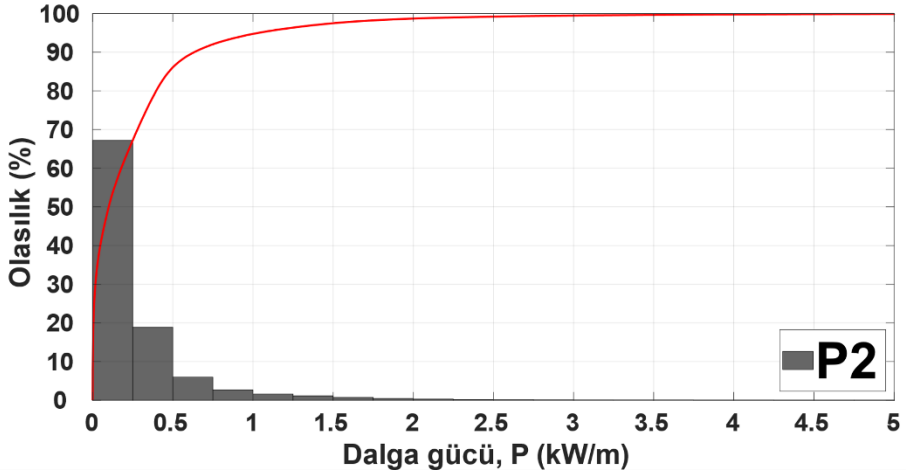


Şekil 4.30 Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyoduna karşılık gelen dalga gücünün yüzdesel olarak etkisi (P7)

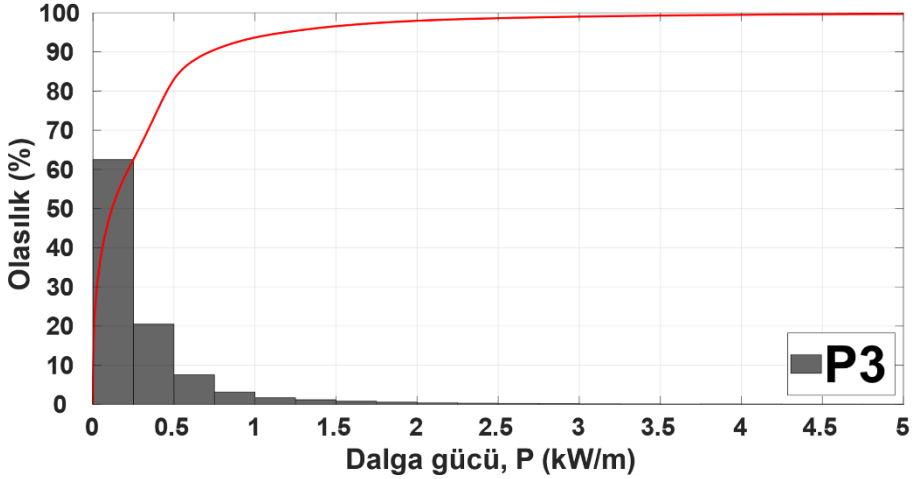
Seçilen noktalar için dalga gücü değerlerinin oluşma olasılığı (PDF) ve kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) her bir nokta için sırasıyla Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 ile sunulmuştur. Şekiller üzerinde dalga gücü değerlerinin oluşma olasılığı gri çubuklar ile, kümülatif dağılım fonksiyonu ise kırmızı çizgi ile verilmiştir. Dalga gücü değerleri çoğunlukla 5 kW/m'nin altında olduğu için x ekseni bu değerle sınırlandırılmıştır. Bu noktalar için maksimum dalga gücü değerleri sırasıyla 22.5, 11.2, 15.5, 14.8, 19.1, 32.6 ve 21.6 kW/m değerlerine kadar yükselmektedir. Şekil 4.31 seçilen noktaların çoğunlukla 0-0.25 kW/m aralığında dalga gücü değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini ve uzun dalga enerji periyodunu temsil eden P1 noktasında 0-0.25 kW/m aralığında dalga gücü değerlerinin oluşma olasılığı %57 iken daha düşük belirgin dalga yüksekliğini ve daha kısa dalga enerji periyodunu temsil eden P5 noktasında ise bu olasılık %88'dir. P2, P3, P4, P6 ve P7 noktalarında ise 0-0.25 kW/m aralığında dalga gücü değerlerinin oluşma olasılıkları sırasıyla %67, %63, %72, %77 ve %70'dir. P1 noktasında 1.50-1.75 kW/m, P2, P3, P6 ve P7 noktalarında 1.25-1.50 kW/m, P4 noktasında 1.00-1.25 kW/m ve P5 noktasında 0.75-1.00 kW/m aralıklarından itibaren dalga gücü değerlerlerinin oluşma olasılıkları %1'in altına düşmeye başlamaktadır.



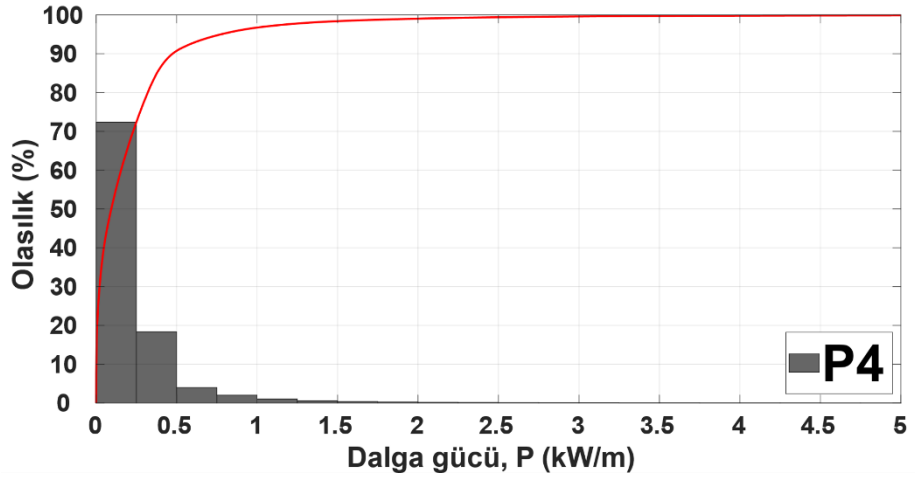
Şekil 4.31 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P1)



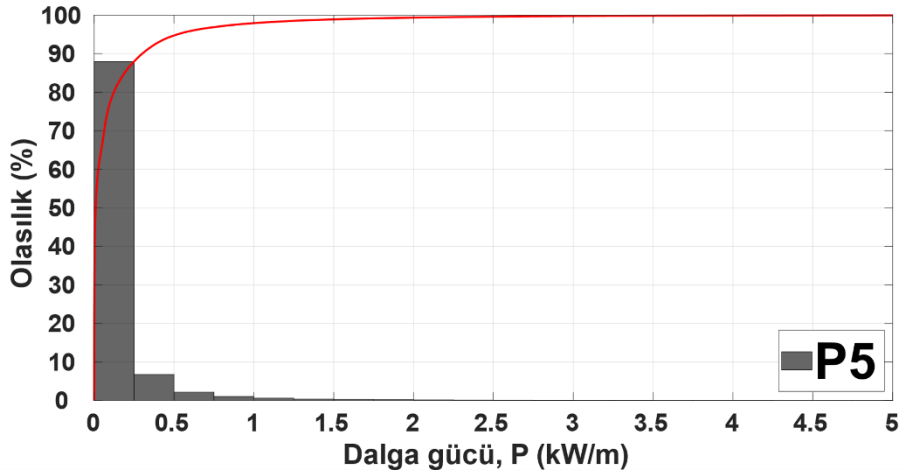
Şekil 4.32 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P2)



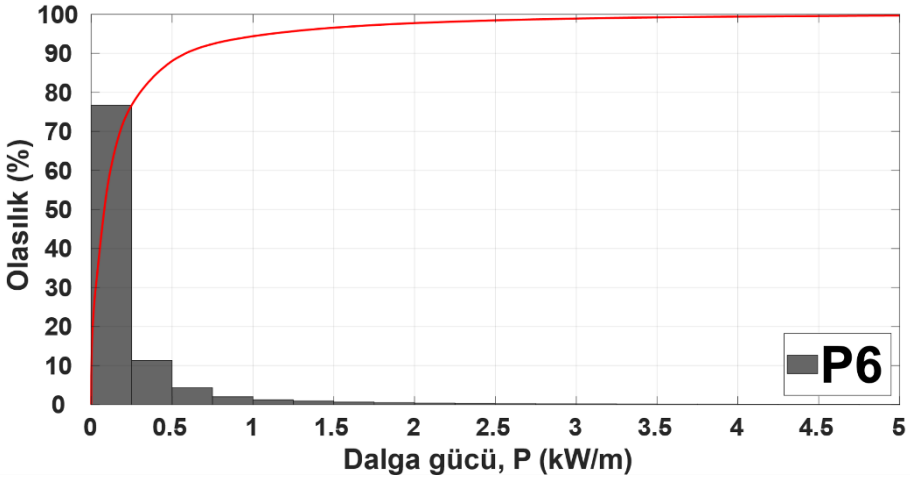
Şekil 4.33 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P3)



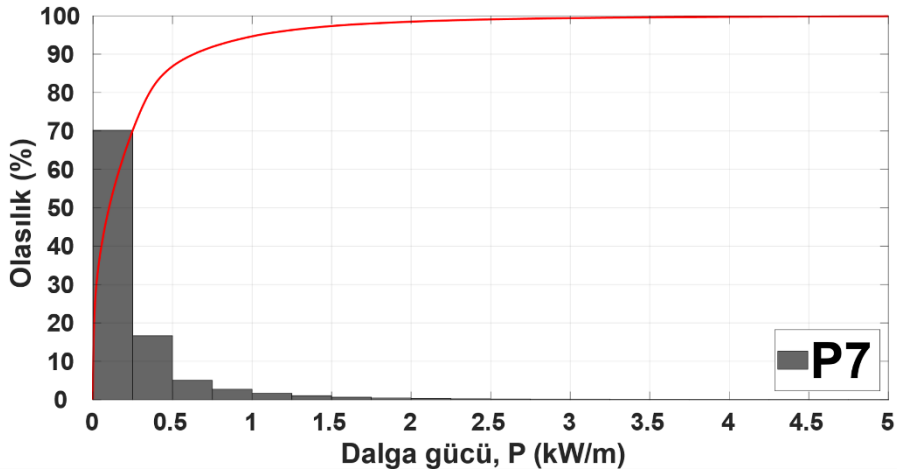
Şekil 4.34 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P4)



Şekil 4.35 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P5)

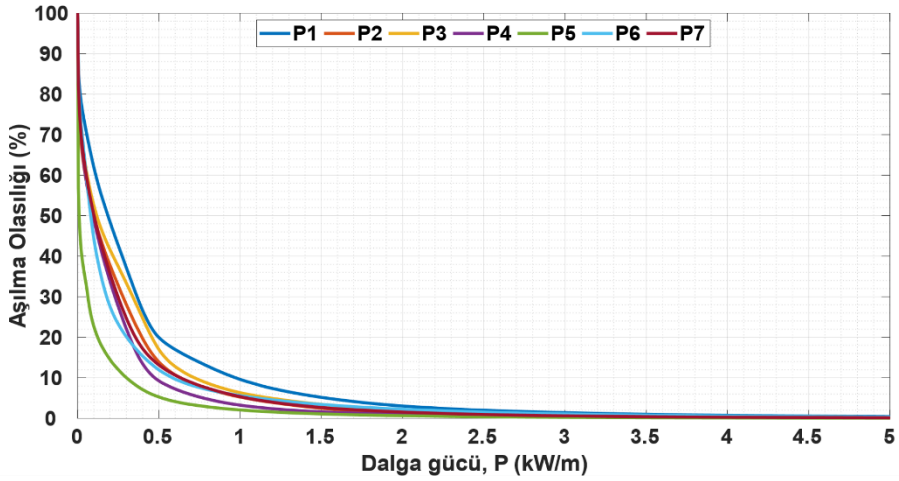


Şekil 4.36 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P6)



Şekil 4.37 Dalga gücünün oluşma olasılığı ve kümülatif dağılım fonksiyonu (P7)

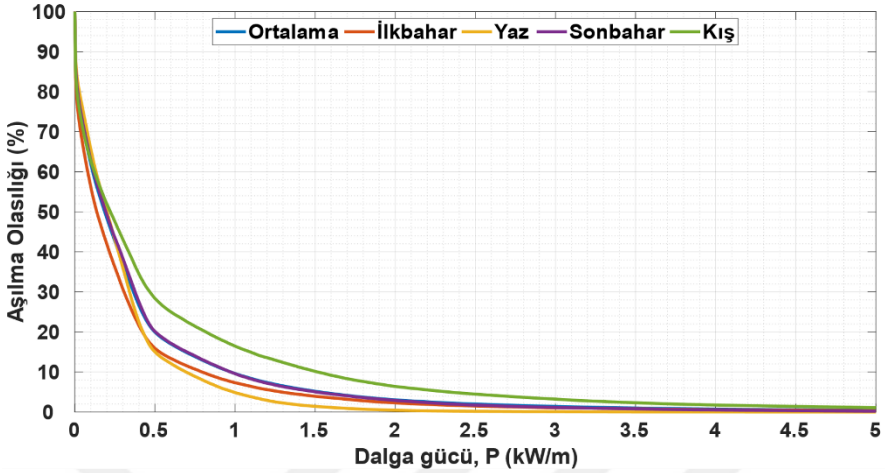
Seçilen noktalar için dalga gücü değerlerinin aşılma olasılığı (POE) Şekil 4.38 ile sunulmuştur. 5 kW/m dalga gücü değerinin altında aşılma olasılığı çoğunlukla %1'in altına düştüğünden x ekseni bu değer ile sınırlandırılmıştır.



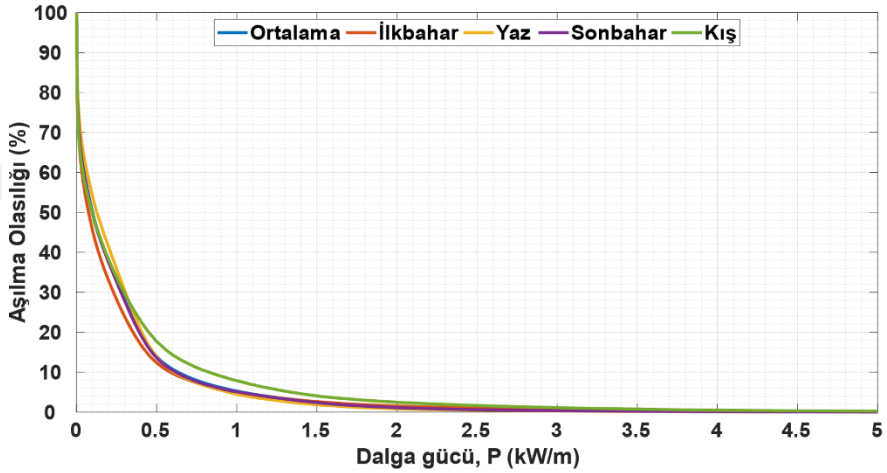
Şekil 4.38 Seçilen noktalarda dalga gücünün aşılma olasılığı

Şekil 4.38, daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini ve uzun dalga enerji periyodunu temsil eden P1 noktasında %90 aşılma olasılığının 0.0016 kW/m olarak en yüksek dalga gücü değerinde, daha düşük belirgin dalga yüksekliğini ve daha kısa dalga enerji periyodunu temsil eden P5 noktasında ise 0.00006 kW/m olarak en düşük dalga gücü değerinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca 0.25 kW/m dalga gücü değeri için P1 noktasında aşılma olasılığı %42 iken P5 noktasında ise %12'dir. P1 ve P5 noktalarına ait eğriler arasında sınırlandırılmış olan P2, P3, P4, P6 ve P7 noktalarında ise genel olarak birbirine yakın eğriler elde edilmiştir.

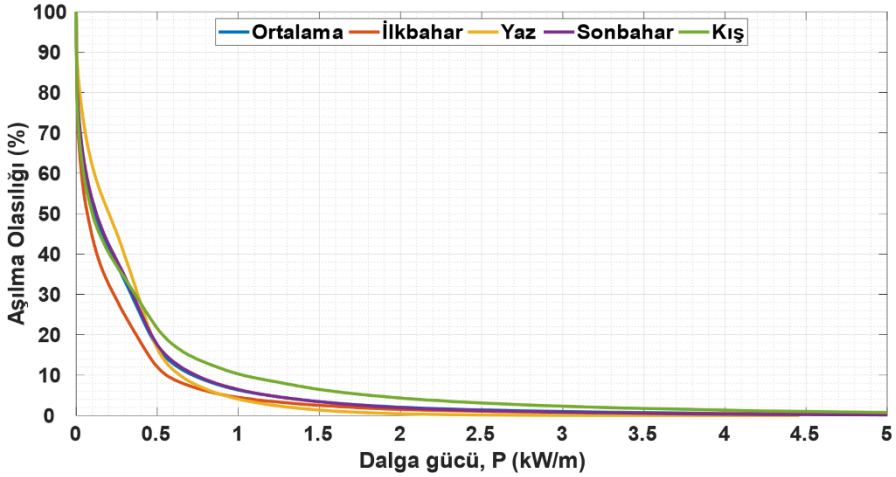
P1, P2, P3, P4, P5, P6 ve P7 noktaları için dalga gücü değerlerinin aşılma olasıkları mevsimsel olarak sırasıyla Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 ile sunulmuştur.



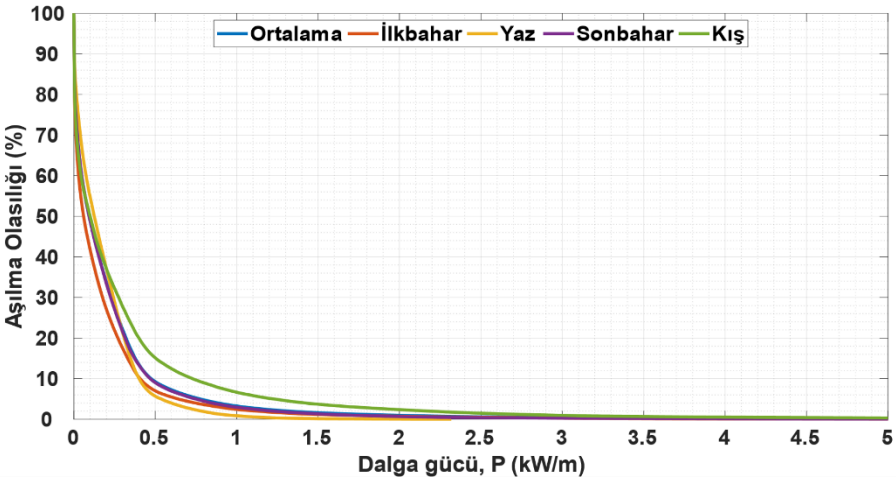
Şekil 4.39 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P1)



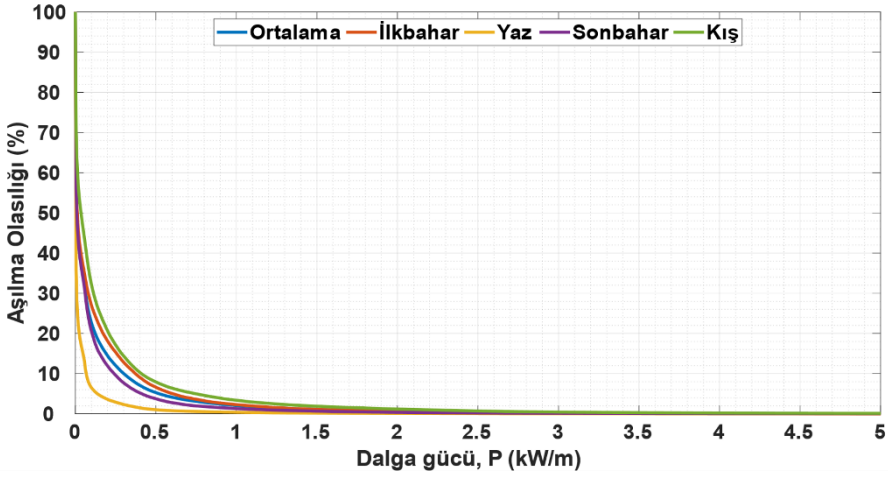
Şekil 4.40 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P2)



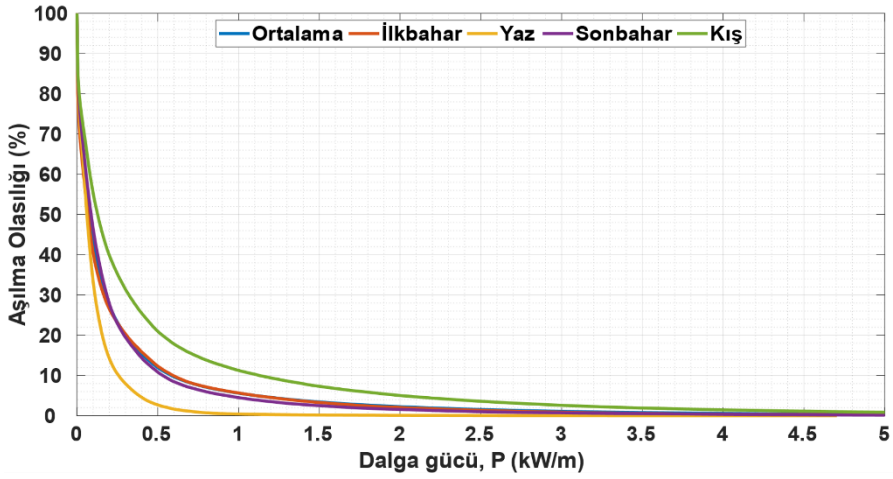
Şekil 4.41 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P3)



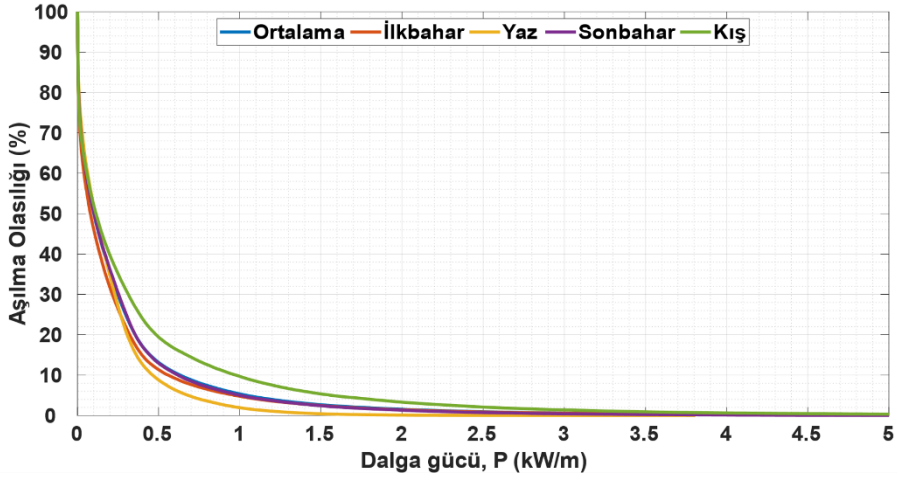
Şekil 4.42 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P4)



Şekil 4.43 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P5)



Şekil 4.44 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P6)



Şekil 4.45 Dalga gücünün aşılma olasılığı (P7)

Şekil 4.39 incelendiğinde P1 noktasında kış, sonbahar, yaz ve ilkbahar mevsimlerinde 0.25 kW/m dalga gücü değerinin aşılma olasılıklarının sırasıyla %48, %44, %43 ve %37 olduğu görülmektedir. Şekil 4.43 üzerinden P5 noktasında kış, ilkbahar, sonbahar, ve yaz mevsimlerinde 0.25 kW/m dalga gücü değerinin aşılma olasılıklarının sırasıyla %18, %16, %10 ve %3 olduğu görülmektedir. P5 noktasında 0.25 kW/m dalga gücü değerindeki aşılma olasılıkları P1 noktasındaki aynı değerdeki aşılma olasılıklarına göre daha düşüktür. Bu durum P5 noktasının zayıf dalgaları, P1 noktasının ise güçlü dalgaları temsil etmesinden kaynaklanmaktadır. P2, P3, P4 ve P7 noktalarında mevsimler arasında geçişler görülmekle birlikte genel olarak birbirine yakın eğriler elde edilmiştir. P6 ise yaz ve kış mevsimi arasındaki farkın en net görüldüğü

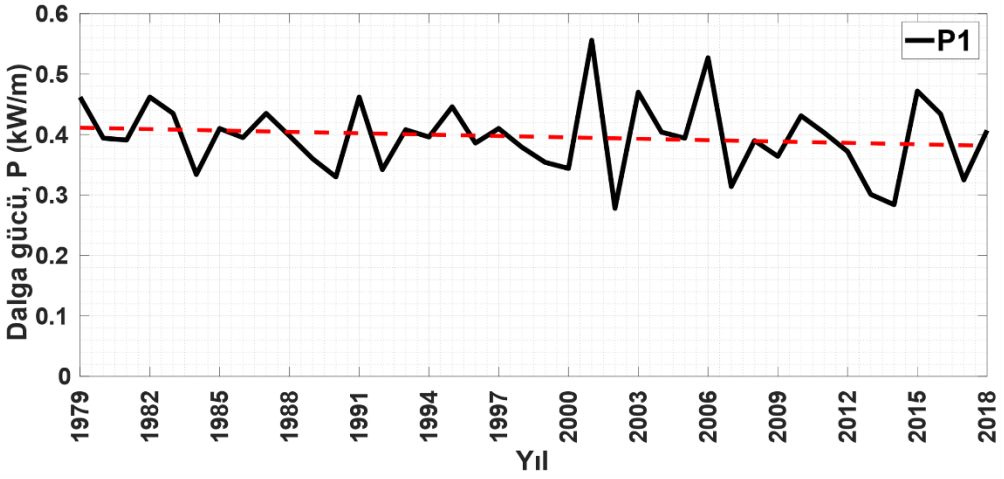
nokta olarak öne çıkmaktadır. P6 noktasında yaz ve kış mevsimlerinlerinde 0.25 kW/m dalga gücü değerinin aşılma olasıkları sırasıyla %10 ve %35'tir.

Verilerin değişkenliğinin artan veya azalan bir eğilim içinde olup olmadığını belirlemek için 1979-2018 yılları arasında doğrusal regresyon yöntemi ile eğilim analizi yapılmıştır. Eğilim analizi sonuçları Tablo 4.10 ile verilmiştir ve her bir nokta için sırasıyla Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52 ile gösterilmiştir. Şekiller üzerinde eğilim çizgileri kırmızı kesikli çizgi ile verilmiştir.

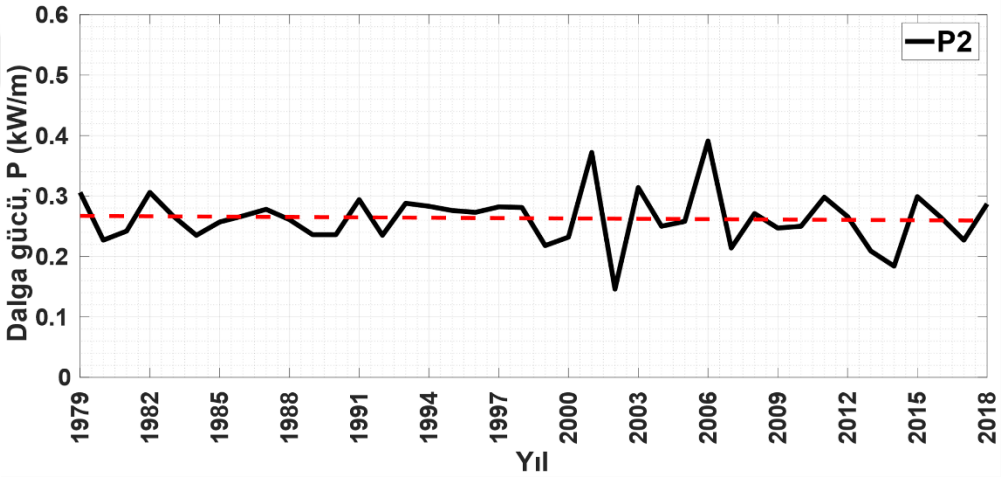
Sonuçlara göre 1979-2018 yılları arasında Marmara Denizi'nde ortalama dalga gücü değeri genel olarak azalma eğilimindedir. P5 ve P6 noktalarında ise ortalama dalga gücü değeri artma eğilimindedir. Çünkü bu noktalar diğer noktalara göre değişkenliği yüksek olan noktalardır ve bu durum eğilim çizgisinin yönünü etkilemektedir. Örneğin, azalma eğiliminde olan P1 noktasında eğilim çizgisinin başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark -0.030 kW/m'dir ve bu iki değer arasında %7.22'lik bir azalma vardır. Artma eğiliminde olan P5 noktasında ise eğilim çizgisinin başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark +0.007 kW/m'dir ve bu iki değer arasında %6.55'lik bir artış mevcuttur. Her bir nokta için eğilim çizgisinin başlangıç ve bitiş değerleri arasındaki fark ve bu iki değer arasındaki yüzdelik değişim Tablo 4.10 ile verilmiştir.

Tablo 4.10 Seçilen noktalarda 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimleri

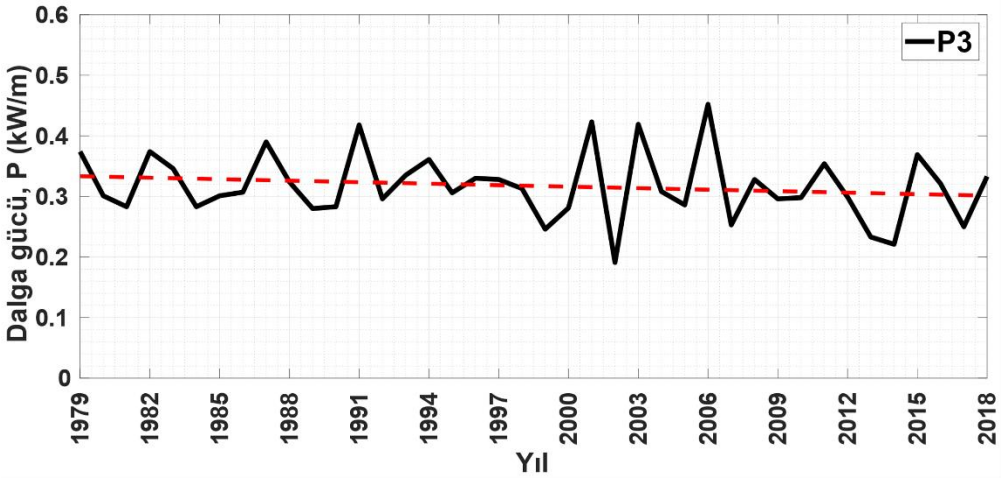
Nokta	%	kW/m
P1	- 7.22	- 0.030
P2	- 2.92	- 0.008
P3	- 9.63	- 0.032
P4	- 7.73	- 0.017
P5	+ 6.55	+ 0.007
P6	+ 5.62	+ 0.014
P7	- 0.31	- 0.001



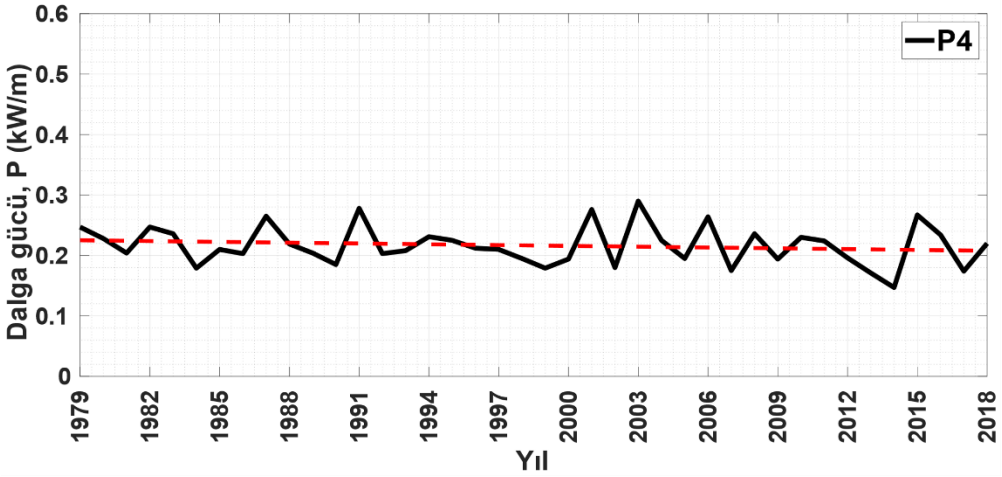
Şekil 4.46 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P1)



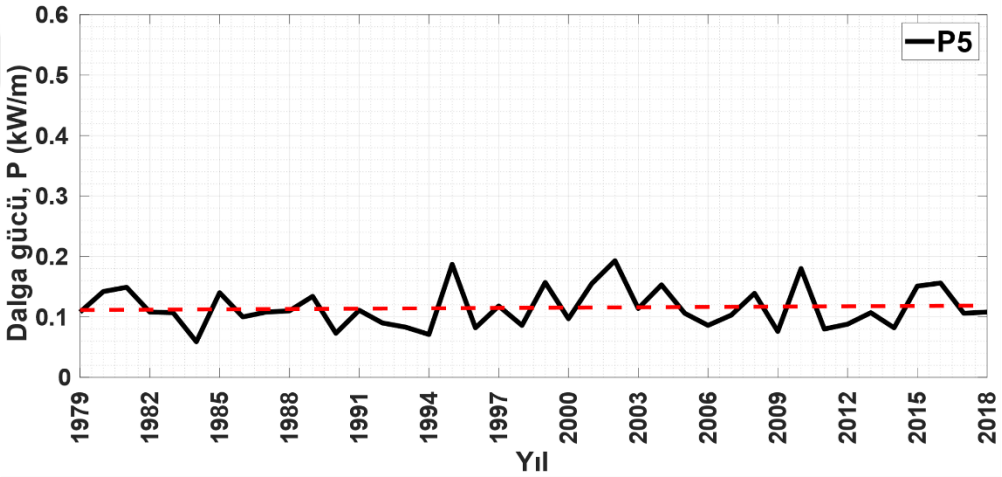
Şekil 4.47 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P2)



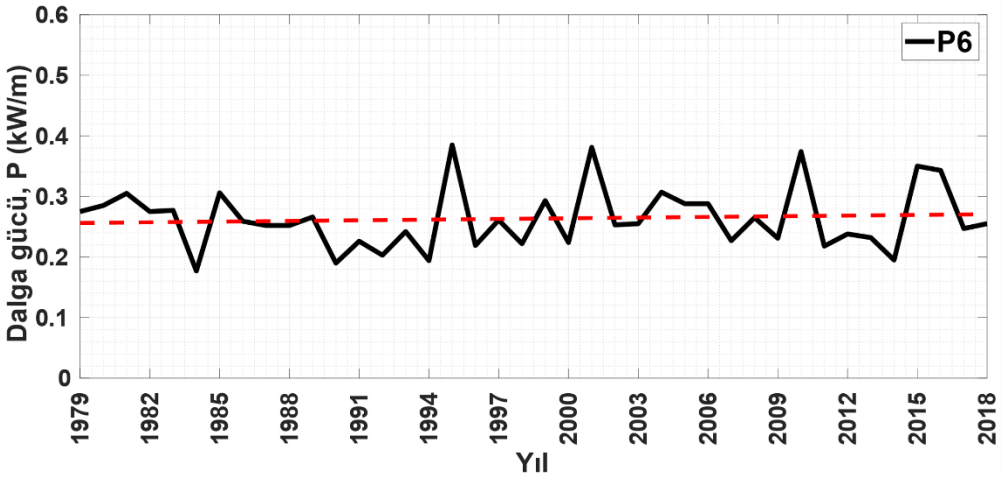
Şekil 4.48 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P3)



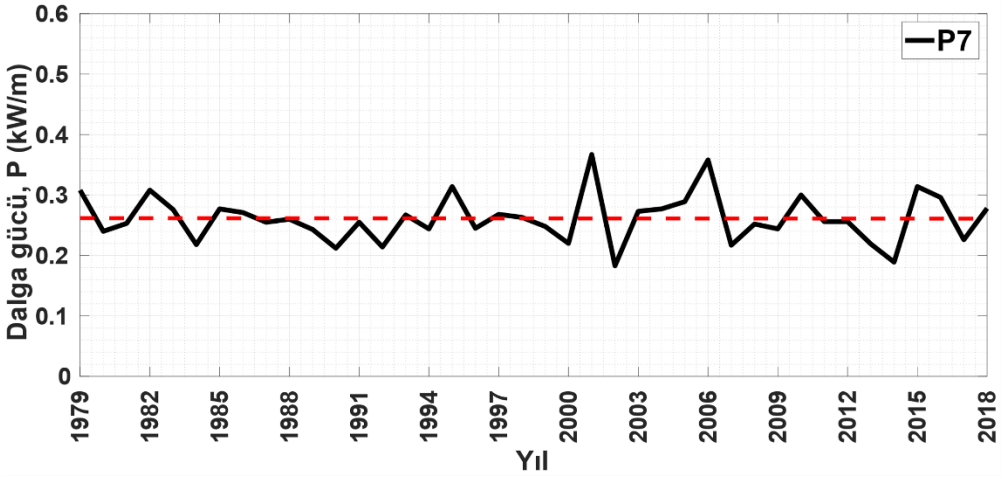
Şekil 4.49 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P4)



Şekil 4.50 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P5)

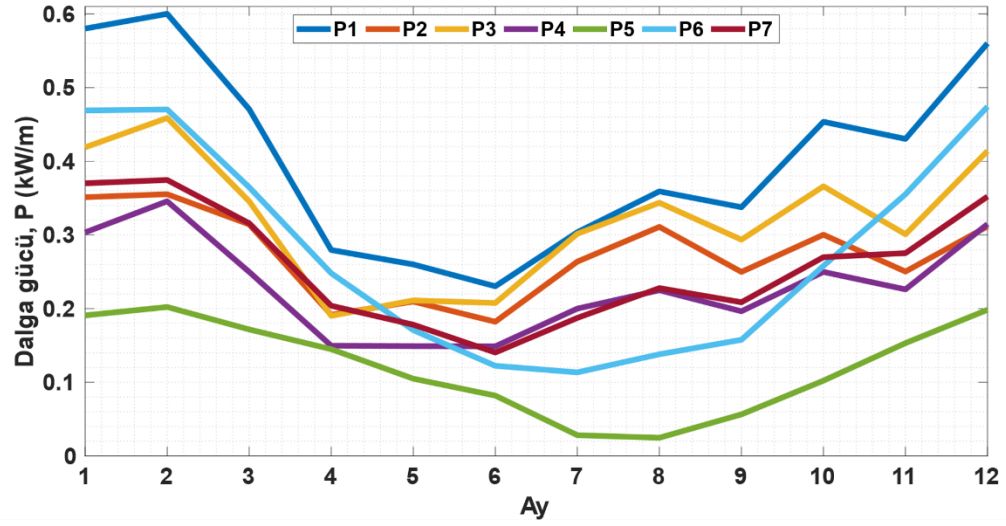


Şekil 4.51 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P6)



Şekil 4.52 40 yıllık dalga gücünün uzun dönemli eğilimi (P7)

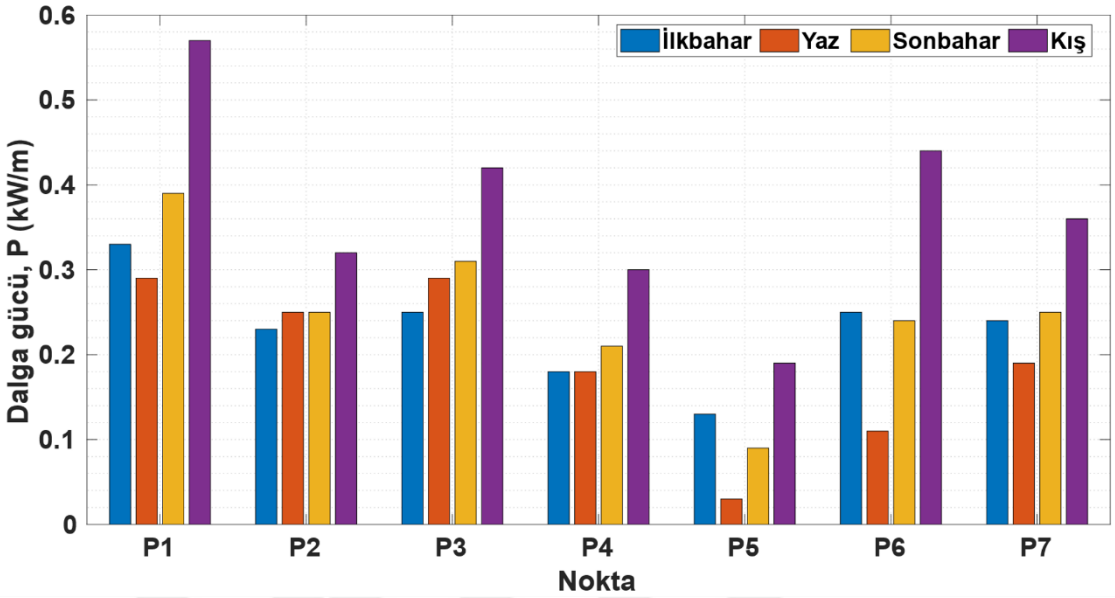
Şekil 4.53 seçilen noktalarda ortalama dalga gücü değerinin aylık olarak değişimini göstermektedir. Aylık olarak en yüksek ortalama dalga gücünün görüldüğü aylar sırasıyla şubat, ocak ve aralık ayları olmasına karşın en düşük ortalama dalga gücünün görüldüğü aylar ise çoğunlukla haziran, mayıs ve nisan aylarıdır. Açık denizi temsil eden P1'de şubat ayında ortalama dalga gücü değeri 0.60 kW/m'ye kadar yükselirken haziran ayında bu değer 0.23 kW/m'ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.53 Seçilen noktalarda aylık ortalama dalga gücü değerleri

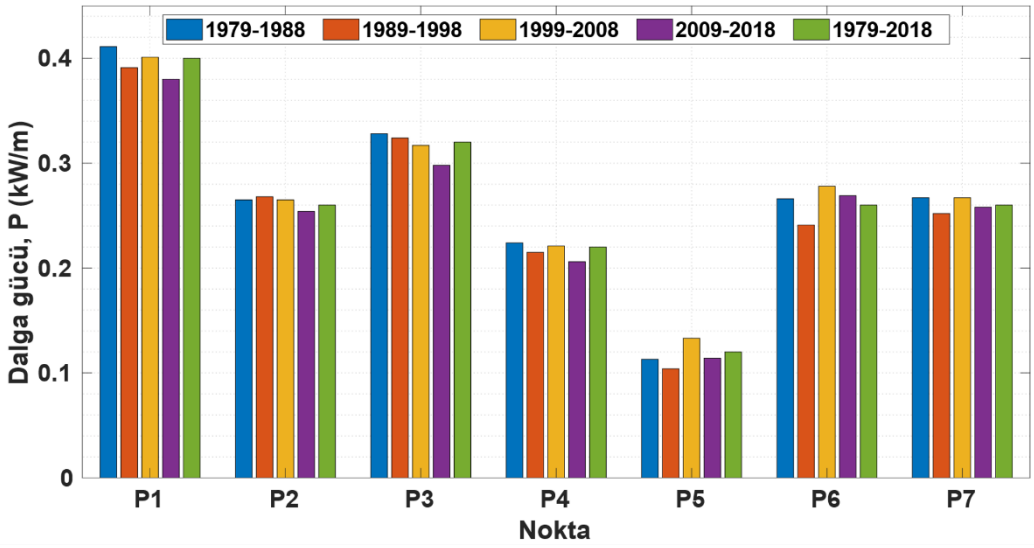
Şekil 4.54 seçilen noktalarda ortalama dalga gücü değerinin mevsimsel olarak değişimini göstermektedir. En yüksek ortalama dalga gücü değerleri 7 nokta için de sırasıyla kış ve sonbahar mevsimlerinde görülmektedir. İlkbahar ve yaz

mevsimlerinde ise kendi içerisinde daha yüksek ve daha düşük değerler görülebilmektedir.



Şekil 4.54 Seçilen noktalarda mevsimsel ortalama dalga gücü değerleri

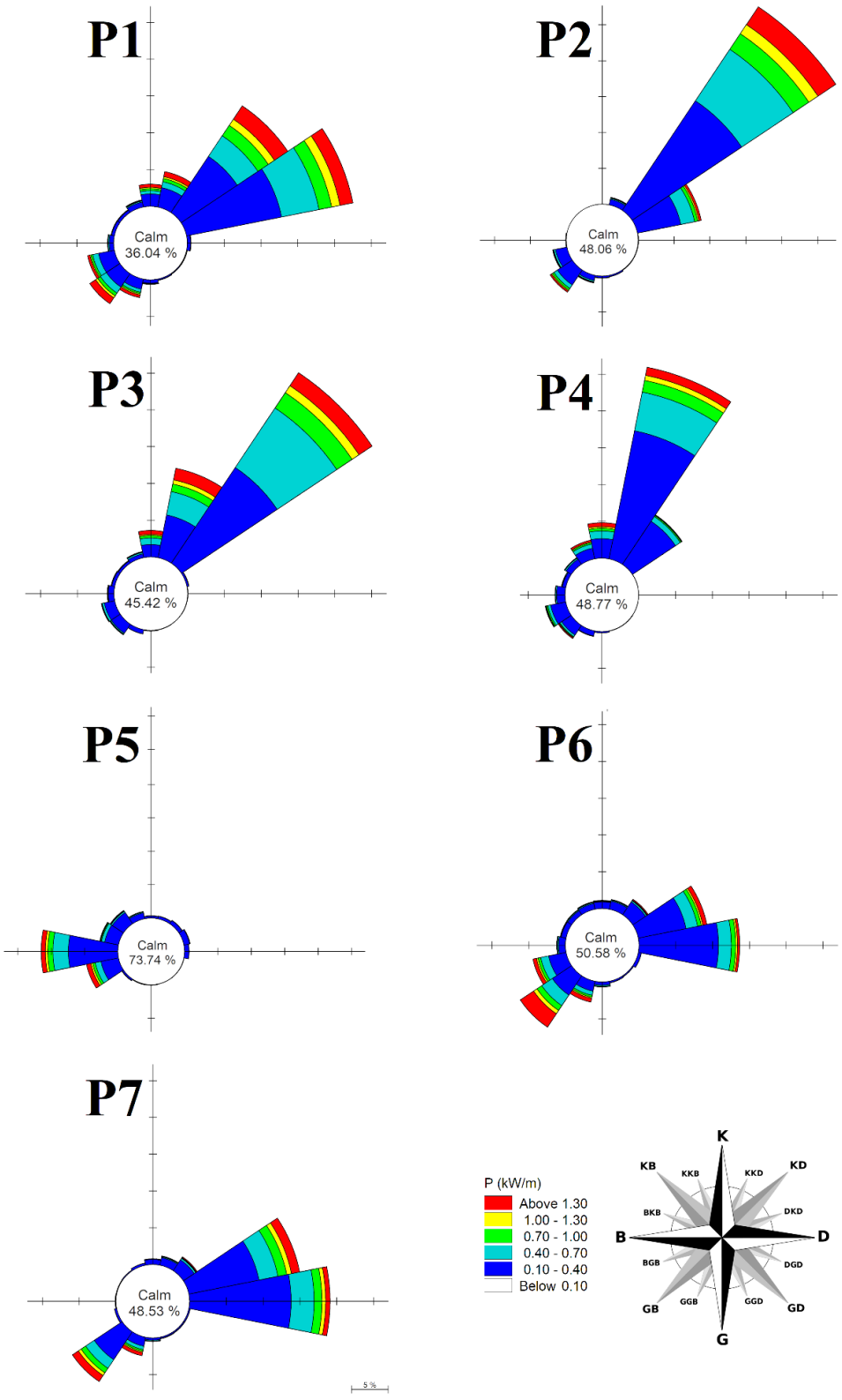
Şekil 4.55 seçilen noktalarda ortalama dalga gücü değerinin 10 yıllık dönemler içerisindeki değişimini göstermektedir. Genel olarak 1979-2018 yılları arasındaki ortalama değere yakın sonuçlar elde edilmekle birlikte en yüksek ortalama dalga gücü değeri 1979-1988 veya 1999-2008 dönemlerinde görülmektedir. Buna karşın en düşük ortalama dalga gücü değeri ise çoğunlukla 2009-2018 yıllarını kapsayan dönemde bulunmaktadır. Bu durum eğilim analizinden elde edilen Marmara Denizi'nde ortalama dalga gücü değerinin genel olarak azalma eğiliminde olması sonucunu desteklemektedir.



Şekil 4.55 Seçilen noktalarda 10 yıllık ve 40 yıllık ortalama dalga gücü değerleri

Şekil 4.56 seçilen noktalarda dalga gücü için dalga güllerini göstermektedir. Dalga gülleri ile dalgaların yön ve büyüklükleri seçilen noktalarda ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Dalga gücü değeri 0.10-1.30 kW/m aralığında 0.30 kW/m'lik gruplara ayrılmıştır. Dalga gücü değerinin 0.10 kW/m altında olması durumunda ise deniz durumu durgun olarak kabul edilmiştir. P1 noktasında meydana gelen dalgaların %36.04'ü, P2 noktasında meydana gelen dalgaların %48.06'sı, P3 noktasında meydana gelen dalgaların %45.42'si, P4 noktasında meydana gelen dalgaların %48.77'si, P5 noktasında meydana gelen dalgaların %73.74'ü, P6 noktasında meydana gelen dalgaların %50.58'i ve P7 noktasında meydana gelen dalgaların %48.53'ü 0.10 kW/m dalga gücü değerinin altındadır. Genel olarak her bir nokta için dalga gücü değeri 0.10-0.40 kW/m aralığında daha fazla sayıda meydana gelmektedir. Dalga gücü değeri arttıkça bu sayı azalmaktadır.

Dalga yönü 16 yön esas alınarak gösterilmiştir. x ve y eksenleri %5'lik dilimlere ayrılmıştır. P2 ve P3 noktasında hâkim dalga yönü kuzeydoğu, P6 ve P7 noktasında hâkim dalga yönü doğu, P1 noktasında hâkim dalga yönü doğu-kuzey-doğu, P4 noktasında hâkim dalga yönü kuzey-kuzey-doğu ve P5 noktasında ise hâkim dalga yönü batıdır. Bu yönler alansal dağılımlarda verilen hâkim dalga yönleri ile benzer sonuçlar vermektedir.



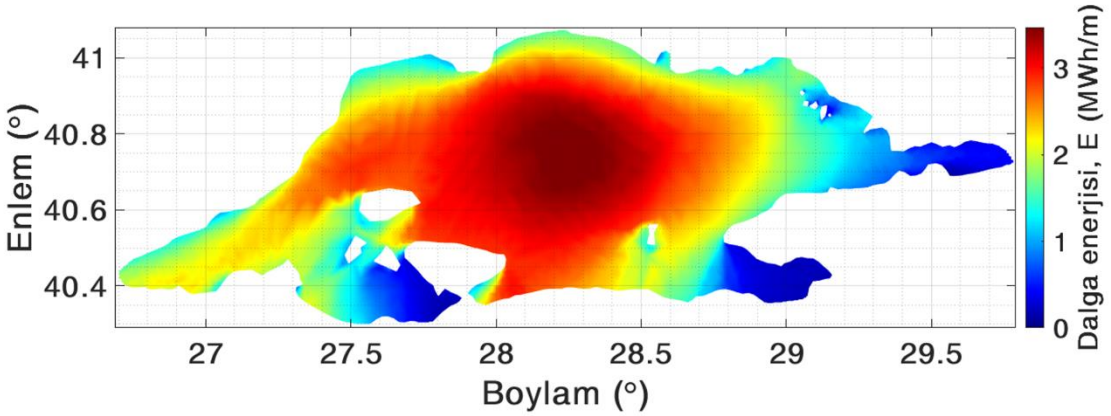
Şekil 4.56 Seçilen noktalarda dalga gücü için dalga gülleri

Bölüm 2'de açıklanan (2.1) eşitliği kullanılarak seçilen noktalardaki ortalama dalga gücü değerlerinden yıllık dalga enerjisi değerleri türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.11 ve Şekil 4.57 ile verilmiştir.

Tablo 4.11 Seçilen noktalardaki ortalama dalga gücü ve yıllık dalga enerjileri

Nokta	Dalga Gücü (kW/m)	Dalga Enerjisi (MWh/m)
P1	0.40	3.47
P2	0.26	2.31
P3	0.32	2.78
P4	0.22	1.90
P5	0.12	1.02
P6	0.26	2.31
P7	0.26	2.29

Marmara Denizi'ndeki bir noktadan 1 yılda elde edilebilecek en yüksek toplam dalga enerjisi değeri uzun dalga enerji periyodu ve daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini temsil eden P1 noktasında 3.47 MWh/m'dir. Bu değer seçilen noktalar üzerinde daha kısa dalga enerji periyodu ve daha düşük belirgin dalga yüksekliğini temsil eden P5 noktasında 1.02 MWh/m ile en düşük değerine ulaşmaktadır. Dalga enerjisi değeri, dalga gücü değerinden zamana bağlı olarak türetildiği için alansal dağılımı dalga gücü ile aynı olmaktadır.



Şekil 4.57 Yıllık dalga enerjisinin alansal dağılımı

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Herhangi bir çalışma alanındaki dalga enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için çalışma alanına ait uzun dönemli belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreleri elde edebilmek için ise doğrudan ölçüm yapmak veya sayısal dalga modeli ile tahmin yapmak gerekmektedir. Marmara Denizi için doğrudan ölçüm kayıtları dalga enerji potansiyelinin belirlenebilmesi amacıyla yeterli düzeyde değildir. Bu sebeple sayısal dalga modeli (MIKE 21 SW) ile tahmin yapılarak çalışma yürütülmüştür. Sayısal dalga modelinde 1979-2018 yılları arasındaki ECMWF kaynaklı ERA-Interim rüzgâr alanı verisi kullanılmıştır. Sayısal dalga modelinin kurulumu için hassasiyet analizi, kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen parametre değerlerinin istatistiksel hata parametreleri ile doğruluğunun ölçülmesi amacıyla 2013-2018 yılları arasındaki mevcut belirgin dalga yüksekliği ölçüm kayıtları kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Aylık bazda yapılan hassasiyet analizi ve kalibrasyon çalışmalarında, istatistiksel hata parametreleri, zaman serileri ve saçılım grafikleri incelenerek sayısal dalga modeli üzerindeki en etkili parametrenin C_{ds} olduğu belirlenmiştir. Ayrıca δ ve Charnock parametresinin de model üzerinde oldukça etkili olduğu; fakat taban sürtünmesi ve kırılma parametrelerinin model üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- Taban sürtünmesi ve kırılma parametreleri için varsayılan değerler (f_w=0.0212, γ=0.8 ve α=1), köpüklenme parametreleri C_{ds}=2.5, δ=0.9 ve Charnock parametresi ise 0.00525 alınarak model yıllık bazda doğrulanmıştır.
- Model alanı ağ sistemi optimizasyonu sonucunda 3372 üçgen elemanlı ve 2141 düğüm noktalı model alanı ağ sistemi oluşturulmuştur.

- Zaman serileri incelendiğinde belirgin dalga yüksekliği değeri düştükçe model ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluğun arttığı görülmektedir.
- Marmara Denizi'nin yarı kapalı bir deniz olması, sığ suların kapladığı alanın fazla olması, kara ve orografik etkenlerin dalgayı sınırlaması gibi etkilerden dolayı dalga modellemesi açık denizde yapılan dalga modellemesine göre daha karmaşık olmaktadır.

İstatistiksel hata parametreleri kullanılarak sayısal dalga modelinin doğruluğu sağlandıktan sonra 1979-2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönem için dalga parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak Marmara Denizi'nin tamamı için alansal dağılımlar üzerinden başta ortalama dalga gücü, maksimum dalga gücü ve 1 yılda elde edilebilecek dalga enerjisi olmak üzere dalga enerji potansiyelinin belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara göre elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 40 yıllık dönemi kapsayan ortalama dalga gücü açık denizde 0.40 kW/m ile en yüksek değeri göstermektedir. Kıyı bölgelerinde ise en yüksek ortalama dalga gücü değerleri sırasıyla güney, kuzey-kuzey-batı ve batı kıyılarında 0.34 kW/m, 0.30 kW/m ve 0.28 kW/m olarak elde edilmektedir.
- Mevsimsel bazda yapılan analizlerde en yüksek ortalama dalga gücü kış mevsimde görülmektedir. Açık denizde bu değer 0.57 kW/m'ye ulaşmaktadır. Sonbahar, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde ise sırasıyla 0.39 kW/m, 0.33 kW/m ve 0.29 kW/m'ye kadar düşmektedir.
- Aylık bazda yapılan analizlerde şubat ayında açık denizde ortalama dalga gücü değeri 0.60 kW/m ile aylık bazda en yüksek değeri göstermektedir. En düşük ortalama dalga gücü ise haziran ayında görülmektedir. Haziran ayında açık denizde ortalama dalga gücü değeri 0.23 kW/m ile aylık bazda en düşük değeri göstermektedir.
- Maksimum dalga gücü değeri İstanbul kıyılarında 34.5 kW/m olarak elde edilmektedir.
- Bir yılda elde edilebilecek en yüksek dalga enerjisi değeri 3.47 MWh/m ile açık denizde meydana gelmektedir.

- Marmara Denizi'nin kuzey-kuzey-batı kıyısı (Tekirdağ, Marmaraereğlisi kıyısı) diğer kıyılara göre WEDI değerinin daha düşük olması ve ortalama dalga gücü değerinin daha yüksek olması sebebiyle dalga enerji potansiyeli yönünden öne çıkmaktadır.

Marmara Denizi dalga ikliminin en doğru şekilde belirlenebilmesi amacıyla uzun dönemli rüzgâr verileri ve dalga parametreleri kullanılmıştır. Belirlenen dalga iklimi yardımıyla çeşitli yükseklik, periyot ve yöne sahip dalgaların hangi dönemde ne sıklıkla meydana geldiği incelenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 40 yıllık dönemi kapsayan ortalama rüzgâr hızı değeri Marmara Denizi'nin güneyinden kuzeyine doğru artış göstermekte ve yaklaşık olarak 3.5 m/s'den 5 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Hâkim rüzgâr yönü ise kuzeydoğudur.
- Mevsimsel bazda en yüksek ortalama rüzgâr hızı kış mevsiminde 5.66 m/s ile, ardından sırasıyla sonbahar, yaz ve ilkbahar mevsimlerinde 5.07 m/s, 4.75 m/s ve 4.61 m/s değerleri ile kuzey bölgesinde meydana gelmektedir.
- 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliği açık denizde 0.40 m ile en yüksek değeri göstermektedir. Marmara Denizi genelinde hâkim dalga yönü kuzeydoğu olmasına karşın kıyıya yakın bölgelerde ve körfez bölgelerinde kıyıya doğru kuzeydoğu yönünden kuzey, kuzeybatı, batı ve doğu yönüne doğru geçişler görülmektedir.
- Mevsimsel bazda yapılan analizlerde en yüksek belirgin dalga yüksekliği kış mevsiminde 0.45 m ile açık denizde görülmektedir. Sonbahar, yaz ve ilkbahar mevsimlerinde ise sırasıyla 0.41 m, 0.38 m ve 0.36 m'ye kadar düşmektedir.
- Aylık bazda yapılan analizlerde şubat ayında açık denizde ortalama belirgin dalga yüksekliği 0.46 m ile aylık bazda en yüksek değeri gösterirken haziran ayında 0.30 m ile en düşük değeri göstermektedir.
- 40 yıllık ortalama dalga enerji periyodu kuzeybatı kıyı şeridi boyunca 2.7-2.9 s arasında değişmekte, Bandırma kıyısında ve Kapıdağ Yarımadası çevresinde de bu değerlere kadar ulaşmakta ve en yüksek değerini göstermektedir.

- Mevsimsel bazda en yüksek ortalama dalga enerji periyodu 2.97 s ile kış mevsiminde görülmektedir. Sonbahar ve yaz mevsimlerinde ise kuzeybatı kıyı şeridinde, Bandırma kıyısında ve Kapıdağ Yarımadası çevresinde 2.95 s değerine kadar çıkarken, bu bölgelerde ilkbahar mevsiminde diğer mevsimlere göre daha düşük değerler görülmektedir.

Çalışma alanı içerisinde belirgin dalga yüksekliği, dalga enerji periyodu ve verilerin değişkenliğine bağlı olarak seçilen noktalar üzerinde olasılık ve istatik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara göre elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu gruplarına karşılık gelen oluşma yüzdesi P1 noktasında 0.25-0.75 m belirgin dalga yüksekliği ve 2.50-3.50 s dalga enerji periyodu aralığında %49.9 ile tüm noktalar içerisinde en yüksek değeri göstermektedir. Bu değer P5 noktasında aynı aralıkta %16'ya kadar düşmekte, diğer noktalarda ise %33-%44.3 aralığında kalmaktadır.
- Belirgin dalga yüksekliği ve dalga enerji periyodu değerlerine karşılık gelen dalga gücü değerinin toplam dalga gücü değeri içerisindeki yüzdesi P1 noktasında 0.50-0.75 m belirgin dalga yüksekliği ve 3.00-3.25 s dalga enerji periyodu aralığında %13 ile P1 noktasındaki en yüksek değeri göstermektedir. Genel olarak her bir nokta için 0.2 kW/m ve 3 kW/m eşdeğer çizgileri arasında yoğunlaşma olmakla birlikte P1 ve P3 noktalarında 3 kW/m ile 10 kW/m eşdeğer çizgileri arasında yüzdesel dalga gücü değeri diğer noktalara göre daha fazla, P5 noktasında daha az yoğunlaşmıştır.
- Seçilen noktalarda meydana gelen dalga gücü değerleri çoğunlukla 0-0.25 kW/m aralığında görülmektedir. Daha yüksek belirgin dalga yüksekliğini ve uzun dalga enerji periyodunu temsil eden P1 noktasında bu aralıkta dalga gücü değerlerinin oluşma olasılığı %57 ile diğer noktalara göre en düşük seviyede iken, daha düşük belirgin dalga yüksekliğini ve daha kısa dalga enerji periyodunu temsil eden P5 noktasında ise bu olasılık %88 ile en yüksek seviyededir. Diğer noktalarda ise bu olasılık %63-%77 aralığında değişmektedir.

- Seçilen noktalardaki aşılma olasılıklarından P1 noktasında %90 aşılma olasılığının 0.0016 kW/m olarak en yüksek dalga gücü değerinde, P5 noktasında ise 0.00006 kW/m olarak en düşük dalga gücü değerinde olduğu görülmektedir. 0.25 kW/m dalga gücü değeri için P1 noktasında aşılma olasılığı %42 iken P5 noktasında ise %12'dir. Bu iki noktaya ait eğriler arasında sınırlandırılmış olan P2, P3, P4, P6 ve P7 noktalarında ise birbirine yakın eğriler elde edilmekte ve 0.25 kW/m dalga gücü değeri için aşılma olasılıkları %23-%38 aralığında kalmaktadır.
- Verilerin değişkenliğinin artan veya azalan bir eğilim içinde olup olmadığını belirlemek amacıyla 1979-2018 yılları arasında doğrusal regresyon yöntemi ile yapılan eğilim analizi sonuçlarına göre ortalama dalga gücü değeri genel olarak azalma eğilimindedir. Diğer noktalara göre değişkenliği yüksek olan P5 ve P6 noktalarında ise ortalama dalga gücü değeri artma eğilimindedir. En yüksek değişim P3 noktasında -0.032 kW/m ve % -9.63 ile meydana gelmektedir.
- Seçilen noktalar için elde edilen mevsimsel dalga gücü değerleri ile en yüksek değerlerin kış ve sonbaharda, en düşük değerlerin ise ilkbahar ve yaz mevsimlerinde meydana geldiği görülmektedir. 10 yıllık dönemler içerisinde en yüksek ortalama dalga gücü 1979-1988 veya 1999-2008 yılları arasında, en düşük ortalama dalga gücü değeri ise çoğunlukla 2009-2018 yılları arasında meydana gelmektedir.
- Dalga gülleri ile P2 ve P3 noktalarındaki hâkim dalga yönünün kuzeydoğu, P6 ve P7 noktalarındaki hâkim dalga yönünün doğu, P1 noktasındaki hâkim dalga yönünün doğu-kuzey-doğu, P4 noktasındaki hâkim dalga yönünün kuzey-kuzey-doğu ve P5 noktasındaki hâkim dalga yönünün batı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara dayanarak ileride yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir:

- ERA-Interim rüzgâr alanı verisi kullanılarak oluşturulan MIKE 21 SW modeli düşük belirgin dalga yüksekliklerini hesaplamada yetersiz kalmaktadır. Marmara Denizi'ndeki belirgin dalga yüksekliği değerlerinin genel olarak düşük olması ve belirgin dalga yüksekliği değeri düştükçe

model ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluğun artması kalibrasyon çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Farklı rüzgâr verisi ve dalga modelleri ile çalışma gerçekleştirerek bu duruma çözüm bulmak gerekmektedir.

- Sayısal dalga modeli ile tahmin edilen parametrelerin doğruluğunun ölçülebilmesi dalga periyodu ölçümlerine de ihtiyaç vardır. Marmara Denizi için dalga periyodu ölçümleri yetersiz kalmakta ve artırılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Abdalla, S., Özhan, E. ve Erkal, S. (1997), “Wind and wave climate of the Sea of Marmara”, 3rd. Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES 97, 3-7 November 1997, Virginia, USA.

Abdollahzadehmoradi, Y. (2018), “Dalga Enerjisi Potansiyelinin Makro ve Mikro Ölçekte Çıkarılması”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Akpınar, A., Kutupoğlu, V., Bingölbali, B. ve Çalışır, E. (2021), “Spatial characteristics of wind and wave parameters over the Sea of Marmara”, Ocean Engineering 222, 108640.

Appendini, C.M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles., P, Lopez. ve J, Mendoza, E.T. (2013), “Wave modelling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalysis assessment”, Applied Ocean Research, 39, 20–30.

Arı, A., Yüksel, Y. ve Çevik E. (2007), “Rüzgar-Dalga İklimi Analizi ve Dalga Modellemesi Üzerine Bir Çalışma”, 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, pp. 107-114. İzmir, Türkiye.

Arı, H.A. (2009), “İstatistiksel Bir Dalga Modeli Kurulumu ve Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Modellenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arı Güner, H.A., Yüksel, Y. ve Özkan Çevik, E. (2013), “Estimation of wave parameters based on nearshore wind–wave correlations”, Ocean Engineering 63, 52-62.

Artüz, M.L. (2007), “Bilimsel Açıdan Marmara Denizi”, Türkiye Barolar Birliği, Ankara.

Aydoğan, B., Ayat, B. ve Yüksel, Y. (2014), “Karadeniz’in Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi”, 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 7-9 Kasım 2014, İstanbul, Türkiye.

CERC (2003), Coastal Engineering Manual, Co. Eng. Res. Center, U.S. Corps of Eng., Vicksburg.

Cornett, A.M. (2008), "A Global Wave Energy Resource Assessment", Sea Technology, 50(4), 59–64.

DHI (2021), MIKE 21 Spectral Waves FM Module User Guide, Danish Hydraulic Institute.

DHI (2021), MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute.

Dunnett, D. ve Wallace, J.S. (2009), “Electricity generation from wave power in Canada”, Renewable Energy, 34, 179-195.

Erkal, S. (1997), “Wind Modelling in the Sea of Marmara”, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.

Gelci, R., Cazalé, H. ve Vassal, J. (1957), “Prévision de la Houle. La Méthode des Densitiés Spectroangularies (Prediction of Waves. The Method of Frequency-Directional Spectral Densities)”, Bull. Infor. Comité Central Oceanogr. d’Etude Côtes, 9: 416-435.

Hagerman, G. (2001), “Southern New England wave energy resource potential”, Proceedings of the Building Energy, Tufts University Boston, MA, USA.

Hasselmann, K. (1962), “On the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum, Part1-General Theory”, Jour. Fluid Mech., 12: 481-500.

Hasselmann, S. ve Hasselmann, K. (1985), “Computations and Parameterization of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Waves Spectrum. Part1: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral”, Jour Phys. Oceanogr., 15: 1369-1377.

Hersbach, H. ve Janssen, P.A.E.M. (1999), “Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model (WAM)”, J. Atmos. And Ocean Tech., 16, 884-892.

Jose, F. ve Stone, G.W. (2006), “Forecast of nearshore wave parameters using MIKE-21 Spectral wave model”, Journal of Physical Oceanography.

Kamphuis, J.W. (2000), Introduction to Coastal Engineering and Management, Adv. Ser. On Ocean Eng., Vol. 16, World Scientific.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. ve Janssen, P.A.E.M. (1994), Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, UK.

Kutupoğlu, V. (2017), “Marmara Denizi’nde CFSR ve ERA Interim Rüzgarları ile Çalıştırılan SWAN Model Performansları ve Model Sonuçlarının Uzun Dönemli Farklılıkları”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Massel, S.R. (1996), Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction, Adv. Ser. On Ocean Eng., Vol. 11, World Scientific.

Miles, J.W. (1957), “On the Generation of Surface Waves by Shear Flows” Jour. Fluid Mech., 3: 417-445185-204.

Moeini, M.H. ve Etemad-Shahidi, A. (2007), “Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie”, College of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, P.O. Box 16765-163, Iran.

Özhan, E., Erkal, S. ve Pişkin, G. (1998), “MARWIND: Marmara Denizi için bir Rüzgar Modeli”, Türkiye Kıyıları 98, 885-894, KAY Yayınları, Ankara.

Özhan, E. ve Abdalla, S. (1999), “Turkish Coast Wind and Deep-Water Wave Atlas”, Applied Project Report. Middle East Technical University, Civil Engineering Department Ocean Engineering Research Center, Ankara, Turkey.

Phillips, O.M. (1957), “On the Generation of Waves by Turbelent Wind” Jour. Fluid Mech., 2: 417-445.

Rusu, E. ve Rusu, L. (2021), “An evaluation of the wave energy resources in the proximity of the wind farms operating in the North Sea”, Energy Reports 7, 19-27.

Saraçoğlu, K.E., Yüksel, Y., Aydoğan, B. ve Ayat Aydoğan, B. (2014), “Marmara Denizi Dalga Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi”, 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, pp. 825-839. İstanbul, Türkiye.

SWAMP Group (1985), Ocean Wave Modeling, Plenum Press, New York.

Vannucchi, V. ve Cappietti, L. (2013), “Wave Energy Estimation in Four Italian Nearshore Areas”, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9-14, 2013, Nantes, France.

Vislmeier, R. ve Hänel, D. (1995), “Adaptive Solutions for Unsteady Laminar Flows on Unstructured Grids”, Int. J. Numer. Meth. Fluids., Vol. 22, 85-101.

Wamdi (1988), “The WAM Model: A Third Generation Ocean Wave Prediction Model”, J. Phys. Ocenog., Vol 18, 1775-1810.

Yüksel, Y. ve Çevik E. (2009), “Kıyı Mühendisliği”, Deniz Mühendisliği Serisi, No 1, Beta, İstanbul.

Yüksel, Y., Çevik E., Aydoğan, B., Arı, A., Saraçoğlu, K.E., Alpli, R. ve Bekar, B. (2011), “Türkiye Denizleri Dalga İklim Modeli ve Uzun Dönem Dalga İklim Analizi”, 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, pp. 411-420. Trabzon, Türkiye.

Yuksel, Y., Yuksel, Z.T., Islek, F., Sahin, C. ve Ari Guner, H.A. (2021), “Spatiotemporal long-term trends of wind and wave climate and extreme characteristics over the Sea of Marmara”, Ocean Engineering 228, 108946.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Ulusan, M.E., Arı Güner, H.A. ve Yüksel, Y. (2021), “Determination of the Wave Energy Potential of Marmara Sea”, 11th International 100% Renewable Energy Conference, 20-23 May 2021, pp. 31-39, Istanbul, Turkey.