T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN KIYI MORFOLOJİSİNE ETKİSİNİN MODELLENMESİ

Büşra BAŞARAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Havva Anıl GÜNER

Temmuz, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN KIYI MORFOLOJİSİNE ETKİSİNİN MODELLENMESİ

Büşra BAŞARAN tarafından hazırlanan tez çalışması 21.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendsliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Havva Anıl GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Havva Anıl GÜNER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

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

Prof. Dr. Serdar BEJİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Esin ÇEVİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kubilay CİHAN, Üye
Kırıkkale Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER sorumluluğunda, tarafımca hazırlanan Küresel İklim Değişikliğinin Kıyı Morfolojisine Etkisinin Modellenmesi 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.

Büşra BAŞARAN

Canım anneme

ve

canım babama

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim ve tez çalışmam süresince her türlü bilgi ve tecrübesi ile desteğini benden esirgemeyen, öneri ve bilgisine her zaman ihtiyaç duyacağım tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER'e vermiş olduğu emekler için sonsuz şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Doktora tezimin olgunlaşmasına katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e ve Sayın Prof. Dr. Serdar BEJİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Saha çalışmalarını 117Y333 nolu proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve verdiği destek ile her zaman yanımda olduğunu hissettiren müdürüm Sayın Hülya KARAKUŞ CİHAN'a ve kendisinin öncülüğünde Deniz ve Kıyı Yapıları Grubu başta olmak üzere tüm YÜKSEL PROJE ailesine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca manevi desteğinin yanı sıra tecrübe ve bilgi birikimini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Kubilay CİHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman tüm sorularıma samimiyetle cevap veren, manevi desteğinin yanı sıra bilgi birikimini de benimle paylaşmaktan çekinmeyen çalışma arkadaşım Sayın Engin Bilyay'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım hazırlığı ve tez kapsamında yayınlanan makale çalışmaları esnasında kendisine ne zaman ihtiyaç duysam her defasında zaman ayırıp, bana faydalı olabilmek için elinden geleni yapan mesai arkadaşım Sayın Cumali MEYDANCI'ya şükranlarımı sunarım.

Tez süresince aramızda kilometreler de olsa her daim yanımda olan, sevgi ve desteklerini her zaman bana hissettiren canım annem ve canım babam başta olmak üzere tüm aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Tüm hayatım boyunca bana verdiğiniz emek ve sevgi için size minnettarım.

Büşra BAŞARAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xvi
ÖZET xviii
ABSTRACT xx
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.1.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı İle İlgili Literaür Özeti 1
1.1.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı İle İlgili Literaür Özeti 4
1.1.3 XBeach İle İlgili Çalışmalar 10
1.2 Problemin Tanımı 16
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı 17
1.3 Hipotez 19
2 KATI MADDE TAŞINIM MEKANİZMALARI, KIYI MORFOLOJİSİ VE MODELLENMESİ 21
2.1 Giriş 21
2.2 Katı Madde Taşınım Mekanizmaları 22
2.2.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı 23
2.2.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı 25
2.3 Kıyı Morfolojisi ve Modellenmesi 28
2.3.1 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı 28
2.3.2 Küresel İklim Değişikliği ve Kıyı Morfolojisi 28
2.3.3 Katı Madde Taşınımındaki Morfolojik Süreçler 33
2.3.4 Kıyı Morfolojsinin Modellenmesi 37
3 KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIM DEĞİŞİMLERİNİN ANALİZİ 46
3.1 Giriş 46

3.2 Çalışma Alanı 47
3.2.1 Karasu Kıyı Bölgesi 47
3.2.2 Karadeniz 48
3.3 Uzun Dönemli Dalga İklimi Değişiminin Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 49
3.3.1 Çalışma Verileri 49
3.3.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı 59
3.3.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Sonuçları ve Değerlendirmeleri .. 72
3.4 Gelecekteki Olası İklim Değişikliklerinin Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 94
4 KIYI PROFİLİ DEĞİŞİMİNİN MODELLENMESİ 120
4.1 Giriş 120
4.2 Kıyı Profili Saha Ölçümlerinin Değerlendirilmesi 121
4.3 Hidrodinamik Veriler 125
4.3.1 Ölçüm Dönemi 125
4.3.2 Dalga İklimi Projeksiyonları 127
4.4 Kıyı Profili Değişiminin XBeach İle Modellenmesi 128
4.4.1 Model Kalibrasyonu 128
4.4.2 Model Kalibrasyon Sonuçları 140
4.5 Gelecekteki Olası İklim Değişikliklerinin Kıyı Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi 147
4.5.1 Dalga Yüksekliğinin Etkisi 149
4.5.2 Dalga Periyodu Etkisi 154
4.5.3 Dalga Doğrultusunun Etkisi 157
4.5.4 Deniz Seviyesi Yükselmesinin Etkisi 162
4.5.5 Tüm Parametrelerin Birlikte Etkisi 167

4.6 Kıyı Profili Gelişiminde İklim Değişikliği Etkilerinin Hassasiyet Analizi 176

4.6.1 Dalga Yüksekliği İçin Hassasiyet Analizleri 186

4.6.2 Dalga Periyodu İçin Hassasiyet Analizleri 188

4.6.3 Dalga Doğrultusu İçin Hassasiyet Analizleri 191

4.6.4 Deniz Seviyesi İçin Hassasiyet Analizleri 193

5 SONUÇ VE ÖNERİLER **197**

KAYNAKÇA **206**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **222**

SİMGE LİSTESİ

A	Dalga hareketi yoğunluğu
A_{sb}	Sürüntü malzemesi katsayısı
A_{ss}	Askıda katı madde katsayısı
B	Basamak yüksekliği
C	Dalga yayılma hızı
C_g	Dalga grup hızı
c_f	Sürtünme katsayısı
D	Difüzyon katsayısı
D_{50}	Ortalama tane çapı
D_{maks}	Maksimum tırmanma seviyesi
D_{min}	Minimum tırmanma seviyesi
d_{10}	Katı madde tanelerinin % 10'unun geçtiği çap
d_{16}	Katı madde tanelerinin % 16'sının geçtiği çap
d_{50}	Katı madde tanelerinin % 50'sinin geçtiği çap
d_{84}	Katı madde tanelerinin % 84'ünün geçtiği çap
d_{90}	Katı madde tanelerinin % 90'ının geçtiği çap
E	Spektrum (enerji) yoğunluğu
F	Enerji akısı
$f_{eğim}$	Eğim düzeltme katsayısı
f_{mor}	Morfolojik hız faktörü
h	Kapama derinliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
H_b	Kırılan dalga yüksekliği
k_v	Sahaya özgü parametre
L	Profil uzunluğu
m_b	Kırılma bölgesinin taban eğimi

p	Porozite
Q	Debi
R	Kıyı çizgisi geri çekilmesi
R_{maks}	Birincil kumul tepe yüksekliği
R_{min}	Birincil kumul taban yüksekliği
S	Deniz seviyesi yükselmesine bağlı düşey yükseklik
T_p	Pik dalga periyodu
U_{10}	Rüzgar Hızı
u	Hücre merkezindeki yatay hız
v	Hücre merkezindeki düşey hız
V	Surf bölgesindeki kıyı boyu akıntı hızı
w_s	Katı madde tane çökelme hızı
z_s	Su seviyesi
z_b	Taban seviyesi
α_0	Ortalama dalga geliş açısı
α_{bs}	Efektif dalga kırılma açısı
ε	Katı madde taşınım katsayısı
σ_g	Katı madde geometrik standart sapması
ϕ	Wenthworth ölçeği
$\overline{V}$	Surf bölgesi üzerinde ortalama kıyı boyu akıntı hızı,
λ	Düzeltme katsayısı
γ	Kırılma indeksi
θ	Dalga yönü

KISALTMA LİSTESİ

ADCP	AquaDopp Current Profiler
BKB	Batı Kuzey Batı
CERC	Coastal Engineering Research Center
DGD	Doğu Güney Doğu
DHI	Danish Hydraulic Institute
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
G	Güney
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
JONSWAP	Joint North Sea Wave Projects
KB	Kuzey Batı
KD	Kuzey Doğu
KKD	Kuzey Kuzey Doğu
LITDRIFT	LITtoral Dritf
LITLINE	LITtoral Process and Coastline Kinetics
LITSTP	LITtoral Sediment Transport
RMSE	Root Mean Square Erros (Ortalama Karakök Hatası)
SLR	Sea Level Rise (Deniz Seviyesi Yükselmesi)
XBEACH	eXreme Beach
1-D	Bir boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Katı madde işlemlerinin zamansal ve alansal ölçeklere göre sınıflandırılması (Larson vd., 2002) 21

Şekil 2.2 Kıyı bölgesi tanımları (CERC, 2002).....23

Şekil 2.3 Fırtına (kış) profili (Friend of Island State Beach Park, Science of the Shore, 2022).....27

Şekil 2.4 Normal (yaz) profil (Friend of Island State Beach Park, Science of the Shore, 2022).....27

Şekil 2.5 180 milyon yıl önceki ve günümüzdeki karaların dağılışı (Öztürk, 2002) 30

Şekil 2.6 Bruun Kuralı'na göre kıyı geri çekilmesi (Bruun, 1962).....32

Şekil 2.7 Fırtına etkisinde katı madde taşınım rejimleri (CERC, 2003) 34

Şekil 2.8 Fırtına etkisi ölçek sisteminde Sallenger terminolojisi (Sallenger, 2000).35

Şekil 2.9 Fırtına etkisi ölçek sisteminde çalkantı rejimi (Sallenger, 2000) 35

Şekil 2.10 Fırtına etkisi ölçek sisteminde çarpışma rejimi (Sallenger, 2000).....36

Şekil 2.11 Fırtına etkisi ölçek sisteminde su ile kaplanma (yıkanma) rejimi (Sallenger, 2000).....36

Şekil 2.12 Fırtına etkisi ölçek sisteminde su baskını rejimi (Sallenger, 2000) 37

Şekil 2.13 XBeach koordinat sistemi (Roelvink vd., 2009).....39

Şekil 2.14 XBeach kademeli ağ sistemi (Roelvink vd., 2009) 40

Şekil 3.1 Çalışma alanı: Karasu kıyı bölgesi 48

Şekil 3.2 Karadeniz bölgesinde 1979-2018 yılları arasındaki ortalama rüzgar hızı ve rüzgar yönü. Siyah nokta çalışma bölgesini göstermektedir (İşlek vd., 2020b) 50

Şekil 3.3 Karaburun için hesaplanan ve ölçülen dalga parametrelerinin zaman serisi; (a) Belirgin dalga yüksekliği; (b) Ortalama dalga periyodu; (c) Ortalama dalga yönü 54

Şekil 3.4 Karadeniz bölgesinde 1979-2018 yılları arasındaki belirgin dalga yüksekliğinin 40 yıllık ortalaması. Siyah nokta, çalışma alanının konumunu göstermektedir (Başaran ve Güner, 2021) 55

Şekil 3.5 1979-2018 yılları arasındaki dalga parametrelerine göre Karasu Bölgesi'ne ait rüzgar ve dalga gülleri; (a) toplam dalga gülü, (b) rüzgar gülü, (c) soluğan dalga gülü, (d) rüzgar dalgası gülü (Başaran ve Güner, 2021) 57

Şekil 3.6 Karasu kıyısına ait anlık akıntı yapısı (Yüksel vd., 2014).....58

Şekil 3.7 K ve dalga yüksekliği, tane çapı ilişkisi (Fredsoe ve Deigard, 1992) 64

Şekil 3.8 2013 (30/07/2013) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü 70

Şekil 3.9 2014 (31/08/2014) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü 70

Şekil 3.10 2015 (09/07/2015) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü 70

Şekil 3.11 PLEIADES uydu görüntülerinden elde edilen 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait kıyı çizgileri 71

Şekil 3.12 Çalışma alanındaki toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliğinin aylık değişimi, (b) Pik dalga periyodunun aylık değişimi, (c) Ortalama dalga açısının aylık değişimi 73

Şekil 3.13 Soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri; (a) net, (b) brüt.....75

Şekil 3.14 Net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesabında kullanılan dört farklı yöntemin karşılaştırılması 78

Şekil 3.15 Net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının 40 yıllık değişim eğilimleri.....80

Şekil 3.16 Dalga parametrelerinin yıllık değişimleri.....82

Şekil 3.17 Brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı yıllık değişimi.....85

Şekil 3.18 Ortalama değerden sapmalar (a) H_s, (b) T_p, (c) α_b ve (d,e,f,g) toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 87

Şekil 3.18 Ortalama değerden sapmalar (a) H_s, (b) T_p, (c) α_b ve (d,e,f,g) toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (Devamı).....88

Şekil 3.19 Yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (a: Kamphuis (1991), b: Kaczmarek vd. (2005), c: Bayram vd. (2007), d: LITDRIFT) 90

Şekil 3.20 Yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (a: Kamphuis (1991), b: Kaczmarek vd. (2005), c: Bayram vd. (2007), d: LITDRIFT) 91

Şekil 3.21 RCP4.5'a göre toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Pik dalga periyodu (c) Ortalama dalga açısı 96

Şekil 3.22 RCP8.5'a göre toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Pik dalga periyodu (c) Ortalama dalga açısı 97

Şekil 3.23 RCP4.5 senaryosuna göre dalga parametrelerinin yıllık değişimleri 99

Şekil 3.24 RCP8.5 senaryosuna göre dalga parametrelerinin yıllık değişimleri 100

Şekil 3.25 RCP 4.5 senaryosuna göre soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri 104

Şekil 3.26 RCP 8.5 senaryosuna göre soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri 105

Şekil 3.27 RCP 4.5 senaryosuna göre dört farklı yöntem ile elde edilen net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri.....107

Şekil 3.28 RCP 8.5 senaryosuna göre dört farklı yöntem ile elde edilen net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri.....108

Şekil 3.29 RCP 4.5 senaryosuna toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri 110

Şekil 3.30 RCP 8.5 senaryosuna göre toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri 111

Şekil 3.31 RCP 4.5 dalga iklimi parametrelerinin yakın ve orta geleceğe göre yıllık değişimler 113

Şekil 3.32 RCP 8.5 dalga iklimi parametrelerinin yakın ve orta geleceğe göre yıllık değişimler 115

Şekil 3.33 RCP 4.5 Dalga iklimine dayanan yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT).....116

Şekil 3.34 RCP 4.5 Dalga iklimine dayanan yıllık toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT).....117

Şekil 3.35 RCP 8.5 Dalga iklimine dayanan yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT).....118

Şekil 3.36 RCP 8.5 Dalga iklimine dayanan yıllık toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT).....119

Şekil 4.1 Karasu sahilinin konumu ve çalışmada kullanılan profil hatları P1 ve P2 121

Şekil 4.2 P1 ve P2 hatlarına ait fırtına öncesi ve fırtına sonrası profil ölçümleri...123

Şekil 4.3 P1 ve P2 profillerine ait fırtına sonrası kıyı çizgisi geri çekilmeleri 124

Şekil 4.4 Belirgin dalga yüksekliğinin (H_s) saatlik zaman serisi (a); pik dalga periyodunun (T_p) zaman serisi (b); pik dalga periyodu ile ilişkili ortalama dalga doğrultusunun (θ) zaman serisi (c) (İşlek vd., 2020b) 126

Şekil 4.5 XBeach kalibrasyon parametrelerinin varsayılan değerlerdeki BSS sonuçları 139

Şekil 4.6 Kalibrasyon çalışmalarının optimum ve varsayılan değerlere göre sonuçları a) P1 profili için, b) P2 profili için.....139

Şekil 4.6 Kalibrasyon çalışmalarının optimum ve varsayılan değerlere göre sonuçları a) P1 profili için, b) P2 profili için (Devamı).....140

Şekil 4.7 P1 ve P2 profillerine ait XBeach model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması a) P1 profili b) P2 profili için.....141

Şekil 4.7 P1 ve P2 profillerine ait XBeach model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması a) P1 profili b) P2 profili için (Devamı) 142

Şekil 4.8 Bölgelere ayrılmış P1 ve P2 profilleri.....143

Şekil 4.9 Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında gerçekleştirilen ölçüm ve XBeach modeli profilleri (kalın sürekli çizgiler: fırtına sonrası ölçüm profilleri;

kalın kesikli çizgiler: XBeach modeli profilleri; ince sürekli çzgiler: fırtına öncesi ölçüm profilleri) 147

Şekil 4.10 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde dalga yüksekliği etkisi.....151

Şekil 4.11 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga yüksekliği etkisi.....153

Şekil 4.12 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosuna göre P1 morfolojisi üzerinde dalga periyodu etkisi 155

Şekil 4.13 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga periyodu etkisi 157

Şekil 4.14 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde dalga doğrultusunun etkisi 159

Şekil 4.15 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga doğrultusunun etkisi 161

Şekil 4.16 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesinin etkisi 164

Şekil 4.17 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesinin etkisi 166

Şekil 4.18 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde tüm parametrelerin birlikte etkisi 169

Şekil 4.19 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde tüm parametrelerin birlikte etkisi 171

Şekil 4.20 P1 profilinde RCP4.5 ve RCP8.5 etkisi.....174

Şekil 4.21 P2 profilinde RCP4.5 ve RCP8.5 etkisi.....175

Şekil 4.22 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık ortalama fırtına belirgin dalga yüksekliği değişimleri.....179

Şekil 4.23 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık ortalama fırtına pik dalga periyodu değişimleri 179

Şekil 4.24 Karasu Bölgesi (2021-2100) dönemi için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası yüksekliklerinin eğilimleri 183

Şekil 4.25 Karasu Bölgesi (2021-2100) dönemi için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası pik periyotlarının eğilimleri.....183

Şekil 4.26 Karasu Bölgesi yakın ve orta gelecek için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası yüksekliklerinin eğilimleri 184

Şekil 4.27 Karasu Bölgesi yakın ve orta gelecek için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası pik periyotlarının eğilimleri.....184

Şekil 4.28 P1 profili üzerinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizi sonuçları..187

Şekil 4.29 P1 profilinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizine ait erozyon ve yığılma miktarları 188

Şekil 4.30 P1 profili üzerinde pik dalga periyodu için hassasiyet analizi sonuçları 190

Şekil 4.31 P1 profilinde dalga periyoduna ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları 191

Şekil 4.32 P1 profili üzerinde dalga geliş açısı için hassasiyet analizi sonuçları ...192

Şekil 4.33 P1 profilinde dalga geliş açısına ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları 193

Şekil 4.34 P1 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesi etkisi 194

Şekil 4.35 P1 profili deniz seviyesi hassasiyet analizi erozyon ve yığılma miktarları 195

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin genel sınıflandırılması (Yüksel, 2005) 24

Tablo 2.2 Küresel iklim değişikliğinin potansiyel etkileri (Kayhan, 2007) 30

Tablo 3.1 Ölçüm istasyonlarının karakteristikleri (İşlek vd., 2021) 53

Tablo 3.2 Çalışma bölgesindeki katı madde özellikleri.....59

Tablo 3.3 Dört farklı yönteme göre kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 76

Tablo 3.4 Dalga parametrelerinin eğilim sonuçları (Şekil 3.15) 81

Tablo 3.5 Dört farklı yönteme göre elde edilen net ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki değişim 89

Tablo 3.6 Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te gösterilen eğilim sonuçları 101

Tablo 3.7 Dört farklı yönteme göre elde edilen net ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarları.....106

Tablo 4.1 Profil hacim değişimleri ve eğim değerleri 125

Tablo 4.2 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine ait dalga parametreleri (Şahin vd., 2021) 127

Tablo 4.3 IPCC 5. Değerlendirme Raporu'na göre gelecekte olması beklenen deniz seviyesi değerleri (IPCC, 2000) 127

Tablo 4.4 BSS (Brier Başarı Puanı) sınıflandırması (Sutherland, 2004) 130

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve istatistiksel hata değerleri 131

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve hata değerleri (Devamı) 132

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve hata değerleri (Devamı) 133

Tablo 4.6 Model kalibrasyonunda dikkate alınan XBeach parametreleri (Kalın yazılanlar varsayılan değerler, italik yazılanlar kalibrasyon değerleri) 137

Tablo 4.7 P1 ve P2 XBeach kalibrasyon model sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi 144

Tablo 4.8 Farklı iklim senaryolarına göre dalga parametreleri değişim miktarları (Şahin vd., 2021; IPCC, 2000) 148

Tablo 4.9 İklim senaryolarına göre dalga yüksekliğinin P1 profili morfoloji değişimi değerleri 150

Tablo 4.10 İklim senaryolarına göre dalga yüksekliğinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri 152

Tablo 4.11 İklim senaryolarına göre dalga periyodunun P1 profili morfoloji değişimi değerleri 154

Tablo 4.12 İklim senaryolarına göre dalga periyodunun P2 profili morfoloji değişimi değerleri 156

Tablo 4.13 İklim senaryolarına göre dalga doğrultusunun P1 profili morfoloji değişimi değerleri 158

Tablo 4.14 İklim senaryolarına göre dalga doğrultusunun P2 profili morfoloji değişimi değerleri 160

Tablo 4.15 İklim senaryolarına göre deniz seviyesi yükselmesinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri 163

Tablo 4.16 İklim senaryolarına göre deniz seviyesi yükselmesinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri 165

Tablo 4.17 İklim senaryolarına göre tüm parametrelerin etkisinde P1 profili morfoloji değişimi değerleri 168

Tablo 4.18 İklim senaryolarına göre tüm parametrelerin etkisinde P2 profili morfoloji değişimi değerleri 170

Tablo 4.19 P1 profilinin iklim senaryolarına göre morfoloji değişimi değerleri....172

Tablo 4.20 P2 profilinin iklim senaryolarına göre morfoloji değişimi değerleri....172

Tablo 4.21 Literatür araştırmalarına göre fırtına eşik değerleri.....177

Tablo 4.22 Beaufort (Bofor) skalasına göre önemli fırtına kategorileri (MGM, 2022) 177

Tablo 4.23 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık fırtına karakteristikleri.....178

Tablo 4.24 Karasu Bölgesi RCP4.5 (2021-2100) yıllık fırtına karakteristikleri 180

Tablo 4.25 Karasu Bölgesi RCP8.5 (2021-2100) yıllık fırtına karakteristikleri 181

Tablo 4.26 Hassasiyet analizinde incelenen iklim değişimi senaryoları.....185

Tablo 4.27 P1 profilinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizine ait erozyon ve yığılma miktarları 188

Tablo 4.28 P1 profilinde dalga periyoduna ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları 191

Tablo 4.29 P1 profilinde dalga geliş açısına ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları 192

Tablo 4.30 P1 profili deniz seviyesi hassasiyet analizi erozyon ve yığılma miktarları 195

ÖZET

Küresel İklim Değişikliğinin Kıyı Morfolojisine Etkisinin Modellenmesi

Büşra BAŞARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER

Bu tez çalışmasında küresel iklim değişikliğine bağlı olarak dalga ikliminde (H_s, belirgin dalga yüksekliği, T_p, pik dalga periyodu, α_0, dalga geliş açısı) ve deniz seviyesinde meydana gelen değişiklikler sonucunda kıyı sistemlerinde alansal ve zamansal ölçeklerde oluşan belirgin farklılıklara odaklanılmakta ve kıyı boyu ile kıyıya dik katı madde taşınım süreçlerini bu etkiler altında inceleyerek Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Karasu kıyısı için gelecek çalışmalara ışık tutmak amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda ilk etapta Karasu kıyısında hakim olan kıyı boyu katı madde taşınımı, ardından ise bölgedeki kıyıya dik katı madde taşınımı süreçleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kıyı boyu katı madde taşınımları ile morfoloji değişimlerinin incelenmesi için öncelikle geçmiş dönem (son 40 yıl) dalga verilerinin kullanılmasıyla kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmalarının mevsimsel ve yıllar arasındaki değişimleri elde edilmiştir. Ardından bu

değişimlerden yararlanarak RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerinde karşılaşılması öngörülen taşınım ve kıyı morfolojisi değişim süreçleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar gerçekleştirilirken Kamphuis (1991), Kaczmarek (2005) ve Bayram (2007) ampirik yöntemleri ile sayısal model olan Litpack yazılımı kullanılmıştır. Bununla birlikte bölgede iki farklı konumda fırtına öncesi ve fırtına sonrası zamanlarda alınan profil ölçümlerinden faydalanarak bölgedeki mevcut kıyıya dik katı madde taşınımı ve kıyıya dik profil değişimleri tespit edilmiştir. Ardından mevcut veriler ışığında RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre kıyıya dik katı madde taşınımları ve değişimleri tespit edilerek Karasu kıyısındaki profil davranışları değerlendirilmiştir. Bu aşamada kıyıya dik profil davranışlarının gelişimlerini modellemek amacıyla XBeach sayısal modeli kullanılmıştır. Bu çalışmaların yanı sıra kıyıya dik profil davranışları üzerinde hangi dalga parametresinin daha etkili olduğunu tespit edebilmek amacı ile hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde Karasu kıyısında azımsanmayacak büyüklükte kıyı boyu katı madde taşınımı olduğu tespt edilmiştir. Bununla birlikte yakın gelecekte hem RCP4.5 hem de RCP8.5 iklim senaryolarına göre kıyı boyu katı madde taşınımında artış tespit edilirken, orta gelecekte RCP4.5 senaryosunda azalma, RCP8.5 senaryosunda ise artış görülmüştür. Ayrıca RCP8.5 iklim senaryosuna göre meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımlarının RCP4.5 senaryosuna göre meydana gelecek taşınımda daha büyük olduğu görülmüştür. Kıyıya dik katı madde taşınım çalışmaları sonucunda morfoloji üzerinde en etkili dalga parametrelerinin dalga periyodu ve dalga geliş açısı olmasının yanı sıra deniz seviyesinde meydana gelen yükselmelerin de morfoloji üzerinde ciddi değişikliklere sebep olduğu sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı boyu katı madde taşınımı, kıyıya dik katı madde taşınımı, XBeach, morfoloji değişimi, Karasu kıyısı

ABSTRACT

Modeling the Effect of Global Climate Change on Coastal Morphology

Büşra BAŞARAN

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER

In this study, it is focused on the significant differences that occur in the coastal systems in spatial and temporal scales as a result of the changes in wave climate (H_s, significant wave height, T_p, peak wave period, α_0, wave angle) and sea level rise due to global climate change. It is aimed to shed light on future studies for the Black Sea coasts in the Western Black Sea Region by examining the longshore and cross-shore transport processes under these effects.

Accordingly, in the first place, it was tried to determine the longshore sediment transport and cross-shore sediment transport in the region. In order to examine the longshore sediment transport and morphology changes, all the seasonal and inter-annual changes of the longshore sediment transport rates were obtained by using hystorical wave data (last 40 years). Subsequently, it has been tried to estimate the longshore sediment transport rates and coastal morphology change processes that are expected to be encountered in the near (2021-2060) and mid-future (2061-2100) periods according to the RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios. While carrying out these studies, the empirical methods of Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005) and Bayram vd. (2007) and the numerical model LITPACK software were used. In addition, by using the pre and post-storm profile

measured at two different locations in the region, the current cross-shore sediment transport and cross-shore profile changes were determined. Subsequently, in the light of the available data, according to the RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, the cross-shore sediment transports and changes were determined and the profile response on the Karasu coast were evaluated. During these studies, the XBeach numerical model, which is used in modeling the development of cross-shore profile response, was used. Additionally, sensitivity analyzes were carried out in order to determine which wave parameter is more effective on the cross-shore profile evolution.

When the results were examined, it was observed that there is a substantial longshore transport along the Black Sea coasts. While an increase was detected in longshore sediment transport rates in the near future according to the both RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, a decrease was observed in the RCP4.5 scenario and an increase was observed in the RCP8.5 scenario in the mid-future. Additionally, it has been observed that the longshore sediment transports that occur according to the RCP8.5 climate scenario are bigger than the transport that occur according to the RCP4.5 scenario. It has been determined as a result of studies that the wave period and wave angle are the most influential wave climate parameters on morphology, and sea level rise also causes serious changes on morphology.

Keywords: Longshore transport, cross-shore transport, XBeach, morphology changes, Karasu coasts

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı İle İlgili Literaür Özeti

Literatür çalışmaları incelendiğinde, kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasının açıklamalarını, taşınım miktarlarını hesaplamak için deneysel modellerle farklı ampirik yöntemlerin sunumlarını ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık ve yıllar arasındaki değişimlerinin incelemelerini içeren farklı çalışmaların olduğu görülmüştür (Shanas and Sanil Kumar, 2014; Smith vd., 2009; Bertin vd., 2008; Kaczmarek, 2005; Pruszak ve Zeidler, 1994; Kamphuis, 1991; Komar ve Inman, 1970). Bu çalışmalardan bazılarında kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasında aktif rol oynayan kırılan dalga parametrelerinin nasıl ve hangi yöntemlerle belirlendiği anlatılmıştır (Larson, 2009). Bununla birlikte, sırasıyla George ve Sanil Kumar (2019), Chowdury ve Behara (2017), Almar vd. (2015), Splinter ve Adams (2012) çalışmalarında dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga açısı gibi dalga iklimi parametrelerinde meydana gelen uzun dönemli değişimlerin kıyı boyu katı madde taşınımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Literatür araştırmaları sırasında yakın kıyı dalga iklimlerinin SWAN, WAVE WATCH III gibi dalga simülasyon (benzeşim) modelleri kullanılarak elde edildiği ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının deneysel yöntemlerle dalga verilerinden belirlenirken sonuçların saha ölçümleri, sayısal verilerle veya fiziksel modeller ile doğrulanmaya çalışıldığı farklı çalışmalar da gözlemlenmiştir (George ve Sanil Kumar, 2019; Dastgheib, 2016; Gowthaman vd., 2015; Casas-Prat ve Sierra, 2012; Abadie vd., 2006). Literatür çalışmalarında sadece kumlu sahillerde değil, çakıllı-kumlu ve çakıllı sahillerde de kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasına ilişkin araştırmalar da bulunmaktadır (Tomasicchio vd., 2015; van Rijn, 2014; Tomasicchio vd., 2013). Araştırmalara göre, ± % 10 hata payı ile

gerçeğe yakın uzun dönemli ortalama net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde edebilmek için, kıyı boyu taşınım miktarına ait ölçümlerin 5-8 yıl boyunca sürekli olarak yapılması gerektiği vurgulanmaktadır (Schoonees, 2000). Bölgesel iklim modelleri, kıyı boyu katı madde taşınım (LST) miktarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasının üzerindeki etkileri ile taşınım dinamiklerini anlamak için bölgesel iklim modellerine ihtiyaç duyulmaktadır çünkü kıyı alanlarının hassasiyeti yalnızca deniz seviyesi yükselmesinden (SLR) kaynaklanmamakta olup aynı zamanda dalga iklimi parametrelerindeki değişimlerden de etkilenmektedir (Almar vd., 2015). Dalga yüksekliğinde meydana gelen küçük bir farklılık (% 8-9 artış) dalga enerjisini artırmakta, bu durum da kıyı boyu katı madde taşınım miktarında 10 ila 100 katlık bir değişime neden olmaktadır (Pattiaratchi vd., 1997). Dalga geliş açısı, kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesaplarında önemli olan ilk parametredir. Dalgalar sahile dik açılarla yaklaştığında dalga enerjisinin kıyı bileşeni sıfır olmakta ve bölgede akım oluşmamaktadır. Dalgalar kıyıya eğik bir açıyla yaklaştığında ise, kıyı akıntısı ile birlikte kıyı boyu katı madde taşınımı meydana gelmektedir (Adams, 2011). Bununla birlikte, 200.000 m^3/yıl' dan fazla katı madde taşınımı olan veya 1.8 m'den daha büyük belirgin dalga yüksekliklerinin etkin olduğu bölgelerde katı madde taşınım çalışmaları için doğru ve güvenilir saha verilerinin elde edilemediği belirtilmektedir (Taborda vd., 1994; Schoonees ve Theron, 1993). Bu gibi durumlarda kıyı boyu katı madde taşınımı, Kaczmarek vd. (2005), Kamphuis (1991), CERC (1984) gibi deneysel yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Diğer yandan bu ampirik formüllerin, çökelti tuzakları, radyoaktif izleyiciler, floresan izleyiciler, optikler veya akustik gibi çeşitli şekillerde gerçekleştirilen saha ölçümleriyle kalibre edilmesi veya desteklenmesi gerekmektedir (Bertin vd., 2008; White, 1998). Küçük dalga kırılma açısının mevcut olduğu durumlarda (tipik olarak 5°) ampirik formüllerde dikkate alınan dalga açısında 1.5-2°'lik sapmalar (hata) olur ise kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesinde bu sapmalar hızla ana hata kaynağı haline geldiği belirtilmektedir (Bertin vd., 2008).

Chowdury vd. (2019) çalışmasında gelecekteki dalga ikliminin kıyı boyu katı madde taşınım miktarları üzerindeki potansiyel etkisi ve dolayısıyla Hindistan kıyıları boyunca seçilen konumlardaki erozyon ve yığılma olayları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında Hindistan kıyıları boyunca meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki değişimler RCP4.5 iklim senaryosu etkisindeki dalga parametrelerinin potansiyel değişimlerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Planlanan dalga iklimi "kısa dönem (2011-2040) ve "orta vadeli dönem" (2041-2070) olmak üzere iki farklı zaman dilimi için katı madde taşınım miktarlarındaki değişimleri araştırmak üzere kullanılmıştır. Çalışma için Hindistan kıyıları 27 farklı hücre ile sınırlandırılmıştır.

Chowdury vd. (2019) çalışmasında seçilen noktaların çoğunda gelecekteki dalga yüksekliklerinin mevcut durumdan daha yüksek olacağı periyotların ise en az %20 oranında artacağı görülmüştür. Ayrıca seçilen noktalardaki ortalama dalga yönlerinde güneye doğru sapma olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlara göre mevcut taşınım büyüklüklerinde farklılıklar olmasına rağmen, Hindistan'ın birçok kıyısı her iki zaman diliminde de aynı sürüklenme yönünü sergilemiştir. Her iki zaman dilimi için gerçekleştirilen benzer karakteristikler, toplam kıyı şeridinin %35'inin gelecekteki dalga iklimi değişimlerinden etkilenmeyeceğini, %20'sinin kötüye gideceğini (mevcut duruma göre daha büyük miktarda erozyona maruz kalacağı), %45'nin ise "gelişeceği" (yığılma/dengeye ulaşacağı) sonuçlarını göstermiştir. Ek olarak, gelecek zaman senaryosundaki yıllık net taşınım miktarının mevcut senaryoya göre önemli ölçüde değişiklik göstermediği görülmüştür.

Chowdury vd. (2017) çalışması ise kıyı çizgisinin genel kıyı jeomorfolojisini tanımlamada önemli rol oynayan kıyı boyu katı madde taşınımının zamansal dinamikleri üzerinde değişken kıyı ikliminin etkisini araştırmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bölgeye ait güncel dalga iklimini elde edebilmek için 1979-2015 dönemine ait ERA-Interim geçmiş dönem dalga veri seti kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bölgede kuzeye doğru yaklaşık 450,000 m^3/yıl değerinde toplam katı madde taşınımı olduğu görülmüştür. Çalışma süresi içinde soluğan ve rüzgar kaynaklı yıllık katı madde taşınımında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin, 2009-2015 Ekim-Mayıs aylarındaki düşük dalga

aktivitesi olduğu düşünülmüştür. Çalışma alanındaki bölgesel kıyı boyu katı madde taşınımının küresel ve bölgesel dalga ve rüzgar ikliminden doğrudan etkilendiği görülmüştür. Analiz süresi boyunca toplam kıyı boyu katı madde taşınımının yaklaşık %5'lik bir düşüş eğiliminde olduğu gözlenmiş ve kıyı boyu katı madde taşınımındaki bu zamansal azalma, düşük enlemlerde soluğan oluşumundaki azalma ile ilişkilendirilmiştir.

1.1.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı İle İlgili Literaür Özeti

Literatür çalışmaları incelendiğinde, kıyıya dik morfoloji değişimlerinin, fırtınalar gibi epizodik olaylardan on yıllara kadar uzanan geniş bir zaman aralığında meydana gelmekte olup kıyı ekosistemleri, doğal ve yapay savunma hatları, altyapı sistemleri ve güvenlik hatları üzerinde zararlı etkilere sebep olabildiği görülmüştür (Karunaratha vd., 2018). Uzun dönemli morfoloji değişimleri, belirgin biçimde daha kısa zaman aralıklarında meydana gelen erozyon ve erozyon sonrasındaki iyileşme süreci arasındaki denge tarafından belirlenmektedir (Castelle vd., 2017). Morfoloji değişimleri üzerinde kısa dönemli olayların önemli olduğu konusunda artan fikir birliğine rağmen kıyı yönetimi kararları, kısa dönemli kıyı değişimlerini göz ardı etmekte ve çalışmalarda yıllık ila on yıllık ölçekleri baz almaktadır (Karunaratha vd., 2018; Toimil vd., 2020). Bu sebeple, kısa dönemli (saatler ila aylar arasındaki) kıyıya dik morfoloji değişimini anlamak, uzun dönemli (yıllar ila on yıllar) kıyı davranışını değerlendirmek için esastır. Çoğu kısa dönemli kıyıya dik morfoloji değşimini inceleyen deneysel ve modelleme çalışmaları, tek bir fırtınadan veya bir dizi fırtınadan kaynaklanan kıyı erozyonuna ve sadece taşkın ile erozyon tehlikelerine odaklanmaktadır (Fernandez-Montblanc vd., 2020). Fırtına sonrası kumsal geri kazanım mekanizmaları, yalnızca deniz ağırlıklı bölgeler için değil, tüm kumul sistemi için gelecekteki kıyı gelişim modellemesinde de kritik bir rol oynamaktadır (Scott vd., 2016). Fırtına sonrasındaki kumsal geri kazanım aşaması ile fırtına etkilerinin değerlendirilmesinde anahtar parametre olan uzun dönemli çalışmalar, kıyı erozyonu sürecine göre daha az çalışılmakta, fırtına çalışmalarında da genellikle ihmal edilmektedir (Eichentopf vd., 2020; Eichentopf vd., 2019; Montreuil vd., 2020). Özellikle erozyon ve iyileşme süreçlerinin daha hızlı

morfolojik değişikliklere dönüştüğü sarp ve dinamik kumsallar için ilgili çalışmalar daha da azdır (Vousdoukas vd., 2012).

Kıyıya dik morfoloji değişimleri ve bu morfoloji değişimlerine sebep olan etkenler üzerinde neredeyse en kapsamlı araştırma van Rijn (2009) çalışmasında yapılmıştır. Bu çalışmada fırtına etkisi altında kumsal ve kumul erozyonunun deneysel ve matematiksel model sonuçları sunulmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte çalışma kapsamında kumul erozyonu üzerinde fırtına kabarması, derin deniz dalga yüksekliği, pik daga periyodu, dalga geliş açısı, katı madde tane çapı ve kıyı profili eğiminin etkileri gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ile birlikte ayrı ayrı araştırılmıştır.

Baldock vd. (2010) çalışmasında surf ve çalkantı bölgelerindeki uzun periyotlu dalgaların, serbest uzun dalgaların ve dalga gruplarının katı madde taşınımı üzerindeki etkilerine dair laboratuvar verileri sunmak için Queensland Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde kıyı profili deneyleri gerçekleştirmiştir. Dalga baseni 31.12 m uzunluk, 6.07 m genişlik ve 0.5 m derinlikte olup deneylerde başlangıç kıyı eğimi 1:10 olan yaklaşık 6 m uzunluğunda bir kum modeli kullanılmıştır. Serbest uzun dalgaların kıyıların morfodinamik gelişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi için, bir dizi kısa dalga ve daha sonra aynı kısa dalgalar ile farklı serbest uzun dalgaların kombinasyonu ile deneyler gerçekleştirilmiş olup deneylerde ayrıca bir dizi bikromatik dalga grubunun profil davranışı da araştırılmıştır.

Baldock vd. (2010) çalışması sonucunda şu sonuçlar tespit edilmiştir. Monokromatik kısa dalga deneyleri fiziksel modellemenin doğada gözlenenlerle tutarlı olan kıyı profilleri oluşturmaktadır. Veriler, serbest uzun dalgaların yığılma (accretive) koşullarında da erozyon koşullarında da karaya doğru katı madde taşınımı gerçekleştirme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bikromatik dalga grupları ise genellikle hem erozyon hem de yığılma (accretive) koşulları etkisinde açık denize doğru taşınımı artırmaktadır ve bikromatik dalga grupları, aynı enerji akısında monokromatik dalgalardan çok daha eroziv etkiye sahiptir. Serbest uzun

dalgalar, H/w_sT'yi (göreceli çökelme hızı) azaltıp yığılmayı artırırken, dalga grupları ise etkili H/w_sT'yi artırma eğiliminde olup erozyonu artırmaktadır.

Baldock vd. (2011) çalışmasında ise uzun dalgaların kıyı bölgesindeki katı madde taşınımı üzerindeki etkisi ile ilgili daha önce yapılan küçük ölçekli deneylerin yanı sıra büyük ölçekli laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada surf ve çalkantı bölgelerindeki katı madde taşınımında uzun dalgaların, bikromatik dalga gruplarının ve rasgele dalgaların etkisi üzerine Barselona UPC'deki (Katalonya Politeknik Üni.) CIEM büyük dalga kanalında, yeni kıyı profili deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dalga kanalı 100 m uzunluğunda, 3 m genişliğinde ve 5 m yüksekliğinde olup deneylerde 2.5 m'lik su derinliği ile kullanılmıştır. Deneyler için ortalama bir kum (d_{50} = 0.25 mm) kıyı modeli kurulmuştur ve yaklaşık olarak kıyı eğimi 1:15'tir. Çalışma sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir. Bikromatik dalga grupları eroziv koşullar etkisinde de yığılma (accretive) koşulları etkisinde de karaya doğru katı madde taşınımını azaltmakta denize doğru taşınımı desteklemektedir. Rastgele dalgalar ise bikromatik dalga gruplarına benzer şekilde denize doğru katı madde taşınımını desteklemektedir. Veriler, dalga gruplarının neden olduğu katı madde taşınımı etkilerinin dikkate alınmasının, kıyıya dik profil gelişiminin yakın kıyı morfolojik modellemesi için önemli olduğunu göstermektedir. Küçük ölçekli ve büyük ölçekli deneyler, serbest uzun dalgaların, eşiğin konumu üzerinde, yalnızca monokromatik dalgaların neden olduğu konuma kıyasla belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Hattori ve Kawata (1980) çalışmasında ise surf bölgesindeki kıyıya ve denize doğru kum taşınımını açıklayan bir model sunulmuştur. Model, net taşınımın dengeye ulaştığı andaki fiziksel değerlendirmeye dayanmaktadır. Çalışma kapsamında 0.4 m genişlikte, 0.7 m derinlikte ve 16 m uzunluktaki bir tarafı cam dalga kanalında, kanalın bir ucunda yer alan dalga üreteci tarafından üretilen monokromatik dalgalar ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Fırtınalar gibi enerjik dalga olaylarına karşı kıyıya dik profil davranışlarını tahmin etmek kolay değildir çünkü fizik yeterince anlaşılmamıştır ve dalga ile topoğrafik veriler genellikle ya çok seyrek ya da neredeyse hiç bilinmemektedir. Bu düzensiz

ve lineer olmayan dalgalar, türbülanslı akıntılar, katı madde tanelerinin değişken şekil ve boyutları ile başlangıç kıyı koşullarının tam olarak bilinememesi gibi çeşitli belirsizliklerden dolayı kıyı morfolojisi gelişimlerini modellemek oldukça zordur (Kalligeris, 2020).

Rusu vd. (2018) çalışmasında ise, 1978-2016 yılları arasındaki 30 yıllık çalışma süresi boyunca tüm Karadeniz havzasında SWAN ile gerçekleştirilen dalga modeli sonuçları kullanılarak, ekstrem fırtınaların coğrafi dağılımının analizi yapılmıştır. Fırtına dinamiklerinin analizini gerçekleştirmek için, H_s değerinin 5 m'den büyük olduğu ve minimum 12 saatlik fırtına süresi göz önüne alınarak Lagrange metodu kullanılmıştır. Çalışma sonunda fırtınaların çoğunun Karadeniz Havzası'nın güney-batı tarafında başladığı ve daha sonra havzanın merkezine doğru yayıldığı fark edilirken, fırtınaların en sık görüldüğü dönemin yılın Ekim-Mart ayları olduğu tespit edilmiştir.

Rio vd. (2012) çalışmasında Cadiz Körfezi'nin İspanya kıyısı boyunca fırtına etkileri için kritik eşiklerin tanımlanması amacıyla bir metodoloji oluşturulmaya çalışılmış olup, kıyılarda önemli morfolojik değişikliklerin oluşması ile kumul basamağı erozyonu ve kıyı altyapısında meydana gelen hasar oluşumu olmak üzere iki tür fırtına etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda hem geçmiş dönem verileri hem de bölgesel çalışma verilerine dayanarak fırtına olaylarının ortalama ve maksimum dalga yükseklikleri ve kritik eşik değerleri için aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır.

- 30 saat veya daha uzun süreli etkinlik,
- Ortalama dalga yüksekliği (≥3.3 m) ve maksimum dalga yüksekliği (≥4.0 m),
- Ortalama veya ilkbahar gelgit durumu,
- 3. ve 4. kadranlardan yaklaşan 9 m/s' nin üzerinde ortalama rüzgâr hızı.

Angnuureng vd. (2017) çalışmasında ise tekil fırtına ve fırtına gruplarına karşı kıyı çizgisi dayanıklılığını ölçmek, gelgit ve kum eşiklerinin kıyı çizgisi konumu üzerindeki etkisini araştırmak ve fırtına sonrası kıyı geri kazanım süresini tahmin etmek amacıyla mezo-makro gelgit etkisindeki Biscarrosse bariyer plajında 2007-

2012 yılları arasındaki altı yıllık süre boyunca kaydedilen günlük video gözlemleri analiz edilmiştir. 6 yıllık çalışma dönemi sonunda toplamda 60 fırtına tespit edilmiş olup bu fırtınaların 24'ünde kötü hava koşulları ve video arızaları nedeniyle kıyı verilerinin tam olarak elde edilememiş, geriye kalan 36 fırtına ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ortalama en yüksek fırtına dalgası yüksekliği 4.9 m ve fırtına süresi boyunca ortalama dalga yüksekliği ise 4.5 m, tüm fırtınalar boyunca ortalama fırtına pik dalga periyotları 12.15 s ortalama fırtına süresi 33 saat olarak tespit edilmiştir.

Kıyı morfolojisi gelişim modelleri, açık deniz dalga koşulları ile profil şeklinin gelişimi arasındaki ampirik ilişkilerden, taneler arası etkileşimleri ve türbülanslı süspansiyonu içeren dalga fazı çözümleme modellerine kadar uzanmaktadır (Wright ve Short, 1984; Larson ve Kraus, 1989; Plant vd., 1999; Ludka vd., 2015; Dong ve Zhang, 2002; Hsu vd., 2004; Gonzalez vd., 2018; Kim vd., 2018). Bununla birlikte kıyı morfolojisi gelişim modellerinin bir dizi farklı koşul altında (H_s, belirgin dalga yüksekliği, T_p pik dalga periyodu, dalga geliş açısı gibi) da değerlendirilmesi gerekmektedir (Kalligeris vd., 2020).

Diğer yandan kıyı, plaj bölgesi ile ön kumul bölgesi arasındaki profil davranışını ve katı madde taşınım değişimini tahmin etmek için birçok sayısal model de geliştirilmiştir (Larson ve Kraus, 1989; Vellinga, 1982; Kriebel ve Dean, 1993). Son 20 yılda geliştirilen bu kıyı morfolojisi modelleri, denge durumunu tahmin eden modellerden (Dean, 1977) çok sayıda fiziksel süreci ve çeşitli zaman ölçeklerini içeren detaylı sayısal modellere (Zheng ve Dean, 1997; Nicholson vd., 1997) kadar farklılık göstermektedir (Sutherland vd., 2004). Kıyı bölgelerinde pragmatik olarak kullanılan sayısal modellemeler, kıyı tasarımı ve planlaması için etkili birer araç olup, tipik olarak belirli bir fırtına olayının (örneğin 100 yılda bir meydana gelen fırtına) belirli bir kıyı yapısı veya doğal kıyı şeridi üzerindeki etkilerinin modellenmesini ve ardından buna göre tasarlanmasını içermektedir (Carley ve Cox, 2003).

Fırtınalar sırasında kumul profilinin zamana bağlı gelişimini modellemeye yönelik yaklaşımlar genel olarak ikiye ayrılmaktadır (Palmsten ve Holman, 2011). İlk

yaklaşım, kumsal ve kumul eğimlerinin kullanıcı tarafından belirlenmiş olan eşikleri aştığında meydana gelen kumul heyelanıdır (Roelvink vd., 2009; Larson ve Kraus, 1989). İkinci yaklaşım ise, aralıklı çökmenin (slumping) kumul yüzüne çarpan dalga kuvvetiyle orantılı olduğunu varsayarak kumul erozyonunu modellemeyi içermektedir (Overton vd., 1994). Yakın zamanda geliştirilen hidro-morfodinamik model XBeach (Roelvink vd., 2009) fırtınalar sırasında kumul yüzüyle dalga çarpışmalarının ana nedeni olan ağırlık dalgalarını hesaba katarak zamana bağlı kumul erozyonu modellemesinde gelişmeler sağlamaktadır (Raubenheimer ve Guza, 1996).

Trifonova vd. (2012) çalışmasında beş farklı kıyı bölgesinin değişen yoğunluktaki fırtınalar karşısında yakın kıyı morfolojik davranışlarının bölgesel ölçekte analizini sunmak hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda fırtına karşısında kıyıların morfolojik davranışının sahaya özgü olduğu ve bölgesel ölçekte bile olsa tek bir eşik değerinin belirlenmesinin zor olduğu bulunmuştur. $0.4\text{-}0.7\times10^{6}$ Jm^{-2} aralığında dalga enerjisine sahip fırtınaların ciddi morfolojik değişimlere sebep olacağı, daha az enerjik olayların ise yalnızca mevsimsel plaj dinamiklerine etki ettiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, 0.7×10^{6} Jm^{-2}'den daha yüksek dalga enerjisine sahip fırtınaların, kıyı şeklini/düzenini geri döndürülemez şekilde değiştirebilecek potansiyel yıkıcı olayları temsil ettiği ifade edilmiştir.

Winter ve Ruessink (2017) çalışmasında, deniz seviyesi yükselmesi (SLR) ve dalga geliş açısının (θ = 0°-30°) kumul erozyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Simülasyonlarda özellikle Hollanda kıyılarından iki temsili alan üzerinde çalışılmış ve kumul erozyonu hacimlerinin azaltılmasında farklı önlem çalışmaları da analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda deniz seviyesi yükselmesi, günümüz derin deniz ekstrem tasarım kabarma seviyesine eklenmiştir. Ayrıca su derinliği 1 m arttığında derin deniz koşullarındaki değişimin küçük olması sebebi ile sabit dalga ve fırtına kabarması koşulları kabul edilmiştir. Çalışmada su seviyesi artışı 0.4 m ve 0.8 m için 0°'den 33.75°'e kadar farklı değerleri analiz edilmiştir. Çalışma bölgeleri olarak Noordwijk ve 45 km kuzeyinde yer alan Egmond kıyıları seçilmiştir. Egmond ve Noordwijk kıyıları için 1:10,000 yıllık hidrodinamik sınır

şartları sırasıyla şu şekildedir; z_s=5.5 (5.8) m, H_{m0}=9.55 (8.55) m, T_p=16.1 (14.3) s. Egmond ve Noordwijk için temsili profiller seçilmiş ve kıyı profillerinin üniform olduğu kabul edilmiştir.

Winter ve Ruessink (2017) çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda mevcut durumda ve deniz seviyesinde yükselme olmayan durumda Egmond ve Noordwijk için sırasıyla 335 m^3/m ve 230 m^3/m erozyon meydana geleceği öngörülmüştür. Her iki bölge için deniz seviyesi yükselmesi ile erozyon hacmi arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Noordwijk'te 25 m, Egmond kıyılarında ise 15 m geri çekilme tespit edilmiştir. Diğer yandan çalışmalara göre dalga açısının kumul erozyonu üzerindeki etkisinin göz ardı edilemeyeceği ve deniz seviyesi yükselmesi ile aynı derecede etkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında fırtına süresinin de erozyon üzerindeki etkisini araştırmak üzere 10 saatlik bir simülasyon yapılmış ve daha uzun sürede daha yüksek erozyon meydana geldiği görülmüştür. İkinci beş saatte erozyonun azalan ivme ile arttığı ve bununla birlikte fırtına süresindeki değişikliğin erozyon hacmi üzerinde deniz sseviyesi yükselmesi ve açıdan daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Diğer yandan, mevcut model ve yaklaşımların çeşitliliğine rağmen, model performansıyla ilgili literatürdeki yorumlar hala yeterli bulunmamaktadır. Bununla birlikte mühendislik aracı olarak kullanılacak sayısal bir model objektif bir değerlendirme gerektirmektedir. Sorulara cevap arayan kıyı mühendisliği otoriteleri ise, kullandıkları modellerde iç süreçlerin detayları ile değil kullanılan modelin amacına uygunluğu ve en önemlisi güvenilirliği ile ilgilenmektedir. Bu nedenle, bir modelin doğruluğunu ve tahmin becerisini belirlemek için kullanılabilecek tamamen nesnel standart model performans algoritmaları oluşturmak gerekmektedir (Sutherland vd., 2004).

1.1.3 XBeach İle İlgili Çalışmalar

Daha şiddetli fırtınaların oluşması ve yükselen deniz seviyesine bağlı olarak kıyı alanlarındaki nüfus ve yükün artması ile kıyıların fırtınalar karşısındaki tepkisini belirleme ihtiyacı kararlı bir şekilde artış göstermektedir. Sallenger (2000) çalışmasında ifade edilen dört fırtına etkisi kategorisine dayalı olarak tasarlanmış

olan XBeach yazılımı da, ABD (Roelvink vd., 2009; McCall vd., 2010; Lindemer vd., 2010); Portekiz (Vousdoukas vd., 2012) ve Avustralya (Splinter ve Palmsten, 2012) dahil olmak üzere dünya çapında birçok farklı bölgede ön kumul erozyonu ve su baskını süreçleri nedeniyle fırtına sonrasındaki morfolojiyi başarılı bir şekilde tahmin etmek için kullanılmaktadır (Armaroli vd., 2013).

Tuan vd. (2006) çalışmasında kanal deneyleri yapılarak dalga kaynaklı yıkanmanın morfolojik gelişimini gözlemleyebilmek için UNIBEST-TC adı verilen 2 boyutlu kıyıya dik profil modeli geliştirilmiştir. Larson vd. (2004) çalışmasında ise prototip tırmanma kaynaklı yıkanma koşullarında kıyıya dik profil değişimi 1 boyutlu SBEACH sayısal model ile doğrulanmıştır. Ancak bu çalışmalarda kıyıya dik profil yıkanma modelleri, kıyı boyu doğrultudaki değişimin üniform olduğu kabulü ile sınırlandırılmıştır. Arazi çalışmaları ise başarılı bir yıkanma benzeşimi için kıyı boyu doğrultudaki değişimin de dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca mevcut modellerde infra-ağırlık dalgaları da dikkate alınmamış fakat yakın kumul hidrodinamiğinin infra-ağırlık dalgalarının oluşturduğu çalkantıdan etkilenmesi sebebi ile yıkanma modellerinde bu dalgaların da göz önünde bulundurulması gerektiği belirlenmiştir. Roelvink vd. (2009) çalışmasında XBecah adı verilen, 2 boyutlu yakın kıyı modeli geliştirilmiştir. Bu model infra-ağırlık dalgalarının da dikkate alındığı, kıyıya dik ve kıyı boyu hidrodinamik ve morfodinamik eşlenik denklemlerin zaman ölçeğinde çözümünü sağlamaktadır.

McCall vd. (210) çalışmasında, bir bariyer adasındaki yıkanma morfolojisinin benzeştirilebilmesi için XBeach modeli kullanılmıştır. Fırtına sırasında ciddi derecede morfolojik değişime uğrayan Florida'daki Santa Rosa Adası'nın bir kısmı modelde incelenecek çalışma alanı olarak seçilmiştir. Adada ölçülen taban seviyesi değişimleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Model sınır koşullarında parametreleştirme hatalarını tolere edebilmek için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiş ve hidrolik parametrelerin yıkanma üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Modelde çalışma alanı olarak Santa Rosa Adası seçilirken, morfoloji değişikliğine sebep olarak Ivan Kasırgası (2004) dikkate alınmıştır. Çalışma alanının fırtına

öncesi ve sonrasındaki batimetri ve altimetri verileri 15 Mayıs 2004 ve 19 Eylül 2004 tarihli iki LIDAR ölçümünden elde edilmiştir. Çalışma alanına ait dalga verileri incelendiğinde ise kasırga sırasında yerinde ölçülen yakın kıyı verisinin mevcut olmadığı, kasırganın karaya yaklaşması sırasında birkaç NOAA (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi) şamandırasından alınan derin su dalga yüksekliklerinin mevcut olduğu görülmektedir. Bu şamandıra verileri SWAN dalga modelinde kullanılarak XBeach model sınırındaki (Santa Rosa Adası'ndan 1.5 km açıkta) belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu tespit edilmiştir. Çalışmada derin deniz dalga koşulları JONSWAP ile tanımlanan XBeach modelinde 36 saat fırtına koşulu dikkate alınmaktadır. XBeach modelinde dikkate alınan çalışma alanının kıyı boyu doğrultudaki ağ aralıkları 20 m iken, kıyıya dik yönde 2 m-29 m arasında değişkenlik göstermektedir.

Çalışma sonucunda bariyer adasının morfolojik değişimi üzerinde gelen dalga yüksekliği ve periyot etkisinin büyük olduğu, yıkanma başlangıcının kabarma seviyesinden daha çok dalga koşulları ile belirlenmekte olduğu, bariyer adası boyunca meydana gelen kabarma seviyesindeki değişimlerin arka bariyer ve koy morfolojisini etkilediği ve fırtına süresindeki değişikliklerin farklı miktarlarda erozyon ve çökelme meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Kombiadou vd. (2021) çalışması, yoğun fırtına erozyonu altındaki yansıtıcı bir kumsalın kısa dönemli morfodinamiğini anlamak ve süreç tabanlı XBeach modelini kullanarak fırtına sonrasındaki kıyı geri kazanım sürecini benzeştirmeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda çalışma kapsamında Faro Sahili boyunca fırtına öncesinde (26 Şubat), fırtınadan hemen sonra (2 Mart) ve fırtınadan sırasıyla 6, 35 ve 49 gün sonra (8 Mart, 6 Nisan ve 20 Nisan) profil ölçümleri (PW, PC ve PE) gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesi, %6 ila %15 arasında değişmekte olan yaklaşık %11'lik ortalama eğime sahip, iyi/çok iyi sınıflanmış 0,35–0,8 mm boyutlarındaki orta ila kaba kum ve dik bir sahil yüzü ile karakterize edilmiştir. Çalışma bölgesinde meydana gelen dalga fırtınaları 2.5 m ila 3 m'yi aşan belirgin dalga yükseklikleri ile karakterize edilmiştir. Morfolojik modelleme çalışmaları için XBeach (sürüm 1.23.5526) yazılımı kullanılmış ve model kalibrasyon sürecini basitleştirmek ve kalibre edilmiş çalışmaların mümkün olduğu kadar geniş çapta

uygulanabilirliğini sağlamak için, biri aşındırıcı, diğeri yığılma hedefleyen kıyı davranışı elde edecek şekilde iki sabit değerli kalibrasyon parametresi seti dikkate alınmıştır. Simülasyonlarda morfodinamik hızlanma faktörü 5 (morfac) kullanılmıştır. Fırtına dalgası özellikleri için model sadece facua parametresini dikkate alırken, fırtına olmayan dalgalar için bermslope parametresi aktif olarak kullanılmıştır. Deneyler bilinçli olarak detaylıca kalibre edilmemiş olup genel bir çözüm için potansiyel beceri gelişimini yıkıcı ve yapıcı koşullara karşılık gelen iki, sabit değerli, kalibrasyon parametre grubu kullanarak tespit etmiştir. Test edilen farklı kalibrasyon parametreleri arasında, facua ve bermslope parametreleri en kritik parametreler olarak tanımlanmıştır.

Çalışma kapsamında Faro Plajı'nda meydana gelen Emma fırtınasından (Mart 2018) önce, fırtına sırasında ve sonrasında ölçülen topoğrafik profiller bölgede kuvvetli kumsal erozyonu olduğunu, bu süreçte aşınan hacimlerin büyük kısmının 45 gün içinde geri kazanıldığını ve fırtına öncesi koşullara hızlıca döndüğünü göstermiştir. Çalışma sonucunda yeni ve tamamen süreç tabanlı bir morfolojik modelin fırtına sonrasındaki geri kazanım sürecini tahmin edebilme kabiliyeti konusunda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. XBeach, yalnızca orijinal model tasarımı (hafif dalga koşullarında kurtarma) açısından değil, aynı zamanda kurtarılan plaj profillerinin (dik ve yüksek banketler) morfolojik gereksinimleri açısından da zorlu koşullar altında iyi performans göstermiştir.

Armaroli vd. (2013) çalışmasında, kuzey İtalya'da yer alan Adriyatik kıyı şeridindeki bir kumul ve kumsal sisteminin fırtınalar karşısındaki davranışını incelemek ve XBeach sayısal modeli tarafından tahmin edilen sonuçları mevsimsel (aylar) ve orta dönemli (3 yıllık) morfodinamik değişimler ile karşılaştırarak değerlendirmek amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha çalışması, yaklaşık 3 yıllık bir süre içerisinde 7 kez gerçekleştirilen ve RTK-DGPS teknolojisini kullanan topoğrafik profil araştırmalarından oluşmuştur. Morfolojik kıyı özellikleri göz önüne alındığında 6 farklı bölge seçilmiş, bu bölgelerde belirlenmiş 20 adet kıyıya dik profil hattı boyunca toplam 103 yüzey katı madde numunesi alınmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm topoğrafik araştırmalarda RTK-DGPS araştırma teknolojisi kullanılmıştır. Profiller, kum

tepelerinin arka tepesinden OSS'nin 1 m ila 1.5 m altındaki derinliğe kadar ölçülmüştür. Batimetrik profiller açık denize doğru ortalama 200 m'den fazla uzatılmış ve yaklaşık 4 m su derinliğine kadar ulaşmıştır. Çalışma bölgesi, kentleşmiş ve nispeten bozulmamış kıyılardan oluşmaktadır. Bölgenin açık deniz tarafı ise, enerjik dalga koşulları sırasında az da olsa koruma sağlayan bir dizi kıyıya paralel batık dalgakıranlardan oluşmaktadır. Çalışma bölgesindeki en belirgin fırtına, Mart 2010'da 3.91 m'lik belirgin dalga yüksekliği ile kaydedilmiştir. Tüm çalışma alanını temsil edecek şekilde altı profil seçilmiştir: 1. bölge için MS2, 2. bölge için MS9, 3. bölge için MS17, 4. bölge için MS24, 5. bölge için MS32 ve 6. bölge için MS39. Mevsimsel kumul eğiliminin aksine, fırtınadan sonra birkaç ön kumul eğiminin düzleştiği gözlemlenmiş ve bu durum kumul çökmesi olarak tanımlanmıştır. Meydana gelen bu ön kumul erozyonu, süreç tabanlı model olan XBeach morfolojik sayısal yazılımı ile simüle edilmiştir. XBeach model çalışmaları için çalışma süresi içinde meydana gelen iki önemli fırtına olayı seçilmiştir. İlk fırtına 1 ve 3 Aralık 2008 tarihleri arasında meydana gelmiş olup küçük dalgalar (H_{sp} = 1.47 m, T_p = 9.1 s, dalga yönü 91° N) ve çok yüksek su seviyeleri (h_p = 0.92 m) ile karakterize edilmiştir. İkinci fırtına 9 ve 10 Mart 2010 arasında meydana gelmiş ve çok büyük dalgalar (H_{sp} = 3.91 m, T_p = 10 s, dalga yönü 59° N) ile yüksek su seviyelerinin (h_p = 0.93 m) kombinasyonunu temsil etmiştir. Bu çalışmada her profil ve fırtına için XBeach parametre ayarlarının on dört kombinasyonu test edilmiştir. Bu kombinasyonlar, iki farklı parametre setinden belirli parametreleri artırarak ve azaltarak elde edilmiştir.

Model performansı, ölçülen ve modellenen değerler arasındaki farkın varyansını, ölçülen değerlerin varyansıyla ilişkilendiren Brier Başarı Puanı (BSS) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Sallenger (2000) fırtına etkisi kategorileri ve Armaroli vd. (2013) çalışmasında tanımlanan DSF (Kumul Stabilite Faktörü) arasındaki karşılaştırmalar ile değerlendirilmiştir. 2008-2009 kış fırtınalarına ait model sonuçları her iki sınıflandırmaya göre değerlendirildiğinde tahmin edilen ile gözlenen kumul sistemi arasında oldukça iyi bir uyum sergilemiştir. Gerçekleştirilen çalışma süreç tabanlı modelleme ile fırtına etkilerinin ampirik tahminleri arasındaki ilişkileri göstermiştir.

Dissanayake vd. (2014) çalışmasında ise kumsal bir kıyı sistemi üzerinde fırtına kaynaklı kumul gelişiminin modelleme yaklaşımı kullanılarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma bölgesi olarak Liverpool Körfezi'nde yer alan Sefton sahiline seçilmiştir. Model sınır koşulları olarak gerçek zamanlı açık deniz su seviyeleri ve dalgalar kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü morfolojik model (XBeach) için dalga sınırını oluşturmak üzere açık deniz dalgalarının dönüştürüldüğü (SWAN modelini uygulayarak), zaman ve alanda değişen deniz seviyesi yüksekliklerini simüle eden Delft3D ağ sistemi kullanılmıştır. Kıyı boyunca çeşitli konumlarda dikkate alınan profillere ait tahmin edilen ve ölçülen fırtına sonrası davranışları arasında yapılan istatistiksel karşılaştırmalar, XBeach modelinin Sefton kıyısı boyunca fırtına kaynaklı kumsal gelişmini başarılı bir şekilde yakaladığını göstermiştir.

Çalışma sonucunda dalga modeli sonuçları, derin denizden kıyıya yakın alanlara doğru ilerledikçe yüksek dalgaların (>1m) dağıldığı ve daha küçük dalgaların (<1 m) geliştiği bir eğilim görülmüştür. Gözlenen verilerin (LiDAR verileri ve fırtına sonrası profilleri) çözümü ve buradaki belirsizlikler, model tahmini ile taban gelişimini bir dereceye olumsuz etkilemiştir. Mart 2010 fırtınasının H_s belirgin dalga yüksekliği ve yükselen gelgit durumu sırasında BKB yönünden yaklaşan yüksek dalga ve rüzgar koşulları ile birlikte Sefton kumsal/kumul sisteminde en büyük taban gelişimi meydana gelmiştir. Sahil boyunca beş ayrı bölgede kıyıya dik fırtına öncesi ve fırtına sonrası kumul-plaj profillerinin karşılaştırılması ile fırtına sırasında düşük miktarda kumul yüzü erozyonu meydana geldiği bulunmuştur. Bu durumun sebebi olarak da çalışma kapsamında dikkate alınan fırtına koşullarının (maks. H_s = 3.8 m) çalışma bölgesinde meydana gelen büyük fırtınalarla karşılaştırıldığında ($H_s \sim$ 4 m 1 yıllık olay için) şiddetli sayılamayacak olmasıdır. Fırtına öncesi ve fırtına sonrası profiler arasındaki karşılaştırmaları RMSE, BSS ve R^2 istatistiksel prametreleri gerçekleştirilmiş olup XBeach modelinin Sefton sahilindeki morfodinamik gelişimi tatmin edici bir şekilde tahmin etme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

Pender D. ve Karunarathna H., (2013) çalışmasında Avustralya, Sidney'in 20 km kuzeyinde yer alan Narrabean kıyısı XBeach yazılımı ile modellenirken,

Vousdoukas vd. (2012) çalışmasında Portekiz'de yer alan Faro kıyısı, Arzaburu vd. (2014) çalışmasında da İngiltere'nin güneybatısında yer alan Slapton Kumulları yine XBeach yazılımı ile modellenmiş ve kıyı gelişim süreçleri incelenmiştir.

1.2 Problemin Tanımı

İklim sisteminde, dünyanın varoluş sürecinden bugüne kadar sürekli doğal değişimler meydana gelmiştir. Bu doğal değişimler günümüzde, sera etkisi, sera gazları birikimindeki değişim boyutu, sülfat parçacıkları, güneş ışınımındaki değişiklikler sebebi ile insan kaynaklı iklim değişikliğinin en belirgin göstergesi olan küresel ısınma olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyanın bu uzun jeolojik tarihi boyunca meydana gelen iklim değişiklikleri yalnızca dünya coğrafyasını değiştirmekle kalmayıp aynı zamanda ekolojik sistemlerde de değişikliklerin meydana gelmesine sebep olmuştur. Böylelikle küresel iklim değişimi hem küresel hem de bölgesel ölçeklerde farklı etkiler oluşturmakta ve insanlığın geleceği için uluslararası boyutta bir tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır.

İklim değişikliğinin en belirgin göstergesi olan küresel ısınma sonucunda okyanuslar ısınıp genişlemekte ve buzullar erimektedir. Buzulların erimesi ile deniz seviyesinde ciddi yükselmeler meydana gelmektedir. Deniz seviyesindeki yükselmeler sonucunda da kıyılarda erozyon, taşkınlar ile tropikal kasırgalar oluşmaktadır. Tüm bunların sonucunda ise kıyı sistemlerinde uzamsal ve zamansal ölçeklerde ciddi boyutta değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler kumsal alanların dengesiz biçimde yer değiştirmesi, sulak alan değişikliği ve kaybı, kıyı profili ve çizgisinin değişmesi şeklinde karşımıza çıkmakta olup kıyı alanlarındaki yaşam şeklini ve toplumların direncini etkilemektedir.

Bununla birlikte yakın kıyı alanları karmaşık ve dinamik bir sisteme sahip olup, iklim değişimi etkisinde meydana gelen dalga iklimi ve su seviyesindeki değişimlerden de oldukça etkilenmektedir. Dalga koşullarında meydana gelen değişimler kıyı boyu ve kıyıya dik akıntıları değiştirmekte, böylelikle kıyısal alanlardaki mevcut katı madde taşınım mekanizmaları ile kıyı morfolojisinde değişimler meydana gelmektedir.

Bu sebeple meydana gelebilecek yıkıcı etkilere karşı kıyı alanlarının davranışlarını değerlendirebilmek ve gelecekteki olaylar için kıyı korumasını tasarlayabilmek amacıyla

çeşitli önlemlerin alınmasına ve sayısal model çalışmaları yapılarak katı madde taşınım süreçlerine ait projeksiyon çalışmalarının oluşturulmasına gereksinim duyulmaktadır. Özellikle kıyısal alanlarda meydana gelen erozyon ve yığılma olaylarının önlenebilmesi için kıyı boyu ve kıyıya dik katı madde taşınım süreçlerinin dolayısı ile de dalga iklimindeki değişimlerin incelenmesine ihtiyaç vardır.

Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm çalışma alanındaki kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasının incelenmesidir. Bunun için geçmiş dönem dalga verilerinden faydalanılarak bölgedeki kıyı boyu katı madde taşınımı hem ampirik hem de sayısal model çalışmaları ile tespit edilmiştir. Farklı yöntemlere göre elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım değerlerinin yıllar içerisindeki değişimleri ile birlikte mevsimsel değişimleri de belirlenmiştir. Geçmiş dönem dalga verileri kullanılarak elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım çalışmaları ardından RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları ışığında gelecekte beklenen olası kıyı boyu katı madde taşınım sistemi için öngörüde bulunulmuştur. Geçmiş dönem çalışmalarına benzer şekilde iklim senaryolarına göre gelecekte karşılaşılması öngörülen kıyı boyu katı madde taşınım süreçlerinin mevsimsel ve yıllar arasındaki değişimleri hem toplam dalgalar hem de bu dalgaları oluşturan soluğan ve rüzgar dalgaları cinsinden ayrı ayrı sunulmuştur. İkinci bölüm ise kıyıya dik katı madde taşınımı ve morfoloji değişimlerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Bu amaçla çalışma bölgesini temsil eden ve TÜBITAK 117Y333 Projesi (Şahin vd., 2021) kapsamında ölçümleri gerçekleştirilen kıyıya dik profiller ile XBeach sayısal modelinin kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından kalibrasyon süreci tanımlanan XBeach yazılımında RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre belirlenen dalga iklimi parametrelerinin değişimleri dikkate alınarak kıyıya dik katı madde taşınımı ve morfoloji süreçlerinin projeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Son olarak kıyıya dik profil davranışları üzerinde dalga iklimi parametreleri ve deniz seviyesi yükselmesinin ayrı ayrı etkilerini ortaya koyabilmek amacı ile XBeach yazılımı kullanılarak hassasiyet analizleri yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bugüne kadar küresel iklim değişikliği hakkında çok fazla çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda ya deneysel ya da sayısal modeller ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada ise iklim değişikliğinin dalga iklimi ve deniz

seviyesini etkilemesi sebebi ile kıyı morfolojisinde meydana gelen değişimler incelenirken bu iki etkinin birlikte dikkate alınacak olması önem arz etmektedir. Ayrıca yine çalışmada sayısal modeller kurulacak olması ve ek olarak saha ölçümlerinden de faydalanılması çalışmayı bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalar içerisinde özel kılmaktadır. Projeksiyon çalışmalarının oluşturulmasında sürekli olarak deney yapmanın zor olması ve sayısal modellerin bu eksikliği gidermesi oldukça önemlidir.

Bu sebeple tez kapsamında aşağıdaki çalışmalar amaçlanmıştır.

- Küresel iklim değişikliği etkisi ile dalga iklimi parametrelerinde (dalga yüksekliği, periyodu ve doğrultusu) meydana gelen değişimler ve deniz seviyesinde meydana gelen yükselmeler sonucunda kıyılarda oluşan kıyı boyu ve kıyıya dik katı madde taşınımı ve morfoloji değişimlerinin incelenmesi ve ilgili soruların cevaplanması;
- Kıyı morfolojisinin ve özellikle yakın kıyı değişimlerinin sayısal model çalışmaları ile desteklenmesi;
- Sayısal modellerden faydalanarak geleceğe yönelik küresel iklim değişimi etkileri sonucunda kıyı boyu ve kıyıya dik katı madde taşınımı ve kıyı morfolojisi değişimlerine yönelik projeksiyon çalışmalarının oluşturulması;
- Tüm sonuçlar ve değerlendirmeler doğrultusunda, kullanılacak sayısal modellerde iklim değişiminin benzeştirilmesindeki eksikliklerin tespit edilmesi ve bunlara çözümler sunulması;
- Mevcut durumdaki sayısal modellerin iklim değişimi sonucunda kıyı morfolojisi üzerindeki etkilerini benzeştirebilmesindeki başarısı ve eksikliklerinin tespit edilmesi.

Bu amaçlar doğrultusunda hazırlanan tezin kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır.

Bölüm 1'de küresel iklim değişimi sonucunda kıyı morfolojisinde meydana gelen değişimlerin doğru belirlenmesinin önemi anlatılmıs, bu çalısmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

Bölüm 2'de kıyı morfolojisini meydana getiren kıyı sistemleri kısaca açıklanmış, kıyısal alanlarda meydana gelen taşınım hareketleri ve bunlar sonucunda kıyı bölgelerinde karşılaşılan morfolojik süreçler açıklanarak konu ile ilgili literatür araştırmaları sunulmuştur. Bununla birlikte çalışmada kullanılan XBeach sayısal modelinin bilimsel altyapısı anlatılmıstır. Ayrıca bu konuda literatürde yapılan çalısmalar özetlenmistir.

Bölüm 3'de geçmiş dönem (son 40 yıl) ve RCP4.5 ile RCP8.5 iklim senaryolarına göre Karasu Bölgesi'nde hakim olan kıyı boyu katı madde taşınım değişimlerinin analizi ampirik (Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005) ve Bayram vd. (2007)) ve sayısal (LITPACK) yöntemler aracılığı ile belirlenmiş ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

Bölüm 4'te mevcut durumda ve RCP4.5 ile RCP8.5 iklim senaryolarına göre Karasu Bölgesi'nde hakim olan kıyıya dik katı madde taşınımları bölgeden iki farklı konumdan alınan kıyıya dik profillerin fırtına öncesi ve fırtına sonrası ölçümlerine göre incelenmiş, XBeach yazılımı ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 5'de yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında belirlenen öneriler sunulmuştur.

1.3 Hipotez

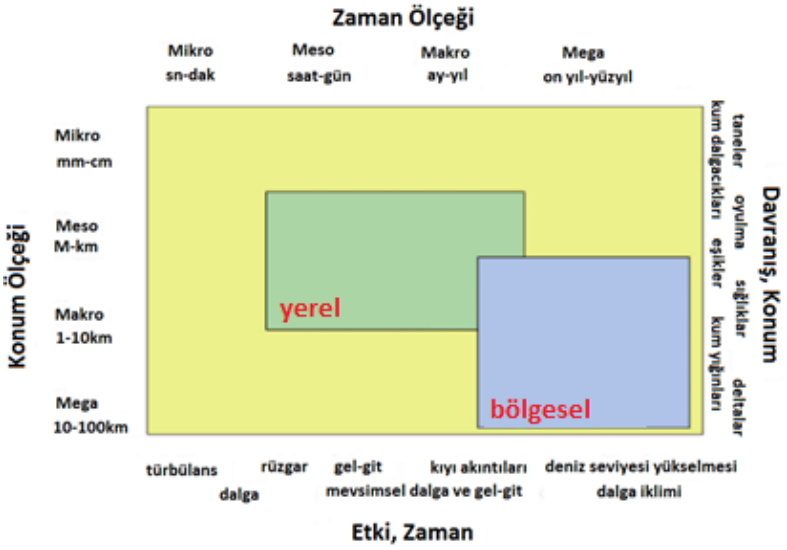
Herhangi bir ülke doğal kıyısal alanları ve bu alanlardaki mevcut taşınım mekanizmaları hakkında güncel ve doğru bilgilere sahip olmalıdır. Bu tür bilgiler kıyısal alanların doğru yönetimi ve daha iyi kullanılmaları için gereklidir. Küresel iklim değişikliğinin kıyı morfolojisine etkisinin incelenmesi konusunda yakın zamanda oldukça araştırma yapılmıştır ancak hala konu ile ilgili cevaplanamamış sorular mevcuttur. Özellikle son yıllarda kıyıya dik katı madde taşınımı ile ilgili farklı çalışmalar yapılmış olup iklim değişikliğine bağlı olarak deniz seviyesi yükselmesi sonucu meydana gelen katı madde taşınımıyla ilgili olan literatür çalışmaları son dönemde gelişim göstermiştir. Söz konusu çalışma, küresel iklim değişimi sonucunda dalga iklimi ve su seviyesinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak yakın kıyı bölgelerinde oluşan yıkıcı sonuçların yanı sıra mevcut

durumdaki literatür çalışmalarının azlığı ve konunun tam olarak çözülememiş olması sebebi ile de oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle, doğru ve daha iyi sonuçlar elde etmek için en son hesaplama ve analiz araçları kullanarak Türkiye kıyılarındaki katı madde taşınım mekanizmalarının ve morfoloji değişim süreçlerinin değerlendirilmesi ve geleceğe ışık tutacak çalışmaların yapılması gerekliliği söz konusudur.

2
KATI MADDE TAŞINIM MEKANİZMALARI, KIYI MORFOLOJİSİ VE MODELLENMESİ

2.1 Giriş

Kıyı alanlarının yönetiminde çevre, ulaşım, ekonomi ve biyoloji gibi birçok önemli etken olmasına rağmen kıyı alanlarının tasarımında en önemli parametre, tasarım kriteri olarak dikkate alınan katı madde hareketidir (Kamphuis, 2000). Özellikle uzun dönemde kıyısal alanlarda meydana gelen katı madde taşınımı ve kıyı profili gelişimlerinin tahmini, bu süreçlerin zaman ve konum ölçeğinde oluşan karmaşık süreçler barındırması sebebi ile oldukça güçtür (De Vriend, 1991a; Larson ve Kraus, 1995). Kıyısal işlemler genel olarak iki ölçekte olup bunlar yerel ölçek ve bölgesel ölçektir. Yerel ölçek 0.01-30 yıl arasında zaman ölçeğine ve 0.1-10 km arasındaki alansal ölçeğe karşılık gelmekte iken; bölgesel ölçek 10-250 yıl arasındaki zaman ölçeği ile 1-100 km arasındaki alansal ölçeğe karşılık gelmektedir.



Şekil 2.1 Katı madde işlemlerinin zamansal ve alansal ölçeklere göre sınıflandırılması (Larson vd., 2002)

Şekil 2.1, büyük ölçekli spektrumda kıyısal işlemler için yerel ve bölgesel ölçeklerin zaman ve konum aralıklarında hangi etki ve davranışlara karşılık geldiğini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere katı madde taşınımı bir dalga periyodu ile oluşan türbülanstan yüzyıllar boyunca meydana gelen su seviyesi yükselmesine kadar değişim gösteren mekanizmalardan oluşmaktadır (Larson vd., 2002).

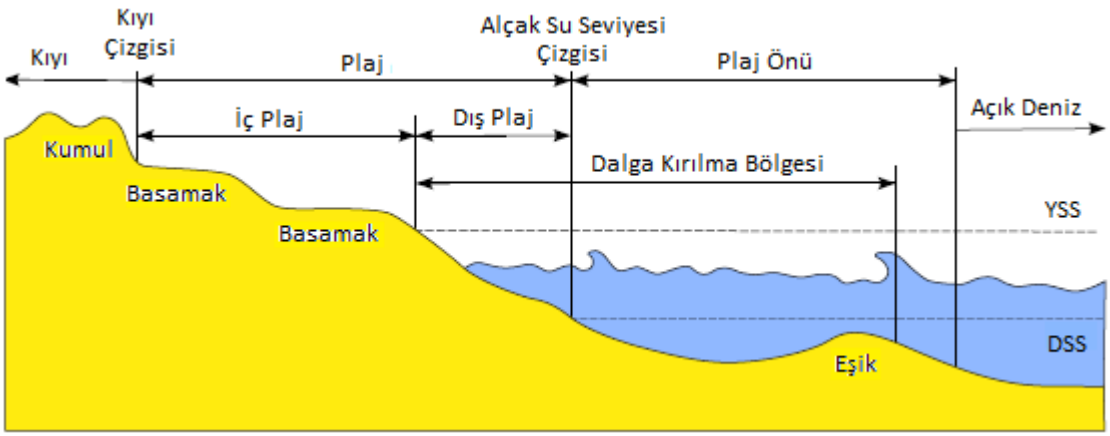
2.2 Katı Madde Taşınım Mekanizmaları

Kıyısal alanlar katı madde taşınım şekline ve miktarına bağlı olarak erozyona uğramakta, yığılmakta ya da stabil kalmaktadır. Katı madde taşınım mekanizması kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyıya dik katı madde taşınımı olarak ikiye ayrılmaktadır. Katı madde taşınım mekanizmasına ait süreçlerin anlaşılabilmesi için Şekil 2.2'de gösterilen kara ve deniz arasındaki geçiş bölgelerinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Kıyı Bölgesi; kıta sahanlığından başlayıp, fırtına kabarması ve dalgalardan etkilenmeyen ilk topoğrafik hatta kadar uzanmakta olup aşağıdaki terimlerden oluşmaktadır:

- Yakın Kıyı Bölgesi: Sahil ve açık deniz arasında kalan bölge olup, dalga kırılmasının başladığı yerdir. Yakın kıyı bölgesinin en belirgin özelliği içerisinde kırılma eşiklerinin yer almasıdır ve bu bölge surf bölgesi olarak da tanımlanmaktadır
- Ön Kıyı Bölgesi: Ortalama düşük su seviyesi ve ortalama yüksek su seviyesi hatları ile sınırlanan bölge olup kıyı çizgisinden düşük su seviyesi hattına kadar uzanan sahil şeridi dir.
- Arka Kıyı Bölgesi: Ortalama yüksek su seviyesi hattı ile kumul topuğu (örnek olarak Hollanda düşey koordinat sistemine +3 m olarak tanımlanmakta) arasında kalan bölge olup ön kıyı bölgesi ile sahili oluşturmaktadır.

- Plaj Gerisi Kumulu: Arka kıyı bölgesinin hemen gerisinde yer alan ve denize doğru olan kumulların oluşturduğu bölgedir (Örnek olarak Hollanda'da genellikle OSS'nin yaklaşık 10 m üzerinde bir yüksekliği vardır).
- Arka Bariyer Bölgesi: Kumulların karaya doğru olan sınırına kadar uzanmakta olup kumul göletleri, bataklıklar, vejetatif bariyer adaları ve su ile kaplanan yelpaze şeklindeki alanlardan oluşmaktadır.
- Kıyı: Ortalama düşük su seviyesinden, fırtına dalgalarından etkilenen kara sınırına kadar devam etmektedir. Kıyı, ön kıyı (ortalama su seviyesi hattı ve yüksek su seviyesi hattı arasında kalan alan) ve arka kıyıdan (genellikle kuru olan kısım) oluşmaktadır.
- Kırılma Bölgesi: Dalgaların kırılmaya başladığı açık deniz sınırından ortalama su seviyesi hattında konumlanan kıyı çizgisine kadar devam etmekte olan ve sınırlarının farklı dalga koşullarına göre değiştiği bölgedir.
- Kapama Derinliği: Kıyı yüzünün deniz sınırı olup, taban seviyesinin belirli bir süre boyunca önemli bir değişiklik göstermediği su derinliğidir.



Şekil 2.2 Kıyı bölgesi tanımları (CERC, 2002)

2.2.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı

Kıyı boyu katı madde taşınım mekanizması, kıyı morfolojisini kontrol eden ve kıyıda erozyon ya da yığılma olaylarının gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirleyen en önemli yakın kıyı olaylarından biridir. Katı madde taşınımına etki eden en önemli neden dalga etkisidir. Dalgalar kıyıya belirli bir açı ile yaklaştırıldıklarında, kıyı boyunca katı madde taşınımına neden olan kıyı boyu

akıntısını oluşturmaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınımının temel mekanizması aşağıdaki gibidir (Yüksel, 2005).

- Dalganın yörüngesel hareketi ile katı taneler hareketlendirilir ve salınımlı bir hareket yaparlar.
- Dalga etkisiyle bir kere hareketlenmiş olan katı taneler akıntı doğrultusunda taşınırlar. Bu akıntılar ya dalga hareketlerinin neden olduğu tek doğrultulu akıntılardır ya da gelgit, rüzgar veya yoğunluk farkının neden olduğu akıntılardır.

Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin genel sınıflandırılması Tablo 2.1 ile verilmiştir.

Tablo 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin genel sınıflandırılması (Yüksel, 2005)

Model	**Sınıflandırma**
CERC (1984)	Enerji modeli,
Davies ve Kamphuis (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini verir.
Sayao, Nairn ve Kamphuis (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini verir.
Bijker (1971)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Engelund-Hansen (Swart, 1976)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Fleming (1977)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Ackers-White (Van der Graaf ve Van Overee, 1979)	Hareketin başlangıç kriteri vardır.
Ackers-White (Flemin ev Swart, 1982)	Dalga ve akıntı şartlarının geniş bir aralığından üretilen harekete başlangıç kriteri vardır.
Nielsen (1979,1985)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur
Kamphuis (1991)	Kıyı eğimi ve taban malzemesi özelliklerini dikkate alır.

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesinde dört farklı yönteme dayalı ampirik formüller kullanılmaktadır. Bu yöntemler; i) enerji akısı yöntemi,

ii) akıntı, iii) kuvveti yöntemi, iv) boyutsal analiz yöntemi ve kuvvet dengesi yöntemidir. Bu yöntemlere bağlı olarak, belirli bir zaman diliminde meydana gelen taşınım miktarına kıyı boyu katı madde taşınım miktarı denir. Bu katı madde taşınım miktarı belirli bir zaman aralığında farklı yönlerden gelen dalgalara göre hesaplandığından bu noktada net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tanımlaması yapılmalıdır.

2.2.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı

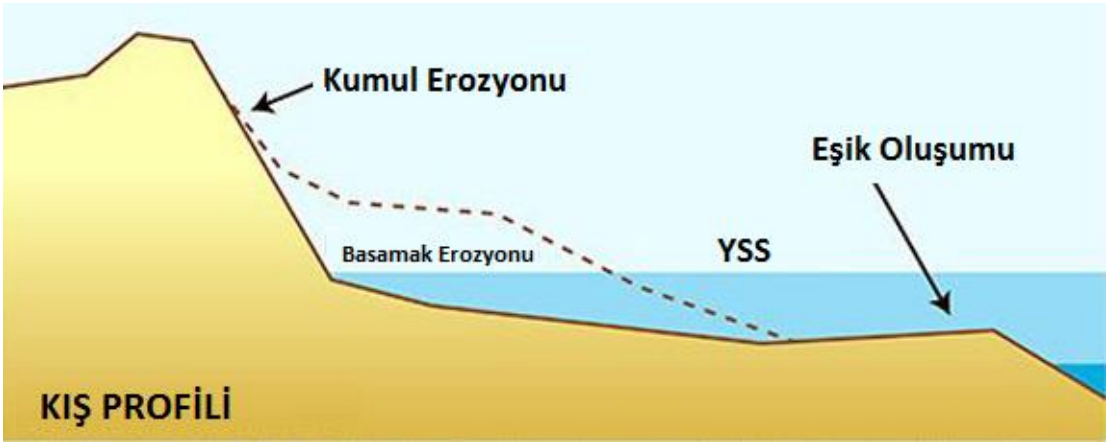
Dalgalar kıyı çizgisiyle belirli bir açı yaparak kırıldıkları anda sahip oldukları enerjinin kıyı çizgisine paralel bileşeni kıyı boyu katı madde taşınımını oluşturuken, kıyı çizgisine dik bileşeni ise kıyıya dik katı madde taşınımına sebep olmaktadır. Kıyıya dik doğrultudaki katı madde taşınımı açık denize doğru ise kıyıda erozyon meydana gelirken, taşınım kıyıya doğru ise kıyıda yığılma meydana gelmektedir (Arı, 2009).

Surf bölgesi dışında kıyıya dik katı madde taşınımı kıyıya doğru iken, surf bölgesi içinde net yörüngesel hızın etkisi ve net geri dönüş akımı arasındaki dengeye bağlı olarak kıyıya veya açık denize doğru taşınım yönü değişmektedir. Fırtına sırasında kıyıya dik katı madde taşınım yönü açık denize doğru gelişmektedir ve bu durum kıyı çizgisinin geri çekilmesine yani kıyıda erozyon olayının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu aşamada erozyona uğrayan katı maddeler ise kırılma bölgesi içinde yakın kıyıdaki bir eşikte yığılmaktadır. Eşikte yığılan katı maddelerin tekrar kıyıya taşınarak kıyı basamağının yeniden oluşması sonucu kıyının yenilenmesi genellikle normal soluğan koşullarında gerçekleşmektedir (Dabees, 2000).

Kıyıya dik katı madde taşınımı, öncelikle kıyı profillerinin oluşumunda başta olmak üzere kıyı çizgisi değişimi ve deniz yapılarının stabilitesi üzerinde büyük önem taşımaktadır. Kıyıya dik katı madde taşınımı dalga etkisinde ve akıntı etkisinde oluşabildiği gibi her iki durum etkisinde de meydana gelmektedir. Kıyıya dik katı madde taşınımı incelendiğinde, çok karmaşık bir mekanizmanın mevcut olduğu görülmüştür. Bu alanda birçok bilim insanı çalışmalar yürütmüş, kendi kabulleri doğrultusunda CERC, Ostran, Crostran gibi farklı birçok model ve sonuç elde etmişlerdir (Yüksel, 2011).

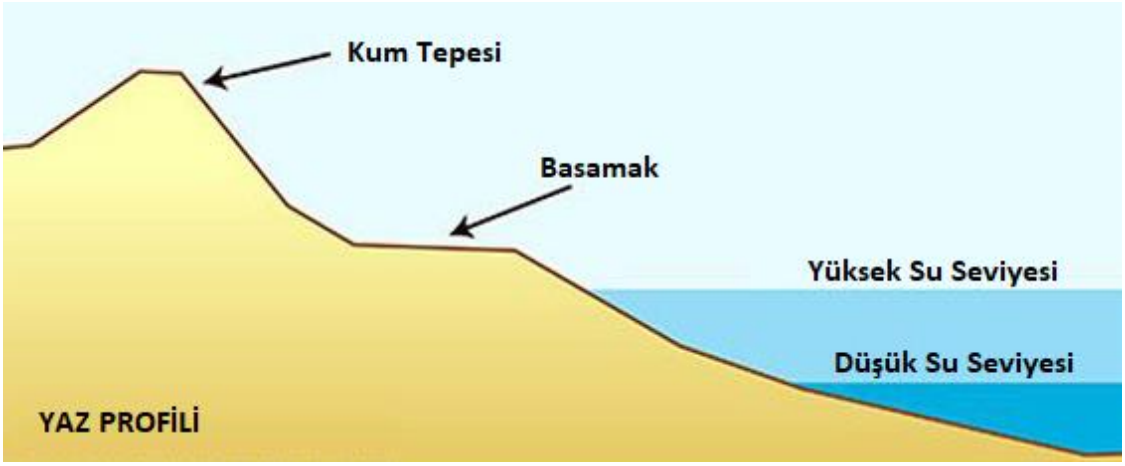
Kıyıya dik katı madde taşınımı sonucunda oluşan profiller ise bir kıyı çizgisinin temel özelliği olup, zaman içinde değişken özelliğe sahip kıyı batimetrisinin belirli dalga ve akıntı koşullarında sahip olduğu şekil olarak tanımlanmaktadır (Yüksel, 2011). Kıyılar, kendilerine etki eden dalga, akıntı ve su seviyeleri gibi çevresel koşullara yanıt vermekte olup çevresel koşullar sabit olduğunda kıyı profili de stabil bir şekle ulaşmaktadır. Bu noktada profilin her noktasında sürekli katı madde taşınım hareketi devam edecek olsa da kıyıya dik net katı madde taşınımı sıfır olmakta ve bu durum "denge profili" olarak adlandırılmaktadır (Kamphuis, 2010).

Fırtınalı havalarda kıyıda oluşan profile "fırtına profili" ya da "kış profili" adı verilmektedir (Kapdaşlı, 1992). Kış profilinde, dalga şartları daha şiddetli olduğu için malzemeler açığa doğru hareket etmekte ve kıyı eğimi azalmaktadır. Malzemelerin açığa doğru taşınmaları sonucunda da profilin en belirgin özelliği olan açık kıyı eşikleri ya da diğer adıyla açık deniz tarafında kum tepeleri oluşmaktadır. Taşınımın tırmanma sırasında eğime ters yönde, geri dönüş sırasında ise eğimle aynı yönde olması sebebi ile malzemelerin taşınımı tırmanma sırasında az, geri dönüş sırasında ise daha çok olmaktadır. Böylelikle fırtına başlangıcından kısa bir süre içinde kıyıda erozyon meydana gelmektedir. Oluşan bu erozyon daha önce kıyıya yakın kırılan dalgaların açığa taşınımı sebebi ile oluşan kum tepeleri üzerinde kırılıp enerjilerini kaybetmeleri ile son bulmaktadır (Yüksel, 2011).



Şekil 2.3 Fırtına (kış) profili (Friend of Island State Beach Park, Science of the Shore, 2022)

Fırtınalı havalar dışında normal deniz koşullarında meydana gelen profile ise "normal profil" ya da "yaz profili" denmektedir. Yaz profilinde ortalama dalga yüksekliği azalırken ortalama periyot artmakta ve malzeme kıyıya doğru taşınmaktadır. Açıktan kıyıya doğru taşınım ile kıyı yenilerek eğim daha dik hale gelmektedir. Bu doğrultuda profilin temel özelliği olan basamak oluşmaktadır. Normal profil üzerinde tırmanan su kütlesinin bir kısmı yeraltına sızmaktadır. Tırmanma sırasında büyük su kütlesinin hareketi geri dönüş sırasında zayıf hale gelmekte ve bu yüzden kıyıda katı madde yığılması meydana gelmektedir (Yüksel, 2011).



Şekil 2.4 Normal (yaz) profil (Friend of Island State Beach Park, Science of the Shore, 2022)

2.3 Kıyı Morfolojisi ve Modellenmesi

2.3.1 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı

Kıyısal alanların ve bariyer adalarının morfolojik gelişimini/değişimini tahmin etmek için genel olarak kıyı boyu katı madde taşınımının güvenilir hesaplarına ihtiyaç duyulmaktadır (Bayram vd., 2007). Kıyı morfolojisinin gelişimi karmaşık fiziksel süreçler içerdiğinden, matematiksel ifadelerle tam olarak tanımlanamamaktadır. Saha ölçümü ve laboratuvar deneyleri ile desteklenen sayısal modeller kıyı morfolojisinin gelişimini tanımlamaya çalışmaktadır. Kıyı gelişimine ait sayısal modeller, basit bir boyutludan daha karmaşık olan üç boyutlu modellere doğru gelişen çeşitlere sahiptir. Her model türünün uygulanabilirliği, koşulların gerektirdiği alansal ve zamansal ölçeklere göre değişiklik göstermektedir (Dabees, 2000). Sayısal modeller, laboratuvar deneyleri ve saha gözlemleri ile fizik kurallarını esas alan formüllere göre çözümler ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, uzun dönemli kıyı morfolojisi değişim tahmini; saha araştırmaları, analiz ve gözlemler ile birlikte güvenilir ve sürekli rüzgar-dalga verilerini gerektirmektedir (Arı vd., 2006).

Gelecekteki kıyı morfolojisini tahmin etmek için dalga yüksekliği ve dalga doğrultusundaki değişimlerin katı madde taşınımı üzerindeki etkilerinin anlaşılması büyük önem arz etmektedir. Çünkü iklim sistemindeki uzun dönemde meydana gelen değişiklikler kıyı boyu katı madde taşınımında sapmalara neden olmakta ve kumsal kıyılarda alansal değişimlere (erozyon/yığılma) sebebiyet vermektedir (Splinter vd., 2012).

2.3.2 Küresel İklim Değişikliği ve Kıyı Morfolojisi

İklim sistemi dünyanın varoluş sürecinden bugüne kadar geçen 4.5 milyar yıllık tarih içerisinde sürekli doğal değişim içerisinde olmuştur. Bilinen en önemli doğal iklim değişiklikleri buzul ve buzul arası dönemlerde oluşmuştur. 19. yüzyılın ortalarından itibaren de iklim sisteminin doğal değişim sürecine insanoğlu dahil olmuştur. Bu sebeple günümüzde iklim değişikliği atmosferdeki sera gazı birikimlerini artıran insan etkinlikleri de dikkate alınarak tanımlanmaktadır.

Aşağıda küresel iklim değişikliği için yapılan farklı tanımlamalar ifade edilmiştir (Türkeş vd., 2000).

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne göre iklim değişikliği; "Karşılaştırılabilir bir zaman periyodunda gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan ya da dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan etkinlikleri sonucunda iklimde oluşan bir değişiklik" olarak tanımlanmıştır. Türkeş (1997a)'da yapılan tanıma göre göre iklim değişikliği; "Nedeni ne olursa olsun iklim koşullarındaki büyük ölçekli (küresel) ve önemli yerel etkileri bulunan, uzun süreli ve yavaş gelişen değişiklikler" olarak açıklanmaktadır.

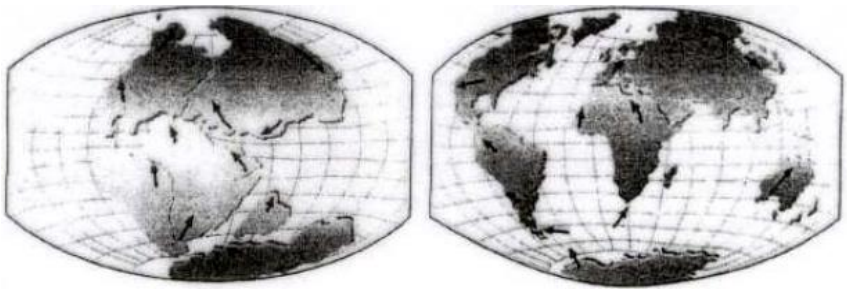
Bu doğrultuda küresel ısınma ve küresel iklim değişikliğinin aynı kavram olmadıklarını da belirtmek gerekmektedir. Küresel ısınma en genel biçimde zaman içerisinde atmosfer sıcaklığında meydana gelen artış olarak tanımlanmakta olup insan kaynaklı iklim değişikliğinin en belirgin göstergelerinden biridir. Diğer bir deyişle küresel ısınma, küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır (Okçu ve Aslan, 2007).

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı üzere iklim değişikliği denildiğinde yalnızca hava sıcaklığındaki değişimden bahsedilmemektedir. Hava ile iklim arasındaki önemli farklardan birinin "zaman" kavramının olduğu unutulmamalıdır. Kısa süreli atmosfer olayları hava olarak nitelendirilirken, iklim değişimi ise hem doğal süreçler hem de insan kaynaklı etkiler sebebi ile atmosferin kimyasal bileşenlerindeki uzun süreli değişimler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Genel olarak küresel iklim değişikliğine sebep olan parametreler şu şekilde özetlenebilir;

- Sera etkisi
- Sera gazı birikimindeki değişim boyutu
- Sülfat parçacıkları
- Güneş ışınımındaki değişiklikler

Dünyanın bu uzun jeolojik tarihi boyunca meydana gelen iklim değişiklikleri yalnızca dünya coğrafyasını değiştirmekle kalmamış ekolojik sistemlerde de değişiklikler oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 2.5 180 milyon yıl önceki ve günümüzdeki karaların dağılışı (Öztürk, 2002)

Bu sebeple küresel iklim değişikliğinin hem küresel hem de bölgesel olarak farklı etkiler ortaya çıkardığı ve çıkarmaya devam edeceği düşünülmekte olup bu etkilerin tarım, orman ve bitki örtüsü, temiz su kaynakları, deniz seviyesi, enerji, insan sağlığı ve bio çeşitlilik kavramları üzerine olacağı beklenmektedir. Bu kapsamda görülmesi beklenen olası etkileri Tablo 2.2 ile ifade edilmiştir (Doğan ve Tüzer, 2011).

Tablo 2.2 Küresel iklim değişikliğinin potansiyel etkileri (Kayhan, 2007)

Deniz Seviyesinde Yükselme ve Sahil Bölgeleri	**Enerji**	**İnsan Sağlığı**	**Tarım**	**Doğal Çevre ve Türler**	**Su Kaynakları**	**Ormanlar**
Sahillerde erozyon	Enerji politikalarında değişim	İklim bağlantılı ölümler	Ürün kayıpları	Doğal yaşam alanlarında kayıplar	Su arzında azalma	Orman kompozisyonu
Sel ve taşkınlar	Enerji tüketiminde değişim	Salgın hastalıkları	Sulama problemleri	Tür çeşitliliğinde azalma	Su kalitesinde düşüş	Ormanların coğrafi dağılımında değişme
Kıyılarda yerleşik toplulukları koruma maliyetleri	Enerji maliyetlerinde değişim	Hava kalitesinde düşüş	Tarım alanlarında değişim		Su kaynakları için rekabet	Orman sağlığı ve verimliliğinde düşüş

Küresel iklim değişikliğinin anlaşılması için küresel çaplı meteorolojik olayların incelenmesi gerekmektedir ve bu olayların en önemlisi tropikal kasırgalardır. Küresel iklim değişikliğinin kasırgalar üzerindeki sonuçları incelendiğinde şu tespitler elde edilmiştir. Atlas Okyanusunda 1900-1920 yılları arasında 134 kasırga meydana gelirken, 1985-2005 yılları arasında 261 kasırga meydana gelmiştir. Kasırga sayıları ile benzer olarak kasırgaların kuvvetleri de artış göstermiştir (Kayhan, 2007).

Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak kuvveti ve sıklıkları artış gösteren bu kasırgaların meydana gelmesi, buzulların erimesi, okyanus sıcaklık ve akıntılarının değişmesi sonucunda kıyı sistemlerinde uzamsal ve zamansal ölçeklerde ciddi boyutta değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler kumul alanların dengesiz yer değiştirmesi, sulak alan değişikliği ve kaybı, büyük taşkınların oluşumu ve erozyon süreçleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu süreçler sonucunda kıyı morfolojisi de sürekli değişim göstermekte olup kıyısal alanlardaki yaşam şeklini ve toplumların direncini etkilemektedir.

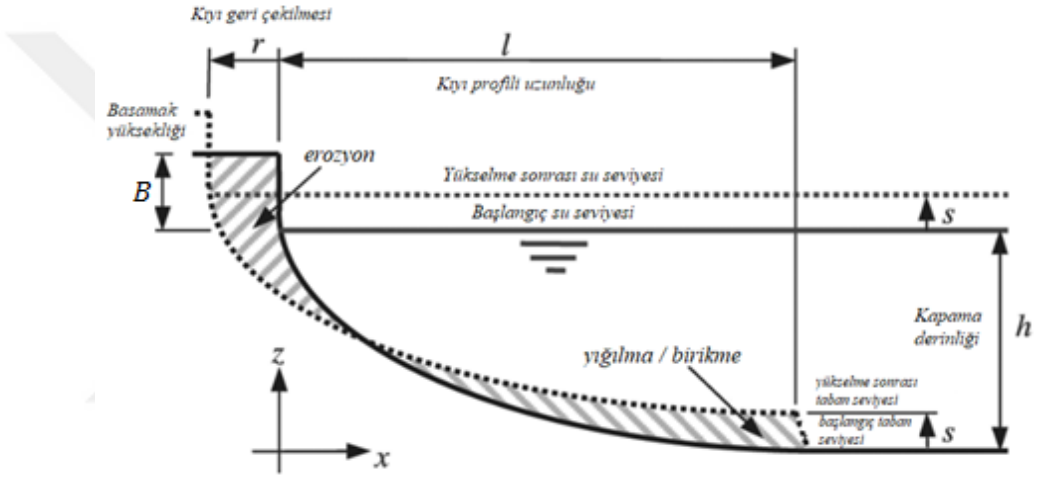
Küresel İklim Değişikliği etkisi ile 19. yüzyılın sonlarından itibaren artış göstermekte olan "Küresel Deniz Seviyesi Yükselmesi"nin de kıyısal alanların geleceği için ciddi derecede tehdit arz ettiği düşünülmektedir. Çalışmalar, deniz seviyesi yükselmesi karşısındaki kıyı davranışlarını araştırmaya devam etmekte olup kumsal kıyıların aşınması muhtemel gözükmektedir, ancak fiziksel süreçler ve (beklenen) kıyı geri çekilmesinin büyüklüğü belirsizliğini korumaktadır.

Kumsal kıyıların deniz seviyesi yükselmesine karşı gösterdiği davranışı tahmin etmede kullanılan en yaygın yaklaşım "Bruun Kuralı"dır (Bruun, 1954; Bruun, 1962; Bruun, 1988). Bu kural, kıyı çizgisinden denize doğru bir kapama derinliğine uzanan, uzun dönemli ortalama profil şekli ile tanımlanan denge profili kavramına dayanmaktadır. "Denge profili" şeklinin, katı madde büyüklüğü ile hakim dalga iklimininin bir fonksiyonu olduğu konusunda genel bir fikir birliği vardır (Dean, 1991). Bruun (1962)'de denge profilinin deniz seviyesi yükselmesi sırasında korunmasını ve deniz seviyesindeki artış ile eşleşmesi için profilin düşey doğrultuda yükselmesi önerilmektedir. Bruun (1962) çalışmasında deniz seviyesi

yükselmesine bağlı olarak düşey yükseklik (S), basamak yüksekliği (B), kapama derinliği (h)'nin bir fonksiyonu olarak yatay kıyı çizgisi geri çekilmesinin (R) tahmin edilmesi için yaygın olarak kullanılan aşağıdaki denklemi geliştirmiştir.

$$R = \left(\frac{L}{B+h} \right) S \tag{2.1}$$

Deniz seviyesi yükselmesi ve kıyı çizgisindeki geri çekilmeler arasındaki geometrik ilişkinin ilk kez öneriliyor olması sebebi ile Bruun Kuralı'nın, deniz seviyesi yükselmesine karşı kıyı davranışlarını ne kadar iyi tahmin edebileceği konusunda çelişkili ifadeler söz konusudur.



Şekil 2.6 Bruun Kuralı'na göre kıyı geri çekilmesi (Bruun, 1962)

Deniz seviyesi yükselmesinin denge profili gelişimi üzerindeki net etkisini ve doğadaki bir kıyı geri çekilmesini gözlemleyip ölçmek için pek çok doğal zorlukların olması sebebiyle zaman ölçeği dikkate alınmalıdır. Bruun Kuralı'nın tek yayınlanan laboratuvar çalışması 50 yıl önce Schwartz (1967) ile yapılmıştır. Bu çalışmada 1 m x 2.3 m'lik dalga baseninin kullanıldığı iki küçük ölçekli laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiş olup bu deneyler ile Bruun Kuralı'nın, deniz seviyesi yükselmesi sebebi ile oluşan kıyı geri çekilmesini niteliksel olarak tahmin etmek için kullanılacağı sonucuna varılmıştır. Buna karşılık bu sonuçlardan 25 yıl sonra Okyanus Araştırmaları Bilim Komitesi (1991) o zamanki mevcut kanıtların tümünü gözden geçirerek Bruun Kuralı'nın yalnızca kıyı şeridinin bölgesel yaklaşımı için kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Daha yakın zamanlarda ise

Cooper ve Pilkey (2004) çalışmasında bu sonuçları yeni saha çalışmaları eşliğinde yeniden değerlendirmiş ve Bruun Kuralı'nın mevcut kıyı mühendisliği uygulamalarından çıkarılmasını tavsiye etmiştir.

Bruun Kuralı'nın kıyı planlaması ve tasarımına uygulanışı göz önüne alındığında, modern araştırmacılar daha fazla bütünsel yaklaşımlar benimsemiştir ve bu da aktif katı madde birikimi için ek kaynak oluşturmuştur. Bununla birlikte bu çalışmalar Bruun Kuralı'nın deniz seviyesi yükselmesi kaynaklı kıyı çizgisi geri çekilmesini tahmin etmedeki etkisi için yetersiz kalmaktadır. Bu belirsizliklere rağmen Bruun Kuralı (Denklem 2.1), kolay uygulanıyor olması ve pratik bir alternatif eksikliği sebebi ile kıyı politikası ve yönetiminde deniz seviyesi yükselmesine karşı kıyı davranışını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir.

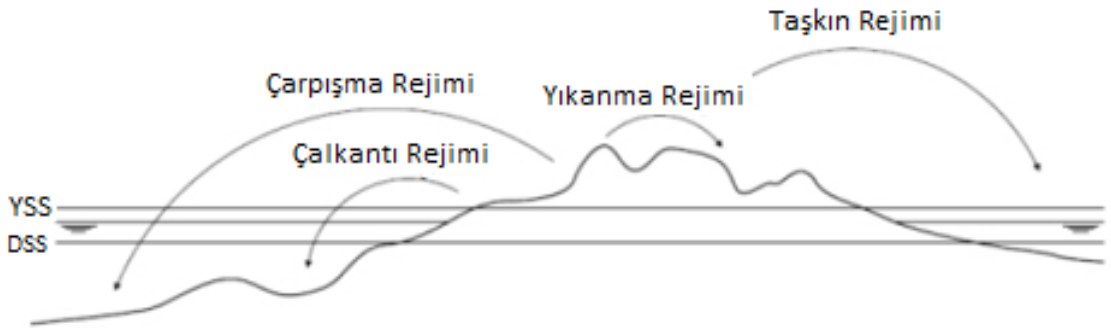
Deniz seviyesi yükselmesine sahip olan kumsal kıyı şeridi davranışları hala iyi anlaşılamamıştır ve şu anda mevcut değişiklikleri tahmin etmek için kullanılan modeller büyük ölçüde test edilmemiş veya doğrulanmamıştır. Bununla birlikte, kıyı duvarı formunda kıyı korumasının kıyı davranışlarını nasıl değiştirebileceğine dair çok az bilgi bulunmaktadır. Bu soruları ele almaya başlamak için, Beuzen (2018) çalışmasında fiziksel laboratuvar deneyleri ile deniz seviyesi yükselmesine karşı kıyı davranışı araştırılmış ve 1960'larda Schwartz (1967) çalışmasında ilk olarak küçük ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Burada sunulan çalışma, kıyı duvarları ile korunan kıyılarda deniz seviyesi yükselmesine göre kıyı davranışı değerlendirmiştir. Bu çalışma, Atkinson vd., (2018) ile yapılan kapsamlı laboratuvar araştırmalarını tamamlayıp genişleterek deniz seviyesi yükselmesine karşın hiçbir yapıya sahip olmayan kıyılardaki davranışları ve Bruun Kuralı'nın gözlemlenen profil gelişmini tahmin etmedeki etkinliğini değerlendirmiştir.

2.3.3 Katı Madde Taşınımındaki Morfolojik Süreçler

Küresel iklim değişikliği sebebi sonucunda formları ve sıklıkları değişen fırtınalar etkisinde kıyı morfolojisinde değişimler meydana gelmektedir. Kıyı bölgesinde bir fırtına kabarması meydana geldiğinde farklı katı madde taşınım süreçleri gelişmektedir. Sallenger (2000) çalışmasında, meydana gelen bu taşınım

süreçlerini anlaşılır kılabilmek ve fırtına etkilerine karşı kıyı davranışlarını açıklamak için "Fırtına Etkisi Ölçek Sistemi" adı altında dört ölçek tanımlamıştır. Bunlar;

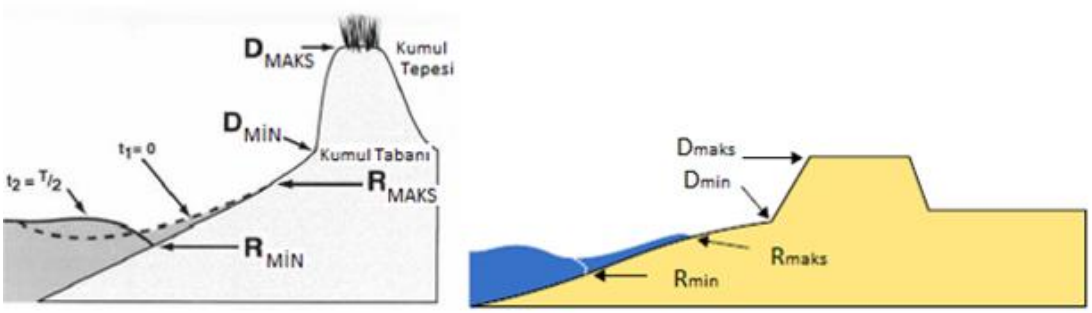
- Çalkantı rejimi (swash)
- Çarpışma rejimi (collusion)
- Su ile kaplanma (yıkanma) rejmi (overwash)
- Taşkın rejimi (inundation)



Şekil 2.7 Fırtına etkisinde katı madde taşınım rejimleri (CERC, 2003)

Bu rejimler kıyı bölgesinde meydana gelen fırtınalar sonrasında kumul sistemlere ait morfolojik süreçler hakkında bilgi sağlamakta olup Şekil 2.8'de gösterilen parametreler ile ifade edilmektedir. Bu parametreler;

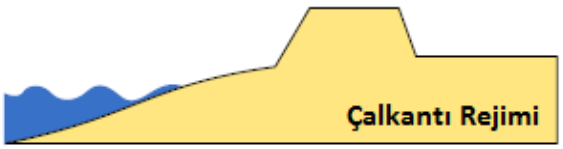
- D_{maks} = Maksimum tırmanma seviyesi, (gelgit + fırtına kabarması + dalga tırmanması)
- D_{min} = Maksimum geri çekilme seviyesi, (gelgit + fırtına kabarması + dalga geri çekilmesi)
- R_{maks} = Birincil kumul tepe yüksekliği
- R_{min} = Birincil kumul taban yüksekliği



Şekil 2.8 Fırtına etkisi ölçek sisteminde Sallenger terminolojisi (Sallenger, 2000)

2.3.3.1 Çalkantı Rejimi

Çalkantı rejimi en düşük fırtına etkisinde oluşmakta olan ve düşük enerjili fırtına koşullarını temsil eden rejimdir. Çalkantı rejiminin $\frac{R_{maks}}{D_{maks}} < \frac{D_{\min}}{D_{\min}}$ ya da $R_{maks} < D_{\min}$ şartlarında meydana gelmekte olup tırmanma ile sınırlı kalmaktadır. Bu rejimde kıyıdan açık denize doğru katı madde taşınımı gerçekleşmektedir. Fırtına sonrasında açık denize doğru taşınan katı maddelerin kıyıya geri dönüşü hafta veya aylar mertebesinde sürmektedir. Bu nedenle kıyıda çok az bir net taşınım meydana gelmektedir. Çalkantı rejimi Şekil 2.9 ile gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Fırtına etkisi ölçek sisteminde çalkantı rejimi (Sallenger, 2000)

2.3.3.2 Çarpışma Rejimi

Çarpışma rejimi çoğunlukla kumul erozyonu ile ilişkili olup, tırmanma kumul tepesi yüzü veya tabanına ulaştığı anda meydana gelmektedir. Çarpışma rejminin oluşma şartları $\frac{R_{maks}}{D_{maks}} \leq \frac{D_{\min}}{D_{maks}} < 1$ ya da $D_{min} < R_{maks} < D_{maks}$ gibidir. Sallenger (2000) çalışmasına göre tırmanma kumul yüzüne ulaşmakta ve kıyıdaki katı maddeleri açık denize taşımaktadır. Bu rejimde çalkantı rejiminde olduğu gibi taşınan katı maddeler kıyıya dönüş yapmamaktadır ve bu sebeple bu rejimde net bir erozyon meydana gelmektedir. Çarpışma rejimi Şekil 2.10 ile aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Fırtına etkisi ölçek sisteminde çarpışma rejimi (Sallenger, 2000)

2.3.3.3 Su ile Kaplanma (Yıkanma) Rejimi

Su ile kaplanma (yıkanma) rejimi $\frac{R_{maks}}{D_{maks}} > 1$ ve $\frac{R_{\min}}{D_{maks}} < 1$ ya da $R_{maks} > D_{maks}$ ve $R_{min} < D_{maks}$ şartlarında meydana gelmektedir. Bu rejimde tırmanma, ilk savunma hattının yüksekliğini, kumul sırtını veya mevcut değilse basamak tepesini aşmaktadır. Kum, karaya doğru net şekilde (10-100 m) taşınmaktadır ve fırtına sonrasında açık denize doğru geri dönmemektedir. Bu sebeple açık denizde net erozyon karada ise net yığılma meydana gelmektedir. Yıkanma rejiminden sonra yedi farklı kıyıya dik profil oluşmaktadır. Bunlar;

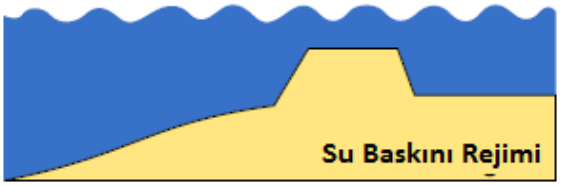
- Kret (tepe) birikimi
- Karaya ötelenme
- Kumul düşüşü
- Kumul tahribatı
- Bariyer birikimi
- Bariyer devrilmesi oluşumu
- Bariyer dağılması



Şekil 2.11 Fırtına etkisi ölçek sisteminde su ile kaplanma (yıkanma) rejimi (Sallenger, 2000)

2.3.3.4 Su Baskını Rejimi

Su baskını rejimi $\frac{R_{\min}}{D_{maks}} > 1$ ya da $R_{min} > D_{maks}$ şartlarında meydana gelmektedir. Fırtına kaynaklı deniz seviyesi yükselmesi fırtına kabarması ile yıkanma ileri boyuta taşınmaktadır. Bu şartlarda tüm kıyı bölgesi tamamen ve sürekli olarak sular altında kalmaktadır. Bu rejim sırasında, bariyer adalarında adayı kanal gibi kesen geçitler açılmaktadır. Kıyılar tamamen su altında kaldığında ilgili morfolojik süreçler netliğini kaybetmektedir.



Şekil 2.12 Fırtına etkisi ölçek sisteminde su baskını rejimi (Sallenger, 2000)

2.3.4 Kıyı Morfolojsinin Modellenmesi

Kıyı gelişimi, basit tek boyutlu sayısal modellerden gelişmiş üç boyutlu sayısal modellere kadar farklılık göstermektedir. Her model tipinin uygulanabilirliği, problemin gerektirdiği alansal ve zamansal ölçeklere göre değişmektedir. Gelişmiş bir 3-D modeli, kıyı profillerinin kısa dönemli gelişimleri için kullanılırken, basit bir 1-D modeli ise kıyı çizgisinin uzun dönemli değişimlerinin zamandan bağımsız simulasyonlarında kullanılmaktadır. Mevcut morfoloji modelleri üç ana gruba ayrılmaktadır (Dabees, 2000):

- Kıyı profili modeli
- Kıyı çizgisi değişimi modeli
- 3-D kıyı değişim modeli

Kıyı profili değişim modelleri, fırtına nedeniyle oluşan kıyı erozyonu ve yenilenmesi ile dalga hareketine karşı plaj malzemesinin başlangıçtaki davranışını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu tip profil modelleri, kıyıya dik katı madde taşınımı ile oluşan kısa dönemli profil gelişimlerini modellemektedir.

Kıyı çizgisi değişiminin sayısal modellemeleri ise analitik kıyı çizgisi değişim modellerinin genelleştirilmiş halidir. Bu modeller, kıyı çizgisi gelişiminin zamanla ve konumla değişimini, kıyı yapısını, dalga iklimini ve sınır şartlarını tüm detayları ile benzeştirebilmektedir.

Üç boyutlu kıyı gelişim modelleri de gelişmiş 3-D modellerinden, gelişmiş tek çizgi teorisi modellerine kadar farklılık göstermektedir. Hidrodinamik ve morfolojik değişimi hesaplayan tam donanımlı 3-D modelleri çok kullanışlı olmamaktadır ve bu modeller arasında en kullanışlısı yarı 3-D modellerdir.

2.3.4.1 Kıyı Profili Değişimlerinin Sayısal Modeli XBeach

XBeach kilometreler boyunca uzanan kumsal kıyılarda meydana gelen fırtınaların zaman ölçeğindeki hidrodinamik ve morfodinamik süreçlerini ve etkilerini benzeştirmek için geliştirilmiş, 2 boyutlu (derinlik ortalamalı) ve açık kaynaklı sayısal bir yazılımdır. XBeach ifadesi, eXtreme Beach kelimesinin kısaltması olup, bu yazılım Deltares ve Delft Üniversitesi tarafından oluşturulmuştur. Sonlu hacimler metoduna dayanan yazılım, dalga enerjisi, akım ve dalga ilerlemesi, katı madde taşınımı ve taban seviyesi morfolojik değişimini çözebilmektedir.

Model, kısa dalga transformasyonu (sapma, sığlaşma ve kırılma), uzun dalga (yerçekimi dalgası) transformasyonu (üretim, yayılma ve dağılma), dalga kaynaklı kabarma ve kararsız akıntıları, ayrıca yıkanma (overwash) ve su baskını (inundation) hidrodinamik süreçlerini içermektedir. Modelin morfodinamik süreçleri arasında, sürüntü malzemesi ve askıda katı madde taşınması, kumul heyelanı (avalanching), yatak/taban yenilenmesi ve gedik ve geçit açılması (breaching) da yer almaktadır. Ayrıca modelde bitki örtüsü ve sert yapıların etkileri de dikkate alınmaktadır.

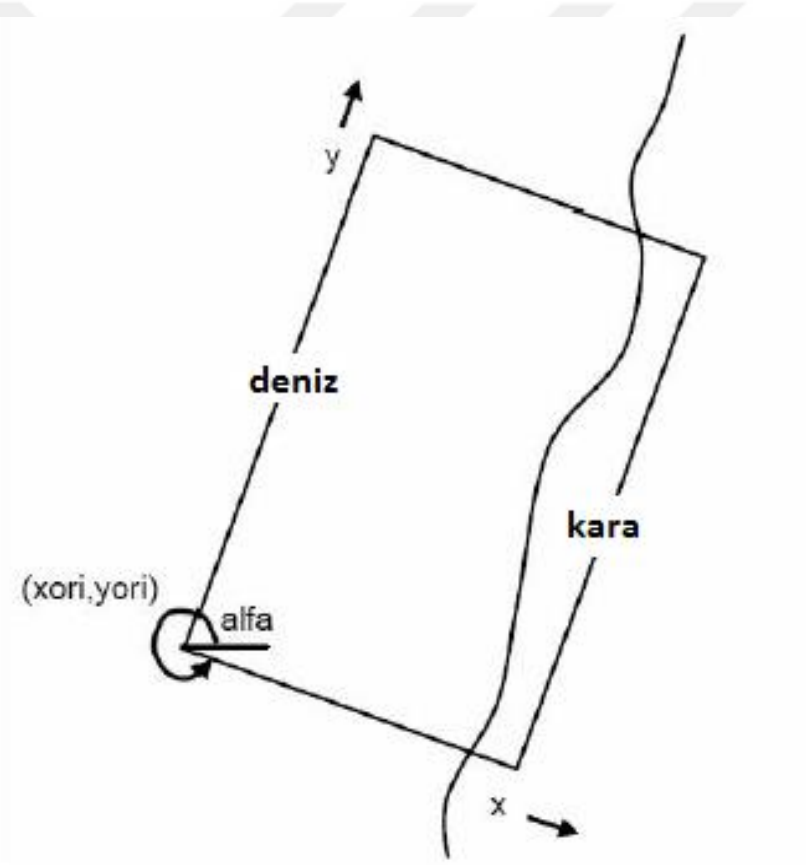
Özetle XBeach, birleşik kısa dalga enerjisi, akış ve infra-ağırlık dalgası yayılımı, katı madde taşınımı ve taban seviyesi değişimini çözerek kumul erozyon profil gelişimini modelleyebilmektedir (McCall vd., 2010).

XBeach'de hidrostatik ve hidrostatik olmayan mod olmak üzere iki çalışma modu vardır. Hidrostatik modda, kısa dalga genlik değişimi, uzun dalgalardan,

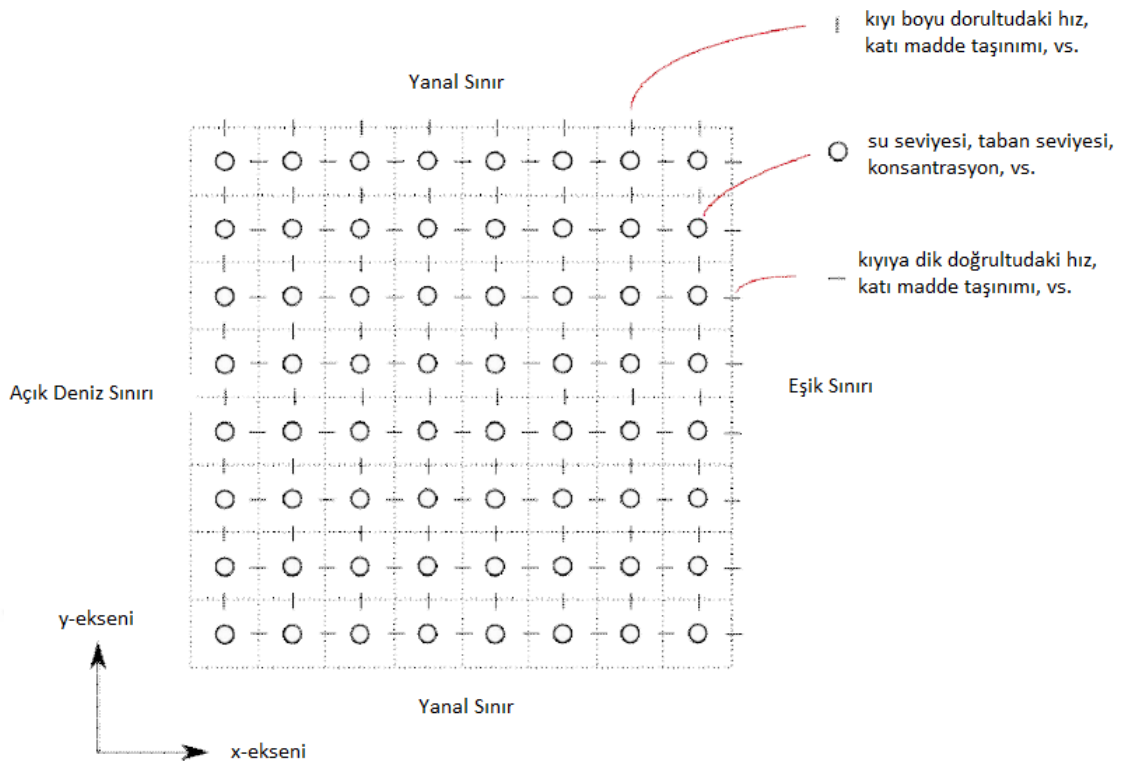
akımlardan ve morfolojik değişikliklerden ayrı olarak çözülmektedir. Bu mod önemli miktarda hesaplama süresi kazandırmaktadır. Daha eksiksiz bir mod olan hidrostatik olmayan mod ise kısa dalga hareketleri dahil tüm işlemleri çözmekte ancak daha fazla hesaplama adımından oluşmaktadır.

- Koordinat ve Ağ Sistemi

XBeach kıyıya dik bir x ekseni ve kıyı boyunca bir y ekseninden oluşan koordinat sistemini kullanmaktadır (Şekil 2.13). XBeach grid (ağ) sistemi; taban seviyeleri, su seviyeleri, su derinlikleri ve konsantrasyonların hücre merkezlerinde tanımlandığı, katı madde taşınımı ve hızların ise hücre ara yüzlerindeki u ve v noktalarında tanımlandığı kademeli bir ağ sistemidir (Şekil 2.14).



Şekil 2.13 XBeach koordinat sistemi (Roelvink vd., 2009)



Şekil 2.14 XBeach kademeli ağ sistemi (Roelvink vd., 2009)

Dalga enerji dengesinde gerilme akılarına ait gradyanlar hücre ara yüzlerindeki u ve v noktalarında tanımlanırken; enerji roller (kırılma kaynaklı çevri) enerjisi ve gerilme akıları hücre merkezlerinde tanımlanmaktadır.

Sırasıyla uu ve vv çıktı değişkenleri ifade edilen hücre merkezlerindeki u ve v hızları interpolasyon ile elde edilmektedir. z_s su seviyesi ve z_b taban seviyesinin her ikisi de yukarı doğru pozitif olarak tanımlanmaktadır. uv ve vu hızları sırasıyla v noktasındaki u hızı ve u noktasındaki v hızı olup kendisini çevreleyen 4 noktadaki hız değerlerinin interpolasyonu ile elde edilmektedir.

- **XBeach Model Denklemleri**

XBeach, spektral dalga ve akıntı sınır koşulları için dalga yayılımı, akıntı, katı madde taşınımı ve taban değişimlerine ait 2 boyutlu yatay denklemleri çözümlemektedir. Yazılım, fiziksel süreç, girdi ve batimetri, dalga koşulları, akıntı, gelgit ve kabarma, katı madde, morfoloji ve çıktı seçeneklerine ait parametreler ile fiziksel sabitlerden oluşmakta olup aşağıdaki denklemleri kullanmaktadır.

- Dalga Hareketi Korunum Denklemi

- Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) Enerji Denklemi
- Sığ Su Denklemi
- Katı Madde Taşınım Denklemleri
- Morfoloji Değişimi

- **Dalga Hareketi Korunum Denklemi**

Sığ su momentum denklemindeki dalga kuvveti, zamana bağlı dalga hareketi korunum denkleminden elde edilmektedir. XBeach, zamana bağlı kısa dalga hareketi korunum dengesini, dalga grupları ölçeğinde çözmektedir. Delft Üniversitesi'nin (sabit, stationary) HISWA modeline benzer şekilde, kısa dalga etki yoğunluğunun yönsel dağılımı dikkate alınırken, frekans spektrumu en iyi $f_{m-1,0}$ spektral parametresi ile gösterilen tek bir temsili frekansla tanımlanmaktadır. Dalga hareketi korunumu denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial C_x A}{\partial x}+\frac{\partial C_y A}{\partial y}+\frac{\partial C_\theta A}{\partial \theta}=-\frac{D}{\sigma} \tag{2.2}$$

Burada dalga hareketi yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$A(x,y,\theta)=\frac{E(x,y,\theta)}{\sigma(x,y)} \tag{2.3}$$

Dalga hareketi korunumu denklemindeki x ve y hızları, dalga akıntı etkileşimi dikkate alınıyorsa grup hızı ve akıntı bileşenlerinin toplamını temsil etmektedir. Hızlar, taban ve akıntılardan kaynaklanan sapmayı dikkate almaktadır.

XBeach, dalga dönmesini hesaplamamakta ve rüzgar kaynaklı dalgalar için kaynak terimi içermemektedir. Dalga kırılması Baldock vd., (1998) ve Roelvink (1993a) çalışmalarına göre modellenmiştir. Düzensiz dalgalar için Roelvink, düzenli dalgalar içinse Baldock modeli kullanılmıştır. Her iki model de dalga hareketi korunumu denkleminde kullanılan dağılım için bir değer üretmektedir.

Dalga enerjisinin alansal dağılımından gerilme akıları ve dalga kuvveti hesaplanmaktadır.

$$F_{w_x} = -\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)$$
$$F_{w_y} = -\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x}\right) \quad (2.4)$$

- **Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) Enerji Denklemi**

XBeach dalga kırılması kaynaklı enerjiyi modelleyebilmek için Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) Enerji Denklemini kullanmaktadır. Roller Enerji Denkleminde kısa dalga enerjisi dağılımı kaynak terim olarak kullanılmaktadır. Kısa Dalga Hareketi Korunumu Denkleminde olduğu gibi burada da Roller enerjisinin yönsel dağılımı çözülmekte ancak frekans dağılımı çözülmemektedir.

$$\frac{\partial E_{roller}}{\partial t} + \frac{\partial C_x E_{roller}}{\partial x} + \frac{\partial C_y E_{roller}}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta E_{roller}}{\partial \theta} = -D_{roller} + D_{dalga} \quad (2.5)$$

Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) Enerji dağılımı, Swendsen (1984) çalışmasında ifade edilen roller (kırılma kaynaklı çevri) kaynaklı yüzeysel kayma gerilmeleri kullanılarak Deigaard (1993) çalışmasına göre hesaplanmaktadır. Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) kaynaklı kayma gerilmeleri Roller (Kırılma Kaynaklı Çevri) enerjisinin uzamsal dağılımından hesaplanmaktadır:

$$S_{xx,roller} = \int \cos^2(\theta) E_{roller}\, d\theta$$
$$S_{yy,roller} = \int \sin^2(\theta) E_{roller}\, d\theta$$
$$S_{xy,roller} = \int \sin(\theta)\cos(\theta) E_{roller}\, d\theta$$
$$S_{yx,roller} = \int \sin(\theta)\cos(\theta) E_{roller}\, d\theta \quad (2.6)$$

bu denklemlerdeki gerilme akıları dalga kuvveti hesaplanmadan önce dalga kaynaklı gerilme akılarına eklenmektedir.

XBeach, momentum ve kütle dengesi denklemlerini aşamalı bir ağ sisteminde çözmekte olup momentum dengesi hücre ara yüzlerinde, kütle dengesi ise hücre merkezlerinde çözülmektedir. XBeach, sığ sudaki dalga kaynaklı kütle akışlarını ve geri dönüş akımlarını da modele dahil etmek üzere sığ su momentum denklemlerini çözmek için Genelleştirilmiş Lagrange Ortalama formülasyonunu

kullanmaktadır. Genelleştirilmiş Langrange Ortalama yönteminde Lagrange, Euler ve Stokes hızları aşağıdaki gibidir.

$$u^L = u^E + u^S$$
$$v^L = v^E + v^S \tag{2.7}$$

Stokes hızları dalga ve roller (kırılma kaynaklı çevri) enerjisinden elde edilmekte olup;

$$u^S = \frac{\left(E_{dalga} + 2E_{roller}\right)\cos(\theta)}{c\rho h}$$
$$v^S = \frac{\left(E_{dalga} + 2E_{roller}\right)\cos(\theta)}{c\rho h} \tag{2.8}$$

Coriolis kuvveti olmadan Genelleştirilmiş Lagrange Ortalama-sığ su denklemleri şu şekildedir;

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L\frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L\frac{\partial u^L}{\partial y} - \eta_h\left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2}\right) = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - g\frac{u^E\left|u^E\right|}{C_f^2 h} + \frac{F_{w_x}}{\rho h} + \frac{F_{wind_x}}{\rho h}$$
$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + v^L\frac{\partial v^L}{\partial y} + u^L\frac{\partial v^L}{\partial x} - \eta_h\left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2}\right) = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} - g\frac{v^E\left|v^E\right|}{C_f^2 h} + \frac{F_{w_y}}{\rho h} + \frac{F_{wind_y}}{\rho h} \tag{2.9}$$

- **Katı Madde Taşınım Denklemleri**

XBeach, katı madde taşınımı için derinlik ortalamalı bir yayılım difüzyon şeması kullanmaktadır.

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_s h\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_s h\frac{\partial C}{\partial y}\right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \tag{2.10}$$

Denklemde, adaptasyon süresi T_s, yerel su derinliği ve katı madde çökelme hızı ile benzeştirilmiştir.

Denge durumundaki konsantrasyon Soulsby-Van Rijn formülasyonu kullanılarak hesaplanmaktadır (Roelvink, 2009).

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h}\left(\left(\left|u^E\right|^2 + 0.018\frac{u_{rms}^2}{C_d}\right)^{0.5} - u_{cr}\right)^{2.4}\left(1 - \alpha_b m\right) \tag{2.11}$$

Denklemde, A_{sb} ve A_{ss} sürüntü ve askıda katı madde katsayılarıdır ve yerel su derinliğinin, tane büyüklüğünün ve katı maddenin göreceli yoğunluğunun fonksiyonudur. Sürtünme katsayısı C_d, yalnızca akış hızından kaynaklanmaktadır. Katı maddenin harekete geçmesi için, Euler hızı ve yörüngesel hızın eşik hız u_{cr} değerini aşması gerekmektedir. Denklemdeki son terim taban eğimi etkilerini tanımlamaktadır ancak bu XBeach'de henüz uygulanmamaktadır.

- **Morfoloji Değişimi**

XBeach, taban seviyesi değişimleri için katı madde taşınım gradyanlarını kullanmaktadır. Katı madde taşınım oranları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} S_x &= hCu^E - D_s h\frac{\partial C}{\partial x} - f_{slope}\left|u^L\right|h\frac{\partial z_b}{\partial x} \\ S_y &= hCv^E - D_s h\frac{\partial C}{\partial y} - f_{slope}\left|v^L\right|h\frac{\partial z_b}{\partial y} \end{aligned} \tag{2.12}$$

Denklemdeki $f_{eğim}$ terimi kullanıcı tarafından belirlenen eğim düzeltme katsayısıdır.

Taban seviyesi değişimi, katı madde taşınım hızı gradyanlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{\left(1-p\right)}\left(\frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y}\right) = 0 \tag{2.13}$$

Burada, p porozite, f_{mor} ise morfolojik hız faktörüdür.

XBeach, fırtına koşulları sırasında kumul çökmesini ve katı maddenin kuru rejimden ıslak rejime taşınımını modelleyebilmek için, bir heyelan algoritması kullanmaktadır. Heyelan, su kesiminin yakınındaki taban eğiminin kullanıcı tarafından kuru ve ıslak noktalar için belirlenen kritik değer aşıldığında meydana gelmektedir.

$$\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| > m_{cr} \ , \ \left|\frac{\partial z_b}{\partial y}\right| > m_{cr} \tag{2.14}$$

Kıyıya dik doğrultudaki taban seviyesi değişimi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \Delta z_b &= \left(\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| - m_{cr}\right)\Delta x \quad , \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \\ \Delta z_b &= -\left(\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| - m_{cr}\right)\Delta x \ , \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Benzer denklemler kıyı boyu doğrultudaki taban seviyesi değişimlerinin hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Morfolojik ivme, algoritmada zaman içerisinde f_{mor} iterasyonu ile hesaba katılmaktadır. Büyük şok dalgalarının üretilmemesini sağlamak için çökme, saniyede maksimum değerle sınırlandırılmaktadır.

3
KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIM DEĞİŞİMLERİNİN ANALİZİ

3.1 Giriş

Sürdürülebilir kıyı alanları yönetimi, günümüzde artan nüfus ve antropojenik faaliyetlerle birlikte dörtte üçü su olan dünya üzerindeki tüm kıyı alanlarında giderek daha çok dikkate alınan önemli bir kavram haline gelmiştir. Üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye'de, toplam uzunluğu 8333 km (adalar dahil) olan kıyı şeridi mevcut olup bu kıyısal alanların çoğunda aktif yaşam ve insan faaliyetleri bulunmaktadır. Geçmişten günümüze kadar devam eden insan faaliyetleri ve iklim sistemlerinde zaman içerisinde oluşan farklılıklar ile kıyısal alanların varlığında aktif bir şekilde rol oynayan dalga ikliminde de dikkat çeken değişiklikler meydana gelmektedir. Dalga ikliminde meydana gelen bu değişikliklerin sonucunda ise, kıyı sistemlerinde alansal ve zamansal ölçeklerde belirgin farklılıklar/değişimler oluşmakta ve kıyısal alanlardaki mevcut sistem daha da karmaşık hale gelmektedir. Bölüm 2'de anlatıldığı üzere bugüne kadar dalga ikliminde meydana gelen uzun dönemli değişimlerin kıyısal alanlar üzerindeki etkileri ile ilgili birçok çalışma yapıldığı ancak Güneybatı Karadeniz kıyıları için benzer bir çalışmanın ortaya konulamadığı görülmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında Karadeniz Bölgesi'nin güneybatı kıyılarında yer alan Karasu sahilinde dalga iklimi parametrelerindeki (dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga geliş açısı) uzun dönemli değişimlerin bölgede meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım mekanizması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın amacı (Başaran ve Güner, 2021);

- Karasu Kıyısında mevcut olan yakın kıyı dalga iklimi ve kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasının mevsimsel ve yıllar arasındaki değişimlerinin tespit edilmesi,

- Bölgedeki yakın kıyı dalga ikliminde meydana gelen uzun dönemli değişimlerin kıyı boyu katı madde taşınımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi.

3.2 Çalışma Alanı

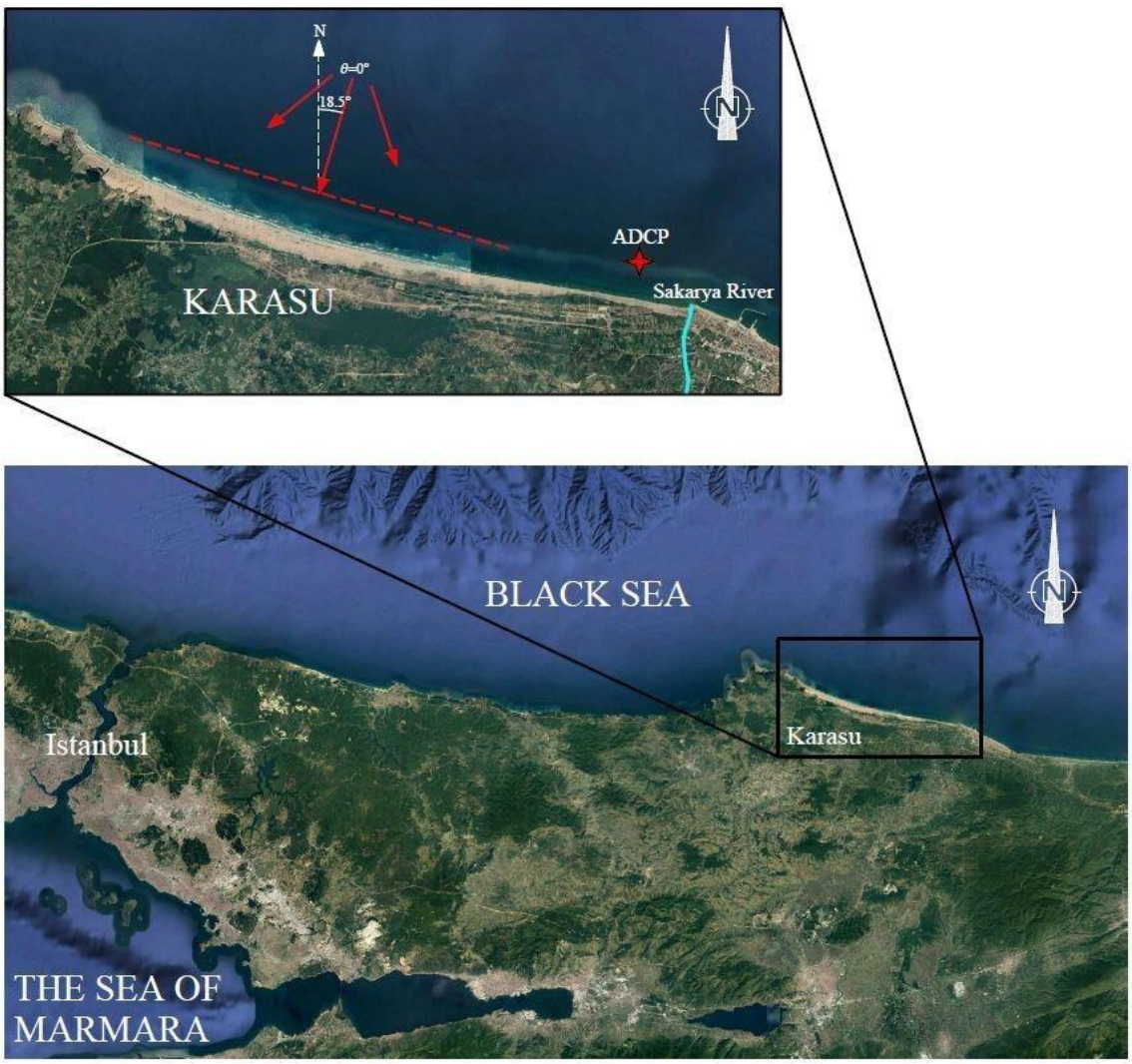
40.91° K - 46.60° K enlem ve 27.45° D - 41.80° D boylamı ile sınırlanmış olan Karadeniz; Avrupa, Anadolu ve Kafkaslar arasında yer almakta olup, Çanakkale ve İstanbul Boğazları ile Akdeniz'e açılan yarı kapalı bir havza olarak bilinmektedir. Araştırmalara göre Karadeniz, 420,000 km^2 yüzey alanına, 540,000 km^3 toplam su hacmine ve sırasıyla 1.2 ve 2.2 km değerlerindeki ortalama ve maksimum su derinliklerine sahiptir (Avşar, 2019; Divinsky ve Kosyan, 2017). Tuzluluk miktarı ve yoğunluk farkı ile diğer denizlerden ayrılan Karadeniz, aynı zamanda büyük nehirlerin aktığı bir deşarj havzasıdır. Karadeniz, Romanya, Bulgaristan, Türkiye, Gürcistan, Rusya ve Ukrayna gibi güçlü bir nüfus yoğunluğuna sahip ülkelerle çevrili olup kıyı şeridi boyunca büyük limanlara sahiptir. Toplam kıyı şeridi uzunluğu 4.125 km olan Karadeniz boyunca, kıyı hattına paralel olan Kuzey Anadolu (güneyde), Kırım ve Kafkas Dağları (kuzeyde) uzanmaktadır (Onea ve Rusu, 2017).

3.2.1 Karasu Kıyı Bölgesi

Çalışma alanı olarak seçilen Karasu Bölgesi, Karadeniz'in güneybatı kıyısında, 30.30° D - 30.85° D ile 41.225° K - 41.050° K arasında yer almakta olup, Sakarya Nehri ağzının batısında 30 km'lik, doğusunda ise 25 km'lik bir plaj alanına sahiptir. Karasu kıyı alanları, aktif ve aynı zamanda oldukça karmaşık bir katı madde taşınım modeli etkisinde olan hassas bir kıyı şeridine sahiptir. Karasu kıyısında hem kıyı boyu hem de kıyıya dik katı madde taşınım mekanizmaları aktiftir. Güneybatı Karadeniz'de yer alan çalışma alanı Karasu Bölgesi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Karasu kıyı bölgesindeki etkin rüzgar yönü kuzeydoğudur (KD) ve bölge, etkin dalga yönü kuzey-kuzeydoğu (KKD) olan dalga iklimi etkisi altındadır. Karasu kıyı şeridi ise batı kuzeybatı-doğu güneydoğu (BKB-DGD) doğrultusunda

uzandığından, etkin rüzgar ve dalgaların kıyıya neredeyse dik açı ile yaklaştığını söylemek mümkündür.



Şekil 3.1 Çalışma alanı: Karasu kıyı bölgesi

3.2.2 Karadeniz

Karadeniz bölgesinde hakim olan hava akımı, Avrupa üzerindeki siklonik ve antisiklonik aktivitelerden oluşmaktadır (Valchev vd., 2010). Bölgedeki deniz suyu sıcaklığı mevsimsel olarak 2 ila 25°C arasında değişmektedir. Karadeniz bölgesinde en fazla yağış güneydoğu kıyılarında, en az yağış ise kuzeybatı kıyılarında görülmektedir (Avşar, 2019). Yüksek yağış alan Karadeniz'in su seviyesi Marmara Denizi'nden yaklaşık 35 cm daha yüksek olup ortalama su seviyesi 0.65+(TUDKA-99) civarındadır (Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı).

Karadeniz bölgesinde kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasını etkileyen en önemli etken olan dalga iklimi parametrelerindeki uzun dönemli değişiklikler birçok araştırmacı tarafından farklı çalışmalarda incelenmiştir. Çalışmalardan elde edilen bilgilere göre, etkin dalga yönü hem kış hem de yaz aylarında kuzey doğrultusundan gelmekte ve birçok fırtına kuzey kesimden gelen rüzgarlar sebebiyle oluşmaktadır (İşlek vd., 2021). Kuzey Karadeniz bölgesinde ortalama fırtına süresi yaklaşık 30 saat iken maksimum fırtına süresi ise 130 saat civarındadır (Rusu, 2009; Coman, 2004). Bununla birlikte çalışmalarda havzanın batı kısmındaki kış fırtınalarının yaz fırtınalarına göre çok daha sık olduğu belirtilmektedir (Valchev vd., 2010). Güneybatı Karadenizdeki rüzgâr dalgalarının ortalama enerjisi, birim dalga boyu başına 8-10 kW'a ulaşmakta iken; meridyen yönünde 2-3 kW/m mertebelerine kadar düşmektedir (Divinsky ve Kosyan, 2017). Diğer yandan, farklı bir çalışmada batı Karadenizdeki yıllık ortalama dalga enerjisi 3 kW/m iken, Karadeniz'in doğu kıyılarında 0.5-1.5 kW/m olduğu belirtilmektedir (Akpınar ve Kömürcü, 2013).

3.3 Uzun Dönemli Dalga İklimi Değişiminin Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

3.3.1 Çalışma Verileri

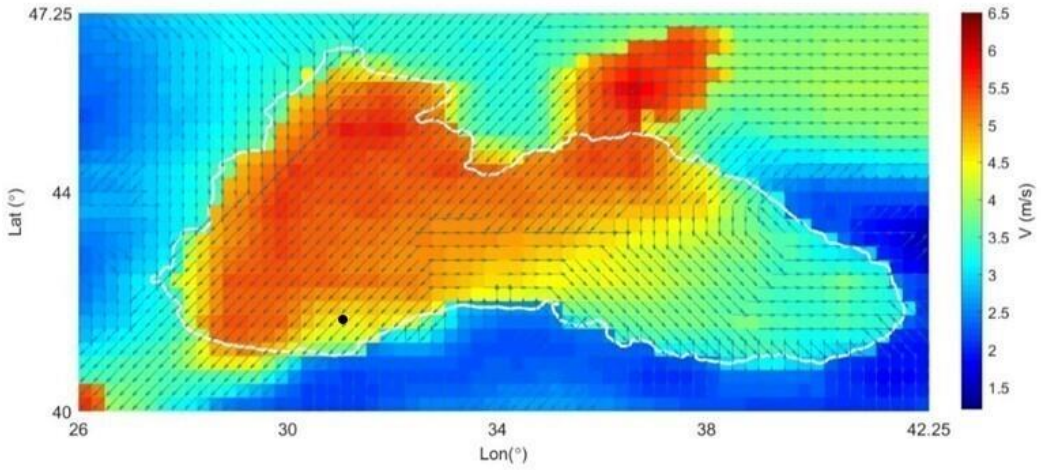
3.3.1.1 Rüzgar

Karadeniz'deki rüzgâr koşulları, özellikle kış mevsiminde değişkenlik göstermektedir. Çalışma alanı Karasu bölgesinin yer aldığı Batı Karadeniz bölgesindeki hakim rüzgar yönü kuzey-kuzeydoğu (KKD) iken, havzanın doğusunda güneyden (G) esen rüzgarlar etkindir. Kış mevsiminde meydana gelen kuvvetli rüzgârlar ise genellikle kuzeybatı doğrultusundan (KB) esmektedir.

Karadeniz bölgesinde gerçekleştirilen rüzgâr analizi çalışmaları sonucunda, Güneybatı Karadeniz bölgesinin daha yüksek rüzgâr hızları, daha uzun fırtına süreleri, daha güçlü rüzgâr enerjisi potansiyeli ve daha az değişkenlik ile karakterize edildiği görülmektedir. Güneybatı Karadeniz bölgesinde aktif olan

uzun dönemde kararlı ve kuvvetli rüzgar koşulları güvenilir, kalıcı ve sürdürülebilir rüzgar enerjisi potansiyeli göstermektedir (İşlek vd., 2020a).

Şekil 3.2, Karadeniz'de 1979-2018 yılları arasındaki 40 yıllık çalışma dönemi boyunca mevcut olan ortalama rüzgâr hızı ve rüzgâr yönünün dağılımını göstermektedir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) verilerinden ERA-Interim açık kaynak rüzgâr verileri kullanılmıştır. 1979 ile 2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönemi kapsayan bu veri seti, deniz seviyesinden 10 m yükseklikteki yeniden analiz verilerinin rüzgâr hızı bileşenlerini sağlamaktadır. ERA-Interim rüzgâr verileri 6 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir (günde dört analiz alanı, 00, 06, 12 ve 18 UTC'de) ve ECMWF veri merkezinden kolaylıkla indirilebilmektedir. Bununla birlikte, bu ECMWF rüzgâr verileri doğal T255 spektral ağından 0.7° x 0.7° alansal çözünürlüğe sahiptir. Bu çalışmada kullanılan veriler ise 0.25°x0.25° uzamsal çözünürlüğe sahip olup seçilen çözünürlüğe ait yeniden analiz modelinin çıktılarıdır. Böylelikle çalışma alanının bulunduğu batı ve güneybatı Karadeniz bölgesinde rüzgâr ikliminin Doğu Karadeniz'e göre daha enerjik olduğu belirtilmektedir. Proje alanı olan Karadeniz'in güneybatı kıyı şeridinde ortalama 40 yıllık rüzgar hızının yaklaşık 4 m/s olduğu ve hakim rüzgar yönünün kuzeydoğu doğrultusu olduğu ifade edilmektedir (İşlek vd., 2020b).



Şekil 3.2 Karadeniz bölgesinde 1979-2018 yılları arasındaki ortalama rüzgar hızı ve rüzgar yönü. Siyah nokta çalışma bölgesini göstermektedir (İşlek vd., 2020b)

3.3.1.2 Dalga

Kıyısal alanlarda meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım miktarını tahmin edebilmek için öncelikle belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, 1979-2018 yılları arasındaki Karadeniz Bölgesini temsil eden soluğan ve rüzgar dalgası bileşenleri ile birlikte toplam (soluğan + rüzgar) dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısı) kullanılmıştır. 1978-2009 yılları arasında Karadeniz'deki dalga parametrelerinin uzun dönemli değişimleri, Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından gerekli görülen üçüncü nesil dalga modeli (MIKE21 SW) kullanılarak değerlendirilmiştir. MIKE21 SW, DHI (Danimarka Hidrolik Enstitüsü) (DHI, 2008a) tarafından geliştirilen üçüncü nesil bir spektral dalga modelidir. Model sonuçları, tüm Karadeniz boyunca farklı noktalarda yer alan yedi istasyondan (Gelendhzik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve Boğaziçi) temin edilen şamandıra ölçümleri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca yerel dalga parametreleri de çalışma bölgesinde kısa süreli gerçekleştirilen ölçüm verileri ile doğrulanmıştır. Dalga ve akıntı ölçümleri, deniz tabanına kıyıdan 1.7 km uzaklıkta ve yaklaşık 20 m derinlikte yukarı bakacak şekilde yerleştirilen ADCP (Akustik Doppler Akım Profil Ölçer, FlowQuest 600, LinkQuest INC.) ile gerçekleştirilmiştir. Dalga gözlemcisinin monitöründen dalga yüksekliği, periyodu, yönü ve akıntı hızları okunabilmektedir.

DHI tarafından dalga simülasyon (benzeşim) çalışmaları için kapsamlı ve birbirinden farklı yöntemlerle birçok kez doğrulanan MIKE21 SW dalga modeli aşağıda açıklanan çalışma mekanizmasına sahiptir. Sayısal dalga modeli MIKE21 SW, dalga hareketi korunum denklemini kapalı ve hücre merkezli sonlu hacimler yöntemiyle çözerek alansal bir ağ üzerinde dalga spektrumunun zamansal gelişimini benzeştirmektedir. Model, zaman entegrasyonunun kesirli adım yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirildiği bölgesel (daha kaba) ve yerel (daha ince) ölçeklerde eş zamanlı hesaplama adımlarına izin veren yapılandırılmamış esnek bir ağ sistemine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında 0.25°x0.25° ağ ve 6 saatlik

zamansal çözünürlüğe sahip ECMWF Era-Interim rüzgâr verileri MIKE21 SW ile modellenmiş ve saatlik dalga verileri elde edilmiştir.

MIKE21 SW dalga modeli aynı zamanda toplam dalga verilerini rüzgâr ve soluğan dalgaları şeklinde bileşenlerine ayırmak için de kullanılmıştır. MIKE21 SW modelinde toplam dalgaları soluğan ve rüzgâr dalgaları bileşenlerine ayırmak için üç farklı yöntem mevcuttur. Bunlar; sabit eşik frekansı, dinamik eşik frekansı (versiyon 1) ve dinamik eşik frekansı (versiyon 2). Çalışma kapsamında dalgaları soluğan ve rüzgar dalgası bileşenlerine ayırmak için dinamik eşik frekans (versiyon 2) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde soluğan dalgaları, aşağıdaki dalga kriterlerine karşılık gelen bileşenler olarak tanımlanmaktadır (DHI, 2008a).

$$\frac{U_{10}}{c}\cos\left(\theta-\theta_w\right)<0.83 \tag{3.1}$$

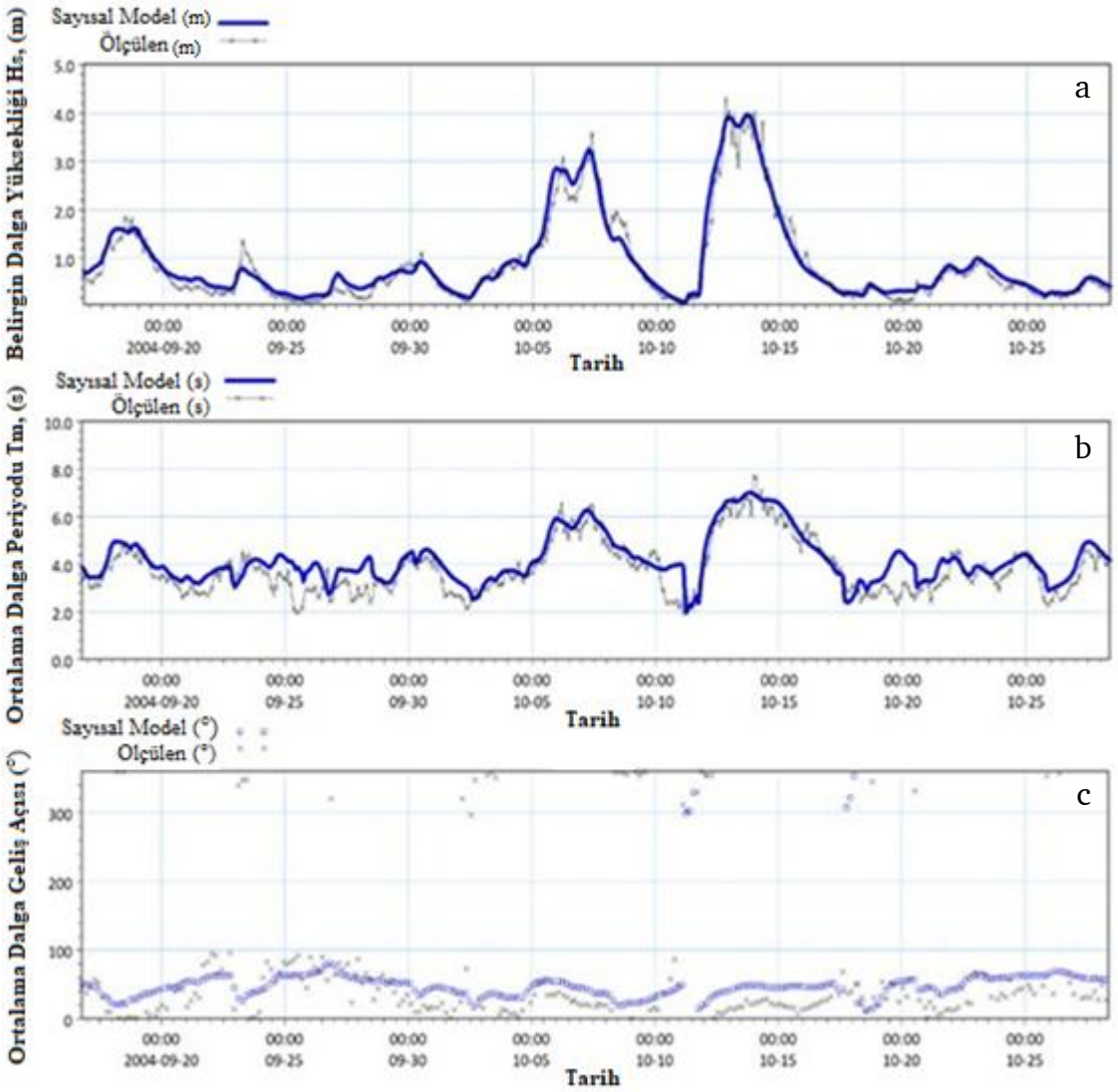
burada U_{10} rüzgar hızı, c (frekans, σ / dalga sayısı, k) faz hızı, θ ve θ_w sırasıyla dalga yayılımı ve rüzgar yönüdür.

Gerçekleştirilen çalışmada MIKE21 SW dalga modelinin performansını değerlendirebilmek amacıyla sayısal modelden elde edilen dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga açısı) şamandıra ölçümlerinden elde edilen dalga verileri ile karşılaştırılmıştır. Ölçüm istasyonlarının özellikleri Tablo 3.1'de tanımlanmıştır.

Tablo 3.1 Ölçüm istasyonlarının karakteristikleri (İşlek vd., 2021)

No	İstasyon	Koordinatlar	Derinlik (m)	Ver Zamanı	Veri Sayısı	Kaynak
1	Gelendhzik	44° 30’ 27” N 37° 58’ 42” E	85	01.07.1996-10.12.2003	15335	Özhan ve Abdalla (2002)
2	Hopa	41° 25’ 24” N 41° 23’ 00” E	100	21.12.1994-30.04.1999	12151	Özhan ve Abdalla (2002)
3	Sinop	42° 07’ 24” N 35° 05’ 12” E	100	01.11.1994-20.06.1996	2465	Özhan ve Abdalla (2002)
4	Filyos	41° 60’ 00” N 32° 02’ 00” E	100	21.12.1995-26.12.1996	7949	DLH (1999)
5	Karaburun	41° 26’ 14” N 28° 41’ 00” E	16	30.08.2003-17.12.2004	2947	Arı Güner vd. (2013)
6	Samsun	36° 28’ 30” N 36° 28’ 30” E	280	09.03.2015-20.03.2016	8905	TMGM
7	Boğaziçi	41° 17’ 32” N 29° 09’ 56” E	95	11.03.2016-19.11.2018	15345	TMGM

Kalibrasyon işlemi Gelendzik (2003) ve Karaburun (2003-2004) istasyonlarında ölçülen dalga verileri ile gerçekleştirilmiştir. MIKE21 SW modelinin doğrulanması ise Gelendzik (1996-2002), Hopa, Sinop, Filyos, Samsun ve Boğaz istasyonlarından alınan (İşlek vd., 2020b; İşlek vd., 2021) ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon verilerine örnek olarak Karaburun için hesaplanan ve ölçülen dalga parametrelerinin zaman serilerinin karşılaştırması Şekil 3.3'te verilmiştir.

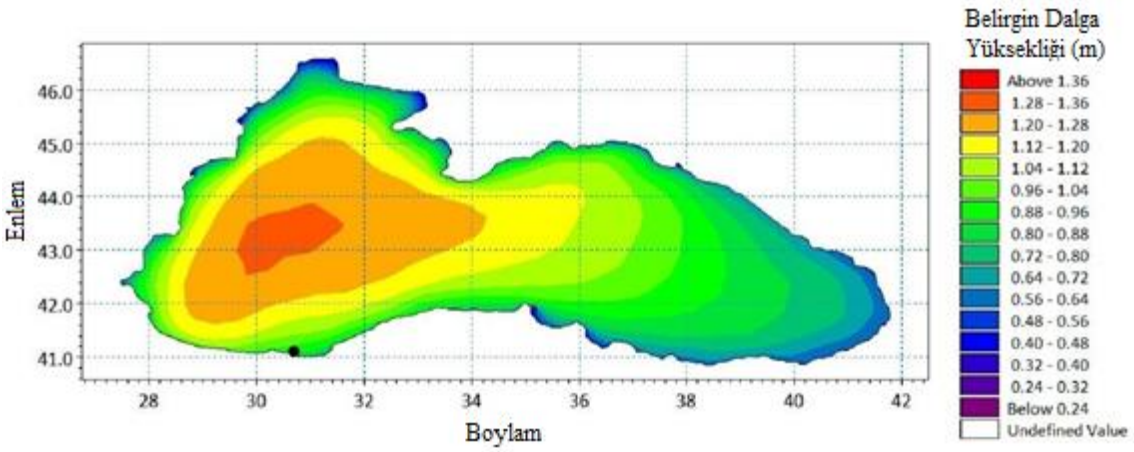


Şekil 3.3 Karaburun için hesaplanan ve ölçülen dalga parametrelerinin zaman serisi; (a) Belirgin dalga yüksekliği; (b) Ortalama dalga periyodu; (c) Ortalama dalga yönü

Veri tahmininin başarısı, tahmin edilen ve gözlenen değerler arasındaki hata/fark oranı (BIAS), ortalama karekök hatası (RMSE) ve korelasyon katsayısı (r) gibi istatistiksel hata tahmin parametreleri cinsinden ifade edilmektedir. Tablo 3.1'deki istasyonlardan elde edilen sonuçlara göre, ölçülen ve model çalışmasından elde edilen belirgin dalga yüksekliği, periyodu ve açıları arasında sırasıyla 0.08 m, -0.18 s ve 17.2° ortalama hata değerleri ile 0.34 m, 0.86 s ve 42° ortalama karekök hataları (RMSE) tespit edilmiştir. Ölçüm ve model sonuçlarına göre belirgin dalga yüksekliği için 0.86, dalga periyodu için 0.74 ve dalga açısı/doğrultusu için 0.61 değerlerinde korelasyon katsayıları elde edilmiştir.

Bununla birlikte çalışma alanındaki ADCP verileri dikkate alındığında ölçüm ve model sonuçlarına göre, belirgin dalga yüksekliği, periyodu ve açıları arasında sırasıyla 0.03 m, -0.02 s ve 6.3° hata değerleri ile 0.1 m, 0.68 s, 19° ortalama karekök hataları (RMSE) tespit edilmiştir. Belirgin dalga yüksekliği, dalga periyodu ve açısı/doğrultusu için model ve ölçüm sonuçları arasında tespit edilen r korelasyon katsayıları ise sırasıyla 0.9, 0.81 ve 0.72 olarak bulunmuştur (Basaran ve Güner, 2021).

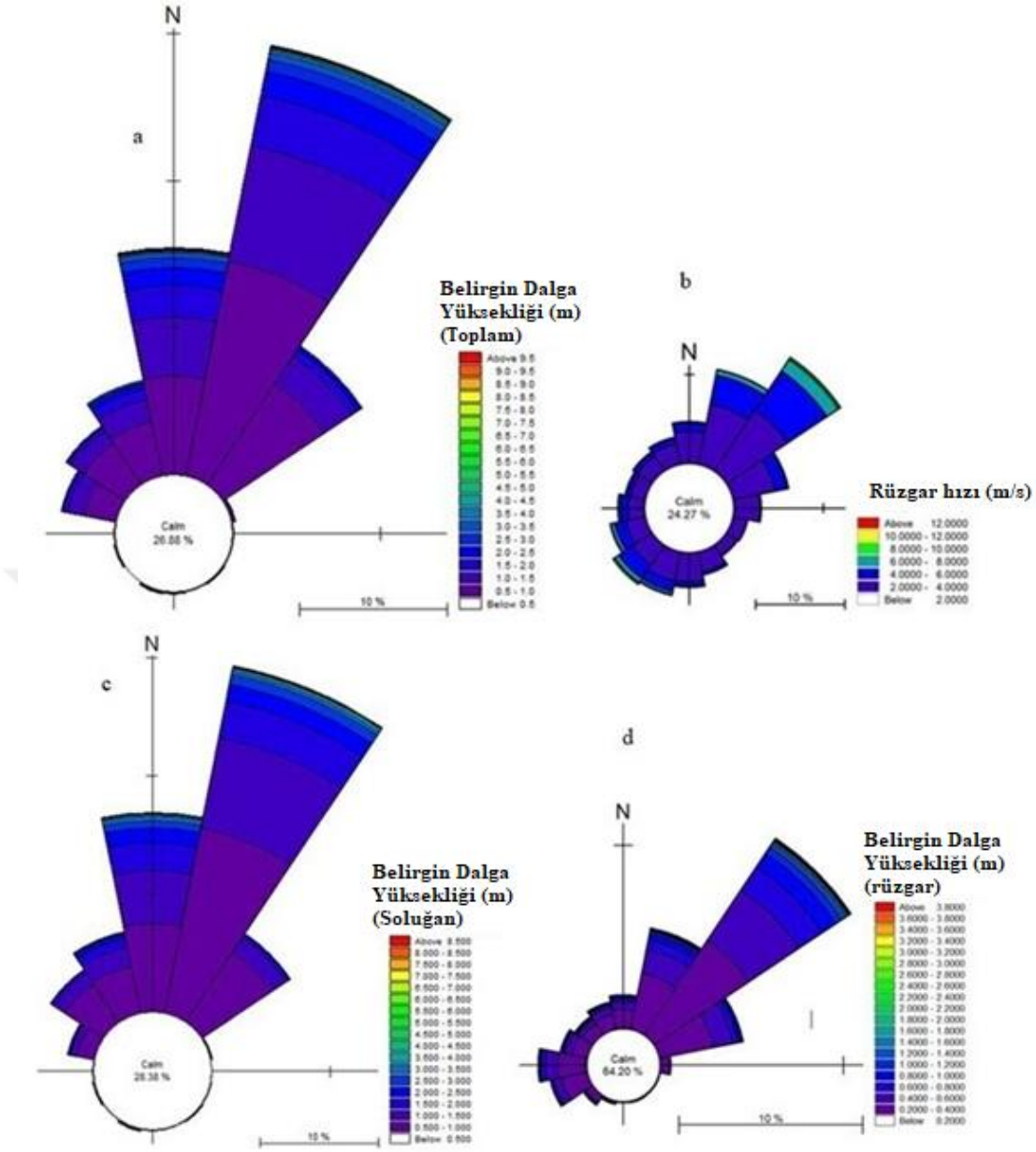
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen dalga modeli parametreleri 0.25°x0.25° ağ çözünürlüğüne ve 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Şekil 3.4, çalışma alanındaki 1979-2018 yılları arasındaki ortalama belirgin dalga yüksekliğini göstermekte olup şekil üzerindeki siyah nokta çalışma alanını temsil etmektedir. Şekilden görüldüğü üzere rüzgâr hızlarının dağılımında olduğu gibi (Şekil 3.2), çalışma alanının bulunduğu batı ve güneybatı Karadeniz'de hakim olan dalga iklimi, Doğu Karadeniz'e göre daha enerjiktir. Aynı zamanda şekilden çalışma alanındaki 40 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin 0.9-1.0 m arasında olduğu da görülmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Karadeniz bölgesinde 1979-2018 yılları arasındaki belirgin dalga yüksekliğinin 40 yıllık ortalaması. Siyah nokta, çalışma alanının konumunu göstermektedir (Başaran ve Güner, 2021)

Çalışma alanında 1979-2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönem boyunca mevcut olan dalga parametrelerinin yönsel davranışlarını belirleyebilmek için rüzgâr ve dalga gülleri oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Rüzgâr ve dalga gülleri MIKE21 SW

dalga modeli sonuçlarına göre 16 farklı yönsel bant için üretilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, Karasu Bölgesi'nde hakim rüzgar ve dalga yönlerinin kuzey-kuzey kuzeydoğu (K-KKD) sektörü olduğu görülmektedir. Şekil 3.5, soluğan dalgaları için etkin yönün KKD olduğunu ve bu doğrultuyu sırasıyla K ve KD yönlerinin takip ettiğini ortaya koymaktadır. Rüzgâr dalgalarında ise dominant yön KD iken bu yönü KKD ve DKD yönleri izlemektedir. Buradan yola çıkarak rüzgar dalgaların için etkin yönün, toplam ve soluğan dalgalarına göre kuzeyden doğuya doğru kaymakta olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca bu şekilden soluğan ve toplam dalga güllerinin benzer dağılıma sahip olduğu görülmekte olup bu durum çalışma alanındaki toplam dalgalar üzerinde soluğan etkisinin baskın olduğunu göstermektedir (Başaran ve Güner, 2021).



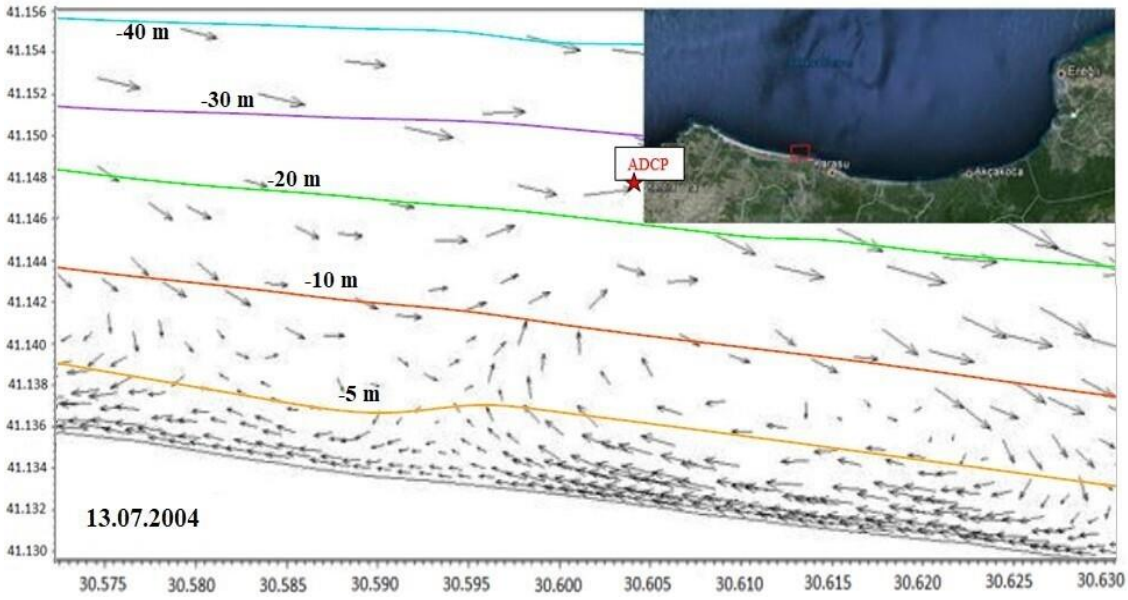
Şekil 3.5 1979-2018 yılları arasındaki dalga parametrelerine göre Karasu Bölgesi'ne ait rüzgar ve dalga gülleri; (a) toplam dalga gülü, (b) rüzgar gülü, (c) soluğan dalga gülü, (d) rüzgar dalgası gülü (Başaran ve Güner, 2021)

3.3.1.3 Akıntı

Karasu kıyısında hakim olan akıntı yapısı için gerçekleştirilen sayısal model çalışmaları incelendiğinde, mevcut akıntı hızı ve yönlerinin Karadeniz'de gözlenen genel sirkülasyon şekli ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Karadeniz'deki ana sirkülasyon yönü, yoğunluk ve sıcaklığa bağlı olarak saat yönünün tersi doğrultudadır (Yüksel vd., 2014). Bu akıntı yapısı, kıyıdan gelen yüzey suları ile

Boğaz'dan gelen Akdeniz sularına karışarak daha küçük ölçekli bir sirkülasyon yapısı oluşturmaktadır (Şekil 3.6).

Çalışma alanı olan Karasu kıyısında dalga kaynaklı akıntılar aktiftir. Sayısal model çalışmalarından elde edilen güncel veriler incelendiğinde, Karasu'nun doğu kıyılarına doğru akıntı yoğunluğunun arttığı görülmektedir. -5 m derinlikteki akıntı doğudan batıya doğru çok daha güçlü bir akıntı meydana getirmektedir. -20 m derinlikteki akıntılar ise -5 m derinlikteki akıntılara benzer bir model göstermektedir. Bölgenin doğu tarafında ise kıyıya dik akıntılar daha aktif hale gelmektedir. Akıntı yönü, -50 m derinlikte doğudan batıya doğru değişmekte ve akıntı yoğunluğu doğuya doğru artmaktadır. -100 m derinlikteki akıntılar ise, Karadeniz'in genel sirkülasyonu gibi batıdan doğuya doğru hareket etmektedir (Yüksel vd., 2014).



Şekil 3.6 Karasu kıyısına ait anlık akıntı yapısı (Yüksel vd., 2014)

3.3.1.4 Gel-git

Karadeniz gel-gitleri, su kütlelerinin gel-git oluşturan kuvvetleri kaynaklı salınımlarından meydana gelmektedir. Karadeniz Bölgesi'nde saat yönünde yarı-günlük gel-git mevcut olup bu gel-gitlere ait genlik değerleri çok küçüktür (3-9 cm). Gel-git salınımları çoğunlukla rüzgâr kaynaklı dalgalanmalar ve Karadeniz'den Ege Denizi'ne gelen yüzey suyu akışının büyüklüğü ile

maskelenmektedir (Alpar ve Yüce, 1997). Karadeniz, Türk Boğazları (İstanbul Boğazı, Marmara Denizi ve Çanakkale Boğazı) yoluyla Akdeniz ile sınırlı su değişimine sahiptir. Komşu havzalardan gelen gel-gitler ise, bu denizlerdeki gel-git salınımları üzerinde oldukça küçük bir etkiye sahiptir (Medvedev vd., 2016).

3.3.1.5 Katı Madde Özellikleri

Karasu Bölgesi'ndeki katı madde özellikleri incelendiğinde, deniz tabanı malzemesinin çok iyi sınıflanmış ve kohezif özelliklere sahip olmayan orta kum olduğu görülmektedir. Karasu kıyı şeridindeki katı madde özelliklerini belirleyebilmek için farklı kesitlerden katı madde numuneleri alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir enine kesit için -5 m, -10 m ve -15 m derinliklerinden olmak üzere üç farklı numune alınmıştır. Bu numunelerin tane boyu dağılımları granülometri deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışma bölgesinde mevcut olan katı madde özelliklerinin tümü Tablo 3.2'de verilmiştir. Tabloda yer alan σ_g parametresi geometrik standart sapma, ϕ ise yatak malzemesi çapı için Wentworth ölçeğidir.

Tablo 3.2 Çalışma bölgesindeki katı madde özellikleri

D_{84} (mm)	D_{50} (mm)	D_{16} (mm)	σ_g	ϕ	Katı Madde
0.5	0.38	0.28	1.336	1.39	Orta Kum

3.3.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı

Kıyı boyu katı madde taşınım mekanizması, kıyı morfolojisini kontrol eden ve kıyı erozyonu veya yığılmasının meydana gelip gelmediğini belirleyen en önemli yakın kıyı olaylarından biridir. Katı madde taşınımının oluşmasındaki en önemli neden ise dalga etkisidir. Dalgalar kıyıya belirli bir açı ile yaklaştığında, kıyı boyu katı madde taşınımına neden olan kıyı boyu akıntılarını oluşturmaktadır. Dalganın yörünge hareketi ile salınımlı bir hareket yapan katı madde taneleri akıntı yönünde taşınmakta ve kıyı boyu katı madde taşınım süreci meydana gelmektedir (Arı vd., 2006; Kamphuis, 1991; Komar ve Inman, 1970).

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesinde dört farklı yönteme dayalı ampirik formüller kullanılmaktadır. Bu yöntemler; enerji akısı yöntemi,

akıntı kuvveti yöntemi, boyutsal analiz yöntemi ve kuvvet dengesi yöntemidir. Bu yöntemlere bağlı olarak, belirli bir zaman diliminde meydana gelen taşınım miktarına kıyı boyu katı madde taşınım miktarı denmektedir. Bu katı madde taşınım miktarı belirli bir zaman aralığında farklı yönlerden gelen dalgalara göre hesaplandığında ise net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tanımlaması yapılmaktadır.

Kıyı mühendisliği çalışmalarında, kıyı boyu katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında yukarıda ifade edilen yöntemlere dayanan birçok formül kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntemler ise sırasıyla aşağıda açıklanmaktadır.

80'li yıllarda geliştirilen Kamphuis (1991) ve CERC (1984) gibi birçok ampirik katı madde taşınım formülü sonraki yıllarda yaygın olarak kullanılmıştır. Kamphuis (1991) yöntemi, kıyı boyu katı madde taşınım miktarına ait yapılacak tahminlerin güvenilir olması için dalga periyodu, katı madde tane boyutu ve kıyı eğimi parametrelerini dikkate almaktadır. Schoonees (2001) çalışmasında, kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesinde Kamphuis (1991) yönteminin basit şekilde kullanılabilir olması ve önemli dalga parametrelerini içermesi sebebi ile en doğru sonuçları sağlayacağını belirtilmiştir. Ayrıca George ve Sanil Kumar (2019) çalışmasında da bahsedildiği üzere, Sanil Kumar vd., (2017) ve Shanas ve Sanil Kumar (2014) çalışmalarında Hindistan'ın orta batı kıyılarında daha güvenilir bir kıyı boyu katı madde taşınım miktarı belirleyebilmek için Kamphuis (1991) formülünün kullanılması önerilmiştir. Shanas ve Sanil Kumar (2014) çalışmasında, Kamphuis (1991) yönteminin çok sayıda laboratuvar deneyleri ile doğrulandığı ve saha ölçüm verileri ile tutarlı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Aynı çalışma, yıllık ortalama (H_s) değeri 1 m olan düşük dalga enerjisine sahip kıyı bölgelerindeki kıyı boyu katı madde taşınım miktarını elde etmek için Kamphuis (1991) yönteminin kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Shanas ve Sanil Kumar, 2014). Yukarıda belirtilen dalga koşulları (genellikle düşük dalga enerjisi) gerçekleştirilen tez çalışması kapsamındaki çalışma bölgesi olarak seçilen Karasu kıyı alanındaki dalga koşulları ile benzer olduğu için, ampirik

yöntemlerden biri olarak Kamphuis (1991) yöntemi kıyı boyu katı madde taşınım miktarını hesaplamak için kullanılmıştır.

Kaczmarek vd. (2005) yöntemi, radyoizotopik ölçümlerden yararlanılarak geliştirilmiş, sınırlı sayıda gözlem yapılabilen alanlarda tercih edilen ve son zamanlarda yaygın olarak kullanılan bir kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tahmin yöntemdir. Yöntem kıyı boyu katı madde taşınım miktarının, tüm surf bölgesi için dalga enerji akısı ile doğru orantılı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Kaczmarek vd. (2005) yöntemi, çalışma alanındaki ölçüm ve gözlem sonuçlarının sınırlı olması ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında son zamanlarda yaygın olarak tercih edilmesinden dolayı gerçekleştirilen çalışmada ampirik yöntemlerden biri olarak tercih edilmiştir.

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarını tahmin edebilmek için kullanılan mevcut formüllerin çoğu yalnızca dalga kaynaklı akıntıları dikkate almaktadır (Kamphuis, 1991 gibi) ve taşınımı etkileyebilecek rüzgâr ve gel-git akıntıları gibi diğer mekanizmaları göz ardı etmektedir. Kıyı boyu katı madde taşınım yöntemlerinin çoğunda dikkate alınmayan rüzgarın önemi konusunda bugüne kadar farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Masselink ve Pattiaracthi, 1998; Ciavola vd., 1997). Bayram vd. (2007) çalışması ise, yalnızca dalga kaynaklı akıntıları değil, diğer mekanizmaları da hesaba katan ve taşınım miktarı hesaplarında katı madde ve dalga özellikleri gibi fiziksel parametreleri de dikkate alan bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Geliştirilen bu yeni formül, pratik uygulamalarla kıyı bölgelerindeki katı madde taşınımının sayısal modellemeleri ve kıyı çizgisi değişiminin izlenmesi için de oldukça uygundur. Tüm bu nedenlerden dolayı Bayram vd. (2007) yöntemi kıyı boyu katı madde taşınım miktarını belirleyebilmek için çalışmada kullanılacak ampirik yöntemlerden bir diğeri olarak seçilmiştir.

Sonuç olarak, bu yöntemler birbirini farklı açılardan tamamladığı için bu çalışmada hepsinin kullanılmasına karar verilmiş ve bunun yanında kıyı boyu katı madde taşınım miktarını tespit edebilmek amacıyle sayısal bir model çalışması da gerçekleştirilmiştir (Başaran ve Güner, 2021).

3.3.2.1 Kamphuis (1991) Yöntemi

Kıyı boyu katı madde taşınımında, katı madde debisini hesaplayabilmek için kullanılan ampirik yöntemlerden biri Kamphius (1991) modelidir. Kamphuis (1991), bir dizi laboratuvar çalışması ve saha ölçümleri sonucunda boyut analizine dayalı ampirik bir model ile katı madde taşınım miktarını hesaplamaktadır. Kamphuis (1991), kıyı boyu katı madde taşınımı hesabında CERC denkleminden farklı olarak dalga periyodunu, kıyı eğimini ve katı madde tane boyutunu dikkate almaktadır.

Kamphuis (1991)'e göre katı madde taşınım debisi aşağıdaki gibidir:

$$Q = 6.4x10^{4}\, x\, H_{sb}^{2}\, T_{p}^{1.5}\, m_{b}^{0.75}\, D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}\left(2\alpha_{bs}\right) \left[m^{3} / yıl\right] \tag{3.2}$$

burada;

H_{sb} belirgin dalganın kırılma yüksekliği (m),

T_p pik dalga periyodu,

m_b kırılma bölgesinin taban eğimi,

D_{50} ortalama tane çapı (m),

α_{bs} efektif dalga kırılma açısıdır.

Çalışma kapsamında ilk olarak Kamphuis (1991) denkleminde kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Bu sebeple ECMWF rüzgâr verileri kullanılarak elde edilen belirgin dalga yükseklikleri, periyotları ve açıları dikkate alınmıştır. Kamphuis (1991) ifadesinde kırılma bölgesindeki belirgin dalga yükseklikleri kullanılmakta olduğu için öncelikle ortalama dalga yükseklikleri ve dalga geliş açılarının kırılma bölgesindeki saatlik değerleri hesaplanarak işleme alınmıştır.

Kamphuis (1991) denklemi incelendiğinde kırılan dalga yükseklikleri, dalga kırılma açısı, pik dalga periyodunun yanında kıyı eğimi ve ortalama tane çapına da gereksinim duyulduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, Karasu kıyı eğimi m=0.0125 ve ortalama tane çapı D_{50}=0.38 mm olarak çalışmada hesaba katılmıştır.

3.3.2.2 Kaczmarek vd. (2005) Yöntemi

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesap yöntemlerinden biri olan Kaczmarek vd. (2005), kırılan dalga tahminine bağlı olarak uzun dönemli kıyı boyu katı madde taşınım miktarını hesaplayan ampirik bir model ortaya koymaktadır. Bu ifadeye göre kıyı boyu katı madde taşınım debisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

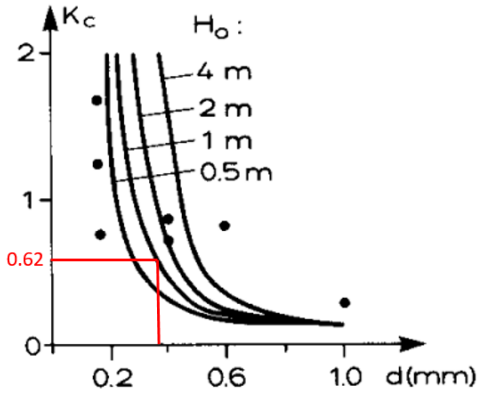
$$Q=\begin{cases}0.023\left(H_b^2 V\right)\left[m^3/s\right];\ H_b^2 V<0.15 \ \text{düşük ve ılıman dalga iklimi}\\ 0.00225+0.008\left(H_b^2 V\right)\left[m^3/s\right];\ \ H_b^2 V>0.15 \ \text{yüksek dalgalar ve fırtınalar}\end{cases} \quad (3.3)$$

Surf bölgesindeki kıyı boyu akıntı hızı:

$$V=0.25k_v\sqrt{\gamma_b g H_b}\sin 2\theta_b \quad (3.4)$$

burada, k_v sahaya özgü parametredir ve hesaplamalarda 2.20 olarak dikkate alınmıştır. Bu sabit kıyı eğimine, taban sürtünmesine, bölgedeki katı madde özellikleri ile deniz tabanı özelliklerine ve dalga koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir (Almar vd., 2015). Bertin vd. (2008) çalışmasında, ölçülen kıyı boyu akıntı hızları ile tahmin edilen değerler arasındaki en iyi uyumun, Komar ve Inman (1970) çalışmasında önerilen 2.7 değerine çok yakın olan k_v=2.9 için elde edildiği söylenmektedir. Bunun yanında Kaczmarek vd. (2005) çalışmasında, k_v değerinin Komar ve Inman (1970'de tanımlanan K" değerine eşit olduğu açıkça belirtilmiştir. k_v = K" denkleminin yanı sıra K", K' ve K boyutsuz parametrelerinin hangi koşullarda ve hangi denklemler ile belirlendiği ve kullanıldığı konusunda daha geniş açıklamalar verilmiş olup bunların yaklaşık değer aralıkları da Komar ve Inman (1970) çalışmasında belirtilmiştir. Ayrıca kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tahmin formüllerinde bir şekilde karşılaşılan K parametresi ve türevleri hakkında çeşitli bilgiler farklı çalışmalarda da açıklanmaya çalışılmıştır (Barbaro vd., 2014; del Valle vd., 1993; Fredsoe ve Deigaard, 1992; Dean vd., 1982). Gerçekleştirilen tez çalışmasında, literatür araştırmaları sonucunda elde edilen k_v = K" ifadesi kullanılmış ve sahaya özgü sabit k_v katsayısı H_s = 0.92 m ve D_{50} = 0.38 mm için 2.20 olarak dikkate alınmıştır. (Fredsoe ve Deigaard,1992 - Şekil 12.9, Sayfa: 335; Koman ve Inman, 1970).

Fredsoe ve Deigard (1992) çalışmasında verilen dalga yüksekliği, ortalama katı madde tane çapı ve $K=K_c$ parametresinin bağıntısını gösteren grafikten $K=K_c$ değeri Şekil 3.7'de gösterildiği gibi 0.62 olarak bulunmuştur. Komar ve Inman (1970) çalışmalarında verilen bağıntılardan yola çıkıldığında ise K' katsayısı 0.28 olarak bulunmuştur. Yine Komar ve Inman (1970) çalışmasına göre K=K'xK'' bağıntısına göre K''=2.20 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.7 K ve dalga yüksekliği, tane çapı ilişkisi (Fredsoe ve Deigard, 1992)

Bu ampirik modelin kullanılabilmesi için gerekli temel parametreler, belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p), dalga geliş açısı (α_0) ve temel sabitler olan kırılma parametresi γ_b ve yerçekimi ivmesi g'dir. Bu parametreler 1979-2018 yılları arasındaki ECMWF Era-Interim rüzgar verileri kullanılarak elde edilmiştir. Kaczmarek vd. (2005) ifadesinde kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı boyu akıntı hızı hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için kırılan dalga yüksekliği ve dalga kırılma açısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreleri elde edebilmek amacı ile Larson vd. (2009) tarafından geliştirilen ifade kullanılmıştır. Larson vd. (2009) çalışmasında verilen ifadeye göre kırılan dalga parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\theta_b = \arcsin\left(\sin(\alpha_0)\sqrt{\lambda}\right) \tag{3.5}$$

$$H_b = h_b.\gamma_b \;;\; h_b = \lambda C^2 / g \tag{3.6}$$

γ_b dalga kırılma parametresi (0.78)

burada, λ düzeltme katsayısı olup $\lambda = \delta.\lambda_a$ olarak elde edilmektedir. δ ise coupling katsayısı olarak bilinmektedir ve $\delta = 1 + 0.1649\varepsilon + 0.5948\varepsilon^2 - 1.6787\varepsilon^3 + 2.8573\varepsilon^4$ şeklinde bulunmaktadır.

Burada, ε taşınım katsayısı olup $\varepsilon = \lambda_a \sin\alpha_0^2$ şeklinde elde edilmektedir.

$$\lambda_a = \left[\cos(\alpha_0)/\alpha\right]^{2/5} \; ; \; \alpha = \left(\frac{C}{\sqrt{gH_s}}\right)^4 \left(\frac{C}{C_g}\right)\gamma_b^2 \tag{3.7}$$

burada, C derin su dalga hızı, C_g dalga grup hızı olmak üzere $C = 1.56T$; $C_g = C/2$ 'e eşittir.

Bu yöntem, kırılan dalga parametrelerini elde etmek için ampirik katı madde taşınım miktarı hesap yöntemlerinden önce uygulanmaktadır. Çalışma döneminde 1979-2018 yılları arasındaki kırılan dalga parametreleri (H_b, α_b) Larson vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilmiş ve daha sonra kıyı boyu katı madde taşınım miktarını hesaplamak için seçilen ampirik taşınım formüllerinde kullanılmıştır.

3.3.2.3 Bayram vd. (2007) Yöntemi

Geliştirilen yeni formül, kıyı alanlarında gerçekleştirilen pratik uygulamalar ile kıyıdaki katı madde taşınımının sayısal olarak modellenmesi ve kıyı çizgisi değişiminin izlenebilmesi için oldukça uygundur. Alternatif bir formül elde edilmesinin genel sebebi ise mevcut formüllerdeki sınırlamalardır. Bu sebeple yeni formül yalnızca dalga kaynaklı akıntılar için değil, aynı zamanda rüzgar ve gelgit kaynaklı katı madde taşınımı hesaplarında da uygulanabilmektedir. Bayram vd. (2007) yöntemi, kıyı boyu katı madde taşınımını yöneten başlıca fiziksel faktörleri içermekte ve birçok koşulu kapsayan geniş bir veri seti ile doğrulanabilmektedir. Bayram vd. (2007) tarafından geliştirilen bu formül aşağıda ifade edilmiştir.

$$Q_{lst} = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1-a)\, g w_s} F\bar{V} \tag{3.8}$$

burada, ε taşınım katsayısı, $\bar{V}$ surf bölgesi üzerinde ortalama kıyı boyu akıntı hızı, F enerji akısı, a porozite ve w_s katı madde tane çökelme hızıdır.

$$\bar{V} = \frac{1}{x_b}\int_0^{x_b} V dx = \frac{5}{32}\frac{\pi \gamma_b \sqrt{g}}{c_f} A^{3/2} \sin\theta_b \tag{3.9}$$

burada c_f sürtünme katsayısı olup 0.05 olarak dikkate alınmıştır (Larson ve Kraus, 1991).

$$A = \frac{9}{4}\left(\frac{w_s^2}{g}\right)^{1/3} \tag{3.10}$$

$$F_b = E_b C_{gb} \cos\theta_b \tag{3.11}$$

$$E_b = \frac{1}{8}\rho g H_b^2 \text{ ve } C_{gb} = \sqrt{g\frac{H_b}{\gamma_b}} \tag{3.12}$$

Surf bölgesinin denize doğru enerji yayılımı ihmal edildiğinde, herhangi bir derinlik için $F=F_b$ olarak dikkate alınabilmektedir.

$$\varepsilon = \left(9.0 + 4.0\frac{H_{s,b}}{w_s T_p}\right).10^{-5} \tag{3.13}$$

Bayram vd. (2007) ifadesinde kullanılacak olan kırılan dalga parametreleri yine Larson vd. (2009) yöntemine göre belirlenmiştir. Hesaplarda porozite değeri 0.4 olarak dikkate alınırken, katı madde tane boyutu 0.38 mm için w_s çökelme hızı 0.04678 m/s olarak bulunmuştur.

3.3.2.4 Sayısal Model (LITPACK)

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının tahmin edilmesinde kullanılan ampirik hesap yöntemlerine ek olarak, çalışma alanındaki taşınım miktarı sayısal bir modelle de belirlenmiştir. Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında kullanılan sayısal model, Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI, 2008b) tarafından geliştirilen LITPACK yazılımıdır. LITPACK, dalga ve akıntılarda kohezif olmayan katı madde taşınımının modellenmesini, kıyı çizgisi gelişmini, kıyı bölgesindeki kum hareketini ve profil gelişimini içeren çalışmalarda kullanılmaktadır. LITPACK

paketindeki belirleyici sayısal modüller: STP, LITDRIFT, LITLINE, LITREN ve LITPROF olarak sıralanmaktadır. LITPACK, kıyı şeridindeki katı madde akısının değerlendirilmesi için dalga radyasyon gerilimi hesaplamaları dahil sofistike bir yaklaşım kullanmaktadır. Yaklaşımın ayrıntılı açıklaması [122] çalışmasında yer almaktadır.

Çalışma alanındaki kıyı boyu katı madde taşınım miktarını belirlemek için LITDRIFT modülü kullanılmıştır. Kıyı morfolojisi çalışmalarında önemli bir yere sahip olan katı madde bütçe analizini içeren LITDRIFT modülü, bir kıyı profili için kıyıya dik dalga yüksekliği, dalga oluşumu ve kıyı akıntısının dağılımını modellemektedir. Belirleyici bir sayısal model olan bu modül, hesaplamalarda iki temel model kullanmaktadır (DHI, 2008c).

- Hidrodinamik model,
- Katı madde taşınım modeli

LITDRIFT modülü ile;

- Kıyı boyu akıntısı,
- Kıyı boyu katı madde taşınımı,
- Yıllık kıyı boyu katı madde taşınımı, belirlenebilmektedir.

LITDRIFT modülü için kullanılan girdi verileri, dalga modeli sonuçlarından alınan, yerel olarak ölçülen dalga verileri kullanılarak kalibre edilen ve doğrulanan dalga verileridir. LITDRIFT modülü, diğer yöntemlere göre katı madde taşınım sürecini tanımlayan daha fazla parametre içermektedir. Bunlar; kıyı jeolojisi, rüzgâr, akıntılar, taban pürüzlülüğü, taban şekilleri, çeşitli dalga teorileri ile zaman ve dalga koşullarına göre konumlarını değiştirebilen açık deniz eşikleridir. Kıyı parametreleri doğru belirlenirse ve model doğru model veya ölçüm sonuçlarına göre kalibre edilirse sayısal model çıktılarının saha ile en uyumlu sonuçları vermesi beklenmektedir. Saha ölçümlerine göre, çalışmada kullanılan ortalama tane çapı (D_{50}) ve katı madde yayılması (geometrik standart sapma) sırasıyla 0.38 mm ve 1.336 olarak dikkate alınmıştır.

Bölgede kıyı boyu katı madde taşınımına ait bir ölçüm olmadığından, LITDRIFT dolaylı olarak LITPACK paketinin LITLINE modülü kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu iki modül işbirliği içinde çalışabilmektedir. Gerçekleştirilen bu dolaylı kalibrasyon yöntemi 2013 ve 2015 yılları arasını dikkate almıştır. LITLINE modülü, belirli bir dönem boyunca kıyı çizgisinde meydana gelen değişiklikleri alansal ve zamansal olarak değişen kıyı boyu katı madde taşınımını kullanarak hesaplamaktadır (DHI, 2008d). LITLINE modülü, kıyı çizgisi konumunu, dalga iklimine ait girdi verilerine göre bir zaman serisi olarak tahmin etmektedir. LITLINE modelinin kalibrasyonu, uydu görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. LITLINE modülünden elde edilen kıyı çizgisi değişimi, uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgileri ile karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmada kullanılan PLEIADES uydu görüntüleri 11 baytlık radyometrik çözüme ve 0.7 m çözünürlüğe sahiptir. LITLINE modülünü kalibre etmek için Haziran 2013 ile Ağustos 2014 tarihleri arasındaki kıyı çizgisi değişimi kullanılmıştır. Kalibrasyon aşaması için % 0.37'lik ortalama mutlak yüzde hatası bulunmuştur. Bu simülasyonun ardından, kalibre edilmiş modeli doğrulamak için Ağustos 2014'ten Haziran 2015'e kadar olan ikinci simülasyon aşaması kullanılmıştır. Bu faz için ise % 0.42'lik ortalama mutlak yüzde hatası tespit edilmiştir. Öte yandan, LITLINE ile kalibrasyon kesin değildir, çünkü kıyı boyu katı madde taşınımının az ya da çok tahmin edilmesinin etkileri taşınım derinliği değiştirilerek düzeltilebilir, ancak bu çalışmada taşınım derinliği (toplam yükseklik, aktif profil derinliği) LITLINE simülasyonlarında kıyı profili ölçümlerine göre sabit tutulmuştur.

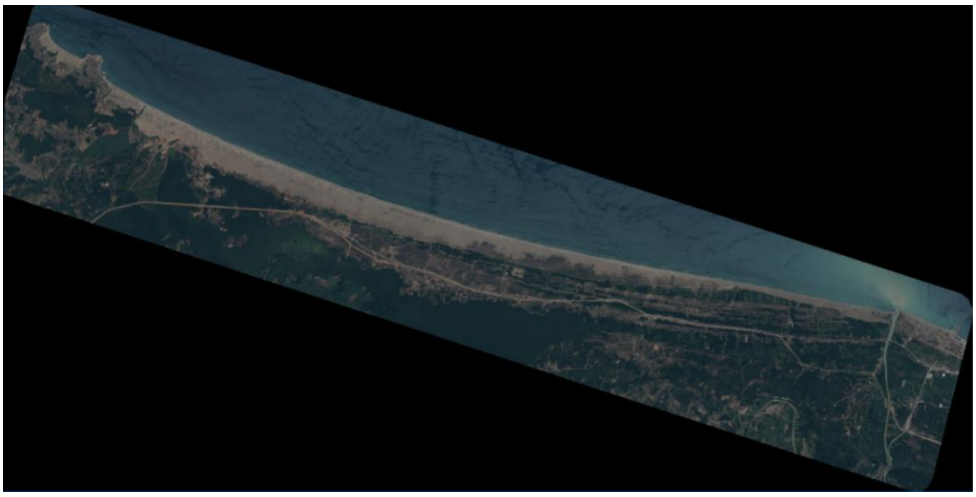
Bir diğer yandan, ilgili çalışma alanı için kalitatif bir kıyı boyu katı madde taşınım miktarı vermek ve ampirik ile sayısal modellerden elde edilen sonuçları değerlendirebilmek için de bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, önceki paragrafta bahsedilen uydu görüntülerinden elde edilen eski yıllara ait kıyı çizgisi değişimlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenebilmesi için, kıyı boyu katı madde taşınıındaki değişimlere bağlı olan basit tek çizgi teorisi kullanılmıştır (Denklem 3.14). Anderson vd. (2018) çalışmasına göre tek çizgi teorisinin kullanıldığı modellerde kıyıya dik katı madde değişikliğinin genellikle ihmal edilebilir olduğu varsayılmaktadır ve bunun yerine,

kıyı boyu katı madde taşınım etkisi ile birlikte katı maddenin birikmesine/erozyonuna bağlı olarak kıyı çizgisi denize ya da karaya doğru taşınırken kıyıya dik profilin şekli korunmaktadır. Zamansal kıyı çizgisi değişimleri, aşağıdaki gibi katı madde taşınımının kıyı boyu değişimleri ile ilgilidir:

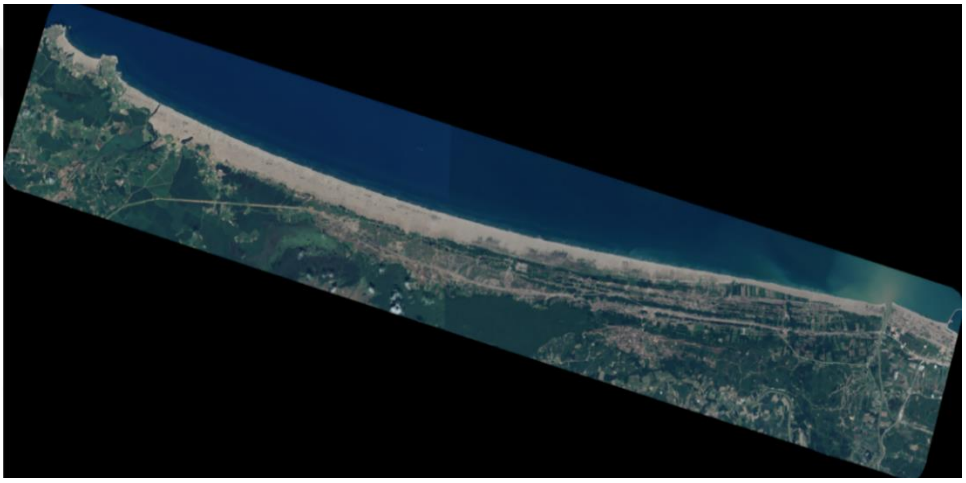
$$Q_x = -h\int \frac{\partial y}{\partial t} dx \tag{3.14}$$

Burada Q_x, hacimsel kıyı boyu katı madde taşınım miktarı (m^3/gün), y, kıyı çizgisinin yer değiştirmesi h, kapama derinliği ve kıyıdaki kumul yüksekliğinin toplamı olarak ifade edilen aktif profil derinliğidir ve x ise kıyı eksenidir (Oh vd., 2020).

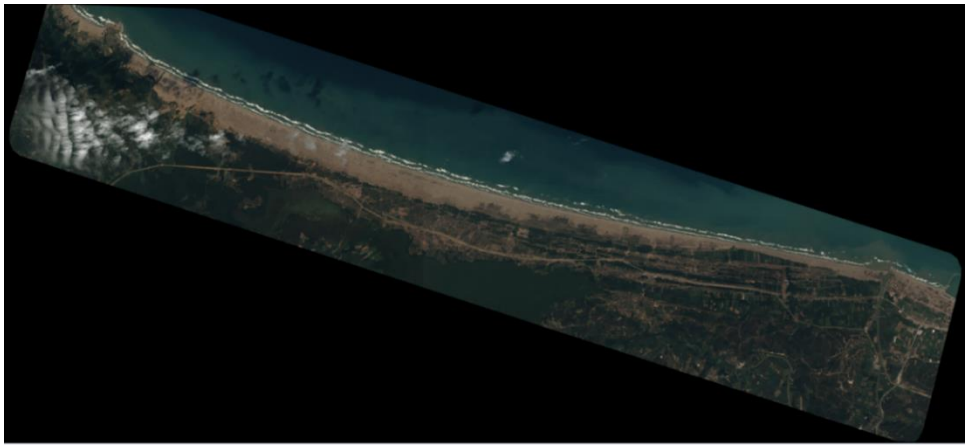
Anderson vd. (2018), Oh vd. (2020) ve Chowdury vd. (2020) araştırmalarından elde edilen bilgilere göre gerçekleştirilen tez çalışmasında da uydu görüntüleri kullanılarak kalitatif kıyı boyu katı madde taşınım miktarı belirlemeye yönelik benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çalışma kapsamında 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait söz konusu uydu görüntüleri kullanılmıştır (Şekil 3.8-Şekil 3.10). Bu yıllara ait kıyı çizgilerinin birbirlerine göre konumları ve değişimleri de Şekil 3.11 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.8 2013 (30/07/2013) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü

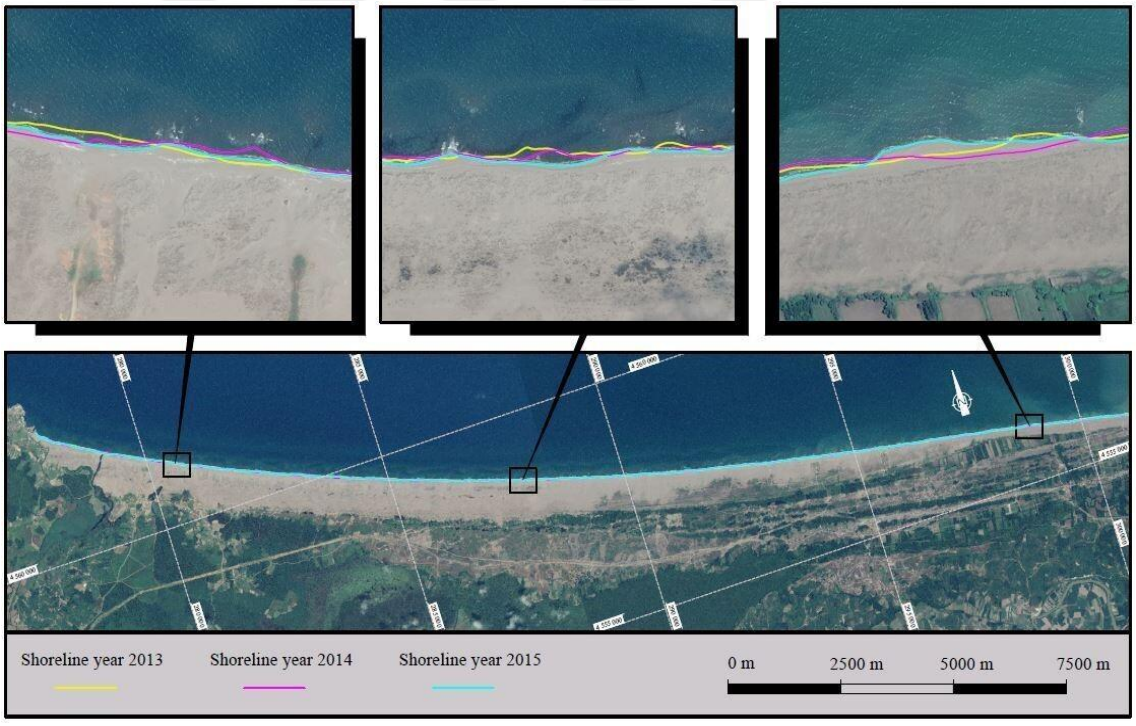


Şekil 3.9 2014 (31/08/2014) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü



Şekil 3.10 2015 (09/07/2015) yılına ait PLEIADES uydu görüntüsü

Tarihsel kıyı çizgileri kullanılarak, x=50 m aralıklarına karşılık gelen y değişimleri belirlenmiştir. Denklemde ifade edilen aktif profil derinliği h, kapama derinliği ve kıyı kumul yüksekliğinin toplamıdır. Kapama derinliği farklı formüllerle hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, ilgili araştırma alanı içinde yer alan yedi farklı platformda TUBITAK 117Y333 Projesi (Şahin vd., 2021) kapsamında gerçekleştirilen profil ölçümleri ile farklı formüller kullanılarak kapama derinliği belirlenmiştir. Elde edilen değişimler, h profil derinliği ve x mesafeleri formülde yerine konulduğunda, 2013-2015 dönemi için iki yıllık ortalama kıyı boyu katı madde taşınım miktarı 76.000 m^3/ yıl olarak belirlenmiştir. Bu değer, Tablo 3.3'de verilen ampirik formüllerin net taşıma değerleri ile karşılaştırılmış ve değerlerin aynı mertebede olduğu görülmüştür. Böylelikle Karasu bölgesindeki net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının kalitatif olarak 60.000-80.000 m^3/yıl aralığında olduğunu söylemek mümkündür (Başaran ve Güner, 2021).



Şekil 3.11 PLEIADES uydu görüntülerinden elde edilen 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait kıyı çizgileri

3.3.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Sonuçları ve Değerlendirmeleri

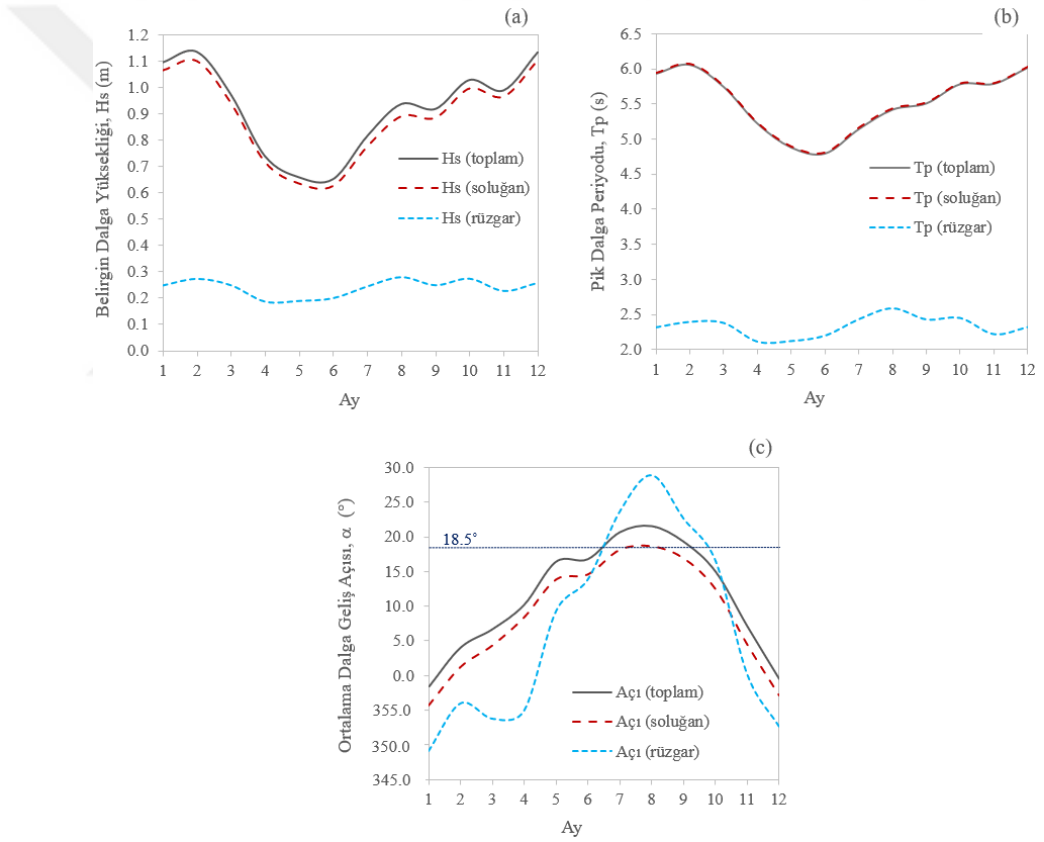
3.3.3.1 Dalga İkliminin Değerlendirilmesi

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, çalışma alanında meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım miktarını hesaplayabilmek için bu bölgeyi temsil eden 40 yıllık geçmiş saatlik derin deniz dalga verileri Bayram vd. (2007), Kaczmarek vd. (2005), Kamphuis (1991) ve LITDRIFT yöntemlerinde kullanılmıştır. Saatlik dalga verileri kullanılarak gerçekleştirilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesabının yanı sıra bölgenin dalga iklimini ortaya çıkarmak için de dalga parametrelerinin çalışma dönemi boyunca aylara göre ortalamaları ve değişimleri belirlenmiştir. Şekil 3.12'de belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısı (α_0)'ın 40 yıllık aylara göre ortalamaları (40 tane ocak ayının ortalaması gibi) gösterilmektedir. 1979-2018 yılları arasındaki çalışma dönemi boyunca elde edilen 40 yıllık dalga parametrelerinin ortalamaları incelendiğinde, belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu ve etkin dalga açısı (yönü) sırasıyla 0.92 m, 5.53 s ve 12° (K-KKD) olarak bulunmuştur. Toplam ($H_{s,toplam}$), soluğan ($H_{s,soluğan}$) ve rüzgâr dalgalarının ($H_{s,rüzgâr}$) aylık ortalama belirgin dalga yükseklikleri ve bu parametrelere ait mevsimsel değişimler Şekil 3.12'de gösterilmiştir. 40 yıllık çalışma döneminin sonunda yıllık ortalama soluğan ve rüzgâr dalgalarının yükseklikleri ($H_{s,soluğan}$) ve ($H_{s,rüzgâr}$) sırasıyla 0.89 m ve 0.24 m olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, rüzgâr dalgalarının yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin, soluğan dalgalarının belirgin dalga yüksekliğine göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni ise, Karadeniz Havzasında soluğan dalgalarının gelişmesinde etken olan feç mesafelerinin büyük olmasıdır (> 600 km) (Başaran ve Güner, 2021).

Şekil 3.12'de verilen dalga iklimi parametreleri ve bu parametrelerin mevsimsel değişimleri, ilgili literatür çalışmalarından elde edilen Güneybatı Karadeniz Bölgesine ait genel dalga iklimi özellikleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Akpınar vd., 2017; Bingölbali vd., 2019; Rusu, 2009; İşlek vd., 2021). Sonuçlar irdelendiğinde yıllık ortalama dalga enerjisine ve maksimum dalga yüksekliğine en yüksek katkının kış aylarında (Aralık, Ocak ve Şubat), minimum dalga yüksekliğinin ise bahar ve yaz sezonunda

(Nisan, Mayıs, Haziran) meydana geldiği görülmektedir. Etkin dalga yönü ise genellikle kuzey sektöründendir (Akpınar vd., 2019; Divinsky ve Kosyan, 2015; Onea ve Rusu, 2017; İşlek vd., 2021).

Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında gelen dalgaların kuzey ile maksimum açı yaparak kıyıya ulaştığı Şekil 3.12'den görülebilmektedir. Çalışma alanının kıyı şeridi normali, gerçek kuzeye göre doğuya doğru 18.5° eğimlidir (Şekil 3.1). Çalışma alanındaki pik dalga geliş açıları kuzeye göre 20-30° arasında değişerek geldiğinden, bu aylarda dalgaların kıyı şeridi normalinin sağ tarafından kıyıya yaklaşırken yılın geri kalan zamanlarında genellikle kıyı şeridi normalinin sol tarafından kıyıya yaklaştığını söylemek mümkündür (Başaran ve Güner, 2021).



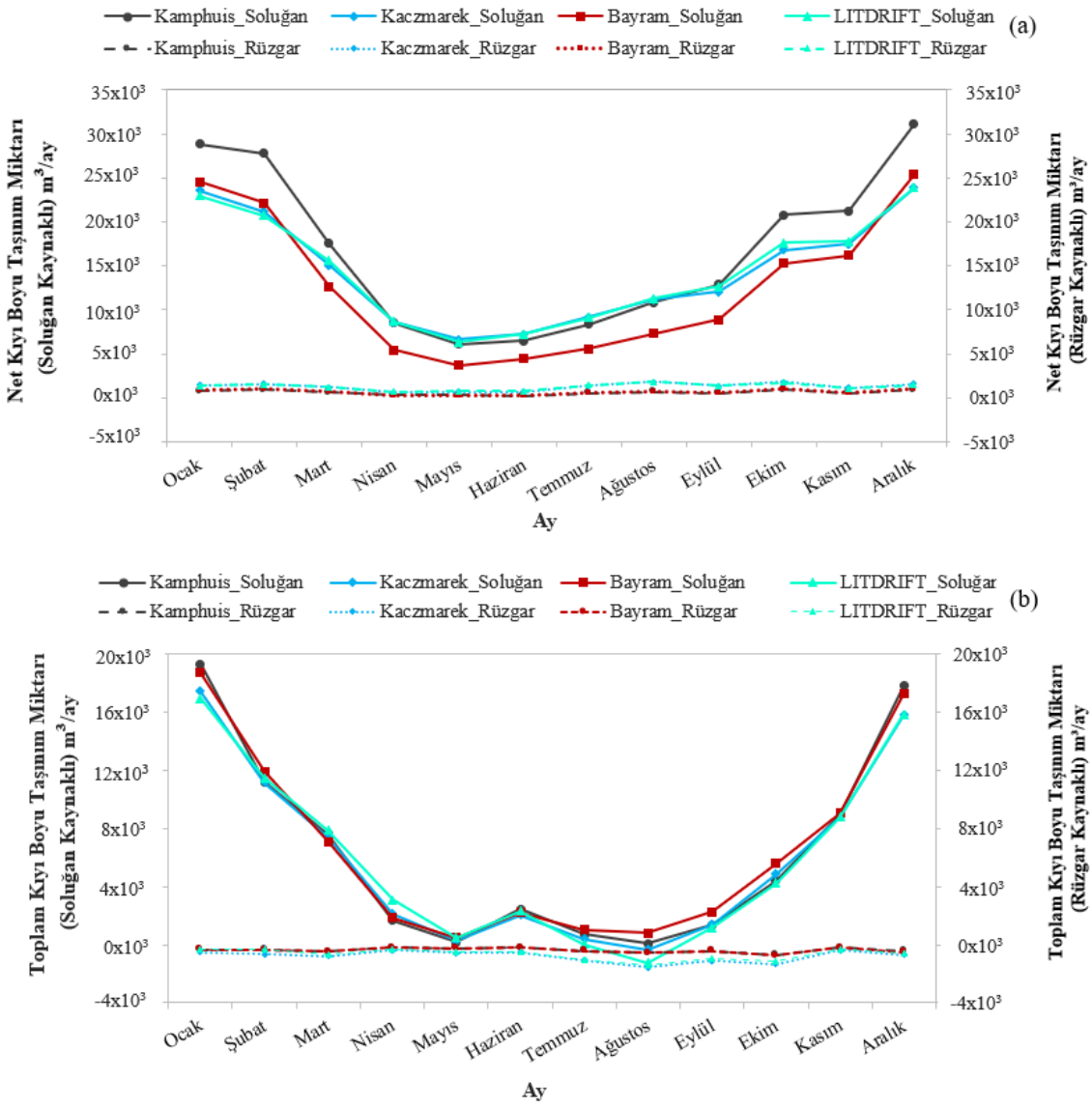
Şekil 3.12 Çalışma alanındaki toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliğinin aylık değişimi, (b) Pik dalga periyodunun aylık değişimi, (c) Ortalama dalga açısının aylık değişimi

3.3.3.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Değerlendirilmesi

Toplam dalgalar (soluğan ve rüzgâr dalgaları olarak bileşenlerine ayrılmaksızın), kıyı şeridi normalinin batısından kıyıya yaklaşmakta ve ilgili çalışma alanının doğu kıyılarına doğru net bir kıyı boyu katı madde taşınımı meydana getirmektedir. Toplam dalga verileri gibi, kıyı şeridinin batısından gelen soluğan dalgaları da kıyı normalinin batısından yaklaşarak, çalışma alanında doğuya doğru net bir kıyı boyu katı madde taşınımı oluşturmaktadır. Soluğan ve rüzgâr dalgalarının neden olduğu kıyı boyu katı madde taşınım miktarları karşılaştırıldığında, çalışmada kullanılan tüm taşınım yöntemleri ile elde edilen soluğan kaynaklı net ve brüt taşınım miktarlarının, rüzgâr dalgaları kaynaklı taşınım miktarına göre sırasıyla ortalama 12 ve 17 kat daha büyük olduğu görülmüştür (Şekil 3.13). Aynı zamanda brüt kıyı boyu katı madde taşınım süreci incelendiğinde, rüzgâr kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım yönünün negatif (batıya) doğru olduğu, buna karşılık soluğan kaynaklı taşınım yönünün ise toplam dalgalardan kaynaklı meydana gelen taşınım gibi doğuya doğru olduğu da şekilden görülmektedir (Şekil 3.13-b). Toplam (soluğan+rüzgâr) dalgalardan kaynaklı oluşan kıyı boyu katı madde taşınım yönünün soluğan kaynaklı taşınım ile aynı olmasının nedeni, çalışma alanında soluğan dalgalarının rüzgâr dalgalarına göre çok daha büyük ve baskın olmasıdır. Bununla birlikte soluğan dalgaları kıyıya yalnızca Temmuz ve Eylül ayları arasında kuzeydoğudan (KD) yaklaşırken yılın geri kalanında kuzeybatıdan (KB) yaklaşmaktadır. Böylelikle, Karasu Bölgesi'ndeki etkin kıyı boyu katı madde taşınımı batı kuzeybatıdan (BKB) doğu güneydoğuya (DGD) olacak şekilde sol kıyıdan sağ kıyıya doğru gerçekleşmektedir (Başaran ve Güner, 2021).

Çalışma alanında mevcut olan rüzgâr dalgaları yerel rüzgârlardan oluşurken, dünyanın en büyük havzalarından biri olan Karadeniz'de soluğan dalgaları uzun feç mesafeleri etkisi ile oluşmaktadır. Soluğan ve rüzgar kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım mktarının mevsimsel değişimleri de Şekil 3.13-a ile gösterilmektedir. Kış aylarında soluğan kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı yüksek olmakla birlikte, ilkbahar ve yaz aylarında soluğan kaynaklı net taşınım çok daha az miktarda oluşmaktadır. Bununla birlikte rüzgâr kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarı özellikle Nisan, Mayıs ve Haziran aylarında

minimum değerlere sahipken, özellikle Ağustos ve Ekim aylarında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Ek olarak, rüzgâr kaynaklı brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarının küçük olduğu ve soluğan kaynaklı brüt taşınıma göre ters yönde olduğu da görülmektedir (Şekil 3.13-b). Bunların yanı sıra, Karadeniz Bölgesi'nde rüzgâr yönünün mevsimsel değişimine bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarının mevsimsel değişimi de Şekil 3.13'de gösterilmektedir (Başaran ve Güner, 2021).



Şekil 3.13 Soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri; (a) net, (b) brüt

Soluğan ve rüzgar kaynaklı olarak ayırmaksızın çalışma alanında hesaplanan toplam net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı 65.000 ± 5.000 m^3/yıl (üç farklı ampirik ve bir sayısal yöntemin ortalaması) iken brüt taşınım miktarı ise yaklaşık 190.000 ± 20.000 m^3/yıl mertebelerindedir. Üç farklı ampirik ve bir adet sayısal yönteme (Bayram vd. (2007), Kaczmarek vd. (2005), Kamphuis (1991) ve LITDRIFT) göre hesaplanan net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Tablo 3.3'te özetlenmiştir.

Tablo 3.3 Dört farklı yönteme göre kıyı boyu katı madde taşınım miktarları

Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarları (m^3/yıl)	Kamphuis (1991)	Kaczmarek vd. (2005)	Bayram vd. (2007)	LITDRIFT
NET	62,900	61,000	71,700	70,110
BRÜT	213,600	182,250	169,800	185,100

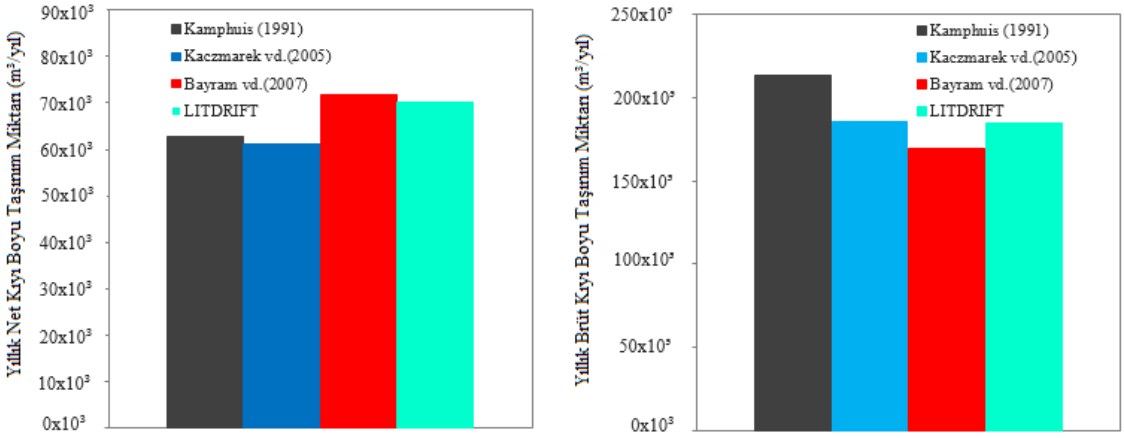
Bu çalışma kapsamında kullanılan tüm yöntemler birlikte değerlendirildiğinde ampirik formüller arasında tespit edilen benzerlikler ve farklılıklar aşağıda özetlemiştir.

Tüm formüller, kırılan dalga yüksekliği (H_b) ve dalga kırılma açısı (α_b)'yi içermektedir. Bayram vd. (2007) ve Kaczmarek vd. (2005) yöntemlerindeki diğer ortak parametre ise g, yerçekimi ivmesidir. Bununla birlikte, diğer iki yöntemden farklı olarak, Kamphuis (1991) yöntemi kıyı boyu katı madde taşınım miktarını, pik periyot (T_p), ortalama tane çapı (D_{50}) ve kırılma bölgesindeki (m) kıyı eğimini dikkate alarak hesaplamaktadır. Kaczmarek vd. (2005) yönteminde ise diğerlerinden farklı olarak, dalga kırılma parametresi γ_b, ve bölgeye özgü sabit k_v hesaplara dahil edilmiştir. Bayram vd. (2007) yöntemi de kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesabında diğer iki yöntemden farklı olarak porozite değeri ile su ve katı maddenin özgül ağırlığını kullanmaktadır.

Tüm formüller birlikte düşünüldüğünde ve yalnızca ortak parametrelere bağlı hale getirildiğinde, kıyı boyu katı madde taşınım miktarları üç formülün hepsinde kırılan dalga yüksekliği (H_b) ve dalga kırılma açısı α_b parametrelerine dayanmaktadır. Buradan taşınım miktarının (H_b) ve (α_b) değerlerinin kuvvetleri

ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Tüm denklem formları incelendiğinde Kaczmarek vd. (2005) ve Kamphuis (1991) yöntemlerinin, aynı yüksekliğe sahip ve rüzgar dalgalarına göre daha büyük olan soluğan dalgalarının kıyıya daha küçük açılar ile yaklaşması durumunda birbirine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Açı değeri büyüdükçe iki yöntem arasındaki fark da artmaktadır. Öte yandan aynı dalga yüksekliğine sahip ve soluğan dalgalarına göre daha küçük olan rüzgar dalgalarının kıyıya büyük açılar ile yaklaşması (kırılma açısı yükseldikçe) durumunda da yöntemler arasındaki farkın arttığı görülmüştür (Başaran ve Güner, 2021).

Elde edilen taşınım miktarı sonuçlarına göre Kaczmarek vd. (2005) yöntemi ve Kamphuis (1991) yöntemi birbirleriyle uyumlu sayılabilecek sonuçlar ortaya koymakta iken Bayram vd. (2007) yöntemi, net kıyı boyu katı madde taşınım miktarını diğer iki yönteme göre daha büyük tahmin etmektedir (Şekil 3.14). Burada Kaczmarek vd. (2005) yöntemindeki önceki bölümlerde açıklanan parametrelerden biri olan, kıyı eğimi, taban sürtünmesi, tane ve deniz tabanı özelliklerine bağlı olarak değişen sahaya özgü k_v sabitinin taşınım miktarı üzerinde etkili olduğuna da dikkat çekmek gerekmektedir. Aynı zamanda Bayram vd. (2007) yöntemi diğer yöntemlerden farklı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında sadece dalga kaynaklı akıntıları değil, rüzgar ve gelgit akıntılarını da dikkate almakta ve bu durum daha büyük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde edilmesine sebep olmaktadır.



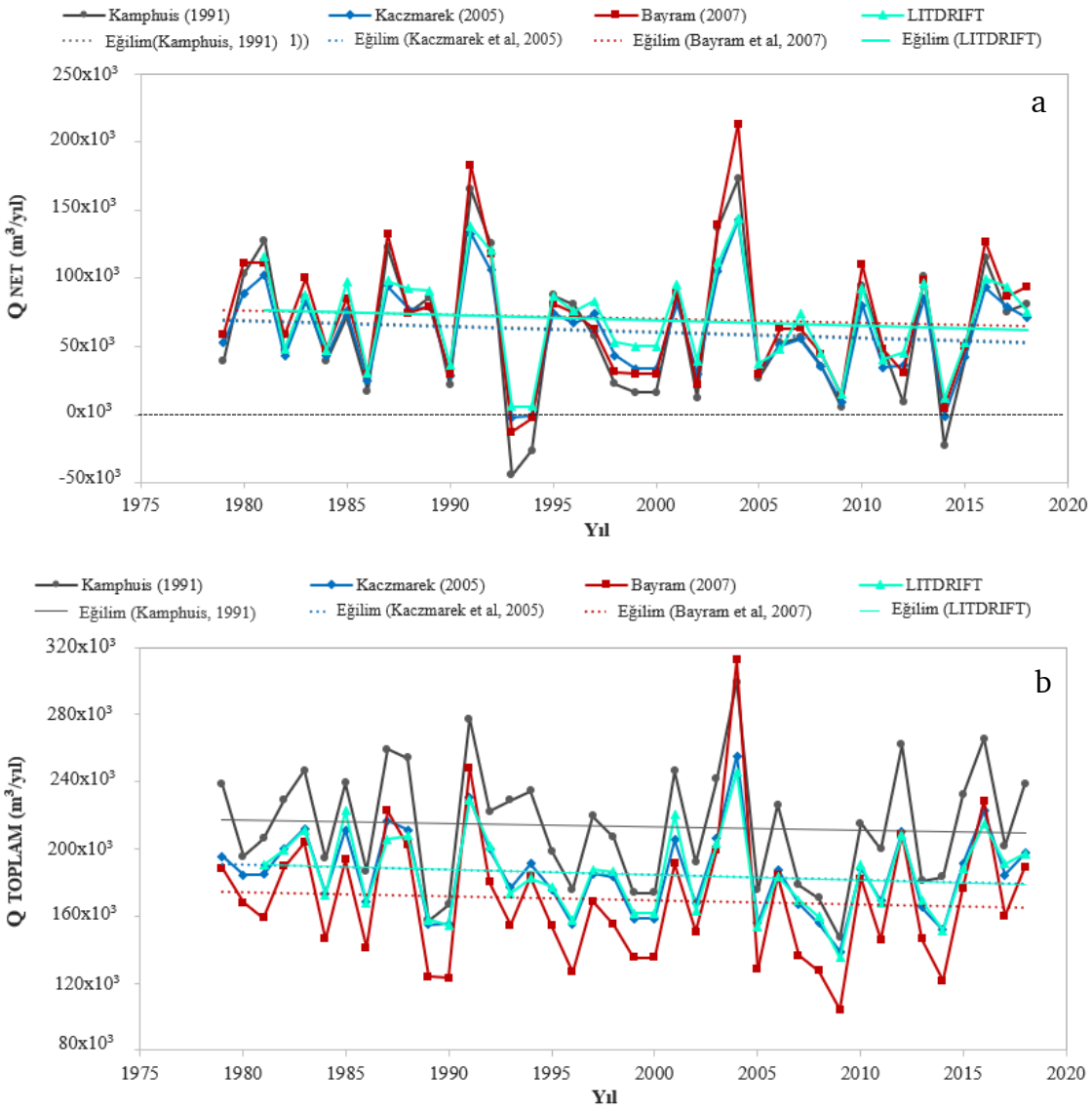
Şekil 3.14 Net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı hesabında kullanılan dört farklı yöntemin karşılaştırılması

Uzun dönemli değişimlerin eğilim analizleri parametrik veya parametrik olmayan yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Parametrik eğilim belirleme yöntemleri, verilerin normal dağılımını gerektirmektedir. Parametrik olmayan eğilim analizi yöntemleri ise verilerin dağılım şeklinden bağımsız olarak zaman serilerinin değişim eğilimlerini belirleyebilmektedir. Bu çalışmada, uzun dönemli değişimlerin incelenmesi amacıyla parametrik olmayan eğilim analizi yöntemlerinden biri olan "en iyi uyum çizgisi" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde saçılan veriler arasındaki ilişkiyi en iyi ifade eden doğrunun denklemi belirlenmektedir. Bu doğrunun denklemi, iki veya daha fazla bağımsız değişkenin doğrusal regresyon analizi ile elde edilmektedir. Böylelikle hem dalga iklimi parametrelerinin hem de dalga iklimine bağlı olarak gelişen kıyı boyu katı madde taşınımı miktarının 40 yıllık çalışma dönemi boyuncaki uzun dönemli değişimleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma dönemi boyunca yıllık kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki değişimi belirleyebilmek için, her yıla ait ortalama taşınım miktarları hesaplanarak sırasıyla net ve brüt miktarlar olarak Şekil 3.15'de görülen eğilim çizgileri ile grafiğe dökülmüştür. Kıyı boyu katı madde taşınımının yıllar arasındaki değişiminin büyük olduğu bu şekilden açıkça görülmektedir. Yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 1.0 ila 3.2×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup tüm yöntemlerin ortalaması 1.9×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 2.1×10^5,

1.85×10^5, 1.7×10^5, $1{,}84\times10^5$ m^3/yıl değerlerindedir. Yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise 0.1 ile 2.1×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup, tüm yöntemlerin ortalaması 0.65×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 0.62×10^5, 0.60×10^5, 0.71×10^5, 0.69×10^5 m^3/yıl değerlerindedir.

Net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında meydana gelen büyük değişimler özellikle 2004 yılında gözlenirken bu yılı büyük taşınım miktarları ile 1991 yılı takip etmektedir. 1993 yılında ise düşük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları gözlenirken bu yılı yine düşük taşınım miktarları ile 2014 yılı takip etmektedir. 40 yıllık çalışma dönemi sonunda brüt ve net kıyı boyu katı madde taşınımlarında sırasıyla toplam 10000 m^3 ve 16000 m^3 azalma gözlenirken 40 yılın ortalaması sonucunda (yıllık bazda) ~250 m^3/yıl ve ~400 m^3/yıl mertebelerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir.

Şekil 3.15-a, net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri için sırasıyla %28.6, %22.9, %15.8 ve %20 mertebelerinde azaldığını ortaya koymaktadır. Net kıyı boyu katı madde taşınım miktarında 40 yıllık çalışma dönemi sonunda ortalama azalma %21.8 olarak bulunmuştur. Şekil 3.15-b incelendiğinde ise, brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri için sırasıyla %4.1, %6.8, %5.1 ve %6.3 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. LITDRIFT ve Kaczmarek vd. (2005) yöntemleri ile elde edilen taşınım miktarlarındaki azalma oranının da hemen hemen aynı mertebede olduğu tespit edilmiştir. Brüt taşınım miktarındaki 40 yıllık çalışma dönemi sonunda meydana gelen ortalama azalma ise % 5.6 olarak bulunmuştur (Başaran ve Güner, 2021).



Şekil 3.15 Net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının 40 yıllık değişim eğilimleri

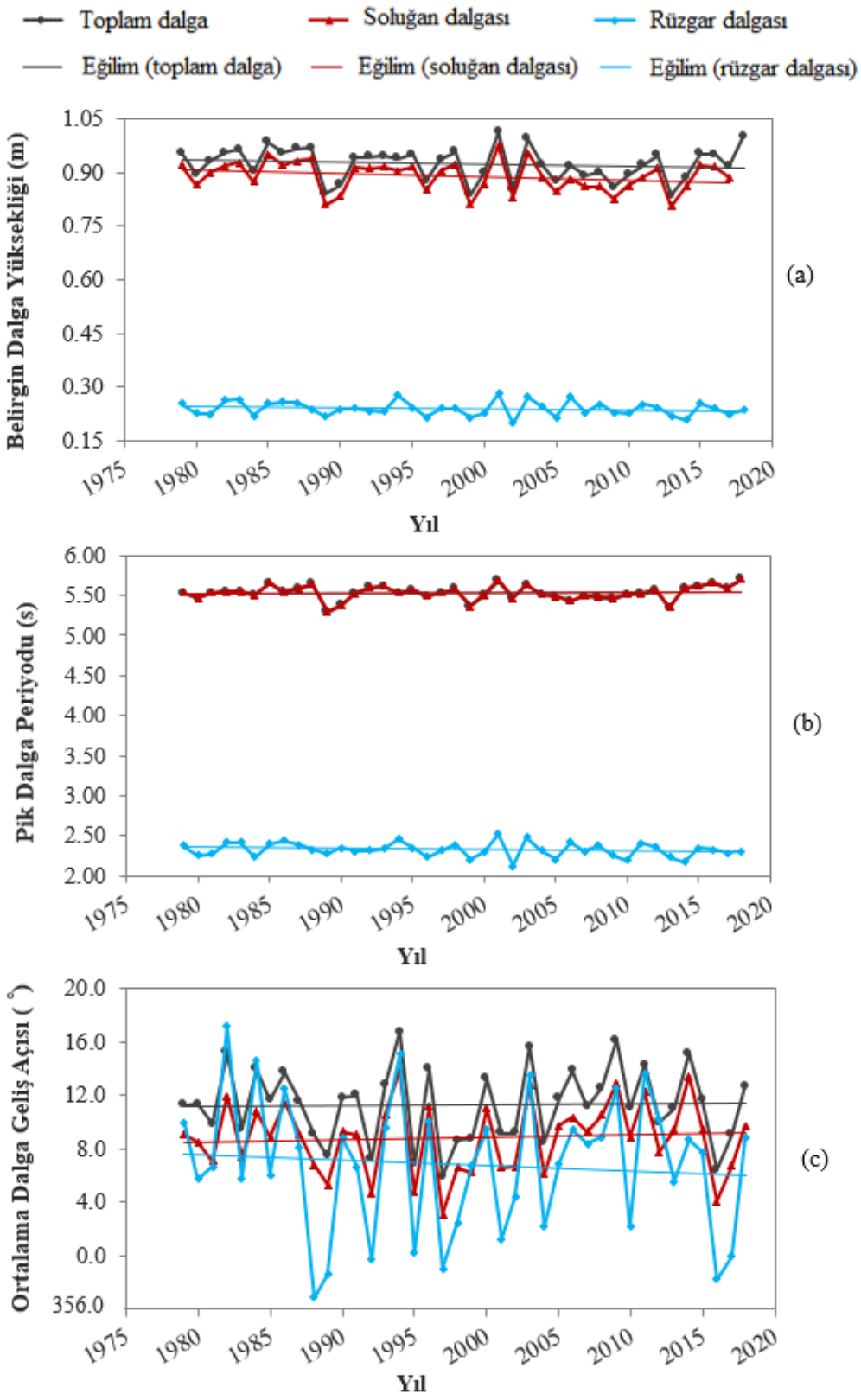
Şekil 3.16'da sırasıyla toplam dalgalar, soluğan dalgaları ve rüzgar dalgaları için belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısı (α_0)'nın 40 yıllık değişimleri sunulmaktadır. 40 yılın sonunda dalga geliş açısı değerleri incelendiğinde toplam, soluğan ve rüzgar dalgaları için şu sonuçların elde edildiği görülmüştür. Toplam dalgaların ortalama gelen dalga açısı 1979 yılında kuzeye göre 11.15° iken, 2018 yılında ise 0.25° doğuya kayarak 11.40° olmuştur. 1979 yılında soluğan dalgaları kıyıya kuzeyden 8.4°'lik bir açı ile yaklaşırken, 2018 yılı sonunda kuzeyden 9.2°'lik bir açı yaparak kıyıya yaklaşmıştır. Diğer yandan rüzgar dalgaları 1979 yılında kuzeye göre 7.6°'lik açı ile 1.70° batıya kayarak 5.9°

ile kıyıya yaklaşmıştır. Buradan yola çıkarak yönlerde çok küçük değişiklikler olduğu için dalga yönünün önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir. Ancak, bu çalışmada 40 yıllık tüm dalga verilerine ait dalga geliş açılarında sırasıyla 0.25° ve 2°'lik bir artış meydana geldiğinde (saat yönünde sapma), yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında %4.4 ve %39.2'lik azalma meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte bir önceki adıma tam zıt şekilde dalga geliş açıları sırasıyla 0.25° ve 2° azaldığında (saat yönünün tersinde sapma) ise yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının %4.0 ve %31.7 mertebesinde yükseldiği tespit edilmiştir.

Şekil 3.16'dan da görülebileceği gibi, tüm dalga parametreleri incelendiğinde, soluğan dalgaları neredeyse toplam dalga değerlerine eşit iken rüzgar dalgalarının toplam dalgaya katkısı çok daha küçük mertebededir. Şekil 3.16'daki eğilim analizleri incelenerek Tablo 3.4'te verilen sonuçlara ulaşılmaktadır. 40 yılın sonunda her dalga türüne ait belirgin dalga yüksekliğinde düşüş eğiliminin meydana geldiği Tablo 3.4'ten açıkça görülmektedir. Kıyı boyu katı madde taşınım miktarında meydana gelen bu azalmanın nedeni olarak 40 yılın sonunda soluğan dalgalarının yüksekliğinde meydana gelen azalma gösterilebilir. Öte yandan rüzgar dalgaları, pik dalga periyodu ve dalga geliş açısı için toplam ve soluğan dalgaları bakımından zıt bir eğilim göstermektedir.

Tablo 3.4 Dalga parametrelerinin eğilim sonuçları (Şekil 3.15)

Dalga Parametreleri	Toplam Dalga	Soluğan Dalgası	Rüzgar Dalgası
Belirgin dalga yüksekliği	% 2.8 azalma	% 4.1 azalma	% 3.9 azalma
Pik dalga periyodu	% 0.5 artış	% 0.6 artış	% 2.5 azalma
Dalga geliş açısı	0.25° artış	0.60° artış	1.70° azalma



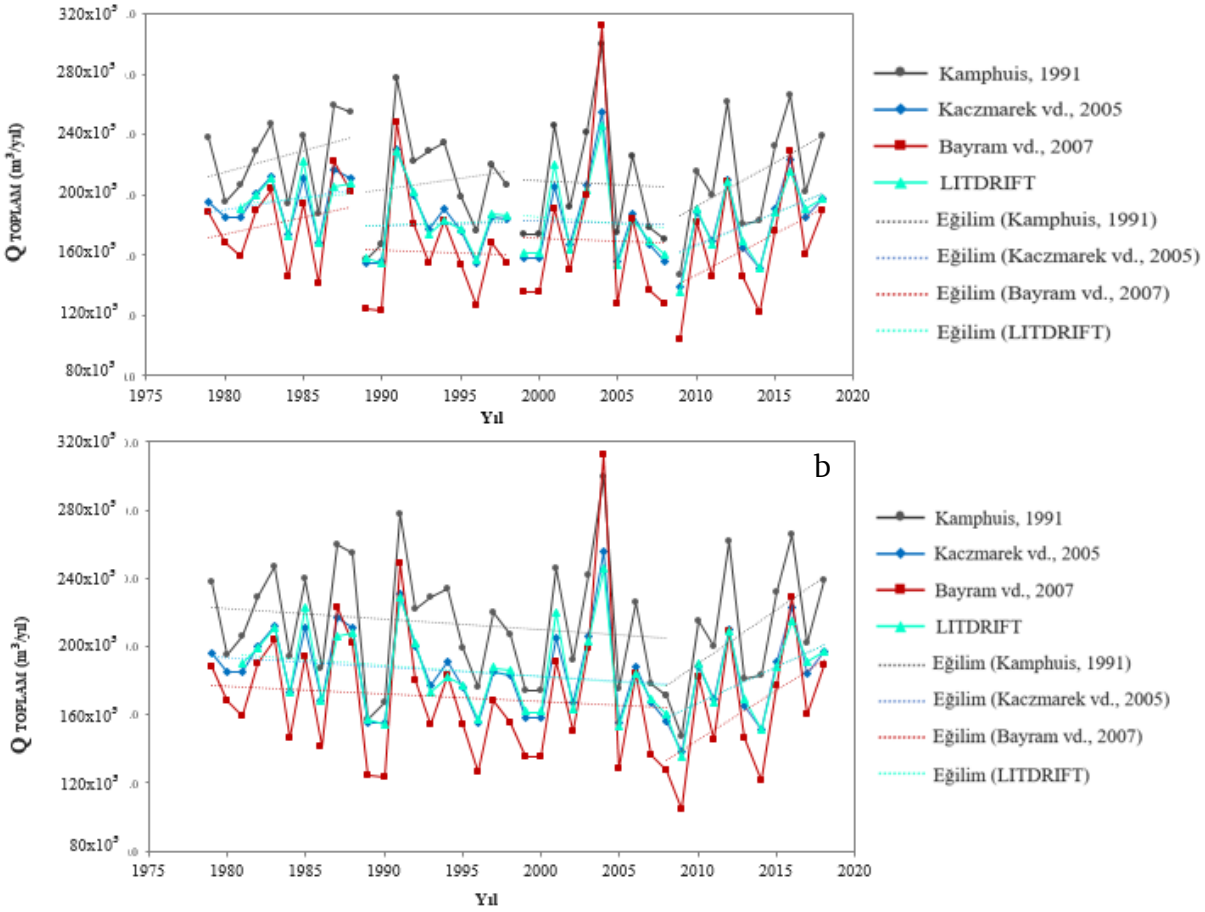
Şekil 3.16 Dalga parametrelerinin yıllık değişimleri

Toplam dalgaların belirgin dalga yüksekliği 1989, 1999 ve 2013 yıllarında minimum değerlerde iken 2001 ve 2018 yıllarında maksimum değerlere ulaşmıştır (Şekil 3.16). Toplam dalgaların geliş açıları incelendiğinde, 1994 ve 2009 yıllarında kıyıya kuzeyden 16-17˚ açıyla (kıyı normaline en yakın ve dolayısıyla kıyıya dik yaklaşma durumu) yaklaştıkları görülmüştür. Dalgaların kıyıya neredeyse dik geldiği bu yıllarda minimum kıyı boyu katı madde taşınım miktarı ile karşılaşılmıştır. 1997 ve 2016 yıllarında dalgalar kıyıya kuzeyden 6-7˚'lik bir açı yaparak (kıyı normal çizgisi ile dalga yönü arasındaki fark maksimumdur) yaklaşmıştır. Dalgaların kıyı normali ile maksimum açı yaparak kıyıya yaklaştığı bu yıllarda daha büyük bir kıyı boyu katı madde taşınım miktarı meydana geldiği görülmüştür. Toplam taşınımın çok düşük olduğu 2009 yılında, belirgin dalga yüksekliğinin de minimum değerde olduğu görülmüştür (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16). Şekil 3.16 ve Tablo 3.4'teki sonuçlara bakıldığında, ilgili araştırma alanı için soluğan dalgalarının toplam dalga üzerinde rüzgar dalgalarına göre 3-4 kat daha fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Kırılan dalga yüksekliğindeki (H_b) değişim brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı üzerinde etkili olurken, dalga kırılma açısı (α_b) parametresindeki değişimin en çok kıyı şeridi normaline bağlı olarak net taşınım miktarı üzerinde etkili olduğunu söylemek mümkündür. Dalga yüksekliği minimum değerde olmamakla birlikte, net taşınım miktarının dalga açısının en yüksek olduğu 1993-1994 döneminde minimum değere ulaşması yukarıda verilen ifadenin göstergesidir (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16).

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının on yıllık periyotlar halinde değişimlerini görebilmek amacıyla her on yılda bir eğilim analizleri yapılmıştır (Şekil 3.17-a) . On yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı değişimleri incelendiğinde, 1999-2008 yılları arasındaki süreçte taşınım miktarlarının azalma eğilimi gösterirken geri kalan tüm zamanlarda taşınım miktarının artış eğiliminde olduğu görülmüştür. 1998-2008 yılları arasındaki on yıllık süreçte, ortalama $\sim 6\times10^4$ m^3/yıl ile en düşük net kıyı boyu katı madde taşınımı meydana gelmiştir. 1989-1998 ve 1999-2008 yılları arasında $\sim 6.5\times10^4$ m^3/yıl mertebesinde, 1979-1988 yılları arasında ise $\sim 7.5\times10^4$ m^3/yıl mertebesinde net kıyı boyu katı madde

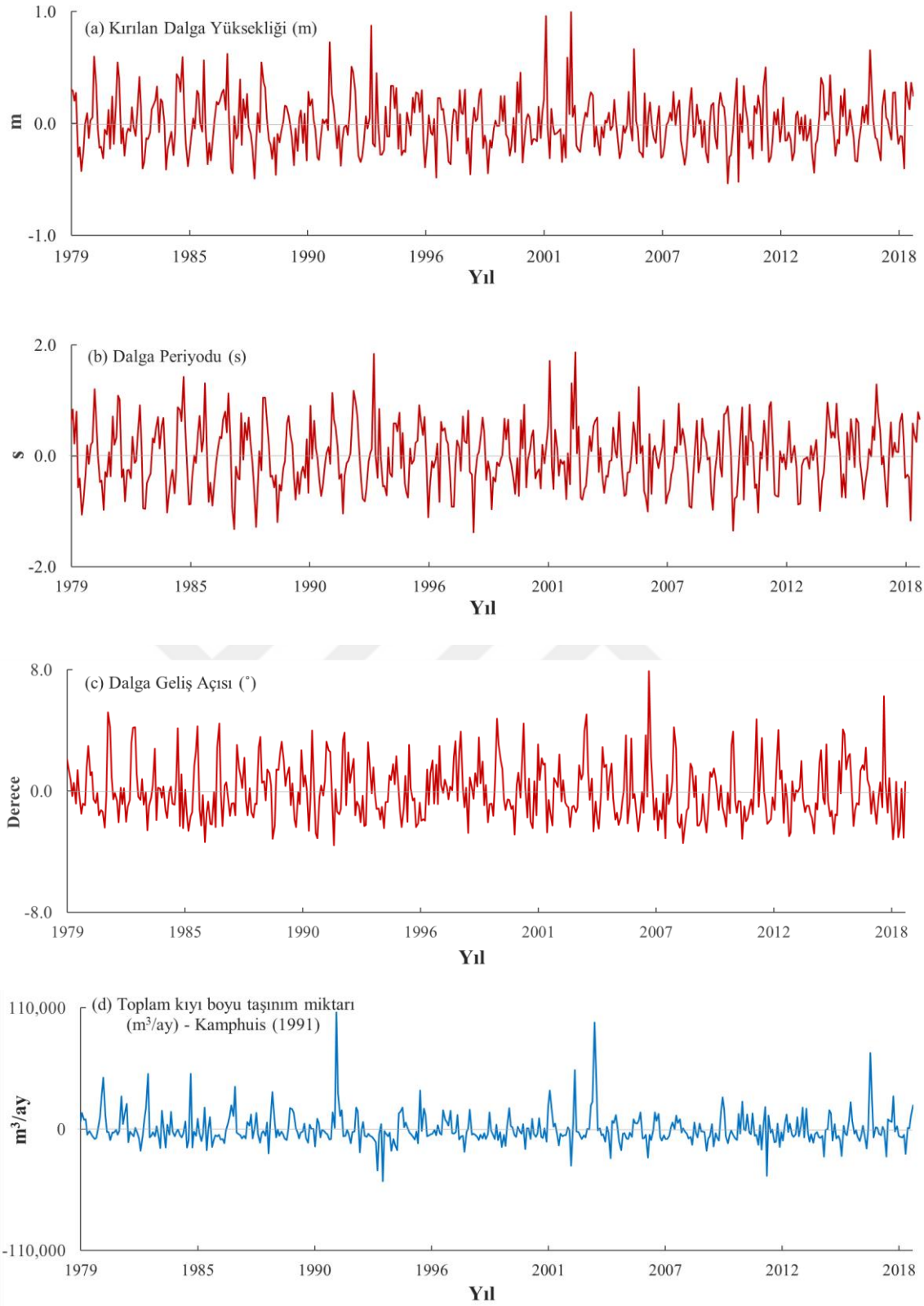
taşınım miktarı tespit edilmiştir. Şekil 3.17-b'de, Karasu kıyısında meydana gelen brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarının 30+10 yıllık periyotlar şeklinde değişimi gösterilmiştir. Gözlem süresinin 30+10 yıl olarak dikkate alınmasının nedeni, son on yılda meydana gelen taşınım miktarındaki değişimin, genel sonuca göre önemli derecede ters eğilime sahip olmasıdır (40 yıllık brüt taşınımda % 5.6 azalma). Bu nedenle, özellikle son on yılda meydana gelen değişimi göstermek amaçlanmıştır. Yıllık taşınıma ait eğilimlerin "10x4" yıllık (Şekil 3.16-a) ve "30+10" yıllık (Şekil 3.17-b) dönemlerde farklı olduğu görülmüştür. Şekil 3.17-b'deki eğilim analizi sonuçlarına göre, 1979-2008 ve 2009-2018 yılları arasında sırasıyla azalan (-%7.3) ve artan (+%28.4) eğilimler ile karşılaşılmıştır. Bunun yanı sıra son 10 yılda taşınım miktarındaki artışın nedeni de araştırılmış ve benzer şekilde dalga parametrelerinin de eğilim analizleri incelenmiştir. Sonuçlar, son 10 yılda belirgin dalga yüksekliğinde artış meydana gelirken, dalga geliş açısında azalma olduğunu göstermiştir. Böylece son 10 yılda dalga yüksekliğinin artması ve dalga açısının azalmasıyla birlikte dalgalar kıyıya daha güçlü ve daha açılı ulaşarak kıyı boyunca büyük miktarda taşınım meydana getirmişlerdir (Şekil 3.15) (Başaran ve Güner, 2021)



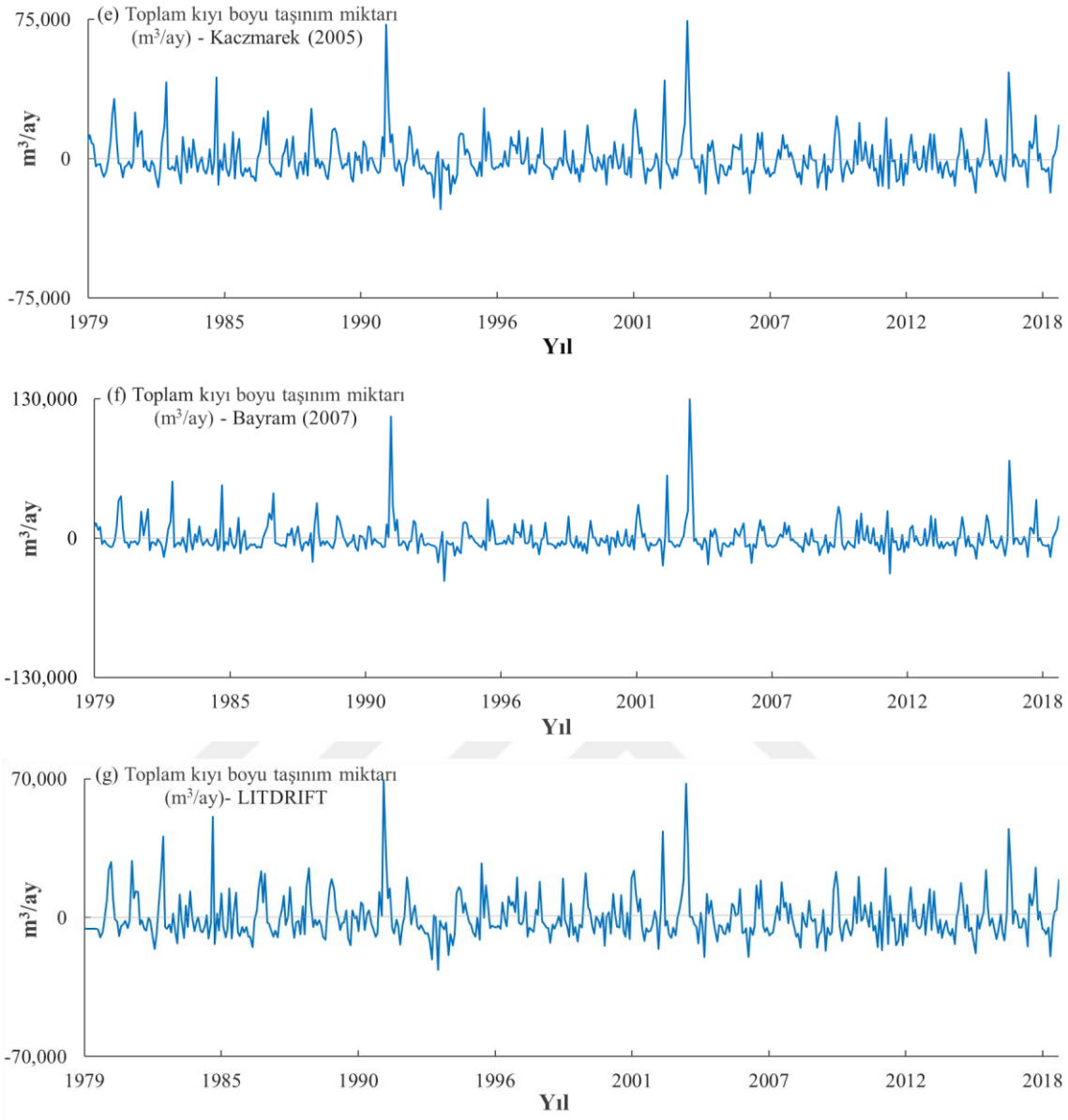
Şekil 3.17 Brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı yıllık değişimi

Diğer yandan çalışma kapsamında kırılan dalga parametrelerindeki uzun dönemli değişimleri belirleyebilmek için, her bir parametreye ait aylık ortalama değerler belirlenmiş ve bu parametrelerin uzun dönemli ortalamaları hesaplanmıştır. Uzun dönemli ortalama değerler, kırılan dalga parametrelerindeki değişimleri tahmin edebilmek için aylık ortalama zaman serilerinden elde edilmiştir (Şekil 3.18). Dalga yüksekliği (H_b), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga yönü (α_b)'nin ortalama değerlerinden sapmaları (DM) genel olarak sırasıyla -0.53 - 1.00 m, -1.37 - 1.87 s ve -3.6 - 7.9° aralıklarında değişmektedir. Kırılan dalga parametrelerinde yıllar ilerledikçe önemli değişimler gözlenmektedir. Nispeten en büyük kırılan dalga yükseklikleri 2003 yılının ardından 2001 ve 1993 yıllarında gözlenirken en düşük dalga yükseklikleri 2010 yılının ardından 1988 yılında gözlemlenmiştir. Dalga periyodundaki ortalamadan maksimum sapmalar 2003 yılı ile 1993 yılında

gözlenmiştir. Ortalama dalga açısında ise 2007 ve 2017 yıllarında ortalamadan büyük pozitif sapmalar meydana gelmiş ve bu durum dalgaların kıyıya gerçek kuzeyin doğusundan yaklaştığını göstermiştir. Aynı zamanda 40 yıllık çalışma süresi içinde üç farklı ampirik ve bir adet sayısal yönteme göre elde edilen taşınım miktarlarının ortalama değerlerinden sapmaları da Şekil 3.18'de verilmiştir. Bu sapmalar Kamphuis (1991) yönteminde -47,000 - 106,000 m^3/yıl arasında, Kaczmarek vd. (2005) yönteminde -27.000 - 70.000 m^3/yıl, Bayram vd. (2007) yöntemi ile -40,000 - 130,000m^3/yıl arasında, LITDRIFT modelinde ise -27.000 - 70.000 aralıklarında değişmektedir. Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemlerinde meydana gelen maksimum sapma değerleri ile 1991 ve 2004 yıllarında karşılaşılmıştır. Dalga parametrelerinin ortalama değerlerinden sapması, ekstrem bir meteorolojik ve dolayısıyla oşinografik olayların o yıllarda meydana gelmiş olabileceğine işaret etmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, 2003 yılında dalga yüksekliği ve periyodundaki ortalamadan sapmalar pik değerlere ulaşmış ve sonuç olarak bu yılki net taşınım miktarları da ortalamadan sapmada maksimum değerler ortaya koymuştur. Ancak 2007 yılında dalga açısının ortalamadan maksimum değerde sapma göstermesi ile dalgaların kıyıya neredeyse dik açıyla yaklaştığı ve böylelikle taşınım miktarında azalma ve ortalama değer etrafında salınım gözlenmiştir (Başaran ve Güner, 2021).



Şekil 3.18 Ortalama değerden sapmalar (a) H_s, (b) T_p, (c) α_b ve (d,e,f,g) toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları



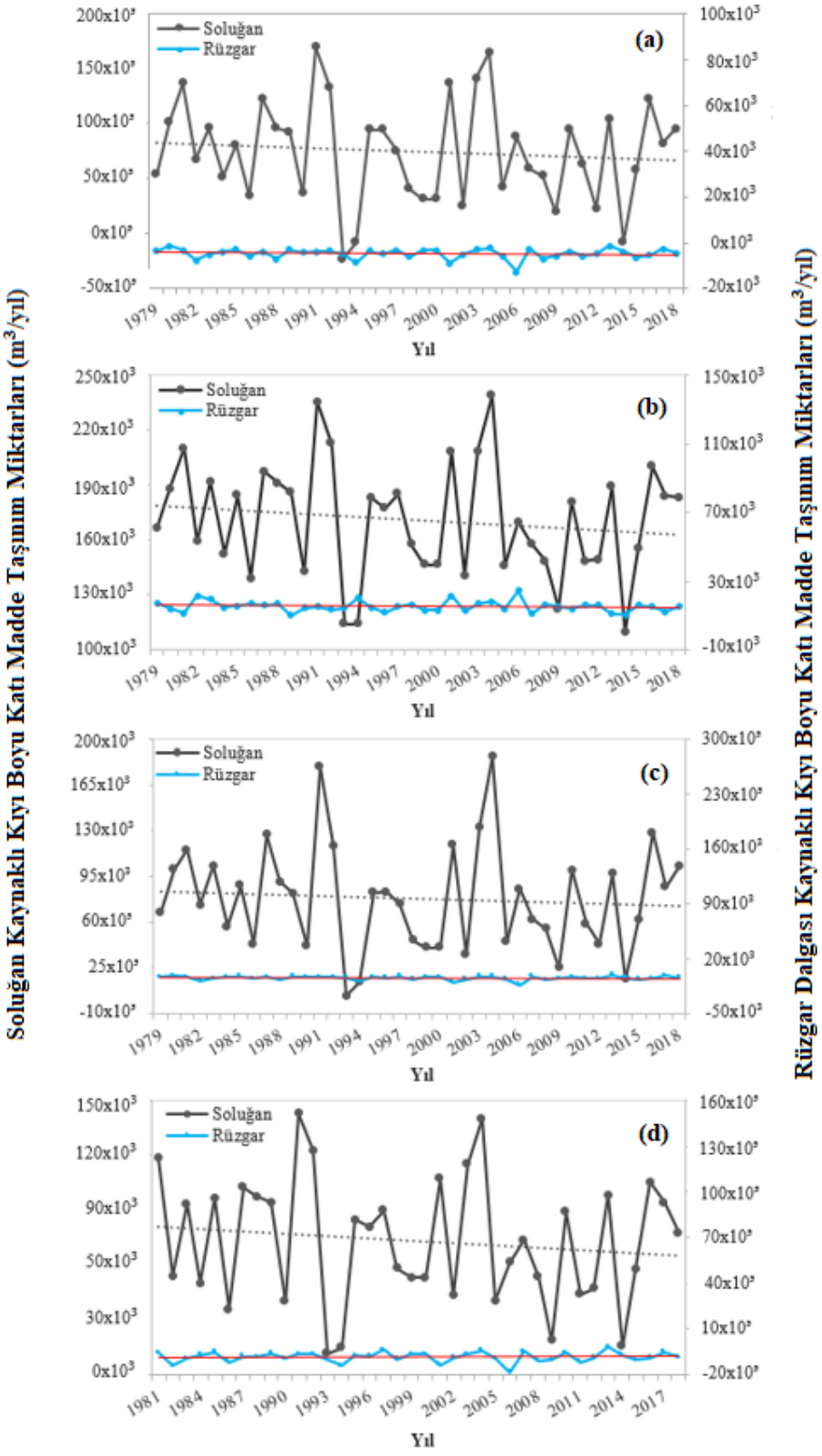
Şekil 3.18 Ortalama değerden sapmalar (a) H_s, (b) T_p, (c) α_b ve (d,e,f,g) toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (Devamı)

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de, 1979-2018 yılları arasında dört farklı yönteme göre elde edilen soluğan ve rüzgar kaynaklı net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarına ait sonuçlar verilmiştir. Aynı zamanda bu sonuçlar Tablo 3.5'te özetlenmiştir. Buradan soluğan kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının azalan eğilime sahip olduğu, rüzgar dalgası kaynaklı net taşınım miktarının ise artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Diğer yandan, hem soluğan hem de rüzgâr kaynaklı brüt taşınım miktarları azalma eğilimi göstermektedir.

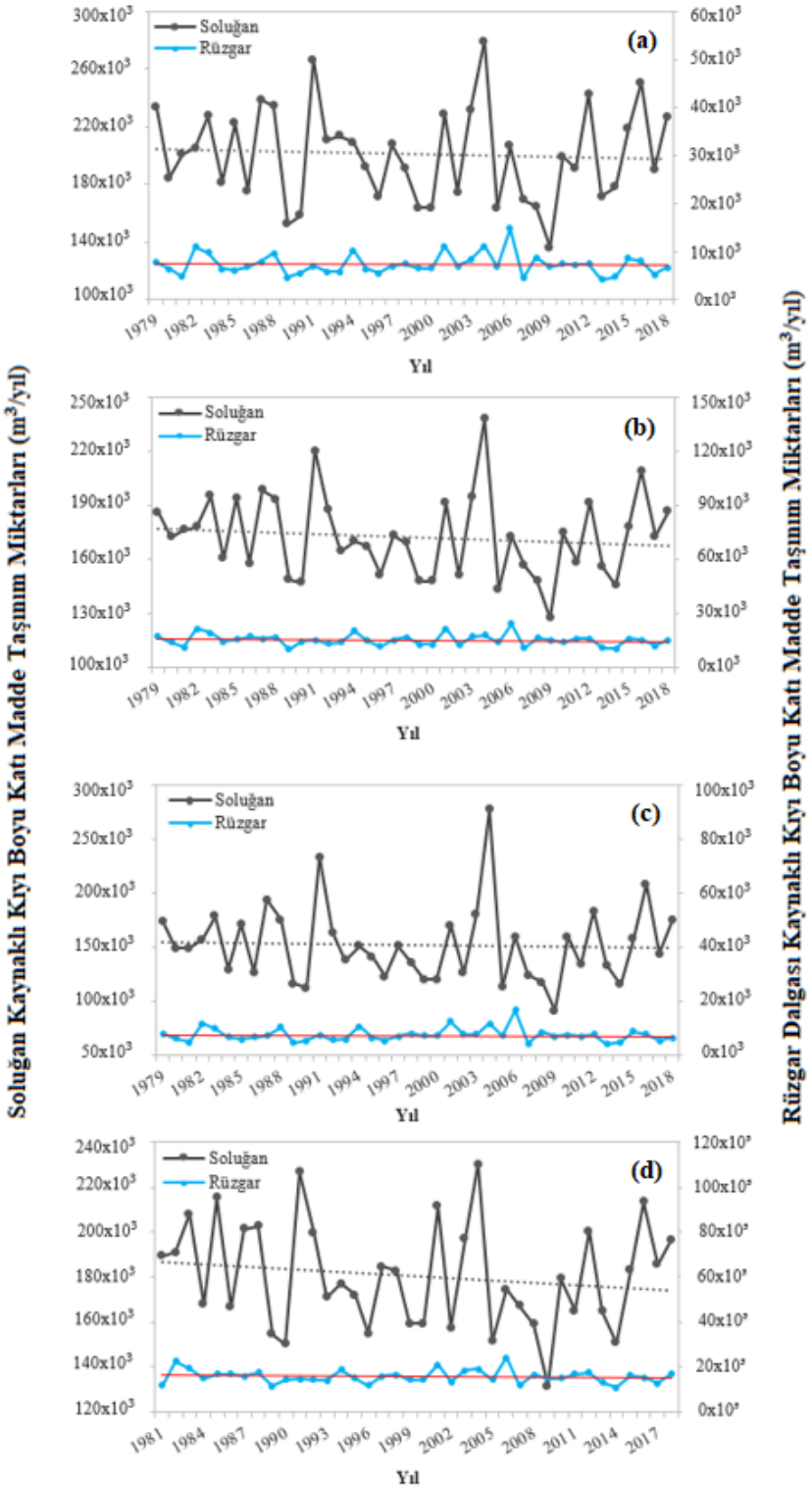
Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'den görülebileceği gibi, üç farklı ampirik yönteme göre maksimum soluğan kaynaklı taşınım miktarları (net ve brüt) 1991 ve 2004 yıllarında meydana gelmiştir. 2014-2015 ve 1993-1994 yılları arasında soluğan kaynaklı net taşınım miktarlarının rüzgar kaynaklı net taşınım miktarlarından bile küçük olduğu gözlenirken; brüt taşınım miktarları için minimum değerler ile de 2009 yılında karşılaşılmıştır. 2006 ve 2001 yıllarında rüzgar dalgası kaynaklı taşınım miktarlarının maksimum değerleri (net ve brüt) gözlenirken, minimum değerleri 2013 yılında tespit edilmiştir. Soluğan kaynaklı net ve brüt taşınım miktarları, maksimum değerlerine 1989 ve 1991-1922 dönemlerinde ulaşmıştır. Tablo 3.5'te görüldüğü gibi LITDRIFT ile elde edilen rüzgar dalgası kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınımında azalma meydana gelmiştir. Soluğan kaynaklı net taşınım miktarındaki değişim (%17.7), rüzgar kaynaklı net taşınımdaki değişimden (%8.1) yüksektir ve çalışma alanında kıyı boyu katı madde taşınım üzerinde daha etkilidir. Brüt soluğan ve rüzgar kaynaklı taşınımdaki değişim oranı, net taşınımdaki değişimlere kıyasla daha azdır. Buna göre, soluğan dalgalarının net taşınım üzerinde brüt taşınıma göre daha etkili olduğunu söylemek mümkündür (Başaran ve Güner, 2021)

Tablo 3.5 Dört farklı yönteme göre elde edilen net ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki değişim

NET KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIM MİKTARLARINDAKİ DEĞİŞİM					
Taşınım Miktarı	**Kamphuis (1991)**	**Kaczmarek vd. (2005)**	**Bayram vd. (2007)**	**LITDRIFT**	**Ort**
Soluğan Kaynaklı Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarı	% 19.4 azalma	% 19.2 azalma	% 13.3 azalma	% 18.7 azalma	% 17.7 azalma
Rüzgar kaynaklı Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarı	% 16.3 artış	% 6.5 azalma	% 13 artış	% 3.5 azalma	% 8.1 artış
BRÜT KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIM MİKTARLARINDAKİ DEĞİŞİM					
Taşınım Miktarı	**Kamphuis (1991)**	**Kaczmarek vd. (2005)**	**Bayram vd. (2007)**	**LITDRIFT**	**Ort**
Soluğan Kaynaklı Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarı	% 3.4 azalma	% 5.1 azalma	% 4.5 azalma	% 6.5 azalma	% 4.8 azalma
Rüzgar kaynaklı Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarı	% 1.4 azalma	% 8.7 azalma	% 1.3 azalma	% 6.1 azalma	% 3.6 azalma



Şekil 3.19 Yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (a: Kamphuis (1991), b: Kaczmarek vd. (2005), c: Bayram vd. (2007), d: LITDRIFT)



Şekil 3.20 Yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (a: Kamphuis (1991), b: Kaczmarek vd. (2005), c: Bayram vd. (2007), d: LITDRIFT)

Karasu kıyısında yer alan 25 km uzunluğundaki çalışma bölgesi Sakarya Nehri'ne kadar uzanmaktadır. Bölge, turizm ve balıkçılık gibi sürdürülebilir bölgesel planlar söz konusu olursa muazzam bir ekonomik getiri potansiyeline sahiptir ve bu nedenle bölge Güneybatı Karadeniz kıyıları için oldukça önemlidir. Bu sebeple Başaran ve Güner, (2021) çalışmasında Güneybatı Karadeniz kıyılarında yer alan Karasu Bölgesi'nin dalga iklimi parametrelerindeki değişikliklerine bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım şekli ve yıllar arasındaki değişimlerinin geçmiş dalga verilerinin kullanılması ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Başaran ve Güner, (2021) çalışması, 1 saatlik dalga verisi zaman serilerini kullanarak güneybatı Karadeniz'de kıyı boyu katı madde taşınımı üzerindeki dalga parametrelerine bağlı uzun dönemli değişimleri analiz eden ilk çalışmadır. Sonuçlar, çalışma alanındaki yıllık ortalama dalga özelliklerinin H_s=0.92 m, T_p=5.53 s olduğunu ve bölgede kuzey-kuzey kuzeydoğu (K-KKD) sektöründen gelen dalgaların baskın olduğunu göstermektedir. Etkin dalga yönü, doğuya doğru üç farklı ampirik ve bir sayısal yöntemle yaklaşık 65.000±5.000 m^3/yıl olarak elde edilen toplam dalga (soluğan+rüzgar) kaynaklı net katı madde taşınımı ile sonuçlanmıştır. Çalışma alanındaki soluğan dalgalarının rüzgar dalgalarından çok daha baskın olduğu ve dolayısıyla soluğan kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınımının, rüzgar kaynaklı taşınımdan 13-20 kat daha çok olduğu bulunmuştur (Başaran ve Güner, 2021).

Karasu Bölgesi'ndeki kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım (LST) miktarı 1.0 ila 3.2×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup tüm yöntemler için ortalama 1.9×10^5 m^3/yıl değerindedir. Yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım (LST) miktarı ise 0.1 ila 2.1×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup ortalama değeri 0.65×10^5 m^3/ yıl mertebesindedir. Brüt kıyı boyu katı madde taşınımının, analiz dönemi (1979-2018) boyunca yaklaşık % 5.6'lık bir düşüş eğilimine sahip olduğu gözlenmiştir (Başaran ve Güner, 2021).

Brüt taşınımdaki düşüşün sebebini anlayabilmek için, dalga iklimi parametrelerinin yıllar içindeki eğilimleri incelenmiş ve bu değişiklikler ile kıyı boyu katı madde taşınım miktarları arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Kıyı

boyu katı madde taşınım miktarındaki bu zamansal azalma, çalışma alanında, 1979 ve 2018 yılları arasında rüzgâr dalgalarından çok daha büyük bir etkiye sahip olan soluğan dalgalarının yüksekliğindeki % 4.1'lik bir azalma ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, ağırlıklı olarak kuzey-kuzey kuzeydoğu (K-KKD) sektöründen kıyıya doğru gelen soluğan dalgalarının açısında hafif bir artış olduğu ve bu artış neticesinde dalgaların kıyı çizgisi normaline daha paralel yaklaştığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma, kalitatif bir kıyı boyu katı madde taşınım miktarı ile ilgili bir değerlendirme de sağlamaktadır. Ampirik ve sayısal modellerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgileri kullanılmış ve geçmiş kıyı çizgisi değişiklikleri tespit edilmiştir. Karasu'daki kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, tek çizgi teorisi ile geçmiş kıyı çizgisi değişiklikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre ortalama net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı 76.000 m^3/yıl olarak belirlenmiş ve bu sonucun ampirik ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Başaran ve Güner, 2021).

Nisan ve Ağustos ayları arasında bölgedeki dalga şiddeti düşük olması (dalga yüksekliği küçüktür) ve dalgaların kuzeyden yüksek bir açıyla (daha dik) kıyıya yaklaşması nedeniyle, daha düşük kıyı boyu katı madde taşınım miktarları gözlenirken, yüksek miktarlar kış döneminde karşımıza çıkmaktadır.

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri ile elde edilmiş olup aynı zamanda bu yöntemlerin taşıma miktarlarını tahmin etmedeki başarıları değerlendirilmiştir. Kamphuis (1991) yöntemi ve Kaczmarek vd. (2005) yöntemi birbiriyle uyumlu sayılabilecek sonuçlar ortaya koymaktadır, Bayram vd. (2007) net kıyı boyu katı madde taşınım miktarını diğer iki yöntemden daha yüksek tahmin etmektedir. Bu durumun, Bayram vd. (2007) yönteminin sadece dalga kaynaklı katı madde taşınımını değil aynı zamanda rüzgar ve gelgit kaynaklı taşıma mekanizmalarını da hesaba katmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna ek olarak, düşük dalga yükseklikleri için Kaczmarek vd. (2005) yöntemi daha yüksek taşınım

miktarları verirken büyük dalga yükseklikleri için Bayram vd. (2007) yöntemi daha düşük taşınım miktarları elde etmiştir. Aynı yükseklikteki soluğan dalgalarının küçük açıyla kıyıya ulaşması durumunda yöntemler arasındaki fark küçük ve yöntemlere ait sonuçlar birbiriyle uyumludur ancak dalgaların kıyıya geniş bir açıyla yaklaşması durumunda yöntemler arasındaki fark artmaktadır. Aynı yükseklikteki rüzgar dalgaları kıyıya geniş bir açıyla yaklaştığında yöntemler arasındaki fark artmakta ve Kaczmarek vd. (2005) yöntemi daha yüksek sonuçlar elde etmektedir. Üç farklı ampirik yöntemin sonucuna göre, kırılan dalga yüksekliğinin brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarına etkisi olduğunun, dalga kırılma açısının ise net taşınım miktarı üzerinde daha etkili olduğunu söylemek mümkündür. LITDRIFT sayısal modelinin sonuçları ise Kaczmarek vd. (2005) yöntemi ile oldukça yakın sonuçlar ortaya koymuştur (Başaran ve Güner, 2021).

Başaran ve Güner, (2021) çalışması, Güneybatı Karadeniz'de kıyı boyu katı madde taşınımında meydana gelen uzun dönemli ilk değerlendirmeyi sağlamakta olup verilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, mevcut hidrodinamik koşullar için kıyı boyunca taşınan katı madde hacmi olarak tanımlanabilir. Ancak, bu çalışmada taşınım miktarları tahmin edilirken bazı belirsizlikler/sınırlamalar vardır, yani çalışma alanı boyunca batimetrinin simülasyon döneminde değişmediği varsayılmaktadır. Ancak yinede ilgili sonuçlar kıyı morfolojisine ait çalışmalar ve uzun dönemli kıyı davranışları için bir temel olarak kullanılabilir.

3.4 Gelecekteki Olası İklim Değişikliklerinin Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

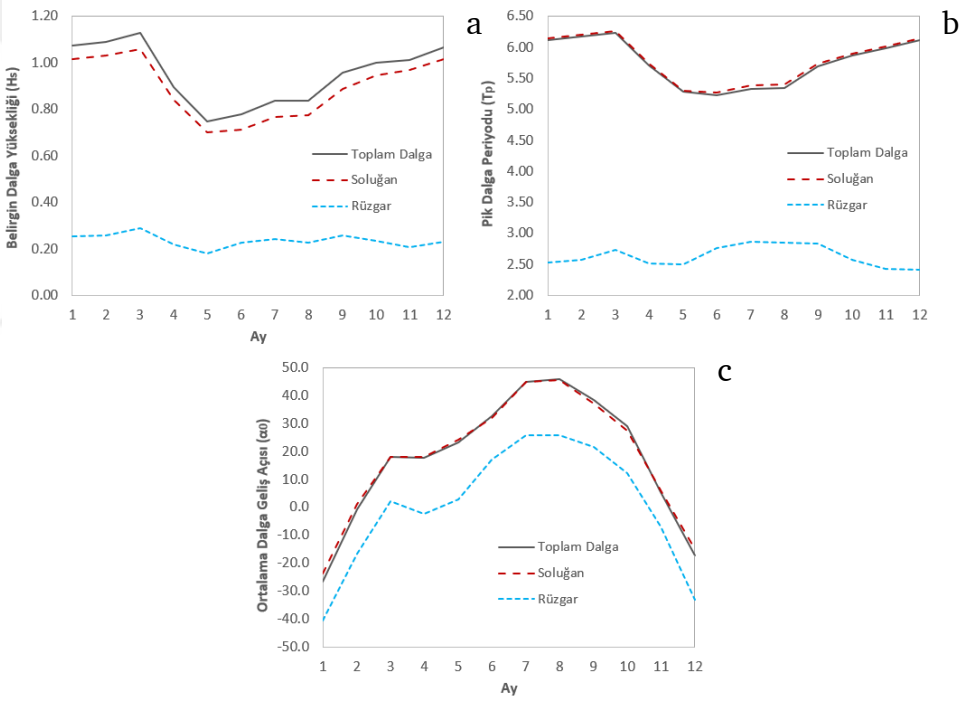
Gelecek dönemlerde, iklim değişikliği sonucunda meydana gelebilecek olumsuz etkilerin en aza indirilmesi için mevcut durumda meydana gelen iklim değişiklerinin gözlenmesi ve bu değişimlere ait eğilimlerin gelecekte nasıl olacağının tahmin edilmesi gerekmektedir. Mevcut ve geçmiş iklimi anlayarak gelecekteki iklim koşullarını tahmin edebilmek için, iklim sistemi bileşenlerinin ve bu bileşenler arasındaki etkileşimlerin matematiksel gösterimi olan modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Modeller vasıtasıyla elde edilen geleceğe yönelik iklim öngörülerinde değişik senaryolar kullanılmaktadır. Senaryo geleceğin tahmini

değil, olması muhtemel alternatif durumların tanımlanmasıdır (IPCC, 2000). Günümüzde, 2007 yılında IPCC kapsamında geliştirilen 40'tan fazla senaryo arasından seçilen Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCPs: Representative Concentration Pathways) kullanılmaktadır. Bu senaryolar yeni yaklaşımla geliştirilen, yeni konsantrasyon senaryoları olup ışınımsal zorlama seviyeleri ve rotaları için 4 farklı tip olarak tanımlanmıştır. Bunlar ışınımsal zorlama değerleri en küçükten en büyüğe olacak şekilde sırası ile RCP3-PD(RCP2.6), RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 senaryolarıdır (IPCC, 2000). Bu çalışmada ise yalnızca RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre projeksiyon çalışmaları yapılmıştır. RCP8.5 yüksek ışınımsal zorlama ve konsantrasyon rotasıdır. RCP4.5 ise orta dengede tutma rotası olup 2100-2150 yılları arasında ışınımsal zorlamanın 4.5 W/m^2'de sabitleneceğini varsaymaktadır.

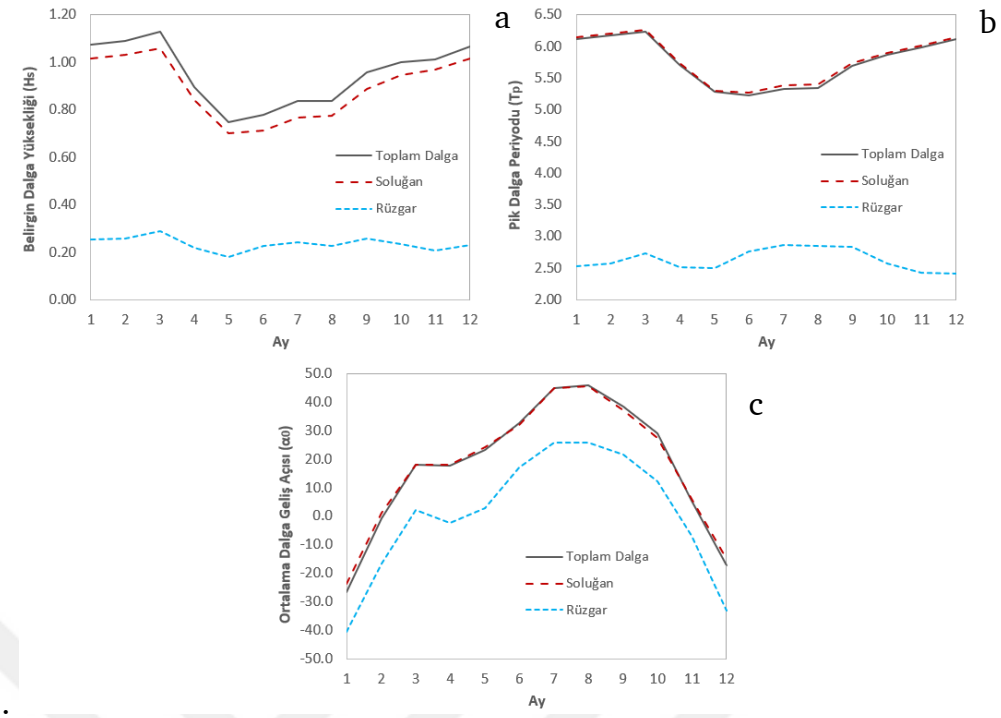
Çalışma kapsamında geleceğe yönelik kıyı boyu katı madde taşınım süreçlerini öngörebilmek amacı ile RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre Karasu Bölgesi'ni temsil eden 2021-2100 yılları arasına ait saatlik derin deniz dalga verileri Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemlerinde kullanılmıştır. Bu verilerin kıyı boyu katı madde taşınım miktarının değişimi üzerinde etkilerinin yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine göre değerlendirmesi ile birlikte bölgenin dalga iklimi de aylara göre ortalamalar ve mevsimsel değişimler açısından açıklanmaktadır. Dalga parametrelerinin 80 yıllık ortalamaları incelendiğinde RCP4.5 senaryosuna göre belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu ve etkin dalga açısı (yönü) sırasıyla 0.94 m, 5.75 s ve 15.2° (K-KKD) olarak bulunmuştur. RCP8.5 senaryosuna göre ise aynı dönem için belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu ve etkin dalga açısı (yönü) ortalamaları sırasıyla 0.95 m, 5.74 s ve 17.5° (K-KKD) olarak tespit edilmiştir.

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısı (α_0)'ın 80 yıllık aylara göre ortalamaları (80 tane ocak ayının ortalamaları gibi) gösterilmektedir.

Bununla birlikte Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de toplam, soluğan ve rüzgar kaynaklı dalgaların aylık ortalama belirgin dalga yükseklikleri, pik dalga periyotları ve ortalama dalga geliş açıları ile bu parametrelere ait mevsimsel değişimler de verilmiştir. 80 yıllık çalışma döneminin sonunda yıllık ortalama soluğan ve rüzgâr dalgalarının yükseklikleri ($H_{s,soluğan}$) ve ($H_{s,rüzgâr}$) RCP4.5 senaryosuna göre sırasıyla 0.88 m ve 0.24 m, RCP8.5 senaryosuna göre ise sırasıyla 0.88 m ve 0.23 m olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, rüzgâr dalgalarının yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliğinin, soluğan dalgalarının belirgin dalga yüksekliğine göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni ise, Karadeniz Havzasında soluğan dalgalarının gelişmesinde etken olan feç mesafelerinin büyük olmasıdır (>600 km) (Başaran ve Güner, 2021).



Şekil 3.21 RCP4.5'a göre toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Pik dalga periyodu (c) Ortalama dalga açısı



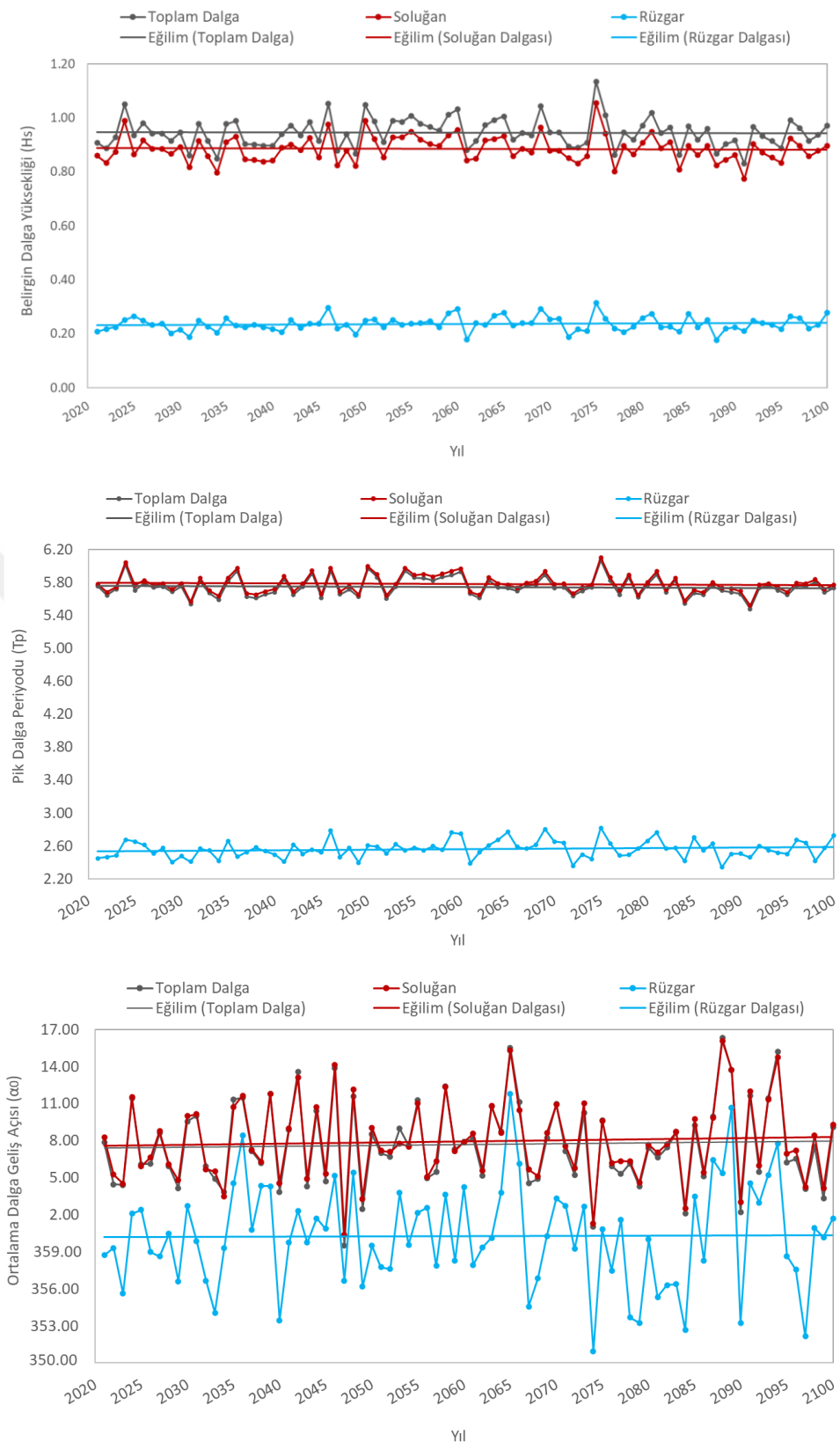
Şekil 3.22 RCP8.5'a göre toplam, soluğan ve rüzgâr dalgalarının H_s, T_p ve α_0 değerlerinin aylık değişimleri; (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Pik dalga periyodu (c) Ortalama dalga açısı

RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları için yine sırasıyla toplam dalgalar, soluğan dalgaları ve rüzgar dalgaları için belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p) ve dalga geliş açısı (α_0) parametrelerine ait 80 yıllık değişimler sırasıyla Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te sunulmaktadır. Şekil 3.23'te RCP4.5 senaryosuna göre elde edilen 80 yıllık ortalama dalga geliş açılarının eğilimleri incelendiğinde toplam dalgaların ortalama gelen dalga açısının 2021 yılında kuzeye göre 7.4° iken, 2100 yılında ise 0.6° doğuya kayarak 8.0° olduğu görülmüştür. Soluğan dalgaları ise 2021 yılında kıyıya kuzeyden 7.6°'lik bir açı ile yaklaşırken, 2100 yılı sonunda kuzeyden 8.4°'lik bir açı yaparak kıyıya yaklaşmıştır. Diğer yandan rüzgar dalgaları 2021 yılında kuzeye göre 0.1°'lik açı ile 0.3° doğuya kayarak 0.4° ile kıyıya yaklaşmıştır. Buradan yola çıkarak yönlerde çok küçük değişiklikler olduğu için dalga yönünün önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilir. Şekil 3.24'te verilen RCP8.5 senaryosuna göre elde edilen 80 yıllık ortalama dalga geliş açılarının eğilimleri incelendiğinde ise toplam dalgaların ortalama gelen dalga açısının 2021 yılında kuzeye göre 6.9° iken, 2100 yılında ise 3.6° doğuya kayarak

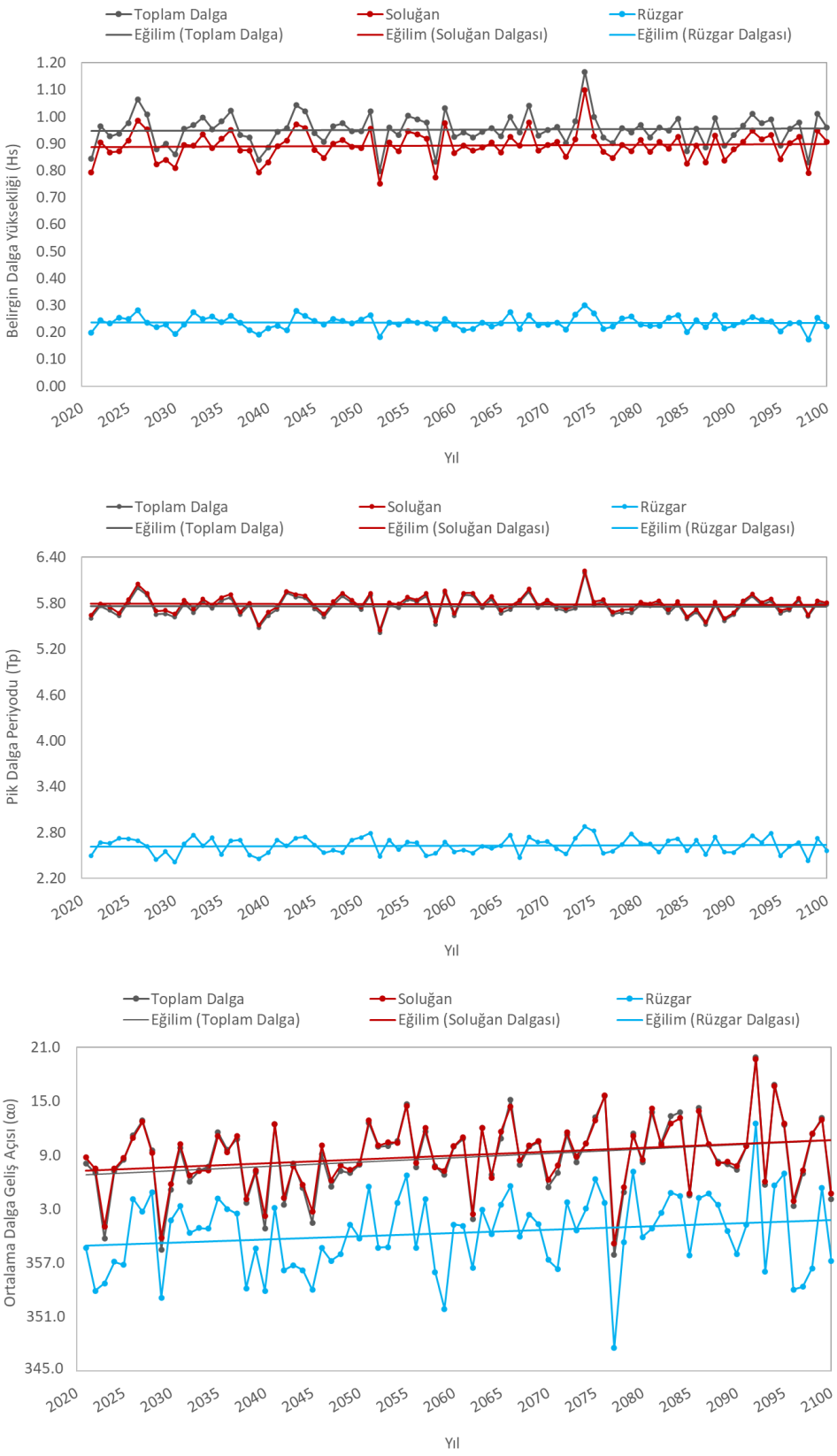
10.5° olduğu görülmüştür. Soluğan dalgaları ise 2021 yılında kıyıya kuzeyden 7.2°'lik bir açı ile yaklaşırken, 2100 yılı sonunda kuzeyden 10.7°'lik bir açı yaparak kıyıya yaklaşmıştır. Diğer yandan rüzgar dalgaları 2021 yılında kuzeye göre 359°'lik açı ile 2.8° doğuya kayarak 1.8° ile kıyıya yaklaşmıştır. RCP8.5 senaryosuna göre ise 80 yıl sonunda dalga geliş açılarında RCP4.5 senaryosuna kıyasla daha büyük değişimler meydana geldiği ve dalgaların kıyı şeridi normaline daha çok yaklaştığı görülmektedir.

Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'ten de görülebileceği gibi, tüm dalga parametreleri incelendiğinde, soluğan dalgaları neredeyse toplam dalga değerlerine eşit iken rüzgar dalgalarının toplam dalgaya katkısı çok daha küçük mertebededir. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'teki eğilim analizleri incelenerek Tablo 3.6'da verilen sonuçlara ulaşılmaktadır.

80 yılın sonunda toplam dalgalara ait belirgin dalga yükseklikleri incelendiğinde iki senaryoda da dalga yüksekliğinin arttığını ancak RCP8.5 senaryosunda daha yüksek bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle daha yüksek dalga yüksekliğine sahip RCP8.5 senaryosunda RCP4.5 senaryosuna göre daha fazla katı madde taşınımı meydana gelmesi beklenecektir. Bununla birlikte pik dalga periyotları incelendiğinde her iki senaryoda hem toplam hem de soluğan dalgalarının periyodunda azalma meydana geldiği ve dolayısıyla dalgaların kıyıya daha sık ulaştığı söylenebilmektedir. Diğer yandan rüzgar dalgalarının periyotları artış gösterip kıyıya daha seyrek geleceği ifade edilebilir.



Şekil 3.23 RCP4.5 senaryosuna göre dalga parametrelerinin yıllık değişimleri



Şekil 3.24 RCP8.5 senaryosuna göre dalga parametrelerinin yıllık değişimleri

Tablo 3.6 Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te gösterilen eğilim sonuçları

RCP4.5 Senaryosuna göre			
Dalga Parametreleri	**Toplam Dalga**	**Soluğan Dalgası**	**Rüzgar Dalgası**
Bellirgin dalga yüksekliği	% 0.42 artış	% 1.1 artış	% 4.4 artış
Pik dalga periyodu	% 0.52 azalma	% 0.52 azalma	% 2.2 artış
Dalga geliş açısı	0.6˚ artış	0.8˚ artış	0.3˚ artış
RCP8.5 Senaryosuna göre			
Dalga Parametreleri	**Toplam Dalga**	**Soluğan Dalgası**	**Rüzgar Dalgası**
Bellirgin dalga yüksekliği	% 0.74 artış	% 1.5 artış	% 1.7 azalma
Pik dalga periyodu	% 0.17 azalma	% 0.35 azalma	% 0.76 artış
Dalga geliş açısı	3.6˚ artış	3.5˚ artış	2.8˚ artış

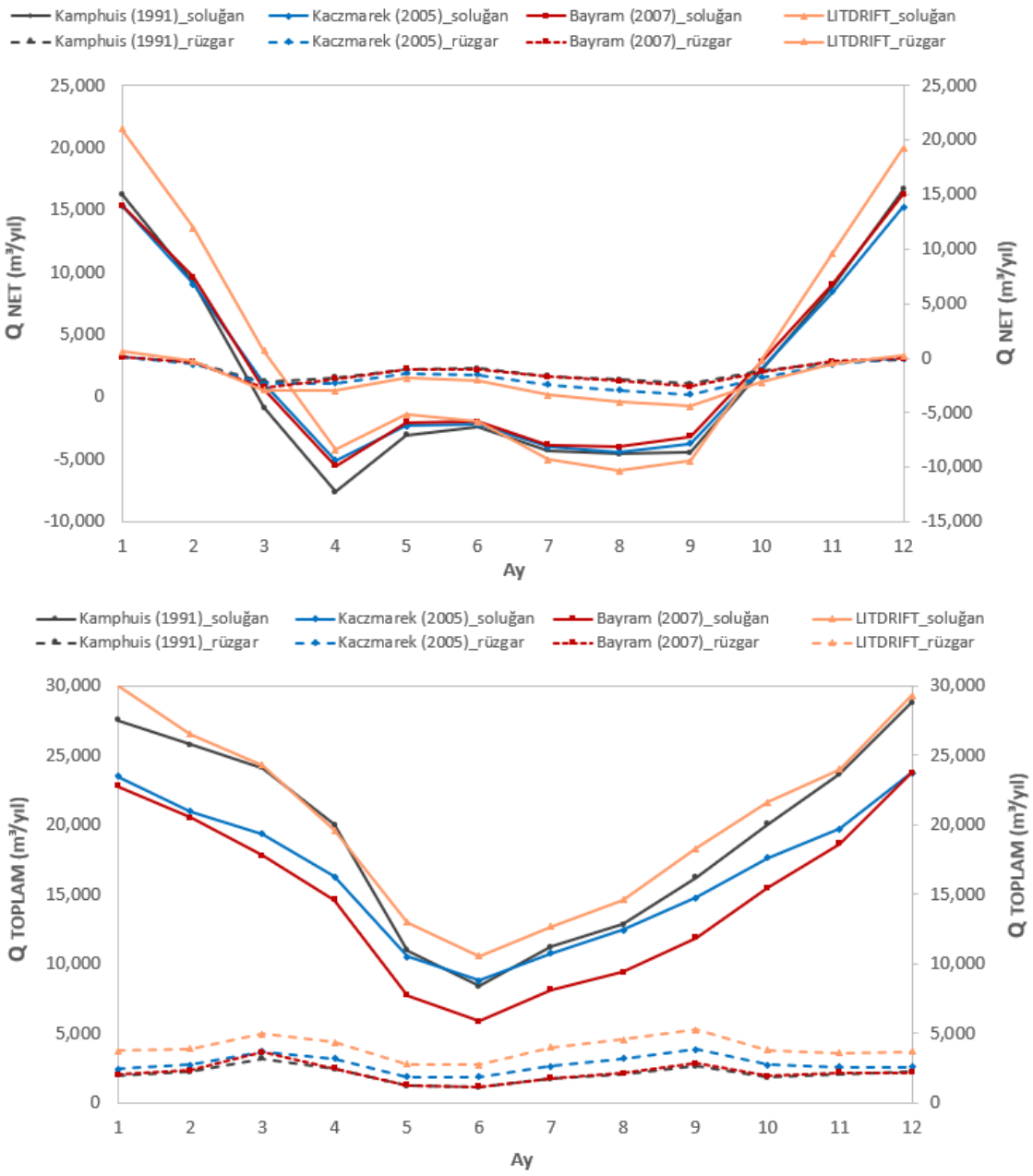
Toplam dalgaların belirgin dalga yüksekliği 2091 ve 2024 yıllarında minimum değerlerde iken 2075 ve 2024 yıllarında maksimum değerlere ulaşmıştır (Şekil 3.23 ve Şekil 3.24). Toplam dalgaların geliş açıları incelendiğinde, RCP4.5 senaryosuna göre 2047 ve 2074 yıllarında kıyıya kuzeyden sırasıyla 359˚ ve 1˚'lik açılarla gelerek kıyı şeridi normaline göre en açılı şekilde yaklaştıkları görülmüştür. 2088 ve 2065 yıllarında ise kuzeye göre 15.5-16.5˚ doğudan kıyıya yaklaşarak kıyı normali ile minimum açı yapmış ve dalgalar neredeyse kıyıya dik ulaşmıştır. Dalgaların kıyıya neredeyse dik geldiği bu yıllarda minimum kıyı boyu katı madde taşınım miktarı ile karşılaşılması beklenmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise dalgalar 2077 ve 2029 yıllarında kıyıya kuzeyden sırasıyla 357.9˚ ve 358.5˚'lik açılarla, kıyı şeridi normaline göre en açılı şekilde yaklaşmıştır. 2092 ve 2094 yıllarında ise kuzeye göre 16.8˚-19.2˚ doğudan kıyıya yaklaşarak kıyı normali ile minimum açı yapmış ve dalgalar neredeyse kıyıya dik ulaşmıştır. Dalgaların kıyıya neredeyse dik geldiği bu yıllarda minimum kıyı boyu katı madde taşınım miktarı ile karşılaşılması beklenmektedir.

Toplam dalgalar (soluğan ve rüzgâr dalgaları olarak bileşenlerine ayrılmaksızın), Kasım-Mart ayları boyunca kıyı şeridi normalinin batısından kıyıya yaklaşmakta iken Nisan-Ekim ayları boyunca kıyıya kıyı şeri normalinin doğusundan yaklaşmaktadır (Şekil 3.21 ve Şekil 3.22). Bu sebeple yılın belirli dönemlerinde (Nisan-Ekim arası) Karasu Bölgesi'nin batı kıyılarına doğru negatif bir net kıyı boyu katı madde taşınımı meydana gelirken yılın bazı dönemlerinde (Kasım-Mart arası) ise ilgili çalışma alanının doğu kıyılarına doğru net bir kıyı boyu katı madde taşınımı meydana gelmektedir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'den görüldüğü üzere toplam dalga verileri ile neredeyse aynı mevsimsel değişimi gösteren soluğan dalgaları da yılın bazı dönemlerinde kıyı şeridinin batısından bazı dönemlerde ise kıyı şeridinin doğusundan gelerek çalışma alanında hem batıya hem de doğuya doğru net kıyı boyu katı madde taşınımları oluşturmaktadır.

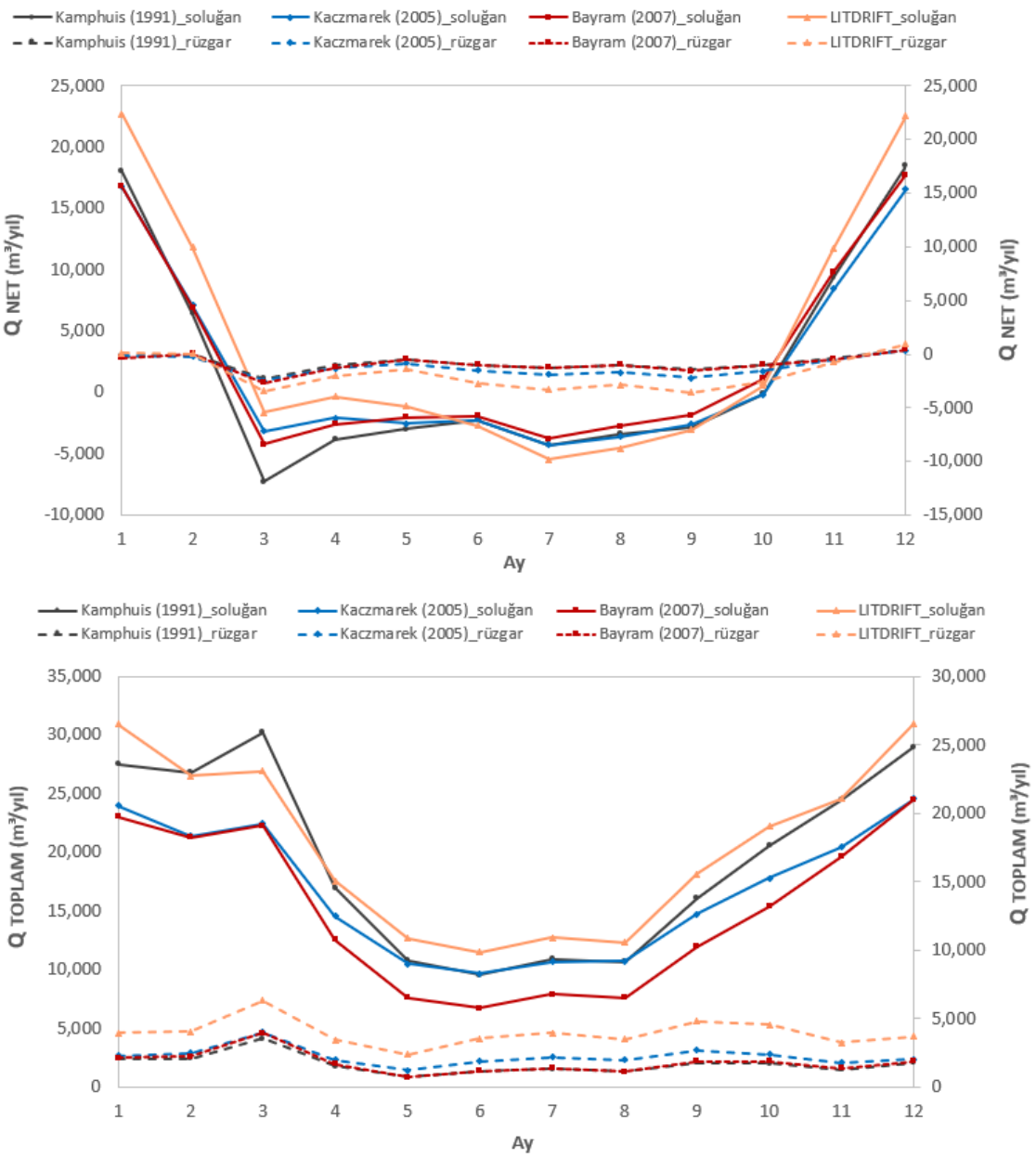
Soluğan ve rüzgâr dalgalarının neden olduğu kıyı boyu katı madde taşınım miktarları karşılaştırıldığında, RCP4.5 senaryosuna göre çalışmada kullanılan tüm taşınım yöntemleri ile elde edilen soluğan kaynaklı net ve brüt taşınım miktarlarının, rüzgâr dalgaları kaynaklı taşınım miktarına göre sırasıyla ortalama yaklaşık 5 ve 7 kat daha büyük olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise bu değerler sırasıyla yaklaşık 6 ve 8 olarak karşımıza çıkmaktadır. (Şekil 3.25 ve Şekil 3.26). Toplam (soluğan+rüzgâr) dalgalardan kaynaklı oluşan kıyı boyu katı madde taşınım yönünün soluğan kaynaklı taşınım ile aynı olmasının nedeni, çalışma alanında soluğan dalgalarının rüzgâr dalgalarına göre çok daha büyük ve baskın olmasıdır. Rüzgar ve soluğan etkisi ile birlikte toplam dalgaların net taşınım yönü incelendiğinde Karasu Bölgesi'ndeki etkin kıyı boyu katı madde taşınımı batı kuzeybatıdan (BKB) doğu güneydoğuya (DGD) olacak şekilde sol kıyıdan sağ kıyıya doğru gerçekleşmektedir. Bu sonuç Başaran ve Güner, (2021) çalışması ile taşınım yönü açısından uyumlu iken, taşınım miktarları geçmiş dalga verilerine göre değişen iklim senaryoları sebebi ile daha az miktarda bulunmuştur.

Soluğan ve rüzgâr kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri de iki farklı senaryoya göre sırasıyla Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 ile gösterilmektedir. Kış aylarında soluğan kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları yüksek olmakla birlikte, ilkbahar ve yaz aylarında soluğan

kaynaklı net taşınım çok daha az miktarda oluşmaktadır. Bununla birlikte rüzgâr kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarı özellikle kış aylarında (Kasım, Aralık, Ocak) minimum değerlere sahipken, özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Ek olarak, rüzgâr kaynaklı toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarının küçük olduğu ve soluğan kaynaklı toplam (brüt) taşınıma göre ters yönde olduğu da görülmektedir (Şekil 3.25 ve Şekil 3.26). Bunların yanı sıra, Karadeniz Bölgesi'nde 2021-2100 yılları arasında meydana geleceği öngörülen rüzgâr yönünün mevsimsel değişimine bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri de Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.25 RCP 4.5 senaryosuna göre soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri



Şekil 3.26 RCP 8.5 senaryosuna göre soluğan ve rüzgar kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının mevsimsel değişimleri

Soluğan ve rüzgar kaynaklı olarak ayırmaksızın çalışma alanında hesaplanan toplam net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı RCP4.5 senaryosuna göre yaklaşık 18,000 m^3/yıl (üç farklı ampirik ve bir sayısal yöntemin ortalaması), RCP8.5 senaryosuna göre ise yaklaşık 21000 m^3/yıl olarak bulunmuştur. Toplam (brüt) taşınım miktarları ise RCP4.5 senaryosuna göre yaklaşık 250,000 m^3/yıl iken RCP8.5 senaryosuna göre 254,000 m^3/yıl mertebelerindedir. Üç farklı ampirik ve bir adet sayısal yönteme (Bayram vd. (2007), Kaczmarek vd. (2005),

Kamphuis (1991) ve LITDRIFT) göre hesaplanan net ve toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarları aşağıda Tablo 3.7 ile özetlenmiştir.

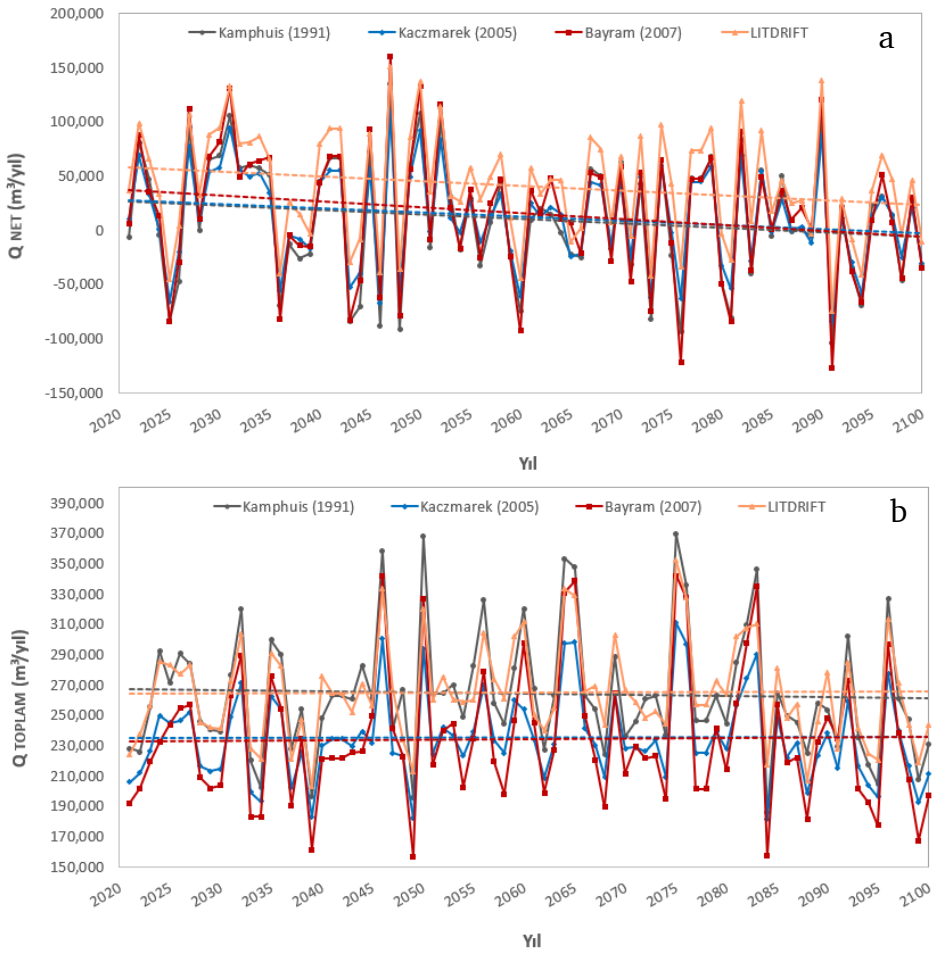
Tablo 3.7 Dört farklı yönteme göre elde edilen net ve kıyı boyu katı madde taşınım miktarları

RCP4.5 Senaryosuna göre;				
Taşınım Miktarı (m^3/yıl)	**Kamphuis (1991)**	**Kaczmarek vd. (2005)**	**Bayram vd. 2007**	**LITDRIFT**
NET	8,550	10,900	13,400	39,300
BRÜT	264,000	235,200	234,850	264,600
RCP8.5 Senaryosuna göre;				
Taşınım Miktarı (m^3/yıl)	**Kamphuis (1991)**	**Kaczmarek vd. (2005)**	**Bayram vd. (2007)**	**LITDRIFT**
NET	10,700	12,150	17,900	42,600
BRÜT	269,000	238,650	240,400	268,000

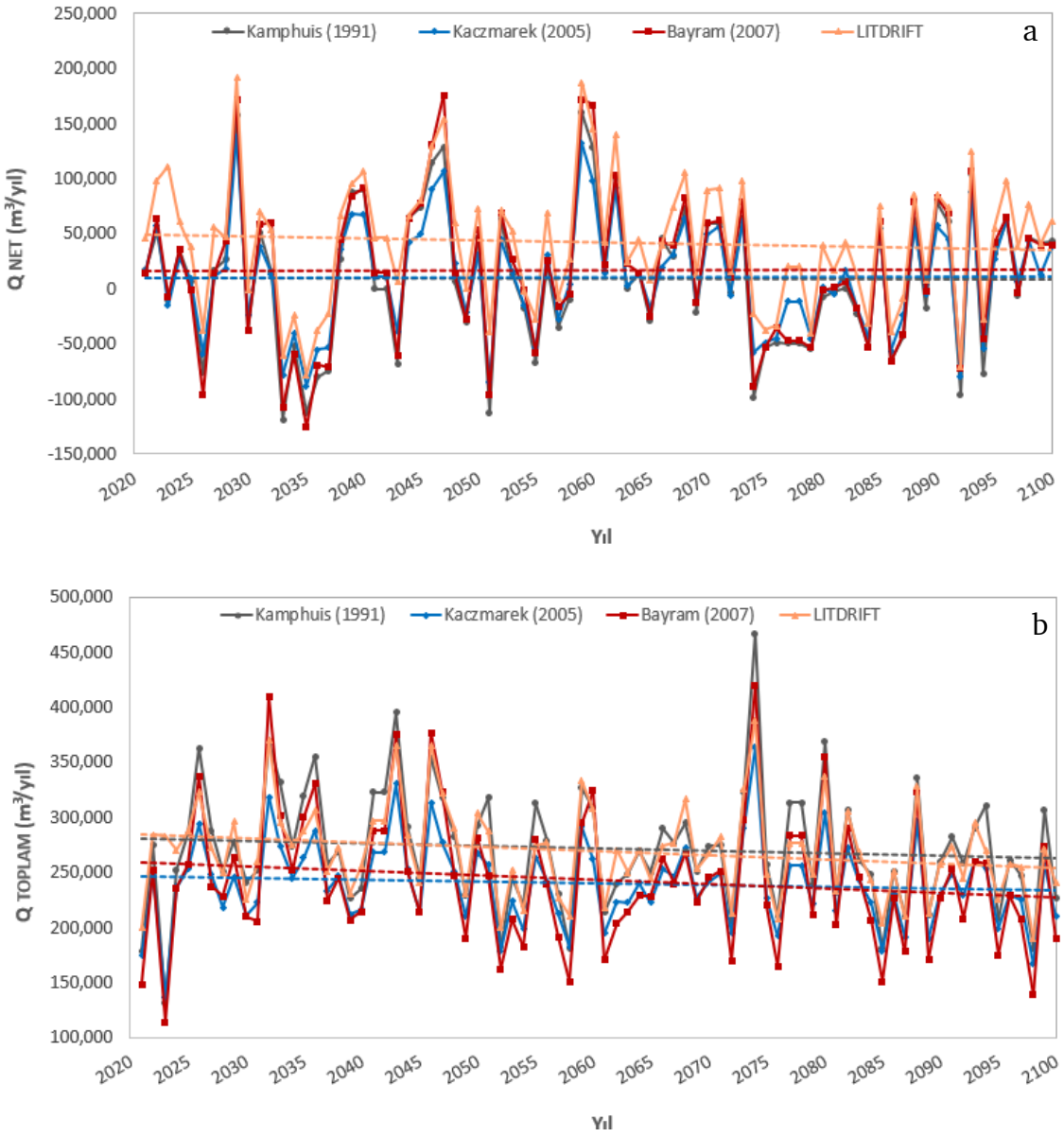
Elde edilen net taşınım miktarı sonuçlarına göre Bayram vd. (2007), Kaczmarek vd. (2005) ve Kamphuis (1991) yöntemi birbirleriyle uyumlu sayılabilecek sonuçlar ortaya koymakta iken LITDRIFT modeli, net kıyı boyu katı madde taşınım miktarını ampirik yöntemlere göre daha büyük tahmin etmektedir (Tablo 3.7). Ampirik yöntemler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise Bayram vd. 2007 yöntemi diğer iki yönteme göre daha büyük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde etmektedir. Burada Bayram vd. (2007) yönteminin diğer yöntemlerden farklı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında sadece dalga kaynaklı akıntıları değil, rüzgar ve gelgit akıntılarını da dikkate alması ile daha büyük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

2021-2100 yılları arasındaki dönem boyunca yıllık kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki değişimleri belirleyebilmek için, her yıla ait ortalama taşınım miktarları hesaplanarak sırasıyla net ve toplam (brüt) miktarlar olarak RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de görülen eğilim çizgileri ile grafiğe dökülmüştür. Kıyı boyu katı madde taşınımının yıllar

arasındaki değişiminin büyük olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre yıllık toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 1.57 ila 3.52×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup tüm yöntemlerin ortalaması 2.4×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 2.30×10^5, 2.35×10^5, 2.34×10^5, 2.65×10^5 m^3/yıl değerlerindedir. RCP8.5 senaryosuna göre ise yıllık toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 1.14 ila 4.67×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup tüm yöntemlerin ortalaması 2.60×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 2.72×10^5, 2.40×10^5, 2.24×10^5, 2.69×10^5 m^3/yıl değerlerindedir.



Şekil 3.27 RCP 4.5 senaryosuna göre dört farklı yöntem ile elde edilen net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri



Şekil 3.28 RCP 8.5 senaryosuna göre dört farklı yöntem ile elde edilen net ve brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri

Yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları incelendiğinde ise RCP4.5 senaryosuna göre -1.0×10^5 ile 1.6×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte olup, tüm yöntemlerin ortalaması 0.195×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 0.10×10^5, 0.12×10^5, 0.15×10^5, 0.41×10^5 m^3/yıl değerlerindedir. RCP8.5 senaryosuna göre ise yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları -0.78×10^5 ile 1.9×10^5 m^3/yıl arasında değişmekte

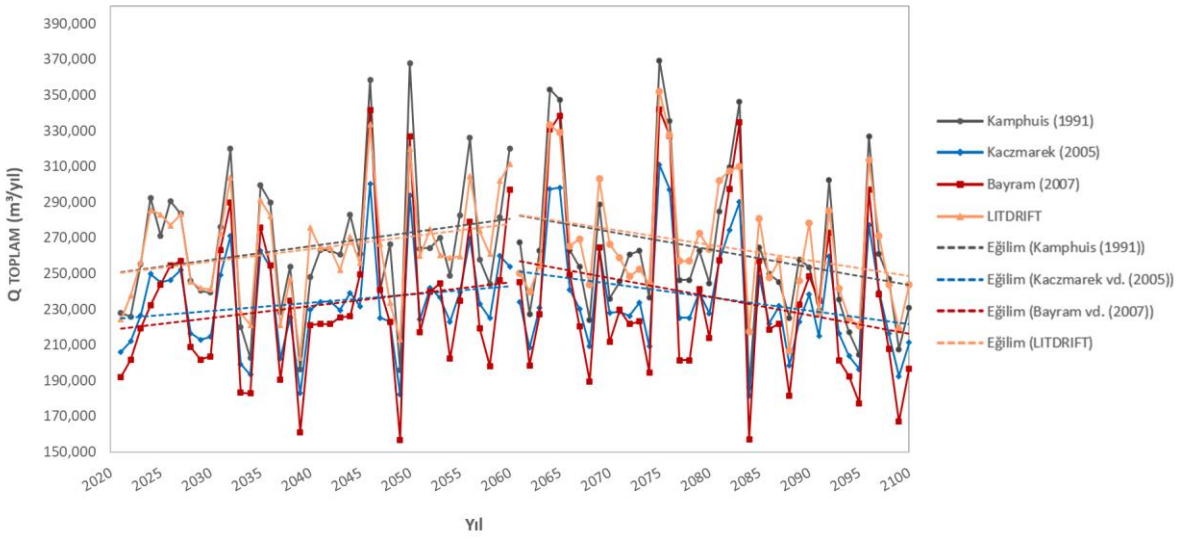
olup, tüm yöntemlerin ortalaması 0.200×10^5 m^3/yıl civarındadır. Her yönteme ait net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ise Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT için sırasıyla 0.097×10^5, 0.11×10^5, 0.17×10^5, 0.42×10^5 m^3/yıl değerlerindedir.

RCP4.5 senaryosuna göre net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarındaki büyük değişimlerin yakın gelecekte 2046-2048 yılları arasında iken orta gelecekte 2090-2091 yılları arasında gözlenmesi beklenmektedir. Bununla birlikte yakın gelecekte minimum net kıyı boyu katı madde taşınımlarının 2026, 2039 yıllarında oluşması beklenirken orta gelecekte 2066, 2080, 2089 ve 2098 yıllarında meydana geleceği düşünülmektedir. 80 yıllık çalışma dönemi sonunda net kıyı boyu katı madde taşınımlarında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla ~400 m^3/yıl ve ~50 m^3/yıl (80 yılın ortalaması-yıllık bazda) mertebelerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir.

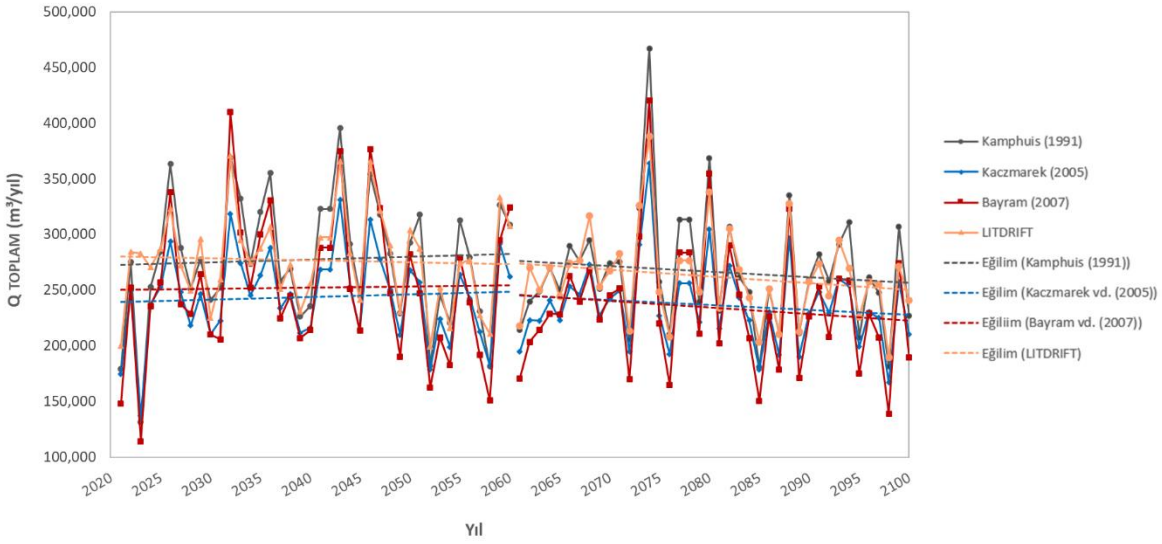
Şekil 3.27-b incelendiğinde, RCP4.5 senaryosuna göre brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri için sırasıyla %2.3 oranında azalma, %0.9 artış, %1.3 artış ve %0.4 oranında artış meydana geldiği görülmüştür. Brüt taşınım miktarındaki 80 yıllık çalışma dönemi sonunda meydana gelen ortalama azalma ise %0.1 olarak bulunmuştur. Şekil 3.27-b incelendiğinde, RCP8.5 senaryosuna göre brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT yöntemleri için sırasıyla %5.7, %6.5, %11.5 ve %9.9 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. Brüt taşınım miktarındaki 80 yıllık çalışma dönemi sonunda meydana gelen ortalama azalma ise %8.4 olarak bulunmuştur.

2021-2100 yılları arasında Karasu Bölgesi'nde meydana geleceği öngörülen toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarları yakın gelecek ve orta gelecek olarak 40'ar yıllık ayrı periyotlarda incelenmiş ve bu dönemlere ait tüm yöntemlerin eğilim analizleri yapılmıştır (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30). Yakın gelecek dönemini temsil eden 2021-2060 yılları arasında RCP4.5 senaryosuna dayanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ortalama %10.4 oranında artış

gösterirken, aynı dönem için RCP8.5 senaryosuna dayanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ortalama %1.75 oranında artış göstermektedir. Bununla birlikte çalışma kapsamında orta gelecek olarak tanımlanan 2061-2100 yılları arasındaki dönemde RCP4.5 senaryosuna dayanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ortalama %12.7 oranında azalma gösterirken, aynı dönem için RCP8.5 senaryosuna dayanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ortalama %8.0 oranında azalmaktadır. Buradan yola çıkarak 2021-2100 yılları arasındaki dönem genel olarak değerlendirildiğinde, RCP4.5 senaryosundaki yakın ve orta geleceğe ait toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının neredeyse birbirini dengeleyebileceği söylenebilirken, RCP8.5 senaryosunda orta gelecekte taşınım miktarında ciddi bir azalma meydana geleceğini ve denge durumunun söz konusu olmayacağı söylenebilir.



Şekil 3.29 RCP 4.5 senaryosuna toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri

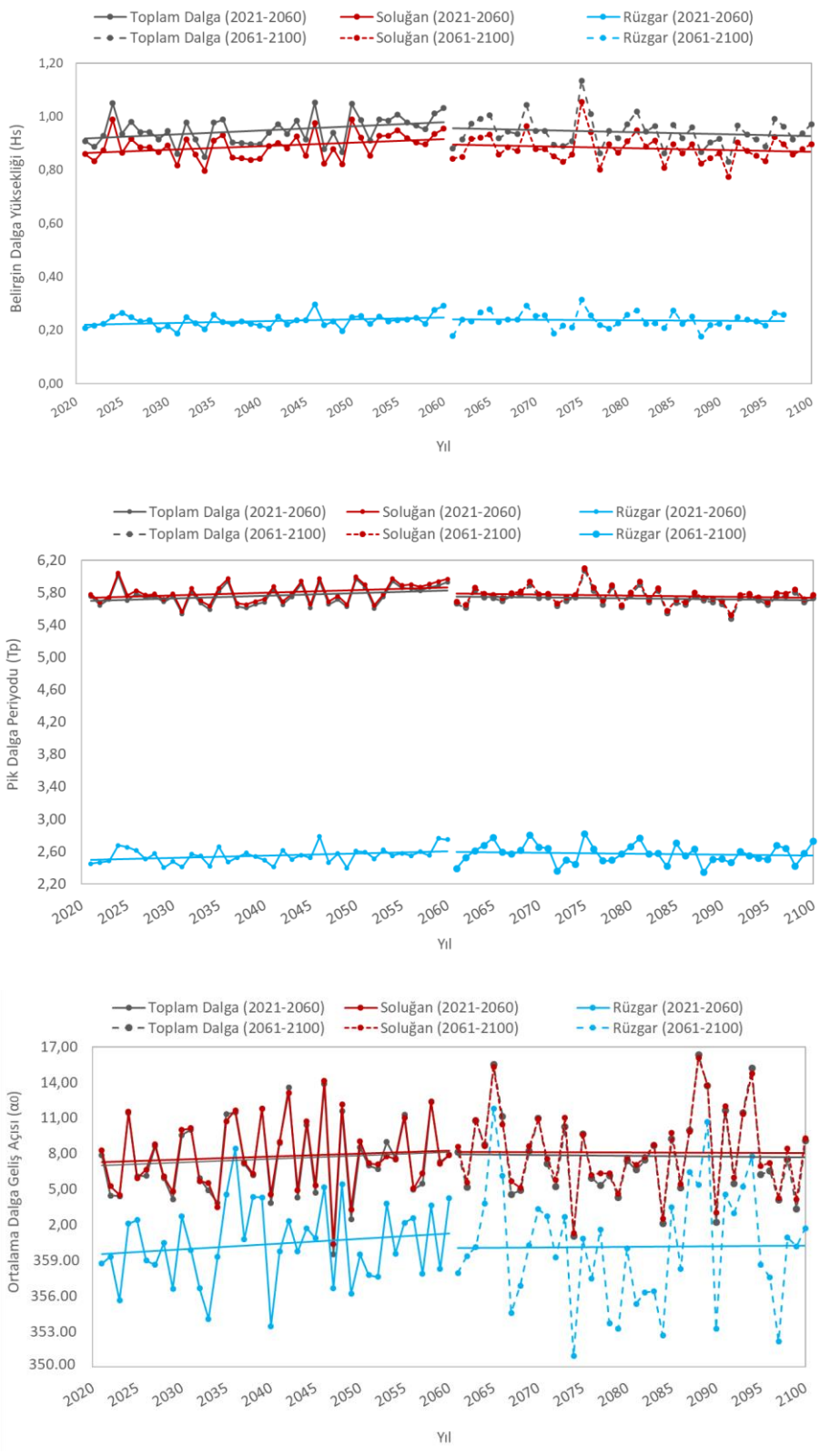


Şekil 3.30 RCP 8.5 senaryosuna göre toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının yıllık değişimleri

Toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında yakın gelecek ve orta gelecekte meydana gelen bu değişimlerden sonra dalga iklimi parametreleri de 2021-2060 ve 2061-2100 dönemlerine göre incelenmiştir. Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre elde edilen dalga iklimi parametrelerinin yakın ve orta gelecekteki değişim eğilimleri gösterilmiştir.

RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte toplam dalganın (soluğan+rüzgar) belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu sırasıyla %6.5 ve %2.2 oranında artış gösterirken dalga geliş açısı 1.1°'lik doğuya doğru kayması ile kıyı normaline az da olsa yaklaşmıştır. RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte toplam dalganın (soluğan+rüzgar) belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu sırasıyla %1.1 ve %0.4 oranında artış gösterirken dalga geliş açısı 2.7°'lik doğuya doğru kayması ile kıyı normaline yaklaşmıştır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında yakın gelecekte dalga yüksekliklerindeki artış oranlarına göre 2021-2060 yılları arasında RCP4.5 senaryosuna dayanan net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının RCP8.5 senaryosuna göre daha çok artış eğiliminde olması beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte RCP8.5 dalga ikliminde dalgalar yakın gelecek sonunda (2060 yılı sonunda) RCP 4.5 iklimine göre kıyı şeridi normaline daha çok yaklaşmış ve (kıyıya daha dik) bu sebeple net kıyı boyu katı madde taşınımında daha az bir artış eğilimi meydana gelmiştir.

RCP4.5 senaryosuna göre orta gelecekte (2061-2100) toplam dalganın (soluğan+rüzgar) belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu sırasıyla %2.6 ve %0.9 oranında azalma gösterirken dalga geliş açısı 1.5°'lik batıya doğru kayması ile kıyı normali ile arasındaki açıyı artırmıştır. RCP8.5 senaryosuna göre orta gelecekte toplam dalganın (soluğan+rüzgar) belirgin dalga yüksekliği ve pik dalga periyodu sırasıyla %1.6 ve %1.7 oranında azalma gösterirken dalga geliş açısı 1.1°'lik doğuya doğru kayması ile kıyı normaline biraz daha yaklaşmıştır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında ise 2061-2100 yılları arasında hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarına dayanan net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının azalma eğiliminde olmaları beklenen bir sonuçtur.

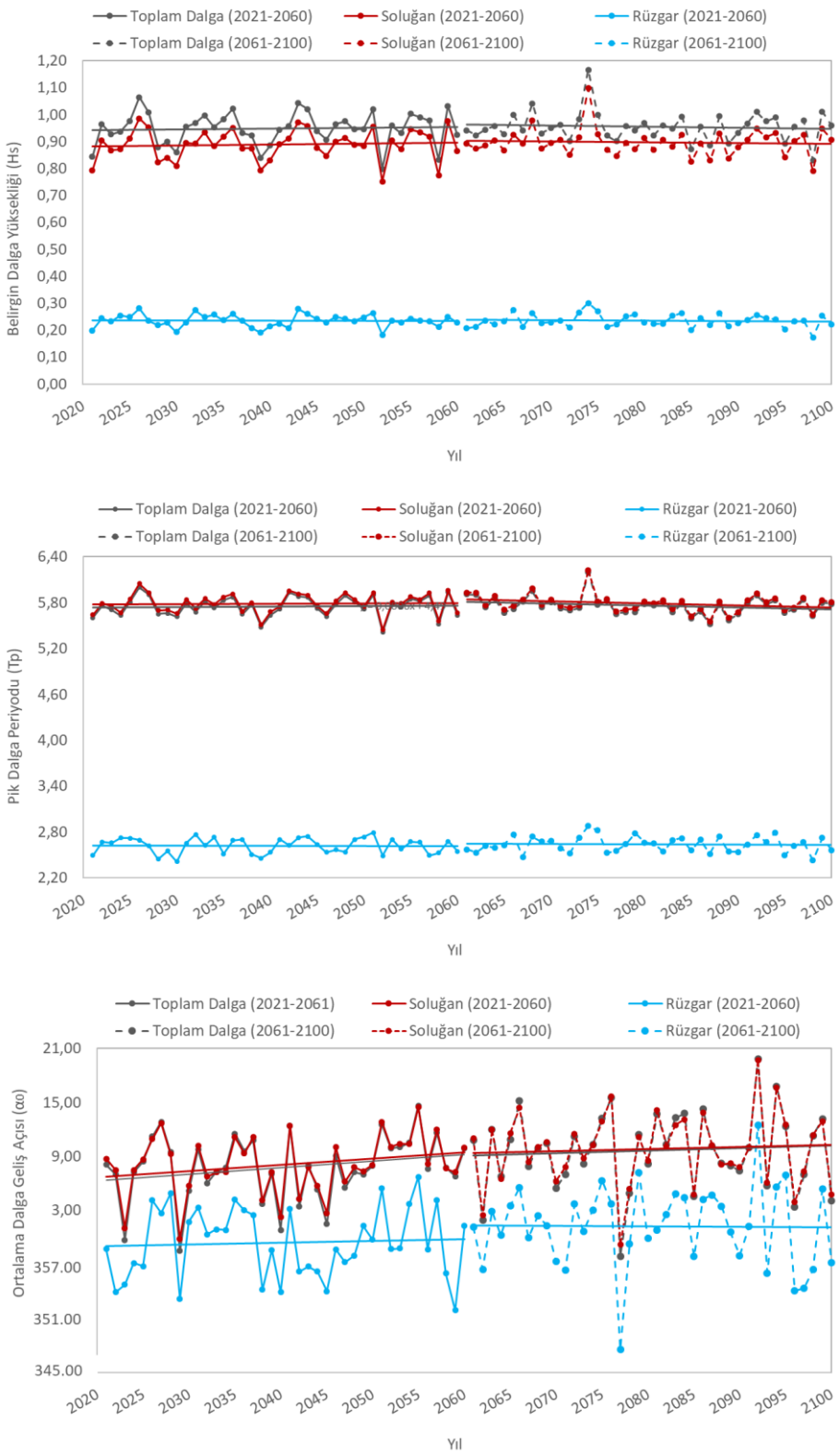


Şekil 3.31 RCP 4.5 dalga iklimi parametrelerinin yakın ve orta geleceğe göre yıllık değişimler

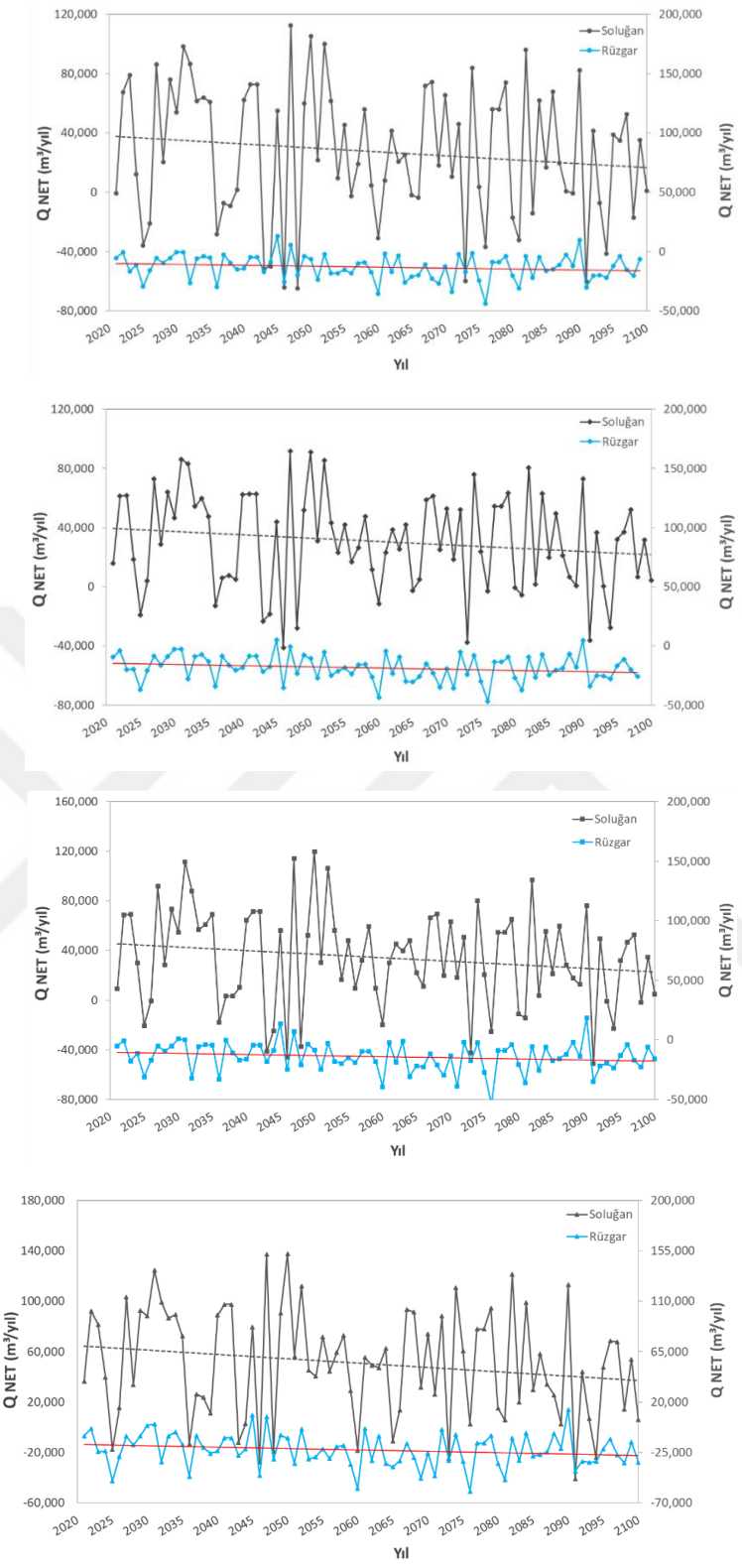
Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te 2021-2100 yılları arasındaki döneme ait RCP4.5 dalga iklimine dayanan, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da ise yine 2021-2100 yılları arasındaki döneme ait RCP8.5 dalga iklimine dayanan ve dört farklı yönteme göre (Kamphuis (1991); Kaczmarek vd. (2005); Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT) elde edilen soluğan ve rüzgar kaynaklı net ve toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarına ait sonuçlar verilmiştir.

RCP4.5 senaryosuna dayanan soluğan ve rüzgar dalgası kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının eğilimleri incelendiğinde hem soluğan hem de rüzgar kaynaklı kıyı boyu net katı madde taşınımlarının azalan eğilime sahip olduğu görülmektedir. Toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım eğilim analizleri irdelendiğinde ise soluğan kaynaklı toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınımlarının azalan eğilim gösterirken, rüzgar dalgası kaynaklı toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının soluğana zıt şekilde ise artış eğiliminde olduğu görülmektedir.

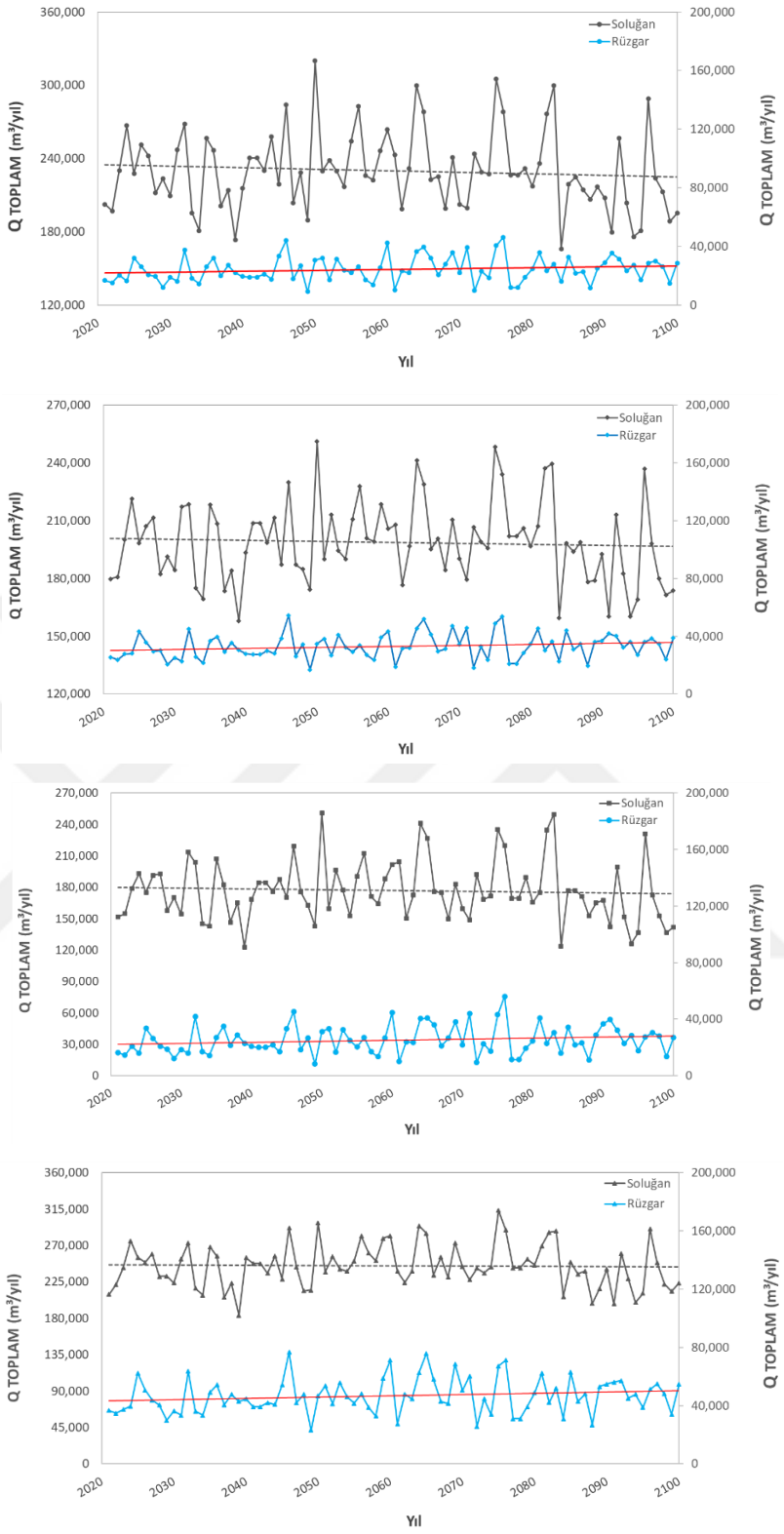
Diğer yandan RCP8.5 senaryosunun sonuçlarına göre, soluğan ve rüzgar dalgası kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının eğilimleri incelendiğinde soluğan kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının az da olsa azalma eğilimi gösterdiği, rüzgar kaynaklı net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının ise artan eğilime sahip olduğu görülmektedir. Toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım eğilim analizleri hem soluğan kaynaklı hem de rüzgar kaynaklı toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınımlarının azalan eğilimde olduğunu bunun yanı sıra, rüzgar dalgası kaynaklı toplam (brüt) kıyı boyu katı madde taşınım miktarındaki azalma eğiliminin soluğana göre daha büyük mertebede olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.



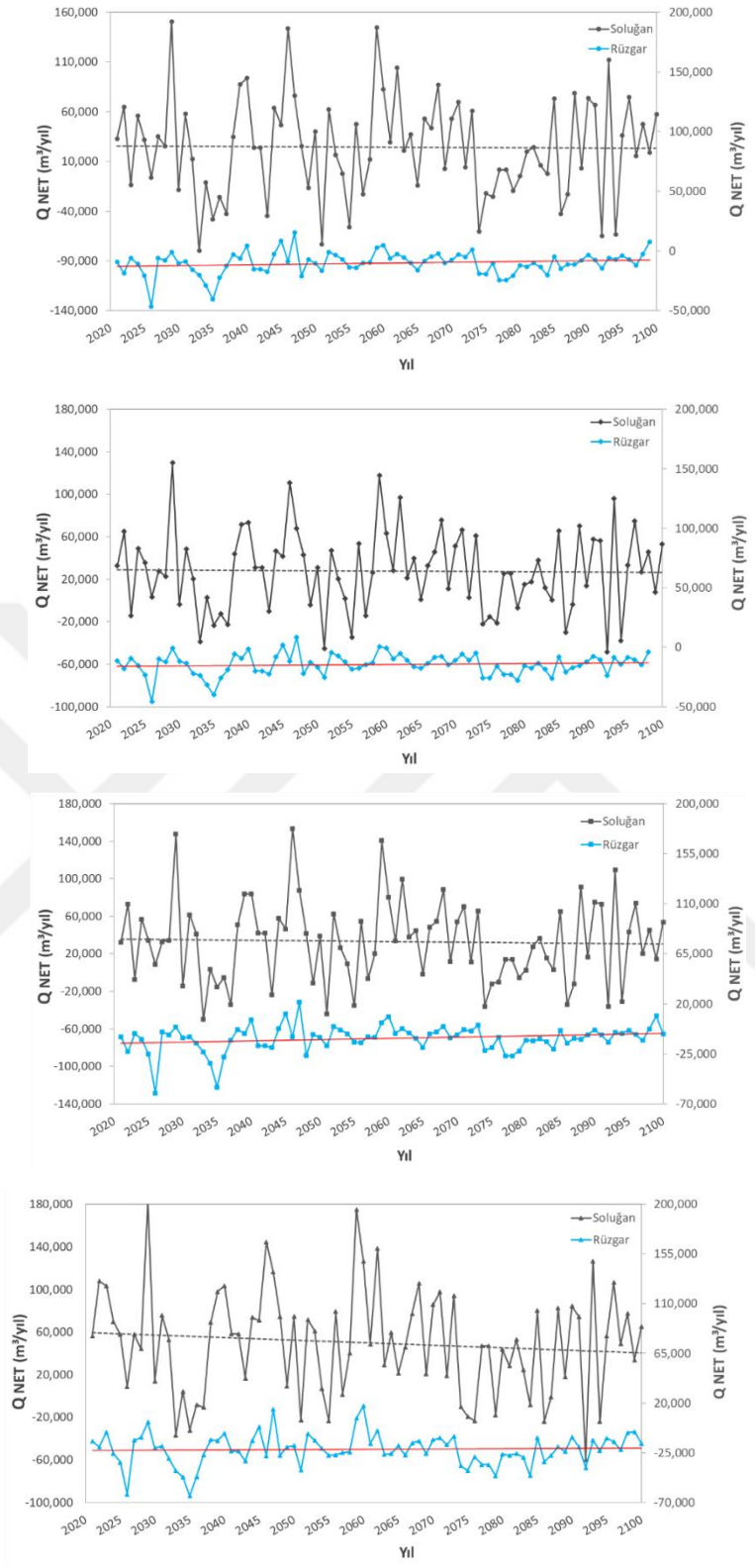
Şekil 3.32 RCP 8.5 dalga iklimi parametrelerinin yakın ve orta geleceğe göre yıllık değişimler



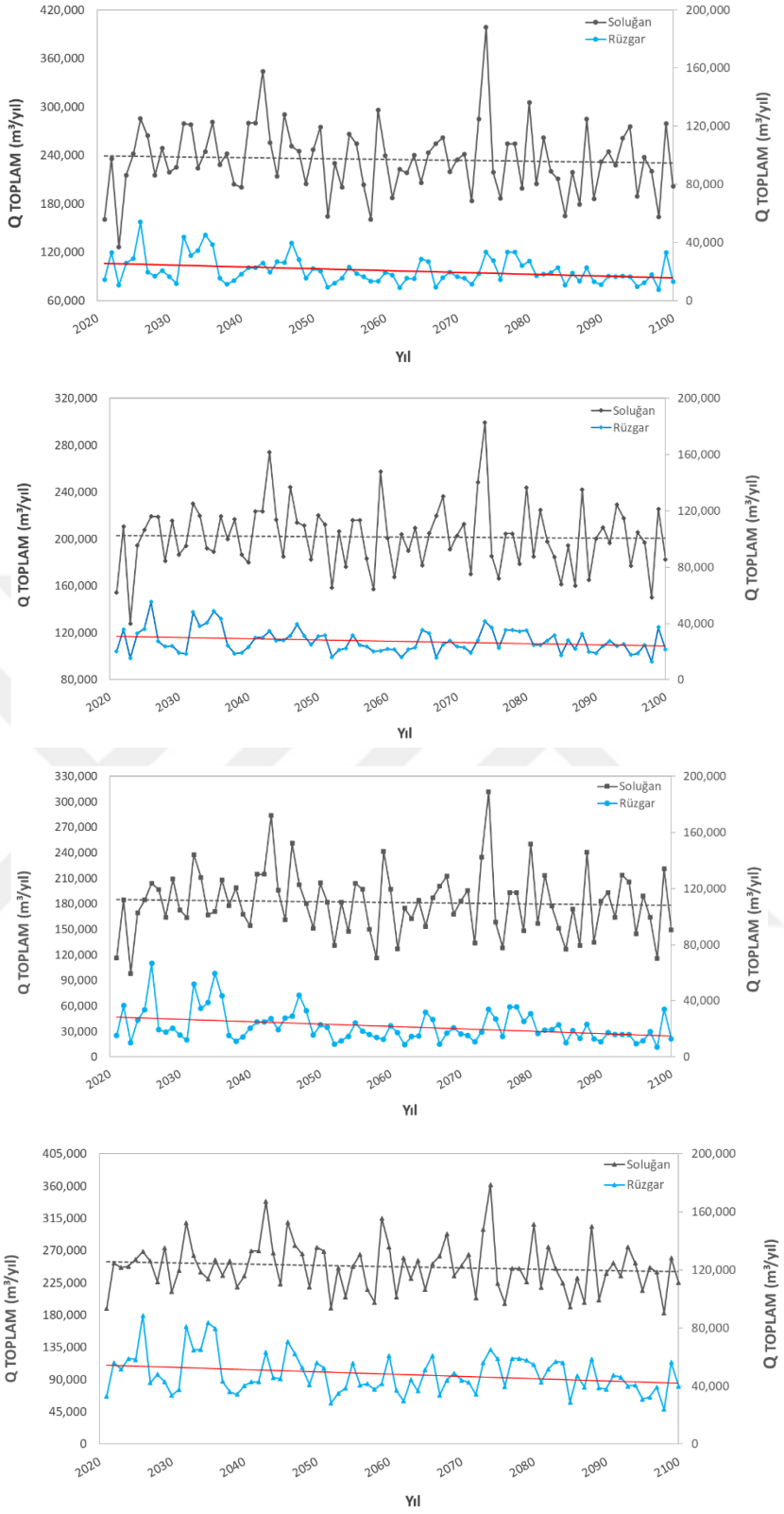
Şekil 3.33 RCP 4.5 Dalga iklimine dayanan yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT)



Şekil 3.34 RCP 4.5 Dalga iklimine dayanan yıllık toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT)



Şekil 3.35 RCP 8.5 Dalga iklimine dayanan yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT)



Şekil 3.36 RCP 8.5 Dalga iklimine dayanan yıllık toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (yukardan aşağı sırasıyla Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005), Bayram vd. (2007) ve LITDRIFT)

4
KIYI PROFİLİ DEĞİŞİMİNİN MODELLENMESİ

4.1 Giriş

Küresel iklim değişikliği sonucunda dalga ikliminde (H_s, belirgin dalga yüksekliği, T_p, pik dalga periyodu ve θ, dalga doğrultusu) ve deniz seviyesinde meydana gelen değişiklikler kıyı morfolojisi üzerinde belirgin etkilere sebep olmaktadır. Özellikle artan dalga yükseklikleri, oluşan fırtınaların sıklığının artması ve deniz seviyesi yükselmesi, kıyıya dik profiller üzerinde etkili olarak ciddi boyutta kumul erozyonlarına ve morfoloji değişimlerine sebep olmakta ve kıyı bölgelerindeki güvenlik seviyesini düşürmektedir. Birçok çalışmada, iklim değişikliği senaryoları altında küresel dalga özelliklerinde meydana gelen değişimler çalışılmış olmasına rağmen şiddetli kumul ve kıyı erozyonlarının önlenmesi için bölgesel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre değişen hidrodinamik koşullar (dalga parametreleri) ve deniz seviyesi yükselmesi etkisinde Batı Karadeniz Karasu kıyısında iki farklı konumda yer alan kıyıya dik katı madde taşınım süreçleri XBeach sayısal modeli ile incelenmiş ve geleceğe yönelik sonuçlar ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı;

- Karasu kıyısında mevcut olan kıyıya dik katı madde taşınım sürecinin tespit edilmesi,
- Karasu kıyısını temsil eden kıyı profillerinin XBeach yazılımı ile modellenmesi,
- Projeksiyon çalışmalarına göre bölgedeki yakın kıyı dalga ikliminde ve deniz seviyesinde meydana gelen uzun dönemli değişimlerin kıyı profilleri gelişimi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi.

- Hassasiyet analizleri ile kıyıya dik profil davranışları üzerinde dalga parametrelerindeki değişimlerin ve deniz seviyesi yükselmesinin etkilerine ait genel çıkarımların elde edilmesi.

4.2 Kıyı Profili Saha Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Çalışma bölgesi olarak seçilen Karasu kıyısı Bölüm 3.2.1'de detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde enerjik ve nispeten yıkıcı sonuçlara sebep olabilecek fırtına sonrasında Karasu kıyısında meydana gelen kıyıya dik morfoloji değişimlerine (erozyon/yığılma) odaklanılmaktadır. Bu doğrultuda Karasu kıyısını temsil edecek iki farklı konumda yer alan kıyıya dik profil hatları dikkate alınmıştır. Bu profiller 117Y333 numaralı TÜBİTAK Projesi (Şahin vd., 2021) kapsamında iki farklı zamanda (fırtına öncesi ve fırtına sonrası) gerçekleştirilen kara ve batimerik ölçümler ile elde edilmiştir.



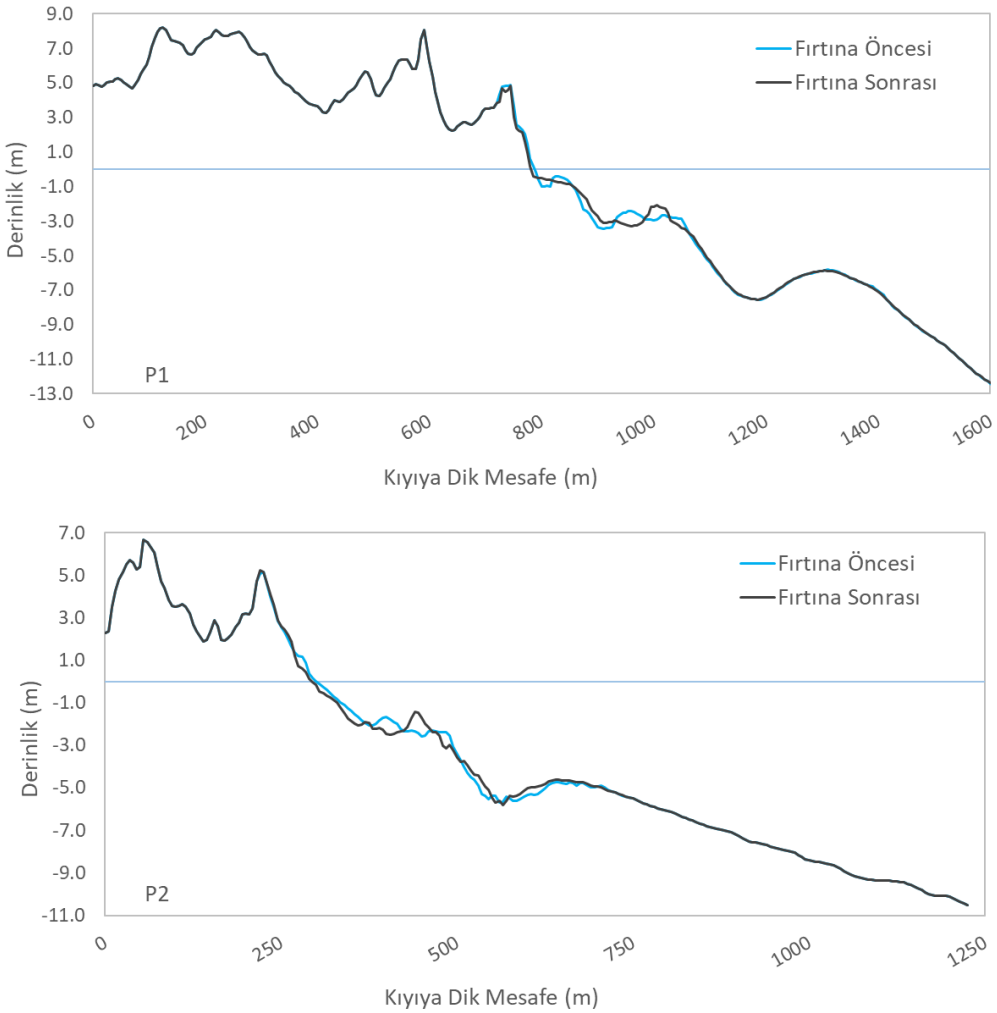
Şekil 4.1 Karasu sahilinin konumu ve çalışmada kullanılan profil hatları P1 ve P2

Çalışma sahasında önceden belirlenmiş olan bu profil hatlarının kara kısımlarında RTK alıcısı ile kot ölçümleri yapılmıştır. Kara ölçümleri ve batimetrik ölçümlerde kullanılan referans noktaları aynı alınarak düşey kıyas kotlarının da aynı olması sağlanmıştır. Kara ölçümlerinde Hemisphere S321+GNSS Akıllı Anten ve Satelline EASy Pro UHF Radyo Modern ekipmanları kullanılmıştır. Ölçme botu, sağlamış olduğu stabilite ve yüksek manevra kabiliyeti ile sığ bölgelerdeki dar alanların hassas bir şekilde ölçülebilmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede kıyıya maksimum seviyede yanaşılmış ve kara okumaları ile arasındaki boşluk en aza

indirgenmiştir. Batimetrik ölçümler için ise ülke nirengi ağına bağlı olarak santimetre hassasiyetinde konumsal veri sağlayan GNSS uydu alıcı Hemisphere S321+GNSS Akıllı Anten, mobil Ohmex SonarMite BTX Singlebeam Echosounder, sesin sudaki yayılma hızını ölçmek için AML Base X(Sunda Velocit Profiller) ve eş zamanlı olarak hem navigasyon hem derinlik hem de konumsal verileri kaydetmek için kullanılan Asus Laptop ile birlikte Satellite EASy Pro UHF Radyo Modern kullanılmıştır (Şahin vd., 2021).

P1 profili çalışma alanının nispeten batısından, P2 profili ise çalışma alanının daha doğusundan, Sakarya Nehri'nin 5.1 km batısına denk gelecek şekilde alınmıştır. İki profil arasında yaklaşık 14.5 km mesafe vardır. Karadeniz'in güneybatısında yer alan çalışma bölgesi Karasu sahili ile birlikte çalışma kapsamında dikkate alınan kıyıya dik profil hatları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

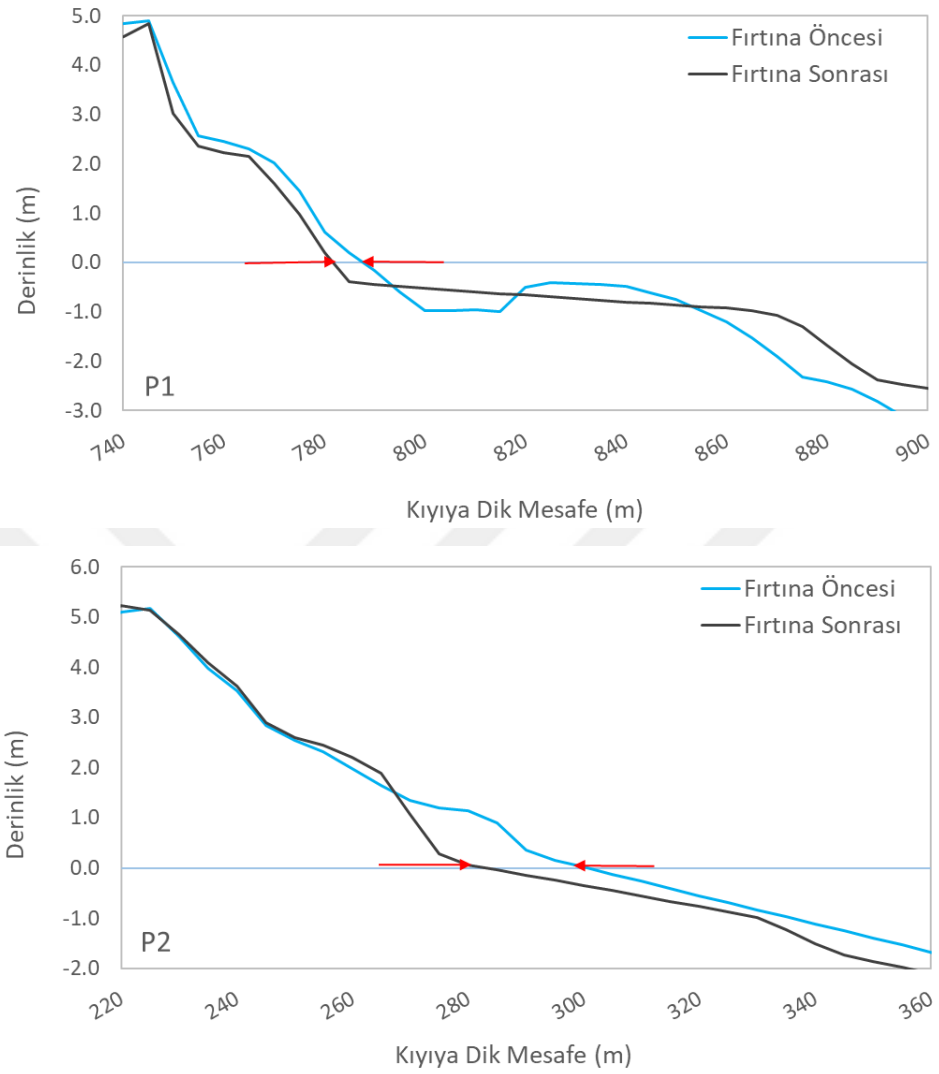
Her iki profil hattı için fırtına öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen topoğrafik ölçümler Şekil 4.2'de, başlangıç profillerine ait eğimler ise Tablo 4.1'de verilmiştir. P1 profili kıyıdan açık denize doğru 1600 m mesafede -12.50 m derinliğe kadar devam etmektedir. P2 profili ise kıyıdan açık denize doğru yaklaşık 1250 m mesafede -10.50 m derinliğe ulaşmaktadır. Fırtına öncesi profiller incelendiğinde P1 profilinin % 8.4, P2 profilinin ise % 5.2 eğim ile dik sahil yüzüne sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 P1 ve P2 hatlarına ait fırtına öncesi ve fırtına sonrası profil ölçümleri

Fırtına sonrasında P1 profilinde 6.1 m'lik kıyı çizgisi geri çekilmesi olurken, P2 profilinde ise 16.5 m'lik kıyı çizgisi geri çekilmesi meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.3). P1 ve P2 profillerinde fırtına sonrasında fırtına öncesine göre meydana gelen belirgin farklılıklar 0.00 ortalama su seviyesi ile yaklaşık -8.00 m derinlik arasında olduğu Şekil 4.2'den görülmektedir. Profillerdeki hacim değişimleri incelendiğinde fırtına sonrasında P1 profilinde yaklaşık 62.30 m^3/m yığılma ve 60.60 m^3/m'lik erozyon meydana geldiği tespit edilmiştir. P2 profilinde ise fırtına sonrasında 63.70 m^3/m'lik yığılmanın yanı sıra 66.90 m^3/m'lik erozyon meydana geldiği tespit edilmiştir. Fırtına sonrasında her iki profil hattında meydana gelen

değişimler, sonuç hacim değişiklikleri ve kıyı çizgisi geri çekilme miktarlarına ait değerler sırasıyla Tablo 4.1 ile özetlenmiştir.



Şekil 4.3 P1 ve P2 profillerine ait fırtına sonrası kıyı çizgisi geri çekilmeleri

Sonuçlar incelendiğinde hem P1 hem de P2 profilinde fırtına sonrasındaki erozyon ve yığılma miktarlarının neredeyse eşit olması sebebi ile denge durumu söz konusu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte P2 profilinde neredeyse P1 profilinin üç katı kadar kıyı çizgisi geri çekilmesi meydana gelmiştir. Bu durumun her iki profil hattı arasındaki ön kumul yüzü ve çalkantı bölgesine ait eğim farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilindiği üzere dik eğimli kıyılarda daha fazla enerji kaybı meydana gelmekte olup dalgalar kıyıya daha az enerji ile ulaşmaktadır. Böylece dik eğimli kıyılarda daha az, küçük eğimli

kıyılarda ise kıyıdan açığa doğru daha çok katı madde taşınım hareketi görülmekte olup P2 hattında daha büyük kıyı çizgisi geri çekilmesi meydana gelmiştir. Bununla birlikte her iki profilde yer alan kıyı eşiklerinin de meydana gelen erozyon ve kıyı çizgisi geri çekilmesi üzerinde etkisi vardır. Van Rijn (2009) çalışmasına göre daha derinde ve daha açıkta yer alan kıyı eşikleri kıyıdan açığa doğru daha çok katı madde taşınımı olmasını engellemektedir. Bu doğrultuda P2 profilinde P1'e göre kıyıya daha yakın ve daha sığ bölgede yer alan açık kıyı eşiği etkisi ile daha büyük kıyı çizgisi geri çekilmesinin meydana geldiğini söylemek mümkündür.

Tablo 4.1 Profil hacim değişimleri ve eğim değerleri

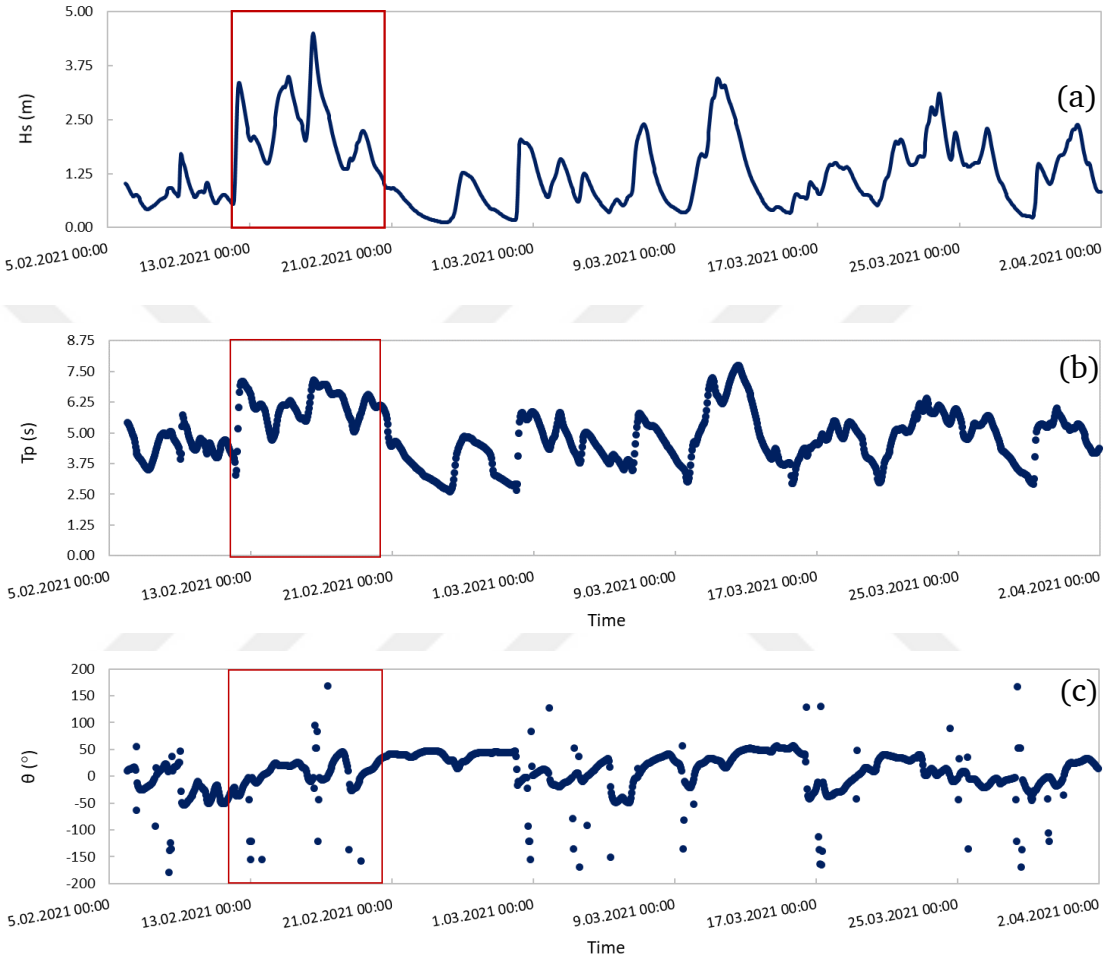
	Profiller	
	P1 Profili	**P2 Profili**
Erozyon (m^3/m)	-60.60	-66.90
Yığılma (m^3/m)	62.30	63.70
Hacim değişimi (m^3/m)	+1.70	-3.20
Kıyı çizgisi geri çekilme mesafesi (m)	-6.10	-16.50
Ön kumul eğimi (%)	8.4	5.2
Çalkantı bölgesi (%)	5.1	3.5
Profil ortalama eğimi (%)	2.9	2.0

4.3 Hidrodinamik Veriler

4.3.1 Ölçüm Dönemi

Mevcut hidrodinamik veriler, çalışma dönemi boyunca Şekil 4.4'te verilen, derin deniz dalgalarının saatlik değerlerini içermektedir. Dalga zaman serileri (belirgin dalga yüksekliği, (H_s); pik dalga periyodu, (T_p); ve pik dalga periyodu ile ilişkili olan ortalama dalga doğrultusu, (θ)) her bir profil hattını temsil eden derin deniz noktasına ait European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) rüzgar verileri kullanılarak üçüncü nesil dalga modeli MIKE21 SW ile elde edilmiştir. MIKE21 SW model sonuçları Bölüm 3.2.1'de açıklandığı üzere tüm Karadeniz boyunca farklı noktalarda yer alan yedi istasyondan (Gelendhzik, Hopa, Sinop, Filyos, Karaburun, Samsun ve Boğaziçi) temin edilen şamandıra ölçümleri ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra yerel dalga parametreleri de

yine Bölüm 3.2.1'de ifade edildiği gibi çalışma bölgesinde kısa süreli gerçekleştirilen ölçüm verileri ile doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında her iki profil hattını temsil edecek noktalardan 0.25°x0.25° ağ ve 6 saatlik zamansal çözünürlüğe sahip ECMWF Era-Interim rüzgâr verileri MIKE21 SW ile modellenmiş ve saatlik dalga verileri elde edilmiştir (İşlek vd., 2020b).



Şekil 4.4 Belirgin dalga yüksekliğinin (H_s) saatlik zaman serisi (a); pik dalga periyodunun (T_p) zaman serisi (b); pik dalga periyodu ile ilişkili ortalama dalga doğrultusunun (θ) zaman serisi (c) (İşlek vd., 2020b)

Çalışma süresi boyunca fırtına olarak nitelendirilen doğa olayı Şekil 4.4'te kırmızı alan ile görüldüğü üzere zaman serisinin 6. gününde başlamış olup yaklaşık 6 gün kadar sürmüştür. Şekil 4.4'te kırmızı ile gösterilen fırtına olayının öncesi ve sonrasında TUBITAK 117Y333 projesi (Şahin vd., 2021) kapsamında batimetrik ölçümler gerçekleştirilerek kıyıya dik iki profil hattı elde edilmiştir. Şekil 4.4 ile

fırtına pik noktası karakteristiklerinin H_s=4.5 m, T_p=7.15 s ve θ=338˚-KKB olduğu görülmektedir.

4.3.2 Dalga İklimi Projeksiyonları

Bu çalışmada Bölüm 3.4'te açıklamaları yapılan RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre projeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında geleceğe yönelik kıyıya dik profil değişimlerini tahmin edebilmek amacı ile RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre Karasu Bölgesi'ni temsil eden 2021-2100 yılları arasına ait saatlik derin deniz dalga verileri kullanılmıştır. Bu verilerin çalışma aralığı olarak seçilen 2021-2100 yılları arasındaki 80 yıllık değerlendirmeleri Bölüm 3.4'te ve Tablo 3.6'da detaylıca açıklanmıştır. Yine Bölüm 3.4'te Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de senaryolara göre yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemleri için eğilimleri verilen dalga parametrelerinin değişim yüzdeleri ile gelecekte beklenen deniz seviyesi artışları (yakın ve orta gelecek olarak gruplandırılmış şekilde) Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.2 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine ait dalga parametreleri (Şahin vd., 2021)

RCP4.5 Senaryosuna göre;		
Toplam Dalga Prametreleri	**Yakın Gelecek (2021-2060)**	**Orta Gelecek (2061-2100)**
Belirgin Dalga Yüksekliği, H_s	% 6.5 artış	% 2.6 azalma
Pik Dalga Periyodu, T_p	% 2.2 artış	% 0.9 azalma
Dalga Doğrultusu, θ	1.1° saat yönünde sapma	1.5° saat yönü tersinde sapma
RCP8.5 Senaryosuna göre;		
Toplam Dalga Prametreleri	**Yakın Gelecek (2021-2060)**	**Orta Gelecek (2061-2100)**
Belirgin Dalga Yüksekliği, H_s	% 1.1 artış	% 1.6 azalma
Pik Dalga Periyodu, T_p	% 0.4 artış	% 1.7 azalma
Dalga Doğrultusu, θ	2.7° saat yönünde sapma	1.1° saat yönünde sapma

Tablo 4.3 IPCC 5. Değerlendirme Raporu'na göre gelecekte olması beklenen deniz seviyesi değerleri (IPCC, 2000)

Ort Deniz Seviyesi Senaryoları	**2046-2065**	**2081-2100**
	Ort Deniz Seviyesi (muhtemel aralık) (m)	**Ort Deniz Seviyesi (muhtemel aralık) (m)**
RCP4.5	0.26 (0.19 - 0.33 arası)	0.47 (0.32 - 0.63 arası)
RCP8.5	0.30 (0.22 – 0.38 arası)	0.63 (0.45 - 0.82 arası)

4.4 Kıyı Profili Değişiminin XBeach İle Modellenmesi

4.4.1 Model Kalibrasyonu

Delft3D (Deltares Open Software) tarafından geliştirilen XBeach, kilometreler boyunca uzanan kumlu kıyılarda oluşan ekstrem fırtına olaylarının zaman ölçeğindeki hidrodinamik ve morfodinamik süreçlerini benzeştirmek için geliştirilmiş, 2 boyutlu ve açık kaynaklı sayısal bir yazılımdır. Yazılım hidrodinamik ve morfodinamik süreçlerden oluşmaktadır. Modelin hidrodinamik süreçleri; kısa dalga transformasyonu (sapma, sığlaşma ve kırılma), uzun dalga (ağırlık dalgaları) transformasyonu (üretim, yayılma ve dağılma), dalga kaynaklı kabarma ve kararsız akıntılar, su baskını ve taşkın süreçlerinden meydana gelirken, morfodinamik süreçleri; taban malzemesi ve askıda katı madde taşınması, kumul heyelanı, taban yenilenmesi ile gedik ve geçit açılması süreçlerinden oluşmaktadır. Özetle XBeach, karmaşık geometrileri temsil edebildiği için kumul erozyonu, su baskını ve gedik açılması süreçlerini modellemek amacıyla kullanılan süreç tabanlı bir akıntı ve katı madde taşınım modelidir (McCall vd., 2010; Roelvink vd., 2009; Splinter ve Palmsten, 2012; Armaroli vd., 2013). Bu çalışmada, doğrusal olmayan sığ su denklemlerinin Genelleştirilmiş Lagrange Ortalaması (GLM) formülasyonunu dikkate alan, zamana bağlı dalga hareketi korunumunu çözen bir boyutlu (1D) “surf salınımı” modu kullanılmaktadır (Roelvink, 1993a). Burada kullanılan hidrodinamik ve katı madde taşınım formülleri Roelvink vd. (2009) çalışmasında ve Bölüm 2.3.4.1’de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.4.1.1 Kalibrasyon Parametreleri

Kıyı bölgelerinde meydana gelen morfolojik değişimleri anlayabilmek için katı madde taşınım süreçlerinin iyi bir şekilde modellenmesi, bu modellemenin doğru bir şekilde yapılabilmesi için de kıyı bölgesinde maksimum sayıda ölçüm yapılması gerekmektedir. Bunun nedeni öncelikle modelin kendi içerisinde tanımlanan değişkenlerinin farklı değerler için kalibre edilmesi ardından da model sonuçlarının saha ölçüm sonuçları ile doğrulanması gerekliliğidir.

Morfolojik modelleme çalışmaları kapsamında XBeach, versiyon 1.23.5526 yazılımı kullanılmıştır. Model çalışmaları dalga grubu ölçeğinde kısa dalga varyasyonları ile bunlarla bağlantılı uzun dalgaların da çözümlendiği "surf salınımı" hidrodinamik modunda gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları ile ilgili olarak, kara ve derin deniz sınırlarında "dalga sönümlenmesi ve üretimi" sınır koşulu dikkate alınırken, derin deniz sınırındaki başlangıç dalga koşulları JONSWAP dalga spektrumu ile tanımlanmıştır. Modelde katı madde ortalama tane boyutu, Karasu kıyı bölgesini temsil eden D_{50}=0.38 mm olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Model kalibrasyon sürecini doğru bir şekilde sonuçlandırabilmek amacı ile literatür araştırmalarında ve yazılıma ait kullanım kılavuzunda kalibrasyon parametresi olarak nitelendirilen tüm parametreler incelenmiş ve çalışma bölgesi olan Karasu'yu temsil edecek parametreler kullanılmıştır. Çalışma bölgesine ait nihai kalibrasyon parametreleri, 39 farklı parametrenin farklı değerleri için koşturulan bir dizi farklı model çalışması ardından belirlenmiştir. Bu parametreler için XBeach kullanım kılavuzunda tanımlanan değer aralıkları dikkate alınarak parametrelerin farklı değerlerinde modeller koşturulmuş, en iyi istatistiksel hata sonucunu veren parametre değeri optimum değer olarak kabul edildikten sonra yeni parametre için farklı değerlerin denenmesi ile kalibrasyon model çalışmalarına devam edilmiştir. Çalışmada Profil 1 ve Profil 2 hatlarına ait gerçekleştirilen kalibrasyon modellerinin ölçülen fırtına sonrası profillere göre karşılaştırması BSS (Brier Başarı Puanı), RMSE (Ortalama Karekök Hatası) ve R^2 (Korelasyon Katsayısı) istatistiksel parametreleri ile yapılmıştır.

RMSE; Ortalama Karekök Hatası olarak bilinmekte olup verilere en iyi uyan doğru etrafında o verilerin ne kadar yoğun olduğunu söyleyen istatistiksel hata parametresidir. RMSE değeri 0.5'in üzerinde ise kötü tahmin, altında ise iyi/başarılı tahmin olarak nitelendirilmektedir. RMSE ortalama karekök hatasının ifadesi Denklem (4.1) ile aşağıda verilmiştir

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\left(z_{\text{ölçüm}} - z_{\text{model}}\right)^2}{N}} \qquad (4.1)$$

R^2; Korelasyon Katsayısı iki farklı değişken arasındaki ilişkinin gücünü gösteren istatistiksel parametredir. R^2 korelasyon katsayısı 1'e ne kadar yakın ise yapılan tahmin o kadar başarılı demektir. R^2 korelasyon katsayısının ifadesi Denklem (4.2) ile verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum\left(z_{\text{fırtına sonrası ölçüm}} - z_{\text{fırtına sonrası model}}\right)^2}{\sum\left(z_{\text{fırtına sonrası ölçüm}} - \bar{z}_{\text{fırtına sonrası ölçüm}}\right)^2} \tag{4.2}$$

Kıyı mühendisliği ve morfoloji değişim çalışmalarında, BSS parametresi başlangıç koşulunu yani fırtına öncesi profili dikkate alması sebebi ile diğer istatistiksel parametrelerden ayrılmaktadır. Bunun yanı sıra BSS ifadesinde morfolojik anlamda aktif hareketin olmadığı derin deniz alanları dikkate alındığında BSS değeri değişmemekte olup bu özelliği ile kıyı mühendisliği çalışmalarında en güvenilir performans değerlendirme parametresi olarak adlandırılmaktadır (Denklem 4.3) (Sutherland, 2004). Bu sebeple kıyı mühendisliği çalışmalarının çoğunda değerlendirme yaparken BSS (Brier Başarı Puanı) parametresi tercih edilmektedir.

$$BSS = 1 - \frac{\left(z_{\text{model}} - z_{\text{fırtına sonrası ölçüm}}\right)^2_{\text{ort}}}{\left(z_{\text{fırtına öncesi ölçüm}} - z_{\text{fırtına sonrası ölçüm}}\right)^2_{\text{ort}}} \tag{4.3}$$

Sutherland (2004) çalışmasında da ifade edildiği üzere BSS=1 değeri en iyi tahmini temsil ederken, BSS=0 değeri kötü tahmin olarak tanımlanmakta olup çalışmada belirtilen BSS parametresinin puan aralıkları ve tahmin becerileri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 BSS (Brier Başarı Puanı) sınıflandırması (Sutherland, 2004)

Tanım	BSS
Mükemmel	1.0-0.5
İyi	0.5-0.2
Makul/Orta	0.2-0.1
Zayıf	0.1-0.0
Kötü	< 0.0

Kalibrasyon çalışmaları sırasında kullanılan parametrelerin kombinasyonları ve bu kombinasyonlara ait istatistiksel hata değerlerine ait örnekler Tablo 4.5'te verilmiş ve ardından her bir parametrenin açıklaması yapılmıştır.

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve istatistiksel hata değerleri

Parametre	Model	Değer	BSS	RMSE	R^2
morfac	M-1.1	1	0.09	0.16	0.99986
	M-1.2	5	0.12	0.16	0.99987
form	M-2.1	vanthiel_vanrijn	0.12	0.16	0.99987
	M-2.2	soulsby_vanrijn	-2.79	0.32	0.99943
waveform	M-3.1	ruessink_vanrijn	0.31	0.14	0.99990
	M-3.2	vanthiel	0.30	0.14	0.99989
scheme	M-4.1	upwind_1	0.23	0.15	0.99988
	M-4.2	warmbeam	0.27	0.14	0.99989
	M-4.3	upwind_2	0.27	0.14	0.99989
	M-4.4	lax_wendroff	0.26	0.14	0.99989
bulk	M-5.1	0	0.27	0.14	0.99989
	M-5.2	1	0.29	0.14	0.99989
gamma	M-6.1	0.40	0.21	0.15	0.99988
	M-6.2	0.55	0.12	0.16	0.99987
	M-6.3	0.78	-1.39	0.26	0.99964
	M-6.4	0.90	-3.31	0.35	0.99935
gammax	M-7.1	0.40	0.31	0.13	0.99878
	M-7.2	1.00	0.38	0.12	0.99890
	M-7.3	2.00	0.44	0.12	0.99900
	M-7.4	2.50	0.39	0.12	0.99892
	M-7.5	3.00	0.40	0.12	0.99894
	M-7.6	4.00	0.46	0.11	0.99904
	M-7.7	5.00	0.40	0.12	0.99894
break	M-8.1	roelvink 1	0.25	0.14	0.99989
	M-8.2	baldock	0.11	0.16	0.99987
	M-8.3	roelvnk 2	0.30	0.14	0.99989
	M-8.4	roelvink_daly	0.26	0.14	0.99989
	M-8.5	janssen	0.18	0.15	0.99988
bedfriccoef	M-9.1	30	0.28	0.14	0.99989
	M-9.2	55	0.30	0.14	0.99989
	M-9.3	90	0.23	0.15	0.99988

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve hata değerleri (Devamı)

Parametre	Model	Değer	BSS	RMSE	R^2
reposangle	M-10.1	0	0.00	0.17	0.99985
	M-10.2	15	0.29	0.14	0.99989
	M-10.3	30	0.30	0.14	0.99989
	M-10.4	45	0.28	0.14	0.99989
bdslpeffmag	M-11.1	none	0.29	0.14	0.99989
	M-11.2	soulsby_total	0.29	0.14	0.99989
	M-11.3	roelvink_total	0.29	0.14	0.99989
bdslpeffini	M-12.1	none	0.29	0.14	0.99989
	M-12.2	total	0.29	0.14	0.99989
	M-12.3	bed	0.29	0.14	0.99989
facua	M-13.1	0.00	0.22	0.15	0.99988
	M-13.2	0.05	0.25	0.14	0.99989
	M-13.3	0.10	0.27	0.14	0.99989
	M-13.4	0.15	0.24	0.15	0.99989
	M-13.5	0.20	0.15	0.15	0.99987
	M-13.6	0.25	-0.07	0.17	0.99984
	M-13.7	0.30	-0.24	0.19	0.99981
	M-13.8	0.35	-0.48	0.20	0.99978
	M-13.9	0.50	-1.41	0.26	0.99964
	M-13.10	1.00	-2.65	0.32	0.99945
facsl	M-14.1	0.00	0.25	0.14	0.99989
	M-14.2	0.50	0.27	0.14	0.99989
	M-14.3	1.00	0.27	0.14	0.99989
	M-14.4	1.60	0.27	0.14	0.99989
facAs	M-15.1	0.00	0.43	0.12	0.99899
	M-15.2	0.10	0.31	0.14	0.99990
	M-15.3	0.20	0.44	0.12	0.99900
	M-15.4	0.30	0.41	0.12	0.99896
	M-15.5	0.40	0.42	0.12	0.99897
	M-15.6	0.50	0.40	0.12	0.99893
	M-15.7	0.60	0.35	0.12	0.99884
	M-15.8	0.70	0.44	0.11	0.99901
	M-15.9	0.80	0.27	0.13	0.99870
	M-15.10	0.90	0.39	0.12	0.998991
	M-15.11	1.00	0.11	0.14	0.99843

Tablo 4.5 Kalibrasyon parametrelerine ait kombinasyonlar ve hata değerleri (Devamı)

Parametre	Model	Değer	BSS	RMSE	R^2
wetslp	M-16.1	0.10	0.21	0.15	0.99988
	M-16.2	0.30	0.21	0.15	0.99988
	M-16.3	0.60	0.21	0.15	0.99988
	M-16.4	1.00	0.21	0.15	0.99988
	M-16.5	0.06	0.15	0.15	0.99987
	M-16.6	0.02	-60.31	1.30	0.99081
lws	M-17.1	1	0.21	0.15	0.99988
	M-17.2	0	0.21	0.15	0.99988
nspr	M-18.1	0	0.46	0.11	0.99904
	M-18.2	1	0.39	0.12	0.99892
smax	M-19.1	-1.00	0.29	0.14	0.99989
	M-19.2	-0.20	0.30	0.14	0.99989
	M-19.3	0.50	0.30	0.14	0.99989
	M-19.4	1.00	0.29	0.14	0.99989
	M-19.5	3.00	0.30	0.14	0.99989
turb+	M-20.1	bore_averaged	0.21	0.15	0.99988
	M-20.2	wave_averaged	0.24	0.14	0.99989
turbadv+	M-21.1	none	0.24	0.14	0.99989
	M-21.2	lagrangian	0.27	0.14	0.99989
	M-21.3	euler	0.27	0.14	0.99989

XBeach sayısal modelinin uzun süreli çalıştırmaları, hidrodinamik zaman ölçeğine göre morfolojik hızlandırma faktörünün kullanılmadığı durumlarda çok zaman alıcı olmaktadır (Roelvink vd., 2010). Çünkü hidrodinamik modüller genellikle morfodinamik modüllerden daha fazla hesaplama süresi gerektirmektedir. Bir morfolojik faktör, her bir zaman adımı için yeni hidrolik parametreler hesaplamak yerine, belirli bir zaman adımı sayısı üzerinden hidrodinamik sonuçları tahmin etmektedir. Bu süreç, derinlik değişimini sabit bir faktörle artırarak çalışmakta, böylece bir simülasyon periyodundan sonra aslında n periyot hesaplanmaktadır (Roelvink, 2006). Durumu örneklemek gerekirse 50 dakikalık bir simülasyon için "morfac" 5 olarak uygulandığında model yalnızca 10 dakika çalışacaktır. Literatür araştırmalarında, Binsma vd. (2018) ile Bart (2017) çalışmalarında olduğu gibi morfac için farklı değerlere sahip birçok model koşturulduğu görülmüştür.

Bununla birlikte genellikle fırtına koşulları sırasında bir morfac değeri önerilmemesinin yanı sıra “surf salınımı” modunda morfac=5 değerinin makul bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür (Bart, 2017). Bu sebeple koşturulan modellerde hem simülasyon sürecinde zaman kazanmak hem de optimum hızda doğruluk elde edebilmek için morfac parametresinin değeri 5 olarak dikkate alınmıştır (Tablo 4.5).

“form” parametresi, profilin denge durumundaki konsantrasyon formülü olup “soulsby_vanrijn” kullanıldığı durumda profilde çok büyük miktarda erozyon meydana gelmiş ve fırtına sonrası ölçüm profilinden maksimum sapma oluşmuştur. Bu sebeple model çalışmalarında fırtına sonrası ölçüm profiline daha yakın model sonucu veren “vanthiel_vanrijn” tercih edilmiştir.

“waveform” parametresi dalga şekli olarak tanımlanmaktadır. Model çalışmalarında lineer olmayan dalga koşulunu dikkate almak için iki farklı dalga şekli vardır. Bunlar; Ursell sayısını esas alan “ruessink_vanrijn” ile Rienecker and Fenton tarafından parametreleştirilen “vanthiel_vanrijn” dalga şekli modelidir.

“scheme” parametresi sayısal şema olarak tanımlanmakta olup XBeach modelinde dalga yayılımını çözen dalga hareketi korunum denkleminin sayısal yönlerini içermektedir.

“break” parametresi dalga kırılmasının formülünü tanımlamaktadır. Durağan/sabit dalga koşullarındaki model çalışmalarında “break” parametresi için “roelvink1”, “roelvink2” veya “roelvink_daly” seçenekleri tercih edilirken, sabit olmayan koşularda “break” parametresi için “baldock” seçeneği uygundur. Parametrenin “roelvink_daly” seçeneği, dalgaların kırılmaya başladığı ve durduğu koşullarda kullanılmaktadır.

“bedfriccoef” parametresi taban sürtünmesi formülünü tanımlamaktadır. XBeach yazılımının dikkate aldığı 5 farklı taban sürtünmesi formülü mevcut olup bunlar; “chezy”, “cf”, “white-colebrook”, “manning”, “white-colebrook-grainsize” formülleridir.

“reposangle” parametresi içsel sürtünme açısı olup 0° ila 45° arasında değişmektedir.

“bdslpeffmag” parametresi toplam katı madde taşınımı (bdlspleffmag = roelvink_total) ya da yalnızca sürüntü maddesi taşınımını (bdlspleffmag = roelvink_bed) dikkate almak için kullanılan parametre olup deniz tabanı sürüntü maddesi taşınım yönünü değiştirmek için parametre (bdlspleffmag = talmon) olarak dikkate alınmaktadır. Çalışmalarda toplam katı madde taşınım miktarı elde edilmek istendiği için bdlspleffmag = roelvink_total olarak dikkate alınmıştır.

bdslpeffini: Taban eğimine göre kritik Shields parametresidir. Bu parametre ile toplam taşınım miktarını elde edebilmek için katı maddenin harekete başlama kriteri ayarlanabilmektedir.

“facua” dalganın yatay düzlemdeki asimetrisi ve çarpıklığından sorumlu olan parametre olup yüksek değerlerde fırtına sonrası ölçülen profilden maksimum sapmalara sebep olmuştur. Bununla birlikte su altındaki kritik eğim olan “wetslp” parametresi ile doğru orantılı bir etkileşim içerisindedir. Model çalışmalarında en iyi sonuç bu parametrenin varsayılan değerinde elde edilmiştir.

“facsl” parametresi ise taban eğiminin etkisini tanımlayarak denge durumundaki katı madde konsantrasyonunu belirlemektedir. Bu parametre küçük değerler aldığında denge durumundaki katı madde konsantrasyonu artmaktadır.

“lws” parametresi uzun dalgaları aktifleştirmek için kullanılan parametre olup katı madde taşınım formüllerindeki denge konsantrasyonunun taşınım hızı büyüklüğü ile ilişkisini temsil etmektedir. Bu parametre 1 olduğunda taşınım hızı Euler hızına eşit olmakta ve modelde uzun dalgaların etkisi dikkate alınmaktadır. Bu parametrenin 1 ve 0 değerleri için model sonuçlarının benzer olduğunu söylemek mümkündür. Herhangi bir etki gözlenememesinin yanı sıra çalışmada varsayılan değer olarak “lws” = 1 şeklinde dikkate alınmıştır.

“nspr” parametresi kısa dalga hücrelerinin merkezlerine etki eden uzun dalgaların model çalışmalarında dikkate alınmasını sağlamaktadır.

“turb” parametresi kısa dalgalar kaynaklı meydana gelen türbülans olayını aktifleştirmek için kullanılmaktadır.

“turbadv” parametresi kısa veya uzun dalga kaynaklı meydana gelen türbülans yayılımını aktifleştirmek için kullanılmaktadır.

Profil bazında yapılan karşılaştırmalar sonucunda XBeach sayısal modelinin Tablo 4.6’da açıklamaları yapılan dokuz farklı parametreye duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

bulk: Tabandaki (çöken) ve askıdaki katı madde miktarını ayrı ayrı hesaplamak yerine toplam taşınımı bulmak için kullanılan parametredir.

eps: Kuru ve ıslak hücrelerin algoritması için eşik derinliği “eps” ile tanımlanmaktadır. Küçük “eps” değerleri, daha fazla kumun ıslanması ve harekete geçmesi ile sonuçlanarak daha çok katı madde taşınımına neden olmaktadır.

facAs: Dalga asimetrisini ölçekleme faktörüdür. Yüksek “facAs” değerleri, kısa dalga asimetrisi ile karaya doğru daha yüksek katı madde taşınımına yol açmaktadır. Dalga asimetrisi, dalgaların yatay eksene göre dalga tepe ve çukurlarının altında kalan alanların simetrik olmamasıdır. Dalgaların asimetrisi arttıkça, dalga tepelerindeki kıyıya doğru olan hız bileşeni derin denizdekinden çok daha yüksek olmaktadır. Katı madde taşınımı, bu kıyıya dik bileşenleri ile doğrudan ilişkili olduğundan, tanelerin karaya doğru hareketine neden olmaktadır.

facSk: Dalga çarpıklığını ölçekleme faktörüdür. Yüksek “facSk” değerleri, kıyıya dik katı madde taşınımı üzerindeki dalga çarpıklığının etkisini etkinleştirir ve “facAs” gibi karaya doğru daha fazla katı madde taşınımına yol açmaktadır. Dalga asimetrisi ve çarpıklığı, dalganın lineer olmayışı ile doğrudan ilişkili olduğundan, bu parametreler taban eğimine ve dalga spektral şekline oldukça duyarlıdır. Bu nedenle, kum eşiği etkisinin baskın olduğu durumlarda bu parametreler dikkatli bir şekilde kalibre edilmelidir.

gamma: Dalga kırılma parametresidir. Yüksek “gamma” değerleri, dalga kırılması sırasında daha az enerji kaybı sağlamaktadır.

gammax: Maksimum dalga yüksekliğinin su derinliğine oranını ifade eden parametredir. Sığ suda su derinliği üzerinden izin verilen maksimum dalga yüksekliği olarak da tariflenebilmektedir.

lwt: Uzun dalgalar kaynaklı türbülans hareketini aktifleştirmek için kullanılan parametredir.

smax: Yıkanma ve tabaka akış koşulları için maksimum Shields kriterini temsil etmektedir. Küçük "smax" değerleri, zayıf karışıma neden olur ve zayıf hacim değişikliği ile daha az miktarda katı madde taşınımı meydana getirmektedir.

wetslp: Su altında heyelan oluşturan kritik eğimdir. Bu parametre için tanımlanan kritik eğim aşıldığında su altında eşik heyalanı meydana gelmektedir. Daha yüksek eğimlerin daha büyük taşınım hacmi ile sonuçlanması beklenmektedir.

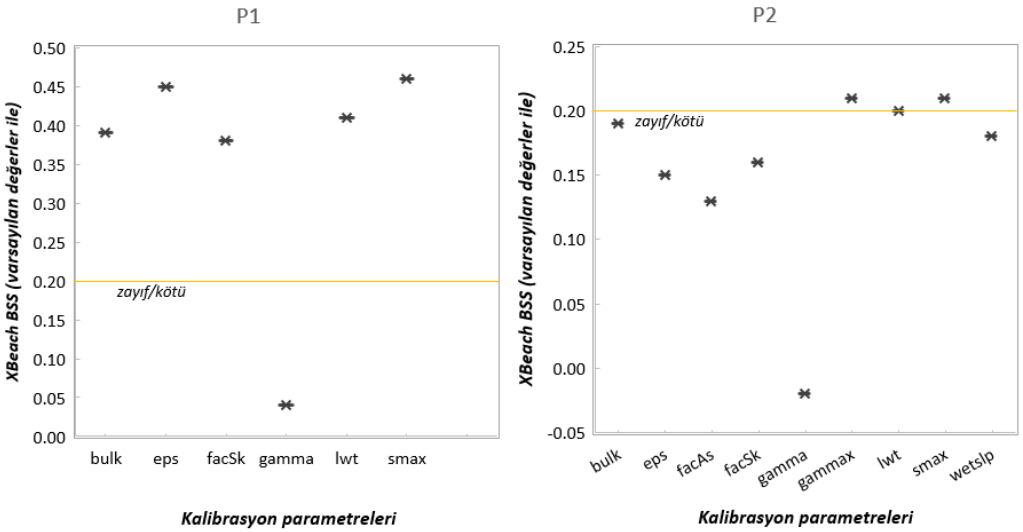
Tablo 4.6 Model kalibrasyonunda dikkate alınan XBeach parametreleri (Kalın yazılanlar varsayılan değerler, italik yazılanlar kalibrasyon değerleri)

Parametre	Değerler	Tanım
bulk	**0**, *1*	Sürüntü ve askıda malzemelerin yerine toplam malzemenin dikkate alınması
eps	**0.005**, *0.0075*	Hücrelerin ıslak kabul edildiği eşik su derinliği (m)
facAs	**0.1**, *0.4*	Dalga asimetrisi faktörü
facSk	**0.1**, *0.5*	Dalga çarpıklık faktörü
gamma	**0.55**, *0.4*	Dalga kırılma parametresi
gammax	**2.0**, *4.0*	Dalga yüksekliğinin su derinliğine olan maksimum oranı
lwt	**0**, *1*	Uzun dalga türbülansını aktifleştirme parametresi
smax	**-1.0**, *3.0*	Dengedeki taşınım konsantrasyonu için maksimum Shields parametresi
wetslp	**0.3**, *0.2*	Su altında heyelan oluşturan kritik eğim (dz/dx veya dz/dy)

Diğer yandan çalışmada kullanılan kalibrasyon parametrelerinin model üzerindeki etkilerini görebilmek amacı ile her bir parametre varsayılan değerleri ile dikkate alınmış ve yeni modeller koşturulmuştur. Çalışma sonucunda her iki profil hattı için aynı kalibrasyon parametrelerinin geçerli olmadığı görülmüştür. P1 profili "bulk", "eps", "facSk", "gamma", "lwt" ve "smax" parametreleri ile kalibre edilirken P2 profili bu parametrelere ek olarak "facAs", "gammax" ve "wetslp" parametreleri ile kalibre edilmiştir. Her iki profilde ortak kullanılan kalibrasyon parametrelerinin optimum değerleri incelendiğinde iki profil için farklı değerlerin

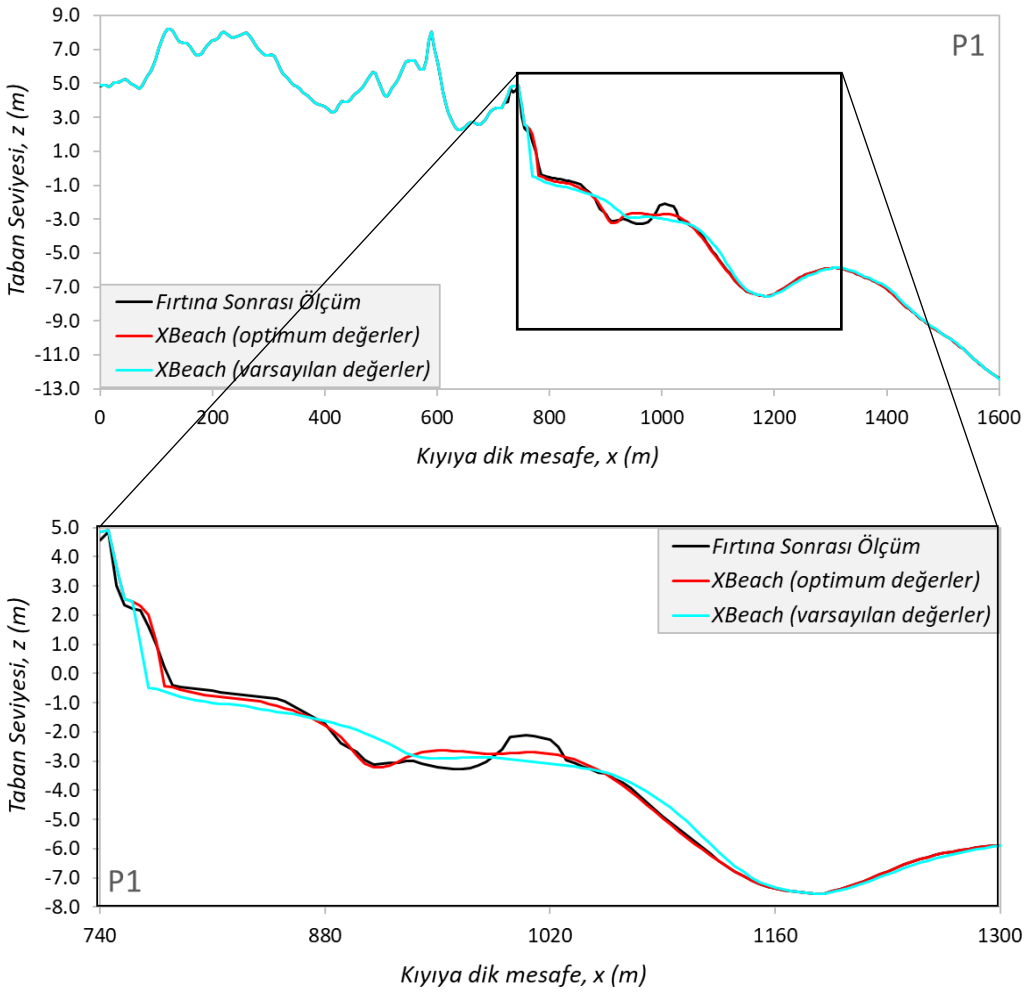
geçerli olduğu görülmüştür. P2 profilinde kullanılan ekstra üç parametrenin (“facAs”, “gammax”, “wetslp”) P1 profilindeki optimum değerleri, varsayılan değerleri olarak bulunmuştur. Her iki profil hattında aynı parametrelerin kullanılmaması, profiller arasında var olan 14.5 km’lik mesafe ve bu mesafe sebebi ile değişen morfolojik özellikler ile açıklanabilmektedir. Bununla birlikte iki profil arasındaki en önemli farklılık profil hatlarına ait eğimlerdir. Tablo 4.1 ile önceki bölümlerde ifade edildiği üzere P1 profili, P2 profiline göre daha dik eğimli ön kumul ve çalkantı bölgelerine sahiptir. Bu da iki profilde meydana gelecek katı madde taşınım hareketini farklı kılmaktadır. Diğer yandan P1 profilinde görülen açık kıyı eşiği P2 profilindekine göre daha derin ve kıyıdan daha uzak konumda yer almaktadır. Böylelikle daha dik ve açık kıyı eşiği olan P1 profilinde açığa doğru katı madde taşınımı olmamış ve kıyı çizgisi daha az geri çekilmiştir. Bu morfolojik farklılıkların yanı sıra P1 profilinden P2 profiline geçildiğinde dalga geliş açısının yaklaşık 10° doğuya doğru kaydığı kalibrasyon çalışmaları sırasında tespit edilmiştir. İki profil arasındaki bu farklılıklar her iki profilde etkin olan kalibrasyon parametrelerinin değişkenlik göstermesi ile P2 profilinde P1 profiline göre neredeyse 2.5 katı mertebede meydana gelen kıyı çizgisi geri çekilmesine sebep olabilmektedir.

Kalibrasyon parametrelerinin varsayılan değerleri ile koşturulan modeller ve optimum değerleri ile koşturulan modellere ait BSS puanları karşılaştırıldığında Şekil 4.5’de görüldüğü üzere P2 profilinin varsayılan değerlerine ait (“gammax” ve “smax” parametreleri dışında) BSS puanlarının zayıf/kötü tahmin sınırı altında kaldığı görülmektedir. P1 profilinde ise gamma parametresi varsayılan değerinde çalıştırıldığında model, zayıf/kötü tahmin ile sonuçlanmıştır. Yine Şekil 4.5’ten her iki profil üzerinde en etkili kalibrasyon parametresinin “gamma” olduğu da açıkça görülmektedir.

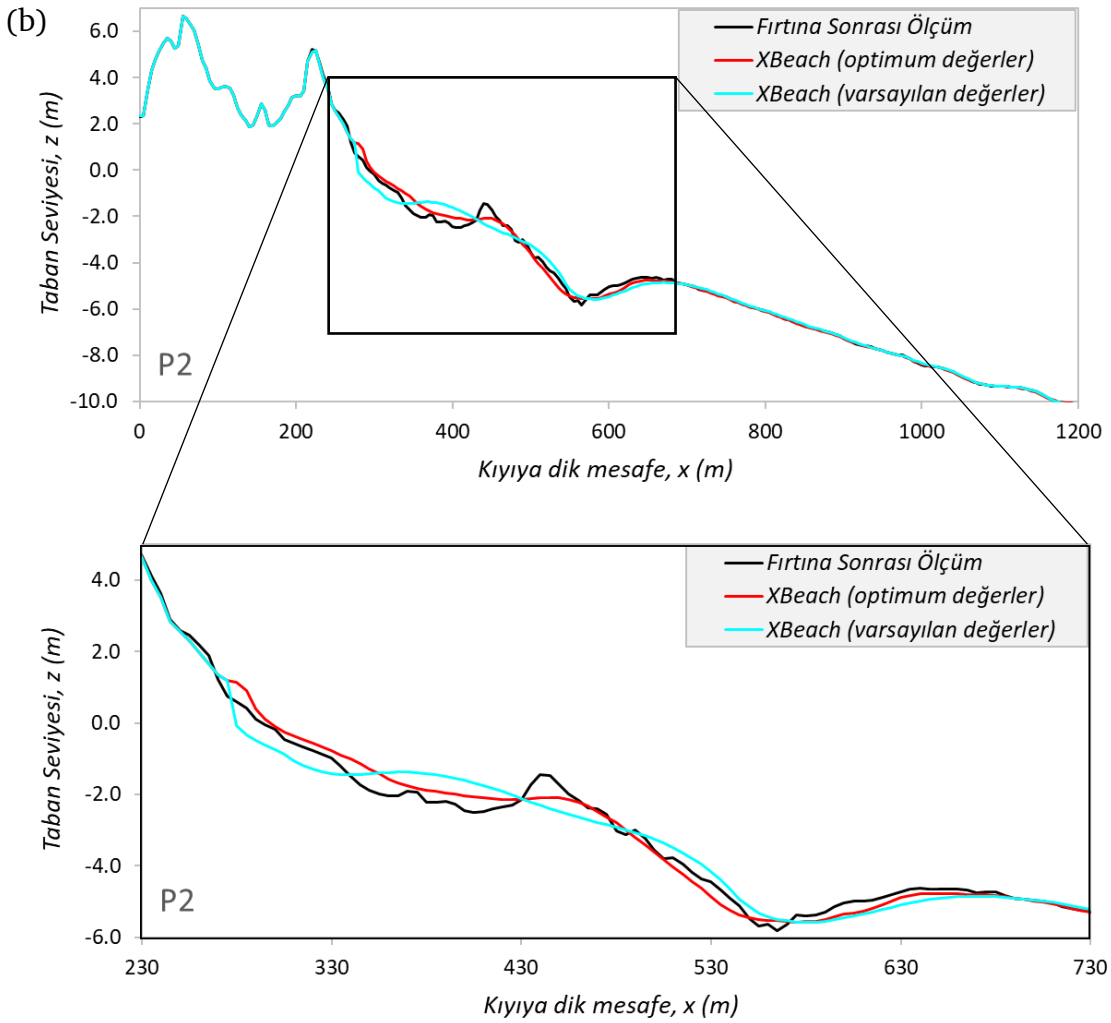


Şekil 4.5 XBeach kalibrasyon parametrelerinin varsayılan değerlerdeki BSS sonuçları

(a)



Şekil 4.6 Kalibrasyon çalışmalarının optimum ve varsayılan değerlere göre sonuçları a) P1 profili için, b) P2 profili için



Şekil 4.6 Kalibrasyon çalışmalarının optimum ve varsayılan değerlere göre sonuçları a) P1 profili için, b) P2 profili için (Devamı)

Şekil 4.6'da ise P1 ve P2 profillerine ait kalibrasyon parametrelerinin optimum ve varsayılan değerlerine ait sonuçlarının karşılaştırması hem tüm profil hatları için hem de aktif değişimin olduğu detay kısımları için ayrı ayrı sunulmaktadır. Sırasıyla mavi ve kırmızı ile gösterilen profiller, P1 ve P2 için tüm parametrelerin varsayılan ve optimum değerlerindeki sonuç profillerini temsil etmektedir. Bu grafik bize varsayılan değerlerden optimum değerlere geçişin profil şeklini nasıl etkilediğini anlatmaktadır.

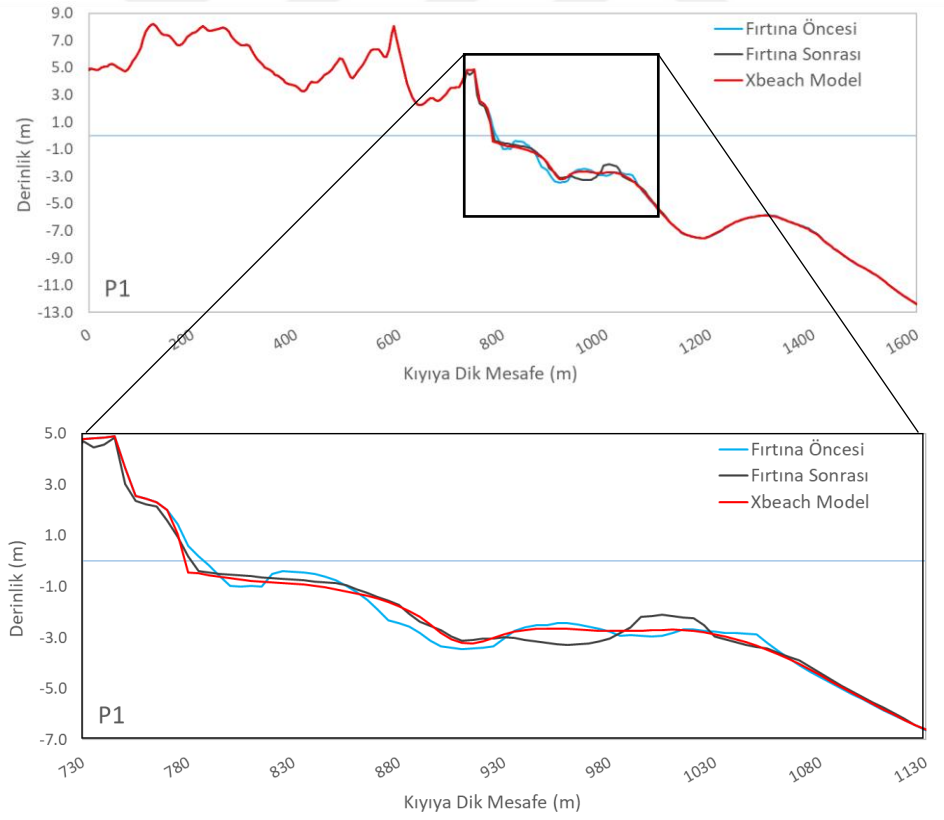
4.4.2 Model Kalibrasyon Sonuçları

Kalibrasyon parametrelerinin optimum değerlerini elde edebilmek için yaklaşık toplam 150 model koşturulmuştur. Kalibrasyon çalışmalarında kullanılan

parametrelerin optimum değerlerini ve en iyi kombinasyonu bulmak için her model sonuç profili ilk olarak fırtına sonrası ölçüm profili ile karşılaştırılmış ve model profilinin ölçümden sapma değerleri tespit edilmiştir. İstatistiksel hata parametreleri (BSS, RMSE, R^2) ile yapılan karşılaştırmalara göre parametrelerin optimum değerlerine karar verilerek bir sonraki parametre için aynı işlemler tekrar edilmiştir (Tablo 4.5).

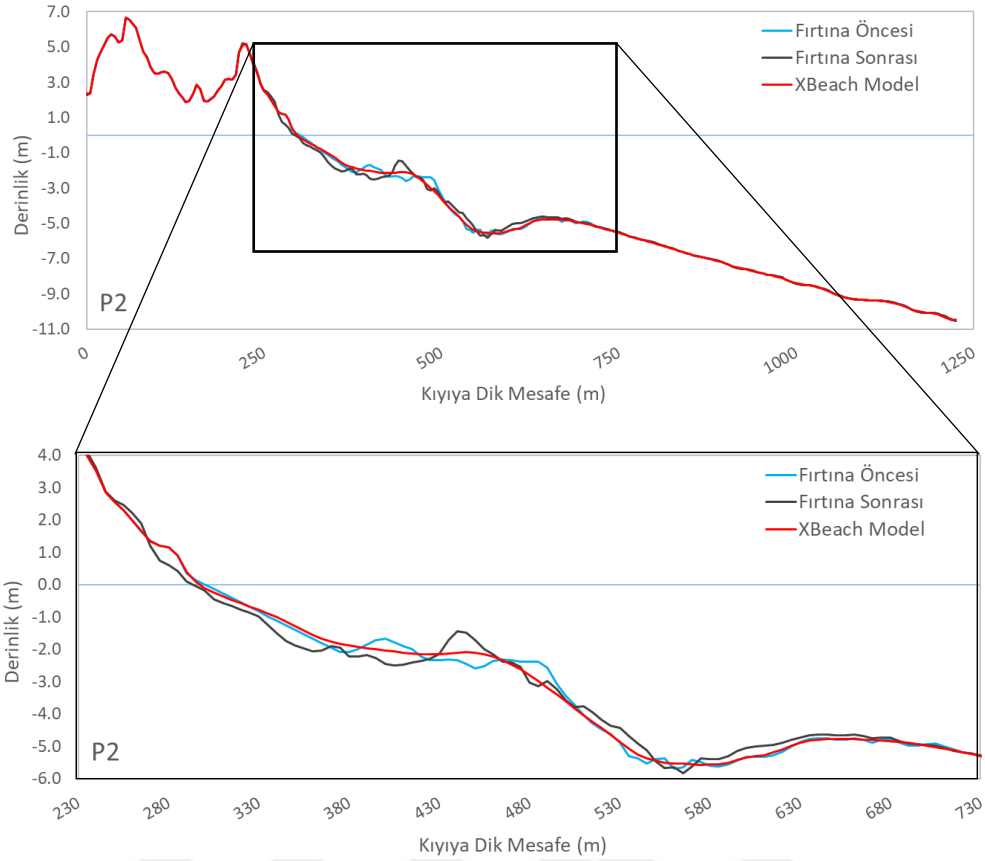
Fırtına öncesi ve fırtına sonrası ölçümlerle elde edilen profiller ile XBeach model sonuçları ile elde edilen profillerin birlikte değerlendirilmesi Şekil 4.7'de verilmiştir. Her iki profile ait grafikte de mavi ile fırtına öncesi, siyah ile fırtına sonrası ölçüm profilleri temsil edilirken kırmızı ile XBeach kalibrasyon model sonuçlarından elde edilen en optimum model sonucu temsil edilmiştir. Buradaki değerlendirme daha önce de ifade edildiği gibi özellikle kıyı mühendisliği çalışmalarında tercih edilen BSS Başarı Puanı ile birlikte RMSE ve R^2 istatistiksel değerlendirmeleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

(a)



Şekil 4.7 P1 ve P2 profillerine ait XBeach model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması a) P1 profili b) P2 profili için

(b)



Şekil 4.7 P1 ve P2 profillerine ait XBeach model sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması a) P1 profili b) P2 profili için (Devamı)

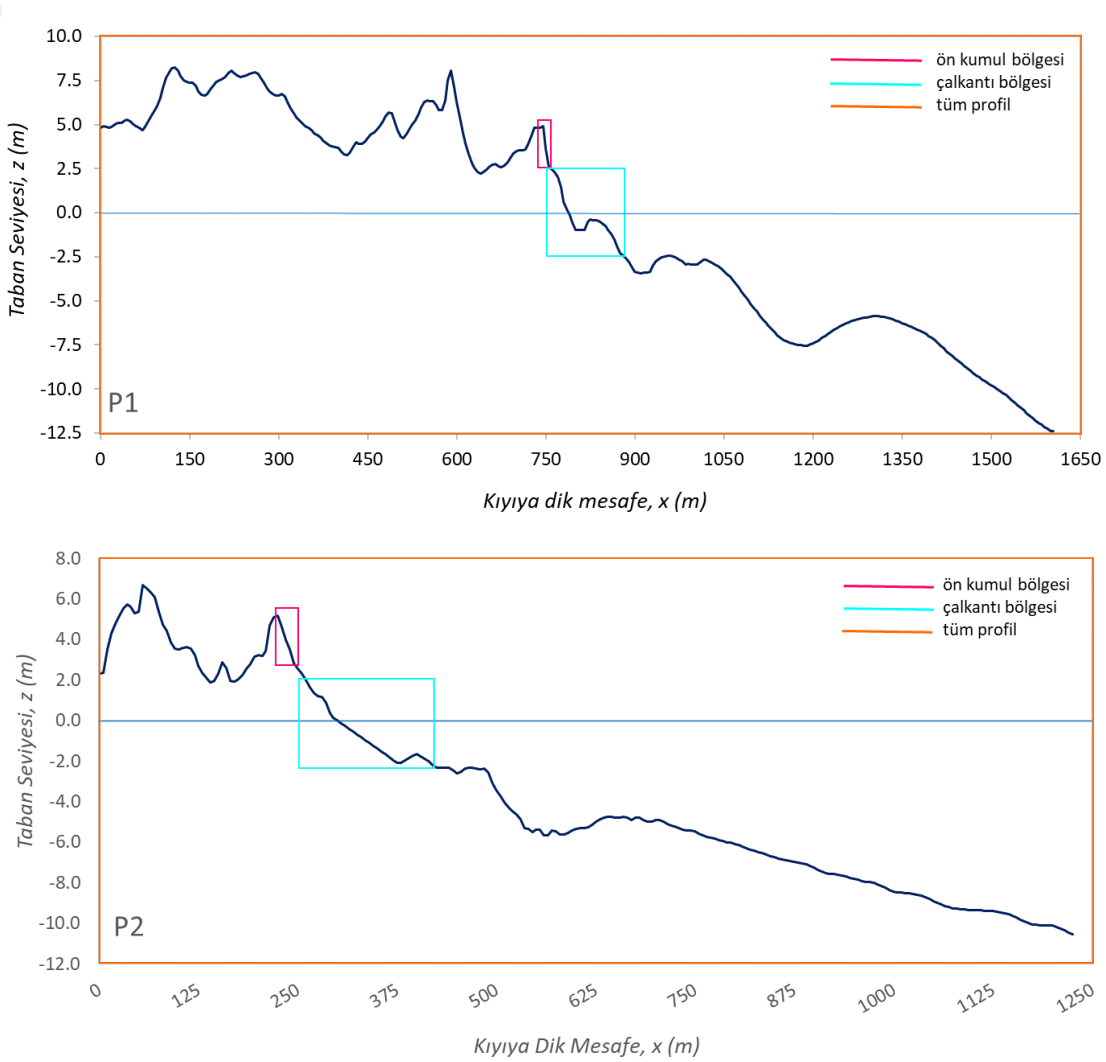
Kalligeris vd. (2020) çalışmasında da ifade edildiği gibi XBeach parametrelerine ait çoğu kalibrasyon ortalama su seviyesi üzerindeki plaj profilleri için yapılmıştır (Splinter ve Palmsten, 2012; Dissanayake vd., 2015). Ancak Kalligeris vd. (2020) çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da yalnızca üst plaj profili değil, genişletilmiş ve tam kıyı profilleri için XBeach model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple profillerin istatistiksel değerlendirmeleri yapılırken profiller Kalligeris vd. (2020) çalışması örnek alınarak bölgelere ayrılmıştır. Bu bölgeler sırasıyla ön kumul bölgesi, çalkantı bölgesi ve tüm profil olarak adlandırılmış olup bölgelerin tanımları aşağıdaki gibidir.

Ön Kumul Bölgesi: Çalışmada dikkate alınan ön kumul bölgesi, Armaroli vd. (2013) ve Keijsers vd. (2014) çalışmalarından faydalanarak dalganın maksimum tırmanma yüksekliği sonrasında yer alan arka kıyı bölgesinde başlayıp ilk kumul tepesine kadar uzanan bölge olarak tanımlanmıştır.

Çalkantı Bölgesi: Çalkantı Bölgesi, özellikle Elfrink ve Baldock (2012) çalışmasında olmak üzere Baldock ve Holmes (1997) ile Baldock vd. (2001) çalışmalarında, dalganın tırmanma ve geri çekilme bölgesi olarak tanımlanırken; Kalligeris vd. (2020) çalışmasında ise gel-git yüksekliği ile belirgin dalga yüksekliğinin yarısının toplamı olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada dikkate alınan çalkantı bölgesi de tüm bu tanımlar dikkate alınarak belirlenmiş ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Tüm Profil: Arka kıyı bölgesindeki kumul bölgesini de içine alacak şekilde derin denize doğru profilin sonuna kadar devam eden bölgedir.

Dikkate alınan bu bölgeler Şekil 4.8'de P1 ve P2 profilleri üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Bölgelere ayrılmış P1 ve P2 profilleri

Kalibrasyon çalışmaları sonucunda P1 ve P2 profilleri için fırtına sonrasını en iyi temsil eden model sonuçları ile fırtına sonrası ölçüm sonuçları BSS Başarı Puanlarına göre karşılaştırıldığında XBeach modelinin P1 ve P2 profillerinde ön kumul yüzlerini iyi tahmin edemediği, bunun yanı sıra çalkantı bölgelerini makul hatta iyi tahmin ettiği görülmüştür. Bununla birlikte P1 profilinde OSS (ortalama su seviyesi) altındaki aktif değişim bölgesinde model sonuçları lokal olarak fırtına sonrası ölçüm profilini yakalayabilmiş ancak bazı bölgelerde başlangıç profilini (fırtına öncesi ölçüm) takip etmeye devam etmiştir.

Fırtına öncesi profilde, çalkantı+ön kumul bölgesinde mevcut olan eşik, fırtına sonrası gözlenen profilde yüksekliğini bir miktar kaybetmiş ve denize doğru kaymıştır. XBeach kalibrasyon model sonucu bu değişimi yakalamış ve neredeyse fırtına sonrası gözlenen profil ile benzer eşik formu sergilemiştir. P2 profili incelendiğinde ise model, fırtına sonrası gözlenen profildeki gibi çalkantı+ön kumul bölgesinde denize doğru kayan dik eşik tepesini yakalamış fakat daha açıklarda meydana gelen kum eşiğini tam olarak doğru tahmin edememiştir. Tüm profil hattı genel olarak değerlendirildiğinde P2 profilinde XBeach kalibrasyon modelinin fırtına sonrası gözlenen profil formunu yakaladığı görülmüştür.

Özetle, P1 ve P2 profillerine ait XBeach kalibrasyon model sonuçlarının belirtilen istatistiksel parametreler aracılığı ile değerlendirilmesi sonucunda kabul edilebilir (makul) ve hatta iyi olarak nitelendirilen profil tahminleri elde edildiği görülmüştür. P1 ve P2 profili XBeach kalibrasyon model sonuçlarının yukarıda tanımlanan bölgelere göre BSS, RMSE, R^2 istatistiksel parametreler cinsinden değerlendirmeleri Tablo 4.7 ile verilmiştir.

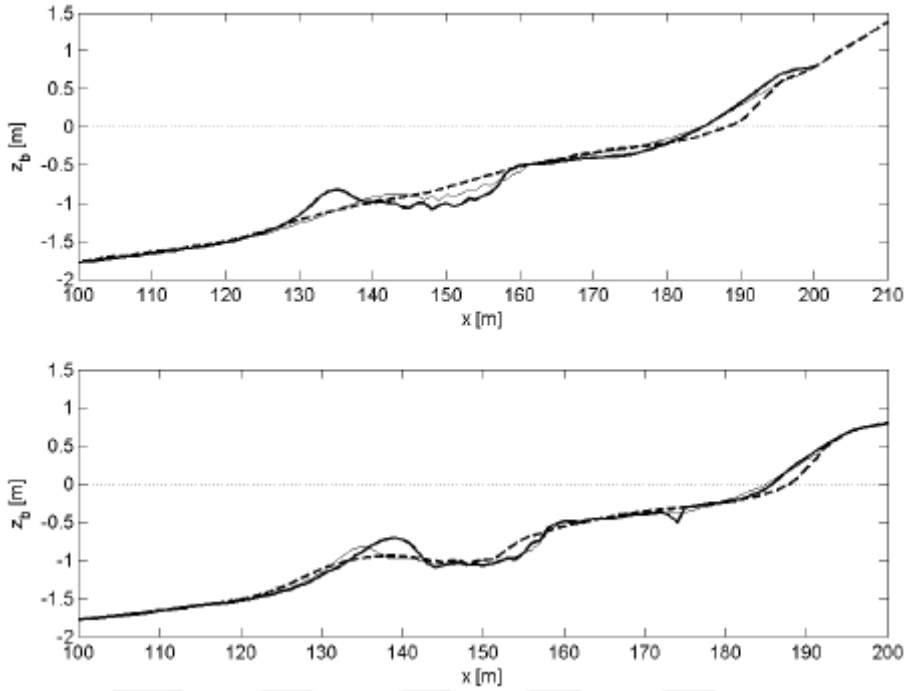
Tablo 4.7 P1 ve P2 XBeach kalibrasyon model sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi

Profil	Bölge	BSS	RMSE	R^2
P1	*Çalkantı+Ön Kumul Bölgesi*	0.59	0.24	0.986
	Çalkantı Bölgesi	0.69	0.21	0.957
	Tüm profil	0.54	0.14	0.999
P2	*Çalkantı+Ön Kumul Bölgesi*	0.33	0.33	0.975
	Çalkantı Bölgesi	0.33	0.36	0.917
	Tüm profil	0.37	0.17	0.998

Elde edilen BSS değerleri yukarıda da belirtildiği gibi makul ve hatta iyi sınıfında yer almakta olup sonuçların genel XBeach uygulamalarındaki (Roelvink vd., 2018) gibi 1'e daha yakın çıkmamasının sebebi şu şekilde açıklanabilmektedir. Kalligeris vd. (2020) çalışmasında da belirtildiği üzere genel olarak çalışılan XBeach uygulamaları nispeten küçük kıyı eğimine sahip plajlarda büyük dalga yüksekliği ve kısa dalga periyotları için koşturulan kısa süreli modellerden oluşmakta ve bu uygulamalarda XBeach performansı optimum değerlerde elde edilmektedir. Bununla birlikte Roelvink vd. (2018) çalışmasında ifade edildiği gibi XBeach yazılımı, temelinde infra ağırlık dalgalarından kaynaklı dalga enerjisinin baskın olduğu varsayımı ile dalgayı sönümleyebilen kıyılar için geliştirilmiş ve kalibre edilmiştir. Bu durum Hollanda kıyılarında gerçekleştirilen tipik XBeach uygulamalarında (Ruessink vd., 1998) olduğu gibi infra ağırlık dalgaları kaynaklı meydana gelen toplam tırmanma ve geri çekilme miktarının, rasgele dalgaların surf bölgesinde kırılması sonucu oluşan toplam tırmanma ve geri çekilme miktarına oranının (R_{IG}/R) (R_{IG}: infra ağırlık dalgaları kaynaklı meydana gelen toplam tırmanma ve geri çekilme yüksekliği; R: rasgele dalgaların toplam tırmanma ve geri çekilme yüksekliği) 0.85 olması ile açıklanmaktadır (Kalligeris vd., 2020). Gerçekleştirilen çalışmada bu oran, dikkate alınan hidrodinamik veriler doğrultusunda 0.85 değerinden çok küçük ($R_{IG}/R << 0.85$) bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen XBeach performansına ait BSS değerlerinin çok yüksek bulunamamasının bir sebebi bu oranın 0.85 mertebeleri yerine çok daha küçük değerde tespit edilmesi iken bir diğer sebebi de dik kıyı eğimi ile dalgayı sönümlemeye uygun olmayan profillerin varlığıdır. Buradan yola çıkarak Karasu kıyılarında çalkantıyı sönümleyecek infra ağırlık dalgalarının yeterince etkin olmadığı ve kıyıların dalgayı sönümlemeye yeterli alana sahip olmadığı sonucu çıkarılabilmektedir. Bununla birlikte XBeach uygulamaları yukarıda da ifade edildiği gibi kısa süreli fırtınalar için profilleri daha iyi benzeştirebilmekte ve performans değerleri daha yüksek elde edilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada XBeach modellerinde dikkate alınan uzun fırtına süreleri de model performansının düşmesine ve dolayısıyla daha küçük BSS değerleri bulunmasına sebep olmuştur. Diğer yandan yukarıda da ifade edildiği gibi çalışma bölgesi Karasu kıyılarının

genel XBeach uygulamalarının aksine büyük kıyı eğimlerine sahip olması da model performansının düşmesine ve XBeach yazılımının özellikle yüksek eğimli ön kumul bölgelerini tam olarak benzeştirememesine sebep olmuştur. Son olarak genel XBeach uygulamalarının aksine (büyük dalga yüksekliği, kısa dalga periyodu) gerçekleştirilen çalışmada dikkate alınan fırtına koşulları daha küçük dalga yükseklikleri ve nispeten uzun dalga periyotlarından oluşmakta olup bu durum da XBeach performansının beklenildiği kadar yüksek çıkmamasına neden olmuştur. Tablo 4.7'de verilen tüm sonuçlar (BSS, RMSE, R^2) değerlendirildiğinde model performansının istenildiği kadar yüksek bulunamamasının yanı sıra model çalışmaları ile P1 profilinin iyi derecede, P2 profilinin ise makul/kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Profillere ait genel değerlendirmelerin yanı sıra Kalligeris vd. (2020) çalışmasına benzer şekilde profiller Şekil 4.8'de gösterilen bölgelere ayrılmış ve özellikle çalkantı bölgesindeki model performansları tespit edilmeye çalışılmıştır. Ön kumul bölgelerinin XBeach yazılımı ile tam olarak temsil edilemediği ancak modelin profillere ait çalkantı bölgelerini bu bölgelerdeki kum eşikleri haricinde çok daha iyi temsil edebildiği sonuçlardan görülmüştür (Tablo 4.7). Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında da bu çalışmadaki sonuçlara benzer XBeach model sonuçları elde edilmiştir. Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında sakin ve ılıman (moderate) koşullarda fiziksel model deneyleri gerçekleştirilen çalışmaların XBeach sayısal modelleri koşturulmuştur. Fiziksel model deneylerinde ılıman (moderate) koşullar eşiğin açık denize taşınımı ile, sakin koşullar ise eşiğin kıyıya doğru hareketi ile temsil etmiştir. XBeach model sonuçlarında, fiziksel model deneylerinde hiçbir değişim olmamasına rağmen kıyı çizgisinde geri çekilmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında gerçekleştirilen model çalışmalarının her ikisinde de bu çalışmaya benzer şekilde fırtına sonrası ölçüm profillerindeki eşiklerin dağıldığı ve XBeach ile tam olarak temsil edilemediği görülmüştür (Şekil 4.9). Bu durum Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında uzun ve kısa dalga etkileşimlerinin XBeach yazılımında kabaca dikkate alınması ile açıklanmış olup, sakin ve ılıman (moderate) koşullarda daha yüksek model performansı elde edebilmek için uzun

dalgalar etkisinde iç surf ve çalkantı bölgesi etkileşimlerinin yazılımda daha detaylı dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır.



Şekil 4.9 Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında gerçekleştirilen ölçüm ve XBeach modeli profilleri (kalın sürekli çizgiler: fırtına sonrası ölçüm profilleri; kalın kesikli çizgiler: XBeach modeli profilleri; ince sürekli çzgiler: fırtına öncesi ölçüm profilleri)

4.5 Gelecekteki Olası İklim Değişikliklerinin Kıyı Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

İklim değişikliğinin, kumsal kıyıların yönetimi üzerinde büyük etkileri söz konusudur. Deniz seviyesinin yükselmesi ve fırtına dalgaları özelliklerindeki değişiklikler, kumul erozyonunun artmasına ve dolayısıyla kıyı sistemlerindeki güvenlik seviyelerinin düşmesine neden olabilmektedir (Winter ve Ruessink, 2017). Kıyı perspektifinden bakıldığında, en bariz ve muhtemelen en etkili faktör deniz seviyesinin yükselmesidir. Ancak iklim değişikliği yalnızca deniz seviyesini değil aynı zamanda kıyı erozyonunu etkileyen açık deniz hidrodinamik sınır koşullarını (dalgalar ve fırtına kabarması seviyeleri) da etkilemektedir (Winter ve Ruessink, 2017; Stived vd., 2013). Bu nedenle, küresel ısınma kaynaklı dalga iklim

değişikliği sonucunda kıyı erozyonunun ne ölçüde etkilenebileceğini ve bu değişikliklere hangi hidrodinamik süreçlerin yol açtığını bilmek oldukça önem arz etmektedir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmada hem P1 hem de P2 profillerine ait kalibre edilmiş modeller Bölüm 4.4.3'te açıklanan dalga iklimi projeksiyonları ışığında yeniden koşturulmuş ve yakın gelecek (2021-2060) ile orta gelecek (2061-2100) zaman ölçeklerinde meydana gelecek kıyı morfolojisi değişimleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte projeksiyon verilerinden faydalanarak dalga iklimi parametreleri (H_s, T_p ve θ) ile deniz seviyesindeki değişimlerin morfoloji üzerindeki etkisinin ortaya konması amaçlanmıştır. Analizler, iklim değişikliğinin Karasu kıyısındaki morfoloji değişimi üzerindeki etkisini yerel ölçekte yansıtmak için süreç tabanlı model olan XBeach ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar hem her bir parametrenin etkisini gösterecek şekilde simülasyonlarda ayrı ayrı değerlendirerek, hem de tüm parametrelerin birlikte etkisini gösterecek şekilde bütünsel bir simülasyon yaklaşımı ile tamamlanmıştır. Tablo 4.8 ile farklı iklim senaryoları (RCP4.5 ve RCP8.5) için modellerde dikkate alınan dalga parametrelerinin değerleri özetlenmiştir.

Tablo 4.8 Farklı iklim senaryolarına göre dalga parametreleri değişim miktarları (Şahin vd., 2021; IPCC, 2000)

Senaryo	**Prametre**	**Yakın Gelecek (2021-2060)**	**Orta Gelecek (2061-2100)**
RCP4.5	H_s	% 6.5 artış	% 2.6 azalma
	T_p	% 2.2 artış	% 0.9 azalma
	θ	1.1° saat yönünde sapma	1.5° saat yönü tersinde sapma
	Deniz Seviyesi	0.26 m artış	0.47 m artış
Senaryo	**Prametre**	**Yakın Gelecek (2021-2060)**	**Orta Gelecek (2061-2100)**
RCP8.5	H_s	% 1.1 artış	% 1.6 azalma
	T_p	% 0.4 artış	% 1.7 azalma
	θ	2.7° saat yönünde sapma	1.1° saat yönünde sapma
	Deniz Seviyesi	0.30 m artış	0.63 m artış

Yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerinde hem P1 hem de P2 profillerinde meydana gelecek değişimler üzerinde her bir dalga parametresi ve deniz seviyesi yükselmesinin etkileri ayrı ayrı incelenerek tablolar ve şekiller ile ifade edilmiştir. Deniz seviyesinin bu yüzyılın sonuna doğru 0.19 ila 0.82 m yükseleceği tahmin edilmektedir (Tablo 4.3). Deniz seviyesi yükselmesi sonucunda, genel su seviyesinin artması ve bu nedenle, dalgaların kum tepesine daha yüksek bir seviyede ulaşması ile kumul erozyonunun da etkilenmesi tahmin edilmektedir. Aynı zamanda Tablo 4.8'e göre yakın gelecekteki belirgin dalga yükseliğinin artması sonucunda kumul erozyonunda artış, orta gelecekteki belirgin dalga yüksekliğinde meydana gelen azalma neticesinde ise kumul erozyonunda düşüş beklenmektedir.

Kalibrasyon çalışmaları sonucunda XBeach model sonuçlarına göre P1 profilinde fırtına sonrası ölçüm sonuçlarına göre 48.00 m^3/m yığılma ile 47.50 m^3/m erozyon meydana gelirken, P2 profilinde ise 29.50 m^3/m yığılma ile 32.00 m^3/m erozyon meydana gelmiştir. Aşağıdaki alt başlıklarda her bir parametrenin kıyı morfolojisi üzerine etkileri değerlendirilmiş ve fırtına sonrası profil ölçüm sonuçlarına göre yüzde (%) cinsinden değişim miktarları ifade edilmiştir.

4.5.1 Dalga Yüksekliğinin Etkisi

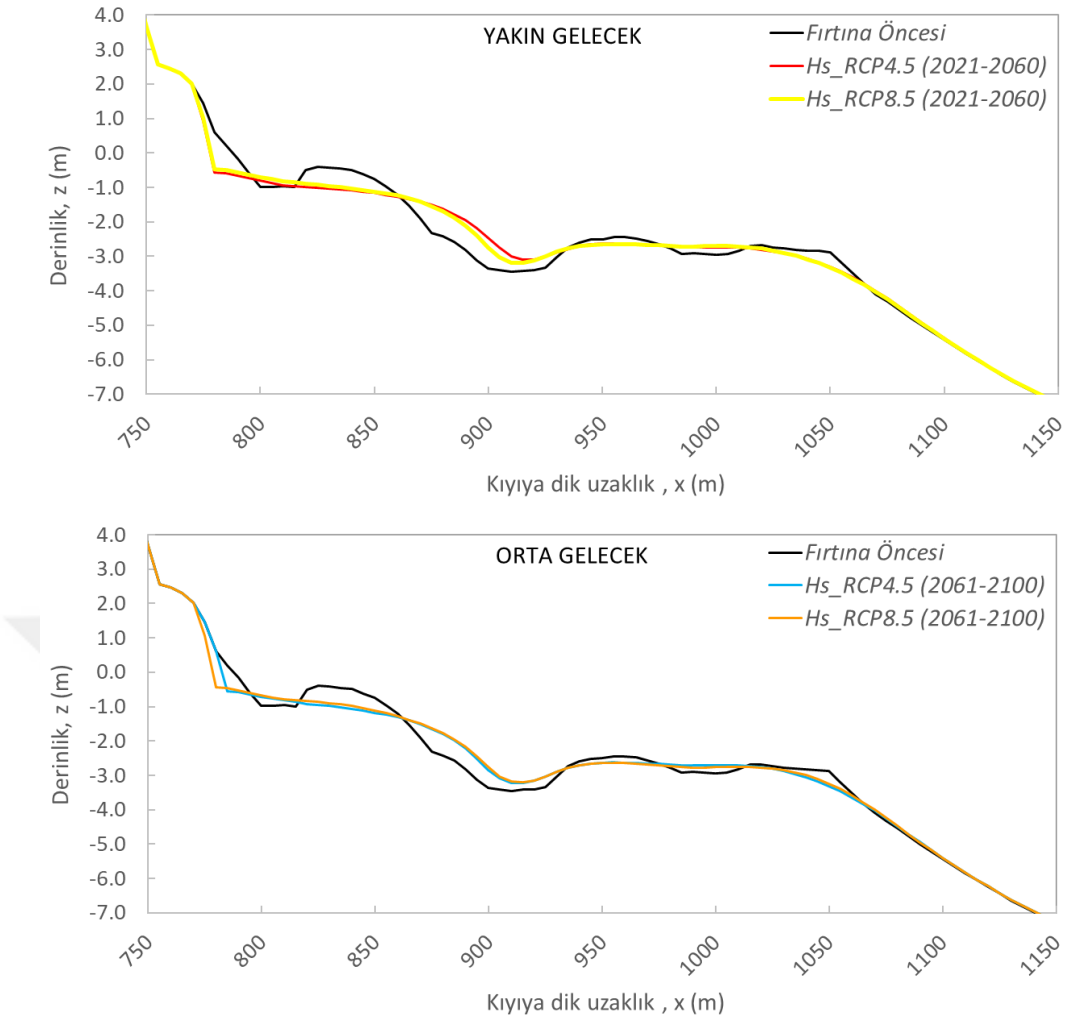
RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) belirgin dalga yüksekliği değerinde %6.5 değerinde artış meydana gelmekte olup bunun sonucunda P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon modeline göre sırasıyla %17.1 ve %16.5 değerinde artış göstermiştir. Belirgin dalga yüsekliği RCP4.5 senaryosuna göre orta gelecekte (2061-2100) %2.6 azalmış olup bunun sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon modeline göre sırasıyla %8.4 ve %8.2 mertebelerinde azalmıştır.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) belirgin dalga yüsekliği %1.1 artış göstermiş olup XBeach kalibrasyon modeline göre profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarı %5 değerinde artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde ise belirgin dalga yüksekliği %1.6 azalma göstermiş olup

bu durum sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları %5.7 ve %5.6 mertebelerinde azalma göstermiştir. Dalga yüksekliği değişimine göre erozyon ve yığılma miktarlarında meydana gelen değişimler Tablo 4.9'da verilmiş olup, tablodaki Erozyon-1 ve Yığılma-1 değerleri dalga parametrelerinde hiçbir değişiklik olmayan durumu (XBeach kalibrasyon modeli), Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga yüksekliğinin iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.9 İklim senaryolarına göre dalga yüksekliğinin P1 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
H_s %6.5 arttığında			H_s %1.1 arttığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	55.61	+17.1	47.50	49.87	+5.0
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	55.94	+16.5	48.00	50.40	+5.0
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
H_s %2.6 azaldığında			H_s %1.6 azaldığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	43.50	-8.4	47.50	44.78	-5.7
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	44.07	-8.2	48.00	45.29	-5.6



Şekil 4.10 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde dalga yüksekliği etkisi

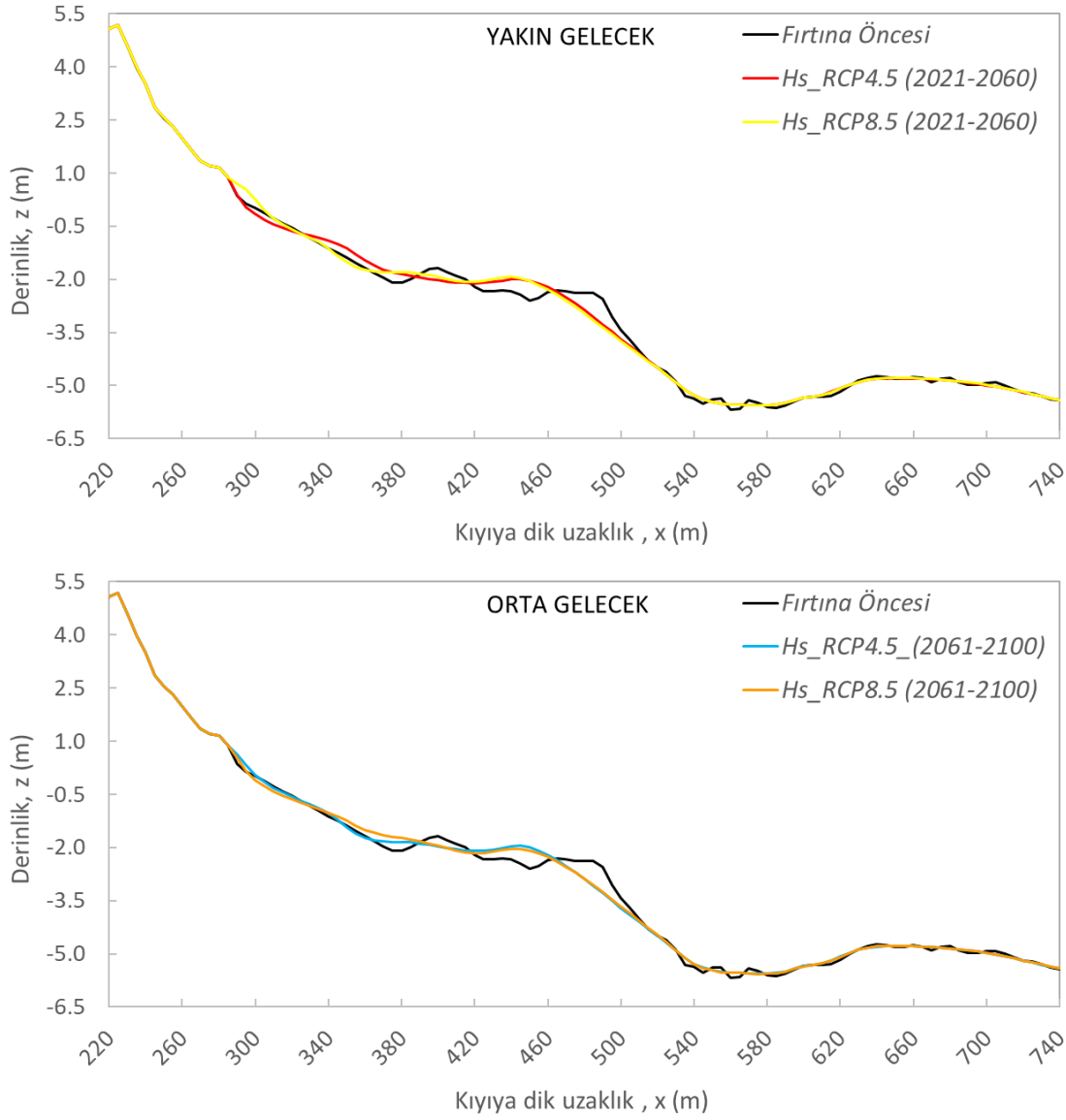
Belirgin dalga yüksekliğinin P2 profili üzerindeki etkileri incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) dalga yüksekliğinde meydana gelen %6.5 değerindeki artış sonucunda XBeach kalibrasyon profiline göre erozyon ve yığılma miktarlarında sırası ile 18.7 ve %19.9 mertebelerinde artış tespit edilmiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde belirgin dalga yüksekliği %2.6 değerinde azalmış ve bu durumun sonucunda P2 profili erozyon miktarı %0.6 azalırken, yığılma miktarı %5.7 artış göstermiştir.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) belirgin dalga yüksekliğinde meydana gelen %1.1'lik artış sonucunda P2 profilinde meydana

gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %8.7 ve %16.6 artış göstermiştir. Bununla birlikte orta gelecek (2061-2100) döneminde belirgin dalga yüksekliğinde meydana gelen %1.6'lık azalma sonucunda P2 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %2.4 ve %10.1 artış göstermiştir. Dalga yüksekliğinin P2 profili üzerindeki etkileri Tablo 4.10'da verilmiş olup tablodaki Erozyon-1 ve Yığılma-1 değerleri dalga parametrelerinde hiçbir değişim olmayan durumu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga yüksekliğinin iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.10 İklim senaryolarına göre dalga yüksekliğinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
H_s %6.5 arttığında			H_s %1.1 arttığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	37.99	+18.7	32.00	34.78	+8.7
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	35.44	+19.9	29.55	34.46	+16.6
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
H_s %2.6 azaldığında			H_s %1.6 azaldığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	31.82	-0.6	32.00	32.76	+2.4
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	31.23	+5.7	29.55	32.54	+10.1



Şekil 4.11 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga yüksekliği etkisi

Belirgin dalga yüksekliği etkisi ile P1 profilindeki maksimum katı madde taşınım hareketi RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde meydana gelirken, P2 profilindeki maksimum katı madde taşınmı da RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde meydana gelmiştir. Bununla birlikte belirgin dalga yüksekliğinin P1 profili üzerinde RCP8.5 senaryosunda daha etkili bir parametre olmasının yanı sıra, P2 profili üzerinde yeterince etkili bir parametre olmadığı her iki senaryonun orta gelecek dönemlerinden anlaşılmaktadır.

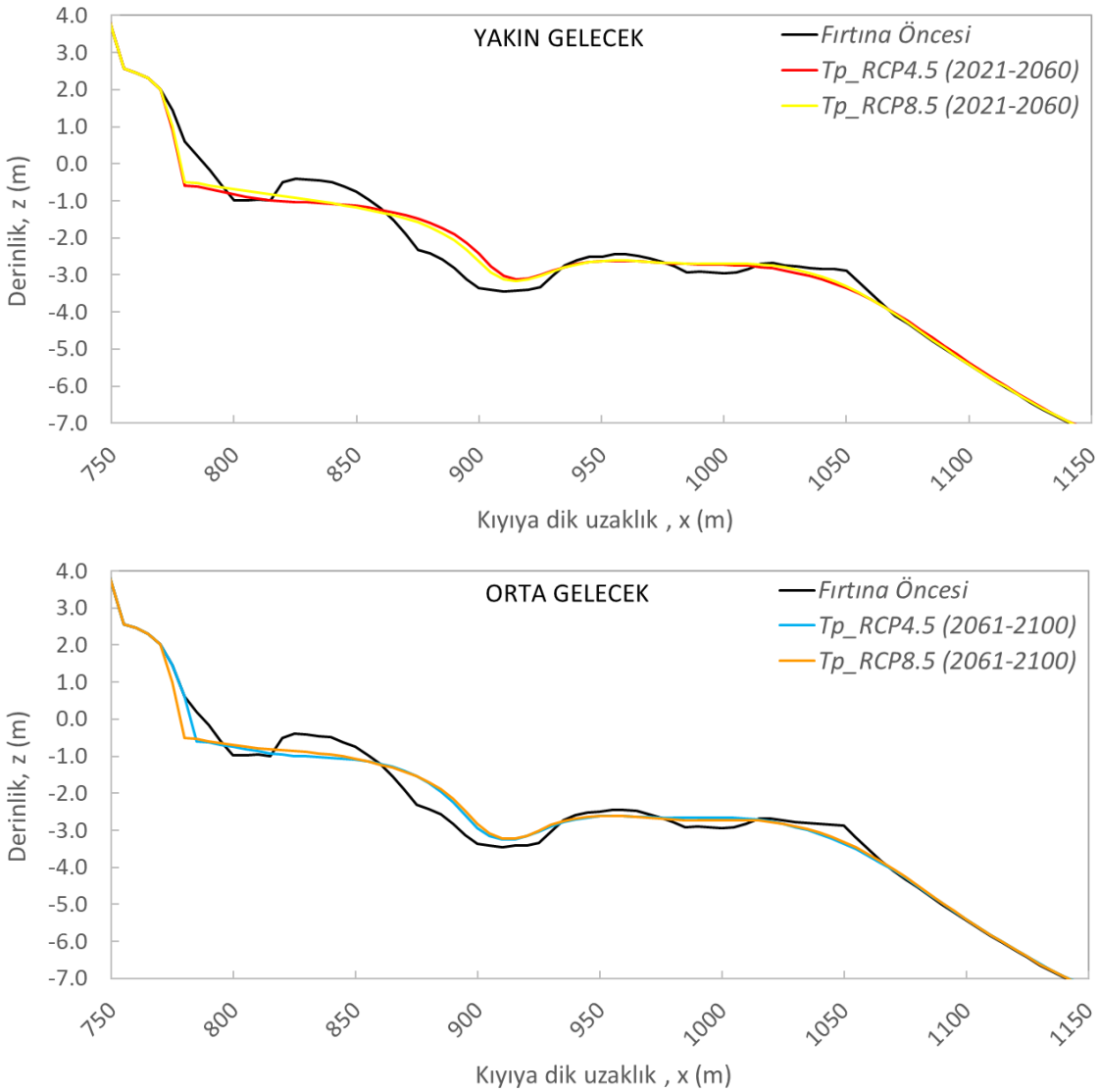
4.5.2 Dalga Periyodu Etkisi

RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) pik dalga periyodu değerinde %2.2 değerinde artış meydana gelmekte olup bunun sonucunda P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %23.9 ve %23.3 değerinde artış göstermiştir. Pik dalga periyodu RCP4.5 senaryosuna göre orta gelecekte (2061-2100) %0.9 azalmış olup bunun sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %3.4 ve %3.6 mertebesinde azalmıştır.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) pik dalga periyodu %0.4 artış göstermiş olup XBeach kalibrasyon modeline göre profilde meydana gelen erozyon miktarı %9.8 artarken, yığılma miktarı %9.0 artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde ise pik dalga periyodu %1.7 azalmış olup bu durum sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarının her ikisi de %6.7 mertebesinde azalmıştır. Dalga periyodu etkisi ile profillere ait erozyon ve yığılma miktarlarında meydana gelen değişimler Tablo 4.11'de özetlenmiş olup tabloda Erozyon-1 ve Yığılma-1 olarak ifade edilen değerler dalga parametrelerinde hiçbir değişim olmayan durumu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga periyodunun iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.11 İklim senaryolarına göre dalga periyodunun P1 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
T_p %2.2 arttığında			T_p %0.4 arttığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	58.84	+23.9	47.50	52.15	+9.8
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	59.18	+23.3	48.00	52.33	+9.0
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
T_p %0.9 azaldığında			T_p %1.7 azaldığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	45.90	-3.4	47.50	44.34	-6.7
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	46.28	-3.6	48.00	44.79	-6.7



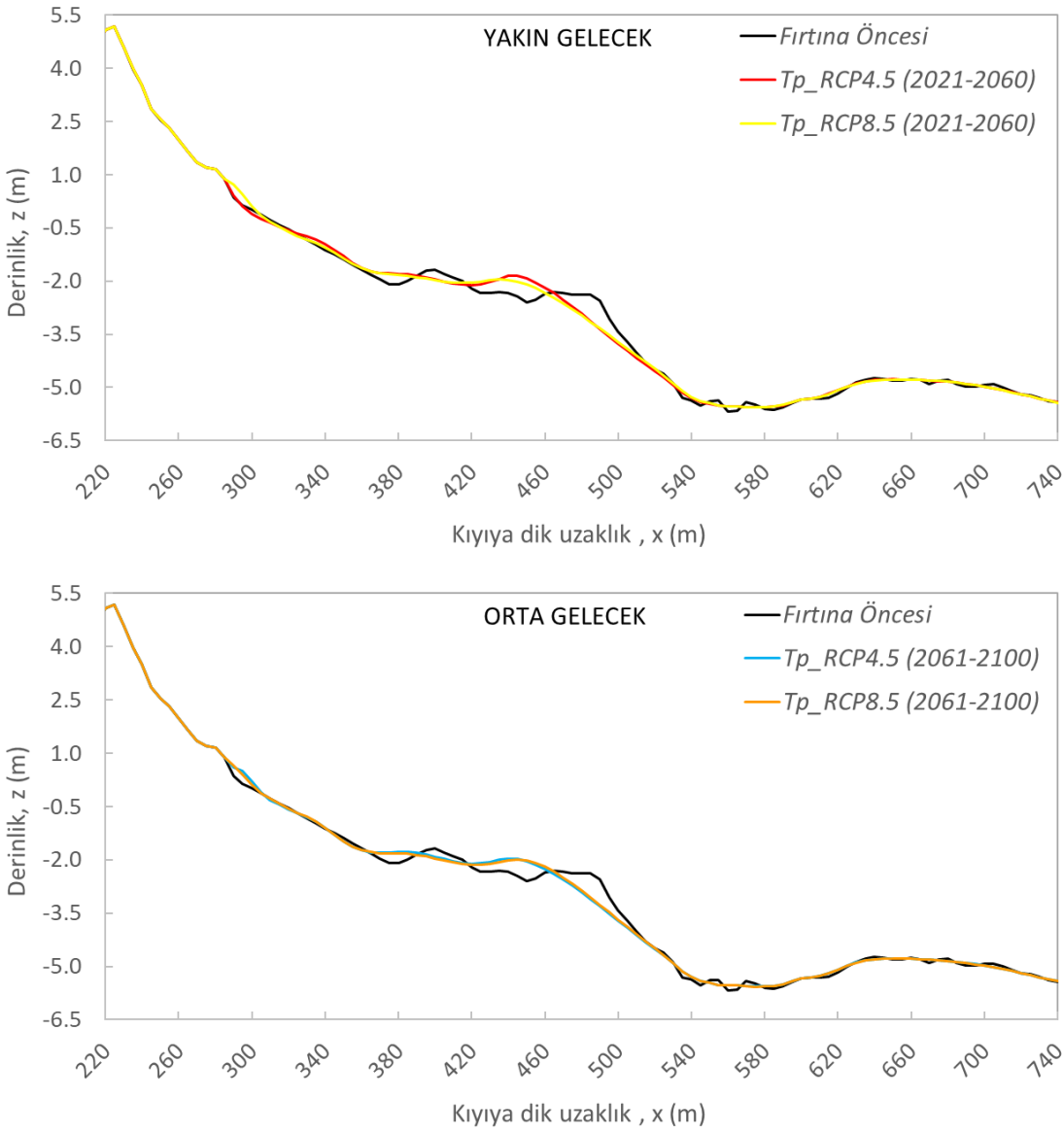
Şekil 4.12 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosuna göre P1 morfolojisi üzerinde dalga periyodu etkisi

Pik dalga periyodunun P2 profili üzerindeki etkileri incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) pik dalga periyodunda meydana gelen %2.2 değerindeki artış sonucunda XBeach kalibrasyon modeline göre erozyon ve yığılma miktarlarında sırası ile %14.4 ve %18.7 mertebelerinde artış tespit edilmiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde pik dalga periyodun %0.9 değerinde azalmış ve bu durum sonucunda P2 profili erozyon miktarı %0.4 azalırken yığılma miktarı ise %7.8 artış göstermiştir.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) pik dalga periyodunda meydana gelen %0.4'lük artış sonucunda P2 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %21.4 ve %14.6 artış göstermiştir. Bununla birlikte orta gelecek (2061-2100) döneminde pik dalga periyodunda meydana gelen %1.7'lik azalma sonucunda P2 profilinde meydana gelen erozyon miktarı %3.5 değerinde azalırken, yığılma miktarı %1.4 oranında artış göstermiştir. Tablo 4.12'de verilen Erozyon-1 ve Yığılma-1 olarak ifade edilen değerler dalga parametrelerinde hiçbir değişim olmayan durumu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga periyodunun iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.12 İklim senaryolarına göre dalga periyodunun P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
T_p %2.2 arttığında			T_p %0.4 arttığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	36.61	+14.4	32.00	34.84	+21.4
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	35.09	+18.7	29.55	33.85	+14.6
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
T_p %0.9 azaldığında			T_p %1.7 azaldığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	31.87	-0.4	32.00	30.89	-3.5
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	31.86	+7.8	29.55	29.96	+1.4



Şekil 4.13 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga periyodu etkisi

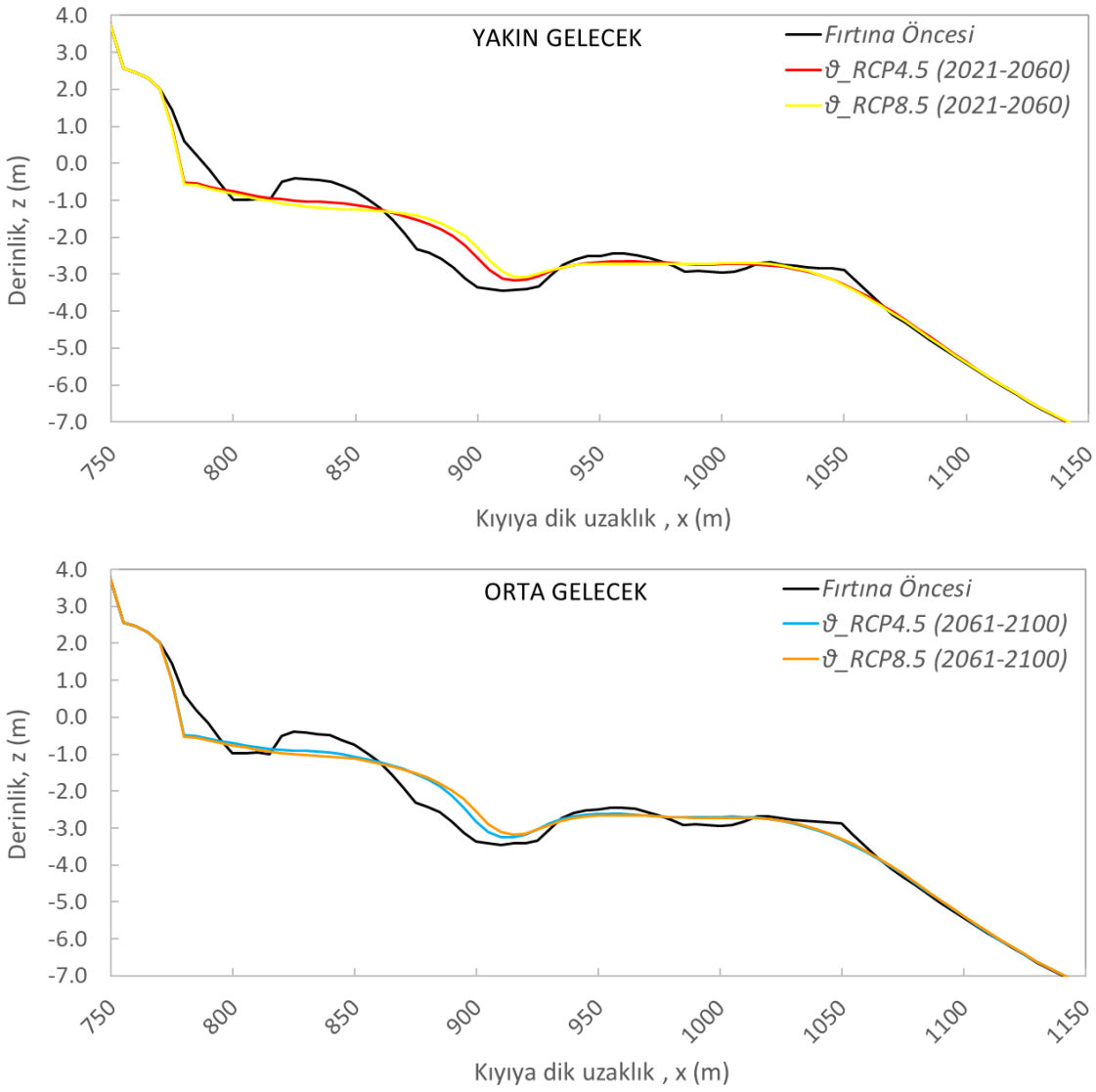
4.5.3 Dalga Doğrultusunun Etkisi

RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) dalga doğrultusu saat yönünde 1.1° sapmaya uğradığında P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %10.7 ve %10.8 değerinde artış göstermiştir. Dalga doğrultusu RCP4.5 senaryosuna göre orta gelecekte (2061-2100) saat yönünün tersinde 1.5° sapmaya uğramış ve bunun sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %0.6 ve %0.5 mertebesinde azalmıştır.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneminde dalga doğrultusu saat yönünde 2.7° sapmaya uğramış olup XBeach kalibrasyon modeline göre profilde meydana gelen erozyon miktarı %29.8, yığılma miktarı %29.5 artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde ise dalga doğrultusu saat yönünde 1.1° sapmış ve bu durum sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları sırasıyla %10.7 ve %10.8 oranında artış göstermiştir. Tablo 4.13'de verilen Erozyon-1 ve Yığılma-1 olarak ifade edilen değerler dalga parametrelerinde hiçbir değişim olmayan durumu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga doğrultusunun iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.13 İklim senaryolarına göre dalga doğrultusunun P1 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında			θ saat yönünde 2.7° sapma yaptığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	52.60	+10.7	47.50	61.64	+29.8
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	53.17	+10.8	48.00	62.14	+29.5
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
θ saat yönünün tersinde 1.5° sapma yaptığında			θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	47.20	-0.6	47.50	52.60	+10.7
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	47.77	-0.5	48.00	53.17	+10.8



Şekil 4.14 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde dalga doğrultusunun etkisi

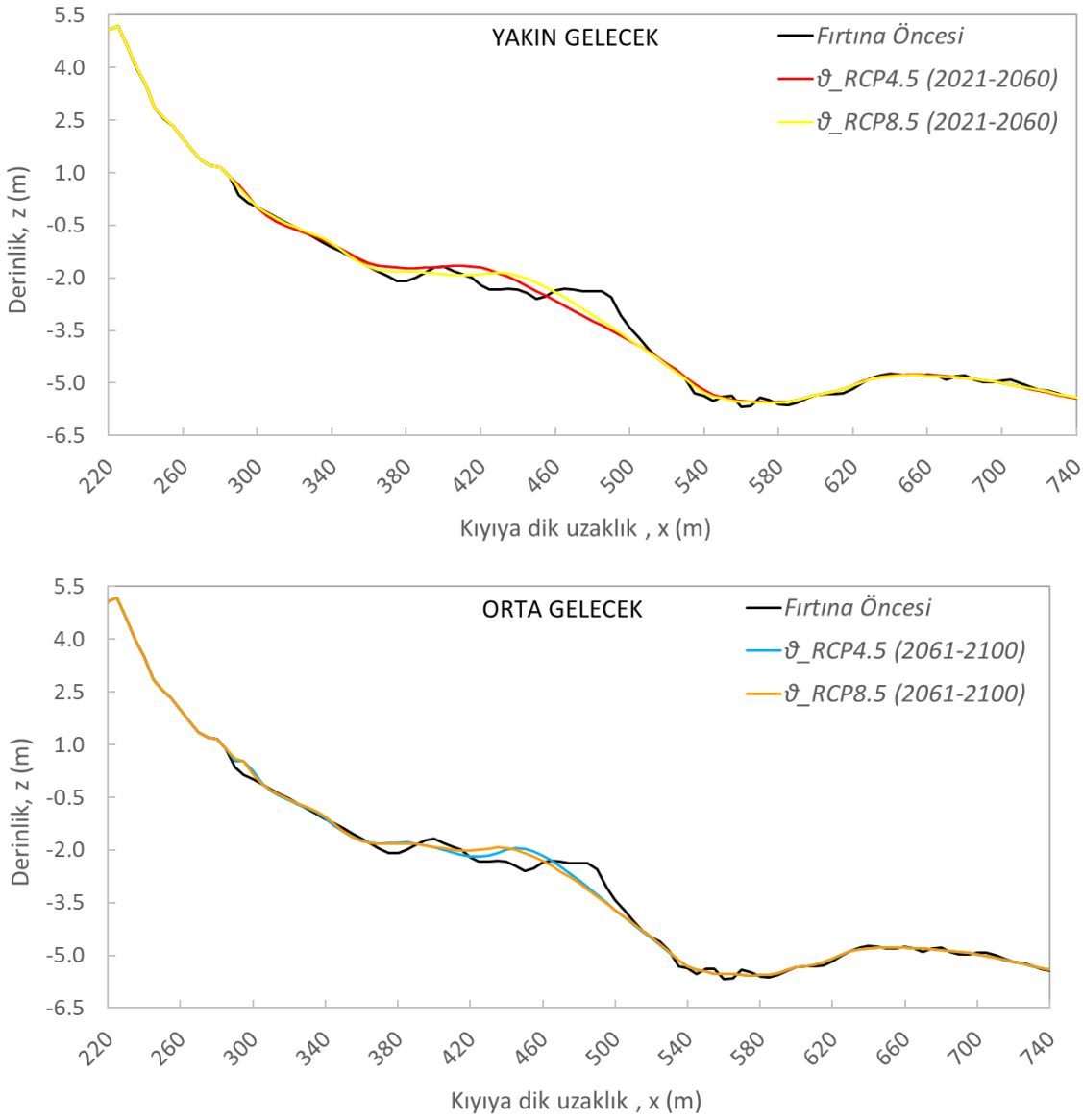
Dalga doğrultusunun P2 profili üzerindeki etkileri incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) dalga doğrultusunda saat yönünde 1.1°'lik sapma meydana gelmiş ve bu durum sonucunda XBeach kalibrasyon modeline göre erozyon ve yığılma miktarlarında sırası ile %3.2 ve %7.8 mertebelerinde artış tespit edilmiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde dalga doğrultusu saat yönünün tersinde 1.5° sapmış olup P2 profili erozyon ve yığılma miktarları sırası ile %1.0 ve %6.0 artış göstermiştir.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) dalga doğrultusunda saat yönünde 2.7° sapma meydana gelmiş olup P2 profilinde meydana gelen erozyon

ve yığılma miktarları fırtına sonrası ölçüm profiline göre sırasıyla %10.8 ve %18.1 oranında artış göstermiştir. Bununla birlikte orta gelecek (2061-2100) döneminde dalga doğrultusu saat yönünde 1.1° sapmış ve bu durum sonucunda P2 profilinde meydana gelen erozyon miktarı yalnızca %3.2 değerinde artarken, yığılma miktarı %7.8 oranında artış göstermiştir. Tablo 4.14'te verilen Erozyon-1 ve Yığılma-1 olarak ifade edilen değerler dalga parametrelerinde hiçbir değişim olmayan durumu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise dalga doğrultusunun iklim senaryolarına göre değiştiği koşulları temsil etmektedir.

Tablo 4.14 İklim senaryolarına göre dalga doğrultusunun P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında			θ saat yönünde 2.7° sapma yaptığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	33.01	+3.2	32.00	35.46	+10.8
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	31.86	+7.8	29.55	34.90	+18.1
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
θ saat yönünün tersinde 1.5° sapma yaptığında			θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	32.33	+1.0	32.00	33.01	+3.2
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	31.32	+6.0	29.55	31.86	+7.8



Şekil 4.15 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde dalga doğrultusunun etkisi

Dalga doğrultusunun profil davranışları üzerindeki etkileri incelendiğinde P1 ve P2 profillerinde meydana gelen en yüksek katı madde taşınım hareketinin RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek (2061-2100) döneminde gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte P1 profilinde dalgalar kıyıya dik geldikçe erozyon ve yığılma miktarının arttığı, dalgaların açılı gelmesi durumunda ise taşınım miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Diğer yandan P2 profilinde dalga kıyıya açılı yaklaştıkça beklenilenin aksine taşınım miktarında artış görülmüş olup bu durumun P2

profilinin surf bölgesinin daha sığ olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum daha detaylı şu şekilde açıklana bilmektedir:

Dalga doğrultusu dalga kırılmasını ve kıyı boyu akıntılarının büyüklüğünü etkileyen önemli bir dalga parametresidir. Van Rijn (2009) çalışmasına göre derin deniz dalga geliş açısı sıfır yani kıyıya dik olmadığında, birbirine ters iki durum söz konusu olmaktadır:

i) Kıyıya açılı gelen dalgalar, sığ surf bölgesinde katı madde taşınım kapasitesinin artması ve daha büyük bir erozyon miktarı ile sonuçlanan kıyı boyu akıntılarını üretmektedir. ii) Kıyıya açılı gelen dalgalar kıyıya yakın bölgede kırılmakta ve bu da dalga yüksekliğinin ve dolayısıyla surf bölgesindeki katı madde taşınım kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. P2 profilinin surf bölgesi P1 profiline göre daha sığ koşullardan oluşmakta olup kıyıya yakın bölgede kum eşiğine sahiptir. Bu durum kıyıya açılı gelen dalgaların bu bölgede kıyı boyu akıntılarını oluşturmasına ve böylelikle beklenilenin aksine daha büyük erozyon miktarı ile karşılaşılmasına sebep olmaktadır.

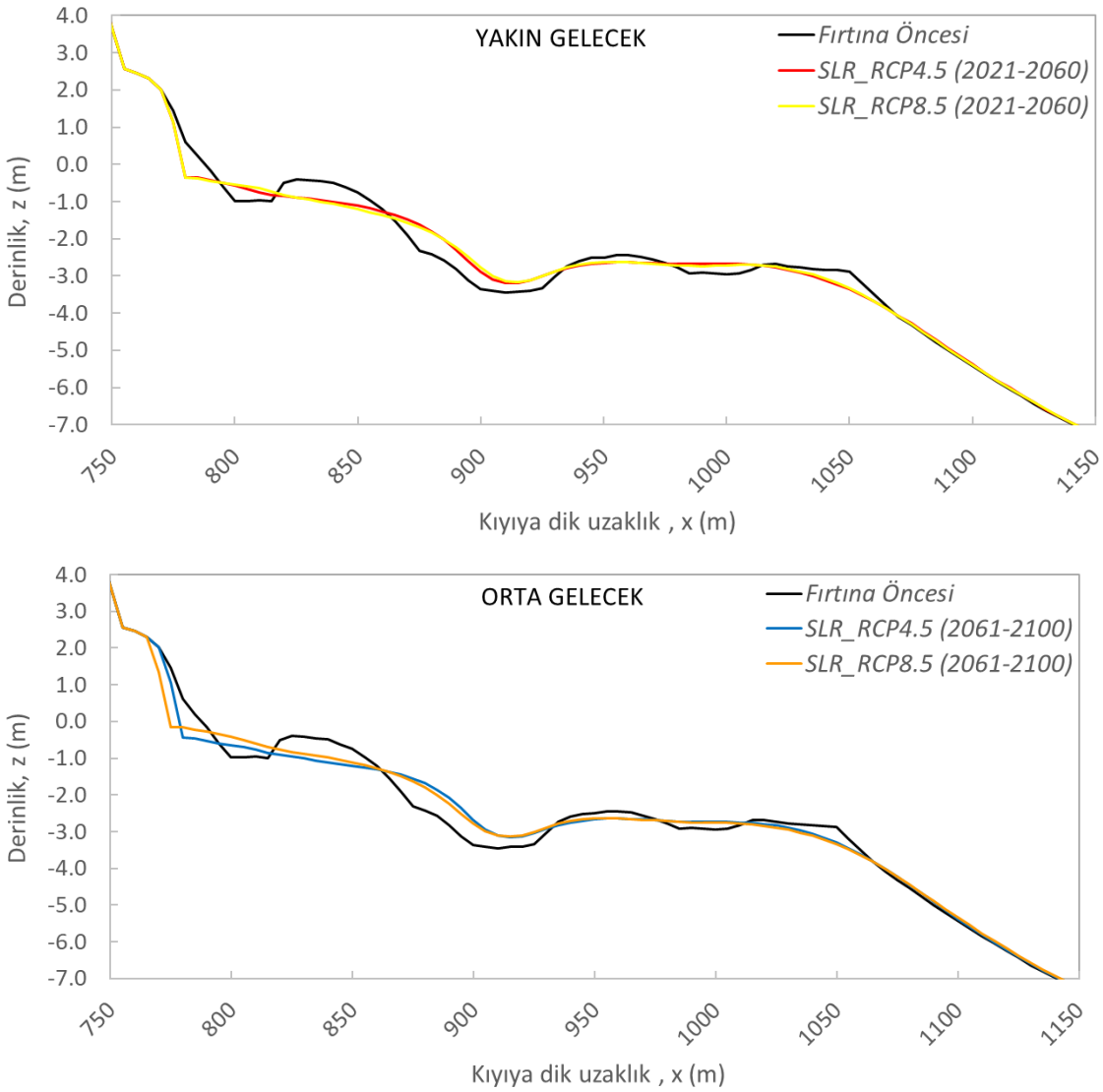
4.5.4 Deniz Seviyesi Yükselmesinin Etkisi

RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneminde deniz seviyesi 0.26 m artış göstermiş olup bunun sonucunda P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %1.2 ve %1.0 değerinde artış göstermiştir. Deniz seviyesi RCP4.5 senaryosunun orta gelecek (2061-2100) döneminde 0.47 m artmış olup bunun sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %9.6 ve %9.5 mertebelerinde artmıştır.

Tablo 4.15 İklim senaryolarına göre deniz seviyesi yükselmesinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Su seviyesi 0.26 m			Su seviyesi 0.30 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	48.07	+1.2	47.50	49.21	+3.6
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	48.46	+1.0	48.00	49.64	+3.4
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Su seviyesi 0.47 m			Su seviyesi 0.63 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	52.08	+9.6	47.50	55.48	+16.8
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	52.58	+9.5	48.00	55.26	+15.1

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneminde deniz seviyesi yüksekliği 0.30 m artış göstermiş olup XBeach kalibrasyon modeline göre P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları sırasıyla %3.6 ve %3.4 değerlerinde artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde ise deniz seviyesi 0.63 m artış göstermiş olup bu durum sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları %16.8 ve %15.1 mertebelerinde artış sergilemiştir. Tablo 4.15'te Erozyon-1 ve Yığılma -1 değerleri deniz seviyesinin sıfır olduğu koşulu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise deniz seviyesinde iklim senaryolarına göre meydana gelen artış koşullarını temsil etmektedir.



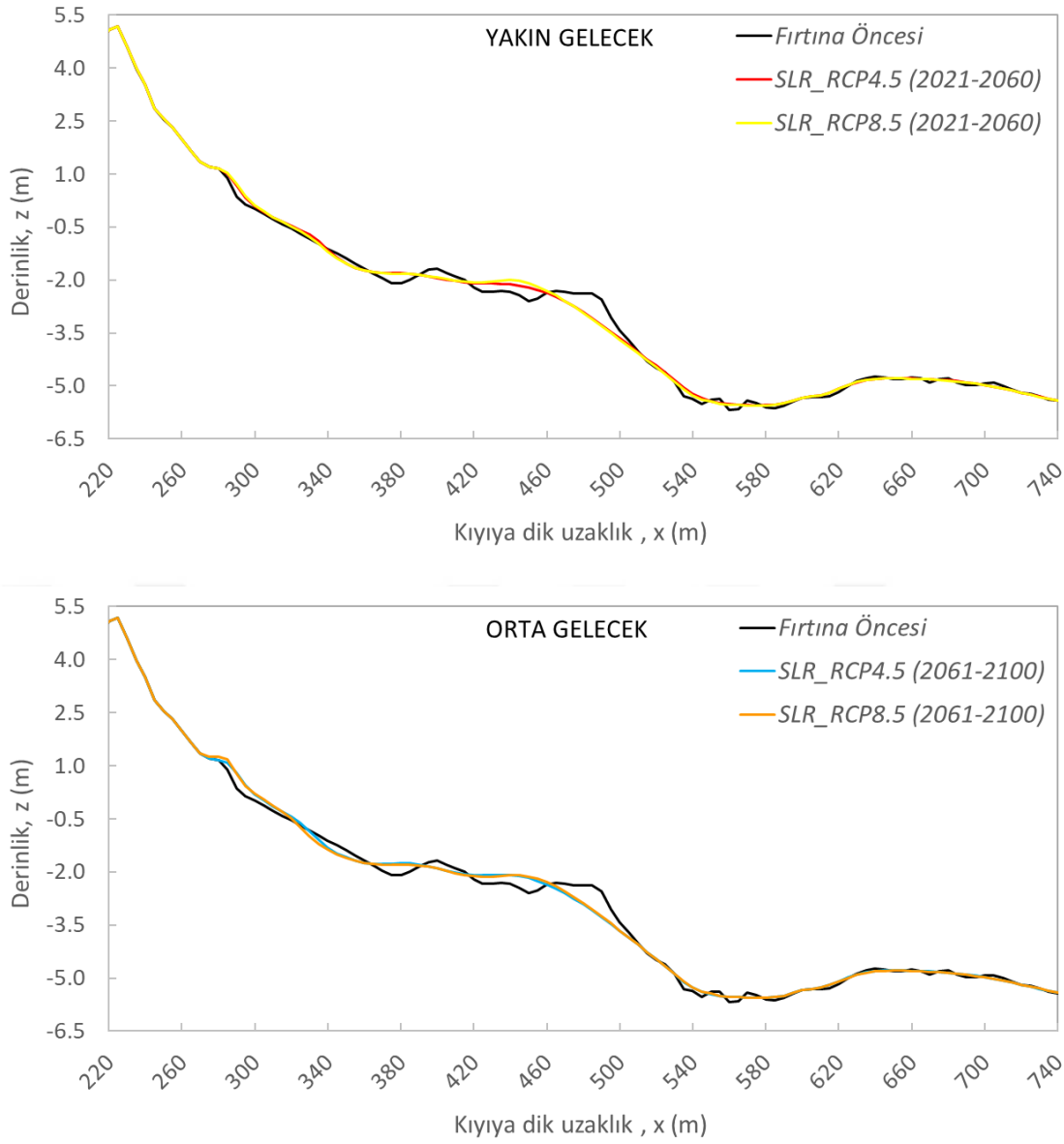
Şekil 4.16 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesinin etkisi

Deniz seviyesinin P2 profili üzerindeki etkileri incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. RCP 4.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) deniz seviyesi 0.26 m artış göstermiş olup bunun sonucunda P2 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %2.5 ve %6.3 değerinde artış göstermiştir. Deniz seviyesi RCP4.5 senaryosunun orta gelecek (2061-2100) döneminde 0.47 m artmış olup bunun sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları XBeach kalibrasyon profiline göre sırasıyla %5.6 ve %13.5 mertebelerinde artmıştır.

RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021-2060) deniz seviyesi yüksekliği 0.30 m artış göstermiş olup XBeach kalibrasyon profiline göre P2 profilinde meydana gelen erozyon miktarı %3.5, yığılma miktarı ise %10.9 oranında artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde ise deniz seviyesi 0.63 m artış göstermiş olup bu durum sonucunda profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları %10.0 ve %15.9 mertebelerinde artış sergilemiştir. Tablo 4.16'da Erozyon-1 ve Yığılma-1 değerleri deniz seviyesinin sıfır olduğu koşulu, Erozyon-2 ve Yığılma-2 değerleri ise deniz seviyesinde iklim senaryolarına göre meydana gelen artış koşullarını temsil etmektedir.

Tablo 4.16 İklim senaryolarına göre deniz seviyesi yükselmesinin P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Su seviyesi 0.26 m			Su seviyesi 0.30 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	32.81	+2.5	32.00	33.12	+3.5
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	31.40	+6.3	29.55	32.78	+10.9
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Su seviyesi 0.47 m			Su seviyesi 0.63 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	33.78	+5.6	32.00	35.19	+10.0
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	33.53	+13.5	29.55	34.25	+15.9



Şekil 4.17 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesinin etkisi

Deniz seviyesi yükselmesi etkisinde en yüksek katı madde taşınım hareketi hem P1 hem de P2 profilinde su seviyesinin maksimum olduğu RCP8.5 iklim senaryosunun orta gelecek (2061-2100) döneminde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde su seviyesi arttıkça profillerde meydana gelen erozyon miktarının artış gösterdiği görülmüştür.

4.5.5 Tüm Parametrelerin Birlikte Etkisi

Her iki profil davranışı üzerinde belirgin dalga yüksekliği, pik dalga periyodu dalga doğrultusu ve deniz seviyesi yükselmesinin etkilerinin ayrı ayrı incelenmesinin yanı sıra tüm etkiler birlikte ele alınarak bu durumun profiller üzerinde yaratacağı etki de gözlenmiştir.

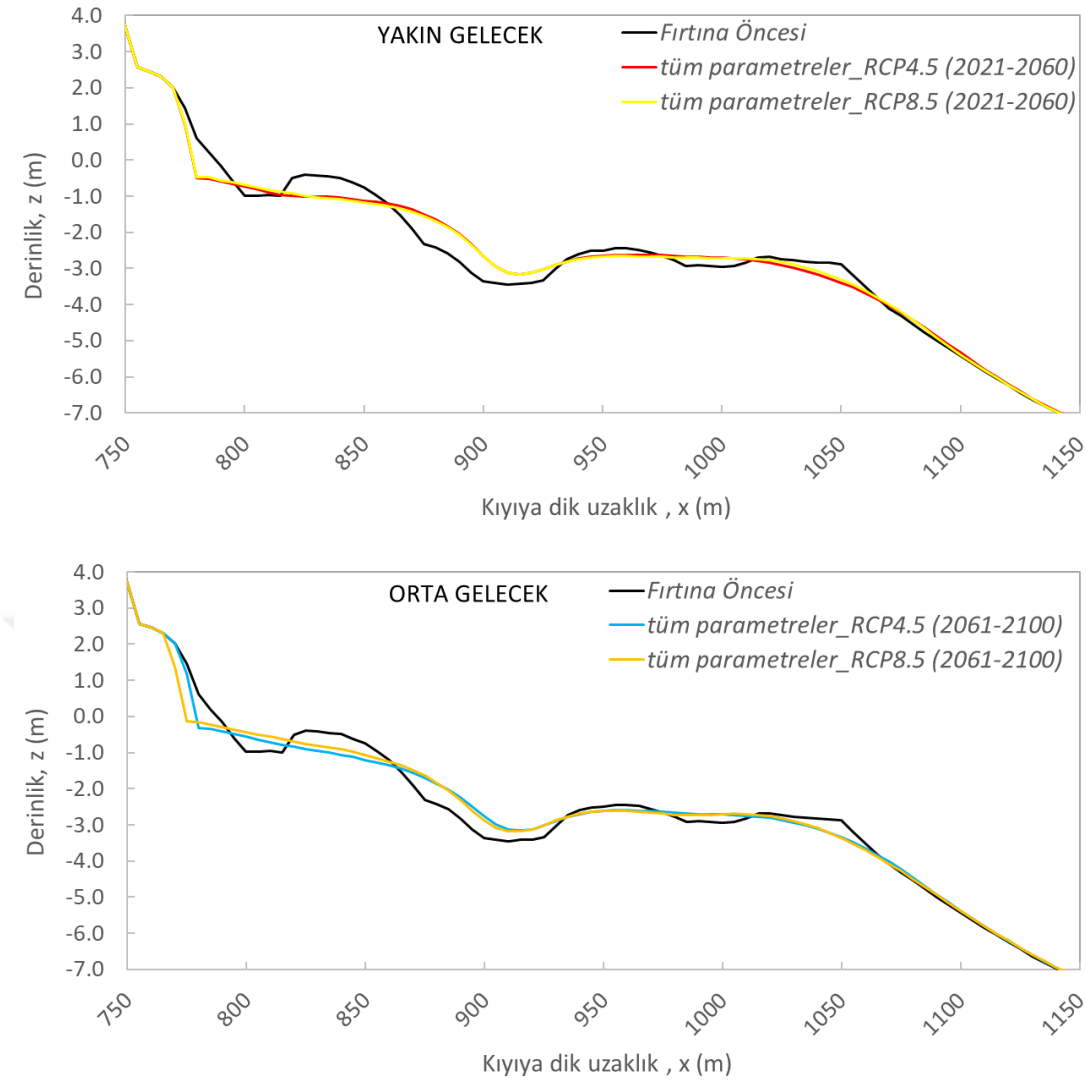
RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde tüm parametrelerin birlikte değişim gösterdiği durumda (belirgin dalga yüksekliğinde %6.5 artış, pik dalga periyodunda %1.1 artış, dalga doğrultusunda saat yönünde 1.1° sapma ve deniz seviyesinde 0.26 m artış) P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarının her ikisi de XBeach kalibrasyon profiline göre % 15.3 oranında artış göstermiştir. RCP4.5 senaryosunun orta gelecek (2021-2060) döneminde ise tüm parametrelerin birlikte değişim göstermesi ile (belirgin dalga yüksekliğinde %2.6 azalma, pik dalga periyodunda %1.6 azalması, dalga doğrultusunda saat yönünün tersinde 1.5° sapma ve deniz seviyesinde 0.47 m artış) P1 profilinde meydana gelen erozyon miktarı XBeach kalibrasyon modeline göre %0.1 oranında azalırken, yığılma miktarı ise %0.3 oranında artış göstermiştir.

RCP 8.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde tüm parametrelerin birlikte değişim gösterdiği durumda (belirgin dalga yüksekliğinde %1.1 artış, pik dalga periyodunda %0.4 artış, dalga doğrultusunda saat yönünde 2.7° sapma ve deniz seviyesinde 0.30 m artış) P1 profilinde meydana gelen erozyon miktarı XBeach kalibrasyon profiline göre %9.2, yığılma miktarı ise %9.3 oranında artış göstermiştir. RCP 8.5 iklim senaryosunun orta gelecek (2021-2060) döneminde ise tüm parametrelerin birlikte değişim göstermesi ile (belirgin dalga yüksekliğinde %1.6 azalma, pik dalga periyodunda %1.7 azalması, dalga doğrultusunda saat yönününde 1.1° sapma ve deniz seviyesinde 0.63 m artış) P1 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarının her ikisi de XBeach kalibrasyon modeline göre %4.5 oranında artış göstermiştir.

Tablo 4.17 İklim senaryolarına göre tüm parametrelerin etkisinde P1 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Hs %6.5 arttığında T_p %2.2 arttığında θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında Su seviyesi 0.26 m			Hs %1.1 arttığında T_p %0.4 arttığında θ saat yönünde 2.7° sapma yaptığında Su seviyesi 0.30 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	54.78	+15.3	47.50	51.86	+9.2
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	55.36	+15.3	48.00	52.47	+9.3
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Hs %2.6 azaldığında T_p %0.9 azaldığında θ saat yönü tersinde 1.5° sapma yaptığında Su seviyesi 0.47 m			Hs %1.6 azaldığında T_p %1.7 azaldığında arttığında θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında Su seviyesi 0.63 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
47.50	47.46	-0.1	47.50	49.65	+4.5
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
48.00	48.13	+0.3	48.00	50.18	+4.5

Bu sonuçlardan yola çıkıldığında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının yakın gelecek (2021-2060) dönemlerinde dalga iklimi parametrelerindeki artışın yanı sıra deniz seviyesinde meydana gelen yükselme sonucunda erozyon ve yığılma miktarlarında ciddi boyutta artış tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının orta gelecek (2061-2100) dönemlerinde dalga parametrelerinde meydana gelen azalmalar ile erozyon ve yığılma miktarlarında da azalma beklenirken, deniz seviyesindeki yükselmeler durumu dengelemiş ve erozyon ve yığılma miktarları hiçbir parametrenin değişmediği duruma çok yakın bulunmuştur. RCP8.5 iklim senaryosundaki 0.63 m'lik artış, dalga yüksekliği ve periyot etkisi ile taşınım miktarlarında beklenen azalmayı durdurmakla kalmamış, daha çok taşınım meydana gelmesine sebep olmuştur.



Şekil 4.18 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P1 morfolojisi üzerinde tüm parametrelerin birlikte etkisi

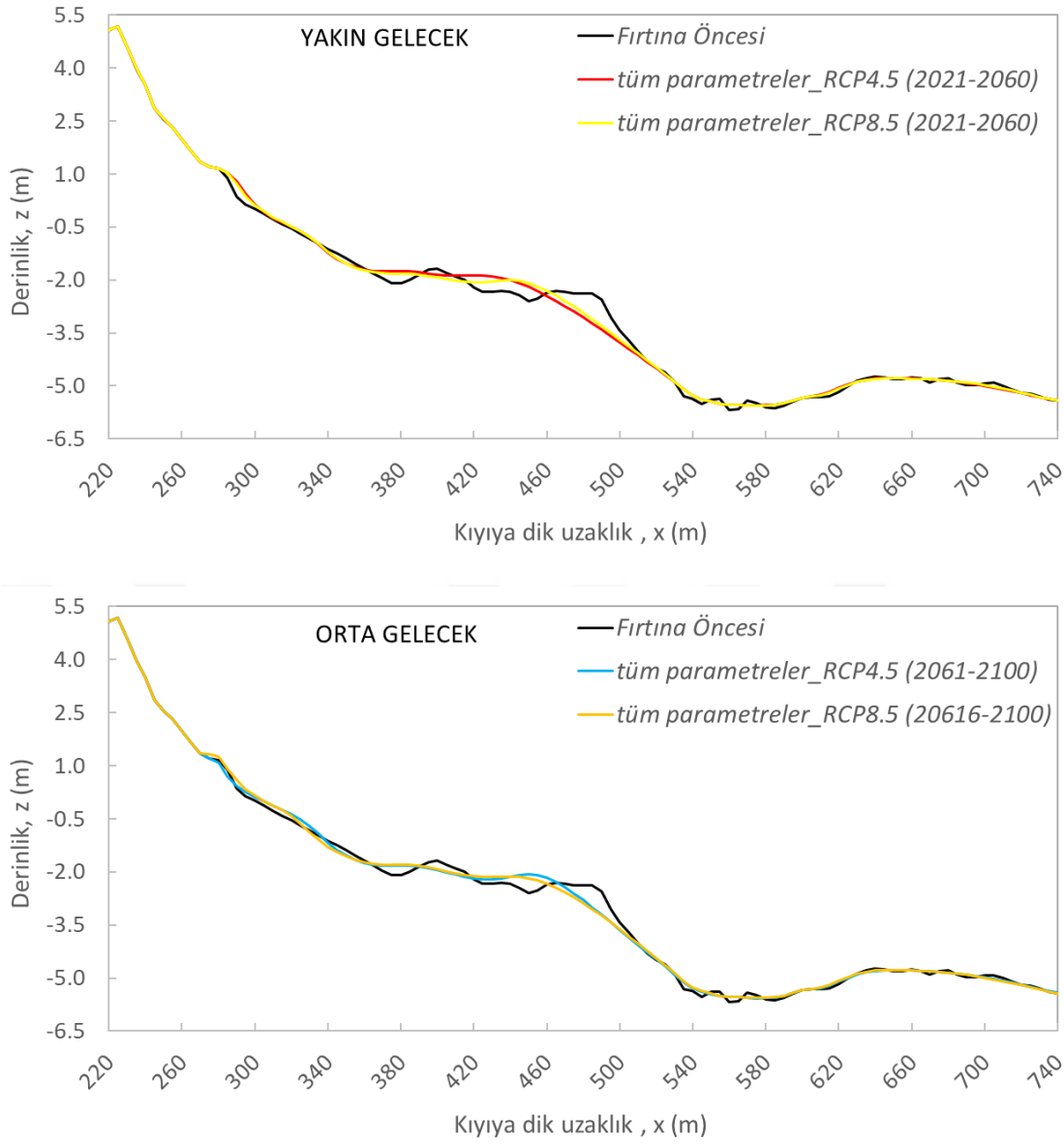
RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde tüm parametrelerin birlikte değişim gösterdiği durumda (belirgin dalga yüksekliğinde %6.5 artış, pik dalga periyodunda %1.1 artış, dalga doğrultusunda saat yönünde 1.1° sapma ve deniz seviyesinde 0.26 m artış) P2 profilinde meydana gelen erozyon miktarı %23.7 oranında artış gösterirken, yığılma miktarında ise %27.0 oranında artmıştır. RCP4.5 senaryosunun orta gelecek (2021-2060) döneminde ise tüm parametrelerin birlikte değişim göstermesi ile (belirgin dalga yüksekliğinde %2.6 azalma, pik dalga periyodunda %1.6 azalması, dalga doğrultusunda saat yönünün tersinde 1.5° sapma ve deniz seviyesinde 0.47 m artış) P2 profilinde meydana

gelen erozyon miktarı XBeach kalibrasyon profiline göre %4.3 oranında azalırken, yığılma miktarı ise %0.7 oranında azalmıştır.

RCP 8.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde tüm parametrelerin birlikte değişim gösterdiği durumda (belirgin dalga yüksekliğinde %1.1 artış, pik dalga periyodunda %0.4 artış, dalga doğrultusunda saat yönünde 2.7° sapma ve deniz seviyesinde 0.30 m artış) P2 profilinde meydana gelen erozyon miktarı XBeach kalibrasyon profiline göre %18.2, yığılma miktarı ise %19.9 oranında artış göstermiştir. RCP 8.5 iklim senaryosunun orta gelecek (2021-2060) döneminde ise tüm parametrelerin birlikte değişim göstermesi ile (belirgin dalga yüksekliğinde %1.6 azalma, pik dalga periyodunda %1.7 azalması, dalga doğrultusunda saat yönününde 1.1° sapma ve deniz seviyesinde 0.63 m artış) P2 profilinde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarında sırasıyla %3.0 ve %7.4 oranında artış tespit edilmiştir.

Tablo 4.18 İklim senaryolarına göre tüm parametrelerin etkisinde P2 profili morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Hs %6.5 arttığında T_p %2.2 arttığında θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında Su seviyesi 0.26 m			Hs %1.1 arttığında T_p %0.4 arttığında θ saat yönünde 2.7° sapma yaptığında Su seviyesi 0.30 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	39.57	+23.7	32.00	37.81	+18.2
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	37.52	+27.0	29.55	35.42	+19.9
ORTA GELECEK (2061-2100)					
RCP4.5			**RCP8.5**		
Hs %2.6 azaldığında T_p %0.9 azaldığında θ saat yönü tersinde 1.5° sapma yaptığında Su seviyesi 0.47 m			Hs %1.6 azaldığında T_p %1.7 azaldığında arttığında θ saat yönünde 1.1° sapma yaptığında Su seviyesi 0.63 m		
Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi	Erozyon-1	Erozyon-2	% Değişimi
32.00	30.62	-4.3	32.00	32.97	+3.0
Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi	Yığılma-1	Yığılma-2	% Değişimi
29.55	29.34	-0.7	29.55	31.74	+7.4



Şekil 4.19 RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre P2 morfolojisi üzerinde tüm parametrelerin birlikte etkisi

Profil davranışları ve morfoloji değişimleri üzerinde tüm parametrelerin etkileri yüzde cinsinden Tablo 4.19 ve Tablo 4.20'de özetlenmiştir. Tablo 4.19'a göre, P1 profilinde RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin pik dalga periyodu olduğu, orta gelecek (2061-2100) döneminde ise deniz seviyesi yükselmesi olduğu görülmüştür. RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin dalga doğrultusu, orta gelecek (2061-2100) döneminde ise deniz seviyesi yükselmesi ile birlikte dalga doğrultusunun

etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte her iki senaryonun yakın gelecek döneminde tüm parametrelerin değiştiği koşul da büyük miktarda erozyon ve yığılmaya sebep olmuştur.

Tablo 4.19 P1 profilinin iklim senaryolarına göre morfoloji değişimi değerleri

YAKIN GELECEK (2021-2060)											
Senaryolar		RCP4.5					RCP8.5				
Parametreler		H_s	T_p	θ	SLR	Tüm	H_s	T_p	θ	SLR	Tüm
Erozyon	%	+17.1	+23.9	+10.7	+1.2	+15.3	+5.0	+9.8	+29.8	+3.6	+9.2
Yığılma	%	+16.5	+23.3	+10.8	+1.0	+15.3	+5.0	+9.0	+29.5	+3.4	+9.3
ORTA GELECEK (2021-2060)											
Senaryolar		RCP4.5					RCP8.5				
Parametreler		H_s	T_p	θ	SLR	Tüm	H_s	T_p	θ	SLR	Tüm
Erozyon	%	-8.4	-3.4	-0.6	+9.6	-0.1	-5.7	-6.7	+10.7	+16.8	+4.5
Yığılma	%	-8.2	-3.6	-0.5	+9.5	+0.3	-5.6	-6.7	+10.8	+15.1	+4.5

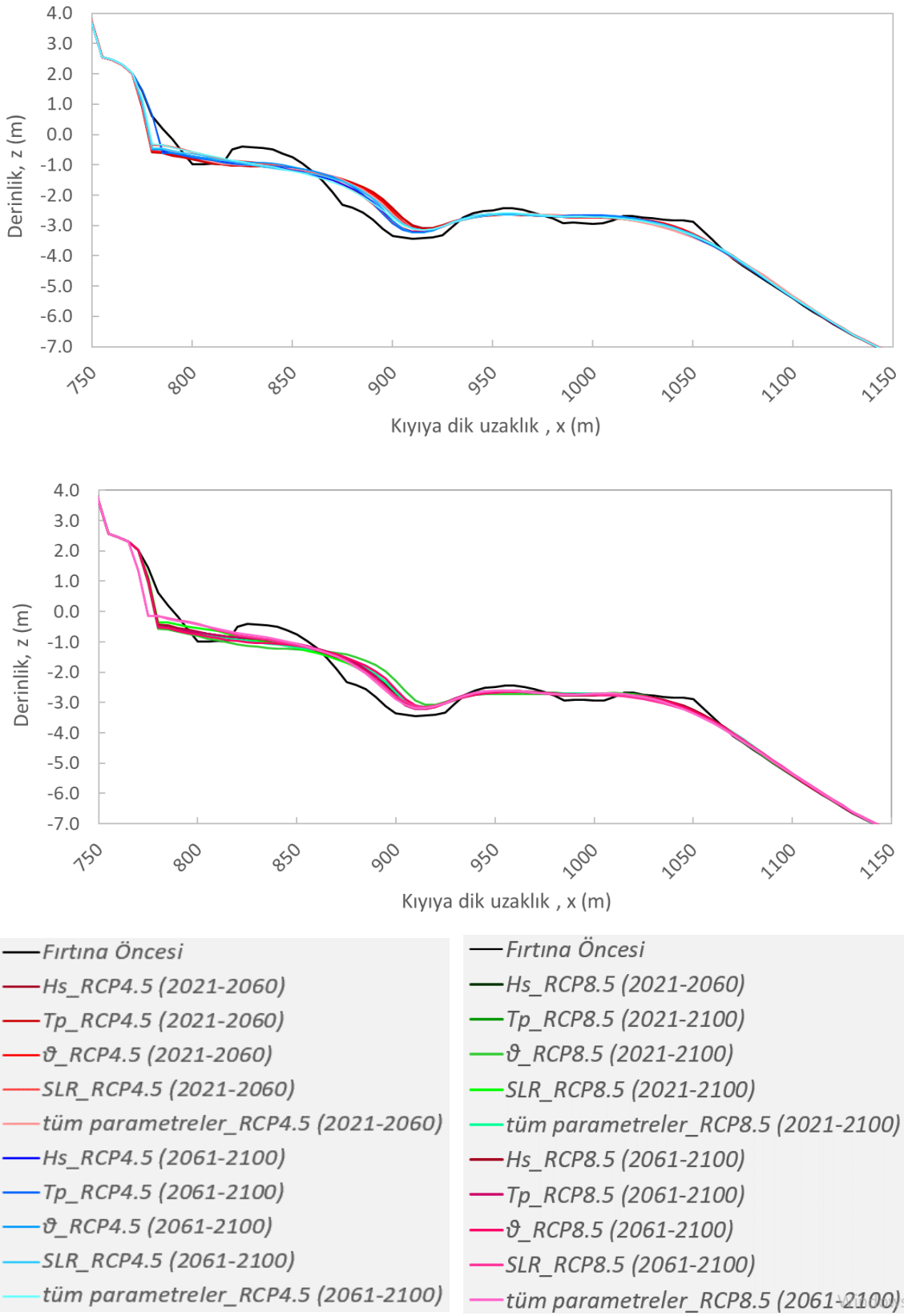
P2 profilinde RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek (2021-2060) döneminde profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin dalga periyodu, orta gelecek (2061-2100) döneminde ise deniz seviyesi yükselmesi olduğu görülmüştür. RCP8.5 senaryosunda profil davranışı üzerinde yakın gelecek (2021-2060) dönemi için en etkili parametre dalga periyodu ile birlikte dalga doğrultusu iken orta gelecek (2061-2100) döneminde profil en etkili parametrenin deniz seviyesi yükselmesi olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte her iki senaryonun yakın gelecek dönemlerinde tüm parametrelerin değiştiği durumda da profil davranışı önemli boyutta farklılık göstermektedir.

Tablo 4.20 P2 profilinin iklim senaryolarına göre morfoloji değişimi değerleri

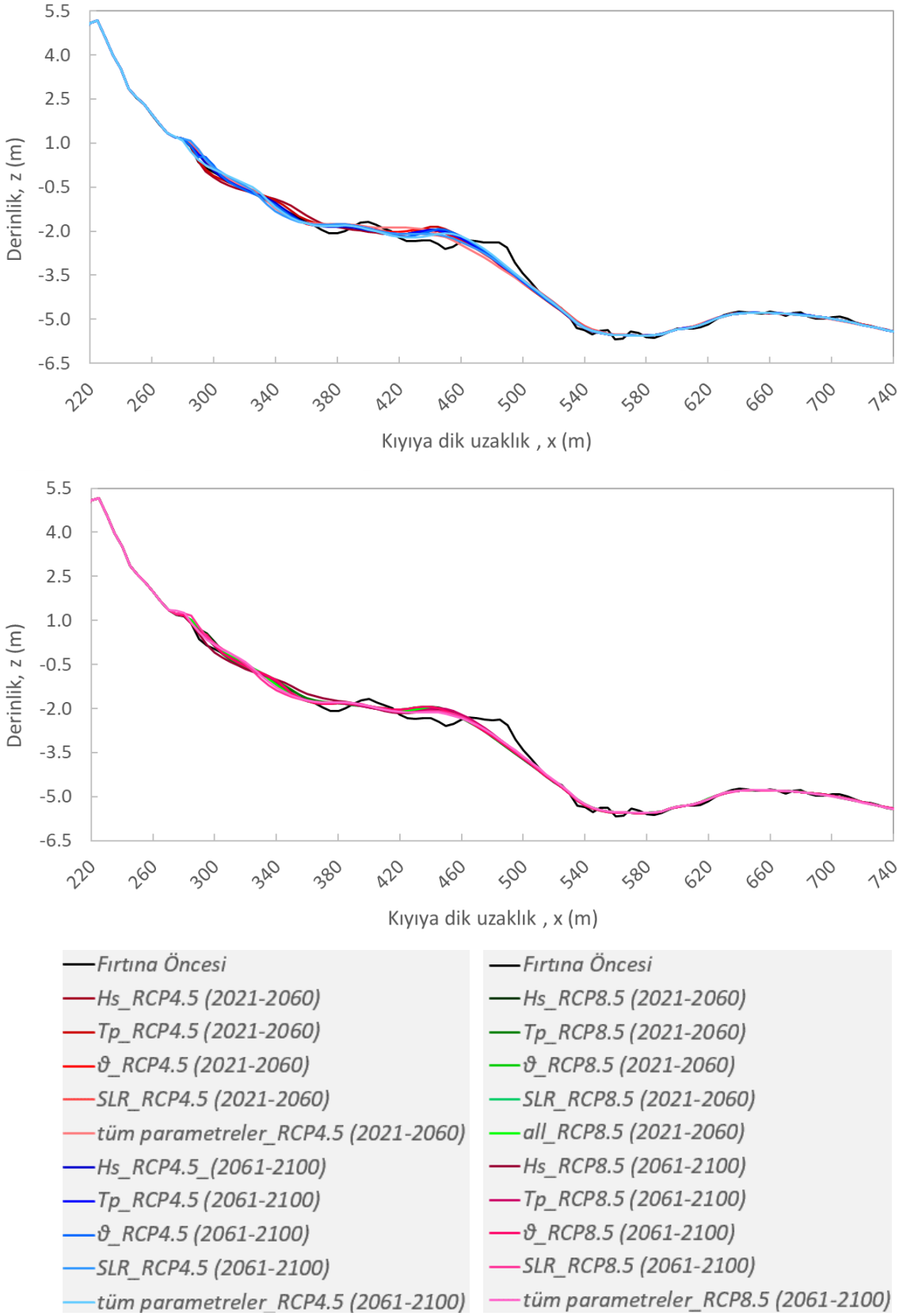
YAKIN GELECEK (2021-2060)											
Senaryolar		RCP4.5					RCP8.5				
Parametreler		H_s	T_p	θ	SLR	Tüm	H_s	T_p	θ	SLR	Tüm
Erozyon	%	+18.7	+14.4	+3.2	+2.5	+23.7	+8.7	+21.4	+10.8	+3.5	+18.2
Yığılma	%	+19.9	+18.7	+7.8	+6.3	+27.0	+16.6	+14.6	+18.1	+10.9	+19.9
ORTA GELECEK (2021-2060)											
Senaryolar		RCP4.5					RCP8.5				
Parametreler		H_s	T_p	θ	SLR	Tüm	H_s	T_p	θ	SLR	Tüm
Erozyon	%	-0.6	-0.4	+1.0	+5.6	-4.3	+2.4	-3.5	+3.2	+10.0	+3.0
Yığılma	%	+5.7	+7.8	+6.0	+13.5	-0.7	+10.1	+1.4	+7.8	+15.9	+7.4

Profillerde meydana gelen taşınım miktarları iklim senaryolarına göre incelendiğinde şu sonuçlar bulunmuştur. Her iki profil için dalga yüksekliği etkisinde RCP4.5 senaryosununun yakın gelecek döneminde RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek dönemine göre daha büyük taşınım miktarı tespit edilirken, orta gelecek döneminde RCP4.5 senaryosundaki taşınım miktarları RCP8.5 senaryosundan daha az bulunmuştur. Dalga periyodu etkisinde her iki profilde RCP4.5 iklim senaryolarında (yakın ve orta gelecek) RCP8.5 senaryolarına göre daha büyük taşınım miktarları meydana gelmiştir. Dalga doğrultusu etkilerindeki taşınım miktarları incelendiğinde ise RCP4.5 senaryolarında meydana gelen taşınım miktarları RCP8.5 senaryosundakilerden daha küçük bulunmuştur. Deniz seviyesi yükselmesi durumlarında RCP8.5 iklim senaryolarında daha yüksek su seviyesi olması sebebi ile RCP4.5 senaryolarına göre daha büyük katı madde taşınım miktarı meydana geldiği tespit edilmiştir. Tüm parametrelerin birlikte değiştiği durumda ise profiller dalga yüksekliği etkisindeki sonuçlar ile benzer sonuçlar sergileyerek yakın gelecekte RCP4.5 senaryosunda, orta gelecekte ise RCP8.5 senaryosunda daha büyük taşınım miktarları görülmüştür.

Bununla birlikte tüm koşullarda profillerde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları neredeyse birbirine eşit değerde olup profillerin denge durumunda olduğu sonucuna varılmıştır. Yakın gelecek (2021-2060) dönemi ve orta gelecek (2061-2100) dönemleri kendi içerisinde karşılaştırıldığında, deniz seviyesi yükselmesi durumu hariç tüm koşullarda yakın gelecekte orta geleceğe göre daha çok katı madde taşınım hareketinin meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebi dalga iklimi parametrelerinde yakın gelecekte orta geleceğe oranla daha belirgin artışların mevcut olmasıdır. Deniz seviyesi yükselmesi durumunda ise orta gelecekte her zaman daha yüksek su seviyeleri olması sebebi ile bu dönemlerde daha büyük erozyon ve yığılma miktarları ile karşılaşılmıştır.



Şekil 4.20 P1 profilinde RCP4.5 ve RCP8.5 etkisi



Şekil 4.21 P2 profilinde RCP4.5 ve RCP8.5 etkisi

Tüm sonuçlar göz önüne alındığında P1 profilinde meydana gelen katı madde taşınım miktarları P2 profiline kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bu da P1 profil bölgesindeki morfolojik değişimlerin daha aktif olduğunun bir göstergesidir. Her iki profil arasında tespit edilen bu farklılıkların sebebi her iki profilde değişim gösteren ve Bölüm 4.2'de anlatılan hidrodinamik ve morfolojik koşullardır.

4.6 Kıyı Profili Gelişiminde İklim Değişikliği Etkilerinin Hassasiyet Analizi

Kıyıya dik katı madde taşınım süreci üzerinde dalga iklimi parametreleri ve deniz seviyesi yükselmesinin etkilerini daha net biçimde ortaya koyabilmek adına hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizleri ile kıyıya dik morfoloji üzerinde belirgin farklar meydana getirecek koşulların araştırılması amaçlanmıştır. Ancak bu çalışmanın yapılması kadar gerçekleştirilecek çalışmanın hangi eşik değerleri baz alacağı da oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple dalga iklimi parametrelerinin değişimlerine geçmeden dalga parametrelerine (özellikle dalga yüksekliğine) temel oluşturacak eşik değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kıyıya dik katı madde taşınımı üzerinde en etkili süreçlerden olan fırtına olayı tanımından yola çıkılmıştır.

Fırtınalar, belirli bir seviyenin üzerindeki belirgin dalga yüksekliğine ait zaman serilerinin yüksek yoğunluklu olan iklim olayları olarak kabul edilmektedir (Petruaskas ve Aagaard, 1971; Angelides vd., 1981). Fırtınalar, kıyılardaki erozyon ve yığılma modellerini etkileyerek kıyıların gelişimini belirleyen olaylardan biri olup, kıyılarda katı madde kaybına, kıyı yapılarının kısmen veya tamamen tahrip olmasına neden olabilmekte ve hatta insan yaşamını tehdit edebilmektedir. Bu sebeple, hangi fırtınaların geçici olmasına rağmen önemli ölçüde morfolojik değişikliklere sebep olduğunu, hangilerinin ise tehlikeli olarak kabul edilip felaketle sonuçlanabileceğini anlamak oldukça önemlidir. Bu durum da, kıyı morfolojisi üzerinde etkili olan fırtına etkisi için bir dizi kritik eşik değerin belirlenmesini gerektirmektedir (Trifonova vd., 2012). Farklı çalışmalara göre tanımlanan fırtına eşik kriterleri Tablo 4.21 ile ifade edilmiştir.

Tablo 4.21 Literatür araştırmalarına göre fırtına eşik değerleri

Çalışma	H_m eşik değeri	Min fırtına süresi	Rüzgar hızı
Rusu vd. (2018)	5.00 m	12 saat	-
Rio vd. (2012)	3.30 m	30 saat	9 m/s
Angnuureng vd. (2017)	3.68 m	12 saat	-
Lopataukhin ve Boukhanovsky (2009)	5.00 m	18 saat	-

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından verilen Beaufort ölçeğinde, rüzgarda fırtına başlangıcı için denizin kabarmaya başlayacağı ve yaklaşık dalga yüksekliğinin 4 m olacağı belirtilmektedir (MGM, 2022). Meteoroloji Genel Müdürlüğü Beaufort Skalasına göre "Kuvvetli Rüzgar"lar etkin olduktan sonra yaklaşık 4 m dalga yüksekliği ile kıyı morfolojisinin uyarılmaya başladığı ve katı madde taşınım sürecinin aktif hale geldiği düşünülmektedir (Tablo 4.22).

Tablo 4.22 Beaufort (Bofor) skalasına göre önemli fırtına kategorileri (MGM, 2022)

Bofor	Rüzgarın Tanımı	Rüzgarın Yaptığı Etki		~Dalga Yüksekliği (m)	Rüzgar Hız Sınırları (m/s)
		Denizde	Kıyıda		
6	Kuvvetli Rüzgar	Büyük dalgalar oluşmaya başlar, dalga tepelerinin köpükleri etrafı daha fazla kaplar. Biraz serpinti olabilir.	Yelkenliler yelkenlerini kapatırlar. Avlanırken çok dikkat edilmelidir.	3	10.8-13.8
7	Fırtınamsı Rüzgar	Deniz kabarmaya başlar. Kırılan dalgaların köpükleri rüzgâr yönü boyunca savrulur.	Yelkenliler limanda kalırlar. Denizde olanlar hareket edemezler.	4	13.9-17.1
8	Fırtına	Uzun boylu, oldukça yüksek dalgalar, dalga tepelerinin kenarları rüzgâr tarafından kırılır, köpükler rüzgâr yönü boyunca savrulur.	Yakında olan tekneler limana çekilirler.	5.5	17.2-20.7

Beaufort (Bofor) Skalası verileri ve literatür araştırmaları bir araya getirildiğinde, Karasu Bölgesi'ne ait fırtına eşik değerleri için aşağıdaki değerler uygun görülmüştür.

- Minimum belirgin dalga yüksekliği H_s=3.5 m
- Minimum fırtına süresi 12 saat

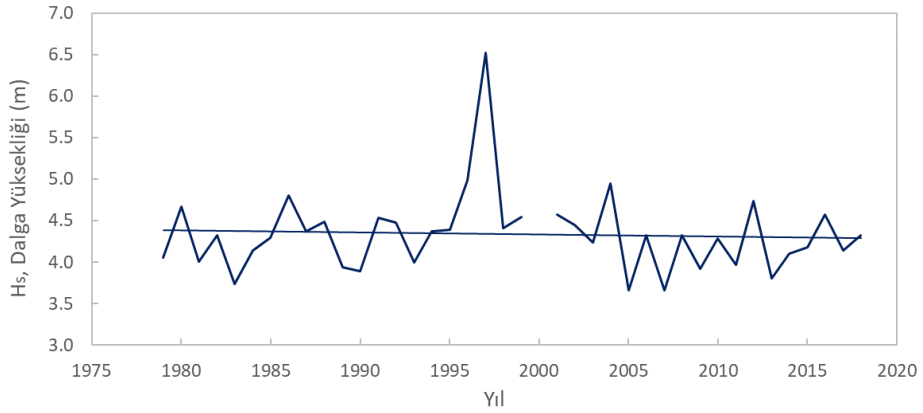
Belirlenen eşik değerler doğrultusunda yüksekliği minimum 3.5 m olan dalgalardan kıyıya kesintisiz olarak minimum 12 saat boyunca gelmesi durumu Karasu Bölgesi için fırtına olayı olarak adlandırılmıştır. Bu doğrultuda, bölgede son 40 yıl içerisinde (1979-2018) meydana gelen fırtınaların analizi gerçekleştirilmiş olup, fırtına ortalama dalga yükseklikleri, fırtına pik dalga periyotları, fırtına süreleri ve adetleri tespit edilmiştir. 1979-2018 yılları arasındaki her yıl için fırtına karakteristikleri Tablo 4.23 ile özetlenmiştir.

Tablo 4.23 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık fırtına karakteristikleri

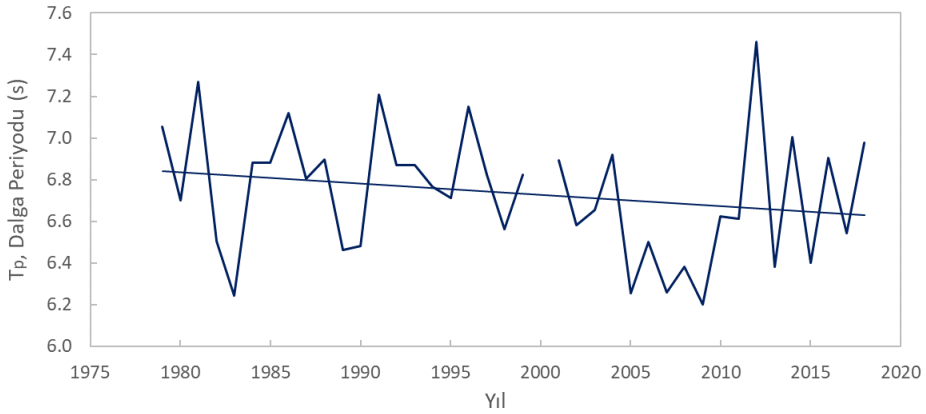
Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet	Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet
1979	165	4.05	7.05	6	1999	78	4.55	6.82	3
1980	38	4.67	6.70	1	2000	-	-	-	0
1981	69	4.01	7.27	4	2001	130	4.57	6.89	4
1982	70	4.33	6.50	3	2002	76	4.45	6.58	3
1983	76	3.74	6.24	5	2003	129	4.23	6.66	5
1984	20	4.14	6.88	1	2004	135	4.95	6.92	3
1985	21	4.29	6.88	1	2005	28	3.66	6.25	2
1986	25	4.80	7.12	1	2006	182	4.32	6.50	6
1987	129	4.37	6.80	5	2007	13	3.66	6.26	1
1988	105	4.49	6.90	4	2008	40	4.33	6.38	2
1989	37	3.94	6.46	2	2009	39	3.92	6.20	3
1990	12	3.89	6.48	1	2010	118	4.28	6.62	5
1991	118	4.53	7.21	5	2011	72	3.97	6.61	3
1992	22	4.48	6.87	1	2012	78	4.74	7.46	3
1993	107	3.99	6.87	4	2013	27	3.80	6.38	1
1994	114	4.37	6.76	4	2014	86	4.10	7.00	5
1995	66	4.39	6.71	2	2015	80	4.18	6.40	4
1996	53	4.99	7.15	1	2016	128	4.58	6.90	6
1997	100	6.52	6.82	4	2017	33	4.14	6.54	2
1998	52	4.41	6.56	1	2018	77	4.33	6.98	3

Yıllara göre 3.5 m üzerinde dalga yüksekliklerinin (fırtına dalgalarının) oluşma sürelerinde 2000'li yıllar ile artışlar meydana geldiği görülmüştür. 2000 yılına kadar 3.5 m'nin üzerinde belirgin dalga yüksekliği şartları yılda ortalama ~70 saat

oluşmakta iken, bu değer 2001 yılı itibari ile 2018 yılı sonuna kadar yılda ortalama ~80 saate çıkmaktadır. 40 yıl sonunda belirgin dalga yüksekliklerinde %2.3 oranında azalma görülürken, yıllık fırtına pik dalga periyotlarında yaklaşık %3.1 düşüş olduğu görülmüştür. 40 yıllık analiz süresi için fırtına karakteristiklerinin eğilimleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 ile özetlenmiştir.



Şekil 4.22 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık ortalama fırtına belirgin dalga yüksekliği değişimleri



Şekil 4.23 Karasu Bölgesi (1979-2018) yıllık ortalama fırtına pik dalga periyodu değişimleri

Son 40 yıllık (1979-2018) fırtına analizinin yanı sıra Karasu Bölgesi'nde iklim senaryolarına göre gelecekte meydana gelebilecek fırtınalar için de bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda (2021-2100) yılları için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına ait dalga verileri belirlenen fırtına eşik değerlerine göre analiz edilmiştir. Gelecek 80 yıllık dönem için gerçekleştirilen fırtına analizi sonuçları (fırtına sayıları ve fırtına karakteristikleri) RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları için sırasıyla Tablo 4.24 ve Tablo 4.25'te özetlenmiştir.

Tablo 4.24 Karasu Bölgesi RCP4.5 (2021-2100) yıllık fırtına karakteristikleri

Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet	Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet
2021	15	3.97	9.18	1	2061	89	4.36	10.31	4
2022	27	3.99	9.55	2	2062	26	4.22	10.35	2
2023	75	4.32	9.98	2	2063	48	4.55	9.96	2
2024	30	4.15	9.88	2	2064	168	4.35	10.12	6
2025	41	3.97	9.17	2	2065	120	4.50	10.30	4
2026	153	3.96	9.83	5	2066	75	4.27	9.62	5
2027	82	4.16	9.83	4	2067	71	4.04	9.60	3
2028	46	4.22	9.38	2	2068	64	5.11	10.31	2
2029	69	4.18	9.96	3	2069	61	3.95	9.54	4
2030	71	4.35	9.33	3	2070	14	3.99	9.28	1
2031	124	4.11	9.66	5	2071	56	4.56	9.53	2
2032	138	4.17	10.05	6	2072	73	4.33	10.85	2
2033	76	3.96	9.49	3	2073	74	4.32	9.92	4
2034	58	4.22	9.42	4	2074	67	4.29	9.77	3
2035	86	4.48	10.35	4	2075	151	4.38	9.98	5
2036	70	4.05	9.51	2	2076	122	4.22	9.31	3
2037	73	4.24	9.72	4	2077	14	3.884	9.63	1
2038	72	4.66	10.26	2	2078	18	3.82	9.38	1
2039	44	4.29	9.40	2	2079	67	4.21	9.69	4
2040	20	4.08	10.82	1	2080	40	3.75	8.85	3
2041	47	4.27	9.45	3	2081	105	4.29	10.12	4
2042	144	4.63	10.29	5	2082	142	4.25	9.71	8
2043	62	4.49	9.97	3	2083	149	4.37	10.18	6
2044	17	3.70	9.41	1	2084	73	4.16	9.15	2
2045	133	4.57	9.89	5	2085	23	3.88	8.89	1
2046	197	4.40	9.95	7	2086	54	4.16	10.27	3
2047	65	4.79	10.55	4	2087	57	4.10	9.62	3
2048	108	4.15	9.76	6	2088	50	4.17	10.13	3
2049	12	4.38	9.47	1	2089	89	4.30	10.33	4
2050	235	4.46	10.23	6	2090	49	4.76	10.50	3
2051	109	3.98	9.22	3	2091	79	4.59	9.68	2
2052	49	4.17	10.02	3	2092	117	4.11	9.68	3
2053	108	4.44	10.23	5	2093	63	4.01	9.43	2
2054	69	4.18	9.12	3	2094	64	4.23	9.13	3
2055	77	3.95	9.41	4	2095	14	3.80	8.79	1
2056	102	3.99	9.57	6	2096	136	4.49	9.92	5
2057	31	4.11	9.83	2	2097	131	4.17	9.43	4
2058	41	4.04	10.13	3	2098	61	4.36	10.35	2
2059	-	-	-	0	2099	23	4.20	9.25	1
2060	104	4.13	9.50	5	2100	118	4.02	9.28	4

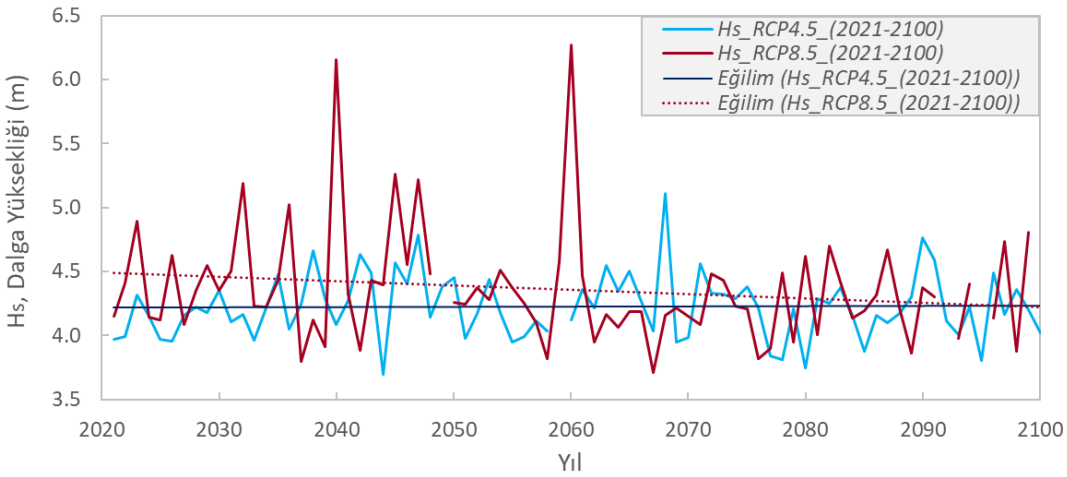
Tablo 4.25 Karasu Bölgesi RCP8.5 (2021-2100) yıllık fırtına karakteristikleri

Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet	Yıl	Saat	H_s	T_p	Adet
2021	45	4.15	9.23	2	2061	34	4.47	9.44	2
2022	133	4.41	9.62	6	2062	18	3.95	9.59	1
2023	44	4.90	9.53	2	2063	97	4.17	9.40	4
2024	62	4.14	9.37	2	2064	56	4.07	9.69	3
2025	92	4.12	9.14	5	2065	89	4.19	9.51	3
2026	232	4.63	10.03	6	2066	106	4.18	9.63	4
2027	104	4.09	10.23	5	2067	40	3.71	10.45	2
2028	133	4.35	9.97	5	2068	87	4.16	9.55	5
2029	69	4.54	10.23	2	2069	28	4.21	10.09	2
2030	115	4.35	10.01	5	2070	93	4.15	9.77	4
2031	51	4.51	10.23	2	2071	83	4.09	9.73	3
2032	149	5.19	10.89	4	2072	24	4.48	9.63	1
2033	135	4.23	9.76	5	2073	121	4.43	10.30	3
2034	81	4.22	9.25	4	2074	167	4.23	9.94	7
2035	162	4.43	9.60	5	2075	81	4.21	9.88	4
2036	160	5.02	10.07	3	2076	29	3.82	9.32	2
2037	67	3.80	9.97	1	2077	38	3.90	8.89	2
2038	47	4.12	9.62	3	2078	187	4.49	10.11	4
2039	48	3.91	9.59	3	2079	50	3.95	9.26	2
2040	34	6.16	11.70	1	2080	148	4.62	10.59	4
2041	142	4.32	10.31	5	2081	32	4.00	9.68	1
2042	34	3.88	9.85	2	2082	56	4.70	9.73	2
2043	160	4.43	10.23	6	2083	31	4.42	9.34	2
2044	78	4.40	10.06	3	2084	120	4.14	9.51	4
2045	84	5.26	10.19	2	2085	28	4.19	9.91	2
2046	171	4.55	10.05	7	2086	56	4.31	10.05	2
2047	106	5.21	10.24	3	2087	56	4.67	10.73	2
2048	95	4.48	9.51	4	2088	84	4.22	9.74	5
2049	-	-	-	0	2089	17	3.86	9.12	1
2050	88	4.26	9.68	4	2090	92	4.37	10.39	3
2051	17	4.25	9.84	1	2091	66	4.30	9.89	3
2052	45	4.37	10.05	2	2092	-	-	-	0
2053	47	4.28	9.96	2	2093	135	3.98	9.83	4
2054	53	4.51	9.69	2	2094	107	4.41	11.06	2
2055	117	4.37	9.86	5	2095	-	-	-	0
2056	111	4.25	10.24	4	2096	129	4.13	10.00	3
2057	59	4.10	9.17	3	2097	69	4.73	10.05	2
2058	19	3.82	10.76	1	2098	17	3.88	9.73	1
2059	91	4.58	10.36	4	2099	133	4.81	10.14	4
2060	66	6.27	11.13	1	2100	-	-	-	0

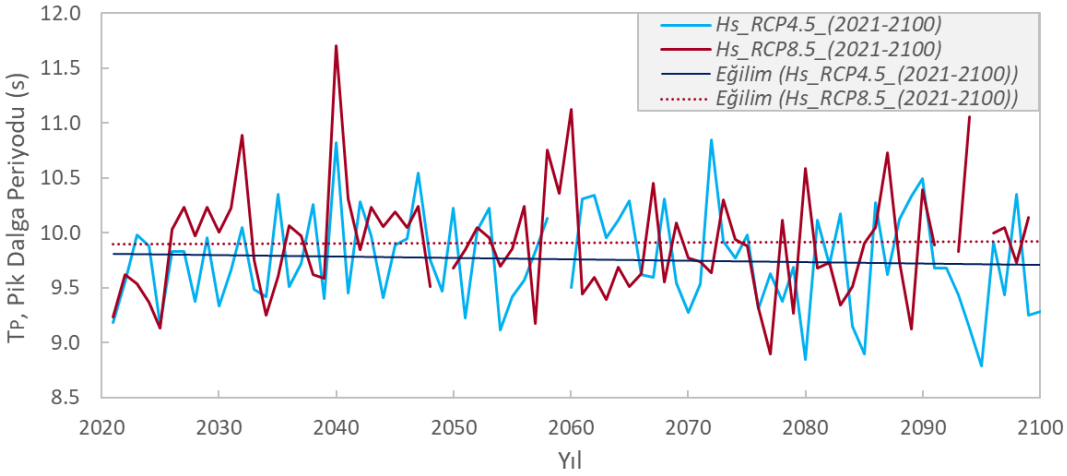
Tablo 4.24'e göre RCP4.5 iklim senaryosunda maksimum fırtına dalgası yüksekliğinin 5.11 m ile 2068 yılında görülmesi beklenirken, minimum fırtına dalgası yüksekliğinin 3.70 m ile 2044 yılında meydana gelmesi beklenmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre en çok fırtına toplam 8 adet ile 2082 yılında beklenirken, 2059 yılında hiç fırtına gözlenmemesi beklenmektedir. Bununla birlikte 235 saat ile en uzun toplam fırtına süresine sahip olan yıl 2050 yılı olması tahmin edilirken, 2049 yılında eşik değer olan 12 saat ile minimum fırtına oluşumunun gözlenmesi beklenmektedir.

Tablo 4.25'e göre RCP8.5 iklim senaryosunda maksimum fırtına dalgası yüksekliğinin 6.27 m ile 2060 yılında görülmesi beklenirken, minimum fırtına dalgası yüksekliğinin 3.71 m ile 2067 yılında meydana gelmesi öngörülmektedir. RCP8.5 senaryosuna göre en çok fırtına toplam 7'şer adet ile 2046 ve 2074 yıllarında meydana gelmesi, 2049, 2092, 2095 ve 2100 yıllarında hiç fırtına gözlenmemesi tahmin edilmektedir. Bununla birlikte 232 saat ile en uzun toplam fırtına süresine sahip olan yılın 2026 yılı olması, 17'şer saat ile minimum fırtına süresine sahip yılların ise 2051, 2089 ve 2098 yılları olması öngörülmektedir.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 ile gelecek dönemlerde olması beklenen fırtına karakteristiklerinin (fırtına dalga yüksekliği ve pik periyodu) 80 yıllık eğilimleri gösterilmiştir. RCP4.5 senaryosunda yıllık ortalama fırtına dalgası yükseklikleri %0.5 oranında artış ile neredeyse hiç değişmez iken, RCP8.5 iklim senaryosunda yıllık ortalama fırtına dalgası yükseklikleri %6.2 mertebesinde azalmıştır (Şekil 4.24). Fırtına dalgası pik periyot değerleri incelendiğinde RCP4.5 iklim senaryosunda %1.1'lik bir düşüş gözlenirken, RCP8.5 iklim senaryosunda %0.2 mertebesinde küçük bir artış tespit edilmiştir (Şekil 4.25).

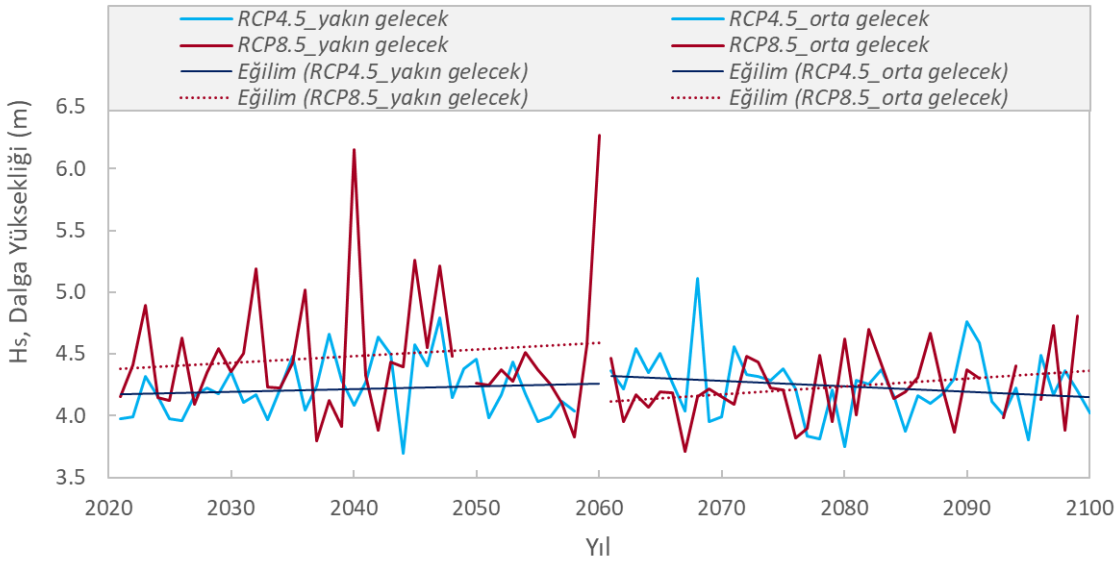


Şekil 4.24 Karasu Bölgesi (2021-2100) dönemi için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası yüksekliklerinin eğilimleri



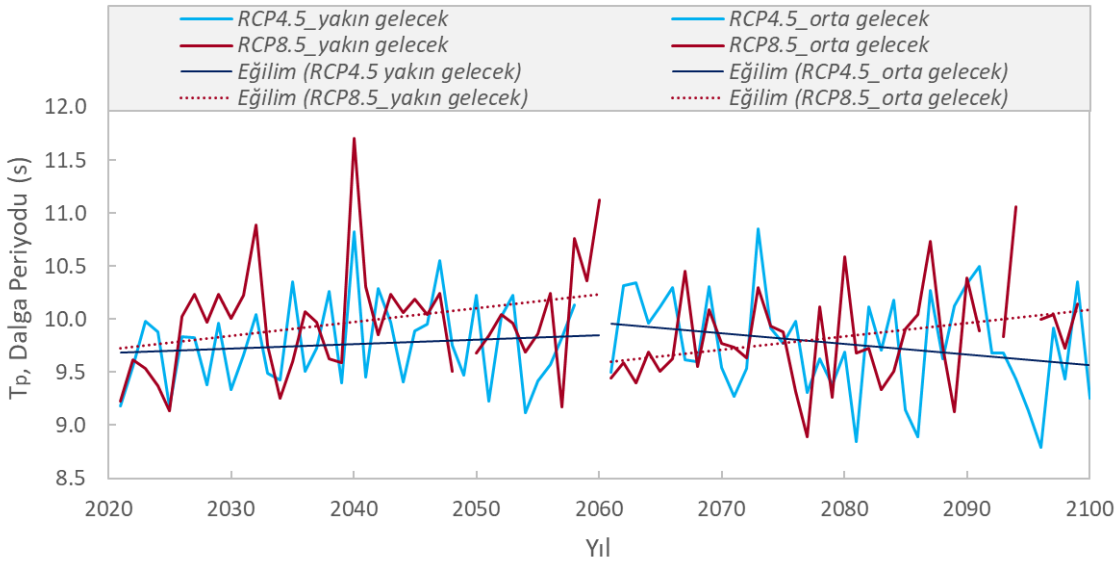
Şekil 4.25 Karasu Bölgesi (2021-2100) dönemi için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası pik periyotlarının eğilimleri

İklim senaryolarına göre gerçekleştirilen fırtına analizleri (2021-2060) arası yakın gelecek dönemi, (2061-2100) arası orta gelecek dönemi olarak iki zaman ölçeğinde ayrıca incelenmiştir. RCP4.5 iklim senaryosunda yakın gelecek döneminde fırtına dalgası yükseklikleri %1.9 oranında artış gösterirken, orta gelecek döneminde fırtına dalgası yüksekliklerinde %4.1 oranında azalma gözlenmiştir. Fırtına dalgası yükseklikleri RCP8.5 iklim senaryosuna göre incelendiğinde ise yakın gelecek döneminde %4.8, orta gelecek döneminde ise %5.8 artış gözlenmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Karasu Bölgesi yakın ve orta gelecek için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası yüksekliklerinin eğilimleri

RCP4.5 iklim senaryosunda yakın gelecek döneminde fırtına dalgası pik periyotları %2.2 oranında artarken, orta gelecek döneminde fırtına dalgası pik periyotlarında %5.0 oranında azalma gözlenmiştir. Fırtına dalgası pik periyotları RCP8.5 iklim senaryosuna göre incelendiğinde ise yakın gelecek döneminde %5.1, orta gelecek döneminde ise %5.0 artış gözlenmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 Karasu Bölgesi yakın ve orta gelecek için iklim senaryolarına göre fırtına dalgası pik periyotlarının eğilimleri

Hem son 40 yıl (1979-2018) hem de (2021-2100) yılları için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre gerçekleştirilen fırtına analizleri sonucunda hem hassasiyet analizi başlangıç değerlerine karar verilmiş hem de hassasiyet analizlerinde çalışılacak olan artış ve azalış oranları tespit edilmiştir. Gerek literatür araştırmaları gerek beaufort (bofor) ölçeği gerekse son 40 yıllık fırtına karakteristiklerinden yola çıkılarak hassasiyet analizlerinde başlangıç belirgin dalga yüksekliği 4.0 m, pik dalga periyodu 8.0 s olarak belirlenmiştir.

Bununla birlikte RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına ait değişimlerden faydalanarak hem dalga yüksekliği ve dalga periyodundaki ortalama değişimler hem de meydana gelebilecek maksimum artışlar hassasiyet analizlerinde dikkate alınmıştır. Bu çerçevede dalga iklimi parametrelerinden belirgin dalga yüksekliği (H_s), pik dalga periyodu (T_p), dalga doğrultusu (θ) ile deniz seviyesi yükselmesi için Tablo 4.26'da özetlendiği gibi farklı koşullarda XBeach modelleri koşturulmuş ve kıyıya dik morfoloji değişimleri üzerinde hangi parametrenin ne derece etkiye sahip olduğu anlaşılmaya çalışılmıştır.

Tablo 4.26 Hassasiyet analizinde incelenen iklim değişimi senaryoları

H_s, Belirgin Dalga Yüksekliği	
Koşul-1 (ortalama değişim)	%6 azalma
Koşul-2	değişim yok
Koşul-3 (ortalama değişim)	%6 artış
Koşul-4 (orta seviye)	%25 artış
Koşul-5 (yüksek seviye)	%50 artış
T_p, Pik Dalga Periyodu	
Koşul-1 (ortalama değişim)	%5 azalma
Koşul-2	değişim yok
Koşul-3 (ortalama değişim)	%5 artış
Koşul-4 (orta seviye)	%25 artış
Koşul-5 (yüksek seviye)	%50 artış
θ, Dalga Geliş Açısı	
Kıyıya dik dalgalar	0°
Kıyı normalinden 5 saat yönü	+5°
Kıyı normalinden 10° saat yönü	+10°
SLR, Deniz Seviyesi Yükselmesi	
Koşul-1	0.00 m
Koşul-2	0.30 m
Koşul-3	0.70 m
Koşul-4	1.00 m
Koşul-5	1.50 m

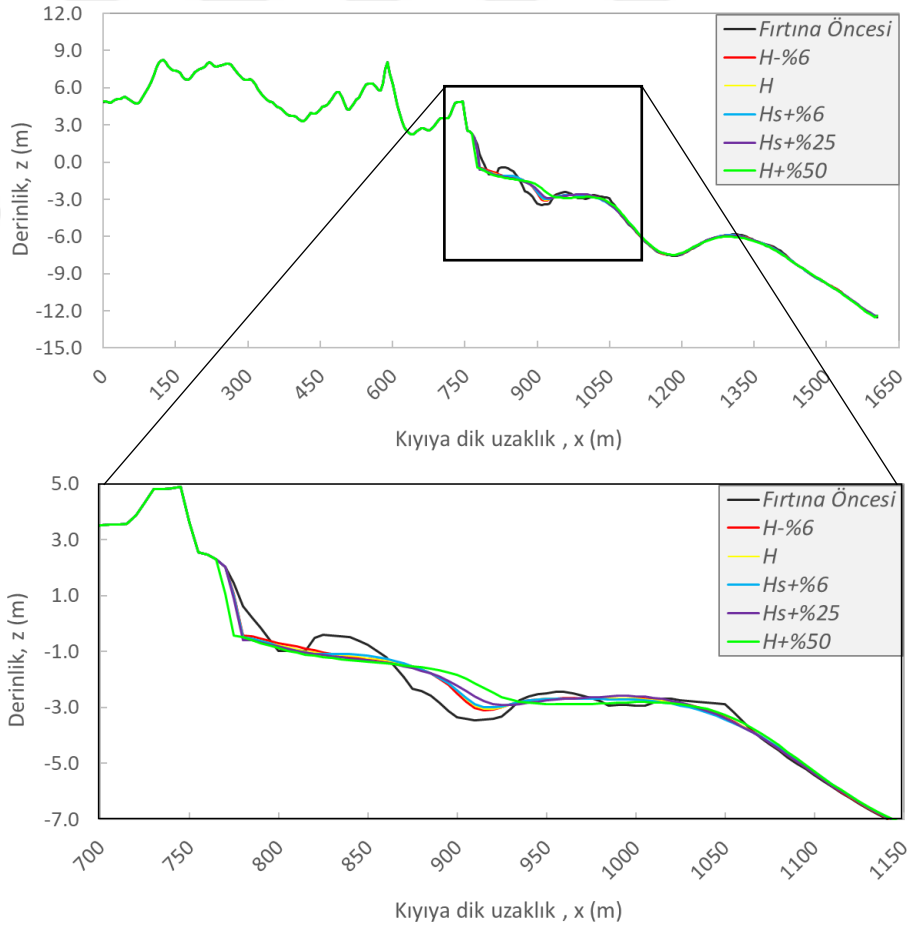
Hassasiyet analizi çalışmalarında benzer bir çalışma niteliğinde olan Van Rijn (2009) çalışması referans alınmıştır. Van Rijn (2009) çalışması Bölüm 2.4.2'de açıklandığı gibi kumul erozyonu üzerinde derin deniz dalga yüksekliği, pik dalga periyodu, dalga geliş açısı, katı madde tane çapı, fırtına kabarması ve kıyı profili eğimi gibi farklı parametrelerin etkilerini görebilmek amacı ile gerçekleştirilen hassasiyet analizlerini içermektedir. Çalışma sonucunda kumul erozyonu üzerinde en etkili iki parametrenin fırtına kabarma seviyesi yani bir diğer deyişle deniz seviyesinde meydana gelen yükselmeler ve katı madde tane çapı olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen kumul erozyonunun artan fırtına kabarması ve azalan katı madde tane çapı ile artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte pik dalga periyodunun da kumul erozyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu, artan dalga periyodu ile birlikte kumul erozyonunun da arttığı görülmüştür.

4.6.1 Dalga Yüksekliği İçin Hassasiyet Analizleri

Belirgin dalga yüksekliğine ait hassasiyet analizleri için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları ışığında gerçekleştirilen fırtına analizlerine göre gelecek dönemde Karasu Bölgesi'nde karşılaşılması beklenen değişimler dikkate alınarak dalga yüksekliğinin %6 artış ve azalış durumları değerlendirilmiştir. Bununla birlikte fırtına analizi sonuçlarına göre orta seviye artış için %25 yüksek seviye artış için %50 artışlar ile dalga yüksekliği değişimlerinin profil davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Profiller üzerinde belirgin dalga yüksekliğinin hassasiyet analizlerine ait iklim koşulları altındaki etkileri Şekil 4.28 ile özetlenmiştir. Belirgin dalga yüksekliği %6 arttığında erozyon miktarı %5.6, yığılma miktarı %3.1 artış gösterirken, dalga yüksekliği %6 azaldığında erozyon ve yığılma miktarları sırasıyla %5.2 ve %5.7 azalmıştır. Belirgin dalga yüksekliği (H_s), 4 m'den %25 artış sonucu 5 m'e yükseldiğinde profilde meydana gelen erozyon %21.4 oranında artarken, yığılma miktarı %11.1 oranında artmıştır. Dalga yüksekliği %50 artış gösterdiğinde erozyon miktarında %68.9, yığılma miktarında ise %35.8 mertebesinde artış söz konusu olmuştur. Dalga yüksekliği arttıkça profil hattında meydana gelen erozyon miktarlarında da artış elde edilmiş olup Şekil 4.29'da bu artış oranları gösterilmiştir. Belirgin dalga yüksekliği artışı ile birlikte profilde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarında doğrusal olmayan ancak

sürekli olan bir artış gözükmektedir. Dalga yüksekliği arttıkça erozyon ve yığılma miktarlarında meydana gelen artışın aynı oranda olmadığı, erozyonun yığılmaya göre daha çok artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.29 ve Tablo 4.27). Elde edilen sonuçlar referans alınan Van Rijn (2009) çalışması ile tutarlı bulunmuştur. Benzer şekilde Van Rijn (2009) çalışmasında da belirgin dalga yüksekliği 3.8 m ile 10 m arasında değiştirilerek dalga yüksekliğinin artışı sonucunda kumul erozyonunun artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Dalga yüksekliği arttıkça dalganın sahip olduğu enerji yükselmekte ve kıyıya daha yüksek enerjili dalgalar ulaşmaktadır. Bu yüksek enerjili dalgalar kıyıda daha yüksek seviyelere kadar tırmanmaktadır. Van Rijn (2009) çalışmasında da belirtildiği gibi böyle yüksek enerjili koşullarda kıyıda, açığa doğru katı madde taşınımı meydana gelmekte olup artan dalga yüksekliği ile doğru orantılı olacak şekilde erozyon miktarı artış göstermektedir.

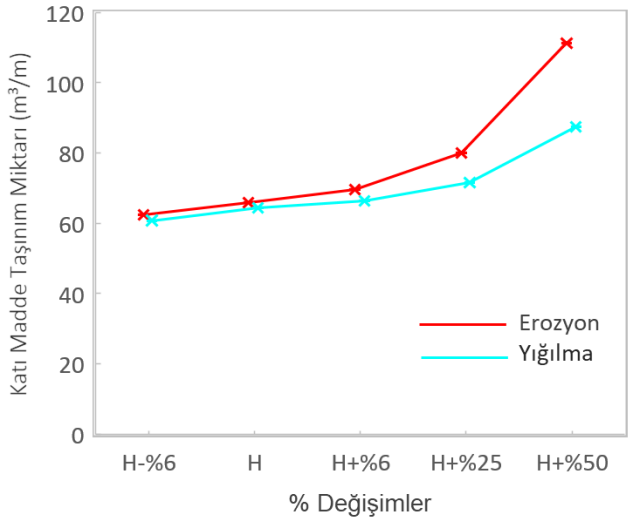


Şekil 4.28 P1 profili üzerinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizi sonuçları

Tüm modellerde dalga tırmanma bölgesinde net bir erozyon meydana gelmesinin yanı sıra çalkantı bölgesinde yer alan kum eşiği de açığa doğru taşınmıştır. Şekil 4.28'den görüldüğü üzere tırmanma bölgesindeki erozyon ve kıyı çizgisinin su ile kesiştiği noktadaki geri çekilme ile çalkantı bölgesindeki kum eşiğinin açığa doğru ilerlemesi artan dalga yüksekliği ile birlikte daha belirgin bir hal almıştır.

Tablo 4.27 P1 profilinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizine ait erozyon ve yığılma miktarları

Belirgin Dalga Yüksekliği	Erozyon (m^3/m)	Erozyon %	Yığılma (m^3/m)	Yığılma %
H %6 azalma	62.46	-5.2	60.74	-5.7
H	65.91	0	64.39	0
H %6 artış	69.62	5.6	66.38	3.1
H %25 artış	80.03	21.4	71.55	11.1
H %50 artış	111.29	68.9	87.45	35.8



Şekil 4.29 P1 profilinde dalga yüksekliği için hassasiyet analizine ait erozyon ve yığılma miktarları

4.6.2 Dalga Periyodu İçin Hassasiyet Analizleri

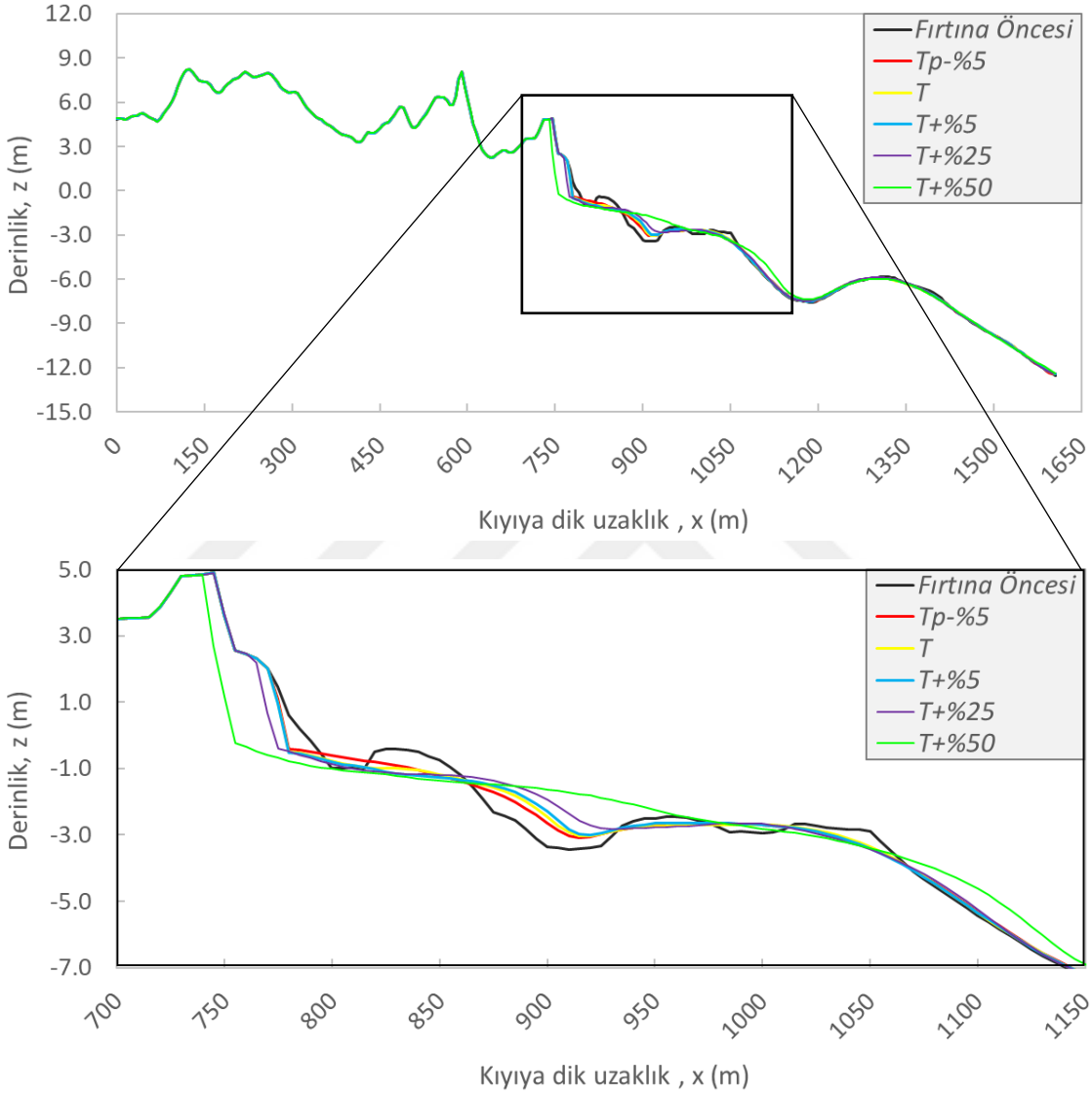
Pik dalga periyoduna ait hassasiyet analizleri için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları ışığında gerçekleştirilen fırtına analizlerine göre gelecek dönemde Karasu Bölgesi'nde karşılaşılması beklenen değişimler dikkate alınarak pik dalga periyodunun %5 artış ve azalış durumları değerlendirilmiştir. Bununla birlikte fırtına analizi sonuçlarına göre orta seviye artış için %25, yüksek seviye artış için

%50 artışlar ile pik dalga periyodu değişimlerinin profil davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Pik dalga periyodu (T_p) değerlerinde de (H_s) gibi sırasıyla %25 ve %50 mertebelerinde artış ile modeller koşturulmuş ve kıyıya dik profil davranışları üzerinde pik dalga periyodunun önemli bir etkisi olduğu elde edilen sonuç profilleri ile tespit edilmiştir (Şekil 4.30). Pik dalga periyodu arttıkça ön kumul yüzünün karaya doğru kaydığı Şekil 4.30 ile görülmektedir. Meydana gelen kıyıya dik toplam taşınım miktarları da artan dalga periyodu ile doğru orantılı olacak şekilde artış göstermiştir. Dalga periyodu 8 s'den %25 artış ile 10 s değerine ulaştığında profilde meydana gelen erozyon miktarı %35.1, yığılma miktarı ise %41.5 oranında artış göstermiştir. Periyodun %50 artışı sonucunda erozyon ve yığılma miktarlarında başlangıç duruma göre ciddi farklılıklar söz konusu olmuş ve her ikisi de yaklaşık 3 kat artmıştır (Tablo 4.28). Bununla birlikte pik dalga periyodu arttıkça kıyıdan yaklaşık 850 m uzaklıkta yer alan eşik açığa doğru ilerleyerek kıyıdan yaklaşık 900 m uzaklıkta yer almıştır (Şekil 4.30). İlaveten, periyot etkisinde meydana gelen erozyon miktarları, dalga yüksekliği etkisinde oluşan erozyon miktarlarına göre daha fazla olup bu sonuç da bize pik dalga periyodunun belirgin dalga yüksekliğine göre kıyıya dik morfoloji değişimleri üzerinde daha etkin bir parametre olduğunu göstermektedir. Şekil 4.31 ile periyot artışına bağlı olarak kıyıya dik katı madde taşınım miktarlarında meydana gelen artış oranları gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere erozyon ve yığılma miktarlarında artış oranları belirgin dalga yüksekliği etkisindeki durumdan farklı olarak neredeyse aynıdır.

Pik periyot etkisindeki hassasiyet analizi model sonuçları incelendiğinde dalga yüksekliği etkisine benzer şekilde dalga tırmanma bölgesinde erozyon meydana gelirken çalkantı bölgesinde yer alan kum eşiğinin açığa doğru ilerlediği görülmüştür. Bununla birlikte pik periyot %50 mertebesinde arttığında ise kıyıda gözle görülür biçimde geri çekilme meydana gelirken profilde hiçbir eşik oluşumu kalmayarak profil düz bir şekil almıştır (Şekil 4.30).

Gerçekleştirilen çalışmaya benzer şekilde Van Rijn (2009) çalışmasında da pik periyot 9 s ile 18 s arasında değiştirilerek pik dalga periyodunun profil davranışları üzerindeki etkisi araştırılmış ve benzer şekilde pik dalga periyodu arttıkça özellikle

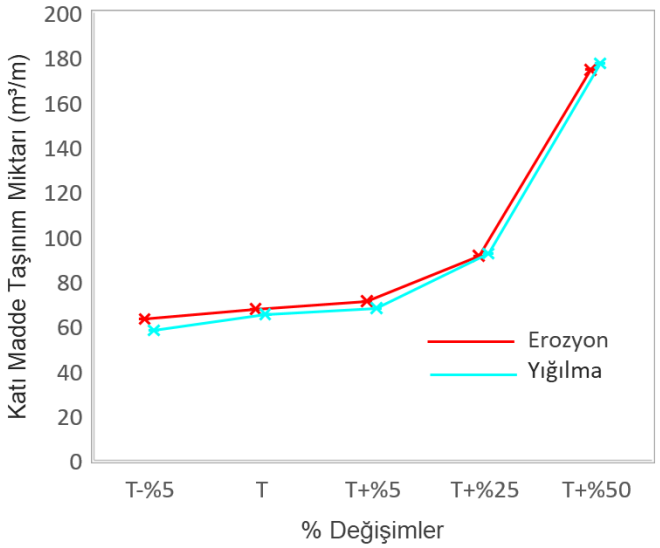
kumul erozyonunun artış gösterdiği tespit edilmiştir. Van Rijn (2009) çalışmasında da belirtildiği gibi yükselen dalga periyodu ile birlikte karaya doğru pik orbital hız artmakta ve böylelikle deniz tabanı kayma gerilmesi artmaktadır. Artan denz tabanı kayma gerilmesi ile birlikte taşınım miktarı ya da bir diğer deyişle meydana gelen erozyon miktarı artmaktadır.



Şekil 4.30 P1 profili üzerinde pik dalga periyodu için hassasiyet analizi sonuçları

Tablo 4.28 P1 profilinde dalga periyoduna ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları

Pik Dalga Yüksekliği	Erozyon (m^3/m)	Erozyon %	Yığılma (m^3/m)	Yığılma %
T %5 azalma	63.17	-6.6	58.06	-11.1
T	67.63	0	65.31	0
T %5 artış	71.14	5.2	68.03	4.2
T %25 artış	91.34	35.1	92.39	41.5
T %50 artış	174.44	157.9	177.26	171.4

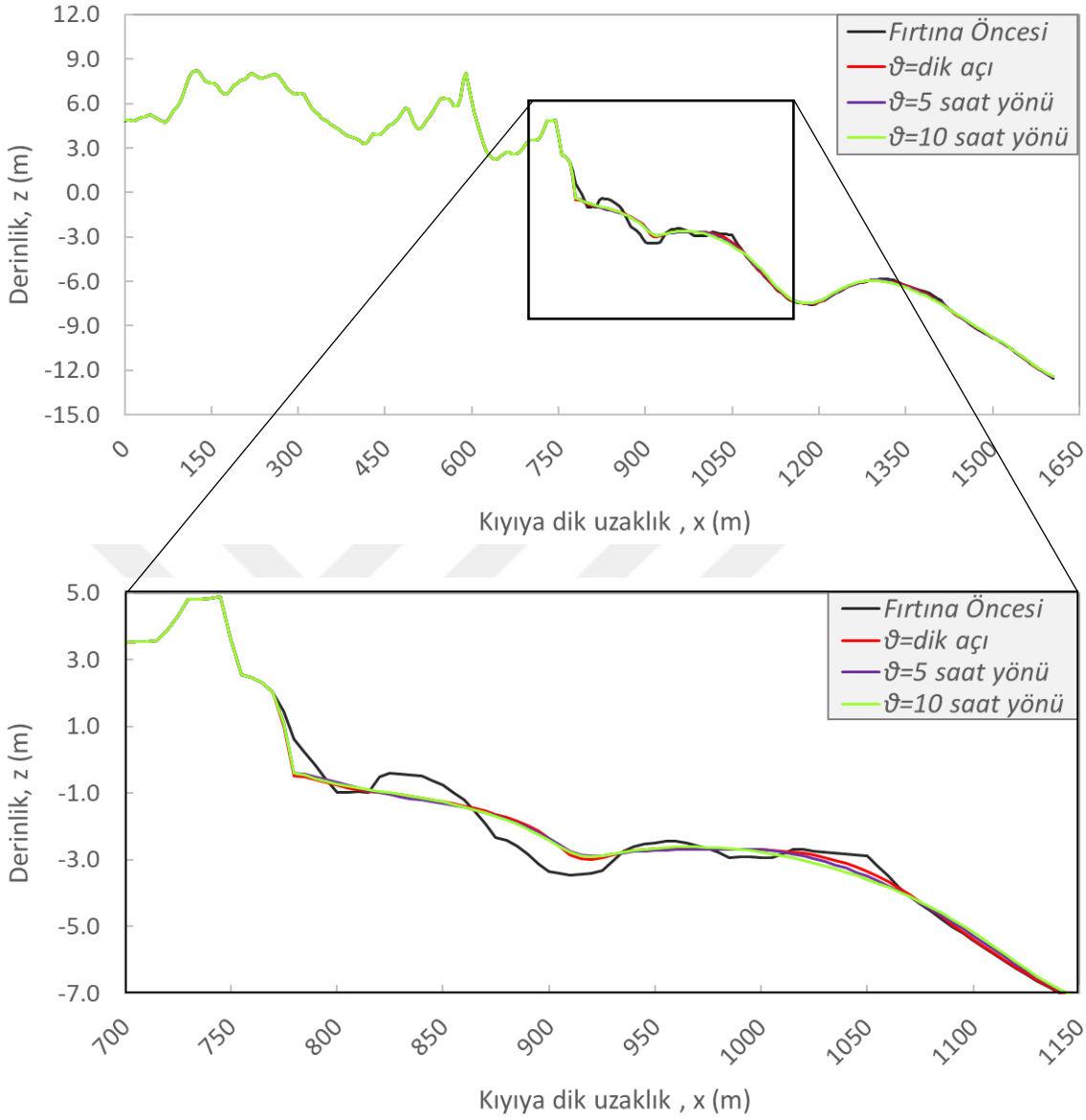


Şekil 4.31 P1 profilinde dalga periyoduna ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları

4.6.3 Dalga Doğrultusu İçin Hassasiyet Analizleri

Dalga doğrultusu Bölüm 4.5.3'te açıklandığı üzere dalga kırılmasını ve kıyı boyu akıntılarının büyüklüğünü etkileyen önemli bir dalga parametresidir. Bu çalışmada da dalga geliş açısının kıyıya dik profiller üzerindeki etkisini araştırmak için öncelikle dalgaların kıyıya 0° ile yaklaştığı yani kıyıya dik geldiği durum için XBeach modeli koşturulmuştur. Ardından saat yönünde 5 ve 10°'lik dalga doğrultusundaki sapmalar ile XBeach modelleri çalıştırılmıştır. Dalga doğrultusu saat yönünde 5° sapmaya uğradığında erozyon ve yığılma miktarlarında %19.2 ve %18.2 oranlarında artış meydana gelmiştir. Bu durum dalgaların kıyı normaline yaklaştıkça açılı gelmesi durumuna göre daha yüksek erozyon ve yığılma meydana geldiğinin göstergesidir.

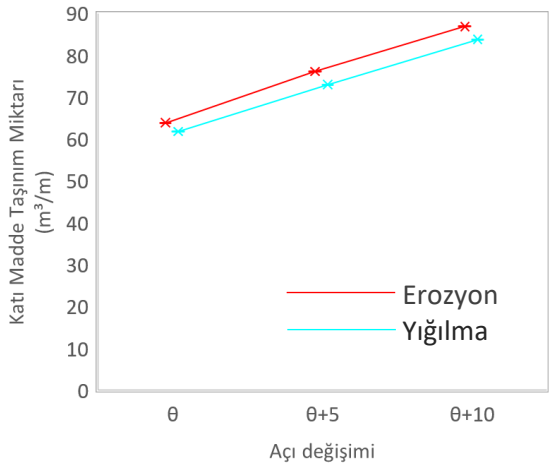
Dalga doğrultusu saat yönünde 10° sapmaya uğradığında ise erozyon ve yığılma miktarları %36.0 ve %35.6 oranlarında artmıştır.



Şekil 4.32 P1 profili üzerinde dalga geliş açısı için hassasiyet analizi sonuçları

Tablo 4.29 P1 profilinde dalga geliş açısına ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları

Dalga Doğrultusu	Erozyon (m^3/m)	Erozyon %	Yığılma (m^3/m)	Yığılma %
θ	63.89	0	61.81	0
θ +5°	76.13	+19.2	73.04	+18.2
θ +10°	86.91	+36.0	83.84	+35.6

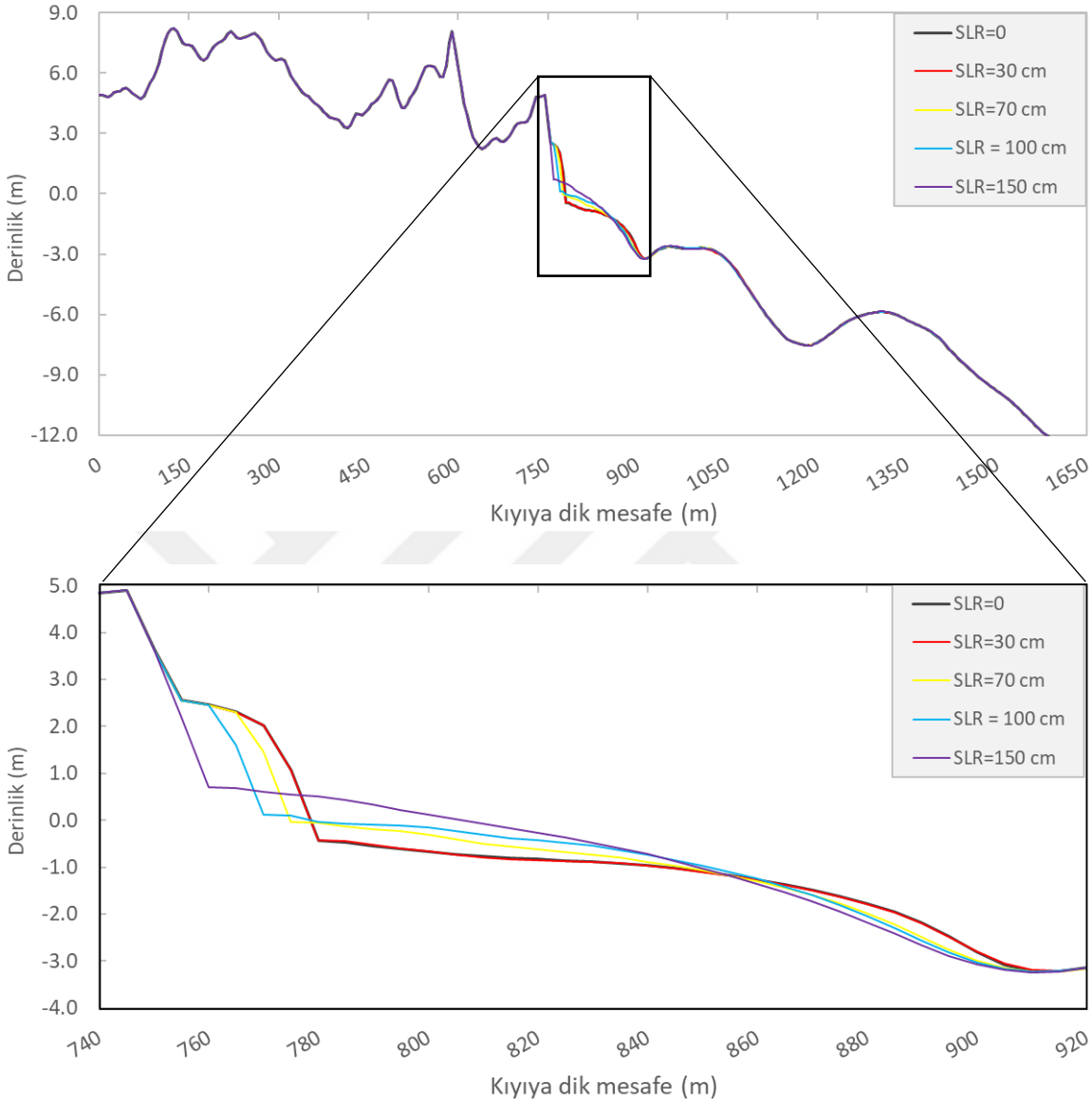


Şekil 4.33 P1 profilinde dalga geliş açısına ait hassasiyet analizi için erozyon ve yığılma miktarları

4.6.4 Deniz Seviyesi İçin Hassasiyet Analizleri

Deniz seviyesi yükselmesi (SLR)'nin profiller üzerindeki etkilerini incelemek üzere P1 profilinde optimum değişimlerin elde edildiği model parametreleri ile birlikte deniz seviyesinin sırası ile 30 cm, 70 cm, 100 cm ve 150 cm yükselmesi durumları XBeach sayısal modeli ile incelenmiş ve Şekil 4.34 ile sonuçlar özetlenmeye çalışılmıştır. Literatür araştırmalarından da yola çıkarak su seviyesi arttıkça deniz tabanının gelen dalgayı daha az hissedeceği ve bu sebeple ortalama su seviyesi altında oluşan erozyon miktarının azalacağı daha doğrusu erozyon konumunun karaya doğru kayma göstereceği düşünülmektedir. Bu sebeple su seviyesi etkisinin özellikle kumsal alanların ön kumul yüzlerinde meydana gelecek olan erozyon miktarı cinsinden değerlendirilmesi daha doğru bulunmaktadır (Winter ve Ruessink, 2017; Dickson vd., 2007). Bu sebeple XBeach model çalışmaları sonrasında elde edilen profillerin ön kumul yüzlerinde oluşan erozyon miktarları tespit edilmiş ve hiçbir su seviyesi artışı olmayan model sonucuna göre karşılaştırmaları Tablo 4.30 ve Şekil 4.34 ile sunulmuştur. Su seviyesi yükseldikçe P1 profili gözle görülür boyutta karaya doğru kayma göstermiştir. Diğer bir deyişle su seviyesi arttıkça ön kumul yüzünde meydana gelen erozyon miktarı net bir şekilde artmıştır. Yine sonuçların sayısallaştırılması sonucunda su seviyesi 30 cm'den 150 cm'e kadar arttığında ön kumul yüzünde meydana gelen erozyon miktarında 3 kat artış söz konusu olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.35 ile

deniz seviyesindeki artışlar sonucunda meydana gelen erozyon ve yığılma miktarlarında doğrusal olmayan ancak sürekli olan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.

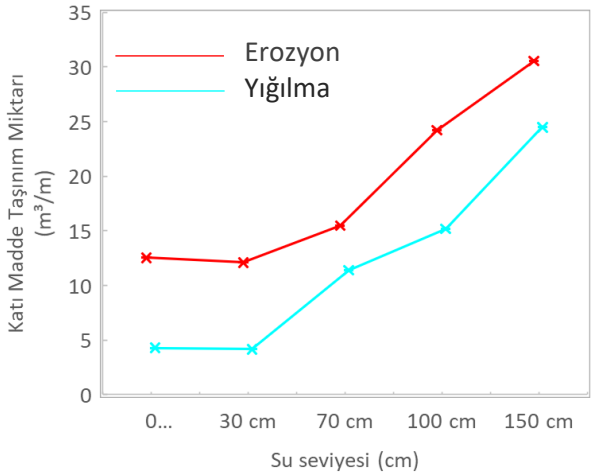


Şekil 4.34 P1 profili üzerinde deniz seviyesi yükselmesi etkisi

Tablo 4.30 P1 profili deniz seviyesi hassasiyet analizi erozyon ve yığılma miktarları

Deniz Seviyesi	Erozyon (m^3/m)	Erozyon %	Yığılma (m^3/m)	Yığılma %
Deniz seviyesi = 0	12.53	0	4.28	0
Deniz seviyesi = 30 cm	12.09	-3.5	4.16	+2.8
Deniz seviyesi = 70 cm	15.45	+23.3	11.40	+166.4
Deniz seviyesi = 100 cm	24.21	+93.2	15.16	+254.2
Deniz seviyesi = 150 cm	30.53	+143.7	24.47	+471.7

Şekil 4.34'ten görüldüğü üzere artan su seviyesi ile birlikte su seviyesi üzerindeki alanda artan bir erozyon olayının meydana geldiği, bununla birlikte kıyı çizgisinin su seviyesi ile kesiştiği noktalarda ciddi bir geri çekilme oluştuğu görülmektedir. Sonuçlar Tablo 4.30 ile birlikte değerlendirildiğinde, yığılma miktarlarının erozyona göre daha küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Van Thiel De Vries (2009) çalışmasında da belirtildiği üzere artan su seviyesi ile birlikte kumul yüzüne etki eden ortalama kuvvetin artması (Fisher vd., 1986) ve fırtına dalgaları ile birlikte kumsalın sular altında kalarak kum tepelerinde epizodik (aralıklı) biçimde meydana gelen kum salınımı ve açığa doğru taşınım ile açıklanabilmektedir. Bununla birlikte Yüksel (2011)'de de belirtildiği üzere su seviyesinin yükselmesiyle fırtına dalgalarının kıyıya daha fazla nüfuz etmesi nedeniyle de erozyon artmakta, profilin kara tarafında daha büyük hacimli katı madde açığa taşınmaktadır.



Şekil 4.35 P1 profili deniz seviyesi hassasiyet analizi erozyon ve yığılma miktarları

Deniz seviyesindeki artışlar sonucunda elde edilen sonuçlar yine benzer çalışma olarak dikkate alınan Winter ve Ruessink (2017) çalışması ile karşılaştırılmıştır. Winter ve Ruessink (2017) çalışmasında da deniz seviyesinin 20 cm ile 250 cm arasında değişen değerleri için XBeach model çalışmaları gerçekleştirilmiş ve çalışmalar sonucunda bu çalışma ile tutarlı olacak şekilde kumul erozyon alanının artan deniz seviyesi etkisi ile yükseldiği tespit edilmiştir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Kıyısal alanlarda kıyı morfolojisi değişimlerini ve zaman içerisindeki gelişimlerini belirleyebilmek için rüzgar ve dalga gibi birçok kıyı parametresinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu parametreler, genellikle karmaşık doğa olayları sebebi ile çoğu zaman tam olarak tespit edilememektedir. Özellikle uzun dönemli dalga verileri her zaman mevcut olmamakta, saha ölçümleri her zaman yapılamamakta ve dolayısıyla kıyı morfolojisi gelişimlerini meydana getiren katı madde taşınım miktarları doğru tespit edilememektedir.

Bu çalışma iki adımdan oluşmaktadır. Her iki adım da çalışma bölgesi olarak seçilen Karasu kıyısı için gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda kıyı boyu katı madde taşınım süreçleri ikinci adımda ise kıyıya dik katı madde taşınım ve morfoloji değişim süreçleri farklı ampirik ve sayısal modeller aracılığı ile incelenmiştir. Bu tez çalışması, Karasu kıyısında meydana gelen katı madde taşınım hareketlerinin mevcut durum tespitini yapmak ve geleceğe yönelik kıyılarda beklenen olası morfoloji değişimlerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Gerçekleştirilen çalışma küresel iklim değişimi sonucunda dalga iklimi parametrelerindeki değişimler ile deniz seviyesinde meydana gelen artışlara bağlı olarak Karasu Bölgesi'ne ait hem uzun dönemli hem de kısa dönemli yakın kıyı morfoloji değişimlerini farklı ampirik ve sayısal modeller aracılığı ile ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Bu aşamada Karasu kıyısında kıyı boyu katı madde taşınımının 40 yıllık (1979-2018) uzun dönemli değişimine ait sonuçları sunulmaktadır.

- Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Karasu hem kıyı boyu hem de kıyıya dik katı madde hareketinin aktif olduğu dinamik bir kumsal sistemine sahiptir. Karasu Bölgesi'nde mevcut durumda etkin dalga yönü kuzey-kuzeydoğu (KKD) sektöründen olup bölgedeki hakim kıyı boyu katı madde

taşınım yönü batı-kuzeybatı (BKB) sektöründen (DGD) doğu-güneydoğu sektörüne doğrudur.

- Geçmiş dönem 40 yıllık dalga verilerine göre bölgede soluğan dalgalarının hakim olduğu ve bunun sonucunda soluğan dalgaları kaynaklı meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımının, toplam dalga kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınımı ile neredeyse aynı mertebede ve aynı yönde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte soluğan dalgalarının yüksekliğinde meydana gelen azalmaya bağlı olarak toplam kıyı boyu katı madde taşınımında da azalma meydana geldiği elde edilen bulgular arasındadır.
- Bölgede hakim olan belirgin dalga yüksekliği küçüldükçe ve dalgalar kıyı normaline paralel gelmeye başladıkça daha küçük kıyı boyu katı madde taşınım hareketi ile karşılaşılmıştır.
- Üç farklı ampirik ve bir adet sayısal yönteme göre (Kamphuis, 1991; Kaczmarek vd., 2005; Bayram vd., 2007 ve LITDRIFT) elde edilen net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları sıraasıyla 62,900 m^3/yıl; 61,000 m^3/yıl; 71,700 m^3/yıl ve 70,110 m^3/yıl iken brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları sırasıyla 213,600 m^3/yıl, 182,250 m^3/yıl, 169,800 m^3/yıl ve 185,100 m^3/yıl değerlerindedir. Soluğan ve rüzgar kaynaklı olarak ayırmaksızın çalışma alanında hesaplanan toplam net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı 65,000±5,000 m^3/yıl iken brüt taşınım miktarı ise yaklaşık 190,000±20,000 m^3/yıl mertebelerindedir.
- Kıyı boyu katı madde taşınımı ile ilgili kalitatif bir değerlendirme sağlamak amacıyla ampirik ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgileri arasındaki değişikliklerin tespit edilmesi ile değerlendirilmiş, ampirik ve sayısal model sonuçları ile uyumlu olacak şekilde 76,000 m^3/yıl mertebesinde net kıyı boyu katı madde taşınımı tespit edilmiştir.
- Kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarını tahmin etmek için kullanılan ampirik yöntemler birbiri ile karşılaştırıldığında Bayram vd. (2007) yönteminin Kamphuis (1991) ve Kaczmarek vd. (2005) yöntemine göre daha büyük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde ettiği

görülmüştür. Bununla birlikte, Bayram vd. (2007), Kaczmarek vd. (2005) ve Kamphuis (1991) yöntemlerinin birbirleriyle uyumlu sayılabilecek sonuçlar ortaya koyduğu, LITDRIFT sayısal modelinin ise net kıyı boyu katı madde taşınım miktarını ampirik yöntemlere göre daha büyük tahmin ettiği tespit edilmiştir.

- Tüm denklemler birlikte düşünüldüğünde Kaczmarek vd., (2005) ve Kamphuis (1991) yöntemlerinin, aynı yüksekliğe sahip ve rüzgar dalgalarına göre daha büyük soluğan dalgalarının kıyıya daha küçük açılar ile yaklaşması durumunda birbirine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Öte yandan aynı dalga yüksekliğine sahip ve soluğan dalgalarına göre daha küçük olan rüzgar dalgalarının kıyıya büyük açılar ile yaklaşması durumunda da yöntemler arasındaki farkın arttığı görülmüştür.
- Bayram vd. (2007) yöntemi diğer iki yöntemden farklı olarak kıyı boyu katı madde taşınımı hesabında sadece dalga kaynaklı akıntıları değil, rüzgar ve gel-git akıntılarını da dikkate almakta ve bu durum daha büyük net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı elde edilmesine sebep olmuştur.
- 40 yıllık (1978-2018) geçmiş dönem verilerine göre, 40 yılın sonunda brüt ve net kıyı boyu katı madde taşınımlarında sırasıyla toplam 10,000 m^3 ve 16,000 m^3 azalma gözlenirken 40 yılın ortalaması olarak yıllık ~250 m^3/yıl ve ~400 m^3/yıl mertebelerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu azalmalar % cinsinden toplam ve net kıyı boyu katı madde taşınımı için %5.6 ve %21.8 mertebesindedir.

Bu aşamada Karasu kıyısı için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre gerçekleştirilen kıyı boyu katı madde taşınım analizi sonuçları sunulmaktadır.

- RCP4.5 iklim senaryosu için ampirik ve sayısal yöntemlere göre (Kamphuis, (1991); Kaczmarek vd. (2005); Bayram vd. (2007); LITDRIFT) elde edilen net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları sırasıyla 8,550 m^3/yıl; 10,900 m^3/yıl; 13,400 m^3/yıl ve 39,300 m^3/yıl iken brüt taşınım miktarları sırasıyla

264,000 m^3/yıl; 235,200 m^3/yıl; 234,850 m^3/yıl ve 264,600 m^3/yıl olarak tespit edilmiştir.

- RCP8.5 iklim senaryosu için ampirik ve sayısal yöntemlere göre (Kamphuis (1991); Kaczmarek vd. (2005); Bayram vd. (2007); LITDRIFT) elde edilen net kıyı boyu katı madde taşınım miktarları sırasıyla 10,700 m^3/yıl; 12,150 m^3/yıl; 17,900 m^3/yıl ve 42,600 m^3/yıl iken brüt taşınım miktarları sırasıyla 269,000 m^3/yıl; 238,650 m^3/yıl; 240,400 m^3/yıl ve 268,000 m^3/yıl olarak tespit edilmiştir.
- 80 yılın (2021-2100) sonunda net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı RCP4.5 senaryosuna göre ortalama 18,000 m^3/yıl, RCP8.5 senaryosuna göre ortalama 21,000 m^3/yıl olarak bulunmuştur. Toplam (brüt) taşınım miktarları ise RCP4.5 senaryosuna göre ortalama 250,000 m^3/yıl iken RCP8.5 senaryosuna göre ortalama 254,000 m^3/yıl mertebelerindedir.
- RCP8.5 iklim senaryosunda elde edilen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktalarının RCP4.5 senaryosuna göre sırasıyla 1.25 ve 1.02 kat büyük olduğu tespit edilmiştir.
- 80 yılın sonunda net kıyı boyu katı madde taşınımlarında ise RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla ~400 m^3/yıl ve ~50 m^3/yıl (80 yılın ortalaması) mertebelerinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir.
- 80 yılın sonunda brüt taşınım miktarındaki 80 yıllık çalışma dönemi sonunda meydana gelen ortalama azalma ise %8.4 olarak bulunmuştur.
- Çalışma dönemi yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemi olarak ayrıldığında, yakın gelecek döneminde toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları RCP4.5 senaryosuna göre ortalama %10.4 oranında artış gösterirken RCP8.5 senaryosunda ortalama %1.75 oranında artış göstermiştir. Orta gelecek (2061-2100) döneminde toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları RCP4.5 senaryosuna göre ortalama %12.7 oranında azalırken RCP8.5 senaryosunda ortalama %8 oranında artış göstermiştir.
- Olası iklim değişiklikleri neticesinde soluğan dalgaları kaynaklı meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım miktarının rüzgar kaynaklı kıyı boyu

katı madde taşınım miktarından RCP4.5 iklim senaryosuna göre 5-7 kat fazla iken RCP8.5 iklim senaryosuna göre ise 6-8 kat fazla olduğu tespit edilmiştir.

- 2021-2100 yılları arasındaki dönem genel olarak değerlendirildiğinde, RCP4.5 senaryosundaki yakın ve orta geleceğe ait toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının neredeyse birbirini dengelediği, RCP8.5 senaryosunda ise orta gelecekte taşınım miktarında meydana gelen azalma sebebiyle denge durumunun söz konusu olmayacağı görülmüştür.

Bu aşamada Karasu kıyısında etkin olan kıyıya dik katı madde taşınımı ile ilgili gerçekleştirilen mevcut durum analizi, sayısal model çalışmalarına ait sonuçlar sunulmaktadır.

- Çalışma kapsamında iki farklı konumda fırtına öncesi ve sonrası profil ölçümleri ile elde edilen P1 profilinin, P2 profiline göre daha dik eğimli ön kumul ve çalkantı bölgelerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum da iki profilde meydana gelecek katı madde taşınım hareketini farklı kılmaktadır.
- P1 profilinde fırtına sonrası ölçüm sonuçlarına göre 62.30 m^3/m yığılma ile 60.60 m^3/m erozyon meydana gelirken, profilin kıyı çizgisinin kara ile kesiştiği nokta 6.1 m geri çekilmiştir. P2 profilinde ise 63.70 m^3/m yığılma ile 66.90 m^3/m erozyon meydana gelirken, profilin kıyı çizgisinin kara ile kesiştiği nokta 16.5 m geri çekilmiştir.
- Profiller arasındaki mesafe ile birlikte profillere ait eğim farklılıkları, profillerin şekilleri ve açık kıyı eşiklerinin konumları ve son olarak dalga geliş yönlerinin kıyıya dik katı madde taşınım süreci üzerinde etkili olduğu görülmüş ve ön kumul yüzü eğiminin azalmasına bağlı olarak profillerde meydana gelen kıyı çizgisi geri çekilmesinin artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kalibrasyon aşamasında her iki profil için aynı kalibrasyon parametrelerinin geçerli olmadığı ve ortak kullanılan parametrelerin optimum değerlerinin aynı olmadığı tespit edilirken her iki profilde etkin olan kalibrasyon parametresinin “gamma” olduğu

görülmüştür. P1 profilinde “bulk”, “eps”, “facSk”, “gamma”, “lwt” ve “smax” parametreleri ile kalibre edilirken P2 profili bu parametrelere ek olarak “facAs”, “gammax” ve “wetslp” parametreleri ile kalibre edilmiştir.

- XBecah kalibrasyon modelleri sonucunda P1 profilinin tamamının sayısal model ile oldukça iyi temsil edildiği, P2 profilinin ise ön kumul yüzü haricinde genel olarak fırtına sonrası ölçüm profilini temsil edebildiği tespit edilmiştir.
- P1 Profilinin XBeach yazılımı ile kalibrasyon sonuçlarına göre istatistiksel hata değerleri BS=0.54, RMSE=0.14, R^2=0.999 olarak bulunurken bu parametreler P2 profilinde sırasıyla 0.37, 0.17 ve 0.998 olarak elde edilmiştir.

Bu aşamada RCP4.5 ve RCP8.5 projeksiyon çalışmalarına göre kıyıya dik morfoloji değişimleri ile ilgili inceleme sonuçları verilmiştir.

- Belirgin dalga yüksekliği etkisinde P1 ve P2 profillerinin her ikisinde de maksimum katı madde taşınım hareketi RCP4.5 iklim senaryosunun yakın gelecek döneminde meydana gelmiştir.
- Pik dalga periyodu etkisinde hem P1 hem de P2 profillerinde meydana gelen maksimum katı madde taşınım hareketi RCP4.5 iklim senaryosunun yakın gelecek döneminde gerçekleşmiştir.
- Dalga doğrultusu etkisinde P1 ve P2 profillerinde meydana gelen maksimum katı madde taşınım hareketi RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde gerçekleşmiştir.
- Deniz seviyesi değişiminin etkisinde hem P1 hem de P2 profillerinde meydana gelen maksimum katı madde taşınım hareketi deniz seviyesi yükselmesinin maksimum olduğu RCP8.5 senaryosunun orta gelecek döneminde gerçekleşmiştir.
- P1 profilinde RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin pik dalga periyodu, orta gelecek döneminde ise deniz seviyesi yükselmesinin etkili olduğu görülmüştür. RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde en etkili

parametrenin dalga doğrultusu olduğu, orta gelecek döneminde ise deniz seviyesi yükselmesi ile birlikte dalga doğrultusunun etkili olduğu tespit edilmiştir.

- P2 profilinde RCP4.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin pik dalga periyodu ve deniz seviyesi yükselmesinin etkili olduğu görülmüştür. RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek döneminde en etkili parametrenin dalga doğrultusu olduğu görülürken, orta gelecek döneminde ise profil davranışı üzerindeki en etkili parametrenin deniz seviyesi yükselmesi olduğu tespit edilmiştir.

Bu aşamada RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarının farklı koşullar altında birbirleri ile karşılaştırmalarına ait sonuçlar verilmiştir.

- İklim senaryoları birbiri ile karşılaştırıldığında her iki profil için dalga yüksekliği etkisinde RCP4.5 senaryosununun yakın gelecek döneminde RCP8.5 senaryosunun yakın gelecek dönemine göre daha büyük taşınım miktarı tespit edilirken, orta gelecek döneminde RCP4.5 senaryosundaki taşınım miktarları RCP8.5 senaryosundan daha az bulunmuştur.
- Dalga periyodu etkisinde her iki profilde RCP4.5 iklim senaryolarında (yakın ve orta gelecek) RCP8.5 senaryolarına göre daha büyük taşınım miktarları meydana gelmiştir.
- Dalga doğrultusu etkilerindeki taşınım miktarları incelendiğinde ise RCP4.5 senaryolarında RCP8.5 senaryosundakilerden daha küçük katı madde taşınım miktarı tespit edilmiştir.
- Deniz seviyesi yükselmesi durumlarında RCP8.5 senaryolarında daha yüksek su seviyesi olması sebebi ile RCP4.5 senaryolarına göre daha büyük katı madde taşınım miktarları tespit edilmiştir.
- Tüm parametrelerin birlikte değiştiği durumda ise profiller dalga yüksekliği etkisindeki sonuçlara benzer şekilde yakın gelecek için RCP4.5 senaryosu, orta gelecekte için ise RCP8.5 senaryosu daha büyük taşınım miktarları ortaya koymuştur.

- Her iki profil için de deniz seviyesi yükselmesi durumu hariç her koşulda yakın gelecek döneminde orta gelecek dönemine göre daha büyük katı madde taşınımı meydana geldiği görülmüştür.
- Tüm koşullarda profillerde meydana gelen erozyon ve yığılma miktarları neredeyse birbirine eşit değerde olup profillerin denge durumunda olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu aşamada kıyıya dik morfoloji değişimleri için gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ile ilgili çalışmalara ait inceleme sonuçları verilmiştir.

- Hassasiyet analizlerinde belirgin dalga yüksekliği arttıkça katı madde taşınım miktarlarının arttığı ancak erozyon ve yığılma miktarlarında meydana gelen artışın aynı oranda olmadığı, erozyonun yığılmaya göre daha çok artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Hassasiyet analizlerinde pik dalga periyodu arttıkça erozyon ve yığılma miktarları artış göstermiştir. Burada elde edilen artışların belirgin dalga yükseliği etkisindekinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Hassasiyet analizlerinde dalgaların kıyı normaline yaklaştıkça açılı gelmesi durumuna göre daha yüksek erozyon ve yığılma meydana geldiği görülmüştür.
- Hassasiyet analizlerinde deniz seviyesinde yükselme meydana geldikçe profilin ön kumul yüzündeki erozyon miktarının da arttığı tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar ışığında ileride yapılabilecek arastırmalar için öneriler asağıda ifade edilmiştir:

- Profil ölçümlerinin hem kış profillerini hem de yaz profillerini temsil edecek dönemlere denk gelecek şekilde belirli aralıklarla tekrarlanması dikkate alınan profiller üzerindeki dönemsel etkilerin daha iyi gözlenmesini sağlayacaktır.
- Genel olarak çalışmalardaki en büyük eksiklik olan katı madde taşınım ölçümlerinin yapılması, model kalibsrasyon ve doğrulama işlemlerinin bu ölçüm sonuçlarına göre gerçekleştirilmesi araştırmacıları çalışmalarda daha doğru sonuçlara sevk edecektir.

- Sayısal yazılımlarda yer alan bölgeye ait spesifik değerlerin/katsayıların yerinde yapılan ölçümlerle tespit edilmesi model kalibrasyon süreçlerini hızlandıracaktır.
- Ölçümlerin yanı sıra çalışma bölgesine ait yerinde yapılacak arazi incelemeleri ve çevre halkın bilgilerine danışılması gerçekleştirilecek çalışmanın gelişim sürecine olumlu yönde katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Abadie, S., Butel, R., Mauriet, S., Morichon, D., Dupuis, H., (2006). "Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast", Continental Shelf Research, 26: 1924-1939.

Adams, P., (2011). "Effect of climate change and wave direction on longshore sediment transport patterns in Soutern California", Climatic Change 109: 211-228.

Akpınar, A., Bingölbali, B., Van Vledder, G., (2017). "Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations", Ocean Engineering 130: 482-497.

Akpınar, A., Jafali, H., Rusu, E., (2019). "Temporal variation of the wave energy flux in hotspot areas of the Black Sea", Sustainability, 11 (562), 1-17.

Almar, R., Kestenare, E., Reyns, J., Jouanno, J., Anthony, E.J., Laibi, R., Hemer, M., Du Penhoat, Y., Ranasinghe, R., (2015). "Response of the Bight of Benin (Gulf of Guinea, West Africa) coastline to anthropogenic and natural forcing, Part1: Wave climate variability and impacts on the longshore sediment transport", Cont. Shelf Res. 110. 48–59.

Alpar, A., Yüce, H., (1997). "Short and Tidal Period Sea-Level Variations Along The Turkish Strait System", Turkish. J. Mar. Sci., 3: 11-22.

Anderson, D., Ruggiero, P., Antolinez, J.A.A., Mendez, F.J., Allan, J. (2018). "A climate index optimized for longshore sediment transport reveals interannual and multidecadal littoral cell rotations", Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 1958-1981.

Arı, H.A., Yüksel, Y., Çevik, E.Ö., Güler, I., Yalçıner, A.C., Bayram, B., (2006). "Determination and control of longshore sediment transport: A case study", Ocean Engineering 34.

Arı, H.A., (2009). İstatistiksel Bir Dalga Modeli Kurulumu Ve Kıyı Boyu Katı Madde Tasınımının Modellenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Armaroli, C., Grottoli, E., Harley, M.H., Ciavola, P., (2013). "Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy", Geomorphology 199: 22–35.

Arzaburu A. M. A., Williams J. J ve Masselink G., (2014). "Application Of XBeach To Model Storm Response On A Macrotidal Gravel Barrier", Coastal Engineering Proceedings, 4(32), 1-15.

Atkinson, A., Baldock, T.E., (2016). "A high-resolution sub-aerial and sub-aqueous laser based laboratory beach profile measurement system", Journal of Coastal Engineering, 107, 28–33.

Atkinson, A., Baldock, T.E., Birrien, F., Callaghan, D.P., Nielsen, P., Beuzen, T., Turner, I.L., Blenkinsopp, C.E., Ranasinghe, R., (2018)." Laboratory investigation of the Bruun Rule and beach response to sea level rise", Coastal Engineering, 136, 183–202.

Avşar, N.B., (2019). Sea level changes in the Black Sea and its impacts on the coastal areas. Ph.D. Thesis, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye.

Baldock, T.E., Holmes, P., 1997. Swash hydrodynamics on a steep beach. Proc. Coastal Dynamics'97. ASCE, Plymouth, pp. 784–793.

Baldock, T.E., Holmes, P., Bunker, S., Van Weert, P., (1998). "Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone", Coastal Engineering, 34, 173–196.

Baldock, T.E., Baird, A.J., Horn, D.P., Mason, T.E., 2001. Measurements and modelling of swash induced pressure gradients in the surface layers of a sand beach. J. Geophys. Res. 106 (C2), 2653– 2666.

Baldock T.E., Manoonvoravong P. ve Pham K.S (2010). “Sediment Transport and Beach Morphodynamics Induced by Free Long Waves, Bound Long Waves, Waves Groups”, Coastal Engineering, 57, 898-916.

Baldock T.E., Alsina J.A., Caceres I., Vicinanza D., Contestabile P., Power H. ve Sanchez-Arcilla A. (2011). Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves”, Coastal Engineering, 58, 114-127.

Barbaro, G., Foti, G., Sicilia, L., Malara, G., (2014). “A Formula for the Calculation of the Longshore Sediment Transport Including Spectral Effects”, Journal of Coastal Research: 30 (5), 961-966.

Bart, L.J.C, (2017). Long-term modelling with XBeach: combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach, Master Thesis, Technical University of Delft / Coastal Engineering Institute.

Basaran, B., Guner, H.A., 2021. “Effect of wave climate change on longshore transport in Southwestern Black Sea”, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 258: 107415.

Bayram, A., Larson, M., Hanson, H., (2007). “A new formula for the total longshore sediment transport rate”, Coastal Engineering, 54: 700–710.

Bertin, X., Castelle, B., Chaumillon, E., Butel, R., Quique, R., (2008). “Longshore transport estimation and inter-annual variability at a high-energy dissipative beach: St. Trojan beach, SW Oléron Island, France”, Cont. Shelf Res. 28 (10), 1316–1332

Beuzen, T., Turner, I.L.,Blenkinsopp, C.E, Atkinson, A., Flocard, F., Baldock, T.E. (2018). “Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls”, Coastal Engineering, 136, 172–182.

Bijker, E.W. (1971), “Longshore Transport Computations”, Journal of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Division, ASCE, Vol 97, 687-701.

Bingölbali, B., Akpınar, A., Jafali, H., Val Vledder, G., (2019). “Downscaling of wave climate in the western Black Sea”, Ocean Engineering, 172: 31-45.

Binsma, J., Helmer, J., Onnink, C., Verbeek, B., (2018). Durable Development of Oasis Beach, Delft University of Technology Faculty Faculty of Civil Engineering & Geosciences Departments Hydraulic Engineering/Havana.

Bruun, P., (1962). “Sea-level rise as a cause of shore erosion”, ASCE J. Waterw. Harb. Div. 88 (WW1), 117–130.

Bruun, P., (1988). “The Bruun Rule of Erosion by Sea-Level Rise: A on Large-Scale Two- and Three-Dimensional Usages”, Journal of Coastal Research, 4 (4): 627-648.

Bruun, P., (1954). “Migrating sand waves or sand humps, with special reference to investigations carried out on the Danish North Sea”, Coast. Proc. 5th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE, New York, 269– 295.

Carley, J.T. and Cox, R.J., (2003). A methodology for utilizing time-dependent beach erosion models for design events. Proceedings of the 16th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference (Auckland, New Zealand), CD-ROM.

Casas-Prat, M., Sierra, J.P., (2012). “Trend anaylsis of wave direction and associated impacts on the Catalan coast”, Climatic Change 115: 667-691.

Bujan, S.; Ferreira, S.; Dodet, G., (2017).” Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast”, Marine Geology, 385: 41–55.

CERC (1984), Shore Protection Manual, Co. Eng. Res. Center, U.S. Corps of Eng.,Vicksburg.

CERC (2002). "Coastal Engineering Manual”, Coastal Engineering Research Center, US. Army Corps of Engineering.

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

Charbonneau, B., (1990). Science of the Shore Column, Yıldız Üniversitesi Yayınları, 214, İstanbul.

Chowdury, P., Behera, M.R., (2017). “Effect long-term wave climate variability on longshore sediment transport along regional coastlines”, Progress in Oceanography, 156: 145-153.

Chowdury P., Behera M. R. ve Reeve Climate D. E., (2019) “Change Impacts On Coastal Sediment Transport Along The Indian Coast”, Climatic Change.

Chowdury, P., Behera, M.R., Reeve, D.E., (2020). “Futurewave-climate driven longshore sediment transpport along the Indian coast”, Climatic Change.

Ciavola, O., Taborda, R., Ferreira, O., Dias, J.A., (1997). “Field measurements of longshore sand transport and control processes on a steep meso-tidal beach in Portugal”, Journal of Coastal Research, 13 (4): 1119–1129.

Coman, C., 2004. EUROSION Case study (Romania) technical report. WWW Page, http://databases.eucc-d.de/files/000150_EUROSION_Danube_delta.pdf.

Cooper, J.A.G., Pilkey, O.H., (2004). “Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule”, Glob. Planet. Change 43, 157–171.

Efficient Modelling of Beach Evolution, Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Dastgheib, A., Reyns, J., Thammasittirong, S., Weesakul, S., Thatcher, M., Ranasinghe, R., (2016). “Variations in the wave climate and sediment transport due to climate change along the coast of Vietnam”, Journal of Marine Science and Engineering, 4 (86): 2-20.

[Davies, M.H. ve Kamphius, J.W. (1985), “Littoral Transport Rate”, Proc. Canadian Coastal Conference, St John’s, 223-240.

Dean, R.G., (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Ocean Engineering Report No. 12, Department of Civil Engineering. University of Delaware, Newark, DE.

Dean, R.G., Berek, E.P., Gable, C.G., Seymour, R.J., (1982). Longshore transport determined by an efficient trap. 18th Coastal Engrg. Conf. ASCE, 954-968.

Dean, R.G. (1991). “Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications”, Journal of Coastal Research, 7: 53–84.

Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (2010). Equilibrium Beach Profiles. Coastal Processes with Engineering Applications, 162–209.

Deigaard, R., (1993). “A note on the three-dimensional shear stress distribution in a surf zone”, Coastal Engineering 20, 157–171.

Del Valle, R., Medina, R., Losada, M.A., (1993). “Dependence of Coefficient K on Grain Size”, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119: 568-574.

De Vriend, H. J., (1991a). “Mathematical modeling and large-scale coastal behaviour. Part 1: Physical processes”, Journal of Hydraulic Research, 29(6): 727-740.

DHI [Danish Hydraulic Institute], 2008a. MIKE21-Wave Modelling, User Guide. Hersholm, Denmark: DHI Water and Environment.

DHI, 2008b. LITPACK-Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves, User Guide. Hersholm, Denmark: DHI Water and Environment.

DHI, 2008c. LITDRIFT Longshore Current and Littoral Drift, User Guide. Hersholm, Denmark: DHI Water and Environment.

DHI, 2008d. LITLINE Coastline Evolution, User Guide. Hersholm, Denmark: DHI Water and Environment.

Dissanayake, P., Brownb, J., Karunarathna, H., (2014). “Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK”, Marine Geology 357: 225–242.

Divinsky, B.V., Kosyan, R.D., (2015). “Observed Wave Climate Trends in the Offshore Black Sea from 1990 to 2004”, Oceanology, 55(6): 837-843.

Divinsky, B.V., Kosyan, R.D., (2017). “Spatio temporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years”, Continental Shelf Research, 136: 1-19.

Doğan, S. ve Tüzer, M. (2011). “Küresel İklim Değişikliği Ve Potansiyel Etkileri”, C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 12 (1).

Dong, P., Zhang, K., (2002). “Intense near-bed sediment motions in waves and currents”, Coastal Engineering, 45 (2). 75–87.

[64] Eichentopf, S.; Alsina, J.M.; Christou, M.; Kuriyama, Y.; Karunarathna, H., (2020). “Storm sequencing and beach profile variability at Hasaki”, Japanese Marine Geology, 424: 106153.

Elfrink, B., Baldock, T., (2002). “Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives”, Coastal Engineering, 45, 149-167.

Engelund, F. ve Fredsøe, J. (1976), “A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels”, Nordic Hydrology, 7/296-306.

Fernández-Montblanc, T.; Duo, E.; Ciavola, P., (2020). “Dune reconstruction and revegetation as a potential measure to decrease coastal erosion and flooding under extreme storm conditions”, Ocean Coastal Management, 188: 105075.

Fisher, J.S., Overton, M.F. and Chisholm, T., 1986. Field Measurements of dune erosion, 20th International Conference on Coastal Engineering, Taipei, Taiwan, pp. 1107-1115.

Fleming, C.A. (1977), The Development and Application of a Mathematical Sediment Transport Model, Ph.D. Thesis, University of Reading.

Fredsøe, J., Deigaard, R., (1992). “Mechanics of Coastal Sediment Transport”, Advanced Series on Ocean Engineering World Science, Singapore.

George, J., Sanil Kumar, V., (2019). “Long-Term in Nearshore Wave Climate and Littoral Drift at Ganpatipule Coast, Eastern Arabian Sea and its Link to

Pacific Climate Variability", Journal of Geophysical Research Oceans, 124: 7307-7327.

Gonzalez-Ondina, J.M., Fraccarollo, L., Liu, P.L.-F., (2018). "Two-level, two-phase model for intense, turbulent sediment transport", Journal of Fluid Mechanics, 839: 198–238.

Gowthaman, R., Sanil Kumar, V., Dwarakish, G.S., Shanas, P.R., Kumar, B.J., Singh, J., (2015). "Nearshore waves and longshore sediment transport along Rameshwaram Island off the east coast of India", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 7: 739-750.

Hattori M. ve Kawamata R. (1980). "Onshore-Offshore Transport and Beach Profile Change", Coastal Engineering, 72, 1175-1193.

Hsu, T.-J., Jenkins, J.T., Liu, P.L.-F., (2004). "On two-phase sediment transport: sheet flow of massive particles". Proc. R. Soc. Lond. A: Mathematichal. Physical and Engineering Science, 460 (2048): 2223–2250.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000), 5th Assessment Report.

Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C., (2020a). "Spatiotemporal Long-Term Trends of Extreme Wind Characteristics Over The Blacks Sea", Dynamics of Atmospheres and Oceans 90: 101132.

Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C., (2020b). "Assessment of long-termwind andwave trends in the Black Sea". Proceedings of Virtual Conference on Coastal Engineering, (36): 1.

Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C., Guner, H.A., (2021). "Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea using two different wind fields", Dynamics of Atmospheres and Oceans.

Kaczmarek, L.M., Ostrowski, R., Pruszak, Z., Rozynski, G., (2005). "Selected problems of sediment transport and morphodynamics of a multi-bar nearshore zone". Estuar. Coast. Shelf Sci., 62 (3): 415–425.

Kalligeris, N.,Smit, P.B., Ludka, B.C., Guza, R.T., Gallien, T.W., (2020). "Calibration and assessments of process-based numerical models for beach profile evolution in southern California", Coastal Engineering, 158: 103650.

Kamphuis, J.W., (1991). "Alongshore sediment transport rate", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 117 (6), 624–640.

Kamphuis, J.W., (2000). "Introduction to Coastal Engineering and Management", Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 16.

Kamphuis, J.W. (2010), Introduction to Coastal Engineering and Management, 2nd Edition, World Scientific Publishing Co. Pte. LTD., ısbn-13 978-981-283-484-3, Singapore.

Kapdaslı, S. (1992). Kıyı Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Karunarathna, H.; Brown, J.; Chatzirodou, A.; Dissanayake, P.; Wisse, P., (2018). "Multi-timescale morphological modelling of a düne fronted sandy beach", Coastal Engineering: 136, 161–171.

Kayhan, M., (2007). "Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye". Türkiye İklim Değişikliği Kongresi, 11 - 13 Nisan 2007, İstanbul.

Keijsers, J.G.S, Poortinga1, A., Riksen, M. J. P. M., Maroulis, J., (2014). "Spatio-Temporal Variability in Accretion and Erosion of Coastal Foredunes in the Netherlands: Regional Climate and Local Topography", Plos One, 9(3).

Kim, Y., Cheng, Z., Hsu, T.-J., Chauchat, J., (2018). "A numerical study of sheet flow under monochromatic nonbreaking waves using a free surface resolving eulerian two-phase flow model", Journal of Geophysical Research: Oceans, 123 (7): 4693–4719.

Komar, P.D., Inman, D.L., (1970). "Longshore sand transport on beaches", Journal of Geophysical Research, 75 (30): 5914–5927.

Kombiadou, K., Costas, S., Roelvink, D., (2021). “Simulating Destructive and Constructive Morphodynamic Processes in Steep Beaches”, Journal of Marine Science and Engineering, 9 (86).

Kriebel, D.L., Dean, R.G., (1993). “Convolution method for time-dependent beach-profile response”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 119: 204–226.

Larson, P., Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change; Report 1, Empirical foundation and model development. Technical Report CERC-89-9, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

Larson, M., Kraus, N., (1991). “Numerical model of longshore current for bar and trough beaches”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 117 (4): 326-347.

Larson, M., and N. C. Kraus. (1995). “Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales”, Marine Geology, 126: 111-127.

Larson, M., Rosati, J.D. ve Kraus, N.C. (2002). “Overview of Regional Coastal Sediment Processes and Controls”, ERDC/CHL CHETN-XIV-4, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Larson, M., Wise, R.A., Kraus, N., (2004). Modelling dune response by overwash transport. In: Mckee Smith, J. (Ed.), Coastal Engineering 29th International Conference. World Scientific, Lisabon, Portugal, pp. 2133–2145.

Larson, M., Hoan, L.X., Hanson, H., (2009). “Direct formula to compute wave height an angle at incipient breaking”, J. Waterway, Port, Coast., Ocean Eng., 136 (2): 119–122.

Lindemer, C.A., Plant, N.G., Puleo, J.A., Thompson, D.M., Wamsley, T.V., (2010). “Numerical simulations of a low-lying barrier island's morphological response to Hurricane Katrina”, Coastal Engineering, 57: 985–995.

Ludka, B.C., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., Yates, M.L., (2015). "Field evidence of beach profile evolution toward equilibrium", Journal of Geophysical Research Oceans, 120: 7574–7597

Masselink, G., Pattiaracthi, C., (1998). "The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment re-suspension", Marine Geology 146: 115–135.

McCall, R.T., Van Thiel de Vries J.S.M., Plant N.G., Van Dongeren, A.R., Roelvink J.A., Thompson, D.M., Reniers, A.J.H.M.,(2010). "Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island", Coastal Engineering 57: 668–683.

Medvedev, I., Rabinovich, A.B., Kulikov, E.A., (2016). "Tides in three enclosed basins: The Baltic, Black and Caspian Seas." Marine Science 3: 46.

Montreuil, A.L.; Chen, M.; Brand, E.; Verwaest, T.; Houthuys, R., (2020). "Post-storm recovery assessment of urbanized versus natural sandy macro-tidal beaches and their geomorphic variability". Geomorphology, 356: 107096.

Nicholson, J., Broker, I., Roelvink, J.A., Price, D., Tanguy, J.M., Moreno, L., (1997). "Intercomparison of coastal area morphodynamic models", Coastal Engineering, 31 (1–4): 97–123.

Nielsen, P. (1979), "Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport", Instıtute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Technical University of Denmark, Denmark, Series Paper No: 20.

Nielsen, P. (1985), "Short Manual of Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport", Technical Memorandum T. M. 85/1, Public Works Deparyment, N.S.W., Denmark.

Oh, J.E., Chang, Y.S., Jeong, W.M., Kim, K.H., Ryu, K.H., (2020). "Estimation of Longshore Sediment Transport Using Video Monitoring Shoreline Data", Journal of Marine Science and Engineering, 8: 572.

Okçu, D., Aslan, Z., (2007). "Küresel iklim değişimi ve Türkiye'deki olası etkileri", İAÜ ABMYO Dergisi, 6: 31-46.

Onea, F., Rusu, R., (2017). “A long-term assessment of the Black Sea wave climate”, Sustainability, 9: 1-19.

Overton, M.F., Pratikto, W.A., Lu, J.C., Fisher, J.S., (1994). Development of a dune erosion model using SUPERTANK data. Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Kobe, Japan.

Öztürk, K., (2002). “Küresel İklim Değişikliği ve Türkiye’ye Olası Etkileri”, G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 22 (1): 47-65.

Palmsten, M.L., Holman, R.A., (2011). “Infiltration and instability in dune erosion”. Journal of Geophysical Research, 116 (C10030: 1–18.

Pattiaratchi, C., Hegge, B.J., Gould, J., Eliot, L.G., (1997). “Impact of sea breeze activity on nearshore and foreshore processes in Southwestern Australia”, Continental Shelf Research, 17(13): 1539-1560.

Pender D. ve Karunarathna H., (2013) “A Statistical-Process Based Approach For Modelling Beach Profile Variaility ”, Coastal Engineering, 81, 19-29.

Plant, N.G., Holman, R.A., Freilich, M.H., Birkemeier, W.A., (1999). “A simple model for interannual sand bar behavior”, Journal of Geophysical Research, Oceans 104 (C7): 15755–15776.

Pruszak, Z., Zeidler, R., (1994). “Sediment Transport in Various Time Scales”, Coastal Engineering 182, 2513-2526.

Raubenheimer, B., Guza, R.T., (1996). “Observations and predictions of run-up”, Journal of Geophysical Research 101 (C10): 25575–25587.

Roelvink, J.A., (1993a). “Dissipation in random wave groups incident on a beach”, Coastal Engineering 19, 127–150.

Roelvink, J.A., (2006). “Coastal morphodynamic evolution techniques”, Coastal Engineering, 53: 277–287.

Roelvink, J.A., Reniers A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R. Lescinski, J., (2009). “Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands”, Coastal Engineering 56, 1133–1152.

Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., de Vries, J. T., Lescinski, J., McCall, R., (2010), “XBeach Model Description and Manual”.

Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., Dastgheib, A., 2018. Improving predictions of swash dynamics in xbeach: The role of groupiness and incident-band runup. Coast. Eng. 134, 103–123.

Ruessink, B.G., Kleinhans, M.G., van den Beukel, P.G.L., 1998. Observations of swash under highly dissipative conditions. J. Geophys. Res.: Oceans 103 (C2), 3111–3118.

Rusu, E., (2009). “Wave energy assessments in the Black Sea”, Journal of Marine Science Technology, 14: 359-372.

Sallenger, A.H., (2000). “Storm impact scale for barrier island”, Journal of Coastal Research, 16(3): 890-895.

Sayao, O.F.S.J., Nairn, R.B. ve Kamphius, J.W. (1985), “Dimensional Analysis of Littoral Transport”, Proc. Canadian Coastal Conf., St John’s.

Schoonees, J.S., Theron, A.K., (1993). “Review of the field-data base for longshore sediment transport”, Coastal Engineering, 19: 1-25

Schoonees, J.S., (2000). “Annual Variation In The Net Longshore Sediment Transport Rate”, Coastal Engineering, 40: 141-160.

Schwartz, M.L., (1967). “The Bruun theory of sea level rise as a cause of shore erosion”, Journal Geology, 75, 76-9.

Scott, T.; Masselink, G.; O’Hare, T.; Saulter, A.; Poate, T.; Russell, P.; Davidson, M.; Conley, D., (2016). “The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England”, Marine Geology, 382: 224–241.

Shanas, P.R., Sanil Kumar, V., (2014). “Coastal processes and longshore sediment transport along Kundapura coast, central west coast of India”, Geomorphology 214, 436-451.

Smith, E.R., Wang, P.W., Ebersole, B.A., Zhang, J., (2009). “Dependence of total longshore sediment transport rates on incident wave parameters and breaker type”, Journal of Coastal Research, 25 (3): 675-683.

Soulsby, R., (1997). Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford Publications, London.

Splinter, K.D., Davidson, M.A., Golshani, A., Tomlinson, R., (2012). “Climate controls on longshore sediment transport”, Continental Shelf Research, 48: 146-156.

Splinter, K.D., Palmsten, M.L., (2012). “Modeling dune response to an East Coast Low”, Marine Geology, 329 (331): 46–57

Stive M.J.F, De Schipper M.A., Luijendijk A.P., Aarninkhof S.G.J., Van Gelder-Maas C., Van Thiel De Vries J.S.M, De Vries S., Henriquez M., Marx S., Ranasinghe R., (2013). “A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: the sand engine”, Journal of Coastal Research, 29:1001–1008.

Sutherland, J., Walstra, D.J.R., Chesher, T.J., Van Rijn, L.C., Southgate, H.N., (2004). “Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth”, Coastal Engineering 51: 119–142.

Svendsen, I.A., (1984). “Wave heights and set-up in a surf zone”, Coastal Engineering, 8, 303–329.

Swart, D.H. (1976), “Coastal Sediment Transport”, Computation of Longshore Transport, Delft Hydraulics, The Netherlands, Report R968.

Şahin, C., Yüksel, Y., Güner, H.A., Öztürk, M., Şafak, I., (2021). “Akarsu Delta Sistemlerinin İklim Değişikliği Etkilerine Karşı Kırılganlığı: Sakarya Nehri Detası Örneği”, 117Y333, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).

Taborda, R., Ferreira, O., Dias, J.M.A., Moita, P., (1994). Field observations of the longshore transport in an high energy environment, Proceedings of the Littoral 94 Conference, Lisbon, Portugal, 479–487.

Toimil, A.; Losada, I.J.; Nicholls, R.J.; Dalrymple, R.A.; Stive, M.J.F., (2020). "Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review", Coastal Engineering 156, 103611.

Tomasicchio, G.R., D'Alessandro, F., Barbaro, G., Malara, G., (2013). "General longshore transport model", Coastal Engineering, 71: 28-36.

Tomasicchio, G.R., D'Alessandro, F., Barbaro, G., Musci, E., De Giosa, T.M., (2015). "Longshore transport at shingle beaches: An independent verification of the general model", Coastal Engineering 104: 69-75

Tuan, T.Q., Verhagen, H.J., Visser, P., Stive, M.J.F., (2006). Numerical Modelling of Wave Overwash on Low-crested Sand Barriers, 30th Coastal Engineering Conference. World Scientific, San Diego.

Türkeş M., Sümer, U.M., Çetiner, G., (2000). Küresel İklim Değişikliği Ve Olası Etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7-24, ÇKÖK Gn. Md., Ankara.

Türkeş, M., (1997a). "Hava ve iklim kavramları üzerine", TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 355: 36-37, Ankara.

Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü (TMGM), 2022.

Valchev, N., Davidan, D., Belberov, Z., Palazov, A., Valcheva, N., (2010). "Hindcasting and assesment of the western Black sea wind and wave climate", Journal of environmental protection and ecology.

Van der Graaf ve Van Der Overeem (1979), "Evaluation of Sediment Transport Formulae in Coastal Engineering Practice", Coastal Engineering, Vol 3, 1-32.

Van Rijn, L.C., (2014). "A simple general expression for ongshore transport", Coastal Engineering, 90: 23-39.

Van Thiel De Vries, J. S. M., (2009). "Dune erosion during storm surge", Ph.D Thesis, Delf University of Tehcnology.

Vellinga, P., (1982). “Beach and dune erosion during storm surge”, Coastal Engineering 6: 361–387.

Vousdoukas, M.I.; Almeida, L.P.M.; Ferreira, Ó., (2012). “Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. Earth Surface Processes And Landforms”, 37: 583–593.

Vousdoukas, M., Ferreira, O., Almeida, L., Pacheco, A., (2012). “Toward reliable stormhazard forecasts: Xbeach calibration and its potential application in an operational early-warning system”, Ocean Dynamics 62: 1001–1015.

Yüksel, Y., (2005). Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Planlama ve Tasarım), Deniz Mühendisliği Serisi No:2, Arıkan Ltd., İstanbul.

Yüksel, Y., (2011). Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Planlama ve Tasarım), Genişletilmiş 2. Baskı, Deniz Mühendisliği Serisi No:2, Arıkan Ltd., İstanbul.

Yüksel, Y., Tan, İ., Ayat, A., Arı Güner, H.A., Aydoğan, B., Şeker D., Kutoğlu, H., (2014). Integrated Model for Karasu Coastal Region. 8th Coastal Engineering Symposium. İstanbul, Turkey, 71-87.

Zheng, J., Dean, R.G., (1997). “Numerical models and intercomparisons of beach profile evolution”, Coastal Engineering, 30 (3–4): 169– 201.

White, T.E., (1998). “Status of measurement techniques for coastal sediment transport”, Coastal Engineering, 35: 17–45

Winter, R.C., Ruessink, B.G., (2017). “Sensitivity analysis of climate change impacts on dune erosion: case study for the Dutch Holland coast”, Climatic Change, 141:685–701.

Wright, L.D., Short, A.D., (1984). “Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis”, Marine Geology, 56 (1): 93–118.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Basaran, B., Guner, H.A., 2021. “Effect of wave climate change on longshore transport in Southwestern Black Sea”, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 258: 107415.»