T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİNDE KIYI ÇİZGİSİ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ: KARASU KIYI ALANI ÖRNEĞİ

Abdülkerim AÇIKKOL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. H. Anıl Arı GÜNER

Şubat, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİNDE KIYI ÇİZGİSİ GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ: KARASU KIYI ALANI ÖRNEĞİ

Abdülkerim AÇIKKOL tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

Jüri Üyeleri

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

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

Prof. Dr. İsmail DURANYILDIZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan İklim Değişikliği Etkisinde Kıyı Çizgisi Gelişiminin İncelenmesi: Karasu Kıyı Alanı Örneği 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.

Abdülkerim AÇIKKOL

Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışması ve lisansüstü eğitim sürecinde, her anında desteğini hissettiğim, tecrübesini ve bilgilerini tüm yönleriyle paylaşan, sabrını, nezaketini ve güvenini hiç esirgemeyen, saygıdeğer tez danışmanım, hocam Doç. Dr. Havva Anıl Arı GÜNER'e sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Lisansüstü eğitim sürecinde bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım, çalışmama ışık tutan ve örnek olan Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL, Sayın Prof. Dr. Esin Özkan ÇEVİK'e ve Yıldız Teknik Üniversitesi Kıyı ve Liman Mühendisliği programı kapsamında çalışmalar yapan akademisyen hocalarıma ve diğer çalışanlara teşekkür ediyorum.

Bu süreçte destek ve yardımları konusunda hiç geri adım atmayan, güzel sohbetlerle de süreci renklendirdiğimiz çok sevgili arkadaşlarım Furkan YÜKSEL ve Kazım ÖZDİL'e teşekkür ederim.

Süreç içerisinde sabırla desteklerinden ve teşviklerinden faydalandığım, motivasyonumun yüksek olmasında hep hassas davranan yöneticilerim Safiye YILMAZ ve Murat SÖNMEZ'e, eski yöneticilerime, çok sevgili oda arkadaşım Erhan TORAMAN'a ve diğer Sağlık Bilimleri Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda görev yapan çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

Son olarak bütün eğitim-öğretim hayatım boyunca beni destekleyen ve yanımda olan canım annem ve babama, kardeşlerime, ailemin diğer fertlerine ve yakın dostlarıma sonsuz sevgiler.

Abdülkerim AÇIKKOL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 1

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı ... 5

1.3 Hipotez ... 7

2 KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMİNİN MODELLENMESİ 8

2.1 Katı Madde Modellerinin Tanımı ... 8

2.1.1 Kıyı Profili Modeli ... 9

2.1.2 Kıyı Çizgisi Değişim Modeli ... 9

2.1.3 Üç Boyutlu Kıyı Gelişim Modeli ... 9

2.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı ... 11

2.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı ... 12

2.4 Katı Madde Bütçesi ... 16

2.5 Kıyı Çizgisi Değişiminin Modellenmesi ... 20

2.5.1 Sayısal Model: GenCade ... 20

2.5.2 GENESIS ve Cascade ... 22

2.5.3 Modele ait Temel Varsayımlar ... 23

2.5.4 Temel Denklem ... 26

2.5.5 Katı Madde Taşınımı ... 27

2.5.6 Ağ Sistemi ... 32

2.5.7 Sınır Şartları ... 33

2.5.8 Sayısal Modelin Stabilitesi ... 35

2.5.9 Ampirik Parametreler ... 37

2.5.10 Dalga Hesabı ... 39

2.5.11 Körfez ve Lagün Girişlerinin (Inlet) Temsil Edilmesi ... 44

2.5.12 GenCade İçeriğindeki Deniz Yapıları ... 46

3 KARASU KIYISI'NDA KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMİNİN TANIMI VE SAHAYA AİT VERİLER 55

3.1 Giriş 55

3.2 Çalışma Alanı 56

3.3 Rüzgar ve Dalga İklimi 58

3.3.1 Rüzgar 59

3.3.2 Dalga 59

3.3.3 Akıntı 60

3.4 Saha Ölçümleri 61

3.4.1 Batimetri ve Jeolojik Yapı 61

3.4.2 Katı Madde Özellikleri 62

3.4.3 Kıyı Çizgisi Verileri 62

4 KARASU KIYI ÇİZGİSİNİN GÜNÜMÜZE KADAR OLAN GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ 66

4.1 Giriş 66

4.2 Sayısal Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması 67

4.2.1 Dalga ve Rüzgar İklimi 67

4.2.2 Model Kalibrasyonu 69

4.2.3 Kalibrasyon Sonuçları 73

4.2.4 Modelin Doğrulanması 74

4.2.5 Modelin Çalışma Performansı 76

4.3 Uzun Dönemli Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi 78

4.3.1 Dalga ve Rüzgâr Verileri 78

4.3.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Model Sonuçları 81

4.3.3 Kıyı Çizgisi Değişimi Model Sonuçları 82

5 KARASU KIYI ÇİZGİSİ GELİŞİMİNDE GELECEKTEKİ OLASI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 85

5.1 Giriş 85

5.2 İklim Senaryoları 86

5.3 Dalga İklimi Değişimi 87

5.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarları 88

5.5 Kıyı Çizgisi Değişimi Model Sonuçları 93

6 SONUÇ VE ÖNERİLER 101

KAYNAKÇA 105

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 113

SİMGE LİSTESİ

η	Anlık su yüzeyi seviyesi
K_t	Ayrık dalgakıranlar için sabit bir iletim katsayısı
D_B	Basamak yüksekliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
BYP	Bypass faktörü
R_s	Courant sayısı
K_d	Dalga dönme katsayısı
E	Dalga enerjisinin sıklığı
C_g	Dalga grup hızı
K_r	Dalga kırılma katsayısı
u_m	Dalga kırılması anındaki dipteki yatay hız
T	Dalga periyodu
K_s	Dalga sığlaşma katsayısı
$\bar{v}_b$	Dalga tarafından oluşturulan akıntı hızı
θ_0	Dalga yaklaşım açısı
q_0	Deniz tarafına gelen veya giden kıyıya ait birim genişlikteki katı
F	Deniz yapısının üzerinden veya içinden geçen kum oranı
L_0	Derin deniz dalga boyu
H_0	Derin deniz dalga yüksekliği
ε_1, ε_2	Difüzyon katsayıları
w_s	Düşme hızı
D_{LTo}	En büyük kıyı boyu taşınım derinliği
σ_g	Geometrik standart sapma
ΔV	Hacim değişikliği
u	Hücre merkezindeki yatay hız
I_l	Islak ağırlık cinsinden taşınım değeri
D_K	Kapama derinliği
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

p	katı maddenin gözeneklilik (porozite) değeri
b	Kırılan dalga pozisyonu
H_b	Kırılan dalga yüksekliği
α_b	Kırılan dalganın kıyıya geliş açısı
γ	kırılma parametresi
$Q_{sağ}$	Kıyı boyunca sağa doğru taşınan katı madde miktarı
Q_{sol}	Kıyı boyunca sola doğru taşınan katı madde miktarı
D_{LT}	Kıyı boyunca taşınımın meydana geldiği derinlik
Δy	Kıyı çizgisi değişikliği
Δx	Kıyı çizgisi hücre uzaklığı
m	kıyı eğimi
q_s	Kıyı tarafına gelen veya giden birim genişlikteki katı madde hacmi
tanβ	Kıyıya yakın ortalama eğim
Y_{gro}	Mahmuz uzunluğu
Q_{net}	Net kıyı boyu katı madde miktarı
A	Ölçek parametresi
PERM	permeabilite katsayısı
T_p	Pik dalga periyodu
$\bar{v}_l$	Sörf bölgesindeki ortalama kıyı boyu akıntı hızı
ρ_s	Sudaki katı madde yoğunluğu
k_s	Taban pürüzlülüğü
Q_{top}	Toplam kıyı boyunca taşınan katı madde miktarı
D_G	Yapının deniz tarafındaki uç kısmına ait derinlik
Y_{nxt}	Yapıya bitişik kıyı çizgisi konumu
ϕ	Yatak malzemesi çapı için Wentworth ölçeği
g	Yer çekimi ivmesi

KISALTMA LİSTESİ

AR5	5th Assassment Report
BC	Bypass Katsayısı
BSS	Brier Skill Score
CERC	Coastal Engineering Research Center
CIRP	Coastal Inlet Research Program
DBW	Detached Breakwater
DHI	Danish Hydraulic Institute
ECMWF	The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GENCADE	GENESIS + Cascade
GENESIS	Generalized Model for Simulating Shoreline Change
IRM	Inlet Reservoir Model
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
NMSE	Normalized Mean Square Error
RCP	Representative Concentration Pathways
RSM	Regional Sediment Management
TMMOB	Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
XBEACH	eXreme Beach
1-D	1 Dimensional
2DH	2 Dİmensional Horizontal
2DV	2 Dimensional Vertical
3-D	3 Dimensional

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kıyısal katı madde kaynakları (Van Rijn, 1998) 19

Şekil 2.2 Kıyı çizgisi değişim hesabı için kütlenin korunumu şeması; a) Enkesit görünüşü, b) Üstten görünüş (Frey vd., 2012) 26

Şekil 2.3 Mahmuz ve ayrık dalgakıran olması durumunda kıyı çizgisi değişiminin şematik gösterimi, a) $a2$ değeri dahil edilmemiş b) $a2$ değeri dahil edilmiş (Frey vd., 2012) 30

Şekil 2.4 Sonlu farklar ağ şeması (Frey vd., 2012) 32

Şekil 2.5 Farklı BC değerlerine göre katı madde yığılmasının şematik gösterimi (Frey vd., 2012) 35

Şekil 2.6 Hesap Şeması (Kamphuis, 2000) 39

Şekil 2.7 Mahmuz yanında Dönme ve Sapma (Kamphuis, 2000) 40

Şekil 2.8 Dalga dönmesi hesabında kullanılan parametreler 43

Şekil 2.9 İnlet sistemine ait morfolojik elemanların etkileşiminin şematik gösterimi (Frey vd., 2014) 45

Şekil 2.10 Dalga iletim katsayısına bağlı kıyı çizgisi davranışı (Hanson ve Kraus, 1989) 49

Şekil 2.11 Kıyı duvarı yerleşiminin şematik olarak gösterimi (Frey vd., 2012) .. 52

Şekil 2.12 GenCade modelinde kıyı duvarı etkisinin kuramsal bir örneği (Hanson ve Kraus, 1985) 52

Şekil 2.13 Kıyı düzenlemesi örneği (Frey vd., 2012) 53

Şekil 3.1 Çalışma alanı Karadeniz ve Karasu kıyısı (Google Earth) 57

Şekil 3.2 Sakarya Nehri Deltası ve çevresi (Şahin vd., 2021) 58

Şekil 3.3 Karasu kıyısına ait akıntı yapısı (Yüksel vd., 2014) 60

Şekil 3.4 Karasu ayrıntılı batimetri haritası (TMMOB, 2012) 61

Şekil 3.5 30/07/2013 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021) 63

Şekil 3.6 31/08/2014 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021) 63

Şekil 3.7 09/07/2015 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021) 64

Şekil 3.8 30/06/1980 tarihli Keyhole-9 Uydu görüntüsü (Başaran ve Güner, 2021, Şahin vd., 2021) 64

Şekil 3.9 Karasu kıyısına ait 2021 Ocak ayı Sentinel-2B uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021) 65

Şekil 4.1 Karasu kıyısı için 2013-2015 yılları arası rüzgâr gülü (Şahin vd., 2021) 68

Şekil 4.2 Karasu kıyısı için 2013-2015 yılları arası dalga gülü (Şahin vd., 2021) 69

Şekil 4.3 Referans çizgisinin konumu ve ağ aralığı 70

Şekil 4.4 Yakın kıyı batimetrisinin düzleştirilmesi (Frey vd., 2012) 72

Şekil 4.5 2013-2014 kalibrasyon süreci kıyı çizgileri; a) 0-12.5 km arası, b) 12.5-25.2 km arası 74

Şekil 4.6 2014 – 2015 doğrulama süreci kıyı çizgileri; a) 0-12.5 km arası, b) 12.5-25.2 km arası 75

Şekil 4.7 Model kalibrasyon (2013-2014) ve doğrulama (2014-2015) süreçlerine ait sayısallaştırılmış kıyı çizgileri, a) sol uç, b) orta nokta, c) sağ uç .. 76

Şekil 4.8 Karasu bölgesine ait 1979-2018 yılları arasındaki dalga ve rüzgar gülleri; a) toplam dalga gülü, b) rüzgar gülü, c) soluğan dalgaları gülü, d) rüzgar dalgaları gülü (Başaran ve Güner, 2021) 79

Şekil 4.9 1981-2018 yılları arası Karasu kıyısına ait kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları 81

Şekil 4.10 1981-2018 yılları arası Karasu kıyısı kıyı boyu net taşınım miktarları 82

Şekil 4.11 1980-2018 yılları arası Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarları 83

Şekil 4.12 1980-1990-2000-2010 ve 2018 yılları arası Karasu kıyısı kıyı çizgisi değişimi model tahmini 84

Şekil 4.13 Sakarya Nehir ağzına yakın batı tarafındaki kıyı çizgisinin noktasal değişimi 84

Şekil 5.1 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 89

Şekil 5.2 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları 90

Şekil 5.3 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu net katı madde taşınım miktarları 90

Şekil 5.4 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları 91

Şekil 5.5 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları 92

Şekil 5.6 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu net katı madde taşınım miktarları 92

Şekil 5.7 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı..... 94

Şekil 5.8 RCP4.5 iklim senaryosuna göre orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı..... 94

Şekil 5.9 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarlarının karşılaştırılması 94

Şekil 5.10 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait Karasu kıyısı kıyı çizgileri 95

Şekil 5.11 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait uydu görüntüsü üzerindeki kıyı çizgileri 95

Şekil 5.12 RCP4.5 iklim senaryosuna göre maksimum yığılmanın oluştuğu noktadaki kıyı çizgisi değişimi 96

Şekil 5.13 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı..... 97

Şekil 5.14 RCP8.5 iklim senaryosuna göre orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı..... 97

Şekil 5.15 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarlarının karşılaştırılması 97

Şekil 5.16 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait Karasu kıyısı kıyı çizgileri 98

Şekil 5.17 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait uydu görüntüsü üzerindeki kıyı çizgileri 98

Şekil 5.18 RCP8.5 iklim senaryosuna göre maksimum yığılmanın oluştuğu noktadaki kıyı çizgisi değişimi 99

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Çalışmada kullanılan uydu görüntüleri (Şahin vd., 2021)..... 6

Tablo 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin genel sınıflandırması (Velden, 1989) 15

Tablo 3.1 Karasu bölgesi katı madde özellikleri (Başaran ve Güner, 2021) 62

Tablo 4.1 Model çalışma performansı açısından BSS değerleri (Sutherland vd., 2004)..... 77

Tablo 4.2 Model tahmin süreçlerine göre hata oranları 78

Tablo 4.3 1980-2018 yılları model sonucuna göre dalga parametrelerinin yıllık ortalama değişimi (Başaran ve Güner, 2021)..... 80

Tablo 5.1 Temsili Konsantrasyon Rotaları özellikleri 87

Tablo 5.2 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre 2100'e kadar dalga parametrelerindeki yıllık ortalama değişim (Şahin vd., 2021) 88

Tablo 5.3 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yıllık ortalama net ve brüt katı madde taşınım miktarları..... 93

Tablo 5.4 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yıllık ortalama erozyon ve yığılma miktarları 100

ÖZET

İklim Değişikliği Etkisinde Kıyı Çizgisi Gelişiminin İncelenmesi: Karasu Kıyı Alanı Örneği

Abdülkerim AÇIKKOL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER

Küresel iklim değişikliği nedeniyle hava sıcaklığındaki artış ve buzulların erimesi sonucu dalga iklimindeki değişim ve deniz seviyesinin yükselmesi kıyı sistemlerinde alansal ve zamansal ölçeklerde farklılıklar oluşturmaktadır. Bu etkiler altında kıyı alanlarında oluşan katı madde taşınımı (erozyon ve yığılma) sonucu kıyı çizgilerinde değişimler meydana gelmektedir. Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Sakarya ilinin Karasu ilçesine ait sahilden denize karışan Sakarya Nehrinin doğu tarafında yapılan son 40 yıllık incelemelerde erozyona uğradığı ve günlük yaşamı tehdit eder boyutta daraldığı görülmüş fakat nehrin batı kısmında çok fazla araştırma yapılmamıştır. Bu çalışmada nehrin batısında kalan Karasu kıyı çizgisinin son 40 yıllık değişimleri ve gelecek yıllar için dalga iklimi ve deniz seviyesindeki değişimlerin etkisi altında modellenerek gelecekteki araştırmalara ışık tutmak amaçlanmıştır. Bölgeye ait kıyı çizgisi değişiminin tahmini için Amerika Birleşik Devletleri Ordu Mühendisliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi (USACE-ERDC) tarafından geliştirilen tek boyutlu bir kıyı gelişim modeli olan GenCade sayısal modeli kullanılmıştır. Modelin kalibrasyon ve doğrulama sürecinde 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait PLEIADES uydu

görüntülerinin sayısallaştırılmasıyla elde edilen kıyı çizgileri ve Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI) tarafından geliştirilen MIKE 21 SW sayısal dalga modelinden elde edilen dalga verileri kullanılmıştır. Ardından Karasu kıyısına ait geçmiş 40 yıllık dönemdeki kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ve kıyı çizgisi değişimi belirlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında 1980 yılına ait Keyhole-9 uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilmiş kıyı çizgisi verileri, MIKE 21 SW dalga modelinden elde edilen dalga verileri ve kalibrasyon ve doğrulama sürecinde belirlenen parametreler kullanılmıştır. RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061- 2100) dönemleri için Karasu kıyısında kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişimi projeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Model tahmin sonuçlarına göre Karasu kıyısında erozyon açısından yakın ve orta gelecek arasında çok fazla farklılık oluşmadığı görülmektedir. Yığılma açısından incelendiğinde, yakın gelecekte yığılmanın fazla olduğu, orta gelecekte ise azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Karasu kıyısının orta gelecekte (2061-2100) erozyon ve yığılma açısından daha stabil hale geçtiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı çizgisi değişimi, GenCade, Karasu kıyısı, modelleme, erozyon

ABSTRACT

Investigation of the Impact of Climate Change on Shoreline Evolution: Case study of Karasu Coastal Region

Abdülkerim AÇIKKOL

Department of Civil Engineering

MSc Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Havva Anıl ARI GÜNER

As a result of the global warming and melting of glaciers due to global climate change, wave climate change and sea level rise create differences in spatial and temporal scales in coastal systems. Under these effects, changes in the shorelines occur in consequense of sediment transport (erosion and accretion) occurring in coastal areas. In the last 40 years, it has been observed that eastside of the Sakarya River, which is located in the Western Black Sea Region, and joins the sea from the coast of the Karasu district of Sakarya province, has been eroded and narrowed to a size that threatens daily life in the last 40 years, but not much research has been done in the western part of the river. In this study, it is aimed to shed light on future research by modeling the changes of the Karasu coastline to the west of the river for the last 40 years and the changes in the wave climate and sea level rise for the coming years. The GenCade numerical model developed by the United States Army Engineer Research and Development Center (USACE-ERDC) was used for the evolution of the Karasu coast. In the calibration and validation process of the model, the shoreline obtained by digitizing the PLEIADES satellite images of 2013, 2014 and 2015 and the wave data obtained from the MIKE 21 SW wave model developed by the Danish Hydraulic Institute (DHI) were used. Afterwards,

the hindcasts of the longshore sediment transport and shoreline change of the Karasu coast in the past 40 years were made, in this part of the study, the shoreline data obtained from the digitization of the Keyhole-9 satellite image of 1980 and the wave data obtained from the MIKE 21 SW numerical wave model and the parameters determined during the calibration and verification process used based on the RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios. Subsequently Karasu shoreline change and longshore sediment transport modeling studies were carried out for the near (2021-2060) and mid-future (2061- 2100) periods. It is noticed that there is no difference between the near and middle future in terms of erosion on the Karasu coast. When the forecasts of the numerical model are analyzed, it is observed that the accretion is high in the near future and decreased in the mid-future. Consequently, it is detected that the Karasu coast becomes more stable regarding erosion and agglomeration in the mid-future (2061-2100).

Keywords: Shoreline change, GenCade, Karasu coast, modeling, erosion

1 GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kıyı alanlarında deniz tabanındaki katı madde dalga ve akıntının etkisiyle sürekli olarak hareket halindedir. Bu hareket kıyı boyu veya kıyıya dik katı madde taşınımları olarak ifade edilmektedir. Kıyıya dik veya kıyı boyu katı madde taşınımıyla kıyıda erozyon veya yığılmalar meydana gelmekte ve bunların sonucunda kıyı çizgisi değişime uğramaktadır. Gelecek dönemlerde belirli bir bölgeye ait kıyı çizgisi değişiminin kıyı mühendislerince tahmin edilmesi, bununla birlikte tahmin sonuçlarına göre alınabilecek önlemlerin tartışılması önem arz etmektedir (Arı vd., 2011; Santiago vd., 2021; Ahammed ve Pandey, 2022).

Değişen küresel iklim şartları dalga ikliminde de değişikliklere sebep olmakla birlikte deniz seviyesinde de artış meydana getirmektedir. Rajasree vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada Hindistan'ın güneybatı kesiminde yer alan Karnataka eyaletine ait düz ve aktif bir kıyı olan Udupi sahilindeki kıyı çizgisi değişimi, küresel iklim değişikliği şartları esas alınarak LITPACK sayısal modeli yoluyla incelenmiştir. Rajasree vd. (2016) geçmiş yıllara ait uydu görüntüleriyle yaptıkları çalışmada kıyının önemli ölçüde erozyona uğradığını ve gelecek 35 yıl için yaptıkları modelleme çalışmasıyla bölgedeki erozyonun tıpkı geçmiş yıllardaki gibi devam ettiğini gözlemlemişlerdir. Davidson vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada ise gelecek dönemler için Avusturalya'nın Gold Sahili'ne ait kıyı çizgisi değişimi, Davidson ve Turner (2009) tarafından önerilen iki boyutlu davranışsal şablon modelinin basitleştirilmiş hali olan tek boyutlu yeni bir model yoluyla tahmin edilmiştir. Çalışmada kıyı çizgisi değişimi modelinin çalışma performansını tespit ederken kök ortalama kare hatası (root mean square error, RMSE) ve Brier Beceri Notu (Brier Skill Score, BSS) adlı iki ayrı istatiksel hata parametresini kullanmışlardır.

Santiago vd. (2021) İspanya'nın Bask Sahili'nde 150 km'lik bir alanda yer alan 28 adet farklı kıyı alanında iklim değişikliğinin kıyı erozyonuna etkisini

incelemişlerdir. RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre elde edilmiş dalga iklimi ve deniz seviyesindeki artışa göre gerçekleştirilen modelleme çalışmasında, Bask Sahili'nde 2100 yılına kadar meydana gelecek olan ortalama erozyonun RCP4.5 senaryosuna göre 10-45 m arasında, RCP8.5 senaryosuna göre ise 14-46 m arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Baptista vd. (2014) Portekiz'in kuzeybatı sahilinde orta dönem için 10, 15 ve 20 yıllık kıyı morfolojisindeki değişimi ve kıyı gelişim tahminlerini Uzun Süreli Yapılandırma (Long-term Configuration, LTC) ve GENESIS sayısal modelleri yoluyla tespit etmişlerdir. Bölgeye ait 2003-2008 yıllarının uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgisi verileri ile modellerin kalibrasyon süreçleri tamamlanmış ve iki sayısal modelin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada modellerin kalibrasyon süreçlerinde RMSE istatiksel hata parametresine göre çalışma performansları belirlenmiş, daha sonra 10, 15 ve 20 yıllık kıyı çizgisi değişimi tahmin çalışmaları yapılmıştır.

Thomas ve Frey (2013) yaptıkları araştırmada kıyı mühendisliği çalışmalarında kullanılan en yaygın tek boyutlu kıyı çizgisi değişim modellerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada GENESIS ile Cascade modellerinin birleştirilmesiyle geliştirilen GenCade sayısal modeli ile GENESIS, UNIBEST, LITPACK modellerinin; modeller hakkında dokümantasyon ulaşılabilirliği, kullandıkları arayüzler, kapsadıkları deniz yapıları, yanal sınır şartları, körfez ve lagünlere giriş bölgeleri gibi sığ alanların modele tanıtılması ile diğer değişken parametreler açısından karşılaştırmalı bir şekilde incelemesi yapılmıştır. Çalışmaya göre GenCade modelinde bulunup diğer modellerde bulunmayan en temel özellik körfez ve lagünlere giriş bölgelerinin modele dahil edilmesi yeteneğidir.

Alvarez-Cuesta vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, İspanya'nın Akdeniz kıyısında yer alan ve insan yerleşiminin fazla olduğu 40 km'lik bir sahil bölgesinde 2020-2100 yılları arası için RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre değişen dalga iklimi ve deniz seviyesi artışına bağlı kıyı çizgisi değişimi, erozyon etki modeli olan IH-LANS modeli yoluyla incelenmiştir. Dastgheib vd. (2022) yaptıkları çalışmada Japonya'nın Hasaki Sahili'nde kıyı erozyonunu ve buna bağlı kıyı çizgisi değişimini RCP2.6 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre Olasılıksal Kıyı Çizgisi Gerilemesi (The Probabilistic Coastline Recession, PCR) modelini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. 21. Yüzyıl sonuna kadarki dönem için

yapılan projeksiyonlarda yüzyıl sonunda yerleşimin olduğu kıyı alanı için RCP2.6 senaryosuna göre kıyının 17 m, RCP8.5 senaryosuna göre ise 29 m geri çekildiği, yerleşimin olmadığı bölgeler için ise RCP2.6 senaryosuna göre 15 m, RCP8.5 senaryosuna göre ise 7 m ilerlediği tespit edilmiştir.

Bhat ve Subrahmanya (2000) tarafından yapılan çalışmada Hindistan'ın Karnataka eyaletinin güney kesiminde yer alan 100 km'lik kıyı alanı incelenmiştir. Çalışmada son 90 yıldaki kıyı çizgisi değişimi doğal etkiler ve insan etkileri altında tespit edilmiştir. Mevcut eski topoğrafik haritalar 1996 ve 1998 IRS-1C uydusunun yüksek uzamsal çözünürlüklü (5.8 m) PAN verilerine dayalı olarak oluşturulan haritalarla karşılaştırılmıştır. Çalışma alanındaki kıyı duvarlarının kıyı çizgisi değişiminde etkisi olduğu, kıyıdaki genişlemenin ve delta oluşumunun tektonik yükselmelere bağlı olarak meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Toimil vd. (2020), küresel ve bölgesel iklim değişikliğinden etkilenen ve belirsizlikleri zamanla artan deniz seviyesi, dalga iklimi, fırtına dalgalanmaları ve gel-gitlerin birleşiminden kaynaklanan süreçleri araştırmışlardır. Çalışmada iklim değişikliğine bağlı bu süreçlerin kıyıda meydana gelen erozyon ve kıyı çizgisi değişimi üzerindeki etkisini modellemek için kullanılan çeşitli yöntemler tartışılmıştır. Kroon vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise kıyı koruma önlemleri olarak kıyı yenilemesi uygulamasının fazlalaşması göz önünde bulundurularak, kıyı çizgisi değişimi modellemelerinde meydana gelen belirsizliklerin artışı araştırılmıştır. Model belirsizliği Genelleştirilmiş Olası Belirsizlik Tahmini (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE) yöntemiyle tespit edilmiştir. Çalışmada tahmin edilen katı madde kayıplarında model belirsizliklerinin göz ardı edilmesi durumunda güven aralığının arttığı gözlemlenmiştir.

Davidson (2021) Kıyı Gelişimi Tahmini (Forecasting Coastal Evolution, ForCE) için sunulan yeni bir model üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, kıyı morfolojisindeki değişimleri inceleyen, daha çok ampirik parametrelerle çalışan, bilinen ve yaygın olarak kullanılan tek boyutlu kıyı gelişimi modellerinden farklı olarak gel-gitler, dalgalar, fırtına dalgaları ve deniz seviyesindeki değişimlerin etkisi altında modüle edilen dinamik bir kıyı gelişimi modeli olan ForCE modeli tanıtılmıştır. ForCE

modeli algoritması denge ilkelerini korurken, karmaşıklığı azaltılmış fizik tabanlı bir yaklaşımla çalışmaktadır. Gel-git akıntıları, deniz seviyesi artışı varyasyonları gibi faktörler bu modelde tanımlanmaktadır.

Ravens ve Sitanggang (2007) Galveston Adası'na ait kıyı bölgesinde 1956-2001 dönemi için katı madde taşınım çalışmaları ve GENESIS sayısal modelini kullanarak adanın kıyı çizgisi değişimini araştırmışlardır. Ding vd. (2021) ise GenCade sayısal modeli kullanarak Delaware kıyı bölgesine ait kıyı gelişimini ve kıyı çizgisi değişimini incelemişlerdir.

Bölgede TMMOB (2012) tarafından yapılan çalışmada Karasu Limanı'nın doğu kesiminde yer alan sahilde bölge halkı tarafından belirtilen kıyı daralmasının şehri olumsuz etkilediği bilgileri üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada kıyıda meydana gelen erozyonun somut bir örneği olarak İkinci Dünya Savaşından kalan koruganlardan birisinin kıyıya 95 metre olan uzaklığının 2012 yılında 10 metreye düşmesi gösterilmiştir. Yine bir diğer kıyı daralmasının getirdiği olumsuz gelişme ise bölgedeki İhsaniye köyüne ait Kum mahallesinin dalgalardan etkilenmesi ve sular altında kalması olarak belirtilmiştir.

Karasu kıyısında yapılan bir diğer çalışma ise Başaran ve Güner (2021) tarafından yapılan, Sakarya Nehri'nin batı kesiminde yer alan sahilde LITPACK sayısal modeli kullanılarak kıyı boyu katı madde taşınımının ve XBeach yazılımı ile kıyıya dik katı madde taşınımının yakın ve orta gelecek dönemler için tespit edilmesidir. Çalışmada 1979-2018 yıllarına ait dalga verileri kullanılmış ve bu dönemde bölgede meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım sonucunda kıyının nehir ağzına yakın batı kısmında yığılmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada bölgeye ait dalga ikliminden belirlenen soluğan ve rüzgar dalgalarının katı madde taşınımı üzerindeki farklı etkileri araştırılmış, soluğan dalgaların rüzgar dalgalarına göre katı madde taşınımı üzerinde daha etkili ve baskın olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma alanı olarak belirlenen Sakarya ilinin Karasu ilçesine ait sahilde Şahin vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre MIKE 21 SW dalga modelinden elde edilen dalga verileri kullanılarak kıyı çizgisi değişim tahminleri yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki farklı iklim senaryosuna göre Karasu kıyı alanında meydana gelen katı madde taşınım miktarları, üç farklı ampirik yöntem olan Kamphuis (1991), Kaczmarek vd. (2005) ve Bayram vd. (2007) ile LITDRIFT sayısal modeli kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre katı madde taşınım miktarının, sayısal model sonuçlarında diğer ampirik yöntemlerin sonuçlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Karasu kıyı çizgisi değişiminin tahmini için çalışmada LITLINE sayısal modeli kullanılmış, yakın ve orta gelecek dönemler için her iki senaryoya göre de kıyının Sakarya Nehir ağzına yakın batı kesiminde yığılmanın meydana geldiği, bölgenin geri kalan kısmında ise kıyının stabil bir yapıda kaldığı gözlemlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Kıyı çizgisi değişim tahminleri fiziksel veya sayısal modeller kullanılarak yapılmaktadır. Sayısal modeller kıyı gelişimi modelleri olarak adlandırılmaktadır ve çok boyutlu ile tek boyutlu sayısal modeller olarak değişmektedir. Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletleri Ordu Mühendisliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi (USACE-ERDC) tarafından geliştirilen tek boyutlu bir kıyı gelişim modeli olan GenCade sayısal modeli kullanılmıştır.

Bu çalışmada Karasu kıyısına ait katı madde özellikleri, kapama derinliği ve basamak yüksekliği gibi saha ölçümlerinden elde edilmiş veriler, Tablo 1.1'de görülen farklı tarihlere bağlı çeşitli uydu görüntülerinin sayısallaştırılmasından elde edilmiş kıyı çizgisi verileri ve Şahin vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada dalga modelinden elde edilen dalga verileri kullanılmıştır. Öncelikle modelin kalibrasyon süreci 2013-2014 yılları arasında, doğrulama süreci ise 2014-2015 yılları arasındaki kıyı çizgisi değişimi ölçüme ait kıyı çizgisiyle model tahmin sonuçlarının karşılaştırılmasıyla tamamlanmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde modelin çalışma performansı Brier Beceri Notu (Brier Skill Score, BSS) ve standartlaştırılmış ortalama kare hatası (normalized mean square error, NMSE) istatiksel parametrelerine göre tespit edilmiştir. Sonrasında 1980-2018 arası 38 yıllık geçmiş dönem kıyı çizgisi değişimi ve kıyı boyu katı madde taşınımı için modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için yapılan projeksiyon çalışmalarında

Karasu kıyı çizgisi değişimi ve kıyı boyu katı madde taşınım tahminlerinin yapılması ve sonuçlara göre çalışma alanındaki yaşamın sürdürülebilirliği açısından fikir alınması amaçlanmıştır. Küresel iklim değişikliğinin etkisi, dalga iklimindeki değişimin IPCC (2011) tarafından belirlenen RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre elde edilen dalga verileriyle birlikte modele tanıtılmış ve tespit edilmiştir.

Tablo 1.1 Çalışmada kullanılan uydu görüntüleri (Şahin vd., 2021)

Uydu	Tarih	Mekansal Çözünürlük (m)
Keyhole-9	30/06/1980	3.0
PLEIADES	30/07/2013	0.7
PLEIADES	31/08/2014	0.7
PLEIADES	09/07/2015	0.7
Sentinel-2B	01/01/2021	10.0

Söz konusu amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmanın kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır:

Bölüm 1'de çalışmada yapılan detaylı literatür araştırması, etkilenilen örnek çalışmalar, tezin amacı ve hipotezinden bahsedilmiştir.

Bölüm 2'de katı madde taşınımının ve kıyı çizgisi değişiminin tanımlanması ve kıyı çizgisi değişim modellerinin tanıtılması yapılmıştır. Ayrıca bu bölümde çalışmada kullanılan GenCade sayısal modeli detaylı olarak anlatılmış, modelin prensiplerinden ve temel denklemlerinden söz edilmiştir.

Bölüm 3'te çalışma alanı olarak belirlenen Karasu kıyısına ait saha çalışmaları, bölgenin batimetrik ve jeolojik yapısı, dalga ve rüzgâr iklimi ve kıyı çizgisi verilerinin oluşturulması anlatılmıştır.

Bölüm 4'te GenCade sayısal modelinden, modelin kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinden, bu süreçlerde modelin çalışma performansını BSS ve NMSE istatiksel yöntemlere göre tespit edilmesinden söz edilmiştir. Ayrıca bu bölümde

bölgedeki geçmiş 40 yıllık döneme ait kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişiminin modellenmesi gösterilmiştir.

Bölüm 5'te yakın ve orta gelecek dönemler için kıyı çizgisi değişimi projeksiyon çalışmaları yapılmıştır. Avrupa Orta Dönemli Hava Tahmin Merkezi'nden (ECMWF) elde edilen rüzgâr verilerinin dalga modeline RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre tanıtılmasıyla elde edilmiş dalga verileri kullanılarak yapılan Karasu kıyı çizgisi değişim tahminleri ve kıyı boyu katı madde taşınım çalışmaları bu bölümde anlatılmıştır.

Bölüm 6'da ise yapılan tüm çalışmaların neticesinde elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

1.3 Hipotez

Küresel iklim değişikliğiyle birlikte değişen dalga iklimi ve deniz seviyesi artışı sonucunda kıyı alanlarındaki morfolojik gelişimin araştırılması, kıyı boyu katı madde taşınımı çalışmaları ve kıyı çizgisi değişiminin incelenmesi, ayrıca bu çalışmaların sayısal modellerle yapılması, ulusal ve uluslararası literatürde birden fazla örneğiyle yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan GenCade sayısal modelinin ulusal veya uluslararası literatür incelendiğinde örneğine az rastlandığından, modelin kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde de yüksek performansla çalıştığı görüldüğünden dolayı bu çalışma önem arz etmektedir. Dalga iklimindeki değişimler ve deniz seviyesindeki artış sonucu sürdürülebilir kıyı alanları oluşturma ve gelecek dönemde örnek kıyı alanı için doğabilecek tehlikeleri önlemek açısından kıyı çizgisi değişiminin doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle doğru tahminlerin yapılabilmesi için tahmin yöntemlerinin çeşitlendirilmesi ve geliştirilmesi açısından gelecek çalışmalara ışık tutulması amaçlanmıştır.

2
KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMİNİN MODELLENMESİ

2.1 Katı Madde Modellerinin Tanımı

Kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi, etkin kıyı alanları yönetimi için önemli olup, çevrenin korunabilmesi ve sürdürülebilir gelişme için de gerekli olmaktadır. Bu durumda kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi için geliştirilen sayısal modellerde kullanılan verilerin doğru olması gerekmektedir. Bu verilerin yetersizliği ve kıyı yapılarının yanlış projelendirilmesi kıyı alanlarında geri dönüşü olmayan bazı sorunlar yaratmaktadır. Bu sebeple dalga verilerinin doğru elde edilmesi ve bu verilerin doğru sayısal modelle kıyı çizgisi gelişiminde kullanılması gerekmektedir. Kıyı alanları yönetiminde bu alanların davranışını önceden tahmin etmek ve en uygun koruma yöntemini seçmek için sayısal modelleme tekniği en güçlü yöntemdir (Arı, 2004).

Kıyı morfolojisindeki gelişim bazı karmaşık fiziksel süreçler içermektedir ve sayısal ifadelerle tam olarak tanımlanamamaktadır. Modelleme ifadeleri, bilinen fiziksel kurallarla bulunan deterministik bağıntılar veya laboratuvar ya da saha ölçümlerine dayanan ampirik formüller olabilmektedir. Kıyı gelişiminin modellenmesi, karmaşık olmayan tek boyutlu sayısal modellerle veya gelişmiş üç boyutlu modellerle uygulanabilmektedir. Bu farklılıklara göre model tercihi, temel sorunun getirdiği uzamsal ve zamansal ölçeklere göre belirlenmektedir. Gelişmiş bir 3-D model, kıyı profilinin kısa dönem gelişimi çalışmasında kullanılırken, basit bir 1-D modelse kıyı çizgisinin uzun dönem değişiminin zamandan bağımsız simülasyonlarında kullanılmaktadır. Mevcut modeller üç ana kategoride tanımlanmaktadır (Dabees, 2000):

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

2.1.1 Kıyı Profili Modeli

Kıyı profili değişim modelleri, fırtınalarla meydana gelen kıyı erozyonu ve ilerlemesi ile dalga hareketine karşı kumul malzemesinin davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Bu tipte bir model, kıyıya dik katı madde hareketiyle oluşan kısa dönemli profil değişimlerini modellemektedir. Bu modellerde kıyı boyu katı madde taşınımı dikkate alınmamaktadır. Eşik oluşumundan ötürü kırılan dalga parametrelerini esas alarak kıyı profili değişimini tahmin etmekte kullanılan birçok model geliştirilmiştir (Dally ve Dean, 1984; Kriebel ve Dean, 1984; Larson ve Kraus, 1989). Deterministik kıyıya dik katı madde taşınım modelleri dalga transformasyonunu ve profil boyunca ortalama hızları hesaplamaktadır. Böylelikle katı madde taşınımı, Bailard'ın (1981) enerji yaklaşımı yardımıyla, yatay hızların ve yerel taban şartlarının fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır (Arı, 2009).

2.1.2 Kıyı Çizgisi Değişim Modeli

Kıyı çizgisi değişiminin analitik modeli, zamana ve konuma göre sabit dalga koşulları altında katı madde taşınımı için basitleştirilmiş diferansiyel formdaki süreklilik denkleminin kapalı çözümüdür. Kıyı çizgisi değişiminin ilk sayısal modeli Pelnard-Considere'in (1956) tek çizgi teorisi ile verilmiştir. Bu teoride ilk varsayım, kıyı profilinin, belirgin bir katı madde taşınımının olmadığı kapama derinliğine kadar kendisine paralel olarak hareket ettiğidir. Kıyı profili değişimi olmadığı düşünüldüğü için (kıyı çizgisi değişimi kıyı boyu katı madde taşınım diferansiyelleri ile verilmektedir) kıyıya dik katı madde hareketi uzun dönemde ihmal edilmektedir. Kıyı çizgisi değişiminin sayısal modellemesi analitik kıyı çizgisi değişim modellerinin genelleştirilmiş halidir. Bu tip bir model, kıyı çizgisi gelişiminin zamanla ve konumla değişimini, kıyı yapısını, dalga iklimini ve sınır şartlarını geniş kapsamda benzeştirmektedir (Arı, 2009).

2.1.3 Üç Boyutlu Kıyı Gelişim Modeli

Üç boyutlu kıyı gelişim modelleri gelişmiş 3-D modellerinden, gelişmiş tek çizgi teorisi modellerine kadar değişiklik göstermektedir. Hidrodinamik ve morfolojik değişimi hesaplayan tam donanımlı 3-D modelleri pek kullanışlı olmamaktadır. Bu modeller arasında en kullanışlısı yarı 3-D modelleridir. Bunlar yakın kıyı

sirkülasyonunu, katı madde taşınımını ve taban değişimlerini belirlemek için geliştirilmiş iki boyutlu düşey modeli (2DV), hız profillerini hesaplayan iki boyutlu yatay modelle (2DH veya kıyı alanı modeli) birleştirmektedir (Briand ve Kamphius, 1990; Roelvink vd., 1994). Bu tip bir model, kısa dönem tahminlerinde (1 fırtınadan 1 yıla kadar) kullanılmaktadır ve ayrıca hesaplama kapsamlı ve modelin doğrulanması için detaylı bilgilere ihtiyaç duymaktadır. Daha geleneksel bir 3-D model ile katı madde taşınımı ve kıyı değişimini hesaplamak için iki boyutlu yatay bir modelin (2DH) hesapladığı yakın kıyı akıntı bilgileri kullanılmaktadır (Arı, 2009).

Sayısal modelin karmaşıklığı arttıkça, sistemin davranışını benzeştirme olanağı da artmaktadır fakat bunun yanında daha çok veri, zaman ve maliyet ihtiyacı meydana gelmektedir. Bu sebeple kıyı morfolojisi değerlendirme çalışmalarında ihtiyaca ve amaca uygun bir model seçilmelidir. Örneğin sadece kıyı çizgisi değişimini belirlemek için bir çalışma yapılacaksa üç boyutlu bir modelin seçilmesi uygun olmamaktadır. Bunun yanında kıyı profilini izlemek için de tek çizgi modeli yeterli olmamaktadır.

2.1.3.1 Tek Çizgi Modeli

Pratikteki uygulamalar için, kıyı çizgisini modellemede tek çizgi yöntemi daha basit ancak daha güçlü bir yöntemdir. 3-D kıyı gelişimini şematik 3-D modelleriyle verebilmek için tek çizgi teorisine birçok çalışma uyarlanmıştır. Bu modeller, kıyı profilinin şeklini kısıtlayan bazı basitleştirici kabuller altında kıyı boyu ve kıyıya dik doğrultudaki taban yüksekliklerinin değişimini tarif etmektedir (Arı, 2009).

Bir yıldan on yıla kadar olan kıyı çizgisi değişimi genellikte tek çizgi modelleri yardımıyla çözümlenmektedir. Kıyı çizgisindeki değişim yüz metrelerden onlarca kilometreleri kapsayacak biçimde tahmin edilebilmektedir. Tek çizgi teorisinde kıyı profilinin kıyıya paralel olarak hareket ettiği kabul edilmektedir. Yanı kıyı profilinin şekli sabit kalmaktadır. Kıyı profilinin açık deniz ve kıyı tarafındaki sınırları sabittir. Kum dalga kırılması sonucunda kıyı boyunca taşınmaktadır. Yakın kıyıdaki ayrıntılı kıyı sirkülasyonu ihmal edilmektedir.

Tek çizgi modellerinin kurulumu ve kalibrasyonu oldukça yavaş olmaktadır. Bunun sebebi kalibrasyon işlemi sırasında karmaşık etkileşimlerin basit ifadelerle

çözümlenmesidir fakat bu evre geçildikten sonra hesaplama oldukça hızlı olmakta ve birkaç senaryo birden rahatlıkla denenebilmektedir. Çoğu sayısal modelin lineer değişim kabulü yapmak ve bazı jeomorfolojik özelliklerin sonucunda bu özelliklerin etkileşimleri, davranışları ve geri mekanizmaları ile büyük ölçekli jeolojik kontroller iyi temsil edilememektedir. Kıyı çizgisi değişiminin sayısal modelleri genelde tümden ziyade kıyı davranışının ve değişiminin bazı parçalarını ortaya koymaktadır (Yalçın vd., 1998).

2.1.3.2 Çok Çizgi Teorileri (İki Çizgi Yaklaşımı)

Tek çizgi teorisi ile çok çizgi teorilerinin prensipleri aynıdır. En önemli fark, kıyıya dik katı madde taşınımının çok çizgi teorisinde dikkate alınmasıdır, böylece denge durumunda olmayan enkesit de hesaba alınmaktadır. Her bir bölge için bir derinlik çizgisinin gelişiminin hesabı tek çizgi teorisinin hesabına eşit alınabilir, ancak bu süreklilik denklemine ilave bir terimin dahil edilmesi ile mümkündür, bu da kıyıya dik katı madde taşınım bileşenidir. Tek çizgi teorisinde olduğu gibi her bir bölge için süreklilik ve hareket denklemleri geliştirilmektedir (Velden, 1989).

2.2 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı

Kıyıya belirli bir açıyla gelen dalgaların kırılma nedeniyle oluşturduğu enerjinin kıyıya dik bileşenleri kıyıya dik katı madde taşınımına sebep olmaktadır. Bu dalgalar etkisinde kıyıya dik doğrultuda açık deniz yönünde net taşınım varsa bu kıyıda erozyona sebep olmaktadır. Tersi tarafta kıyı yönünde net taşınım olması durumunda ise yığılma meydana gelmektedir.

Surf bölgesi dışında kıyıya dik katı madde taşınımı kıyıya doğru olmaktadır, surf bölgesi içinde ise net yörüngesel hızın etkisi ve net geri dönüş akımı arasındaki dengeye bağlı olarak kıyıya veya açık denize doğru yönü değişmektedir. Fırtına sırasında taşınım kıyı çizgisinin geri çekilmesine sebep olacak şekilde açık denize doğru olmaktadır ve erozyona uğrayan katı madde kırılma bölgesinde yakın kıyıdaki bir eşikte yığılmaktadır. Genellikle katı maddeyi kıyıya geri taşıyan ve kıyı basamağını yeniden oluşturan normal soluğan koşullarında kıyı yenilenmektedir. Fırtınanın sebep olduğu erozyon ve kıyı yenilenmesini içeren mevsimlik değişimler

nispeten kısa sürelerde oluşmaktadır. Kıyıya dik katı madde taşınımını kıyı çizgisi değişim modellerinin dışında tutmakla bu modellerde değişimlerin mevsimlik değil süre olarak en az yıllarla inceleneceği kabulü yapılmaktadır. Birçok durumda kıyıya dik katı madde taşınımının kıyı çizgisi değişiminde uzun dönem etkisi olmaktadır. Örneğin, ekstrem olaylarda ve kıyı materyalinin ince olduğu durumlarda fırtına dalgaları askı durumundaki katı maddeyi öyle açığa taşımaktadır ki soluğan dalgalarla bile geriye taşınım sağlanamamaktadır. Bu durumda kıyıya dik katı madde taşınımını modellemelerde dikkate almak, kıyı çizgisini daha doğru tahmin edebilmek ve kısa dönem değişimleri belirlemek için modelin çalışma süresini uzun tutmak oldukça önemlidir (Dabees, 2000).

2.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı

Kıyı alanlarında katı madde taşınımına sebep olan birçok neden bulunmaktadır. Bunların en önemlisi dalga etkisidir. Akarsu ve gel-git etkisi akarsu ağızlarında görülmektedir. Korunmasız ve kurak kıyı alanlarında rüzgar etkileri de oldukça önemlidir. Kıyı boyu katı madde taşınımında, kıyıya dik katı madde taşınımında olduğu gibi, dalga etkisine göre surf bölgesinin içinde ve dışında katı madde taşınım mekanizmalarında farklılıklar bulunmaktadır. Ancak kıyı sistemlerinin oluşumu açısından kıyı boyu ile kıyıya dik katı madde taşınımlarının birbirleri arasında etkileşiminin ve birbirleriyle bağlı bir mekanizmanın var olduğu söylenebilmektedir (Yüksel vd, 1998).

Dalga etkisiyle kıyı boyunca taşınım yapan katı madde hareketlerinde üç temel mekanizma bulunmaktadır. Bunlardan iki tanesi surf bölgesinde dalga kırılması ile ilişkilidir, diğeri ise kırılma noktasının açığında kalan dalga mekanizması ile ilişkilidir.

1- Dalgaların kıyı ile belli bir açı yaparak kırılması ve tırmanması daha sonra yerçekimi etkisi ile doğrudan geri dönmesi nedeniyle kıyı yüzeyi boyunca katı taneler zig-zag hareketleri yapmaktadır. Bu işlem kıyı eğiminin büyük olması durumunda kıyısal katı madde taşınımı olarak bilinmektedir. Eğer dalga daha büyük bir açı ile kırılırsa, bu durumda kıyı boyu taşınım modu hakim olmaktadır.

2- Kırılan ve kırılmış dalgaların surf bölgesi içinde hareket ettirdiği katı madde tanecikleri dalgaların veya diğer akıntıların kıyı boyu bileşeni boyunca taşınmaktadır. Bu işlem kıyı boyu kum eşikleri ile rölatif olarak geniş surf bölgesi mevcut olduğunda oldukça iyi gerçekleşmektedir.
3- Surf bölgesinin dışındaki kıyı boyu taşınım, dalgaların yörüngesel hareketi ile tabanda hareket eden tanecikler, dalgaların kütle taşınımı ya da diğer bir akıntı yapısı ile oluşmaktadır. Dalgaların kıyıya herhangi bir açıyla yaklaşmasıyla kıyıya dik katı madde taşınımının yanı sıra yörüngesel hızlardan kaynaklanan kütlesel taşınımın kıyı boyu bileşeni söz konu olmaktadır. Bu işlem dalga etkisinde oluşan kum dalgacıklarının veya taban şekillerinin oluşması sebebiyle oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum, hidrolik cilalı bir taban üzerinde kütle taşınımı ile oluşan akıntılardan kaynaklanan net katı madde taşınımının bazen ters doğrultuda meydana gelmesine sebep olabilmektedir.

Belli bir sürede taşınan katı madde miktarı kıyı boyu katı madde debisi olarak ifade edilmektedir. Genellikle bir yıllık dönem göz önüne alınarak yıllık katı madde taşınım debisi belirlenmektedir. Yıl içinde değişik yönlerden gelen dalgalara göre hesaplanan kıyı boyu katı madde debileri birbirlerine göre farklı olduklarından, kıyıdan bakıldığında katı madde taşınımı için sol ve sağ tanımları yapılırsa (Yüksel vd., 1998):

$$Q_{sg} = Q_{sr} + Q_{sl} \tag{2.1}$$

Burada;

- Q_{sr} = Kıyı boyunca sağa doğru taşınan katı madde miktarı
- Q_{sl} = Kıyı boyunca sola doğru taşınan katı madde miktarı
- Q_{sg} = Toplam kıyı boyunca taşınan katı madde miktarı (Q_{top})

$$Q_{sn} = Q_{sr} - Q_{sl} \tag{2.2}$$

Burada;

- Q_{sn} = Net kıyı boyu katı madde miktarı (Q_{net})

Brüt katı madde taşınımının miktarı o kıyı bölgesindeki deniz tabanındaki hareketliliği belirlemektedir, Q_{net} sıfır olsa da Q_{top}'ın yüksek olması o kıyıda deniz yapılarını ilgilendiren ciddi bir katı madde hareketliliğinin var olduğuna işaret etmektedir (Yüksel vd., 1998).

Temel Mekanizma

1- Dalganın yörüngesel hareketiyle katı madde hareketlendirilmektedir ve salınım yapmaktadır.
2- Dalga etkisi altında hareketlenen katı madde akıntı doğrultusunda taşınmaktadır. Bu akıntılar ya dalga hareketinin sebepiyet verdiği tek doğrultulu akıntılar ya da gel-git, rüzgar yoğunluk farkıyla meydana gelen akıntılardır.

Genel olarak su derinliğine eşit yüksekliğe ve birim genişliğe sahip bir düzlem boyunca katı madde taşınımı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$q_s = \frac{1}{t'} \int_0^{h+\eta} \int_0^{t'} c(z,t)u(z,t)dt\,dz \tag{2.3}$$

Burada; q_s katı madde taşınımı (m^3/ms), t' integrasyon periyodu (s), h yerel su derinliği (m), η anlık su yüzeyi seviyesi (m), $c(z,t)$ malzemenin anlık konsantrasyonu, $u(z,t)$ anlık hız bileşeni (m/s), z tabandan olan seviye (m), t zamandır (s).

Bu bölümde hız (u) kıyı boyu hızına eşit alınmıştır. Bu hız pratik olarak zamandan bağımsızdır, çünkü zamana bağlı hız bileşeninin neden olduğu dalgaların kıyıya ve dolayısıyla kıyı boyu hız doğrultusuna hemen hemen dik olduğu kabul edilmiştir. Hız zamandan bağımsız olduğunda $[u(z,t) \rightarrow u(z)]$ anlık konsantrasyon $[c(z,t)]$ yerine zamansal ortalama konsantrasyon $[c(z)]$ kullanılır.

Böylece kıyı boyu katı madde taşınım formülü daha uygun bir denkleme dönüşebilmektedir.

$$q_s = \frac{1}{t'} \int_0^{h+\eta} u(z)\,\overline{c(z)}\,dz \tag{2.4}$$

(2.4) eşitliği akarsular için kullanılan katı madde taşınım formüllerine benzemektedir. Prensip olarak her iki taşınım formülü de aynıdır, bundan dolayı

bu taşınım formüllerini aynı zamanda yalnız akıntı durumu için de kullanmak mümkündür. Ancak hız ve konsantrasyonu hesaplamak için kullanılan metotlar her durumda farklıdır. Hız oluşan kuvvetlere ve taban kayma gerilmesine bağlıdır. Taban kayma gerilmesi dalga hareketinden etkilenmektedir. Kıyı boyunca katı madde konsantrasyonu akarsudakinden daha fazladır çünkü dalga hareketi tabandaki malzemeyi karıştırmaktadır. Konsantrasyon başlıca dalga hareketine bağlıdır. Bu nedenle (2.3) denklemini (2.4) denklemine dönüştürerek çözmek daha uygun ve kolaydır ancak dalga etkisini ihmal etmek mümkün değildir (Yüksel vd., 1998).

Geçmişte birçok araştırmacı katı madde taşınımını belirlemek için uğraşmıştır. $u(z)$ ve $c(z)$ çeşitli parametrelere (dalga karakteristikleri (H_0, T), kırılma parametresi (γ), katı madde karakteristikleri (d_{50}), dalga yaklaşım açısı (θ_0), kıyı profilinin eğimi (m), taban pürüzlülüğü (k_s)) bağlıdır. Çeşitli çözümler arasındaki fark yukarıda ifade edilen parametrelerin dikkate alınma şeklidir. Örneğin bazı formüller kırılma bölgesinde katı madde taşınımı dağılımını verirler, SPM formülü (CERC, 1984) kırılma bölgesi boyunca toplam kıyı boyu katı madde taşınımını vermektedir. Kıyı boyu katı madde taşınımı sınıflandırılması genel haliyle Tablo 2.1'de gösterilmiştir (Yüksel vd., 1998).

Tablo 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin sınıflandırması (Velden, 1989)

Model	Sınıflandırma
SPM (CERC, 1984)	Enerji modeli
Davies ve Kamphuis (1985)	Enerji modelini, tane boyutunu ve kıyı eğimini içerir.
Sayao, Nairn ve Kamphuis (1985)	Enerji modelini, tane boyutunu ve kıyı eğimini içerir.
Bijker (1971)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.

Tablo 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınım modellerinin sınıflandırması (Velden, 1989), (devamı)

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 de Graaff ve Van Overeem, 1979)	Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Ackers-White (Fleming ve Swart, 1982)	Dalga ve akıntı şartlarının geniş bir aralığından türetilen harekete başlangıç kriteri vardır.
Nielsen (1979, 1985)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Kamphuis (1991)	Kıyı eğimini ve taban malzemesinin özelliklerini dikkate almaktadır.

2.4 Katı Madde Bütçesi

Katı madde bütçesine ait tahminlerin yapılması, doğa yapılarının (gel-gitle oluşan doğal ağızlar, vb.) etrafında gerçekleşebilecek erozyon miktarını ve önemini belirlemek ve mühendislik faaliyetleri nedeniyle (dalgakıranların ve barajların inşaat, vb.) meydana gelebilecek olası etkilerin değerlendirilebilmesi için önemli olmaktadır.

Belirlenmiş bir alan için yapılan katı madde bütçesi tespiti, depolanma ve erozyonla sonuçlanan değişken katı madde kaynak ve kayıplarının göreceli olarak önemini vermektedir. Katı madde bütçesi; temelde giren ve çıkan kütlenin

dengesidir. Kütlenin veya hacmin bir bölgedeki zamanla değişimi, giren katı madde ve çıkan katı madde arasındaki farka eşit olmaktadır (Yüksel, 2005).

Kıyıya dik katı madde bütçesi, mümkün olduğu kadar açığa uzanabilmekte ve sonunda geçiş derinliğindeki kıyı alanını (20 m derinliğe kadar) kaplamaktadır, böylece kırılma bölgesi ve kıyı alanı arasındaki bağlantı tespit edilmektedir (katı madde alışverişi).

Muhtemel katı madde kaynakları (Şekil 2.1):

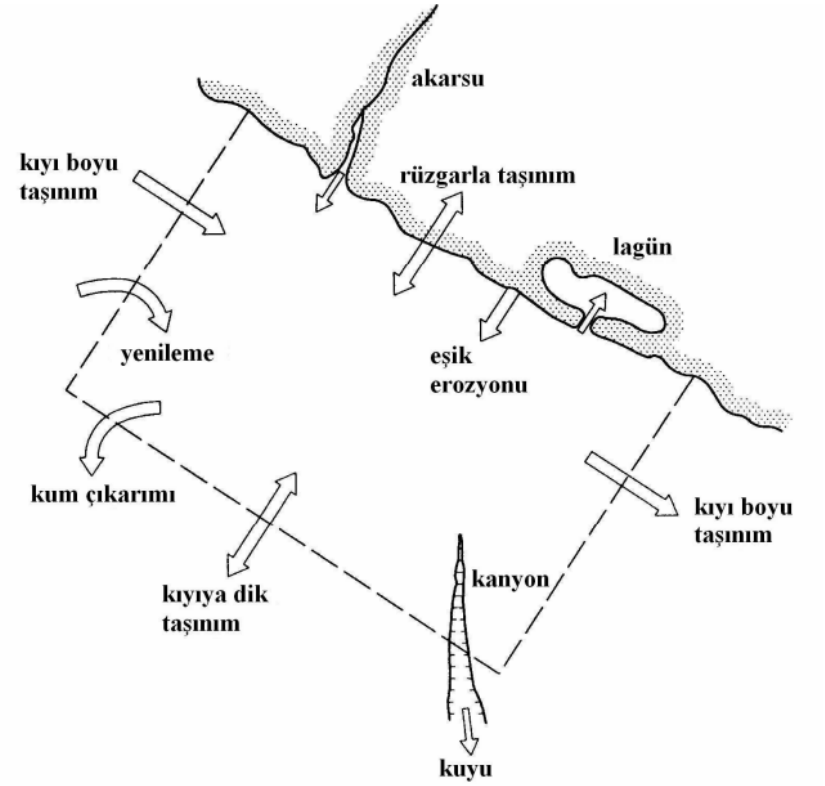
- Akarsular; akarsuya ait drenaj havzalarının doğal yapısına, bitkilerin yoğunluklarına, iklim sistemine (yağış vb.), katı madde çeşidine (çamur, silt, kum), baraj veya kum çıkarım işleminin varlığına (suya gelen katı madde miktarında düşüş) bağlı olmaktadır.
- Akıntılar; yoğunluk veya gel-git akımları kıyı bölgesine alüvyal katı madde taşıyabilmektedir.
- Eşik erozyonu/yamaç erozyonu; dalgaların akıntı ile hareket etmesi fırtına esnasında kıyı çizgisinde ciddi miktarda geri çekilmeye sebep olabilmektedir (10 m/olay); dalgalar eşik veya yamaçlarda altının oyulmasına neden olabilmektedir. İngiltere'deki Holderness Kıyısı (2 m/yıl) ve Hollanda'nın kuzey kıyı bölgesi (uzun dönemde oluşan miktar ile 2, 3 m/yıl olarak değişebilmektedir) buna iyi bir örnektir; gel-gitle oluşan doğal ağızların yakınındaki kıyı bölgeleri (kuyuya benzer davranırlar) özellikle önemli olmaktadır; eğer yamaçlar kil ve siltten oluşmaktaysa, kıyı alanına katkısı minimum olacaktır, çünkü katı madde hacminin büyük çoğunluğu suyun derin kısımlarına taşınacak veya komşu havzada kalacaktır; erozyon miktarının tahmin edilebilmesi; aşınma yapan tabakaların boyuna ve uzunluğuna, yamaç maddesine ait kum yüzdesinin bilinmesine bağlıdır.
- Açık deniz kıta sahanlık alanı (lokal kum basamakları); kıyı tarafına doğru taşınım kıta sahanlığı bölgesinden kıyıya doğru katı madde taşımaktadır; Osborne vd. (1991) ABD'nin doğu kıyısında kıta sahanlığında ve kıyıya yakın kumsallardaki kumun tanecik yapısını incelemişler ve katı maddenin büyük kısmının (%30-%40) kıta sahanlığından yakın kıyıya dalga hareketi ile taşındığını gözlemlemişlerdir.

- Kıyı yenilenmesi; kıyıda veya kıyı yüzeyinde kumun pompalanmasıyla yapay şekilde birikmesi, erozyona karşı koruma tamponu oluşturması ve böylece kıyı çizgisinde geri çekilmeyi engellemesi sebebiyle komşu açık denizlerinden, göl ve kıyı alanlarından kumun taranma işlemi,
- Biyolojik depolama; tropikal bölgelerde doğal üretimlerin katkı yapması (mercanlar),
- Hidrolojik depolama; deniz suyunda doğrudan çökelme nedeniyle maddenin oluşumu (kalsiyum-karbonat tanecikleri),
- Rüzgarla taşınan kum; rüzgarın esmesi genel olarak kıyıda katı madde kayıplarına sebep olabilmektedir, bu materyal esasen eşik alanda birikmektedir, kıyıda azalma yapan katı maddenin miktarı kumul alanda gözlemlenen hacim değişiminden tahmin edilebilmektedir (stereo fotoğraflama teknikleri).

Muhtemel katı madde kayıpları:

- Koy, göl ve iç deniz gibi alanlarda kumun tutulması; gel-git, rüzgar ve yoğunlukla meydana gelen net katı madde sirkülasyonları kıyı bölgelerinde katı madde kaybına sebebiyet vermektedir.
- Kum çıkarımı; ticari sebeplerle kumun kıyı alanından çıkarılma işlemi yalnızca sıkça yığılmaların görüldüğü alanlarda mümkün olmalıdır.
- Derin açık deniz bölgelerinde/çukur alanlarında ve deniz altında kumun tutulması; özellikle küçük çaptaki taneler askı halinde alandan taşınabilirler, genelde kanyonlar derin denizlerde yer almaktadırlar fakat bazı durumlarda (Güney Kaliforniya) kanyonların başlangıç kısmı kıyı alanının yakınında sığ sularda konumlanabilmektedir ve katı madde taşınımı engellenmektedir. Katı madde bazen yoğunluk akımı etkisinde derin sulara taşınmaktadır; bir kanyon bazen koya kadar uzanmakta ve kumu akarsulardan açıkta tutmaktadır (Afrika'nın batı sahilindeki Congo Kanyon'u).
- Rüzgar ile kıyı alanından kumul alanlara taşınım yapan kum,
- Çözünme ve aşınma; kıyı eğimi, aşınma ve ayırıcı taşınım olayları yüzünden katı madde kaybının sonucu olabilmektedir; katı maddenin kademeli olarak aşınması katı madde kaybına neden olabilmektedir çünkü küçük

yapılı taneler askı maddesi olarak alandan taşınabilmektedirler; rölatif olarak kısa mesafelerde (10 km) aşınım sadece kaba malzemeler için belirgin olmaktadır (çakıl ve taş, Chesil sahili, İngiltere); deniz ve mercan kabuğu gibi katı maddeler aşınım ve çözünmeye karşı daha dayanıksız olmaktadır (Van Rijn, 1998).



Şekil 2.1 Kıyısal katı madde kaynakları (Van Rijn, 1998)

Burada kaynaklar ve kayıplar dönüşümsüz bir doğanın olguları olarak tariflenmiştir; bir yamaçtan aşınan bir katı madde partikülü bu sisteme geri dönememektedir ve bir kanyonda depolanan bir partikül kıyı alanı için daimî bir kayıptır.

Kaynak ve kayıplarla birlikte depo ve yığılmalar da ayrılmalıdır. Depolar, kıyı sistemlerinde taşınım yapan veya hareket etmeyen kum/çakıl eşik veya basamaklar olabilmektedirler. Belli zamanlarda katı madde tanecikleri buralarda depolanabilmektedirler, fakat tekrar taşınım işleminde yer almak için hareketlenmektedirler (Yüksel, 2005).

Karasal yığılmalar:

- Çakıl bariyer sahilleri,

- Ağızlardaki diller,
- Yarımay çıkıntılar (burunlar),
- Kumul sistemleri,

formunu almaktadırlar.

Deniz yığılmaları gel-git özellikleri ile bağıntılıdır, bunlar:

- Ağız girişleri,
- Kapalı kanallar,
- Burundan yansıyan gel-git nedeniyle oluşan vortisite kabarmaları.

Kaynaklar ve kuyular, jeolojik bilginin analizi veya ağır mineraller, deniz kabukları, oksit tabakalar, sistematik incelme ve katı maddelerin sınıflandırılması gibi doğal verilerin analiz edilmesiyle nitelendirilebilmektedirler (Yüksel, 2005).

Net kıyı boyu taşınım hacmi, mahmuzlar, dalgakıranlar, batık açık deniz dalgakıranları, burunlar gibi insan eliyle yapılmış yapıların veya dil, tombolo gibi formların etrafında meydana gelen yığılmanın şeklinden tahmin edilebilmektedir (Arı, 2004).

2.5 Kıyı Çizgisi Değişiminin Modellenmesi

2.5.1 Sayısal Model: GenCade

GenCade, kıyı alanlarında katı madde taşınımını, kıyı morfolojisindeki değişimleri, kumsalların hacimsel gelişimini, körfez ve lagünlere girişlerdeki ve mühendislik yapılarındaki kum geçişini hesaplamak için geliştirilen tek boyutlu yeni bir sayısal modeldir. GENESIS modeli (Hanson ve Kraus, 1989) ve Cascade modelinin (Larson vd, 2003) sentezlenmesiyle oluşan GenCade modeli, kıyı projelerinin lokal modifikasyonları ve bölgesel kümülatif etkilerini analiz etmek ve doğru bir şekilde çözümlemek için, proje ölçekli mühendislik tasarım seviyesindeki hesaplamalarla bölgesel ölçekli planlama seviyesindeki hesaplamaları birleştirmektedir. Model ilk olarak Bölgesel Katı Madde Yönetimi (Regional Sediment Management, RSM) ve Kıyı Girişleri Araştırma Programı (Coastal Inlets Research Program, CIRP)'nın katkısıyla, Amerika Birleşik Devletleri Ordu

Mühendisliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi (USACE-ERDC) tarafından 2012 yılında geliştirilmiştir (Frey vd., 2012).

GenCade modeli tarama, dolgu gibi mühendislik faaliyetleriyle birlikte iskele, kıyı duvarı, mahmuz ve dalgakıran gibi deniz yapılarının etkilerini içermektedir. Kıyı çizgisi değişiminin yanı sıra model, çıktı olarak katı madde taşınım miktarlarını, körfez ve lagünlere girişlerdeki sığ bölgelerin kum hacmi gelişimlerini de vermektedir (Munger ve Frey, 2015).

GenCade kıyı çizgisi değişimini, kırılan dalga yüksekliği ve kırılan dalga açısı parametrelerinin etkisi altında meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımı ve büyük ölçekli bölgesel morfolojik etkiler altında modellemektedir. Körfezler, lagünler ve bitişik sahiller gibi birbiri ile ilişki içerisinde olan kıyı projelerinin ve morfolojik özelliklerin gelişimi GenCade modeli tarafından benzeştirilmektedir. Modelin ilk versiyonu, dalga kaynaklı kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarını, kıyı çizgisi değişimini, gel-git düzlüklerinin gelişimlerini, bypassı, kıyı stabilizasyon ve restorasyon projelerinin projeksiyonlarını hesaplamaktadır. Model insan etkisi ve doğal etkiler altında proje ölçeğinde ve bölgesel ölçekte mühendislik uygulamalarıyla, orta ve uzun vadeli morfolojik tepkilerin tahmini için tasarlanmıştır. GenCade:

- Plan düzeyindeki çalışmalarla mühendislik tasarımı çalışmalarını entegre etme,
- Bir yıldan yüz yıla kadar değişebilen zaman ölçeklerinde hesaplama yapma,
- Bölgesel eğilimleri muhafaza etme ve denge koşullarına yakınsama,
- Bypass ve düzlüklerin gelişimini hesaplayarak geçişleri (inlet) dahil etme,
- Deniz yapılarına ait özellikleri hesaplama ve çözümleme,
- Lokal projelerin bölgesel ölçekte etkileşimi yoluyla kümülatif etkilerin modellemesini kapsamaktadır (Frey vd., 2012).

Ayrıca GenCade sayısal modeli:

- Değişken çözünürlüklü ağlar,
- Körfez ve lagünlerde bypass işlemi,
- Düzlüklerde katı madde dengesinin hesaplanması için Körfez ve Lagün Girişleri Rezervuar Modeli (Inlet Reservoir Model, IRM),

- Bölgesel morfolojik eğilimlerin model yoluyla temsili,
- Kıyı yapılarının etkileri (mahmuzlar, iskeleler, dalgakıranlar, kıyı duvarları vs.),
- Dalgakıranların arkasındaki muska ve tomboloların hesabı,
- Ayrık dalgakıranların zamana bağlı geçirimliliği,
- Kırılan dalga özelliklerinin etkin bir şekilde hesaba dahil edilmesi gibi özellikleri içermektedir (Frey vd., 2012).

2.5.2 GENESIS ve Cascade

GenCade sayısal modeli iki eski kıyı çizgisi değişimi modeli olan GENESIS (Hanson, 1987; Hanson ve Kraus, 1989; Gravens vd., 1991; Hanson vd., 2006) ve Cascade (Larson vd., 2003; Larson ve Kraus, 2003; Larson vd., 2006; Connell ve Kraus, 2006; Larson vd., 2007) sayısal modellerinin yeteneklerini birleştirmek ve daha iyi hale getirmek için geliştirilmiştir. GenCade modelinin adı GENESIS ve Cascade kelimelerinin harmanlanması yoluyla elde edilmiştir. GENESIS (Kıyı Çizgisi Değişiminin Benzeştirilmesi için Genelleştirilmiş Model, GENEralized model for SImulating Shoreline Change) uzun bir süre boyunca geliştirildiğinden ve tasarım uygulamalarında geniş bir yelpaze içerdiğinden GenCade sayısal modeli temelinin büyük bir kısmını sağlamaktadır. Cascade modelindeki bölgesel ve büyük ölçekli süreçler, körfez ve lagünler için uygulanan bypass işlemleri, düzlüklerdeki katı madde hacimlerinin değişimi GenCade modelinin temel işlevleri olarak GENESIS modeline dahil edilmiştir (Frey vd., 2012).

GENESIS kıyı yapıları ve mühendislik faaliyetleri (kıyı dolgusu, kum taraması vb.) üzerindeki dalga etkilerinin, orta ve uzun vadeli kıyı çizgisi değişimi üzerindeki etkisini hesaplamak ve modellemek için geliştirilmiştir. Hanson ve Kraus (1989) GENESIS model teorisinin ve yeteneklerinin kapsamını tanımlamaktadır. Gravens vd. (1991), kıyı mühendisliği uygulamalarına rehberlik etmek için girdi ve çözüm dosyalarının geliştirilmesi için kullanıcıya yönelik bir kılavuz sunmaktadır (Frey vd., 2012).

Cascade modeli bölgesel katı madde yönetimi ve kıyı planlama uygulamaları için bölgesel ve yerel ölçekte kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı gelişimini modellemektedir. Model verimli biçimde yıllardan yüzyıllara kadar değişen

süreçler için zaman ölçekli hesaplama yapmaktadır. Cascade modelinin kullanılabileceği kıyı bölgesi, katı maddenin körfez ve lagün girişleri gibi sığ alanların etrafında taşındığı veya bypass edildiği bariyer adaları olarak tanımlanmıştır. Cascade modelinin kapsadığı bir modül olan Giriş Rezervuar Modeli (IRM)'nin basitleştirilmiş bir versiyonu, düzlüklerin morfolojik özellikleriyle (gel-gitin oluşturduğu deltalar, bypass bölgeleri vb.) birlikte katı madde yığılması ve taşınımını modelleme yeteneğine sahiptir. IRM ayrıca GenCade modeline dahil edilmiş ve geliştirilmiştir. Geçmişteki uygulamalarda Cascade, GENESIS modeline ait mühendislik tasarımı çalışmalarında sınır koşulları olarak bölgesel katı madde taşınımı ve planlama kısmında katı madde bütçesine ait bilgileri sağlama aracı olarak kullanılmıştır. GenCade modelinin geliştirilmesi, kıyı gelişimi modelleme çalışmalarının bölgesel ölçekte sorunsuz çalıştırılabilmesi için ardışık zaman ve alan ölçekleriyle hesaplanan bölgesel taşınımın, koy, körfez ve lagünlerdeki kıyı gelişimi ve katı madde taşınımını modelleme sürecini kolaylaştırmıştır (Frey vd., 2012).

2.5.3 Modele ait Temel Varsayımlar

GenCade tek boyutlu bir sayısal model olması sebebiyle bazı temel varsayımlarla çalışmaktadır. Bunlar:

- Kıyı profil şeklinin sabit kalması,
- Kıyı profilinin denizden kıyıya ve kıyıdan denize doğru derinlik limitlerinin sabit olması,
- Katı maddenin kırılan dalgaların ve kıyı boyu akıntılarının etkisiyle taşınması,
- Yakın kıyı sirkülasyonunun ayrıntılı yapısının ihmal edilmesi,
- Kıyı çizgisi gelişiminin uzun dönemli eğiliminin olmasıdır.

Model, kıyı profilinin fırtınaların sebep olduğu ekstrem değişimlerin dışında, kıyıya özgü ortalama bir şekli koruduğunu varsaymaktadır. Bu varsayıma göre dik ve sarp bir yapıya sahip kumsallar dik ve sarp formu, az eğimli kıyılar ise uzun vadede hafif eğimini korumaktadır. Dalga iklimindeki mevsimsel değişimler, kıyı çizgisinin kıyıya veya denize doğru hareket etmesine neden olsa da GenCade modeli bunun sonucunda profilin ortalama eğiminde meydana gelen değişimin ve

toplam aktif profil üzerindeki ortalama kıyı eğimindeki değişimin nispeten küçük olduğunu varsaymaktadır (Frey vd., 2012).

Bir diğer geometrik varsayım ise, kıyı boyu katı madde taşınımının kıyı profilinde iyi tanımlanmış iki sınır kotu arasında meydana geldiğidir. Bu iki sınır kotu kara tarafında basamak yüksekliğinin üst kotu, deniz tarafında ise kapama derinliği olarak tanımlanmıştır. Katı madde hareketinin bu iki kot arasında meydana geldiği varsayımı, kıyı çizgisi değişiminin hesaplanabileceği ve katı madde hacminin değişebileceği kıyı enkesitinin belirlenmesinin basit bir yöntemini sağlamaktadır (Frey vd., 2012).

GenCade modeli ayrıca kıyı boyu katı madde taşınım miktarının hesaplanabilmesi için tahmine dayalı ifadelere ihtiyaç duymaktadır. Açık kıyı alanları için taşınım miktarı kıyı çizgisi doğrultusuna göre kırılan dalga yüksekliğinin ve yönünün bir fonksiyonudur. Taşınım miktarı, kırılan dalga parametrelerine göre belirlendiğinden, yakın kıyıda oluşan akıntı yapısına ait ayrıntılar göz ardı edilmektedir. Model gel-git veya rüzgar kaynaklı katı madde taşınımını yalnızca kırılan dalga parametreleriyle birlikte hesaplamaktadır (Frey vd., 2012).

Kıyı çizgisi davranışında uzun vadeli net bir eğilim olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım, kıyı alanındaki fırtınaların, dalga iklimindeki değişimlerin, gel-git kaynaklı dalgalanmaların, diğer döngüsel ve rastlantısal olaylar nedeniyle meydana gelen çalkantıların arasında, kıyı çizgisi değişiminin kararlı bir sinyalini yakalayıp tahminde bulunabilmek için gerekmektedir. Temelde net bir eğilim varsayımı kıyı boyu katı madde taşınımını meydana getiren dalga hareketinin ve sınır koşullarının uzun vadeli kıyı gelişimini kontrol eden ana faktörler olduğunu varsaymaktadır. Bu varsayım genellikle, yüksek eğilimli katı madde taşınımına sahip kıyıları ve belirli sınır şartlarını getiren mahmuz, jetty ve ayrık dalgakıran gibi kıyı yapılarını içeren açık kıyıları iyi bir şekilde temsil etmektedir. Bununla birlikte kıyılar arası taşınımın hâkim olduğu bazı kıyı bölgeleri, net bir eğilim olmadan önemli değişim göstermekte ve yine de mühendislik faaliyetleri veya kıyı yapılarına ihtiyaç olduğunu gösteren önemli erozyon sorunları yaşayabilmektedir (Frey vd., 2012).

GenCade sayısal modeli, mahmuzlar ve jettylerde meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımlarını ampirik bir şekilde açıklamaktadır. Model düşey ve yatay su veya katı madde sirkülasyonunu hesaba katmamaktadır. Bu durumda model rip akıntıları, geri dönüş taban akıntısı veya diğer üç boyutlu akışkan ve taşınım tahminlerini yapamamaktadır (Frey vd., 2012).

GenCade modeli koy, körfez ve lagünlerde katı madde yığılma ve taşınım hareketlerini açıklamak için Körfez ve Lagünlere Giriş Rezervuarı Modeli (IRM)'ni kullanmaktadır. Genelleştirilmiş arayüz sayesinde model:

- Dalgaların açıyla gelmesi ve kıyı boyundaki dalga yüksekliği gradyanı nedeniyle meydana gelen katı madde taşınımı,
- Çeşitli bariyer adalarının temsili,
- Rüzgâr ve gel-git kaynaklı oluşan akıntılar nedeniyle meydana gelen katı madde taşınımı,
- Katı madde kaynak ve kayıplarının temsili,
- Kıyı dolgusu ve taraması,
- T veya Y mahmuzlar gibi birleşik kıyı yapıları,
- Mahmuz veya jettylerde katı maddenin bypassı,
- Ayrık dalgakıranlarda, jetty veya mahmuzlarda meydana gelen dalga dönmesi,
- Ayrık dalgakıranlarda su seviyesine bağlı dalga iletimi gibi çeşitli kıyı süreçlerini ve kıyı yapılarını içermektedir (Kraus, 2000).

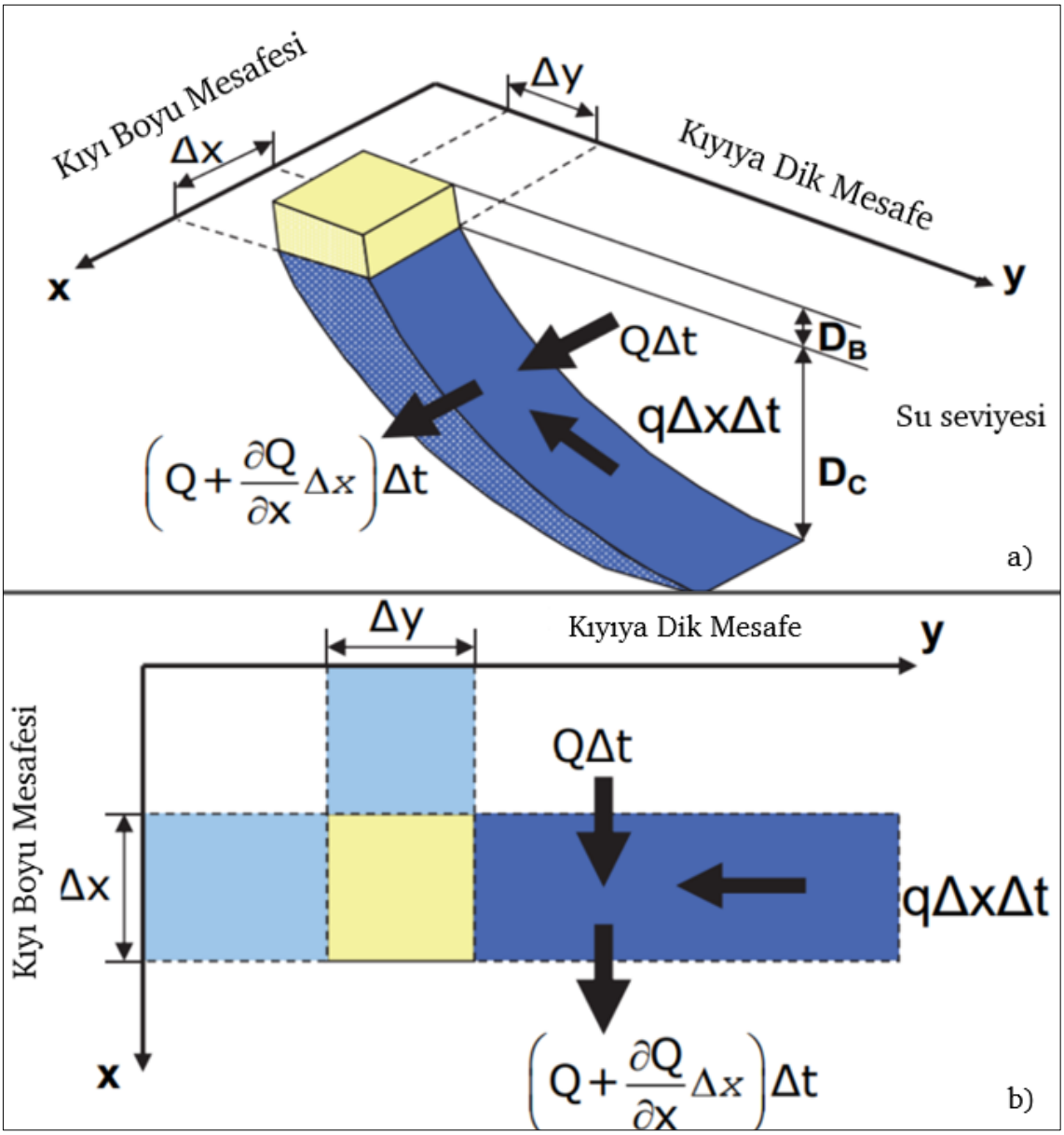
Model mahmuzları, jettyleri, iskeleleri, ayrık dalgakıranları, kıyı dolgularını ve kıyı duvarlarını çeşitli sayı ve kombinasyonlarda içerebilmektedir (Frey vd., 2012).

GenCade sayısal modeli:

- Kıyı yapıları üzerindeki dalga yansımaları,
- Yapıların şekli ve yönü ile ilgili detaylar,
- Gel-git seviyesinin değişmesine yönelik doğrudan bir içerik,
- Kıyı çizgisi değişiminin modellenmesine ilişkin temel kısıtlamalar gibi bazı sınırlandırmalar ve kısıtlamalara sahiptir (Frey vd., 2012).

2.5.4 Temel Denklem

Kıyı çizgisi değişimi modelinde kullanılan ana denklem katı madde hacminin korunumu ile formüle edilmiştir. Kartezyen koordinat sisteminde kıyı çizgisi x eksenine, kıyı normali ise y eksenine paraleldir. Bu durumda y değeri kıyı çizgisi uzaklığını, x ekseni ise kıyı boyu mesafesini temsil etmektedir (Şekil 2.2). Bir Δt zaman aralığında kıyının belirli bir kısmına giren ve çıkan net miktardaki katı madde ile kıyı profilinin şekil değiştirmeksizin kıyı tarafına veya denize doğru ötelendiği varsayılmaktadır (Frey vd., 2012).



Şekil 2.2 Kıyı çizgisi değişim hesabı için kütlenin korunumu şeması; a) Enkesit görünüşü, b) Üstten görünüş (Frey vd., 2012)

$$\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C) \quad (2.5)$$

Burada;

ΔV = hacim değişimi (kontrol hacime dört tarafından giren veya çıkan net katı madde miktarı),

Δy = Kıyıya dik kıyı çizgisi değişimi,

Δx = Kıyı boyu hücreler arası mesafe,

D_B = Basamak yüksekliği,

D_C = Kapama derinliğidir.

Hücrelerin yanal alanlarında kıyı boyu katı madde taşınımında (ΔQ) değişiklikler varsa hacim değişmektedir. Net hacim değişimi (2.6) eşitliği ile verilmektedir:

$$\Delta Q \Delta t = (\Delta Q / \Delta x) \Delta x \Delta t \quad (2.6)$$

Katı madde kaybı ve kaynağı olması durumunda ise $q = q_s + q_o$ şeklinde hesaplanmaktadır. Kıyı tarafına gelen veya kıyı tarafından giden kıyıya ait birim genişlikteki katı madde hacmi q_s , deniz tarafındaki hacim ise q_o'dır. Bu ifade $q \Delta x \Delta t$ olarak tanımlanmaktadır. İfadenin yeniden düzenlenmesi ve $\Delta t \rightarrow 0$ olarak limiti alınması durumunda kıyı çizgisi değişimine ait temel denklem (2.7) ile verilmektedir (Frey vd., 2012):

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (2.7)$$

Burada;

q_s = Kıyı tarafındaki kaynak veya kayıp, katı madde taşınımı,

q_o = Açık deniz tarafındaki kaynak veya kayıp, katı madde taşınımıdır.

2.5.5 Katı Madde Taşınımı

Kıyı boyu katı madde taşınımı Q (m^3/s) için klasik CERC denklemi (2.8) eşitliği ile verilmiştir (Komar, 1969):

$$Q = \left(H^2 C_g \right)_b a_1 sin 2 a_b \quad (2.8)$$

Burada;

H = Dalga yüksekliği (m),

C_g = Dalga grup hızı (m/s),

a_b = Dalga kırılma açısı (^{o}),

a_1 = (2.9) eşitliği ile verilen boyutsuz parametredir.

$$a_1 = \frac{K_1}{16\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)(1-p)1.416^{5/2}} \tag{2.9}$$

Burada;

K_1 = Nominal değeri 0.77'ye eşit olan ampirik bir katsayı,

ρ_s, ρ = Sırasıyla katı madde ve suyun özgül kütlesi (kg/m^3),

p = Katı maddenin porozitesidir.

GENESIS modeli (Hanson, 1987) (2.8) eşitliği ile verilen ifadenin genişletilmiş bir versiyonu olan (2.10) eşitliğini kullanmıştır (Kraus ve Harikai, 1983):

$$Q = \left((H^2 C_g)_b\right)\left(a_1 sin2a_b - a_2 cosa_b \frac{\partial H_b}{\partial x}\right) \tag{2.10}$$

Burada; a_2 boyutsuz bir parametredir:

$$a_2 = \frac{K_2}{8\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)(1-p)(tan\beta)1.416^{5/2}} \tag{2.11}$$

Burada; $tan\beta$ kıyı çizgisinden maksimum kıyı boyu taşınım derinliğine kadar olan ortalama taban eğimidir. Modelde $tan\beta$ hesaplanabilmesi için başka bir karakteristik derinlik olan maksimum kıyı boyu taşınım derinliği (D_{LTo}) (2.12) ile hesaplanmaktadır:

$$D_{LTo} = 2.28H_o - 10.9H_o^2/L_o \tag{2.12}$$

Burada;

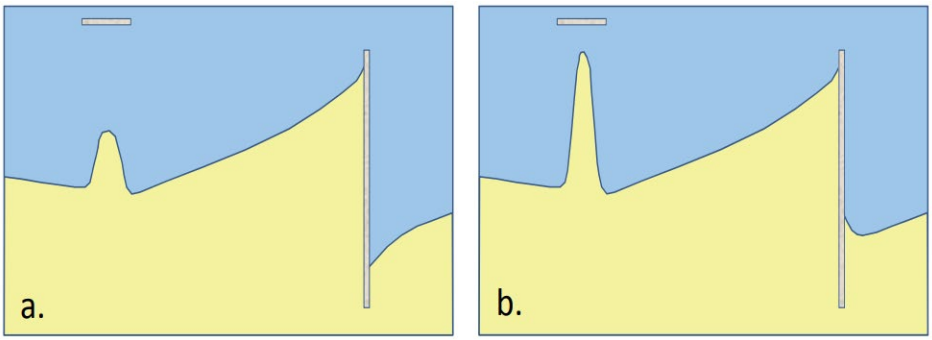
$H_o\ (m)$ = derin deniz belirgin dalga yüksekliği,

$L_o\ (m)$ = derin deniz dalga boyudur.

Derin deniz dalga boyu lineer dalga teorisi $L_o = gT^2/2\pi$'den hesaplanmaktadır. Burada; g (m/s^2) yer çekimi ivmesiyken, T (s) dalga periyodudur. Dalga verileri spektral verilerden elde edilmişse dalga periyodu spektral pik periyot, diğer türlü belirgin dalga periyodu olarak kullanılmaktadır. (2.12) eşitliği aşırı dalgalar altında kıyı bölgesinin yıllık limit derinliğini tahmin etmek için Hallermeier (1983) tarafından tanıtılmıştır. Modelde D_{LTo} derin su dalga verilerinden her bir zaman adımına göre hesaplanmaktadır ve model bölgesindeki kıyı boyunca geçerli olduğu varsayılmaktadır. Sinüs dalgası özellikleri mevsimsel olarak değişmektedir ve maksimum kıyı boyu taşınım derinliği tanımı, ortalama profil şekli ve kıyı eğimindeki değişimi yansıtmaktadır.

Dalgalar "rms" dalga yüksekliği değeriyle kullanıldığında K_1=0.39, belirgin dalga yüksekliği ile kullanıldığında K_1=0.77 olarak hesaba katılmaktadır. Hanson ve Kraus (1989) modelleme tecrübelerine göre bu değerler arasındaki bağıntıyı $0.5K_1 < K_2 < 1.5K_1$ olarak tavsiye etmektedir.

K_1 ve K_2 değerleri kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında, belirli bir zaman aralığında ölçülen kıyı çizgisi değişimleri kullanılarak belirlenmektedir. a_2 teriminin dahil edilmesi mahmuz ve jettylerin aşağı kıyısında ve ayrık dalgakıranların korunaklı tarafında daha gerçekçi ve belirgin değişimler elde edilmesini sağlamaktadır (Şekil 2.3). Genellikle K_1'de yapılan değişiklikler tüm modelleme alanını etkilerken, K_2'deki varyasyonlar sadece yapıların yakınlarında dalga dönmesinden etkilenen alanlardaki kıyı çizgisi değişimlerini etkilemektedir. Yıllık kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişimi açısından kabul edilebilir bir uyum sağlayabilmek için, genellikle kalibrasyon işleminde ilk olarak K_1 değerinin ayarlanması tavsiye edilmektedir. Sonrasında K_2 değeri yapı yanındaki kıyı çizgisi değişiminin daha iyi olması için değiştirilebilmektedir. Yapı yanındaki kıyı çizgisi davranışı söz konusu yapının permeabilitesi, genişliği, konumu gibi parametrelere bağlı olmaktadır (Frey vd., 2012).



Şekil 2.3 Mahmuz ve ayrık dalgakıran olması durumunda kıyı çizgisi değişiminin şematik gösterimi, a) $\boldsymbol{a_2}$ değeri dahil edilmemiş b) $\boldsymbol{a_2}$ değeri dahil edilmiş (Frey vd., 2012)

Taşınım miktarı I_l (N/s) batık ağırlık cinsinden (2.13) eşitliği ile verilmektedir.

$$I_l = \left(EC_g\right)_b \left(K_1 sina_b cosa_b - K_2 \frac{cosa_b}{tan\beta} \frac{\partial H_b}{\partial x}\right) \tag{2.13}$$

Burada; E dalga enerjisi yoğunluğudur (J/m^2).

Bagnold (1963) tarafından sunulan ifadeden faydalanılarak ve (2.13) eşitliğinin değiştirilmesiyle elde edilen kıyı boyu akıntısı (2.14) ile ifade edilmektedir:

$$I_l = K_3\left(EC_g\right)_b cosa_b \frac{\bar{v}_l}{u_m} \tag{2.14}$$

Burada; K_3 boyutsuz bir katsayı, $\bar{v}_l$ (m/s) surf bölgesindeki ortalama kıyı boyu akıntı hızı ve u_m (m/s) dalga kırılması sırasındaki taban yakınındaki maksimum yatay hız bileşenidir ve (2.15) ile verilmektedir.

$$u_m = \left(\frac{2E_b}{\rho d_b}\right)^{1/2} = \left(\frac{\gamma g H_b}{4}\right)^{1/2} \tag{2.15}$$

Burada;

d_b = Kırılma derinliği (m),

γ = Kırılma indeksi (-),

g = Yerçekimi ivmesidir (m/s^2).

(2.15) eşitliğine göre kıyı boyu katı madde taşınımı yalnızca kırılan dalgaların etkisinde oluşmamaktadır. Komar ve Inman (1970) ve Kraus vd. (1982)'de tartışıldığı gibi gel-git veya rüzgar sebepli kıyı boyu akıntılarından da meydana gelebileceği ifade edilmiştir.

Eğer kıyı boyu akıntısı ($\bar{v}_l$), sadece dalga kaynaklı akıntıdan ($\bar{v}_b$) oluşuyor ise (2.16) eşitliği (Longuet-Higgins 1970, Komar ve Inman 1970):

$$\bar{v}_l = \bar{v}_b = K_4 u_m sina_b \tag{2.16}$$

Burada; K_4 ampirik bir katsayı olup Komar ve Inman (1970)'a göre $K_4 = 2.7$ olarak önerilmiştir. (2.14, 2.15 ve 2.16) eşitliklerine göre $K_3 = K_1/K_4$ olmaktadır. Böylelikle sadece dalga kaynaklı akıntı dikkate alındığında (2.14 ve 2.16) eşitlikleri CERC ifadesiyle uyumlu olmaktadır yine de farklı kaynaklı akıntıların etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. GenCade kıyı boyu gradyanları etkisini de içeren (2.16) eşitliğinin genelleştirilmiş versiyonunu kullanmaktadır:

$$\bar{v}_b = K_4 u_m sina_b - K_5 \frac{4}{\gamma g} u_m \frac{\partial(u_m^2)}{\partial x} \frac{1}{tan\beta} \tag{2.17}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; K_5 ampirik bir katsayı olup K_2/K_3'e eşittir. Dolayısıyla GenCade modelinde kullanılan (2.17) eşitliğinde ifade edilen ilişki sadece dalga kaynaklı taşınım düşünüldüğünde, GENESIS modelinde kullanılan asıl taşınım ifadesine eşdeğerdir. Yeni formülle GenCade modeli gel-git akıntıları gibi diğer akıntıları da hesaba katabilmektedir. Ortalama akıntı ($\bar{v}_t$) dalga kaynaklı akıntıya ($\bar{v}_l$) lineer olarak eklendiğinde (2.13) eşitliği:

$$I_l = \left(EC_g\right)_b \left(K_1 sina_b cosa_b + K_3 cosa_b \frac{\bar{v}_t}{u_m} - K_2 \frac{cosa_b}{tan\beta} \frac{\partial H_b}{\partial x}\right) \tag{2.18}$$

Burada; K_3 (2.14) eşitliğindeki boyutsuz katsayıdır. Islak ağırlık taşınım miktarından hacimsel taşınım miktarına çevrilirse:

$$Q = \left(H^2 C_g\right)_b \left(a_1 sin2a_b + cosa_b \left(a_3 \frac{\bar{v}_t}{u_m} - a_2 \frac{\partial H_b}{\partial x}\right)\right) \tag{2.19}$$

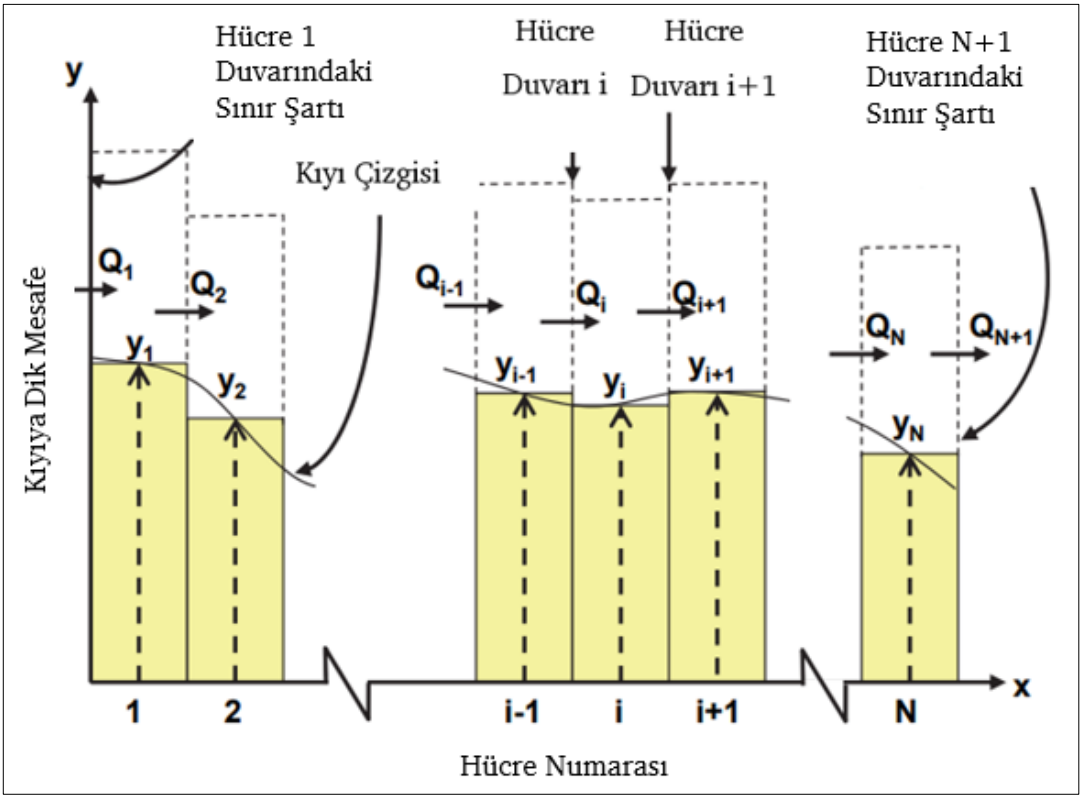
ifadesi elde edilmektedir. Burada; a_3 boyutsuz parametresi:

$$a_3 = \frac{K_3}{8\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)(1-p)1.416^{5/2}} \tag{2.20}$$

olarak ifade edilmektedir (Frey vd., 2012).

2.5.6 Ağ Sistemi

Modelde ağ sistemi kurulurken, x ekseni kıyı boyuna paralel, y ekseni ise kıyıya dik olan bir koordinat sistemi belirlenmektedir (Şekil 2.4). Kıyı çizgisi ağ sistemi, x ekseni boyunca uzanan N+1 adet hücre duvarına sahip N adet hücreden oluşmaktadır. Modelde tanımlanabilecek maksimum hücre sayısı 4000 adettir. Hücre çözünürlükleri kıyı boyunca eşit veya değişken olarak dağıtılabilmektedir. GenCade modelinde kıyı boyunca hesaplanan nicelikler; kıyı çizgisi konumları (y_i) hücrenin merkezinde olacak şekilde, katı madde miktarları (Q_i) hücrenin duvarlarında olacak şekilde ayrıklaştırılmaktadır. Kıyı alanı koordinat sistemine ait sol sınır 1 hücresinde, sağ sınır ise N hücresinde bulunmaktadır ve bu durumda toplamda kıyı çizgisi konumu N adettir. N adet hücre için N+1 adet hücre duvarı bulunduğundan kıyı boyu katı madde taşınım miktarı N+1 adet olarak hücre duvarlarında hesaplanmaktadır. Katı madde taşınımı dalga koşullarının bir fonksiyonu olduğundan, dalga parametreleri Q noktalarında hesaba katılmaktadır. Modelde mahmuzlar ve ayrık dalgakıranlar Q noktalarında tanımlanırken, kıyı duvarları, akarsu debileri, katı madde kaynak ve kuyuları ise y noktalarında tanımlanmaktadır (Frey vd., 2012).



Şekil 2.4 Sonlu farklar ağ şeması (Frey vd., 2012)

2.5.7 Sınır Şartları

GenCade modelinde üç farklı sınır şartı bulunmaktadır. Bunlar; sabit, hareketli ve geçitli sınır şartlarıdır. Sabit sınır şartı, sınırın hesaplama süresince belirlenen başlangıç kıyı çizgisi konumundan hareket etmeyeceği anlamına gelmektedir. Sabit sınır şartı modelde varsayılan olarak yer almaktadır. Hareketli sınır şartında sınır belirtilen mesafe kadar yine belirtilen zaman aralığında hareket etmektedir. Sınırın çevresindeki koşulların projede meydana gelecek değişikliklerden etkilenmemesi için sabit ve hareketli sınır şartları proje alanının iki uç noktası olan hücrelerde konumlandırılmaktadır. Geçitli sınır şartında mahmuz veya jetty gibi kıyı koruma yapıları bulunmaktadır.

2.5.7.1 Sabit Kıyı Şartı

Model için belirlenen bir kıyı çizgisi boyunca ölçülen kıyı noktalarının aynı planda çizilmesi tavsiye edilmektedir. Böylece kumsal bir kıyı veya daha sert yapıdaki bir kıyı için zamana bağlı olarak önemli ölçüde hareket etmeyen bir kıyının sınıra yakın uzaklıktaki bölümlerini bulmak mümkün olmaktadır. Sınır bu şekilde belirlendiğinde yanal sınırın sabitlenmiş olduğu söylenebilmektedir. Taşınım miktarı (2.21) ile verilmektedir:

$$Q_1 = Q_2 \text{ veya } Q_{N+1} = Q_N \tag{2.21}$$

Bu hangi uçtaki ağ noktasının dikkate alındığına bağlı olarak değişmektedir. Eğer sınır koşulunda $\partial Q/\partial x = 0$ ise $\partial y/\partial t = 0$ olduğu anlamına gelmektedir ve y değişmemektedir.

2.5.7.2 Hareketli Kıyı Şartı

Kıyının bir bölümü sabit kıyı olarak tanımlanmamışsa, kıyı çizgisinin sabit bir y_{RC} değeri ile hareket ettiği bir bölüm olduğu varsayılmaktadır ve (2.22) eşitliği ile ifade edilmektedir:

$$y_N^{t+1} = y_N^t + y_{RC} \tag{2.22}$$

Burada; üst ifadeler zamanı tanımlamaktadır. Modelde, sınır şartı taşınım miktarı ile belirlenmektedir ve (2.23) ifadesi ile verilmektedir:

$$Q_{N+1}^{t} = Q_{N}^{t} - \frac{y_{RC} - (D_B + D_C)q_N^t}{2B} \quad (2.23)$$

Burada; $B = \Delta t/(2(D_B + D_C)\Delta x)$ şeklinde hesaplanmaktadır, q ise katı madde kaynağı veya kuyudur.

2.5.7.3 Geçitli Kıyı Şartı

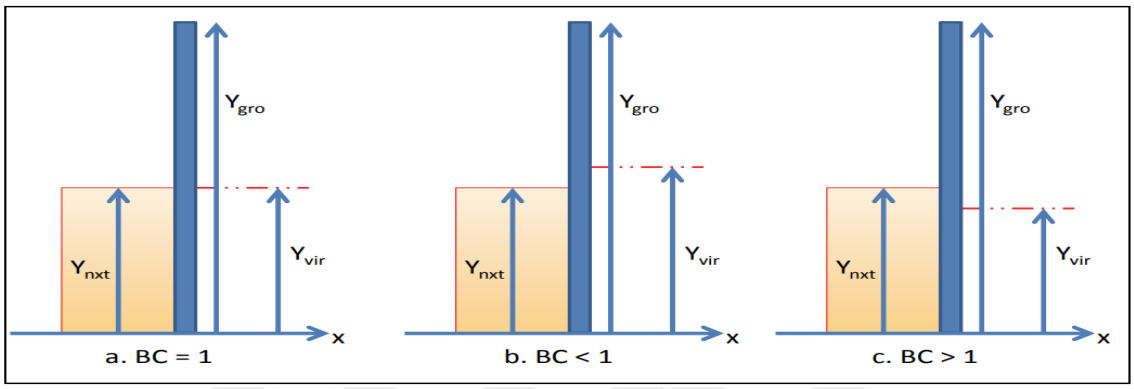
Kıyıda mahmuz, iskele, kıyıya bağlı dalgakıran gibi yapılar veya burun mevcutsa katı maddenin kıyı boyunca hareketliliğini kısmen veya tamamen kesintiye uğratabilmektedir. Yapı hangi uçta ise geçitli sınır şartı o uçta modele dahil edilmektedir. Kıyıya ait hücrenin iç etki alanında bulunan bu yapı, model tarafından hesaplanan taşınım miktarını ve kıyı çizgisi değişimini sınırlamak için hareket etmektedir.

Bu yapıların etkisi yapıyı geçebilecek katı madde miktarına göre parametrelendirilmektedir. Hücreye giren ve çıkan katı madde miktarına göre temsil edilmektedir. Örneğin yüksek dalgaların olduğu zaman adımlarında mahmuzun açıklarında katı madde hareket edebilmekte fakat mahmuzu geçerek kıyıya gelmesi beklenmemektedir. Daha az yüksekliğe sahip dalgaların olması durumunda yapı seçici bir kapı görevi görmektedir. Mahmuzların veya dalgakıranların etrafından katı madde geçişi D_G/D_{LT} oranı ile tespit edilmektedir. Burada (2.13) eşitliği ile verilen D_{LT} (m) kıyı boyunca taşınımın meydana geldiği derinlik, D_G (m) ise yapının deniz tarafında kalan topuk derinliğidir. İnlet yakınında tanımlanan mahmuz ve iskelelere ait bir sorun, yapının öbür tarafında kıyı çizgisine ait bir konum bilgisi olmamasıdır. Aynı şekilde yanal sınırda bulunanlar için de konum bilgisi bulunmamaktadır. Bu durumda modelin yapı etrafındaki bypassı kontrol edebilecek bir bypass katsayısına (BC) ihtiyacı bulunmaktadır. Bu katsayı (2.24) eşitliği ile verilmiştir:

$$BC = \left(Y_{gro} - Y_{vir}\right)/\left(Y_{gro} - Y_{nxt}\right) \quad (2.24)$$

Burada; Y_{gro} mahmuzun uzunluğu, Y_{vir} kıyı çizgisi konumu (giriş kanalında veya model ağ noktasının bitişiğinde), Y_{nxt} ise yapının hemen yanındaki kıyı çizgisi konumudur. Varsayılan bypass katsayısı 1'dir, 0'dan büyük bir sayı olarak da belirlenebilmektedir. BC parametresi 1'den küçük olarak belirlendiğinde inlet

bölgesine (inlet yanında ise) veya model alanı olarak belirlenen alanın dışına (yanal sınırda ise) daha az katı madde geçişi olmaktadır. Her iki durumda yapının yanında katı madde yığılmasının artması beklenmektedir. BC'nin 1'den büyük olması durumunda ise tam tersi sonuç elde edilmektedir. Böylelikle modelin ilk olarak varsayılan değerle koşturulup sonrasında da katı madde geçişinin miktarına göre BC'nin 1'den büyük ya da küçük değerini tanımlamak gerekmektedir. Farklı BC değerlerine göre katı madde yığılma miktarına bağlı parametreler Şekil 2.5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 2.5 Farklı BC değerlerine göre katı madde yığılmasının şematik gösterimi (Frey vd., 2012)

2.5.8 Sayısal Modelin Stabilitesi

GenCade sayısal modeli açık bir çözüm şeması kullanmaktadır. Kolay programlama, basit sınır şartları ifadeleri ve kapalı şemaya göre model koşturma süresinin daha kısa olması açık çözüm şemasının başlıca avantajlarıdır. Açık çözüm şemasının önemli dezavantajı ise stabilite problemidir. Bu, kapalı şemaya kıyasla açık şemada her zaman daha kısa süreli zaman adımlarına ihtiyaç duyulması anlamına gelmektedir ve böylelikle çok daha fazla zaman adımı sayısı oluşmaktadır. Sonuç olarak açık şemalı programlar genellikle daha uzun hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu süreyi azaltabilmek için mümkün olan en uzun süreli zaman adımı belirlenmektedir. Belirli koşullarda (2.8) eşitliğinin zaman ve konum aralığı adımlarıyla bağının incelenmesi için (2.25) eşitliği ile daha basit bir forma indirgenmektedir:

$$Q = Q_o \left[a_1 sin2a_{bs} - a_2 cosa_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right] \qquad (2.25)$$

Burada; $Q_o = H_b^2 C_{gb}$ (m^3/s)'dir. (2.7) eşitliğinin y ifadesine bağlı olarak lineerleştirilmesiyle tutarlı ve yaklaşık bir stabilite kriteri elde edilmektedir. Lineerleştirme $sin2a_{bs} \approx 2a_{bs}$ ve $a_{bs} = a_b - a.tan(\partial y/\partial x) \approx a_b - \partial y/\partial x$ ifadelerini kullanarak küçük kırılma açıları ve kıyı çizgisi açıları kabulü ile yapılmaktadır. Burada; a_{bs} dalgaların, yerel kıyı çizgisi doğrultusuna göre kırılma açısı, a_b x eksenine göre dalgaların kırılma açısı ve $\partial y/\partial x$ ise yerel kıyı çizgisinin doğrultusudur. $\partial y/\partial x \approx 0$ olarak düşünüldüğünde (2.7) ifadesi (Kraus ve Harikai, 1983):

$$\frac{\partial y}{\partial t} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{2.26}$$

şeklinde verilmektedir. Burada; $\varepsilon_1 = \frac{2Q_0 a_1}{D_B + D_C}$ ve $\varepsilon_2 = \frac{Q_0 a_2 sina_b}{D_B + D_C}\frac{\partial H_b}{\partial x}$ olarak parametrelendirilmektedir.

Kırılan dalgalar tarafından üretilmeyen bir akıntı söz konusu olduğunda, (2.26) eşitliğindeki difüzyon katsayısı (2.27) eşitliğindeki değişimi göstermektedir:

$$\varepsilon_2 = \frac{Q_0 sina_b}{D_B + D_C}\left(a_2 \frac{\partial H_b}{\partial x} - a_3 \frac{\overline{v_t}}{u_m}\right) \tag{2.27}$$

(2.26) eşitliği difüzyon denklemi olduğundan, stabilite özellikleri tam olarak bilenmemektedir. Bu durumda hesaplama şemasının stabilite parametresi (2.28) eşitliği ile verilmektedir:

$$R_s = \frac{\Delta t(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{(\Delta x)^2} \tag{2.28}$$

Burada; R_s ifadesi Courant sayısıdır, stabilite parametresi olarak adlandırılmaktadır. (2.26) eşitliğinin sonlu farklar formu $\Delta y \sim \Delta t/(\Delta x)^2$ olduğunu göstermektedir ve Δx iki kat azaltıldığında, hesaplama şemasının stabilitesini korumak için zaman adımın dört kat azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir.

(2.26) eşitliği açık şema olarak çözüldüğünde, verilen model sabitleri ve parametreleri için stabilitenin korunması amacıyla en uzun zaman adımı üzerinde sıkı bir sınırlama getirilmektedir. Difüzyon denkleminin açık şema ile

çözülebilmesi için $R_s < 0.5$ şartının sağlanması gerekmektedir. Eğer herhangi bir ağ noktasında R_s değeri 0.5'in üstüne çıkarsa hesaplanan kıyı çizgisi fiziksel olmayan salınımlar gösterecektir. ε_1 ve ε_2 ifadeleri yerel dalga koşullarına bağlı olduklarından kıyı boyunca büyük değişiklikler gösterebilmektedir. Hücrelerdeki aralığın mühendislik zorunlulukları sebebiyle sabitlendiği göz önüne alındığında, büyük bir dalga yüksekliği, küçük zaman adımı (Δt) değerine gereksinim duymaktadır. Modelde herhangi bir noktada stabilite sağlanamazsa GenCade modeli uyarı vermektedir. Böyle bir uyarı durumunda zaman adımının (Δt) veya uzamsal çözünürlüğün ($l/\Delta x$) veya her ikisinin azaltılması gerekmektedir (Frey vd., 2012).

2.5.9 Ampirik Parametreler

2.5.9.1 Kıyı Boyu Taşınım Derinliği

Belirli dalga koşulları altında, kıyı boyu taşınımın gerçekleştiği profilin genişliği, mahmuz ve jettylerde meydana gelen bypass miktarını tahmin etmek için gerekli olmaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınımı büyük oranda surf bölgesinde gerçekleştiği için bu genişlik yaklaşık olarak surf bölgesinin genişliğine eşittir. Modelde katı madde bypass algoritması profilin kıyıdan açığa mesafenin değişmeksizin artan bir fonksiyonu olduğu varsayımıyla, surf bölgesinin genişliği ile doğrudan ilişkili aktif kıyı boyu taşınım derinliğine gereksinim duyulmaktadır. Bu derinlik D_{LT} (m), yapının yukarı kıyısında $H_{1/10}$ dalga yüksekliğinin kırılma derinliğinde tanımlanmaktadır. Standart kabuller altında bu derinlik model tarafından kullanılan belirgin dalga yüksekliği H_s (m) ile ilişkilendirilmiştir:

$$D_{LT} = \frac{1.27}{\gamma} H_b \tag{2.29}$$

Burada; 1.27 $H_{1/10}$ ile belirgin dalga yüksekliği ($H_{1/3}$) arasındaki dönüşüm katsayısıdır. Aktif kıyı boyu taşınım derinliği (D_{LT}) aşırı yüksek dalga koşulları dışında, tipik olarak kapama derinliğinden (D_k) daha küçük olmaktadır. Kıyının ortalama eğiminin hesaplanabilmesi için maksimum kıyı boyu taşınım derinliği (D_{LTo}) ifadesi kullanılmaktadır ve bu ifade (2.12)'de verilmiştir (Frey vd., 2012).

2.5.9.2 Ortalama Profil Şekli ve Eğimi

Modelde kıyı profilinin kendisine paralel olarak hareket ettiği varsayıldığından profil şeklinin belirtilmesine gerek duyulmamaktadır. Ancak kıyı boyunca kırılan dalgaların konumunun belirlenmesi ve kıyı boyu katı madde taşınım denkleminde kullanılan ortalama yakın kıyı taban eğimini hesaplamak için kıyı profil şeklinin belirtilmesi gerekmektedir. Bu durumda Bruun (1954) ve Dean (1977) tarafından tanımlanan denge profil şekli kullanılmaktadır. Bruun (1954) ve Dean (1977) farklı kıyılar için ortalama profil şeklini basit bir matematiksel ifade olan (2.30) eşitliği ile tanımlamışlardır:

$$D = Ay^{2/3} \tag{2.30}$$

Burada; D (m) su derinliği, y (m) kıyı çizgisine olan mesafeyi ifade etmektedir. Ölçek parametresinin (A) Moore (1982) tarafından ortalama tane çapına (d_{50}) bağlı olduğu belirtilmiştir. $A = 2.25\ (w_s^2/g)^{1/3}$, burada w_s çökelme hızıdır (Kriebel vd., 1991). Tane boyutu modele tanımlandığında model en iyi temsili profil şeklini verecek bir A değeri üretmektedir. Profil ölçümü mevcut değilse surf bölgesine ait ortalama tane çapı parametresi kullanılmaktadır. (2.29) eşitliği ile tanımlanan denge profili için ortalama yakın kıyı eğimi $(tan\beta)$, 0'dan y_{LT}'ye eğimin integralinin ortalama değeri $(\partial D/\partial y)$ olarak hesaplanmakta ve $tan\beta = A(y_{LT})^{-1/3}$ olmaktadır. Burada y_{LT} (m) maksimum kıyı boyu taşınım derinliği olan D_{LTo}'dan kıyıya uzanan bölgenin genişliğidir ve $y_{LT} = (D_{LTo}/A)^{3/2}$ olarak ifade edilmektedir. Yakın kıyı ortalama eğimi (2.31) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Frey vd., 2012):

$$tan\beta = \left(\frac{A^3}{D_{LTo}}\right)^{1/2} \tag{2.31}$$

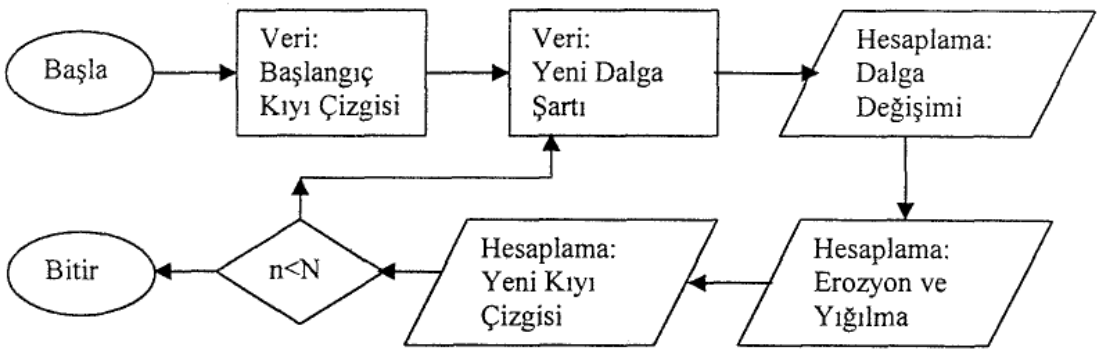
2.5.9.3 Kapama Derinliği

Kapama derinliği (D_k) kıyı profilinin değişmediği derinliktir. Derin denizde batimetrik ölçümlerin yapılması zor olduğundan kapama derinliği ampirik olarak belirlenememektedir. Bu durum geniş değerler aralığında çalışmayı gerektirmektedir. Dalga ikliminden tahmin edilen ortalama bir değer üzerinde de çalışılabilmektedir.

2.5.10 Dalga Hesabı

2.5.10.1 Dalga Sığlaşması ve Sapması

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, kıyı morfolojisi problemlerini çözmek için bir seri hesabın olası her dalga şartı için tekrar yapılması gerekmektedir. Başlangıç zamanında (t_1), ilk olarak bir kıyı çizgisi tanımlanmaktadır. Daha sonra yeni dalga şartlarına göre dalga değişimi ve bu değişmiş dalgalardan Δt süresindeki erozyon ve yığılma hesaplanabilmektedir. Bunlar kıyı şeklini biraz değiştirmekte ve $(t_1 + \Delta t)$ süresinde yeni kıyı şeklini meydana getirmektedir. Tüm bu işlemler yeni dalga şartında da yapılmakta ve $t_1 = N$, Δt süresinde sonlanmaktadır. Hesapların sürekli sonlanmasından dolayı bir 1-D modeli, basit dalga değişim hesaplarını kullanmaya ihtiyaç duymaktadır. Daha karmaşık sapma hesapları kullanılabilmektedir fakat bu daha fazla zaman gerektirebilmektedir (Kamphuis, 2000).



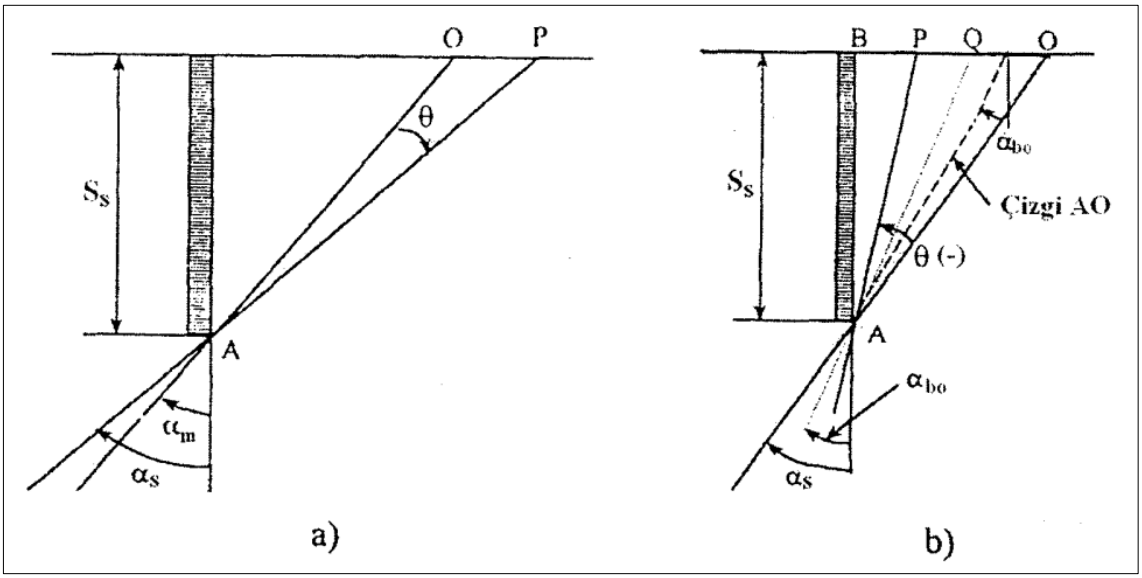
Şekil 2.6 Hesap Şeması (Kamphuis, 2000)

2.5.10.2 Dalga Dönmesi

Dönme hesapları oldukça kapsamlı hesaplamalardır ve 1-D modeline uygulanmadan önce basitleştirilmeye gerek duymaktadır. Paralel açık deniz dalgakıranları Perlin ve Dean (1983), Hanson ve Kraus (1989) tarafından GENESIS modeli ile tartışılmıştır. Dabees ve Kamphuis (1998) ve Dabees (2000) ise dönmeyi tek çizgi modelinde kapsamlı olarak dikkate almışlardır. Burada örnek olarak (dönme ve sapma hesaplarının basitleştirilmesine) mahmuzlardan dolayı oluşan sapma ve dönme verilmiştir (Arı, 2004).

Goda (1985), dönmeyi genel dalganın yönsel dağılımını kullanarak hesaplamaktadır. Bir engelin, gelen doğrusal dalga spektrumu enerjisinin bir

bölümünü tuttuğu kabul edilmektedir. Goda'nın metodunu kullanarak ve bazı ilave kabullerle bir mahmuzun arkasındaki dönme ve sapma için basit ifadeler üretilmektedir. Şekil 2.7'de gelen dalga ışınının S_s uzunluğundaki yapıyla α_s ve ortalama dalga doğrultusunun da (AO) korunan bölge sınır çizgisi ile θ açısı yaptığı görülmektedir. Goda (1985), $\alpha_s < \alpha_m$ için doğrusal spektrumdaki tüm enerjinin yapı tarafından alındığı ve spektrumdan kaldırıldığını kabul etmektedir. Bu, korunan bölge sınır çizgisi boyunca gelen dalga enerjisinin yarısını kaldırmaktadır. Korunan bölge sınır çizgisi boyunca H için 0.71 H_i bulunmuştur.



Şekil 2.7 Mahmuz yanında Dönme ve Sapma (Kamphuis, 2000)

H_i, gelen dalga yüksekliğidir. Böylece korunan bölge sınır çizgisi boyunca dönme katsayısı $K_d = 0.71$'dir. Aynı zamanda P noktasına θ açısıyla ulaşan dalga enerjisi ile ilgili regresyon bağıntısı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$0 \geq \theta \geq -90\ için, \quad K_d = 0.71 - 0.0093\theta + 0.000025\theta^2 \tag{2.32}$$

$$40 \geq \theta > 0\ için, \quad K_d = 0.71 + 0.37 sin\theta \tag{2.33}$$

$$90 \geq \theta > 40\ için, \quad K_d = 0.83 + 0.17 sin\theta \tag{2.34}$$

Dalga kırılma yüksekliği şu denklemden bulunabilmektedir;

$$H_{sb} = K_d H_{srb} \tag{2.35}$$

H_{srb}, dönme olmaksızın sığlaşma, sapma ve kırılmayla oluşan dalga yüksekliğidir. K_d'nin hesaplanmış değerleri yapı gerisindeki dalga yüksekliğini azaltacağından

aynı zamanda kırılma açısı da küçülmektedir. Dönmenin dalga kırılma açısına etkisi S_s, α_s, T_p, h_k ve H_b üzerinde araştırılmıştır ve dönmeye kırılma açısı (α_{bd}) düzeltilmiştir ve K_d'ye göre basit bir bağıntı bulunmuştur.

$$\alpha_{bd} = \alpha_b K_d^{0.375} \tag{2.36}$$

(2.36) eşitliği, korunan bölgenin hem içi hem dışı için geçerli olmaktadır. Korunan bölgenin içindeki dalga kırılmasının sonucu olarak kırılma açısında meydana gelecek daha fazla azalma dikkate alınmaktadır. Denklem (2.36) eşitliğine göre mahmuz sonundaki kırılma açısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\alpha_{bo} = \alpha_b (0.71)^{0.375} \tag{2.37}$$

Burada mahmuzun sonunda dalga ışınının koruma bölgesi sınır çizgisi (AO) ile AQ hattı arasındaki bölgenin tam ortasına ulaştığı kabul edilmektedir. Bu mahmuzla α_{bo} açısını yapmaktadır. Yapıdaki kırılma açısı sıfır olduğundan basit bir bağıntı vermek mümkündür (Arı, 2004).

2.5.10.3 Dalga Kırılması

Derin su referans derinliğinden veya yakın kıyı referans çizgisinden dalga dönüşüm hesabı (dış dalga modelinin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak), başlangıçta model menzilinde bulunan yapılardan dalga kırılması hesaba katılmadan gerçekleştirilmektedir. Çözüm stratejisi, dalga kırılması dahil edilmeden kırılan dalga koşullarının ilk yaklaşımını elde etmek ve her kırılma kaynağı tarafından dalga alanındaki değişimlerin hesaba katılmasıyla sonucu değiştirmektir.

Dalga dönmesi göz ardı edildiğinde, kırılan dalga hesabında üç bilinmeyen bulunmaktadır. Bunlar: kırılan dalga yüksekliği, kırılan dalga açısı ve kırılan dalganın derinliğidir. (2.38) eşitliği referans dalga verilerine dayalı olarak kırılan dalga yüksekliğini vermektedir (Snell Yasası). (2.40) eşitliği ise derinliğe bağlı kırılma kriteridir ve dalga kırılma denklemidir.

(2.38) eşitliği, sapma ve sığlaşma ile dönüştürülmüş kırılan dalgaların yüksekliğini hesaplamak için kullanılmaktadır:

$$H_b = K_r K_s H_{ref} \tag{2.38}$$

Burada;

- H_b = belirli bir noktada kırılan dalga yüksekliği (m),
- K_r = sapma katsayısı
- K_s = sığlaşma katsayısı
- H_{ref} = hangi dalga modelinin kullanıldığına bağlı olarak, açık deniz referans derinliğindeki veya yakın kıyı referans hattındaki dalga yüksekliğidir (m).

Kırılma ve sığlaşma katsayıları şu şekilde ifade edilmektedir:

$$K_r = \sqrt{\frac{cos\theta_1}{cos\theta_2}} \quad ve \quad K_s = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \tag{2.39}$$

Burada;

- θ_1 = dalga başlangıç açısı,
- θ_2 = dalganın belirlenen yerdeki varış açısı,
- C_{g1} ve C_{g2} = belirlenen noktalardaki grup hızlarıdır (m/s).

Derinlik tanımlı dalga kırılması denklemi:

$$H_b = \gamma d_b \tag{2.40}$$

Burada; γ katsayısı 0.78 olarak kullanılmaktadır.

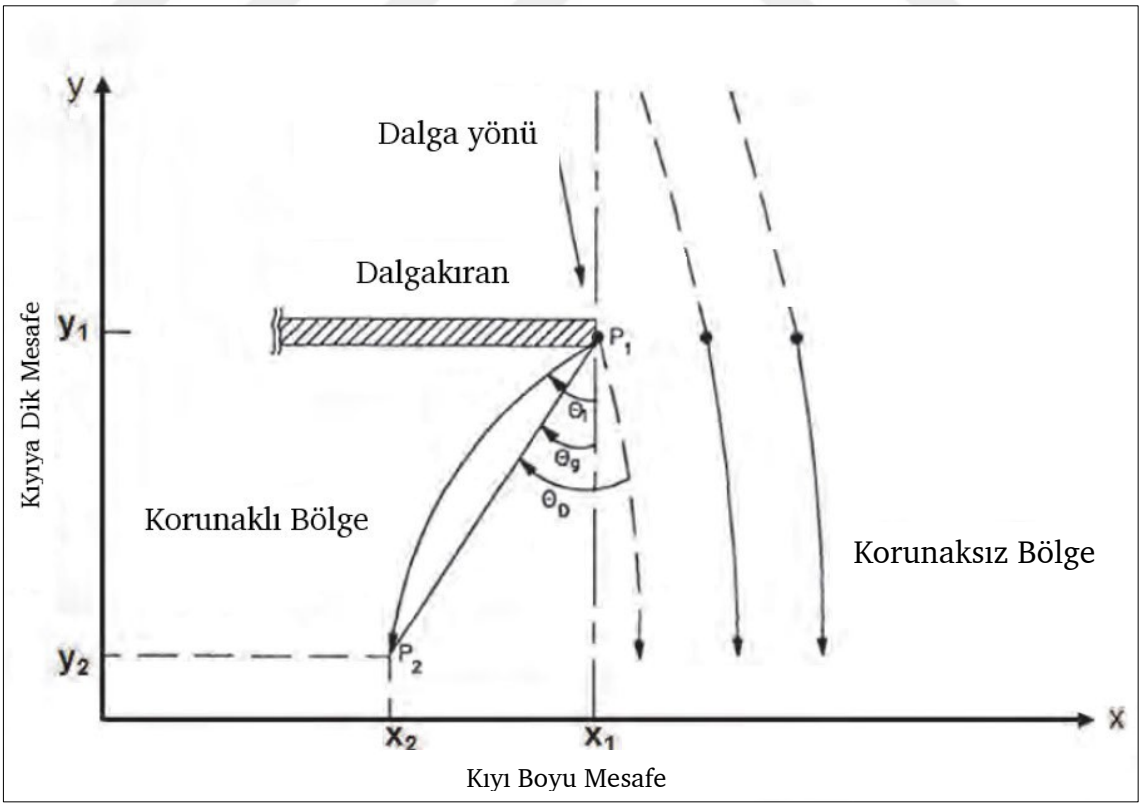
Dalgalarda dönme meydana getiren yapılar yoksa bu tipteki dalga verileri katı madde taşınımı hesaplarında (2.10) eşitliğindeki gibi kullanılmaktadır (Frey vd., 2012).

2.5.10.4 Dalga Kırılmasının Yapılar Üzerindeki Etkisi

Surf bölgesinden kıyı tarafına uzanan ayrık dalgakıranlar, jetty ve mahmuzlar, dalgaları kırılmadan önce engelleyebilmektedir. Benzer şekilde burunlar ve adalar da dalgaları kırılmadan önce engelleyebilmektedirler. Yapıların uç kısmı dairesel düzende dalga şekilleri üretmektedir ve dalga alanının bozulması yapının korunaklı bölgesindeki kıyı çizgisi davranışını kontrol eden önemli bir faktördür.

Katı madde tipik olarak yapının üzerinde dalgaların dönmeye uğradığı bölgelerde yığılma yapmaktadır. Yapıya çarpan dalgaların sapması ve dairesel formda yapının arka kısmına doğru ilerlemesiyle dalga yüksekliğinde azalma meydana gelmektedir. Sığlaşan dalgalar katı maddenin bir veya iki taraftan kıyı boyunca taşınmasına neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda kıyı çizgisi değişiminin gerçekçi tahminlerini elde etmek için dalga dönmesinin, sapmasının ve kırılmaya kadarki sığlaşmanın doğru ve verimli şekilde hesaplanması gerekmektedir.

Şekil 2.8'de bir yapının arkasındaki kırılan dalga yüksekliği ve açısı için yapılan hesaplamanın şekli tanımlanmıştır (Kraus, 1981,1982,1984). Yapının uç kısmından kıyıya doğru ilerleyen dalgaların dönmesi sonucu yaptığı açıya bağlı olarak yapının arka kısmı korunaklı bölge, açık kısım ise korunaksız bölge olarak ayrılmıştır. Dalga dönmesi her iki bölgede de etkili olabileceğinden kırılan dalga yüksekliğini belirlemek için her iki bölgede de bir dönme katsayısı hesaplanmaktadır. Korunaklı bölge içinde kırılan dalga açısının belirlenebilmesi için dalga ışınlarının θ_1 açısıyla yapının ucundaki P_1 noktasından radyal olarak ilerleyerek θ_2 açısıyla P_2 noktasında kırıldığı varsayılmaktadır (Frey vd., 2012).



Şekil 2.8 Dalga dönmesi hesabında kullanılan parametreler

Dalganın korunaklı bölge içindeki P_2 noktasına ilerlemesinde etkili olan θ_1 açısı, sayısal hesaplama ağ hücrelerinin konumunu tanımlayan kıyı boyu mesafeyle birlikte dalga kırılması kriterinin de bir fonksiyonu olduğundan bilinmemektedir. Başlangıçta P_1 ile P_2 noktalarını birleştiren düz çizginin kıyı normali ile yaptığı açı (θ_g) kullanılmaktadır. Dönme etkisiyle dalga yüksekliği azalmaktadır ve bunun sonucunda dalga kırılmamaktadır. Dönme, sapma ve sığlaşmaya uğrayan dalganın kırıldığı bölgenin belirlenebilmesi için yinelemeli bir hesaplama yapılmaktadır. Dalga kırılmasıyla (2.41)'de ifade edilen iki şart sağlanmaktadır:

$$H_b = K_D(\theta_D)H_b' \text{ ve } H_b = \gamma d_b \tag{2.41}$$

Burada; K_D dönme katsayısı, θ_D P_2 gölge alanında ise P_1 noktasından ilerleyen dalga ışını ile P_1 ve P_2 noktalarını birleştiren düz çizgi arasındaki açıdır. H_b' ise aynı hücrede dönmeye uğramayan kırılan dalga yüksekliğidir.

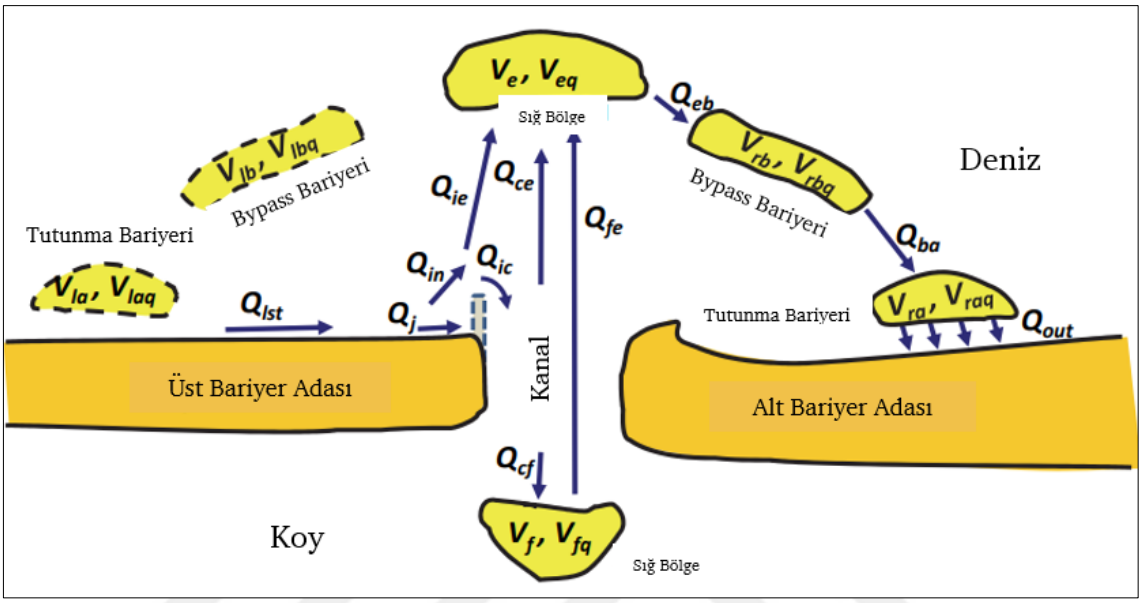
2.5.11 Körfez ve Lagün Girişlerinin (Inlet) Temsil Edilmesi

Körfez ve lagünlere girişlerdeki düzlüklerin morfolojik yapısının değişimi ve komşu kıyılarla etkileşimleri kıyı alanları için büyük öneme sahip olmaktadır. GenCade modeli ilk olarak Kraus (2000) tarafından sunulan, sonra Larson vd. (2003, 2006) tarafından geliştirilen Giriş Rezervuar Model'ini (Inlet Reservoir Model, IRM) kullanmaktadır. Her inlet Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bir giriş kanalı ve birkaç morfolojik elemanla (bariyerler ve sığlıklar) tanımlanmaktadır. Bu elemanlar sırayla; gerçek katı madde hacmi V_x ve bir denge hacmi V_{xq} ile belirlenmektedir. Burada; x alt indisi a (bağlantı bariyerleri), b (bypass bariyerleri), e (gel-git düzlükleri), f (taşkın düzlükleri) olarak değişim göstermektedir. Her morfolojik elemanın hidrodinamik şartlar ve katı madde koşulları için belirli bir denge hacmine sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu morfolojik elemanlardaki katı madde akısı (2.42) eşitliği ile ifade edilmektedir:

$$Q_{ox} = Q_{ix}\frac{V_x}{V_{xq}} \tag{2.42}$$

Burada; Q_{ox} x elemanından çıkan katı madde akısını, Q_{ix} ise elemana giren katı madde akısını temsil etmektedir. Bağlantı ve bypass bariyerlerinde üçüncü bir indeks olarak, karadan denize bakıldığında r (sağ) veya l (sol) indeksi diğer iki

indeksin önünde bulunmaktadır. Katı madde taşınımı soldan sağa gerçekleştiğinde girişin sol tarafındaki bağlantı ve bypass bariyerleri aktif olmamaktadır çünkü katı maddenin kıyının sol tarafından bağlantı ve bypass bariyerlerinden geçmeden gel-git düzlüklerine sorunsuz şekilde aktarıldığı varsayılmaktadır. Buna karşılık olarak aynı durum sağdan sola taşınım için de geçerli olmaktadır.



Şekil 2.9 İnlet sistemine ait morfolojik elemanların etkileşiminin şematik gösterimi (Frey vd., 2014)

Şekil 2.9'da taşınım soldan sağadır. Kıyı boyunca inlete doğru hareket eden katı madde miktarı (Q_{lst}), bir jetty tarafından stabilize edilmiş veya edilmemiş durumda olabilmektedir. İki durumda da katı madde girişe doğru hareket etmektedir. Eğer bir jetty varsa katı maddenin bir kısmı (Q_j) yapı tarafından tutulmaktadır. Jetty yoksa tutulan katı madde miktarı $Q_j = 0$ olmaktadır. Q_{in} ise inlet sistemine giren katı madde miktarıdır. İnlete giren katı madde miktarının (Q_{in}) bir kısmı (Q_{ie}) denge hacmine göre doluluklarına bağlı olarak düzlüklere, diğer kısmı (Q_{ic}) ise giriş kanalına dahil edilmektedir. Bu hacimlerle orantılı olarak düzlükler katı madde tarafından beslenmektedir. Sayısal olarak (2.43) ve (2.44) eşitlikleriyle ifade edilmektedir:

$$Q_{ie} = \delta Q_{in}, \qquad Q_{ic} = (1-\delta)Q_{in}, \qquad \delta = \frac{V_e + V_f}{V_{eq} + V_{fq}} \tag{2.43}$$

ve

$$Q_{ce} = \beta Q_{ic}, \qquad Q_{cf} = (1-\beta)Q_{ic}, \qquad \beta = \frac{1 - V_e/V_{eq}}{2 - V_e/V_{eq} - V_f/V_{fq}} \tag{2.44}$$

Sistem dengede tamamen dolu değilse, gelen Q_{in}'in sadece bir kısmı inlet sisteminden ayrılmaktadır ve kıyıdan uzağa taşınmaktadır. İlgili morfolojik elemanların başlangıç ve denge hacimleri, bariyerlerin konumlarına bağlı olarak modelde belirtilmektedir (Frey vd., 2012).

Walton ve Adams (1976) Birleşik Devletler'den alınan 43 adet gel-git düzlüklerine ait saha verilerine göre denge hacmi için ampirik ifadeler türetmişlerdir. Gel-git tanımı yaklaşık olarak IRM'nin gel-git ve bypass bariyerlerinin hacimlerinin toplamına karşılık gelmektedir. Farklı morfolojik elemanların hacimlerini (V_{xq}) hesaplayan bu ifadeleri kullanmak için, aralarındaki boyut ilişkisine dair bazı varsayımlar yapılmaktadır. Morfolojik elemanların ilişkili oranlarını belirlemek için hava fotoğrafları ve batimetrik ölçümlerden faydalanılmaktadır. Komşu kıyılar üzerinde etkisi olmayan körfez ve lagün girişlerini tanımlamak için aşağıdaki kriterlerin tümünün sağlanması gerekmektedir:

- Kanalın her iki tarafında da jetty olmaması,
- Morfolojik elemanların başlangıç ve denge hacimlerinin eşit olması durumunda tüm elemanların tamamen dolu olmasının sağlanması,
- Her iki taraftaki Q_{out} yalnızca girişe bitişik ilk hücrede çözülmektedir.

2.5.12 GenCade İçeriğindeki Deniz Yapıları

2.5.12.1 Yapı Türleri

GenCade modelinde deniz yapıları; mahmuzlar, jettyler, liman dalgakıranları veya ayrık dalgakıranlar, kıyı duvarları, yumuşak yapılar veya kıyı dolguları olarak tanımlanabilmektedir. Daha karmaşık yapı çeşitleri (T-mahmuz, Y-mahmuz, yarı Y-mahmuz ve payandalı jettyler) modelde bulunan yapıların birleştirilmesiyle tanımlanmaktadır.

Kıyı çizgisi değişiminin modellenmesinde yapıların doğrudan iki etkisi vardır:

- Surf bölgesinin içine uzanan yapılar, yukarı kıyı tarafında kıyı boyunca hareket eden katı maddenin bir kısmını veya tamamını bloke etmektedir ve

aşağı kıyı kısmında katı madde kaynağını azaltmaktadır. Dönmeye uğratmayan mahmuz veya jettyler olarak adlandırılan bu yapılar, katı madde taşınımını bloke etmektedir fakat dalgalar üzerinde etkileri bulunmamaktadır.

- Uçları surf bölgesini aşarak açığa doğru uzanan mahmuz, jetty veya dalgakıranlar ise dalga dönmesi üzerinde etkilidir.

Gerçekte tüm mahmuz ve jettyler dalga dönmesinde etkili olmaktadır. Bu yapılarda hesaplama zorluğu oluştuğundan, kısa mahmuz ve dalgakıranlar için dalga dönmesi olmayan yapı olarak sınıflandırma varsayımı yapılmaktadır. Kısa yapılar dalga dönmesi oluşturan veya oluşturmayan olarak karşılaştırılmalı da çalıştırılabilmektedir. Modelleme sonucunda karşılaştırma yapılarak hangi yapılarda dalga dönmesinin göz ardı edilebileceği gözlemlenmektedir. Sadece mahmuz ve jettyler dalga dönmesi meydana getirmeyen yapılar olarak tanımlanabilmektedir. Modelde ayrık dalgakıranların Y-mahmuzlar gibi her zaman dalga dönmesi oluşturan yapılar olarak çalıştırılması gerekmektedir (Frey vd., 2012).

2.5.12.2 Mahmuz ve Jettylerin Etkisi

Modelde mahmuz veya jettylerden geçen iki çeşit katı madde hareketi tanımlıdır. Bypass olarak adlandırılan ilk hareket çeşidi, yapının deniz tarafındaki uç kısmının etrafında gerçekleşmektedir. Diğer katı madde hareketi ise yapının üstünden veya içinden geçmesidir. (2.29) eşitliğinde görüleceği gibi, yapının ucundaki su derinliği (D_G), aktif kıyı boyu taşınım derinliğinden (D_{LT}) daha küçükse bypassın gerçekleştiği söylenmektedir. Alt profilin şekli bilindiğinden (2.30) D_G yapının ucu ile kıyı çizgisi konumundan bulunmaktadır. Mahmuz veya jettyler hücre duvarlarında yer aldığından, bu derinlik tek değildir. Modelde yapının aşağı kıyısındaki derinlik kullanılmaktadır. Katı madde bypass etkisini temsilen bir faktör (BYP) kullanılmaktadır ve (2.45) ifadesiyle tanımlanmaktadır:

$$BYP = 1 - \frac{D_G}{D_{LT}}, \quad D_G \leq D_{LT} \tag{2.45}$$

Bu ifade her bir zaman adımı için hesaplanmaktadır.

Katı maddenin mahmuz gibi kıyı bağlantılı bir yapının üzerinden veya içinden geçerek kıyıya doğru yaptığı taşınımı tanımlamak için bir geçirimlilik katsayısı (PERM) belirlenmiştir. Mahmuz katı madde geçişini önlüyorsa ve yüksekliği ortalama sakin su seviyesinden fazlaysa $PERM = 0$, tamamen geçirgen bir yapıya sahipse $PERM = 1$ olarak tanımlanmaktadır.

PERM bu nedenle 0 ile 1 aralığındadır ve mahmuzların veya diğer yapıların (jetty, dalgakıran vb.) yapısal özelliklerine, yüksekliğine ve sahaya ait gel-git aralıklarına dikkat edilerek belirlenmektedir. Uydu görüntüleri yapının boşluk alanı miktarları ve dolayısıyla geçirimlilik katsayısı hakkında fikir verebilmektedir. En uygun PERM değeri modelde kalibrasyon aşamasında belirlenmektedir.

Belirlenen BYP ve PERM değerlerine göre model, kıyı bağlantılı bir yapı üzerinden, çevresinden veya içinden geçen katı maddenin toplam F fraksiyonunu (2.46) eşitliğindeki gibi hesaplamaktadır (Hanson 1987):

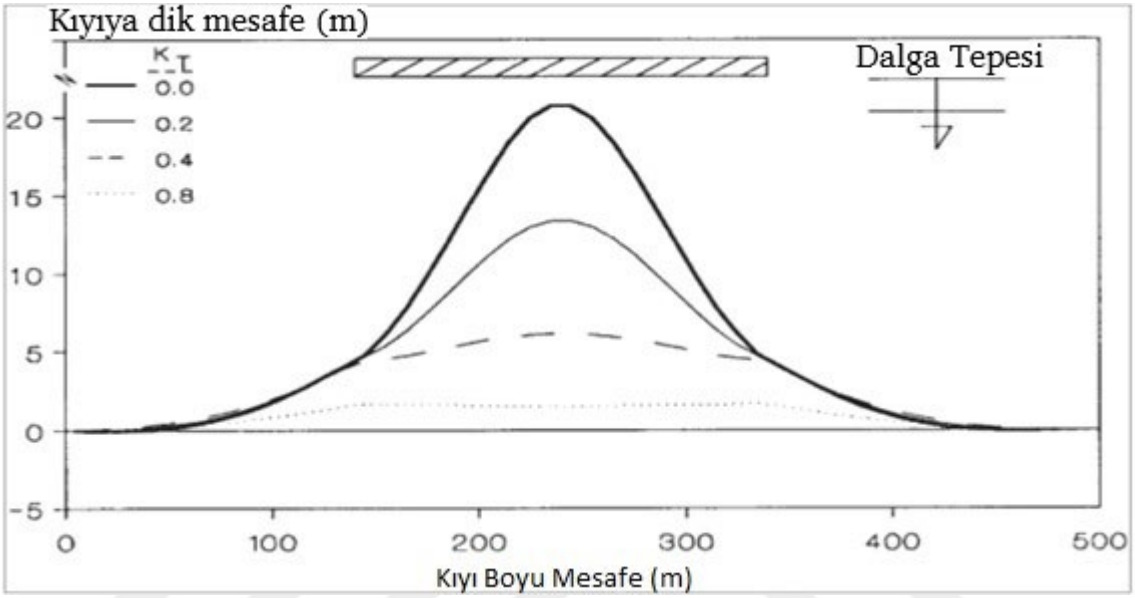
$$F = PERM(1 - BYP) + BYP \tag{2.46}$$

Bu fraksiyon ağ sistemi boyunca tanımlanan her bir kıyı bağlantılı yapı için tüm zaman adımlarında hesaplanmaktadır (Frey vd., 2012).

2.5.12.3 Ayrık Dalgakıranların Etkisi

Kıyı çizgisinin ayrık dalgakıranlara tepkisi tasarım sürecinde dikkate alınmalıdır. İletim katsayısı kıyının ayrık dalgakıranlara tepkisini kontrol etmede görevli önemli bir parametredir (Hanson ve Kraus, 1990). GENESIS modeli (Hanson ve Kraus, 1989), birden fazla ayrık dalgakıranda dalga dönmesi, sapması ve iletimini temsil kabiliyetine dayalı olarak hem sahada hem de hareketli taban fiziksel model deneylerinde kıyı çizgisini modellemek için kullanılmıştır (Hanson ve Kraus, 1989, 1990, 1991a, 1991b; Hanson vd., 1989; Rosati vd., 1992; Gravens ve Rosati, 1994; Herbich vd., 1996). Başlangıç olarak GENESIS modeli ayrık dalgakıranlar için yalnızca sabit bir iletim katsayısını (K_t) tanımlamıştır. Modelleme sisteminde dalga iletimini tanımlamak amacıyla, her ayrık dalgakıran için ayrı bir girdi parametresi olarak iletim katsayısı (K_t) değeri sağlanmıştır. Doğrudan dalgakırana gelen dalgaların yüksekliğinin, dalgakıranın deniz tarafındaki yüksekliğine oranı olarak tanımlanan iletim katsayısı (K_t) 0 ile 1 aralığındadır. İletim katsayısının 0

olması durumu iletimin olmadığını, 1 olması durumu ise tam iletim olduğunu göstermektedir. Şekil 2.10'da 0 ile 1 aralığında farklı değerlere sahip K_t'nin tek bir ayrık dalgakıran olması durumuna göre GenCade model sonuçları gösterilmektedir. Daha büyük dalga iletimi kıyı çizgisinin küçük muskalara ya da denize doğru genişleyen bir yapıya sahip olması sonucunu getirmektedir (Frey vd., 2012).



Şekil 2.10 Dalga iletim katsayısına bağlı kıyı çizgisi davranışı (Hanson ve Kraus, 1989)

Çeşitli mühendislik çalışmaları için ayrık dalgakıran olması durumunda kıyı çizgisi değişiminin tahmin edilmesi önemlidir. Tahmin kabiliyetinin geliştirilebilmesi amacıyla dalga iletim katsayısı için yayınlanmış birkaç ampirik formül değerlendirilmiştir (Wamsley ve Hanson, 2002; Wamsley vd., 2002, 2003). Belirli bir yapı konfigürasyonu ve özellikleri, su seviyesi ve dalga şartları için en uygun tahmin yöntemini belirlemek amacıyla çeşitli hassasiyet testleri yapılmıştır. Modelde her yapı için sabit bir K_t değeri kullanılabilmektedir veya modelin zamanla değişen su seviyesi, dalga yüksekliği ve yapı özelliklerine göre uygun değer hesaplaması tanımlanabilmektedir. Değişken K_t seçeneği seçildiğinde belirtilen giriş zaman aralığındaki bir girdi dosyasından su seviyesi okunmaktadır. Her yapı için geometrik özellikler (kret yüksekliği ve genişliği, denize ve karaya doğru olan eğimler ve yapının ortalama tane boyutu) belirlenmekte ve Ahrens (2001), Seabrook ve Hall (1998), d'Angremond vd. (1996) hesaplama yöntemleri

arasından biri seçilebilmektedir. Seçilen yöntemin yapı tipine ve konfigürasyona uygun olması gerekmektedir.

Seabrook ve Hall Formülü batık yapılarla ilgili iletim süreçlerini en iyi şekilde karşılamaktadır (Wamsley ve Hanson, 2002; Wamsley vd., 2002,2003). Bu çalışmalar özellikle batık yapılarla ilgili olup, yüzey yapıları açısından verimlilik göstermemektedir. d'Angremond vd. (1996) denklemi ise taş dolgu ve tek parça yapılara uygulanabilmektedir. Derin veya nispeten yüksek yapılar için d'Angremond vd. (1996) denklemi tavsiye edilmemektedir. Hem Seabrook ve Hall hem de d'Angremond vd. (1996) formülleri öncelikli olarak geleneksel yapı sistemleri için geliştirilmiştir, dolayısıyla bu formüllerin resif yapılar için uygulanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Olası genel tahmin denklemlerinden GenCade modeli için en verimli sonuç veren çalışma Ahrens (2001) baskın mod yaklaşımı ifadesidir. Ahrens denklemi (Tanaka, 1976) K_t'ye karşı R/H_0'ı (laboratuvar verileriyle uyumlu olarak) çizerken bir S eğrisi oluşturan ve yüksek yapılar için makul sonuçlar veren tek denklemdir. Ayrıca bu ifadeler uygulanabilirlikte sınırlama getirmemektedir. Ancak Ahrens denklemi esas olarak resif dalgakıranlar için geliştirilmiş olup geleneksel bir yapı üzerinde iletimi daha iyi tahmin etmektedir. Ahrens denklemi batık yapılar için göreceli kret genişliğinin etkisini yeterince açıklamamaktadır.

Şekil 2.10'da bir ayrık dalgakıran arkasındaki muska gelişimi görülmektedir. Belirli koşullar altında muska ayrık dalgakırana ulaşana kadar gelişmeye devam edecek ve daha sonra tombolo oluşturacaktır. Bu tombolo oluşumunu T-mahmuz ve ayrık dalgakıranlarda tanımlamak için sınır şartı, Hanson ve Kraus (1986), Kraus ve Hanson (1995) çalışmalarında tartışıldığı gibi GENESIS modelindeki kıyı duvarına benzer şekilde formüle edilmiştir. Bununla birlikte tombolo kısıtlamasının uygulanması, dalga dönmesini, önceden açık olan hesap hücrelerinin bloke edilmesini ve yapının hem kara hem deniz tarafında katı madde taşınımını içerdiğinden karmaşıktır. Tombolonun yapıya ulaşabileceğini ama daha da ileri gidemeyeceğini belirtmek gerekmektedir. Model hücresi yapı ile temas kurduğunda, o hücreye taşınım miktarı, katı maddenin fazlasının yukarı kıyıdaki hücrelerde kalmasına izin verecek şekilde planlanmaktadır. Bu uygulama katı madde hacminin korunmasını ve taşınım yönünün sabit kalmasını sağlamaktadır.

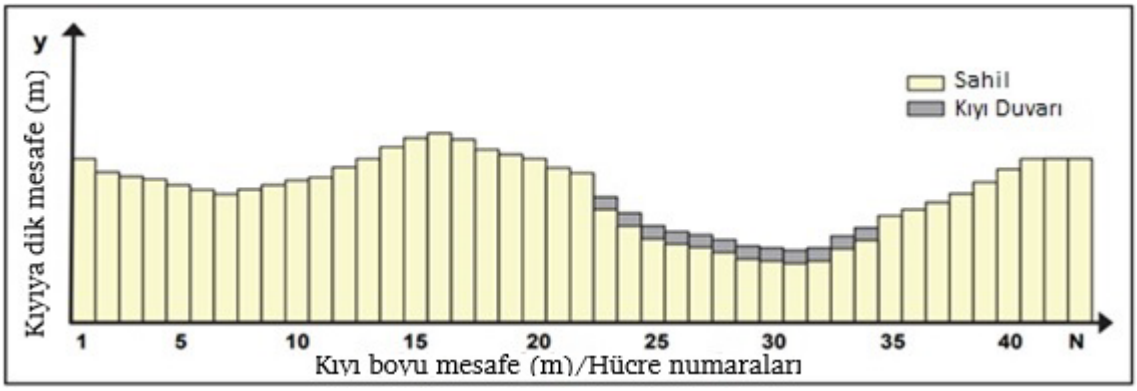
2.5.12.4 Kıyı Duvarlarının Etkisi

Kıyı duvarlarının etkin bölümleri ağ noktaları üzerinde herhangi bir yerde tanımlanabilmektedir. Kıyı duvarlarının düz olması gerekmediği ve kıyı şeklini takip edebilmesi için eğrisel formda oluşturulabileceği belirtilmektedir. Kıyı duvarları kıyı çizgisi üzerine veya arkasına yerleştirilebilmekte fakat kıyı çizgisinin deniz tarafına yerleştirilememektedir.

Bir kıyı duvarı veya genel olarak kayalık, uçurum gibi kıyıya paralel, aşındırılamayan doğal bir bariyerin karaya doğru hareket edememesi nedeniyle, kıyı çizgisinin konumuna bir kısıtlama getirmektedir. Hanson ve Kraus (1985, 1986) bir kıyı duvarı tarafından kısıtlanan bu konumu hesaplamak için bir varsayım geliştirmiştir. Bu varsayım kıyı çizgisi hareketi modelleme teorisi ile benzeşmektedir ve aşağıdaki üç özelliğe sahiptir:

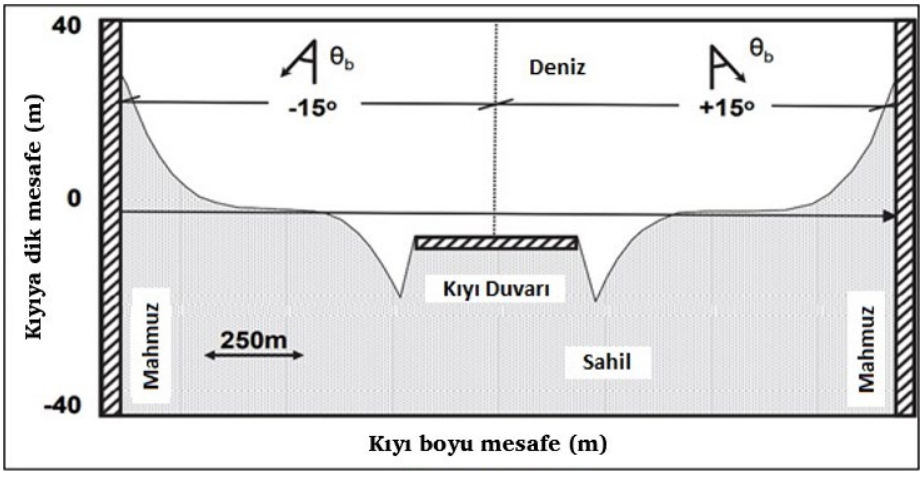
- Kıyı duvarının bulunduğu konumdaki kıyı çizgisi karaya doğru geri çekilme gösterememektedir.
- Katı madde miktarı korunmaktadır.
- Duvardaki kıyı boyu katı madde taşınımının yönü, potansiyel yerel taşınım yönü ile aynı olmaktadır.

Kıyı duvarı kısıtlamasının engellendiği ağ hücrelerinde, kıyı çizgisi konumu ve taşınım miktarı ayrık dalgakıran bölümünde anlatılan sürece benzer şekilde tanımlanmaktadır. Komşu hücrelerdeki katı madde miktarları gerektiğinde katı madde miktarını ve taşınım yönünü korumak için ayarlanmaktadır. Bu hesaplama çok detaylı olmakla birlikte ayrıntılar için Hanson ve Kraus (1986) çalışması incelenebilmektedir. Aynı ağ hücresinde iki değere sahip kıyı çizgisi konumuna yol açacağından, kıyı duvarının hücre duvarında tanımlanması mümkün olmamaktadır. Böylelikle mahmuz, jetty ve ayrık dalgakıranlar hücre duvarına yerleştirilirken, kıyı duvarları hücrenin merkezine yerleştirilmektedir. Bunun nedeni kıyı duvarlarının hücre duvarlarında bulunan dalgalar üzerinde etkisinin olmayıp, hücre merkezlerindeki kıyı çizgisi konumunun değişmesini sağlamasıdır. Şekil 2.11'de hücre 23'ten 34'e kadar tanımlanmış bir kıyı duvarı örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Kıyı duvarı yerleşiminin şematik olarak gösterimi (Frey vd., 2012)

Şekil 2.12'de ise iki mahmuz arasında orta noktada bulunan bir kıyı duvarının katı madde taşınımının üzerindeki etkisi kuramsal olarak ifade edilmektedir. Kıyı duvarı başlangıçta kıyı çizgisinden karaya doğru küçük bir mesafede yerleştirilmiştir. Burada kıyı başlangıçta yavaş yavaş aşınıp kıyı duvarını açığa çıkarmaktadır. Kıyı çizgisi kıyı duvarına ulaştığında daha fazla geri çekilememektedir. Böylelikle açıkta kalan bir hücrenin potansiyel erozyonu, bitişik hücreye taşınım yönünde, yani ayrılma noktasından uzağa aktarılmaktadır. Kıyı duvarı tamamıyla açığa çıkarsa her iki tarafta da yapının bulunduğu bitişik hücrelerde erozyon meydana gelmektedir. Bu örnek sınırlamanın bir kıyı duvarının yanında olduğu kadar önünde de gerçekçi bir kıyı çizgisi değişim hesabını sağladığını göstermektedir (Frey vd., 2012).



Şekil 2.12 GenCade modelinde kıyı duvarı etkisinin kuramsal bir örneği (Hanson ve Kraus, 1985)

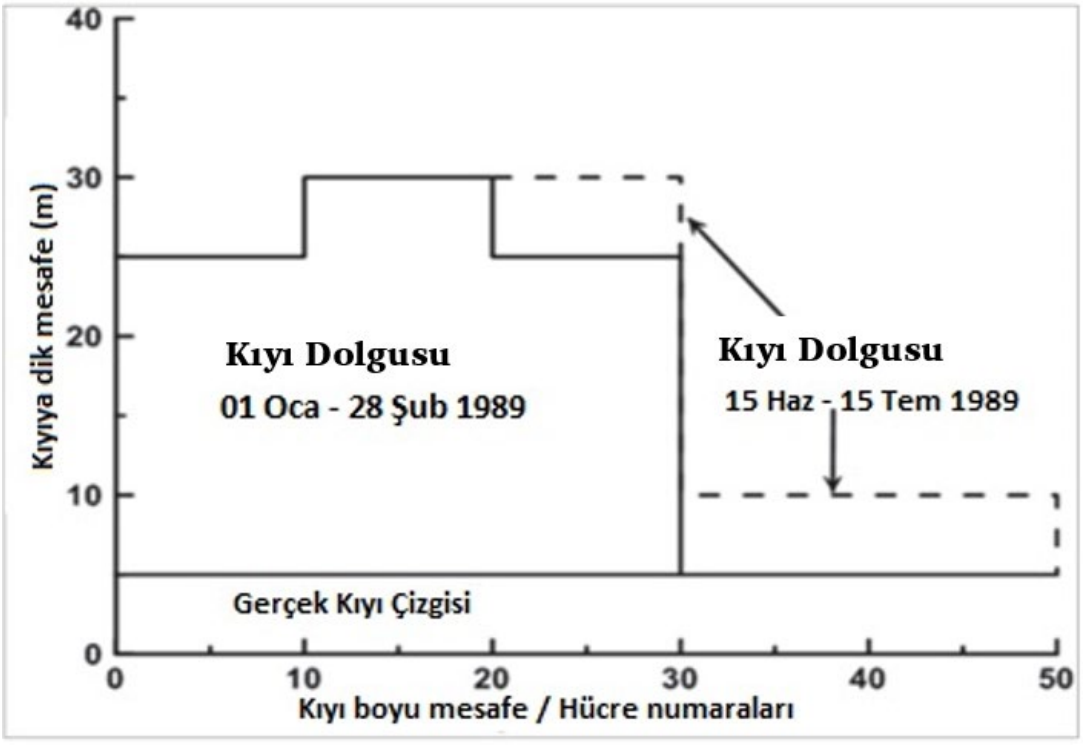
2.5.12.5 Kıyı Dolgusunun Etkisi

Kıyı dolguları kıyıda herhangi bir yere zaman ve konum örtüşecek şekilde yerleştirilebilmektedir. Kıyı, belirli bir dolgunun tanımlandığı her hücrede günlük olarak eşit miktarda ilerletilmektedir. Kıyı dolguları mahmuzları kaplayabilmektedir ve kıyı aşındığında mahmuzlar açığa çıkarak çalışmaya başlamaktadır.

Model şu varsayımlarla dolguların davranışını tanımlama kapasitesine sahiptir:

- Dolgu malzemesi yerel katı maddenin ortalama tane çapına sahip olmaktadır.
- Modele tanımlanan dolgunun profili tane boyutuna karşılık gelen denge şekline sahip olmaktadır.
- Beslenen kıyının basamak yüksekliği doğal kıyı ile aynı olmaktadır.

Bir diğer nokta, modelde girdi olarak belirtilen kıyı dolgusu genişliğinin, dolgu şablonuna karşılık gelen mesafe değil, dalga ve akıntılar tarafından denge haline ulaşan dolgu genişliği olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.13'te basit bir kıyı dolgusu gösterilmektedir. Modelde bu dolgunun her bir kıyı konumu boyunca sabit genişliğe sahip bir dizi dolgu faaliyeti ile temsil edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.13 Kıyı düzenlemesi örneği (Frey vd., 2012)

Şekil 2.13'te görülen kıyı dolgusu 3 şekilde tanımlanmaktadır: ilki 1 Ocak 1989'da başlayan ve 28 Şubat 1989'da biten, 20 metre genişliğinde ve 1'den 30'a kadar olan ağ hücrelerini kapsamaktadır; ikincisi 1 Ocak 1989'da başlayan ve 28 Şubat 1989'da biten, 5 metre genişliğinde, 10 ile 20 arasında olan hücreleri kapsamaktadır; üçüncüsü ise 15 Haziran 1989'da başlayan ve 15 Temmuz 1989'da biten 5 metre genişliğinde 20 ile 60 arası hücreleri kapsamaktadır (Frey vd., 2012).

2.5.12.6 Katı Madde Kaynakları ve Kayıpları

Modelde kaynak veya kuyulardan kıyıya katı madde eklenip çıkarılmasıyla kıyı çizgisinin davranışı değişmektedir. Bu özellik modelde "Bypass İşlemi" olarak tanımlanmaktadır. Yaygın katı madde kaynakları: falez, kayalık ve kumulların erozyonu, taranan malzemenin yerleştirilmesi de dahil olmak üzere kıyı yenilenmesi, rüzgarla taşınan kum, nehirlerle beraber taşınan katı madde ve açık denizden malzemenin karaya doğru taşınmasıdır. Yaygın katı madde kayıpları ise: rüzgarla açığa taşınan kum, tarama, bariyer adalarının su baskınına uğraması ile katı maddenin açık denize taşınımıdır. Böylelikle belirli koşullara bağlı olarak bazı süreçler kıyı için hem bir kaynak hem de kayıp işlevi görebilmektedir. Modelde farklı konumlara ve büyüklüklere göre, ilgili zamanlamaya sahip olan rastgele sayıda kaynak ve kayıp belirtilebilmektedir.

Katı madde kaynağı teriminin modelde girdi olarak uygulanabileceği bir uygulama örneği, katı maddeyi sabit bir ivmeyle inlete pompalayan özel bir katı madde bypassının olduğu kıyı mühendisliği uygulaması için verilebilmektedir. Bu durumda modelleme süresi boyunca sabit bir debiye sahip ($m^3/saat$) bypass terimi girilmektedir. Bu kıyı dolgusuna benzer bir işlev görmekte ancak kıyı dolguları basamak genişliğindeki artış olarak girildiğinden, kıyı dolgusundan farklı bir şekilde modele girdi olarak sunulmaktadır (Frey vd., 2014).

3
KARASU KIYISI'NDA KIYI ÇİZGİSİ DEĞİŞİMİNİN TANIMI VE SAHAYA AİT VERİLER

3.1 Giriş

Dalga ve akıntı etkisi altında deniz tabanı malzemesi hareket halindedir. Bu hareketler kıyı morfolojisinde değişime ve katı maddenin kıyı boyunca taşınmasına sebep olmaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınımıyla kıyıda erozyon ve yığılmalar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda ise kıyı çizgisi değişime uğramaktadır (Arı vd., 2011).

Küresel iklim değişikliği sonucu değişen dalga iklimi ve deniz seviyesindeki artışın da etkileri ele alınarak, kıyı alanlarında planlamalar yapılabilmesi için, kıyı boyu katı madde taşınımı, kıyıya dik katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişiminin mühendislik çalışmalarıyla belirlenmesi önem arz etmektedir.

Kıyı alanlarında kıyı boyu katı madde taşınımına bağlı kıyı çizgisi değişimleri kıyı bölgelerinde yaşayan topluluklar üzerinde endişe oluşturmaktadır. Kıyı çizgisinin geri çekilmesi, kumsalların kaybına ve sonuç olarak kıyı alanlarında yaşam süren toplumun günlük hayatlarında olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Uzun vadeli kıyı çizgisi gelişiminin tahmin edilmesi ve doğabilecek tehlikelerin önceden önlenebilmesi için erozyon gibi morfolojik değişimlerin sebebinin detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Çoğu zaman kıyı çizgisi değişiminin temel sebebi kıyı boyunca taşınan katı maddenin taşınım yönündeki gradyanlardır. Örneğin, kıyıdaki bir bölüme ait net taşınım yönünde artan bir hacim varsa, katı maddenin taşındığı diğer bölümde katı madde miktarı azalacak ve bölgede erozyona sebep olacaktır. Kıyıda meydana gelen erozyon kıyı çizgisinde gerilemeye sebep olacak ve kumul kaybı oluşacaktır. Bu nedenle kıyı çizgisi gelişimi açısından bir bölgenin stabilitesiyle ilgili yapılacak araştırmalarda öncelikli olarak kıyı boyu katı madde taşınım süreçlerinin ve kıyıya ait katı madde bütçesinin tanımlanması gerekmektedir (Mangor, 2004).

Kıyı çizgisinin stabilitesi için yapılacak olan çalışmalar kıyı mühendisleri için önem arz etmektedir. Kıyı çizgisi değişimini hesaplayabilen sayısal modeller, kıyı boyunca gelen dalga enerjisi ile oluşan katı madde taşınımının arasında bir ilişki olduğu ilkesiyle çalışmaktadır. Kıyı gelişimi modelleri kıyı boyu katı madde taşınımını detaylı bir şekilde benzeştirmese de kıyı çizgisi gelişimini, kumul yüksekliklerindeki değişimleri, hacim kayıplarını ve artışlarını güvenli bir şekilde tahmin etmektedir. Gelişmiş sayısal modeller katı madde taşınımlarının karmaşık fiziksel yapısını üç boyutlu olarak ele almaktadır (Abbott ve Price, 1994).

Çalışmanın bu bölümünde çalışma alanı Karasu kıyısına ait bazı problemler, bölgenin konumu, dalga ve rüzgar iklimi ile saha ölçümlerinden bahsedilmiştir.

3.2 Çalışma Alanı

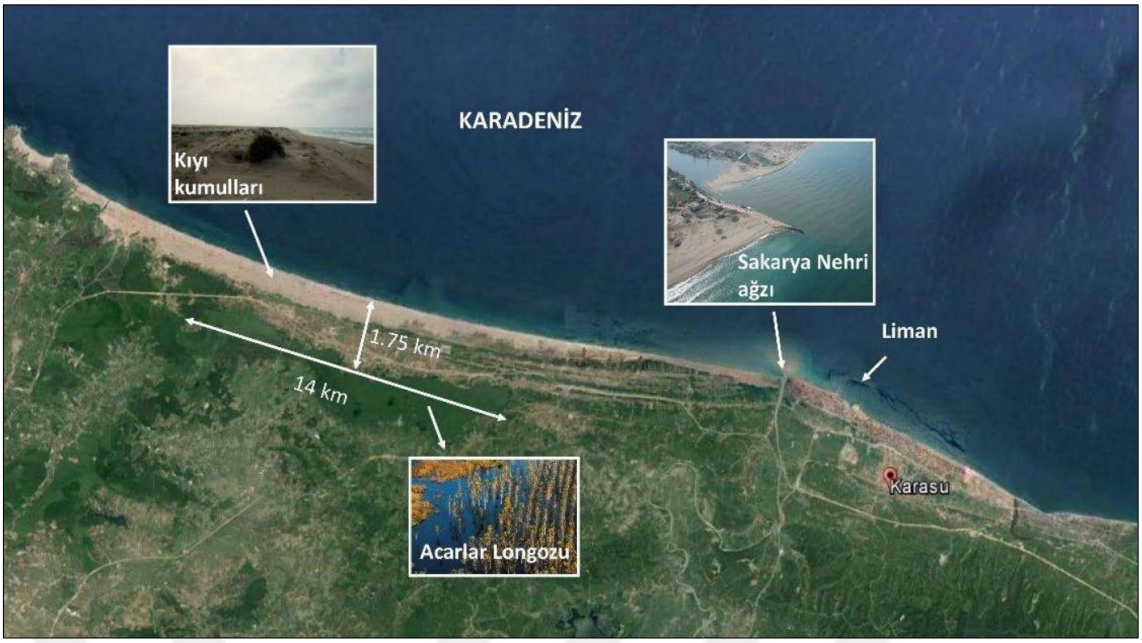
Çalışma alanı Karadeniz'in güneybatı kesiminde yer alan Karasu kıyısıdır. Karadeniz 40.91^0 K – 46.60^0 K enlemleri ve 27.45^0 D – 41.80^0 D boylamları arasında, kuzey ve kuzey doğusunda Kafkaslar, batısında Doğu Avrupa, güneyinde ise Anadolu ile sınırlanmış yarı kapalı bir havza olarak yer almaktadır. Karadeniz'in yüzey alanı 420,000 km^2, su hacmi ise 540,000 km^3 olarak belirtilmiş, ortalama derinliğin yaklaşık 1.2 km, en büyük derinliğin ise 2.2 km olduğu tespit edilmiştir (Avşar, 2019; Divinsky ve Kosyan, 2017). Güneyinde İstanbul ve Çanakkale Boğazlarıyla Akdeniz'e, kuzeyinde ise Don Volga Kanalıyla Hazar Denizine açılan Karadeniz'in; Batum, Odesa, Sinop, Sivastopol, Sochi, Trabzon, Varna ve Yalta gibi birçok liman şehrine kıyısı bulunmaktadır (Başar vd., 2015). Bulgaristan, Gürcistan, Romanya, Rusya, Türkiye ve Ukrayna ülkelerine kıyısı olan ve toplamda 5800 km'lik kıyı şeridine sahip olan Karadeniz; Dinyeper, Dinyester, Don Nehri, Kuban Nehri, Sakarya Nehri ve tüm Doğu ve Orta Avrupa'yı kapsayan Tuna Nehri tarafından beslenmektedir (Pauly, 2008).

Karasu kıyısı, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer alan Sakarya ilinin Karasu ilçesine ait kıyı kesiminde yer almaktadır. Karasu sahili Karadeniz'in güneybatısında, 30.30^0 D – 30.85^0 D boylamları, 41.225^0 K – 41.050^0 K enlemleri arasında konumlanmaktadır. Çalışma bölgesi Sakarya Nehir ağzının batı kısmında yer alan 25-30 km'lik alandır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Çalışma alanı Karadeniz ve Karasu kıyısı (Google Earth)

Karasu kıyısını besleyen Sakarya Nehri, kıyı bölgesinde delta oluşturmuştur. Bu delta doğu-batı yönünde yaklaşık 25 km'lik bir kumsaldan oluşmaktadır. Kumsal yapısı yaklaşık 100 metre genişliğinde geniş bir sahildir. Kumsal nehir ağzının doğusunda batı tarafına göre daha geniştir. Karasu bölgesindeki dalga yapısı doğudan batıya ve batıdan doğuya iki yönde de aktif şekilde kıyı boyu katı madde taşınımı meydana getirmektedir. Sakarya Nehir ağzında meydana gelen yoğun kum birikimleri ve kıyının morfolojik yapısı bu duruma işaret etmektedir. Sakarya Deltası Şekil 3.2'de görüldüğü gibidir (TMMOB, 2012; Şahin vd., 2021).



Şekil 3.2 Sakarya Nehri Deltası ve çevresi (Şahin vd., 2021)

Sakarya Nehri üzerindeki baraj gibi yapılar ve kum alımları gibi faaliyetler, Karasu kıyı bölgesinde son 10 yıldır erozyona sebebiyet vermektedir. Erozyon kıyı alanında yer alan yapılaşmayı olumsuz etkilemekte, yapılarda su baskınları veya zeminlerin kayması gibi problemler meydana getirmektedir. Ayrıca nehir ağzının 2 km doğusuna inşa edilen limandan kaynaklı olarak kıyının doğu kesiminde erozyon miktarı oldukça artmıştır. Bölgede yapılan çalışmada İkinci Dünya Savaşından kalan koruganlardan birisinin denize 95 m olan uzaklığının 10 m'ye kadar azaldığı gözlemlenmiştir (TMMOB, 2012).

Karasu kıyı bölgesinde çalışma alanı Sakarya Nehir ağzının batı tarafında yer alan yaklaşık 25 km'lik sahil bölgesidir. Kıyı alanına ait kıyı çizgisi verileri çeşitli uydu görüntülerinin sayısallaştırılmasından elde edilmiştir. Kıyı çizgisi değişim tahminleri için çalışma bölgesine ait dalga ve rüzgâr verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada Şahin vd. (2021) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen kıyı çizgisi, dalga ve rüzgâr verileri kullanılmıştır (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Başaran ve Güner, 2021).

3.3 Rüzgar ve Dalga İklimi

Dalgalar kendini oluşturan rüzgâr gerilmelerinin etkisindeki kuvvetin şiddetine göre farklı büyüklüklerde oluşurlar. Belli bir su kütlesinin içerisinde veya temas

halindeki her cisme dalga kuvveti etkidiğinden dalganın önemi ihmal edilemez. Dalgalar liman yapıları üzerinde dalga basıncına, basenlerde ise çalkantıya sebep olurlar. Kıyı çizgisi boyunca dalgaların neden olduğu kuvvet kıyı boyu katı madde taşınımına, erozyona ve deniz yapılarının hasar görmesine sebep olmaktadır (Yüksel vd., 1998).

Çalışma alanı olan Karasu kıyısında etkin rüzgâr yönü kuzeydoğudur (KD) ve bölgenin etkin dalga yönü dalga iklimi açısından kuzey-kuzeydoğudur (KKD). Karasu kıyı şeridi batı-kuzeybatı ile doğu-güneydoğu (BKB-DGD) doğrultusunda uzandığından, etkin rüzgâr ve dalga yönünün kıyıya neredeyse dik olduğunu söylemek mümkündür (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021).

3.3.1 Rüzgar

Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Karasu kıyısına ait hâkim rüzgâr yönü kuzey-kuzeydoğu (KKD), havzanın doğu kesiminde ise güneydir (G). Karadeniz'de özellikle kış aylarında rüzgâr koşulları değişkenlik göstermektedir ve kış mevsiminde rüzgârın etkin yönü genellikle kuzeybatı (KB) doğrultusundadır (Başaran ve Güner, 2021).

Karadeniz'e ait rüzgâr analizi çalışmalarında, bölgenin geneline göre Güneybatı Karadeniz Bölgesi'nin daha yüksek rüzgâr hızına, daha uzun fırtına sürelerine ve dalga güçlü rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bölgede aktif olan uzun dönemde kuvvetli rüzgâr koşulları kalıcı ve sürdürülebilir rüzgâr enerjisi potansiyeline sahiptir (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021).

3.3.2 Dalga

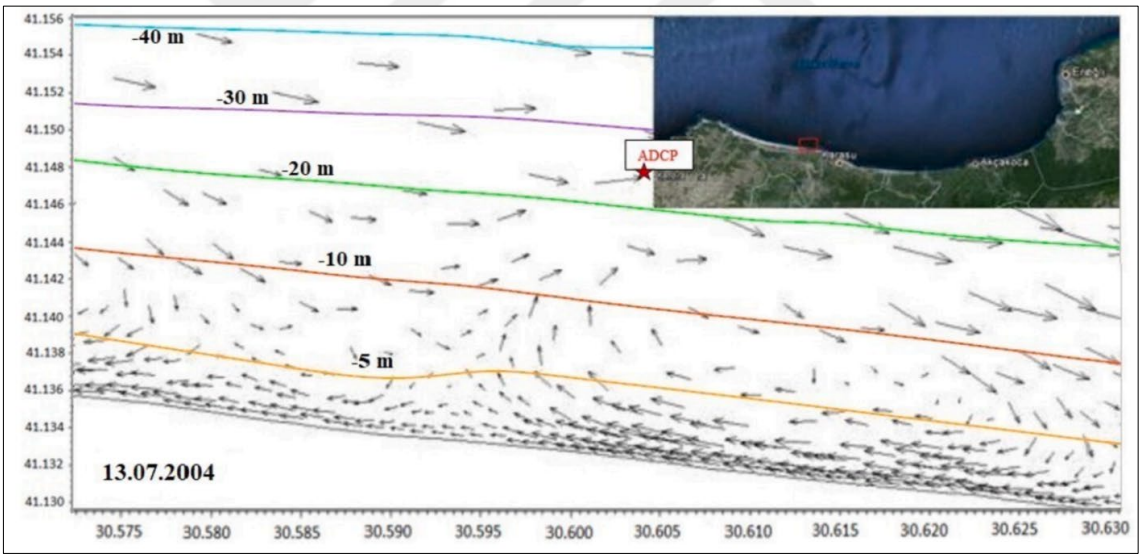
Çalışmada Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI) tarafından geliştirilen MIKE 21 SW üçüncü nesil dalga modelinden elde edilen dalga verileri ile çalışılmıştır (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021).

Avrupa Orta Dönemli Hava Tahmin Merkezi'nden (ECMWF) elde edilen rüzgar verileri dalga modeline tanıtılarak dalga iklimi belirlenmiştir. Bölgeye ait hâkim dalga yönünün kuzey-kuzeydoğu (KKD), kuzeydoğu (KD) ve kuzey (K) olduğu

görülmüştür. Ayrıca dalga yönlerine bakıldığında kuzey (K) ve kuzey-kuzeydoğu (KKD) yönlerinde büyük dalga yüksekliği oluşma yüzdelerinin daha fazla olduğu, kuzeydoğu (KD) yönünde ise bu durumun değiştiği gözlemlenmiştir. Daha az sıklıkla gelen ama şiddetli dalgalar ise kuzey-kuzeybatı (KKB) yönünden gelmektedir. Dalga ikliminin bu yapısı kıyı boyunca akıntı yapısı etkilemektedir (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021).

3.3.3 Akıntı

Çalışma bölgesi Karasu kıyısında akıntının Karadeniz'in genel sirkülasyon yapısına uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yoğunluk ve sıcaklığa bağlı olarak Karadeniz'deki ana sirkülasyon, saat yönünün tersi doğrultudadır. Bu akıntı yapısı kıyıdan gelen yüzey suları ile İstanbul Boğazı'ndan gelen Akdeniz sularının karışmasıyla küçük ölçekli bir sirkülasyon yapısı oluşturmaktadır. Bölgeye ait ayrıntılı akıntı yapısı Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir (Yüksel vd., 2014).



Şekil 3.3 Karasu kıyısına ait akıntı yapısı (Yüksel vd., 2014)

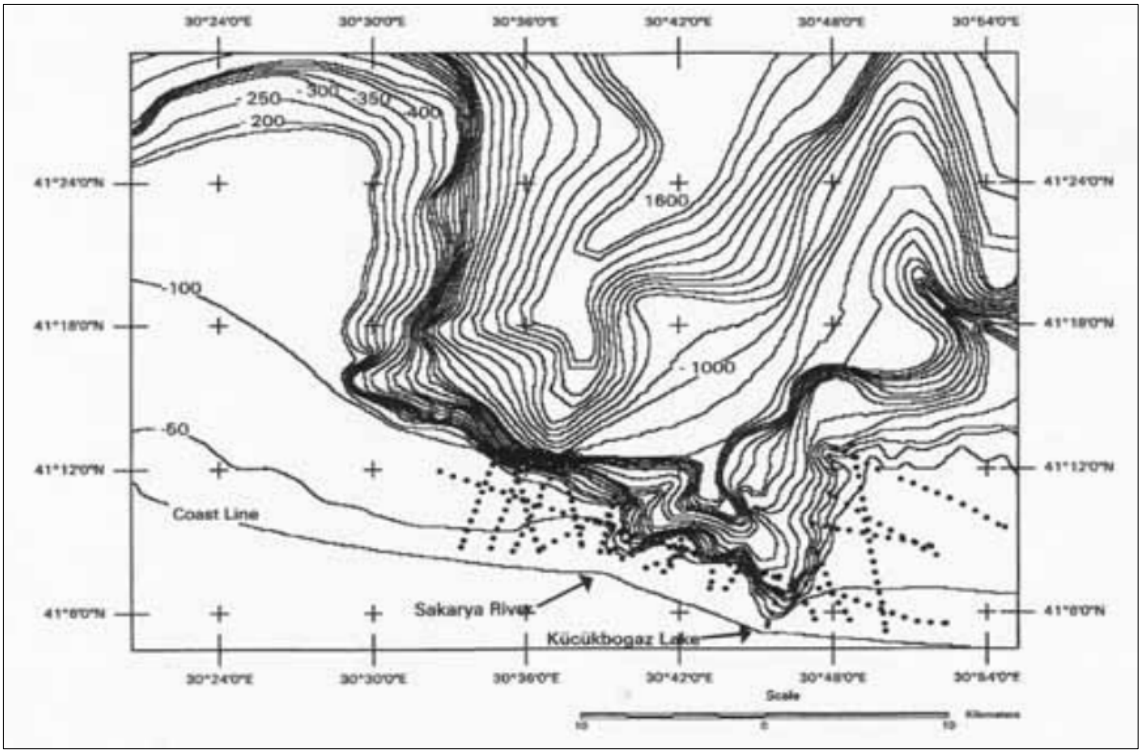
Karasu kıyısında aktif akıntı dalga kaynaklı olarak görülmektedir. Dalga modelinden elde edilen veriler, Karasu'nun doğu kıyılarına doğru akıntı yoğunluğunun arttığını göstermektedir. 5 m derinlikteki akıntı doğudan batıya doğru çok daha güçlü akıntılar meydana getirmektedir. 20 m derinlikte meydana gelen akıntılar ise 5 m derinlikteki akıntılara benzer bir model göstermektedir. Bölgenin doğu kesiminde kıyıya dik akıntılar meydana gelmektedir. Akıntı yönü 50 m derinlikte doğudan batıya doğru yön değiştirmekte ve akıntı yoğunluğu

doğuya doğru artmaktadır. 100 m derinlikte ise bölgedeki akıntı yönü, Karadeniz'in genel sirkülasyonu gibi batıdan doğuya doğru yönelmektedir (Yüksel vd., 2014).

3.4 Saha Ölçümleri

3.4.1 Batimetri ve Jeolojik Yapı

Sakarya Nehri deltası ve denizaltı kanyonu 100 m derinliğine kadar 10 km'den az dar bir morfolojik yapıdadır. Kanyon 50 m derinliğine kadar deniz tabanını keskin bir şekilde kesmektedir. Delta ucu uzantısı nehir ağzından 1.5 km mesafede kanyon tarafından kesilmektedir ve 5 km açığa kadar takip edilmektedir. Denizaltı kanyonu Sakarya Nehri ağzında ve Küçükburgaz Gölü önünde denizaltı deltasını ve kıyı şeridini kesen karaya doğru iki girinti yapmaktadır. Sakarya Nehri ağzındaki kanyon -50 metreden başlayıp -800 metreye ulaşarak yaklaşık 10 km'lik bir yapıdadır. Bu iki girinti 800 metreden sonra sert bir şekilde kuzeybatıya dönerek 1000 – 1100 metrelerde daha geniş bir kanyon olarak 2000 m su derinliklerine ulaşır. Bölgeye ait batimetri haritası Şekil 3.4'te verilmektedir (TMMOB, 2012).



Şekil 3.4 Karasu ayrıntılı batimetri haritası (TMMOB, 2012)

Katı madde kırılan dalgaların kıyı boyu akıntısının etkisiyle taşınır. Modelde kıyı boyu katı madde taşınımı için tahmine dayalı ifadeler gereklidir. Taşınım miktarı bölgesel olarak kırılan dalgaların yüksekliği ve yönüyle parametrelendirildiği için yakın kıyı sirkülasyonundaki ayrıntılar göz ardı edilmektedir.

Modelde kıyı profilinin taşınımda kendisine paralel hareket ettiği varsayıldığından dip profil şeklinin belirtilmesi gerekmez. Bundan dolayı GenCade modelinde kıyı eğimi ampirik parametrelerle model tarafından elde edilmektedir.

3.4.2 Katı Madde Özellikleri

Karasu bölgesinde katı madde özellikleri, farklı kesitlerden numuneler alınarak belirlenmiştir. Her bir enine kesit için 5 m, 10 m ve 15 m derinliklerinden üç ayrı numune seti hazırlanmıştır. Numunelerin tane boyu dağılımları granülometri deneyleri ile belirlenmiştir. Katı madde özellikleriyle ilgili deniz tabanı malzemesinin çok iyi sınıflanmış ve kohezif özelliklere sahip olmayan orta kum olduğu söylenebilmektedir. Bölgeye ait katı madde özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Tabloda görülen σ_g parametresi geometrik standart sapma, ϕ ise yatak malzemesi çapı için Wentworth ölçeğidir (Başaran ve Güner, 2021).

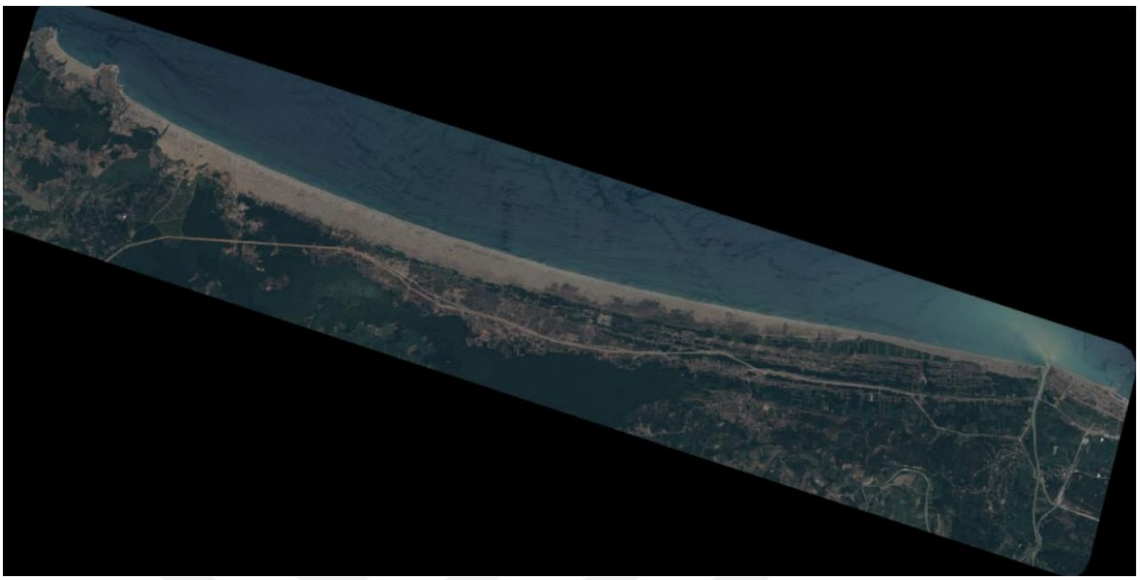
Tablo 3.1 Karasu bölgesi katı madde özellikleri (Başaran ve Güner, 2021)

D_{84} (mm)	D_{50} (mm)	D_{16} (mm)	σ_g	ϕ	Katı Madde
0.50	0.38	0.28	1.336	1.39	Orta Kum

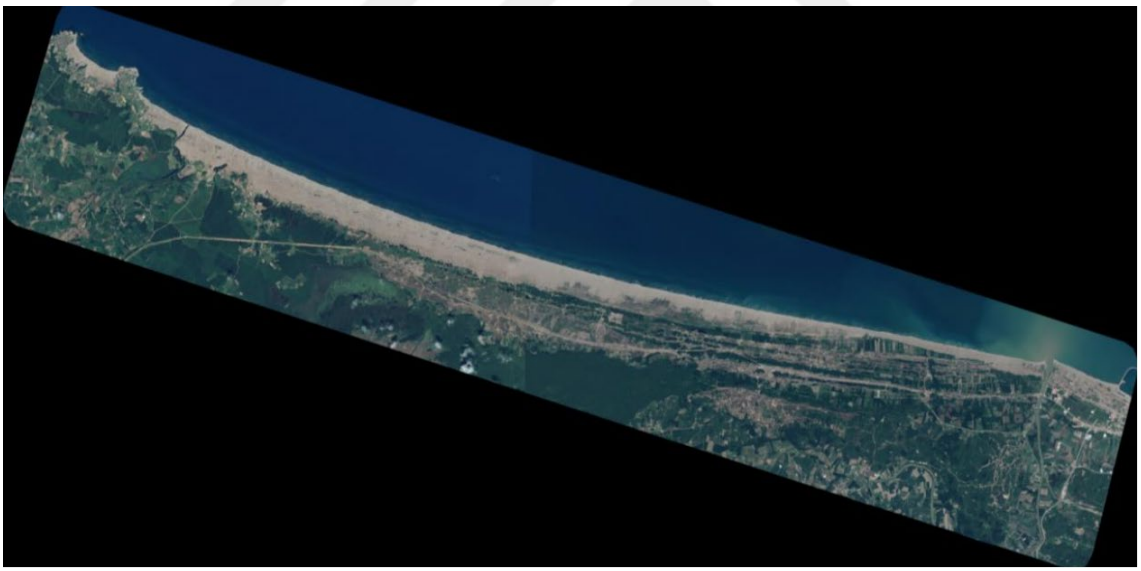
3.4.3 Kıyı Çizgisi Verileri

Karasu sahiline ait kıyı çizgisi verileri, 30/07/2013, 31/07/2014 ve 09/07/2015 tarihlerine ait 3 ayrı veri seti halinde PLEIADES uydu görüntülerinin sayısallaştırılmasıyla elde edilmiştir. 50 metre aralıklarla belirlenen 505 adet hücre ile toplamda 25200 metrelik kıyı çizgisi, bir baz çizgiye dayandırılarak konumlandırılıp çalışmada kullanılmıştır. 2013 (Şekil 3.5), 2014 (Şekil 3.6) ve 2015 yıllarına ait uydu görüntüleri (Şekil 3.7) 70 santimetrelik mekansal çözünürlüğe sahiptir.

2013 ve 2014 yıllarına ait kıyı çizgisi farkı modelin kalibrasyon sürecinde, 2014 ve 2015 yıllarına ait uydu görüntülerinden elde edilmiş kıyı çizgisi farkı ise modelin doğrulanması sürecinde kullanılmıştır.



Şekil 3.5 30/07/2013 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021)

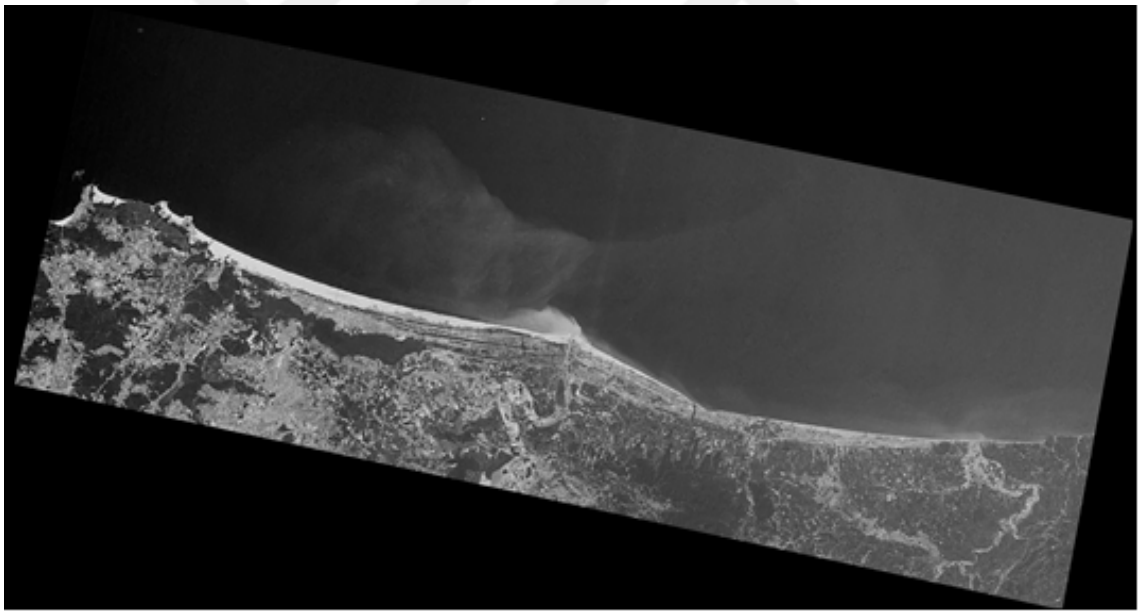


Şekil 3.6 31/08/2014 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021)



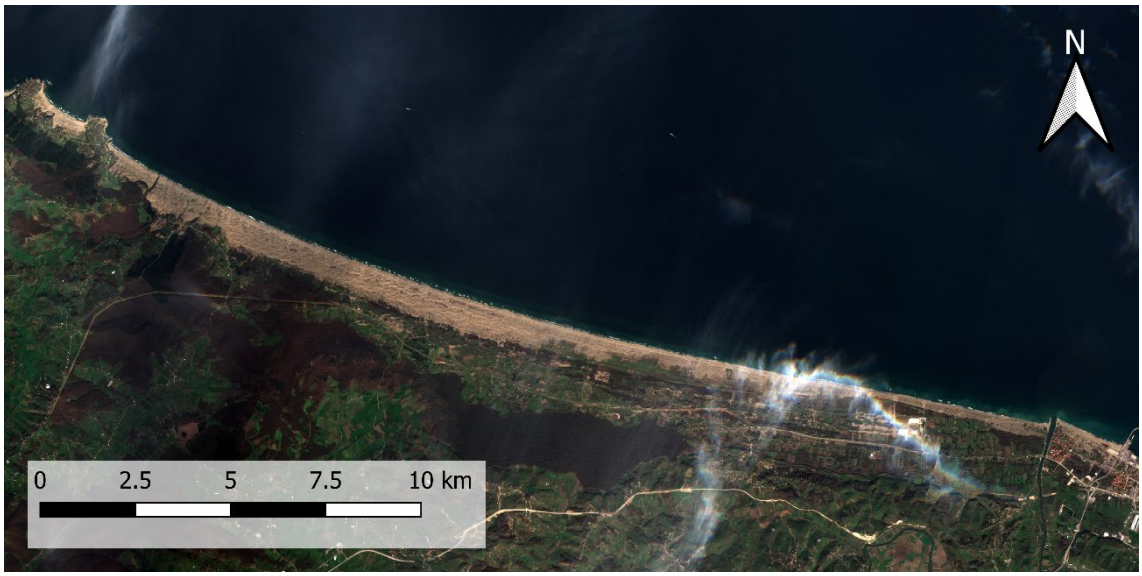
Şekil 3.7 09/07/2015 tarihine ait PLEIADES uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021)

1980'den günümüze kadar olan kıyı çizgisi değişimi çalışması için kullanılan 30/06/1980 tarihine ait 3m mekânsal çözünürlüğe sahip Keyhole-9 uydu görüntüsü Şekil 3.8'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.8 30/06/1980 tarihli Keyhole-9 Uydu görüntüsü (Başaran ve Güner, 2021, Şahin vd., 2021)

RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre gerçekleştirilen Karasu kıyısına ait 2100 yılına kadarki kıyı çizgisi değişimi tahmin çalışmasında kullanılan 2021 Ocak ayına ait 10 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel-2B uydu görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Karasu kıyısına ait 2021 Ocak ayı Sentinel-2B uydu görüntüsü (Şahin vd., 2021)

Uydu görüntülerinin sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgilerinin üst üste getirilmesi sonucu 2013-2014 yılları arasındaki ölçüm verilerine ait kıyı çizgisi değişimi miktarları belirlenmiştir. Buna göre Sakarya Nehir ağzının batı tarafında erozyonun maksimum seviyede ve 31 m olduğu, maksimum yığılmanın ise yine nehir ağzının batı noktasına yakın bölgede 34 m olduğu görülmüştür. Modelin doğrulama sürecinde kullanılan 2014-2015 yılları arasındaki kıyı çizgisi değişim miktarları incelendiğinde, maksimum erozyonun aynı bölgede 28 m olduğu, maksimum yığılmanın ise 34 m olduğu tespit edilmiştir (Şahin vd., 2021).

4
KARASU KIYI ÇİZGİSİNİN GÜNÜMÜZE KADAR OLAN GELİŞİMİNİN İNCELENMESİ

4.1 Giriş

Çalışmada Amerika Birleşik Devletleri Ordu Mühendisliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi (USACE-ERDC) tarafından geliştirilen ve tek boyutlu bir kıyı çizgisi gelişim modeli olan GenCade sayısal modeli kullanılmıştır. GenCade sayısal modeli kıyı çizgisi değişim tahmini, kıyı boyu katı madde taşınım miktarları gibi kıyı morfolojisi çalışmalarını içermektedir.

GenCade sayısal modeli uzun (yüzyıllar) veya kısa (yıllar) dönemler için kıyı çizgisi değişimini belirleyen, ayrık veya bağlı dalgakıranları, mahmuzları, jettyleri, kıyı duvarları gibi deniz yapılarını, aynı zamanda kıyı dolgusu ve kıyı yenileme işlemleri gibi mühendislik faaliyetlerini içinde barındıran bir kıyı gelişim modelidir. Model surf bölgesinde kırılan dalgaların ve bu dalgaların kıyı boyunca oluşturduğu akıntının etkisi altında meydana gelen ve CERC denklemiyle hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınımı sonrasında değişen kıyı çizgisini belirlemektedir. Model ayrıca körfez ve lagünlere giriş düzlüklerindeki katı madde hacim değişimlerini, katı madde bypass işlemlerini ve bu girişlerdeki morfolojik elemanlardaki değişimleri benzeştiren Körfez ve Lagün Girişleri Rezervuar Modeli (Inlet Reservoir Model, IRM) olarak adlandırılan bir modeli içermektedir. Sonuç olarak GenCade sayısal modeli deniz yapılarındaki katı madde değişim (yapılardan geçen, yapı önünde veya arkasında yığılma yapan vb.) süreçleri, körfez ve lagünlere girişlerdeki sığ bölgelerdeki morfolojik elemanların katı madde taşınım süreçleri vb. kıyı bölgesine ait varyasyonların kıyı çizgisi değişimi üzerindeki etkilerini hesaplamaktadır (Ding vd., 2021).

Çalışmanın bu bölümünde, GenCade modelinin kalibrasyon ve doğrulama süreçleri 2013, 2014 ve 2015 yıllarına ait saha verileri, MIKE 21 SW dalga modelinden elde edilmiş dalga verileri ve PLEIADES uydu görüntülerinin

sayısallaştırılmasıyla (Şahin vd., 2021) elde edilmiş kıyı çizgisi verileri ile gerçekleştirilmiştir.

Karasu kıyısında meydana gelen uzun dönemli kıyı çizgisi değişiminin belirlenebilmesi için, sayısal model 1980-2018 yılları arasında koşturulmuştur. Başlangıç kıyı çizgisi olarak 30/06/1980 tarihine ait Bölüm 3 - Şekil 3.8'de verilen Keyhole-9 (KH-9 Lower Resolution Mapping) uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgisi verileri, MIKE 21 SW dalga modelinden elde edilmiş dalga verileri (İşlek vd., 2020a; İşlek vd., 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021) ile kalibrasyon ve doğrulama sürecinde belirlenmiş parametreler kullanılarak GenCade sayısal modeliyle 1980-2018 yılları arası kıyı boyu katı madde taşınımları ve kıyı çizgisi değişimleri belirlenmiştir.

4.2 Sayısal Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

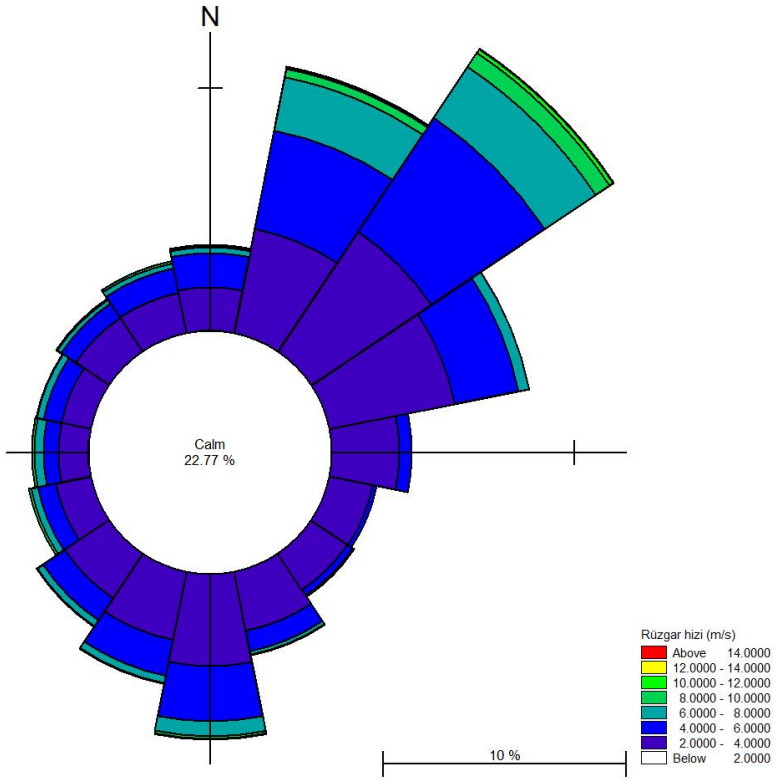
Çalışma bölgesi olan Karasu kıyısında 2013-2014 yılları arasında meydana gelen kıyı çizgisi değişimi, sayısal modelin kalibrasyon aşamasında maksimum verimle çalışmasını sağlayan ilgili parametreler belirlenerek tahmin edilmiştir. Modelin kalibrasyon sürecinde çalışma performansı Brier Beceri Notu (Brier Skill Score, BSS) ve standartlaştırılmış ortalama kare hatası (normalized mean square error, NMSE) adlı iki istatiksel hata parametresi kullanılarak belirlenmiştir.

Kalibrasyon sürecinde belirlenen ilgili parametrelerle, 2014-2015 yılları arasında değişen kıyı çizgisinin belirlenmesi ile modelin doğrulanması gerçekleştirilmiş, BSS ve NMSE istatiksel parametrelerine göre doğrulama sürecindeki model performansı belirlenmiştir.

4.2.1 Dalga ve Rüzgar İklimi

Karadeniz'de rüzgar koşulları özellikle kış mevsiminde değişkenlik göstermektedir. Karasu kıyısının içinde bulunduğu Batı Karadeniz Bölgesi'nde hakim rüzgar yönü kuzey-kuzeydoğu (KKD) iken bölgenin doğusunda güneyden (G) esen rüzgarlar hakimdir. Kış mevsiminde kuvvetli rüzgarlar genelde kuzeybatı (KB) yönünden esmektedir (İşlek vd., 2020a; Başaran ve Güner, 2021).

Kalibrasyon ve doğrulama aşaması için 2013-2015 yıllarına ait Karasu kıyısı rüzgar verileri Avrupa Orta Dönemli Tahmin Merkezi'nden (ECMWF) elde edilen verileri kullanılmıştır. Karasu kıyı alanında rüzgar en çok kuzeydoğu (KD) yönünden esmektedir. Ayrıca bölgede rüzgar kuzeydoğu yönünden sonra en çok kuzey-kuzeydoğu (KKD) ve doğu-kuzeydoğu (DKD) yönlerinden esmektedir. Karasu kıyısı 2013-2015 yıllarına ait rüzgar gülü Şekil 4.1'de verilmiştir (Şahin vd., 2021).

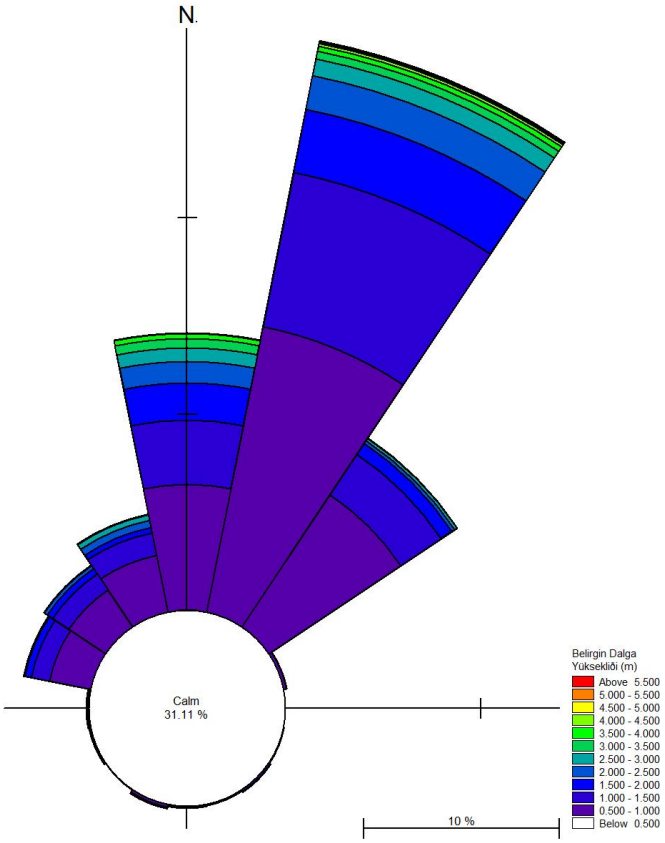


Şekil 4.1 Karasu kıyısı için 2013-2015 yılları arası rüzgâr gülü (Şahin vd., 2021)

Dalga verileri küresel rüzgâr verilerini içeren ERA-Interim veri setinin MIKE 21 SW dalga modeline tanıtılmasıyla elde edilmiştir. 2013, 2014 ve 2015 yıllarındaki 3 yıllık dönemi kapsayan rüzgar veri seti, deniz seviyesinin 10 m üstündeki rüzgar hızı bileşenlerini sağlamaktadır. İlk olarak dalga modeli ile 0.50x0.50 ağ çözünürlüğü ve 6 saatlik (günde 4 adet analiz; 00, 06, 12 ve 18 UTC) zamansal çözünürlüğe sahip rüzgâr verileri modellenmiş ve saatlik dalga verileri elde edilmiştir.

Model sonuçlarına göre 2013-2015 yılları arası Karasu kıyısına dalganın en fazla kuzey-kuzeydoğu (KKD), kuzey (K) ve kuzeydoğu (KD) yönlerinden gelmekte

olduğu, kıyıya dalga geliş sıklığı bakımından bu yönleri kuzey-kuzey batı (KKB) yönünün takip ettiği görülmüştür. Dalga yüksekliği parametresi açısındansa en yüksek dalgaların kuzey ve kuzey-kuzeydoğu yönlerinden geldiği, kuzeydoğu yönünde ise daha küçük yükseklikte dalgaların kıyıya geldiği belirlenmiştir. 2013-2015 yılları arasında Karasu kıyısına ait dalga gülü Şekil 4.2'de belirtildiği gibidir (Şahin vd., 2021).

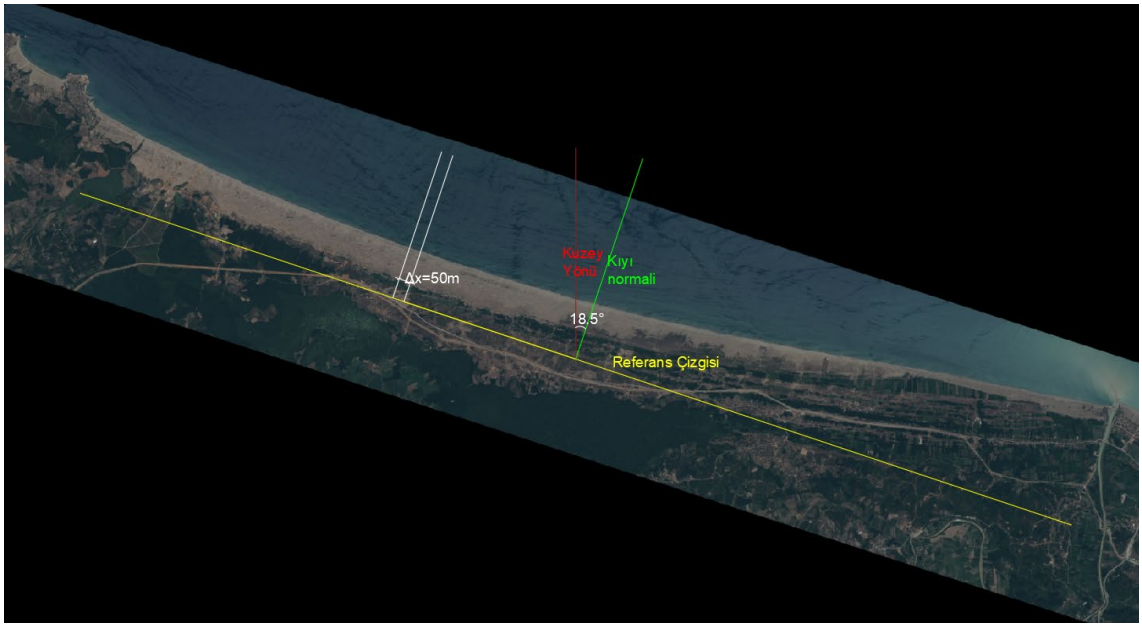


Şekil 4.2 Karasu kıyısı için 2013-2015 yılları arası dalga gülü (Şahin vd., 2021)

4.2.2 Model Kalibrasyonu

GenCade modelinin kalibrasyon çalışmasında 2013-2014 yıllarına ait 2 adet uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgisi verileri kullanılmıştır. Sayısallaştırma çalışmasında kıyı çizgileri, kıyı normalinin kuzey yönü ile 18.5^0 açı yapan bir referans çizgisi belirlenmesi ve 50 metre olarak düzenlenen hücre aralıkları ile her bir hücrenin referans çizgisine olan mesafesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.3). Kıyı çizgisi toplamda 25,200 metre olup 505 adet hücreden oluşturulmuştur.

İşlek (2020a, 2020b), Şahin vd. (2021) çalışmalarında tüm Karadeniz'i MIKE 21 SW dalga modeli ile modellenmiş, Şahin vd. (2021) ile Başaran ve Güner (2021) tarafından yapılan çalışmalarda bu model sonuçlarından ilgili dalga parametreleri Karasu kıyı alanı için elde edilmiştir. Kalibrasyon aşamasında 60-80 metre arasındaki farklı derinliklerde elde edilen ve 30/07/2013 tarihi ile 29/07/2014 tarihi arasındaki saatlik dalga verileri (Başaran ve Güner, 2021) kullanılmıştır. Modelde zaman adımı 1 saat olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3 Referans çizgisinin konumu ve ağ aralığı

Kalibrasyon aşamasında GenCade sayısal modeline ait boyutsuz kalibrasyon parametreleri birçok kez test edilerek modelin çalışma performansı açısından en uygun parametreler belirlenmiştir.

4.2.2.1 Kalibrasyon Parametreleri

GenCade modelinde 3 ayrı kalibrasyon parametresi bulunmaktadır. Bunlar K_1, K_2 ve ISMOOTH parametreleridir.

K_1

Bölüm 2.5.3'te detaylı olarak anlatılan kıyı boyu katı madde taşınımı Q (m^3/s) CERC denklemi (2.8) eşitliği için K_1 (2.9) eşitliğinde nominal değeri 0.77 olan ampirik bir katsayı olarak verilmektedir. Modelin kalibrasyonunda K_1 değeri 0.1 ile 1.5 aralığında test edilmiş; 0.1 ile 0.3 arasında ölçüm değerlerine yakın sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Böylelikle bu aralıkta yapılan daha detaylı

denemeler sonrasında modelde en uygun sonucu veren K_1 değerinin 0.15 olduğu tespit edilmiştir.

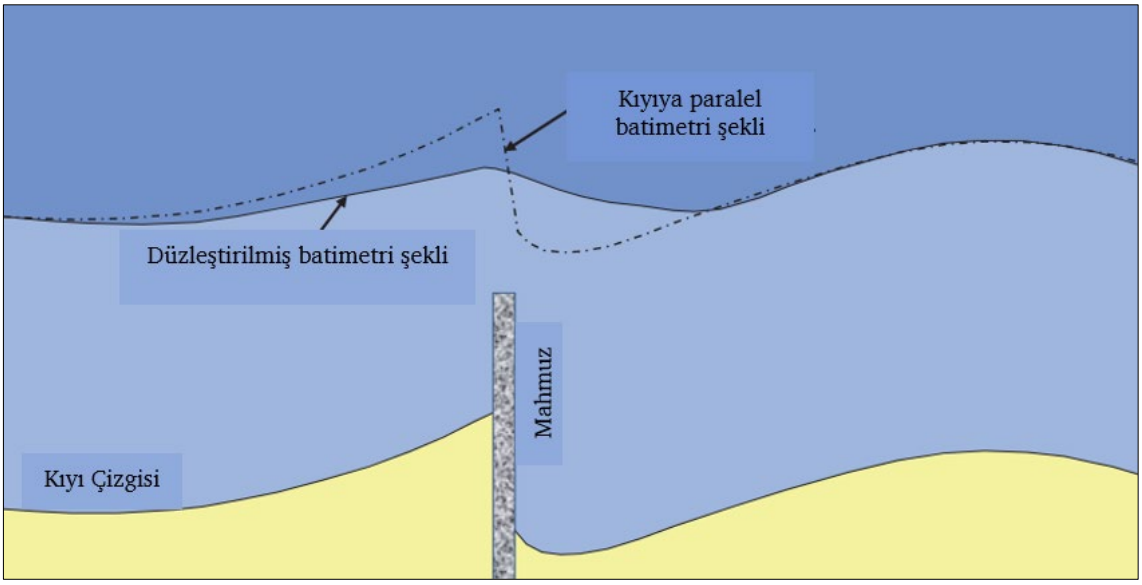
K_2

Hanson ve Kraus (1989) K_1 ve K_2 arasındaki bağıntıyı $0.5K_1 < K_2 < 1.5K_1$ olarak tavsiye etmiştir. K_2 parametresi özellikle ayrık dalgakıranlar, mahmuz ve jetty gibi deniz yapılarına yakın dalga dönme bölgesinden etkilenen alanlardaki kıyı çizgisi değişiminde etkili olmaktadır. K_2 için yapılan denemeler sonucunda en ideal K_2 değerinin $0.5K_1$'e karşılık geldiği belirlenmiştir.

Yakın Kıyı Batimetrisinin Düzleştirilmesi - ISMOOTH

Yakın kıyıya ait kıyı profili için, model kıyı çizgisi değişim modeli formülasyonunda temel bir varsayımla çalışmaktadır. Bu varsayım kıyı profilinin kıyı çizgisine paralel hareket etmesidir. Düzleştirilmiş batimetri verisi kıyı çizgisindeki değişimin kıyı profilinden geri beslendiğini tanımlamaktadır fakat kıyı çizgisinin doğrudan bir kopyasının ele alınmamasını sağlamaktadır. Model dalga verilerinin hesaplamasını yaparken Şekil 4.4'te görüldüğü gibi düzleştirilmiş batimetri şeklini baz almaktadır. Düzleştirilmiş batimetri verisinin açık deniz batimetrisini daha iyi tahmin ettiği varsayılmaktadır. GenCade sayısal modelinde bu veri tüm hücreleri kapsayan bir pencere üzerinde ISMOOTH parametresiyle çalışmaktadır ve ISMOOTH değerinin 1 olması durumu ekstrem biçimde batimetrinin kıyı çizgisine paralel olduğunu (Şekil 4.4'teki kesikli çizgi), 100'e yaklaşması ise daha düz bir taban yapısını ifade etmektedir (Şekil 4.4'teki düz çizgi).

Bu aşamada ISMOOTH parametresini belirlerken 1 ile 100 arasında birçok test yapılmıştır. En iyi değerin 20 ile 30 arasında kalmasından dolayı bu aralıkta daha detaylı denemeler yapılıp en uygun düzleştirme değerinin 23 olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 4.4 Yakın kıyı batimetrisinin düzleştirilmesi (Frey vd., 2012)

4.2.2.2 Katı Madde Özellikleri ve Kıyıya Ait Parametreler

Kıyı gelişiminin belirlenmesinde kıyı alanını temsil eden üç ayrı parametre bulunmaktadır. Bunlar: kapama derinliği (d_k), basamak yüksekliği (d_b) ve ortalama tane çapıdır (d_{50}).

Modelde kıyı profil yapısının sabit kaldığı varsayılmaktadır. Örneğin uzun dönem için dik ve sarp bir yapıya sahip kıyı yapısı modelde dik ve sarp olarak kalırken küçük eğimli kıyı alanı ise orantılı olarak küçük eğimli yapısını koruyacaktır. Dalga iklimindeki dönemsel değişiklikler kıyıya veya açığa doğru döngüsel taşınım hareketlerine sebep olsa da aktif profilin ortalama eğimindeki değişiklik görece küçük kalacaktır. Profilin deniz ve kıyı taraflarında derinlik limitleri sabittir. Bu şu anlama gelir; model katı maddenin iyi planlanmış iki kot arasında taşınım yaptığını varsaymaktadır. Bu iki kot ise kıyıda basamak yüksekliği, açıkta ise kapama derinliğidir (Frey vd., 2012).

Kapama Derinliği (d_k)

Dean (2002)'in vermiş olduğu kapama derinliği ifadesi (4.1):

$$d_k = 2.28H_{s,12} - 68.5\left(\frac{H_{s,12}^2}{gT^2}\right) \tag{4.1}$$

şeklindedir. Burada; d_k (m) kapama derinliği, $H_{s,12}$ (m) 12 saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliğidir. Ayrıca GENESIS modelinde yer alan Hanson (1987) tarafından verilen (4.2) eşitliği:

$$d_k = 2H_{maks} \tag{4.2}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada H_{maks} (m) bir yılda oluşabilecek en büyük dalga yüksekliğini ifade etmektedir.

Bölgeye ait kapama derinliğinin 8 metre ile 17 metre arasında olduğu hesaplanmıştır. Kalibrasyon aşamasında kapama derinliği 8 ile 17 metre arasında koşturularak uygun derinliğin 15 metre olduğu belirlenmiştir.

Basamak Yüksekliği (d_b)

Bölgede basamak yüksekliğinin 2 metre ile 6 metre arasında değiştiği 117Y333 numaralı TUBİTAK projesi (Şahin vd., 2021) kapsamında yapılan arazi ölçümlerinde belirlenmiştir. Kalibrasyon aşamasında sayısal modelde basamak yüksekliği ölçüm noktalarına göre 2 ile 6 metre arasında koşturulmuştur.

Ortalama Tane Çapı (d_{50})

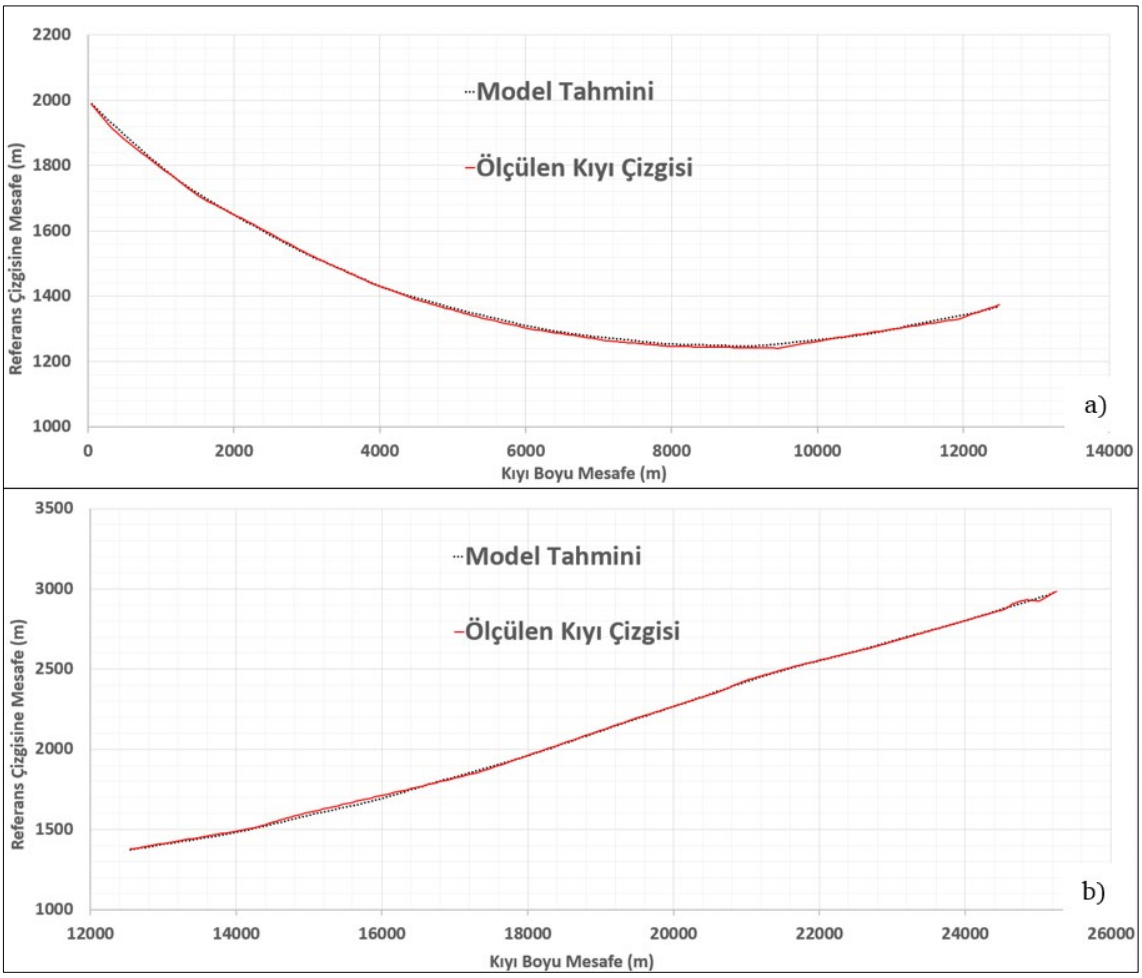
Bölüm 3.4.2'de verilen değer modelde ortalama tane çapı (d_{50}) parametresi için kullanılmıştır.

4.2.3 Kalibrasyon Sonuçları

Kalibrasyon sürecine ait model sonuçları ile ölçüme ait değerler karşılaştırıldığında:

- Model sonucuna göre 2013-2014 yılları arasında maksimum erozyonun 12.8 metre olduğu gözlemlenmiştir. 2013-2014 uydu görüntüleri verilerine göre ise en büyük erozyonun 18.2 metre olduğu belirlenmiştir.
- Model sonucuna göre 2013-2014 yılları arasında en büyük yığılmanın 20 metre olduğu, bu değerin 2013-2014 uydu görüntülerine göre 32.2 metre olduğu gözlemlenmiştir.
- En büyük yığılmanın model sonucuna ve ölçüm verilerine göre Sakarya Nehir ağzına yakın bölgede meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kalibrasyon sürecine ait model tahmin sonuçları ve uydu görüntülerinden ölçülen kıyı çizgisi Şekil 4.5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.5 2013-2014 kalibrasyon süreci kıyı çizgileri; a) 0-12.5 km arası, b) 12.5-25.2 km arası

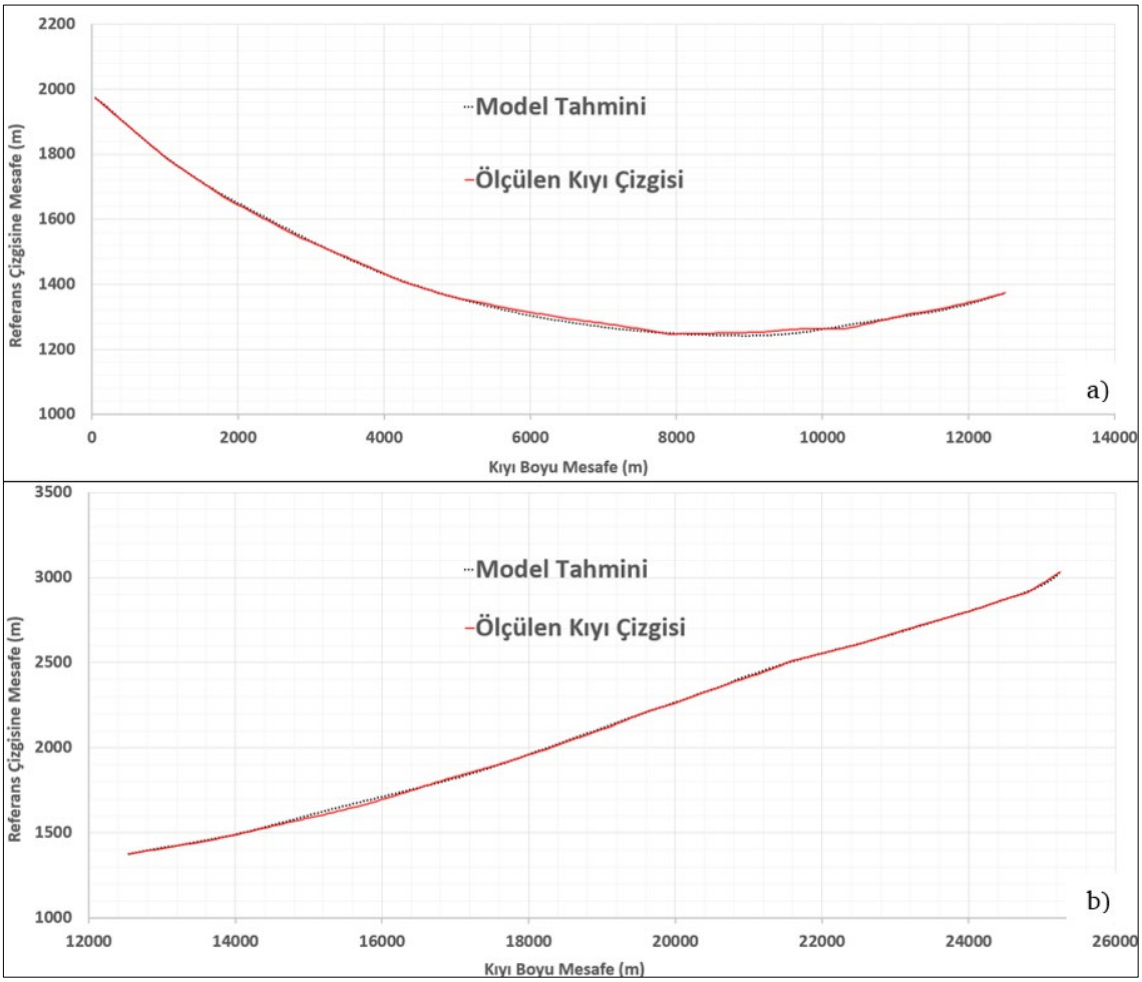
4.2.4 Modelin Doğrulanması

Modelin doğrulama aşamasında 2014 ve 2015 yıllarına ait 2 adet uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilmiş kıyı çizgisi değerleri kullanılmıştır. Kalibrasyon süreciyle aynı şekilde kıyı çizgileri kuzeyle 18.5^0'lik açı yapan bir kıyı normaline sahip referans çizgisiyle sayısallaştırılmıştır. Kıyı çizgisi toplamda 25,200 metre olup 505 adet hücreden oluşturulmuştur.

Doğrulama aşamasında dalga verisi olarak 60-80 metre arasındaki farklı derinlikler için elde edilen 01/08/2014 tarihi ile 31/07/2015 tarihi arasındaki saatlik dalga verileri (Başaran ve Güner, 2021) ile kalibrasyon aşamasında

belirlenen diğer parametreler koşturulmuş ve modelin doğrulanması yapılmıştır. Model doğrulama aşamasında zaman adımı 1 saatlik olarak belirlenmiştir.

Modelin doğrulama sürecine ait model tahmin sonuçları ve uydu görüntülerinden ölçülen kıyı çizgisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



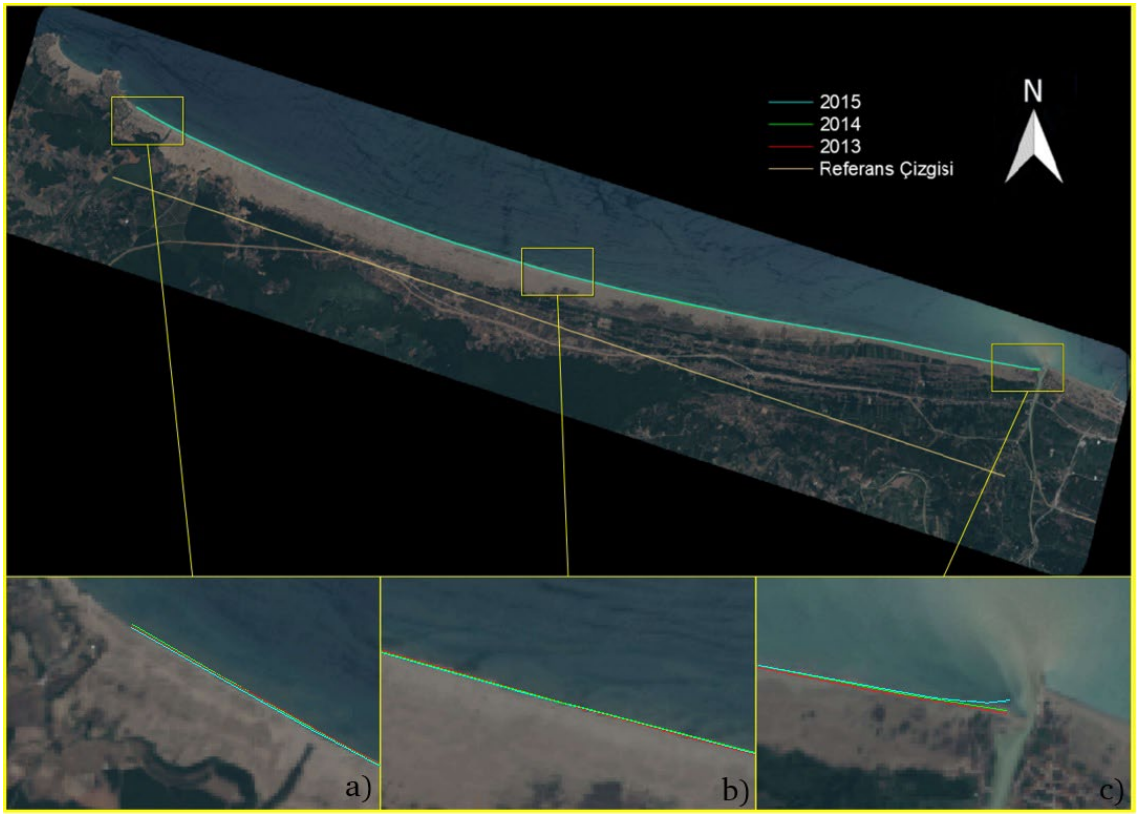
Şekil 4.6 2014 – 2015 doğrulama süreci kıyı çizgileri; a) 0-12.5 km arası, b) 12.5-25.2 km arası

Modelin doğrulanması sürecine ait kıyı çizgisi değişim miktarları şu şekildedir;

- Model sonucuna göre 2014-2015 yılları arasında maksimum erozyonun 16.2 metre olduğu gözlemlenmiştir. 2014-2015 uydu görüntüleri verilerine göre ise en büyük erozyonun 21.6 metre olduğu belirlenmiştir.
- Model sonucuna göre 2014-2015 yılları arasında en büyük yığılmanın 39.5 metre olduğu, bu değerin 2014-2015 uydu görüntülerine göre 47.7 metre olduğu gözlemlenmiştir.

- En büyük yığılmanın model sonucuna ve ölçüm verilerine göre Sakarya Nehir ağzına yakın bölgede meydana geldiği tespit edilmiştir.

Model kalibrasyon ve doğrulama süreçlerine ait kıyı çizgisi değişiminin uydu görüntüsü üzerinde sayısallaştırılmış görüntüsü Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Model kalibrasyon (2013-2014) ve doğrulama (2014-2015) süreçlerine ait sayısallaştırılmış kıyı çizgileri, a) sol uç, b) orta nokta, c) sağ uç

4.2.5 Modelin Çalışma Performansı

Modelin çalışma performansını belirlerken 2 ayrı hata parametresi olan Brier Beceri Notu (Brier Skill Score, BSS) ve standartlaştırılmış ortalama kare hatası (normalized mean square error, NMSE) kullanılmıştır.

$$NMSE = \frac{\sum_i \left(y_{p_i} - y_{m_i}\right)^2}{\sum_i {y_{m_i}}^2} \tag{4.3}$$

Burada; y_p model tahmini, y_m ise uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgisidir. İyi bir modelde NMSE oranı 0'a yaklaşmaktadır. Bu modeldeki tüm tahminlerin ölçülen son kıyı çizgisi değeriyle iyi eşleştiğini ifade etmektedir. Genellikle NMSE model performansını belirlemede etkili bir parametre olsa da paydadaki fark

teriminin karesi alındığından, büyük sapmalara karşı hassastır, bu yüzden NMSE oranında üst bir sınır bulunmamaktadır ve sıfıra yakın bir değer aldığında modelin iyi performans gösterdiğine işaret etmektedir. Birkaç uç noktada sonuç alınan tahmin değeri iyi bir model tahmininde dahi yüksek bir NMSE değerine neden olabilir. Bu durumda BSS, NMSE oranını tamamlayabilmektedir. BSS; (4.4) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$BSS = \frac{\sum(y_p - y_m)^2}{\sum(y_b - y_m)^2} \tag{4.4}$$

Burada; y_b ilk uydu görüntüsünden alınan kıyı çizgisi konumudur (Miller ve Dean, 2004).

Model çalışma performansı açısından BSS oranı Tablo 4.1'de belirtildiği gibi 5 ayrı seviyede tanımlanmaktadır (Sutherland vd., 2004).

Tablo 4.1 Model çalışma performansı açısından BSS değerleri (Sutherland vd., 2004)

Model Çalışma Performansı	BSS
Çok iyi	1.0 – 0.5
İyi	0.5 – 0.2
Orta	0.2 – 0.1
Kötü	0.1 – 0.0
Çok kötü	<0.0

Çalışmanın kalibrasyon ve doğrulama süreçleri için elde edilen hata değerleri BSS ve NMSE istatiksel parametreleri için Tablo 4.2'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre model Karasu kıyısı için kalibrasyon sürecinde her iki istatiksel hata parametresine göre iyi sonuçlar vermiştir. Yine doğrulama sürecinde model sonuçları BSS istatiksel hata parametresine göre bir alt sınıfta değerlendirilse de model çalışma performansı "iyi" olarak sonuçlanmıştır. Ayrıca model doğrulama sürecinde de NMSE istatiksel hata parametresine göre sıfıra çok yakın kalarak iyi sonuç vermiştir.

Tablo 4.2 Model tahmin süreçlerine göre hata oranları

Tahmin Süreçleri	BSS	NMSE
Kalibrasyon 2013 – 2014	0.54	1.43×10^{-5}
Doğrulama 2014 – 2015	0.44	1.55×10^{-5}

4.3 Uzun Dönemli Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi

Modelin kalibrasyon ve doğrulama süreçleri tamamlandıktan sonra Karasu bölgesine ait uzun dönem kıyı çizgisi değişiminin tahmini için GenCade sayısal modeli 1980-2018 yılları arasında koşturulmuştur. Başlangıç kıyı çizgisi verileri Bölüm 3 - Şekil 3.8'de verilen Keyhole-9 (KH-9 Lower Resolution Mapping) Uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasıyla elde edilmiştir. Kuzey ile 18.5^0 açı yapan kıyı normaline sahip bir referans çizgisinin belirlenmesiyle, referans çizgisine olan mesafelerin her 50 metrede bir hesaplanması sonucunda 25000 metrelik 501 adet kıyı çizgisi verisi belirlenmiştir. İlk kıyı çizgisi verisinin elde edildiği 30/06/1980 tarihine ait Keyhole-9 uydu görüntüsü 3m mekânsal çözünürlüğe sahiptir (Başaran ve Güner, 2021).

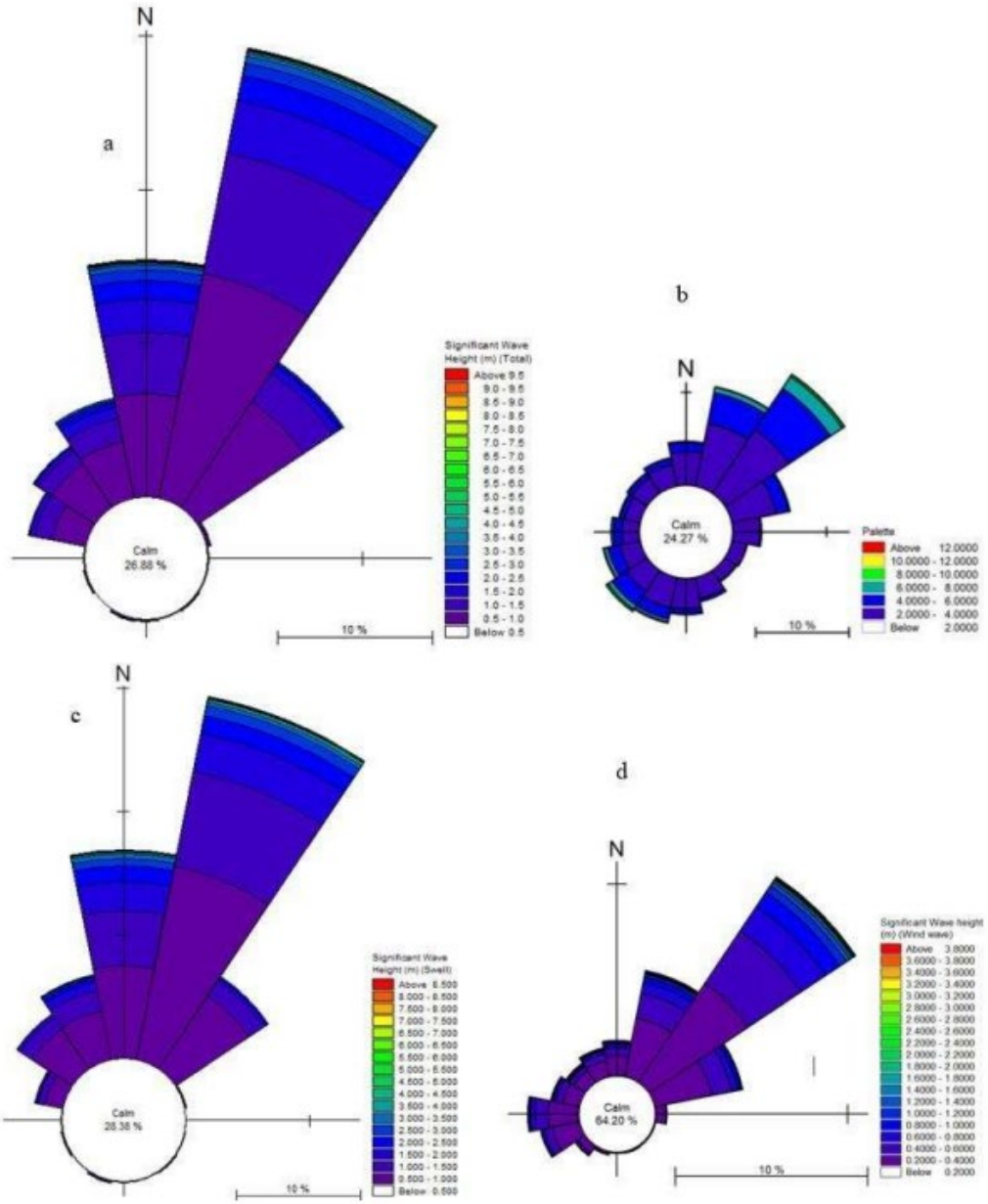
1980-2018 tarihleri arasındaki model tahmini sürecinde kalibrasyon ve doğrulama aşamasında belirlenen parametreler girdi olarak tanımlanmıştır.

4.3.1 Dalga ve Rüzgâr Verileri

Karasu kıyısı uzun dönem kıyı çizgisi değişimi için 1979-2018 yılları arasındaki dalga iklimini temsil eden soluğan ve rüzgâr dalgası verileri kullanılmıştır. Dalga verileri küresel rüzgâr verilerini içeren ERA-Interim veri setinin MIKE 21 SW dalga modeline tanıtılmasıyla elde edilmiştir. 1979 ile 2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönemi kapsayan veri seti, deniz seviyesinin 10 m üstündeki rüzgar hızı bileşenlerini sağlamaktadır. İlk olarak dalga modeli ile 0.5^0x0.5^0 ağ çözünürlüğü ve 6 saatlik (günde 4 adet analiz; 00, 06, 12 ve 18 UTC) zamansal çözünürlüğe sahip rüzgâr verileri modellenmiş ve saatlik dalga verileri elde edilmiştir. Buna göre çalışma alanının bulunduğu Batı ve Güneybatı Karadeniz'in Doğu Karadeniz'e göre rüzgar iklimi açısından daha yüksek enerjiye sahip olduğu görülmektedir.

Bölgede 40 yıllık ortalama rüzgar hızının 4 m/s olduğu ve hakim rüzgar yönünün kuzeydoğu (KD) olduğu görülmektedir (İşlek, 2020a, 2020b; Şahin vd., 2021; Başaran ve Güner, 2021).

Çalışma kapsamında elde edilen dalga modeli parametreleri 0.25^0x0.25^0 ağ çözünürlüğüne ve 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Karasu kıyısında 1979-2018 yılları arasındaki 40 yıllık dönemde mevcut dalgaların yönsel davranışlarını belirleyebilmek için dalga ve rüzgâr gülleri oluşturulmuştur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Karasu bölgesine ait 1979-2018 yılları arasındaki dalga ve rüzgar gülleri; a) toplam dalga gülü, b) rüzgar gülü, c) soluğan dalgaları gülü, d) rüzgar dalgaları gülü (Başaran ve Güner, 2021)

Dalga ve rüzgâr gülleri incelendiğinde Karasu kıyısına gelen dalgaların ve bölgede etkin rüzgârın hâkim yönünün kuzey-kuzeydoğu (KKD) olduğu görülmektedir. Soluğan dalgaları için hâkim yön yine kuzey-kuzeydoğu, bu yönü takip eden yönler ise kuzey (K) ve kuzeydoğudur (KD). Rüzgâr dalgaları için hâkim yön kuzeydoğu iken bu yönü kuzey-kuzeydoğu ve doğu-kuzeydoğu (DKD) yönleri takip etmektedir. Dalga ve rüzgâr güllerinden yola çıkarak rüzgâr dalgalarının etkin yönünün toplam ve soluğan dalgalara göre kuzey yönünden doğu yönüne doğru kaymakta olduğunu, ayrıca soluğan ve toplam dalga güllerinin benzer bir yön dağılımına sahip olduğunu söylemek mümkündür. Bu durumda Karasu kıyı bölgesinde toplam dalgalar üzerinde soluğan dalgalarının baskın olduğu söylenebilmektedir (Başaran ve Güner, 2021).

Dalga iklimine ait toplam dalga, soluğan dalgası ve rüzgar dalgası parametrelerinin (belirgin dalga yüksekliği, dalga pik periyodu ve ortalama dalga açısı) 1980-2018 yılları arasında değişimi Tablo 4.3'te verilmiştir (Başaran ve Güner, 2021).

Dalga veri seti modelde kıyı 1980-2018 yıllarına ait kıyı çizgisi değişiminin belirlenebilmesi için 60-80 metre derinlikte çalıştırılmıştır. GenCade sayısal modeli saatlik olarak elde edilen 40 yıllık toplam 337,531 adet dalga verisiyle koşturulmuştur.

Tablo 4.3 1980-2018 yılları model sonucuna göre dalga parametrelerinin yıllık ortalama değişimi (Başaran ve Güner, 2021)

Dalga Parametreleri	Toplam Dalga	Soluğan Dalgası	Rüzgar Dalgası
Belirgin dalga yüksekliği, H_s	% 2.8 azalış	% 4.1 azalış	% 3.9 azalış
Pik dalga periyodu, T_p	% 0.5 artış	% 0.6 artış	% 2.5 azalış
Ortalama dalga açısı, α_0	0.25^0 doğuya kayma	0.60^0 doğuya kayma	1.70^0 batıya kayma

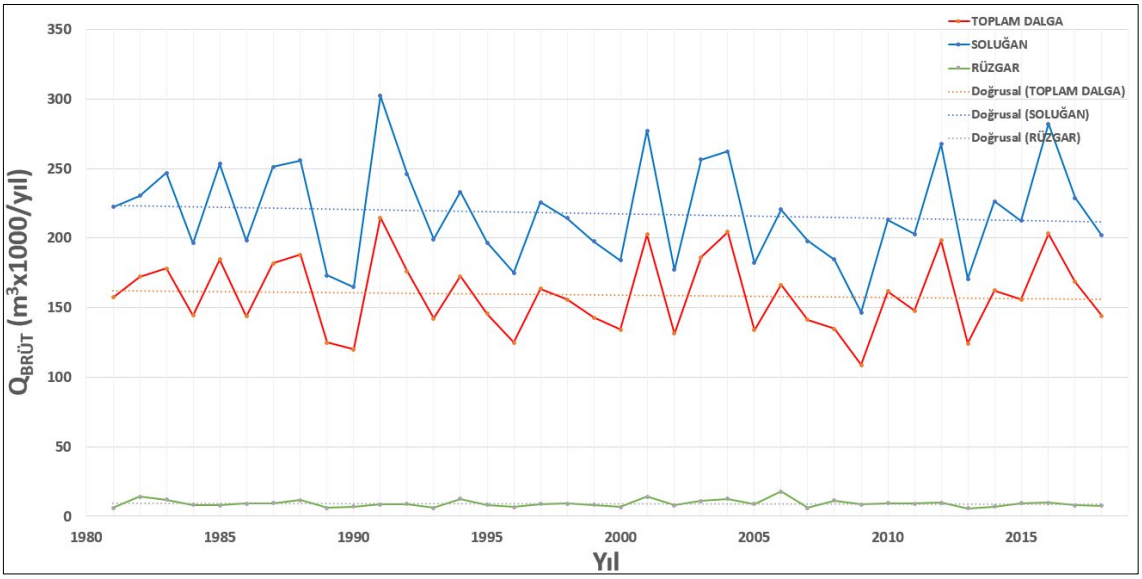
4.3.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı Model Sonuçları

Karasu kıyısı için GenCade sayısal modeli ile 1981-2018 yılları arasında yapılan çalışmanın sonuçlarına göre yıllık ortalama kıyı boyu net katı madde taşınımı 67,000 m^3'tür. Buradan yola çıkarak Karasu kıyısının aktif bir kıyı olduğu söylenebilmektedir.

Kıyı boyu katı madde taşınımı, çalışma alanının batı-kuzeybatı (BKB) yönünden doğu-güneydoğu (DGD) yönüne doğru oluşmaktadır. Kıyı bölgesinin sol tarafından sağ kıyıya doğru bir katı madde taşınımı meydana gelmektedir.

Bölgede soluğan dalgaları rüzgar dalgalarına göre çok daha baskındır. Bu yüzden soluğan dalgaları daha fazla miktarda kıyı boyu katı madde taşınımına sebep olmaktadır. Karasu kıyısında 1981-2018 yılları arası toplam dalgaların (soluğan ile rüzgar dalgalarının toplamı) meydana getirdiği yıllık ortalama brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı yaklaşık olarak 160,000 m^3'tür. Soluğan dalgaların sebep olduğu yıllık ortalama brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarı yaklaşık 217,000 m^3 iken, rüzgar dalgalarının ise yaklaşık 10,000 m^3 olarak sonuç vermiştir.

1981-2018 yılları arasında Karasu kıyısında toplam dalga, soluğan ve rüzgar dalgalarının meydana getirdiği katı madde taşınımının nispeten azalış yönünde bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 1981-2018 yılları arası Karasu kıyısına ait kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları

Bölgede toplam dalgaların neden olduğu yıllık ortalama net kıyı boyu katı madde taşınımı miktarı yaklaşık 67,000 m^3, soluğan dalgaların neden olduğu taşınım miktarı yaklaşık 75,000 m^3, rüzgar dalgalarının ise yaklaşık 6,000 m^3'tür. 1981-2018 yılları arası Karasu kıyısında meydana gelen maksimum net katı madde taşınımı miktarı 190,000 m^3 iken minimum miktar ise 1,200 m^3'tür. Net katı madde taşınım değerleri için negatif değerler kıyının sağından sol tarafına taşınımın meydana geldiğini ifade etmektedir. Kıyı boyu net katı madde taşınım miktarları yıllık olarak Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.10 1981-2018 yılları arası Karasu kıyısı kıyı boyu net taşınım miktarları

4.3.3 Kıyı Çizgisi Değişimi Model Sonuçları

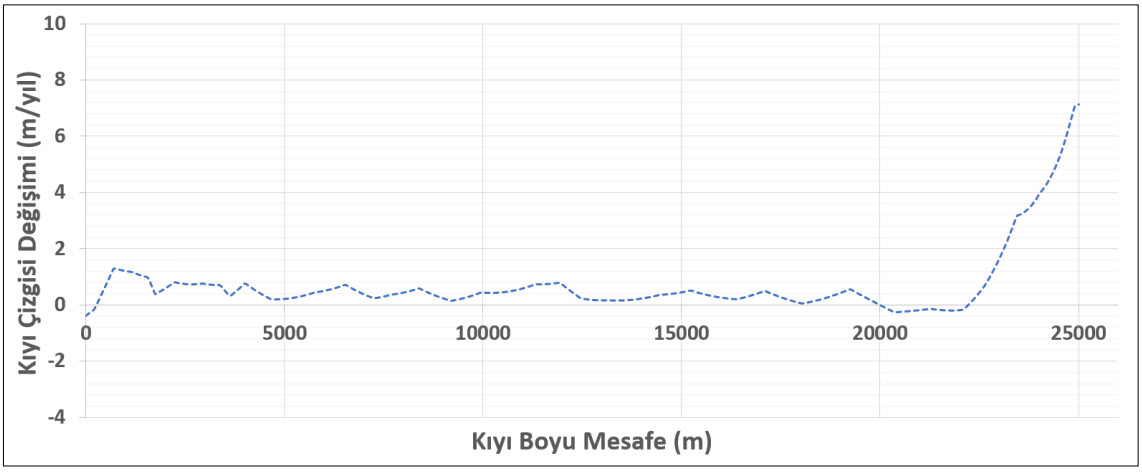
Karasu kıyı çizgisi değişimi için 1980-2018 yılları arası GenCade sayısal modelinden elde edilen temel bulgular aşağıdaki gibidir;

- Karasu kıyısında ortalama kumul basamak yüksekliği 2-6 metredir. Bu yapı kıyıda meydana gelen erozyon miktarını azaltan doğal bir koruma yapısı görevi görmektedir.
- GenCade sayısal model sonuçlarına göre 1980-2018 yılları arasında kıyıda oluşan yıllık ortalama en büyük erozyon miktarının 0.39 m olduğu tespit edilmiştir. Bölgeye ait uydu görüntülerinin karşılaştırılmasıyla ilgili yapılan bazı çalışmalarda (Aydın ve Uysal, 2014; Görmüş vd., 2014, Başaran ve Güner, 2021) 1980-2015 yılları arasında Sakarya Nehri'nin denize karıştığı noktanın hemen batı kısmında yüksek miktarda erozyon oluştuğu

gözlemlenmiştir. Aydın ve Uysal (2014) çalışmasında, 1987-2013 yılları arasında Sakarya Nehir ağzının batı tarafında yer alan noktada erozyonun 247 m olduğu, aynı yıllar için Görmüş vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise aynı noktada erozyonun yaklaşık 300 m olduğu, Başaran ve Güner (2021) tarafından 1980-2015 yılları arasında yapılan çalışmada ise erozyonun bu noktada 281 m olduğu tespit edilmiştir. Sayısal model sonuçlarında ise Sakarya Nehir ağzının çevre bölgesinde yığılmaların oluştuğu tespit edilmiştir. Erozyonun sebebinin bölgede yapılan kum tarama faaliyetleri olduğu, Karasu kıyı bölgesinde kıyı boyu katı madde taşınımının batıdan doğuya doğru olduğu, nehir ağzının kıyı boyunca taşınan katı madde dolayısıyla tıkandığı ve tekne geçişine müsaade etmediği ve bunun sonucunda nehir ağzının batı kısmına yaklaşık 135 metre uzunluğunda ve 20 metre genişliğinde bir jetty yapısı inşa edildiği, bu yapının inşasının ise bu bölgede oluşan yığılmanın sebebi olduğu tespit edilmiştir.

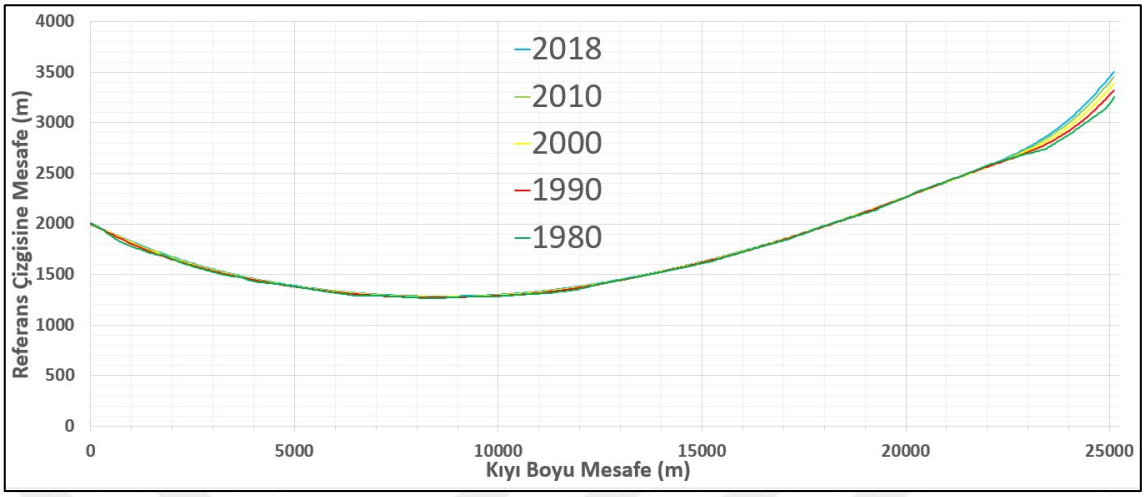
- Karasu kıyısında 1980-2018 yılları arasında yıllık ortalama en büyük yığılma miktarının Sakarya Nehri'nin denize karıştığı bölgenin hemen batısında 7.12 metre olduğu gözlemlenmiştir.
- Model sonuçlarına göre 1980-2018 yılları arasında Karasu kıyı bölgesinin erozyon ve yığılma açısından çok fazla değişime uğramadığı, kıyı çizgisi değişiminin stabil bir düzen gösterdiği söylenebilmektedir.

Yıllık ortalama kıyı çizgisi değişimi miktarları Şekil 4.11'de verilmiştir.



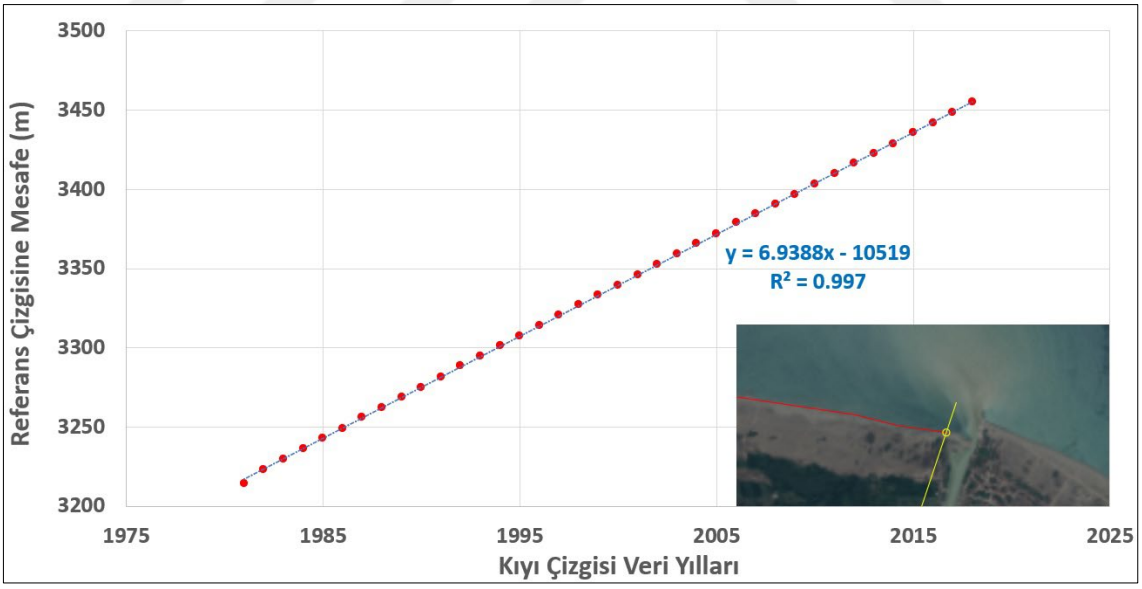
Şekil 4.11 1980-2018 yılları arası Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarları

1980-1990-2000-2010 ve 2018 yıllarına ait kıyı çizgisi model tahminleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 1980-1990-2000-2010 ve 2018 yılları arası Karasu kıyısı kıyı çizgisi değişimi model tahmini

1980 ile 2018 yılları arasında model sonuçlarına göre yığılmanın maksimum olduğu noktaya (nehir ağzına yakın nokta) ait kıyı çizgisi değişim miktarlarına bağlı değişim grafiği Şekil 4.13'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.13 Sakarya Nehir ağzına yakın batı tarafındaki kıyı çizgisinin noktasal değişimi

5
KARASU KIYI ÇİZGİSİ GELİŞİMİNDE GELECEKTEKİ OLASI İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Küresel iklim değişikliğiyle meydana gelen dalga iklimindeki değişim ve deniz seviyesindeki artışın kıyı alanları üzerindeki etkisinin kıyı mühendisleri tarafından incelenmesi ve bu doğrultuda çalışmaların yapılması gerekmektedir. Dalga yükseklik parametrelerindeki artış, rüzgâr sıklıklarının değişmesi veya artması kıyı alanlarında yüksek miktarda erozyona sebep olabilmektedir. Erozyon sonucunda kıyı bölgelerindeki şehir yaşamları risk altına girmektedir.

Bu bölümde Karasu kıyı alanında RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemleri için değişen dalga parametreleri (H_s; belirgin dalga yüksekliği, T_p; dalga pik periyodu ve θ; dalganın kıyıya geliş açısı) etkisinde GenCade sayısal modeli kullanılarak kıyı çizgisi değişim tahminlerinin yapılması amaçlanmıştır.

Başlangıç kıyı çizgisi verisi olarak 2021 Ocak ayına ait Bölüm 3 - Şekil 3.9'da verilen Sentinel-2B uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgisi kullanılmıştır. Karasu kıyısında kuzey yönü ile 18.5^0 açı yapan kıyı normaline sahip bir referans çizgisinin belirlenmesiyle hesaplanan mesafeler toplamda 503 adet veri ile 25,100 metrelik başlangıç kıyı çizgisini oluşturmuştur. Sentinel-2B uydu görüntüsü 10 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir (Şahin vd.,2021).

Yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemleri için yapılacak olan kıyı çizgisi değişim tahminleri için GenCade sayısal modelinde kullanılan parametreler modelin kalibrasyon ve doğrulama (2013-2015) süreçlerinde belirlenen parametrelerdir.

Çalışmada yakın ve orta gelecek dönemlerine ait kıyı çizgisi değişiminin tahmini için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 2021-2100 arasında koşturulan MIKE

21 SW dalga modelinden elde edilen dalga veri setleri kullanılmıştır (Şahin vd., 2021; İşlek vd., 2022).

5.2 İklim Senaryoları

Küresel iklim değişikliğinin çevresel ve toplumsal etkileri, yalnızca dünyanın kendi sistemsel tepkisine değil aynı zamanda insanlığın teknolojik, ekonomik, politik ve yaşam tarzındaki değişimine göre verdiği tepkiye bağlı olacaktır. Toplumların veya bireylerin gösterecekleri değişimlerin belirsiz olmasından kaynaklı olarak küresel iklim değişikliğinin gelecek dönemlerde etkilerini araştırabilmek için bir takım gelecek iklim senaryoları geliştirilmiştir (Jubb vd., 2013).

Küresel iklim değişikliğinin gelecek dönemde etkilerinin araştırılabilmesi için Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2011 yılında Beşinci Değerlendirme Raporu'nda (Fifth Assessment Report, AR5) Temsili Konsantrasyon Rotalarını (Representative Concentration Pathways, RCPs) tanıtmıştır. RCP'ler 21. yüzyılın sonlarında meydana gelecek olan ışınımsal zorlama ile karakterize edilmiş, metrekare başına Watt (W/m^2) olarak ölçülen, karbondioksit ve diğer sera gazları ile aerosollerin bir sonucu olarak alt atmosfer tabakasında tutunabilecek maksimum ısı olarak tanımlanmıştır (Vuuren vd., 2011).

RCP'ler 2100-2150 yılları arasında stabil hale geçecek ışınımsal zorlama miktarı ile kategorize edilmiştir. Örneğin RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2100 yılında maksimum ışınımsal zorlamanın 4.5 W/m^2 olacağı ve stabil hale geçeceği öngörülmektedir. RCP'ler 4 farklı tip olarak tanımlanmıştır. Bunlar çok düşük zorlanma senaryosu ve en iddialı yol olan RCP2.6 (RCP3PD), iki orta stabilizasyon senaryoları olan RCP4.5 ve RCP6.0, birçok yüksek emisyon seviyesini temsil eden RCP8.5'tir. RCP8.5 emisyonları azaltmak için çok az çaba gösterilmesinden yola çıkar ve 2100 yılına kadar küresel ısınmada başarısızlığı temsil eden senaryodur. RCP6.0 senaryosu sera gazı emisyonlarını azaltmak için bir takım teknolojik stratejilerin uygulandığını varsayar ve 2100 yılından bir süre sonra ışınımsal zorlanmanın stabil hale geldiğini öngörür. RCP4.5 ise AR5'e göre ortalama bir zorlanma değeri varsaysa da IPCC Dördüncü Değerlendirme Raporu'ndaki (AR4) en düşük emisyon senaryosuna (B1) benzer. RCP2.6 ise emisyonları azaltmak için

planlanan en iddialı yolu temsil eder. Emisyon değerlerinin erken zirve yaptığı ve stabil hale geçtiğini ve sonrasında atmosferik karbondioksidin aktif olarak uzaklaştırılmasıyla azaldığını öngörmektedir (Jubb vd., 2013).

Bu çalışmada dalga iklimi verileri ortalama önlemleri kapsayan RCP4.5 ve iklim önlemlerinde başarısızlığı temsil eden RCP8.5 senaryosuna göre elde edilmiştir. RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına ait bazı özellikler Tablo 5.1'de belirtildiği gibidir (Şahin vd., 2021).

Tablo 5.1 Temsili Konsantrasyon Rotaları özellikleri

Temsili Konsantrasyon Rotaları	Işınımsal Zorlama Değeri	Değere Ulaşma Zamanı	Atmosferik Karbondioksit Konsantrasyonu
RCP4.5	4.5 W/m^2	2100 öncesi	~ 650 ppm
RCP8.5	8.5 W/m^2	2100	> 1370 ppm

5.3 Dalga İklimi Değişimi

Çalışma bölgesine ait RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre 2021-2100 yılları arasında SW dalga modelinden elde edilmiş dalga parametreleri GenCade sayısal MIKE 21modelinde yakın ve orta gelecek dönem için Karasu kıyısına ait kıyı çizgisi değişiminin tahmin edilebilmesinde kullanılmıştır. Dalga parametrelerinin 80 yıllık ortalamaları incelendiğinde RCP8.5 senaryosuna göre ortalama belirgin dalga yüksekliği 0.95m, ortalama pik dalga periyodu 5.74 s, ortalama etkin dalga açısı 17.5^0 (K-KKD) olarak tespit edilmiştir. RCP4.5 senaryosuna göre ise çalışma bölgesinde 80 yıllık ortalama belirgin dalga yüksekliği 0.94 m, ortalama pik dalga periyodu 5.75 s, ortalama etkin dalga geliş yönü ise 15.2^0 olarak belirlenmiştir (Şahin vd. 2021).

Dalga parametrelerinin (belirgin dalga yüksekliği, dalga pik periyodu ve dalga geliş açısı) iki ayrı iklim senaryosuna göre değişimleri Tablo 5.2'de görüldüğü gibidir. Buna göre 80 yıllık dalga parametreleri incelendiğinde, her iki iklim senaryosuna göre de dalga yüksekliğinin artış gösterdiği fakat RCP8.5 senaryosuna göre daha fazla artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca pik dalga

periyodunun her iki iklim senaryosunda da azaldığı ve buna göre kıyıya gelen dalga sıklığının arttığı söylenebilmektedir (Şahin vd., 2021).

Tablo 5.2 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre 2100'e kadar dalga parametrelerindeki yıllık ortalama değişim (Şahin vd., 2021)

RCP4.5 senaryosuna göre			
Dalga Parametreleri	**Toplam Dalga**	**Soluğan dalgası**	**Rüzgar dalgası**
Belirgin dalga yüksekliği, H_s	% 0.42 artış	% 1.1 artış	% 4.4 artış
Pik dalga periyodu, T_p	% 0.52 azalma	% 0.52 azalma	% 2.2 artış
Ortalama dalga açısı, θ	0.6^0 doğuya kayma	0.8^0 doğuya kayma	0.3^0 doğuya kayma
RCP8.5 senaryosuna göre			
Dalga Parametreleri	**Toplam Dalga**	**Soluğan dalgası**	**Rüzgar dalgası**
Belirgin dalga yüksekliği, H_s	% 0.74 artış	% 1.5 artış	% 1.7 azalma
Pik dalga periyodu, T_p	% 0.17 azalma	% 0.35 azalma	% 0.76 artış
Ortalama dalga açısı, θ	3.6^0 doğuya kayma	3.5^0 doğuya kayma	2.8^0 doğuya kayma

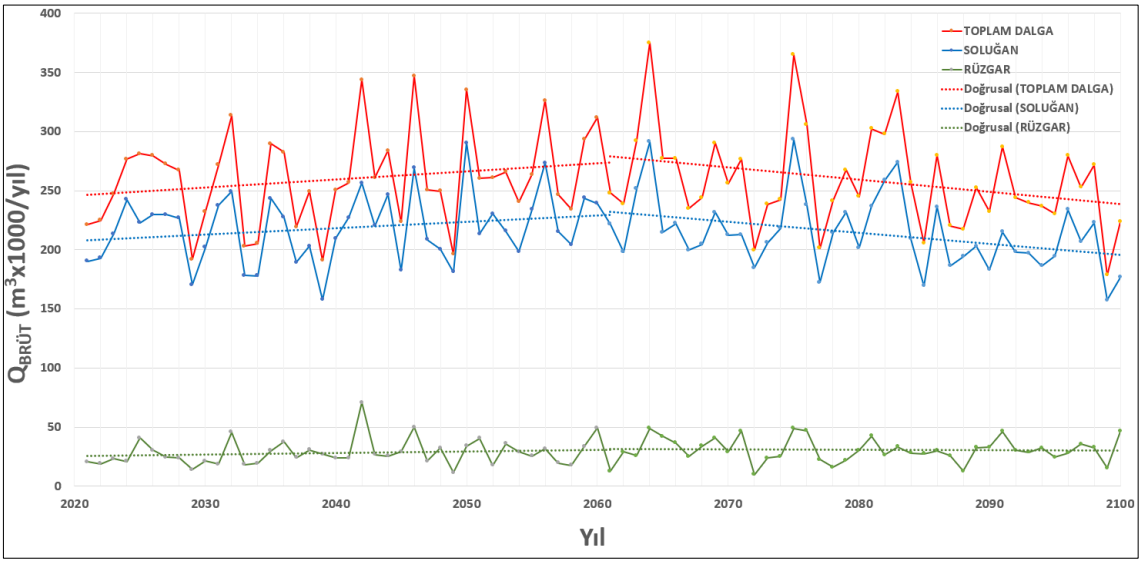
5.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarları

Çalışma alanı olan Karasu kıyısında 2021-2100 yılları arasında yapılan modelleme çalışmasına göre RCP4.5 iklim senaryosuna göre kıyı boyu katı madde taşınım miktarları incelendiğinde:

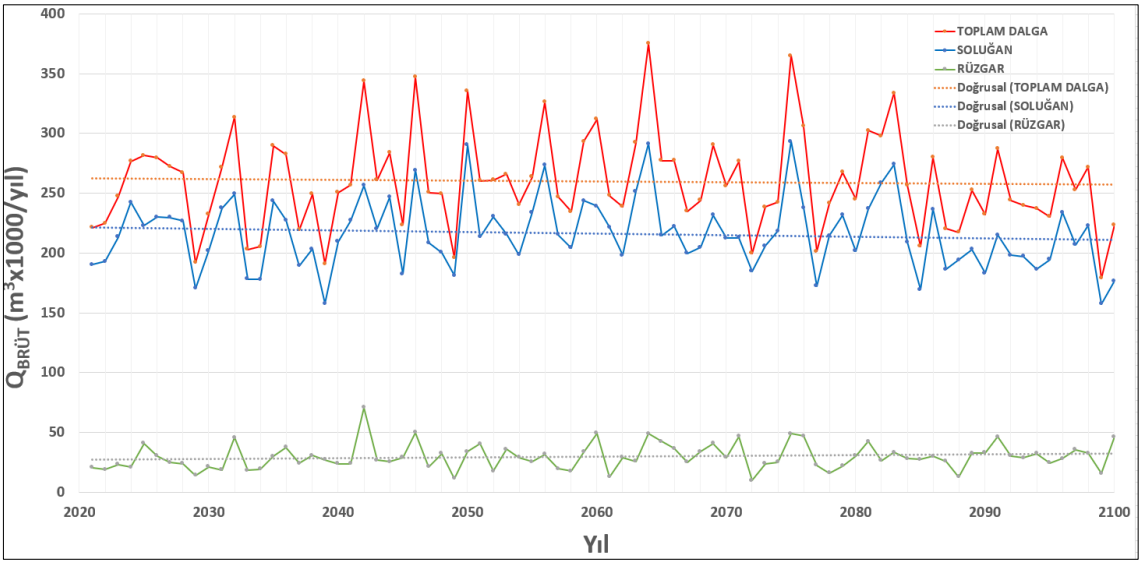
- Soluğan ve rüzgar dalgalarının sebep olduğu katı madde taşınımları karşılaştırıldığında; bölgedeki soluğan dalgaların rüzgar dalgalarına oranla toplam (brüt) katı madde taşınımında yaklaşık 7 kat, net katı madde taşınımında ise yaklaşık 3 kat daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Soluğan dalgalarının meydana getirdiği katı madde taşınımının, toplam (soluğan ve

rüzgar dalgalarının toplamı) dalgalardan kaynaklanan taşınımla aynı yönde ve yakın miktarda olmasının nedeni; soluğan dalgaların bölgede rüzgar dalgalarına göre daha büyük ve etkili olmasıdır.

- Toplam dalgaların neden olduğu yıllık ortalama brüt katı madde taşınım miktarı yaklaşık olarak 260,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde taşınım miktarı ise yaklaşık 47,000 m^3'tür. Soluğan dalgaların neden olduğu yıllık ortalama brüt katı madde taşınım miktarı yaklaşık olarak 216,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde taşınım miktarı ise yaklaşık 47,500 m^3'tür. Rüzgar dalgalarından kaynaklı taşınan yıllık ortalama brüt katı madde miktarı yaklaşık olarak 30,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde miktarının ise yaklaşık 18,000 m^3 olduğu gözlemlenmiştir.
- Bölgede yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine göre katı madde taşınım miktarları incelendiğinde; brüt katı madde taşınımının eğilimi yakın gelecekte artış gösterirken, orta gelecek dönemde 2100 yılına kadar azalış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.1). 2021-2100 yıllarına göre brüt katı madde taşınım dağılımı ise daha stabil olmakla beraber az miktarda azalış gösterdiği söylenebilmektedir (Şekil 5.2).

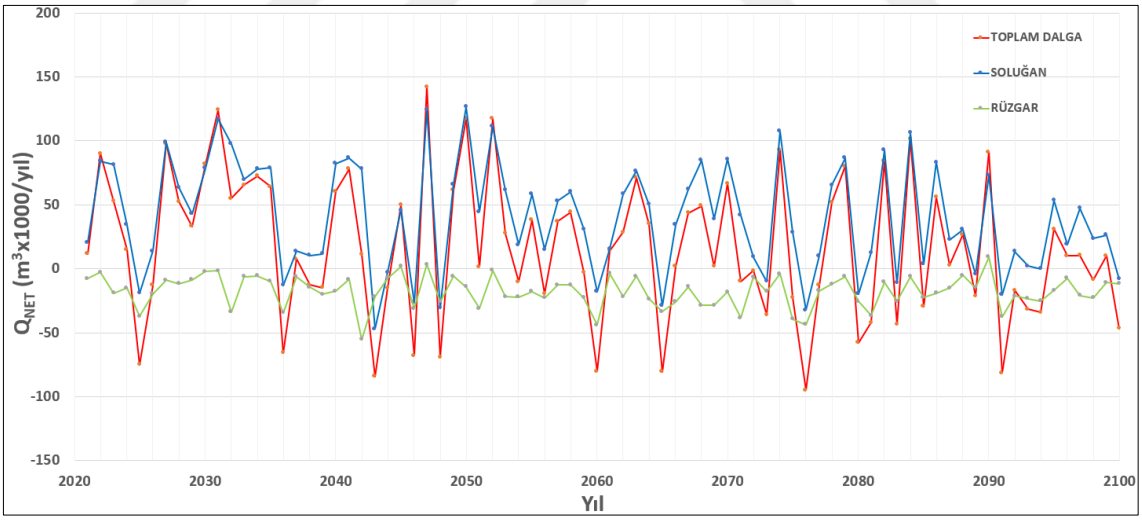


Şekil 5.1 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları



Şekil 5.2 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları

- 2021-2100 yılları arası Karasu kıyısında meydana gelen maksimum net katı madde taşınımı 142,200 m^3, minimum ise 1,400 m^3'tür. Net katı madde taşınımında negatif miktarlar taşınımın sağdan sola olduğunu, pozitif olanlar ise soldan sağa taşınım meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 5.3).



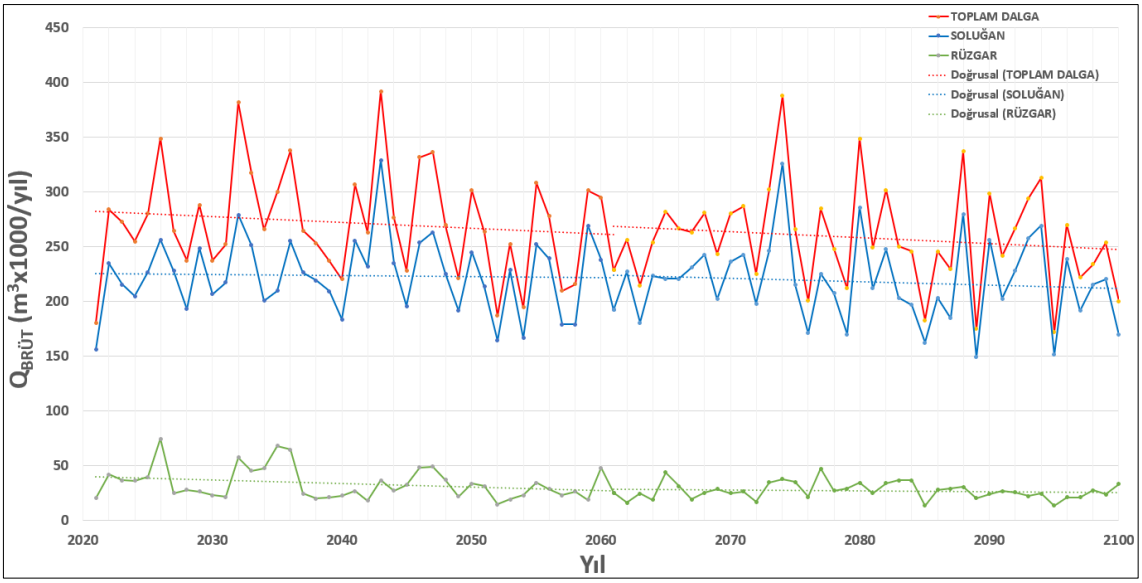
Şekil 5.3 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu net katı madde taşınım miktarları

Karasu kıyısında 2021-2100 yılları arasında yapılan modelleme çalışmasına göre RCP8.5 iklim senaryosuna göre kıyı boyu katı madde taşınım miktarları incelendiğinde:

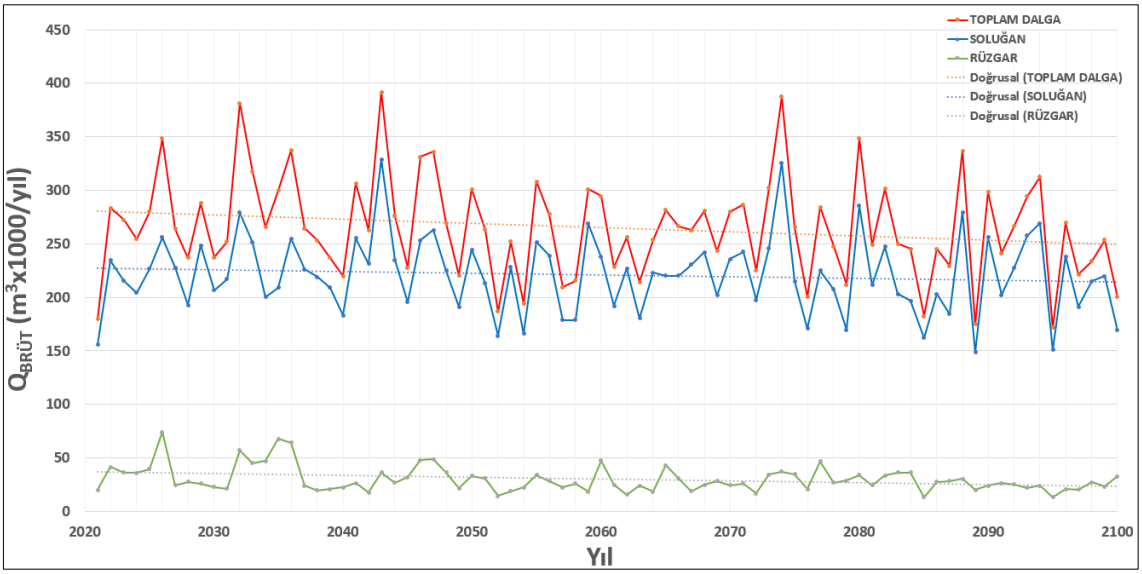
- Soluğan ve rüzgar dalgalarının sebep olduğu katı madde taşınımları karşılaştırıldığında; bölgedeki soluğan dalgaların rüzgar dalgalarına oranla

toplam (brüt) katı madde taşınımında yaklaşık 7.3 kat, net katı madde taşınımında ise yaklaşık 3 kat daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

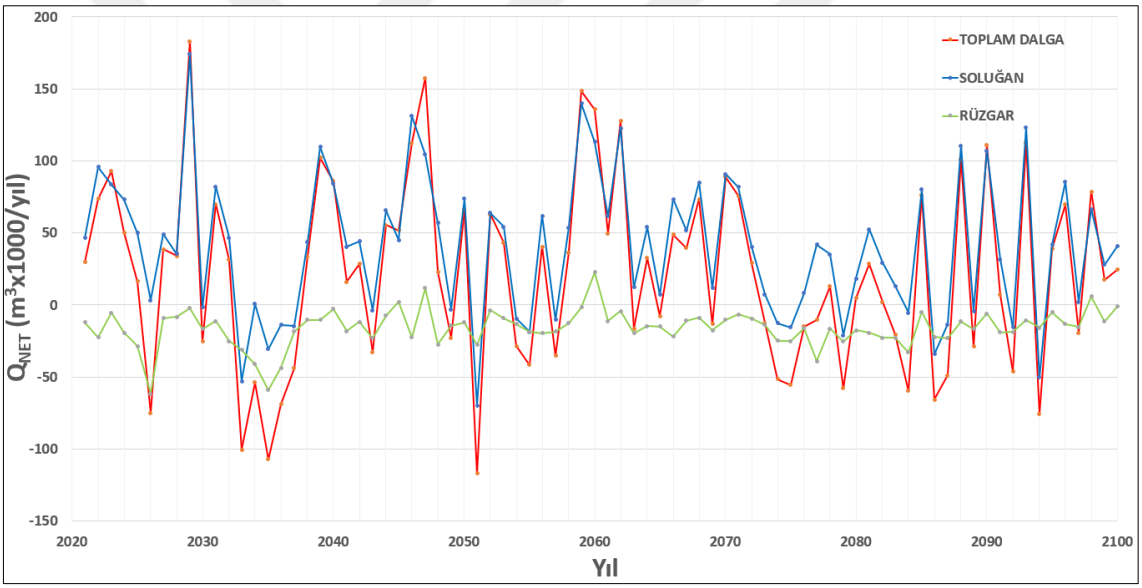
- Toplam dalgaların neden olduğu yıllık ortalama brüt katı madde taşınım miktarı yaklaşık olarak 265,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde taşınım miktarı ise yaklaşık 55,000 m^3'tür. RCP8.5 iklim senaryosuna göre soluğan dalgaların neden olduğu yıllık ortalama brüt katı madde taşınım miktarı yaklaşık 221,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde taşınım miktarı ise yaklaşık 50,500 m^3'tür. Rüzgar dalgalarından kaynaklı taşınan yıllık ortalama brüt katı madde miktarı 30,000 m^3, yıllık ortalama net katı madde miktarı ise 17,000 m^3'tür.
- Bölgede yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine göre katı madde taşınım miktarları incelendiğinde; brüt katı madde taşınımının eğilimi hem yakın gelecekte hem de orta gelecek dönemde 2100 yılına kadar azalış gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.4). 2021-2100 yıllarına göre brüt katı madde taşınım dağılımında da azalış gözlemlenmektedir (Şekil 5.5).
- 2021-2100 yılları arası Karasu kıyısında meydana gelen maksimum net katı madde taşınımı 183,000 m^3, minimum ise 2,200 m^3'tür. RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası net katı madde taşınımı gösteren grafik Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.4 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için brüt kıyı boyu katı madde taşınım miktarları



Şekil 5.5 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarları



Şekil 5.6 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası kıyı boyu net katı madde taşınım miktarları

RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre 2021-2100 yılları arasında Karasu kıyısı için yapılan modelleme sonuçlarından elde edilen yıllık ortalama net ve brüt katı madde taşınım miktarlarına bakıldığında Karasu kıyısının aktif bir kıyı olduğu söylenebilmektedir. Çalışma Karasu kıyısına ait modelleme sonucuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için, ayrıca 2021-2100 yılları arası toplam değer olarak yıllık ortalama kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yıllık ortalama net ve brüt katı madde taşınım miktarları

	RCP4.5		RCP8.5	
	BRÜT (m^3/yıl)	NET (m^3/yıl)	BRÜT (m^3/yıl)	NET (m^3/yıl)
2021-2060	217,093	44,688	227,002	53,688
2061-2100	215,785	34,035	214,595	38,688
2021-2100	216,439	39,362	220,798	46,188

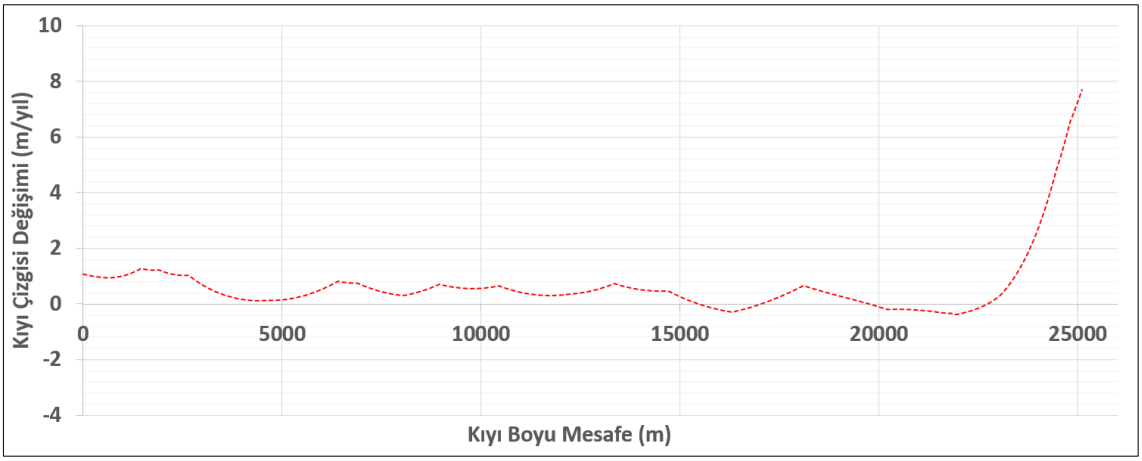
5.5 Kıyı Çizgisi Değişimi Model Sonuçları

Karasu kıyısı için GenCade sayısal modeli 2021-2100 yılları arasında yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemlerine ait kıyı çizgisi değişimi için, RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre dalga modelinden elde edilmiş iki ayrı 701,251 saatlik dalga veri setiyle, 2021 Ocak ayı Sentinel-2B uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilmiş 25.10 km'lik başlangıç kıyı çizgisi verisiyle koşturulmuştur.

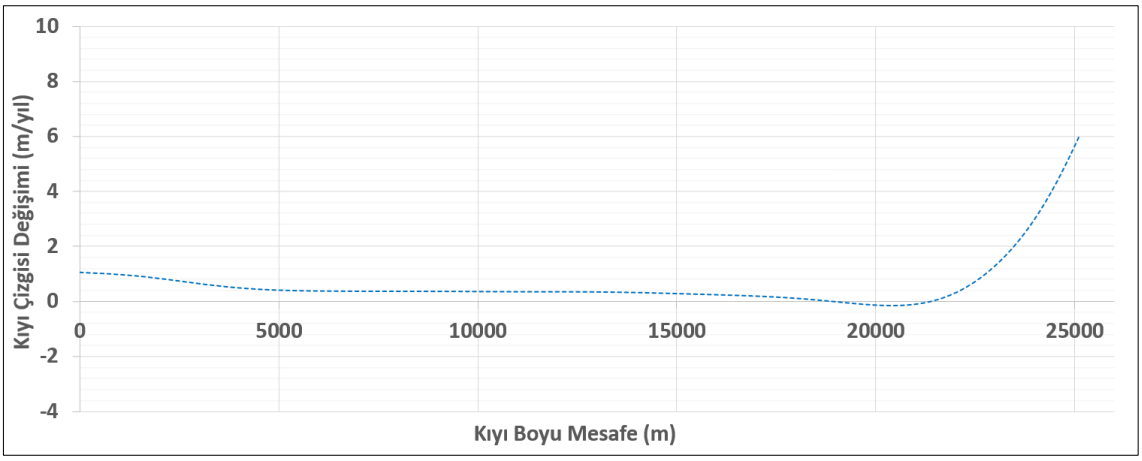
Çalışma alanının 80 yıllık kıyı çizgisi değişimi model tahmini RCP4.5 iklim senaryosu için şu şekildedir;

- Bölgede yıllık ortalama en büyük erozyon yakın gelecek (2021-2060) dönem için 0.39 metre, orta gelecek (2061-2100) dönem için ise 0.14 metredir. Yakın ve orta gelecek (2021-2100) dönemlerin tamamı bir arada incelendiğinde yıllık ortalama en büyük erozyon 0.17 metredir.
- Çalışma alanı Karasu kıyı bölgesinde yakın gelecek (2021-2060) dönem için yıllık ortalama en büyük yığılma 7.7 metre, orta gelecek (2061-2100) dönem için ise 6.3 metredir. Yıllık ortalama en büyük yığılma yakın ve orta gelecek (2021-2100) dönem için 6.8 metredir.

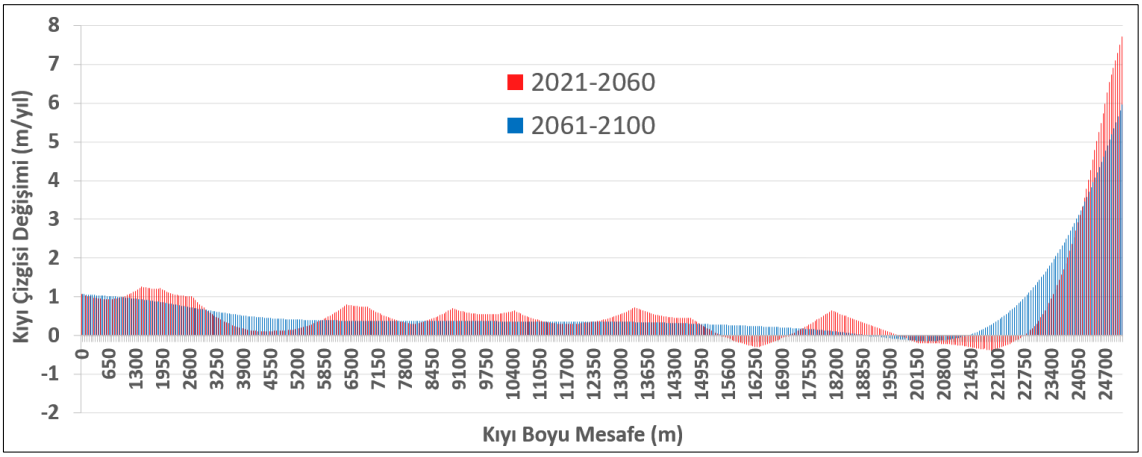
RCP4.5 iklim senaryosuna göre Karasu kıyısına ait yakın gelecek dönem için yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı Şekil 5.7'de, orta gelecek dönem için Şekil 5.8'de, yakın ve orta gelecek dönem için yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı Şekil 5.9'da, yakın ve orta gelecek dönemlere ait 2021-2060-2100 yılları kıyı çizgileri Şekil 5.10'da görüldüğü gibidir.



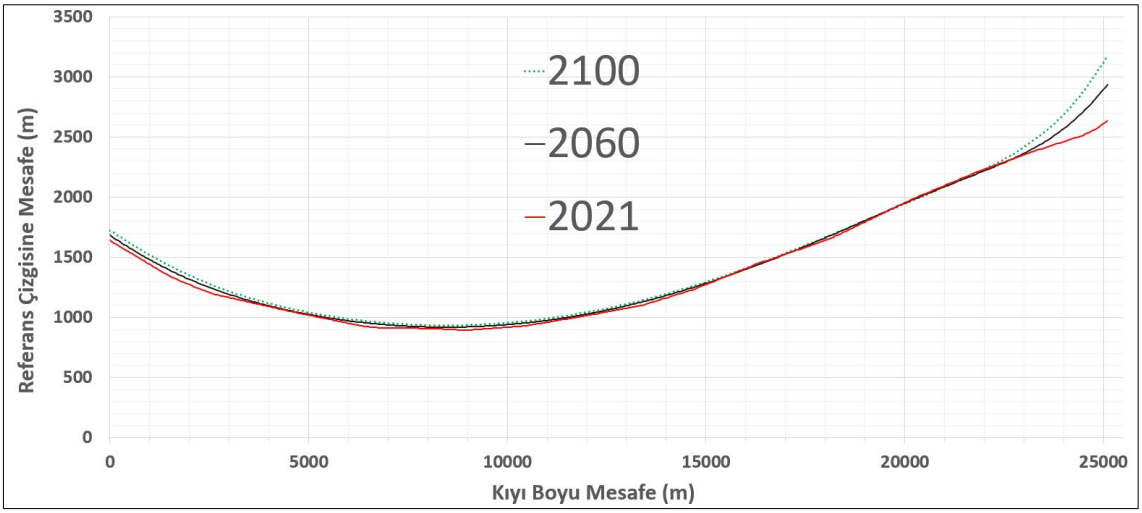
Şekil 5.7 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı



Şekil 5.8 RCP4.5 iklim senaryosuna göre orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı

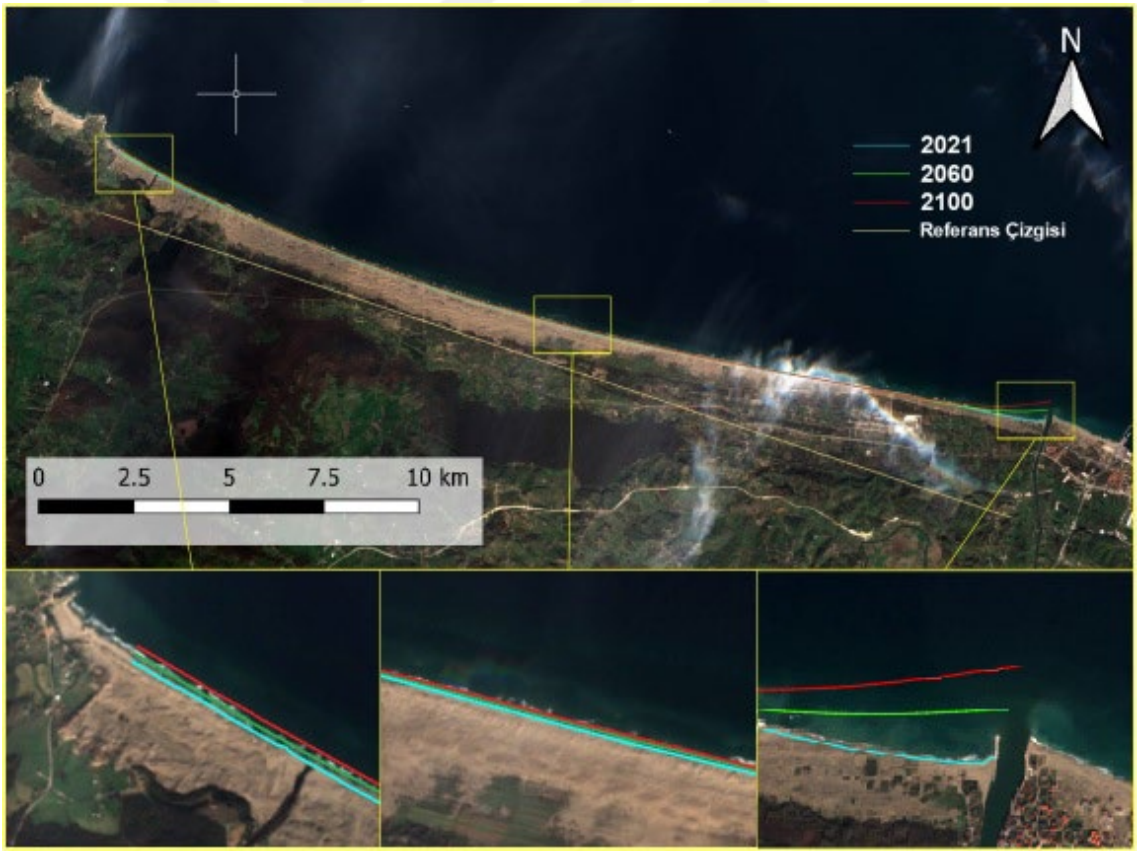


Şekil 5.9 RCP4.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarlarının karşılaştırılması



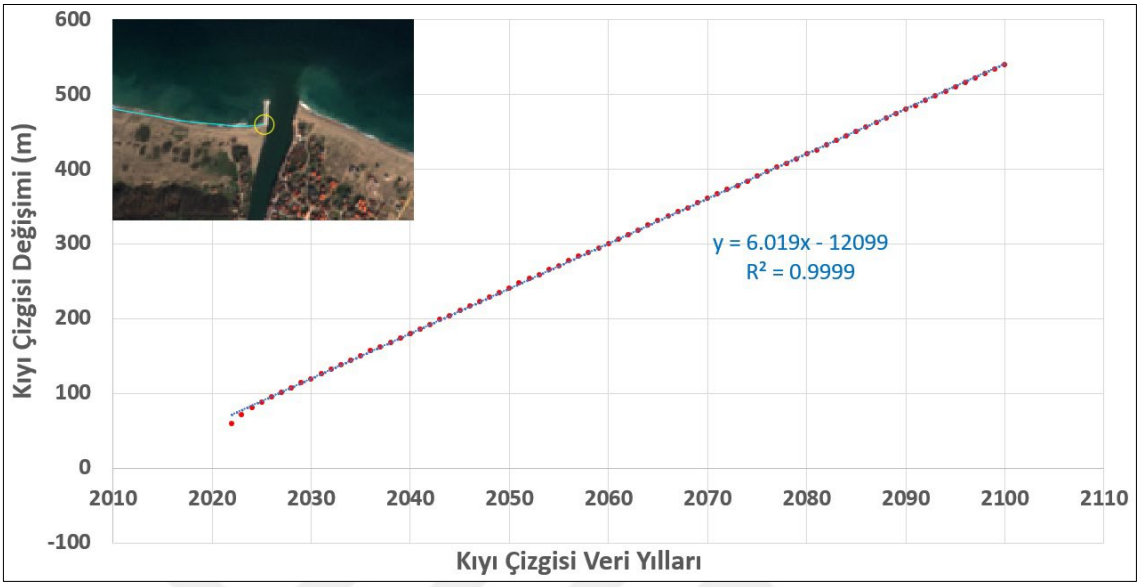
Şekil 5.10 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait Karasu kıyısı kıyı çizgileri

Uydu görüntüsü üzerinde sayısallaştırılmış ölçülen ve model sonuçlarından elde edilen kıyı çizgileri Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11 RCP4.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait uydu görüntüsü üzerindeki kıyı çizgileri

Maksimum yığılmanın meydana geldiği noktaya (Sakarya nehir ağzının bitişiği) ait 2021-2100 yıllarına göre kıyı çizgisi değişim miktarı dağılım grafiği ise Şekil 5.12'de verilmiştir.

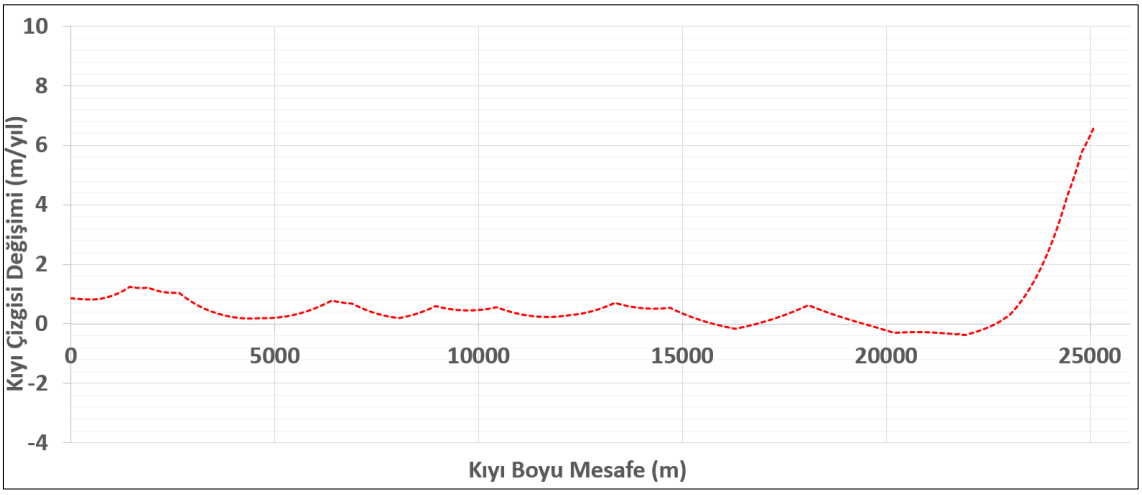


Şekil 5.12 RCP4.5 iklim senaryosuna göre maksimum yığılmanın oluştuğu noktadaki kıyı çizgisi değişimi

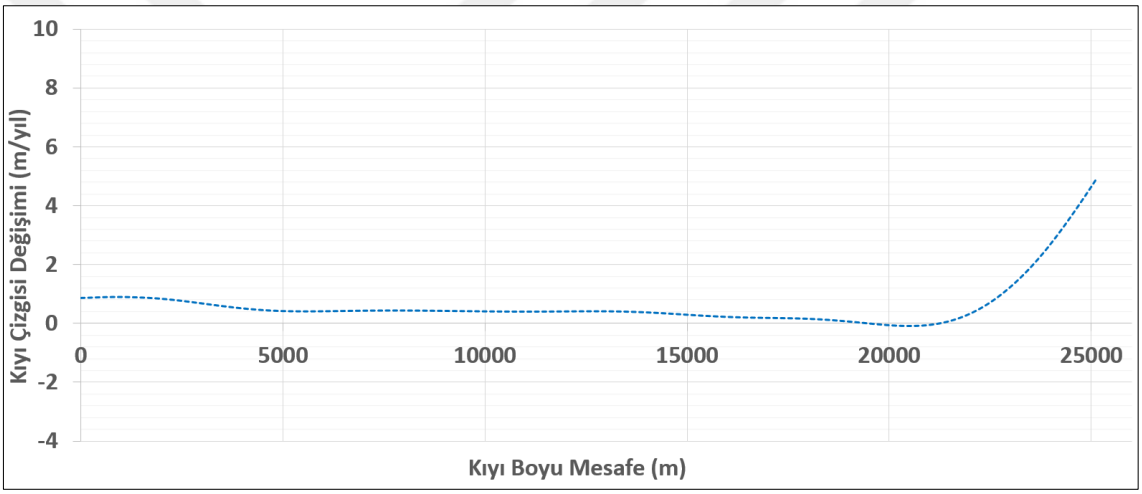
Çalışma alanının 80 yıllık kıyı çizgisi değişimi model tahmini RCP8.5 iklim senaryosu için şu şekildedir;

- Bölgede yıllık ortalama en büyük erozyon yakın gelecek (2021-2060) dönem için 0.39 metredir, orta gelecek (2061-2100) dönem için ise 0.10 metredir. Yakın ve orta gelecek (2021-2100) dönemler bir arada düşünüldüğünde meydana gelen yıllık ortalama en büyük erozyon ise 0.20 metredir.
- Çalışma alanı Karasu kıyı bölgesinde yakın gelecek (2021-2060) dönem için yıllık ortalama en büyük yığılma 6.6 metre, orta gelecek (2061-2100) dönem için ise yıllık ortalama en büyük yığılma 5.0 metredir. Yıllık ortalama en büyük yığılma yakın ve orta gelecek (2021-2100) dönem için 5.7 metredir.

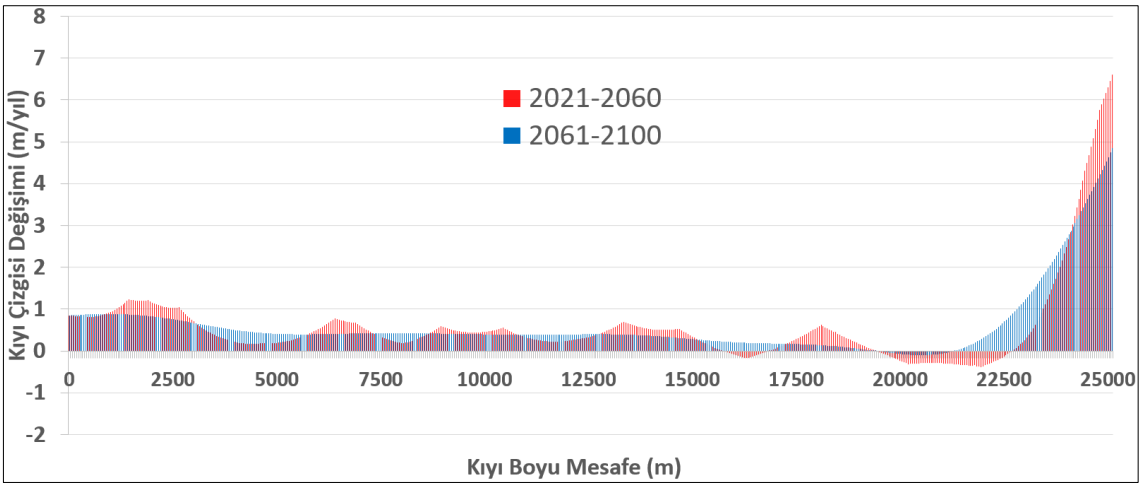
RCP8.5 iklim senaryosuna göre Karasu kıyısına ait yakın gelecek dönem için yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı Şekil 5.13'te, orta gelecek dönem için yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı Şekil 5.14'te görülmektedir. Yakın ve orta gelecek dönem için yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı Şekil 5.15'te, yakın ve orta gelecek dönemlere ait 2021-2060-2100 yılları kıyı çizgileri Şekil 5.16'da görüldüğü gibidir.



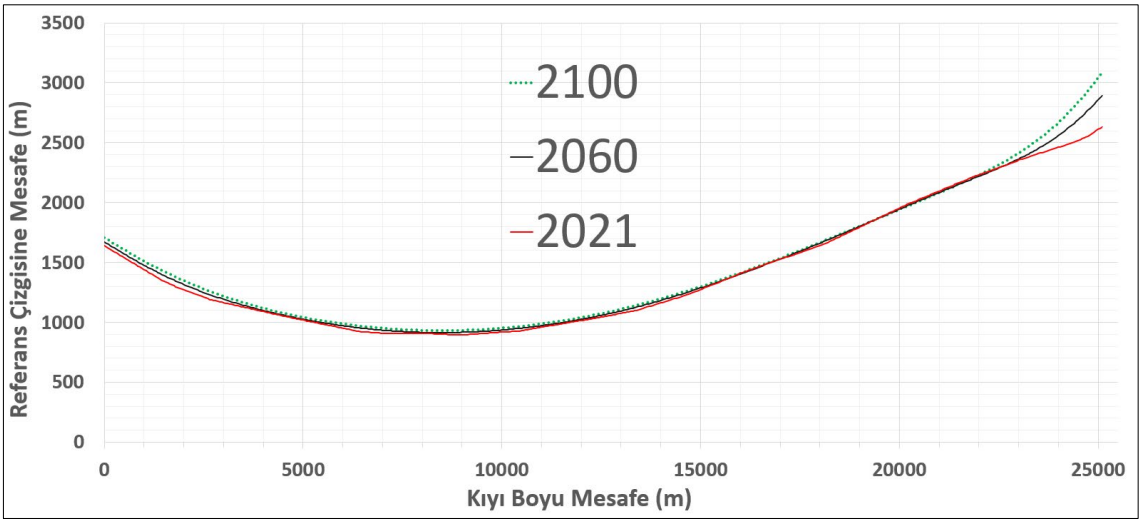
Şekil 5.13 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın gelecek (2021-2060) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı



Şekil 5.14 RCP8.5 iklim senaryosuna göre orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarı

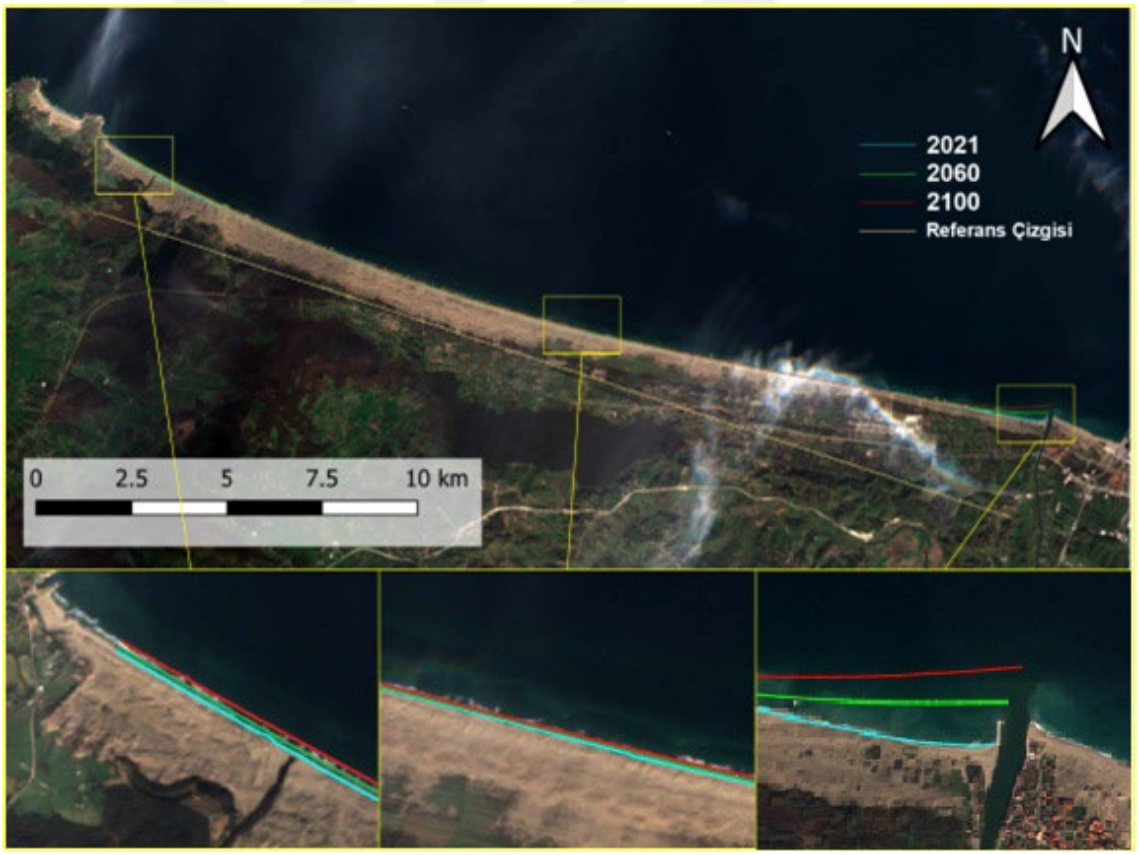


Şekil 5.15 RCP8.5 iklim senaryosuna göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) döneme ait Karasu kıyısı yıllık ortalama kıyı çizgisi değişim miktarlarının karşılaştırılması



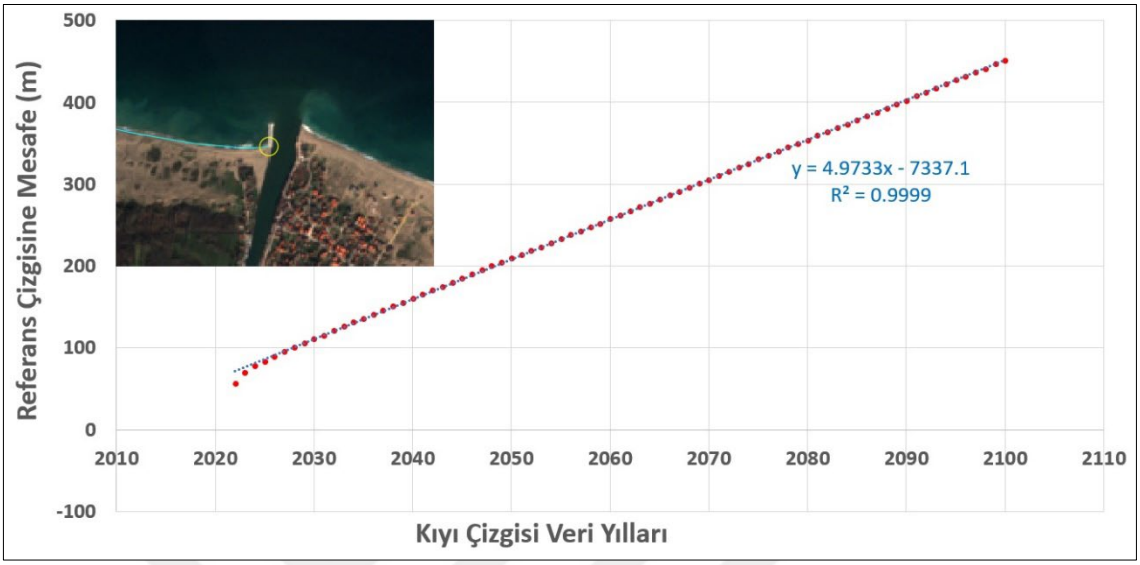
Şekil 5.16 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait Karasu kıyısı kıyı çizgileri

Uydu görüntüsü üzerine sayısallaştırılmış ölçülen ve model tahmin sonuçlarından elde edilen kıyı çizgileri Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2060-2100 yıllarına ait uydu görüntüsü üzerindeki kıyı çizgileri

Maksimum yığılmanın meydana geldiği noktaya (Sakarya Nehir ağzına yakın batı kısmındaki nokta) ait yıllara göre değişen kıyı çizgisi mesafelerinin dağılım grafiği Şekil 5.18'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.18 RCP8.5 iklim senaryosuna göre maksimum yığılmanın oluştuğu noktadaki kıyı çizgisi değişimi

RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre Karasu kıyısında oluşan kıyı çizgisi değişimi model sonuçları değerlendirildiğinde; her iki iklim senaryosuna göre iki gelecek dönemde de kıyının çok fazla erozyona uğramadığı, bu açıdan kıyının stabil halde olduğu söylenebilmektedir. Orta gelecek dönemde kıyıdaki erozyonun yakın geleceğe göre daha düşük olduğu da tespit edilmiştir.

Yığılma açısından, Karasu kıyı bölgesindeki en büyük yığılmanın model sonuçlarında RCP4.5 iklim senaryosunda RCP8.5'e göre daha fazla olduğu, yakın gelecek dönemde de orta gelecek döneme göre yine daha yüksek yığılma miktarı gösterdiği söylenebilmektedir.

Karasu kıyısının RCP4.5 senaryosuna göre daha fazla yığılma ve erozyona uğradığı, 2061-2100 yılları arasında hem yığılma hem erozyon açısından daha düşük değerler görüldüğü için kıyının stabil hale geçeceği söylenebilmektedir.

Her iki iklim senaryosuna göre de orta gelecek (2061-2100) dönemde kıyı çizgisi değişim miktarlarının azaldığı görülmektedir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görüleceği gibi orta gelecek dönemde kıyı boyunca taşınan katı madde debisinin azalış eğilimi göstermesi bunun sebebi olarak söylenebilmektedir.

RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryosuna göre 2021-2100 yılları arası modellenen Karasu kıyısı için yıllık ortalama yığılma ve erozyon miktarları Tablo 5.4'te görüldüğü gibidir.

Tablo 5.4 RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yıllık ortalama erozyon ve yığılma miktarları

Senaryo	Çalışma Dönemi	Maksimum Erozyon (m)	Maksimum Yığılma (m)
RCP4.5	Yakın gelecek	0.39	7.7
	Orta gelecek	0.14	6.3
	2021-2100	0.17	6.8
RCP8.5	Yakın gelecek	0.39	6.6
	Orta gelecek	0.10	5.0
	2021-2100	0.20	5.7

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Küresel iklim değişikliği sonucunda değişen dalga iklimi ve kutup bölgelerinde yer alan buzulların erimesi sonucu artan deniz seviyesi, kıyı alanlarında yer alan şehir yaşamlarını olumsuz etkileyecektir. Bu durumda kıyı mühendisliği faaliyeti olarak değişen dalga ikliminin dalga parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, tartışılması ve bu değişimler sonucunda kıyı boyu ve kıyıya dik katı madde taşınımlarının ve kıyı çizgisindeki değişimlerin gelecek yıllara göre tahmin yöntemleri belirlenip tespit edilmesi ve araştırmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada Karadeniz'in güneybatı kesiminde yer alan Sakarya ilinin Karasu ilçesine ait sahil bölgesinde değişen dalga ve rüzgâr ikliminin RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre elde edilmesiyle, yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için bölgeye ait kıyı çizgisi değişimi bir sayısal model yoluyla tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma iki aşamadan oluşmakta olup, ilk aşamada GenCade sayısal modelinin kalibrasyon ve doğrulama süreci üzerine çalışılmıştır. Ayrıca bu aşamada Karasu kıyısına ait geçmiş 40 yıllık dönemde kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişimi tahmin edilmiştir. İkinci aşamada ise RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre yakın (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için kıyı boyu katı madde taşınımı ile kıyı çizgisi değişimi modellemeleri yapılmıştır.

Bu aşamada modelin kalibrasyon ve doğrulama süreçleri ile 39 yıllık (1980-2018) kıyı boyu katı madde taşınım ve kıyı çizgisi değişim sonuçları sunulmaktadır.

- Modelin kalibrasyonu bölgeye ait 2013-2014 yılları uydu görüntülerinin sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgileriyle yapılmış, doğrulama ise 2014-2015 yıları arasındaki kıyı çizgileri farkı üzerinden tespit edilmiştir. Kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde modelin çalışma performansı BSS ve NMSE olarak bilinen iki ayrı istatiksel parametreye göre belirlenmiştir. BSS ve NMSE değerlerine göre model, kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde yüksek performansla çalıştığını göstermiştir.

- Modelin kalibrasyon aşamasında kıyı çizgisi değişiminde en etkili parametrenin kıyı boyu katı madde taşınım denkleminde yer alan K_1 parametresi olduğu görülmüştür. Onun yanı sıra yakın kıyı düzleştirme parametresi (ISMOOTH) kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesinde etkili parametredir.
- 1981-2018 yılları arasında gerçekleştirilen modelleme çalışması sonucunda kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarı yıllık ortalama 160,000 m^3, kıyı boyu net katı madde taşınım miktarı ise yıllık ortalama 67,000 m^3 olarak sonuç vermiştir. Bu durumda Karasu kıyısının aktif bir kıyı olduğu, kıyı bölgesinin sol tarafından sağ tarafına doğru katı madde taşınımına sahip olduğu söylenebilmektedir.
- Bölgede soluğan dalgaların rüzgar dalgalarına göre baskın olduğu, soluğan dalgaların meydana getirdiği katı madde taşınım miktarının toplam dalgalara (soluğan ile rüzgar dalgalarının birleşimi) yakın bir miktarda olduğu gözlemlenmiştir. Soluğan dalgaların meydana getirdiği kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarı yıllık ortalama 217,000 m^3, rüzgar dalgalarının meydana getirdiği kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarı ise 10,000 m^3 olarak sonuç vermiştir.
- Karasu kıyısına ait geçmiş 40 yıllık dönemde kıyı çizgisi değişimi tahmin edilmiştir. 1980 yılına ait uydu görüntüsünden elde edilen kıyı çizgisi verileri ile 1990, 2000, 2010 ve 2018 yıllarındaki kıyı çizgileri tahmini yapılmış, model tahmin sonuçlarına göre Sakarya Nehir ağzının batı kısmında yığılmanın meydana geldiği görülmüştür. Bölgede yapılan düzenli ve büyük ölçekteki kum taramaları, nehir üstünde kurulan Hidro Elektrik Santral ve barajlar model tahminlerindeki nehir ağzının batısında yer alan yığılmayı engelleyen faktörlerdir. Dolayısıyla bu noktada beklenen yığılmayı engelleyen faktörlerin, bölgede yapılan mühendislik faaliyetleri ve nehir yapıları gibi insan etkilerinin olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında 2021-2100 yılları arasında modellenen Karasu kıyısı kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişim sonuçları verilmektedir.

- RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre elde edilen dalga verileri ile 2021 yılına ait uydu görüntüsünün sayısallaştırılmasından elde edilen kıyı çizgisi

verileri (Şahin vd., 2021), kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde belirlenen sahaya ait parametreler ve diğer kalibrasyon parametreleri kullanılmıştır.

- GenCade modeli RCP4.5 iklim senaryosuna göre Karasu kıyısında 2021-2100 yılları arasında yıllık ortalama kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarında yaklaşık 220,000 m^3 olarak sonuç vermiştir. Model sonucuna göre yıllık ortalama kıyı boyu net katı madde taşınım miktarı ise 45,000 m^3'tür.
- RCP8.5 iklim senaryosuna göre model sonucunda 2021-2100 yılları yıllık ortalama kıyı boyu brüt katı madde taşınım miktarı yaklaşık 230,000 m^3, yıllık ortalama kıyı boyu net katı madde taşınım miktarı ise yaklaşık 55,000 m^3'tür. Kıyı bu yönüyle aktif bir kıyıdır.
- Model bu süreçte yakın gelecek (2021-2060) ve orta gelecek (2061-2100) dönemler için çalıştırılmıştır. Tahmin sonuçlarına göre Karasu kıyısı her iki iklim senaryosunda ve her iki gelecek dönemde de erozyon açısından stabil bir haldedir.
- RCP4.5 iklim senaryosuna göre en büyük erozyonun yaklaşık 0.39 metre olduğu tespit edilmiştir. Yığılma açısından ise en büyük değerin RCP4.5 senaryosuna göre yakın gelecek dönemde 7.70 metre olduğu gözlemlenmiştir. Orta gelecek dönemde ise yığılma miktarı azalmıştır.
- RCP8.5 senaryosuna göre en büyük erozyonun yakın gelecek dönemde 0.39 metre olduğu ve orta gelecek dönemde azaldığı gözlemlenmiştir. Yığılmanın yine yakın gelecek dönemde 6.60 metre olduğu tespit edilmiş yine bu iklim senaryosunda orta gelecek dönemde kıyının yığılma açısından daha stabil bir yapıya geçiş yaptığı gözlenmiştir.
- Her iki senaryoda da kıyının yığılma ve erozyon açısından orta gelecek (2061-2100) dönemde stabil bir yapıya geçtiği, kıyı boyu katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi değişim miktarlarında azalma görüldüğü söylenebilmektedir.
- Her iki senaryoda da maksimum yığılma değerinin Sakarya Nehir ağzının batı kesiminde yer aldığı, bunun sebebinin ise nehir tarafından taşınan katı maddenin bu kısımda yığılmaya yol açtığı, nehrin kıyıyı beslediği söylenebilmektedir.

- Her iki iklim senaryosuna göre yapılan model tahmini sonuçlarında, kıyının orta gelecek (2061-2100) dönemde yakın gelecek (2021-2060) döneme göre daha stabil bir hale geçtiği ve hem erozyon hem de yığılma miktarlarının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi çalışma alanında meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımın orta gelecek dönemde azalan bir eğilim göstermesidir.

Bu sonuçlarla ileride yapılabilecek araştırmalar için öneriler aşağıda ifade edilmiştir:

- Kıyı çizgisi değişim modelinin kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde çalışmanın bölgeye ait kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin ölçüm değerleriyle karşılaştırılmalı olarak yapılması, süreci hızlandıracak ve modelin çalışma performansında artışa sebep olacaktır.
- Bölgeye ait saha çalışmalarından elde edilen değerlerin doğru tespit edilmesi kalibrasyon ve doğrulama süreçlerinde daha etkili sonuçlar almaya neden olmaktadır.
- GenCade sayısal modelinde bölgeye ait bazı parametreler (kıyı eğimi, batimetri yapısı, kıyı profili) ampirik olarak ifade edilmekte veya modelin kurulumundaki temel denklemlerden elde edilmektedir. Bu durumda modelleme esnasında belirlenen kıyı düzleştirme parametresi (ISMOOTH) etkili bir parametredir.

KAYNAKÇA

Abbott, M.B., Price, W.A. (1994). "Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book", Great Britain by The Alden Press, Oxford.

Ahammed, K.K., Pandey, A.C. (2022). "Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite data and geostatistics: A case study on the eastern coast of India", Journal of Water and Climate Change, Vol: 13, No:3, 1447.

Ahrens, J.P. (2001). "Wave transmission over and through rubble-mound breakwaters", Draft Contract Report submitted to the U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.

Alvarez-Cuesta, M., Toimil, A., Losada, I.J. (2021). "Reprint of: Modelling long-term shoreline evolution in highly anthropized coastal areas. Part 2: Assessing the response to climate change", Coastal Engineering 169, 103985.

Arı, H.A. (2004). "Kıyı Çizgisinin Sayısal Modellemesi Üzerine Bir Çalışma; Karaburun Örneği", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arı, H.A. (2009). "İstatiksel Bir Dalga Modeli Kurulumu ve Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Modellenmesi", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arı, H.A., Yüksel, Y., Çevik, E.Ö. (2011). "Kıyı Alanı Modellemesi: Karadeniz Karaburun Örneği", 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 315-328.

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.

Aydın, M., Uysal, M. (2014). "Risk assessment of coastal erosion of Karasu coast in Black Sea", Journal of Coastal Conversation 18, 673-682.

Bailard, J. A. (1981), "An Energetics Total Load Sediment Transport Model for a Plane Sloping Beach", Journal of Geophysical Research 86, C11, pp 938-954.

Baptista, P., Coelho, C., Pereire, C., Bernardes, C., VelosoGomesi F., (2014). "Beach morphology and shoreline evolution: Monitoring and modelling medium-term responses (Portuguese NW coast study site)", Coastal Engineering 84, 23- 37.

Başar, E., Erol, S., Yılmaz, H. (2015). "Karadeniz Limanlarında Ro-Ro Taşımacılığı ve Gelişimi", Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi 5 (12), 71-82.

Başaran, B., Güner, H.A. (2021). "Effect of wave climate change on longshore sediment transport in Southwestern Black Sea", Estuarine, Coastal and Shelf Science, 258, 107415.

Başaran, B. (2022). “Küresel İklim Değişikliğinin Kıyı Morfolojisine Etkisinin Modellenmesi”, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bhat, H.G., Subrahmanya, K.R. (2000). “Shoreline Changes and Evolution of the Coastal Zone in Southern Karnataka, India – An Analysis Basen on Multi-Temporal Data”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7. Amsterdam 2000.

Bijker, E.W. (1971). “Longshore Transport Computations”, Journal of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Division, ASCE, Vol 97, 687-701.

Briand, M.H.G., Kamphuis, J.W. (1990). “A Micro Computer Based Quasi 3-D Sediment Transport Model”, Proc. 22nd Int. Coastal Eng. Conf., ASCE, 2159-2172.

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.

CERC (1984). “Shore Protection Manual”, Co. Eng. Res. Center, U.S. Corps of Eng., Vicksburg.

Connell, K. J., Kraus N.C. (2006). “Cascade Version 1: User’s Guide”, ERDC TNSWWRP-06-5, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Dean, R.G. (2002). “Beach Nourishment: Theory and Practice”, 118. World Scientific.

d’Angremond, K., J. van der Meer, R. De Jong (1996). “Wave transmission at lowcrested structures”, Proceedings 25th Coastal Engineering Conference, ASCE, 2.418-2,427.

Dabees, M. A., Kamphuis, J. W. (1998). “ONELINE, a Numerical Model for Shoreline Change”, Proc. 27th Int. Conf. on Co. Eng., ASCE, Sydney.

Dabees, M.A. (2000). “Efficient Modelling of Beach Evolution”, Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Dally, W. R., Dean, R.G. (1984). “Suspended Sediment Transport and Beach Profile Evolution”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol 110, No. 1, pp 15-33.

Dastgheib, A., Martinez, C., Udo, K., Ranasinghe, R. (2022). “Climate change driven shoreline change at Hasaki Beach Japan: A novel application of the Probabilistic Coastline Recession (PCR) model”, Coastal Engineering 172, 104079.

Davidson, M.A., Turner, I.L. (2009). “A behavioural-template beach profile model for predicting shoreline evolution”, Journal of Geophysical Research-Earth Surface 114, F1.

Davidson, M.A., Lewis, R.P., Turner, I.L. (2010). “Forecasting seasonal to multi-year shoreline change”, Coastal Engineering 57, 620-629.

Davidson, M. (2021). “Forecasting coastal evolution on time-scales of days to decades”, Coastal Engineering 168, 103928.

Davies, M.H., 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”, Tech. Rep. No. 12, U. Delaware, Newark.

DHI [Danish Hydraulic Institute] (2008a). “MIKE21-Wave Modelling, User Guide”, Hersholm, Denmark: DHI Water and Environment.

Ding, Y., Kim, S.C., Permenter, R.L., Styles, R.B., Gebert, J.A. (2021). “Simulations of Shoreline Changes along the Delaware Coast”, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Coastal Inlets Research Program, ERDC/CHL TR-21-1.

Divinsky, B.V., Kosyan, R.D. (2017). “Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years”, Continental Shelf Research 136, 1-19.

Fleming, C.A. (1977). “The Development and Application of a Mathematical Sediment Transport Model”, Ph.D. Thesis, University of Reading.

Fleming, C.A., Swart, D.H. (1982). “New Framework for Prediction of Longshore Currents”, Proc. 18th International Conference on Coastal Engineering, Cape Town, Vol II, Chapter 99, 1640-1658.

Frey, A.E., Connell, K.J., Hanson, H., Larson, M., Thomas, R.C., Munger, S., Zundel, A. (2012). “GenCade Version 1 Model Theory and User’s Guide”, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Coastal Inlets Research Program, ERDC/CHL TR-12-25.

Frey, A.E., King, D.B., Munger, S. (2014). “Recommendations and Requirements for GenCade Simulations”, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Coastal Inlets Research Program, ERDC/CHL TR-14-6. Hanson, H., Kraus, N.C. (1989). “Genesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change, Report 1, Technical Reference”, Department of The Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississippi, 39180-6199.

Goda, Y. (1985). “Random Seas and Design of Maritime Structures”, U. Tokyo Press.

Görmüş, K.S., Kutoğlu, Ş.H., Şeker, D.Z., Özölçer, İ.H., Oruç, M., Aksoy, B. (2014). “Temporal analysis of coastal erosion in Turkey: a case study Karasu coastal region”, Journal of Coastal Conversation 18, 399-414.

Graaf, V.D., Overeem, V. (1979). “Evaluation of Sediment Transport Formulae in Coastal Engineering Practice”, Coust. Engng; Nld; DA. 1979; Vol. 3; No 1, pp 1-32; Bibl. 24 Ref; 8 ill.

Gravens, M. B., Kraus N.C., Hanson H. (1991). “GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change, Report 2, Workbook and User’s Manual”, Instruction Report CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Gravens, M.B., Rosati, J.D. (1994). “Numerical Model Study of Breakwaters at Grand Isle, Louisiana”, Miscellaneous Paper CERC 94-16.

Hallermeier, R.j. (1983). “Sand Transport Limits in Coastal Structure Designs”, A Specialty Conference on Design, Construction, Maintenance and Performance of Coastal Structures | Arlington, Virginia, United States.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1985). "Seawall Constraint in Shoreline Numerical Model", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, 1079- 1083.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1986). “Seawall Boundary Condition in Numerical Models of Shoreline Evolution”, Technical Report CERC 86-3, U. S. Corps of Eng., Vicksburg.

Hanson, H. (1987). “Genesis: A Generelized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use”, Ph.D. Thesis, Dept. of Water Resources Eng., Lund Inst. of Tech./Univ. of Lund.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1989). “Genesis: Generelized Model for Simulating Shoreline Change”, CERC Report 89-19, U. S. Corps of Eng., Vicksburg.

Hanson, H., Kraus, N.C., Nakashima L.D. (1989). “Shoreline change behind transmissive detached breakwaters”, Proc. Coastal Zone '89, ASCE, 568-582.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1990). “Shoreline Response to a Single Transmissive Detached Breakwater”, Proc. 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE, 2,034-2,046.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1991a). “Numerical simulation of shoreline change at Lorain, Ohio”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 117(1): 1-18.

Hanson, H., Kraus, N.C. (1991b). “Comparison of shoreline change obtained with physical and numerical models”, Proc. Coastal Sediments '91, ASCE, 1,785-1,813.

Hanson, H., Larson M., Kraus N.C., Gravens M.B. (2006). “Shoreline response to detached breakwaters and tidal current: Comparison of numerical and physical models”, Proceedings of 30th International Coastal Engineering Conference, World Scientific, 3,630-3,642.

Herbich, J. B., Elfiky A.E., Elmongy A.E., Elsaeed, G. (1996). “Shore protection studies using mathematical models for the Ras-Elbar area, Egypt”, Proc. 25th Coastal Engineering Conference, ASCE, 3,976-3,985.

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 Black Sea”, Dynamics of Atmospheres and Oceans 90: 101132.

Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C. (2020b). “Assessment of long-termwind and wave trends in the Black Sea”, Proceedings of Virtual Conference on Coastal Engineering, (36): 1.

Jubb, I., Canadell, P., Dix, M. (2013). “Representative Concentration Pathways (RCPs)”, Australian Climate Change Science Program, Information Paper.

Kamphuis, J.W. (1991). “Along Shore Sediment Transport Rate”, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol 117, 624-640.

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

Komar, P.D. ve Inman, D.L. (1970). “Longshore Sand Transport on Beaches”, Journal of Geophysical Research, 75(30), 5514-5527.

Kraus, N.C., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T.O., Horikawa, K. (1982). “Field Experiments on Longshore Transport in the Surf Zone”, Proceedings of 18th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 969-988.

Kraus, N.C., Harikai, S. (1983). “Numerical Model of the Shoreline Change at Oarai Beach”, Coastal Eng., 7, 1-28.

Kraus, N. C., Hanson, H. (1995). “Discussion of: Beach nourishment in presence of seawall, by R.G. Dean, and C.-H. Yoo”, Waterway, Port Coastal and Ocean Eng., 121(5), 272-274.

Kraus, N. C. (2000). “Reservoir model of ebb-tidal shoal evolution and sand bypassing”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 126(6), 305-313.

Kriebel, D.L., Dean, R.G. (1984). “Beach and Dune Response to Severe Storms”, Proc. 19th Int. Coastal Engrg. Conf., ASCE, 1584-1599.

Kriebel, D. L., Kraus, N.C., Larson, M. (1991). “Engineering methods for predicting beach profile response”, Proc. Coastal Sediments '91, ASCE, 557-571.

Kroon, A., de Schipper, M.A., van Gelder, P., Aarninkhof, S.G.J. (2020). “Ranking uncertainty: Wave climate variability versus model uncertainty in probabilistic assessment of coastline change”, Coastal Engineering 158, 103673.

Larson, M., Kraus, N.C. (1989). “SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm Induced Beach Change”, Technical Report CERC-89-9, Coast. Eng. Res. Center, U.S. Army Eng. Waterway Experiment Station, Vicksburg.

Larson, M., Kraus, N.C. (2003). “Modeling regional sediment transport and coastal evolution along the Delmarva Peninsula”, In Proceedings Coastal Sediments ’03, ASCE (on CD).

Larson, M., Kraus, N.C., Hanson, H. (2003). “Simulation of regional longshore sediment transport and coastal evolution – The Cascade model”, Proc. 28th Coastal Engineering Conference, ASCE, 2,612-2,624.

Larson, M., Kraus, N.C., Connell, K.J. (2006). “Cascade Version 1: Theory and Model Formulation”, ERDC TN-SWWRP-06-7. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Larson, M., Kraus N.C., Connell K.J. (2007). “Modeling Sediment Storage and Transfer for Simulating Regional Coastal Evolution”, Proc. 30th Coastal Engineering Conference, ASCE, 3,924-3,936.

Longuet-Higgins, M. S. (1970). “Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Parts 1 and 2”, Journal of Geophysical Research, Vol 75, 6778-6801.

Mangor, K. (2004). “Shoreline Management Guidelines”, DHI Water & Environment, Hørsholm, Denmark.

Miller, J.K., Dean, R.G. (2004). “A simple new shoreline change model”, Coastal Engineering 51, 531 – 556.

Moore, B. (1982). “Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height”, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE.

Munger, S., Frey, A.E. (2015). “GenCade Version 1 QuickStart Guide: How to Start a Successful GenCade Project”, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center Coastal Inlets Research Program, ERDC/CHL SR-15-1.

Nielsen, P. (1979). “Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport”, Institute 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.

Osborne, P.D., Vincent, C.E. (1991). “Vertical and horizontal structure in suspended sand concentrations and wave-induced fluxes over bedforms”, Marine Geology 131 (1996), 195-208.

Pauly, D. (2008). “Global fisheries: a brief review”, Journal of Biological Research-Thessaloniki 9, 3-9.

Pelnard-Considere, R. (1956). “Essai de Theorie de l’Evolition des Formes de Rivage en Plages de Sable et de Galets”, 4-ieme Journees de l’Hydraulique, Les engeries de la mer, Question III, Rapport No. 1.

Perlin, M., Dean, R.G. (1983). “A Numerical Model to Simulate Sediment Transport in the Vicinity of Coastal Structures”, Report MR-83-10, U.S. Army Corps of Eng.

Rajasree, B.R., Deo, M.C., Nair, L.S. (2016). “Effect of climate change on shoreline shifts at a straight and continuous coast”, Estuarine, Coastal and Shelf Science 183, 221-234.

Ravens, T.M., Sitanggang, K.I. (2007). “Numerical Modeling and Analysis of Shoreline Change on Galveston Island”, Coastal Education and Research Foundation, Journal of Coastal Research, Number 233:699-710. 2007.

Roelvink, J.A., Walstra, D.J., Chen, Z. (1994). “Morphological Modelling of Keta Lagoon Case” Proc. 25th Int. Conf. on Coast. Eng., Orlando, FL, ASCE, 3222-3236.

Rosati, J. D., Gravens, M.B., Chasten, M.A. (1992). “Development of detached breakwater design criteria using a shoreline response model”, Proc. Coastal Engineering Practice ’92, ASCE, 814-829.

Santiago, I., Camus, P., Gonzalez, M., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., Campo, A., Uriarte, A. (2022). “Impact of climate change on beach erosion in the Basque Coast (NE Spain)”, Coastal Engineering 167, 103916.

Sayao, O.F.S.J., Nairn, R.B., Kamphius, J.W. (1985), “Dimensional Analysis of Littoral Transport”, Proc. Canadian Coastal Conf., St John’s.

Seabrook, S., Hall, K. (1998). “Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters”, Proc. 26th Coastal Engineering Conference, ASCE, 2000-2013.

Sutherland, J., Peet, A.H., Soulsby, R.L. (2004). “Evaluating the performance of morphological models”, Coastal Engineering 51, 917-939.

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. (2021). “Akarsu Delta Sistemlerinin İklim Değişikliği Etkilerine Karşı Kırılganlığı: Sakarya Nehri Deltası Örneği”, 117Y333, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).

Tanaka, N. (1976). “Effects of submerged rubble-mound breakwater on wave attenuation and shoreline stabilization”, Proc. 23rd Japanese Coastal Engineering Conference, 152-157 (in Japanese).

TMMOB (2012). “Karasu Kıyı Alanı Kıyı Daralması Raporu”, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Selanik Cad. No: 19/1 Yenişehir 06650 ANKARA.

Thomas, R.C., Frey, A.E. (2013). “Shoreline Change Modeling Using OneLine Models: General Model Comparison and Literature Review”, US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-II-55.

Toimil, A., Camus, P., Losada, I.J., Le Cozannet, G., Nicholls, R.J., Idier, D., Maspataud, A. (2020. “Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment”, Earth-Science Reviews 202-103110.

Van der Velden, E.T.J.M. (1989). “Coastal Engineering, Vol.2”, Delft Univ. of Tech.

Van Rijn L.C. (1998). “Principles of Coastal Morphology”, Amsterdam, The Netherlands.

Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011). “The representative concentration pathways: an overview”, Climatic Change, 109:5–31.

Walton, T. L., Adams, W.D. (1976). “Capacity of inlet outer bars to store sand”, Proceedings 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1919-1937.

Wamsley, T., Hanson, H. (2002). “Evaluation of Proposed Submerged Jetty Spur on Shoreline Evolution, Grays Harbor, WA”, Proc. 28th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 2625-2637.

Wamsley, T., Hanson, H., Kraus, N.C. (2002). “Wave Transmission at Detached Breakwaters for Shoreline Response Modeling”, Technical Note ERDC/CHL CHETN-II-45, US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.

Wamsley, T., Kraus, N.C., Hanson, H. (2003). “Shoreline Response to Breakwaters with Time-dependent Wave Transmissivity”, Proc. Coastal Sediments '03, ASCE, 11 pp. (CD)

Yüksel, Y., Çevik, E., Çelikoğlu, Y. (1998). “Kıyı ve Liman Mühendisliği”, TMMOB, İMO Ankara Şubesi, Ankara.

Yüksel, Y. (2005). “Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Planlama ve Tasarım)”, 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.

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.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Açıkkol, A., Güner, H.A.A. (2022). "Küresel İklim Değişikliğinin Kıyı Çizgisi Değişimi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi: Karasu Örneği", Uluslararası İklim Değişikliğinin Sağlık, Yaşam, Mühendislik ve Sosyal Bilimler Üzerindeki Etkileri Kongresi, Konya, Türkiye, pp. 128-141.