YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİKSEL BİR DALGA MODELİ KURULUMU ve KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ MODELLENMESİ

İnşaat Yük. Müh. Havva Anıl ARI

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 25 Ağustos 2009
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı : Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Emin KARAHAN (İTÜ)
: Prof. Dr. M. Sedat KABDAŞLI (İTÜ)
: Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER (ODTÜ)
: Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU (YTÜ)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ v

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xviii

ÖNSÖZ xxi

ÖZET xxii

ABSTRACT xxiii

1 GİRİŞ 1

1.1 Problemin Tanımı 1
1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 2

2 DALGA ANALİZİ ve TAHMİN YÖNTEMLERİ 5

2.1 Giriş 5
2.2 Dalga Tahmin Modelleri 5
2.2.1 Enerji Taşınımı Denklemine Dayanan Dalga Tahmin Modelleri 6
2.2.1.1 Birinci Nesil Modeller 6
2.2.1.2 İkinci Nesil Modeller 7
2.2.1.3 Üçüncü Nesil Modeller 9
2.2.2 Ampirik Tahmin Modelleri 15
2.2.2.1 SPM Yöntemi 15
2.2.2.2 SMB Yöntemi 15
2.3 Dalga Kayıtlarının Analizi 16
2.3.1 Analog Kayıtlar 16
2.3.2 Dijital (Sayısal) Kayıtlar 16
2.4 Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar 18

3 KIYI MORFOLOJİSİ MODELLEMESİ 31

3.1 Giriş 31
3.2 Kıyı Çizgisi Modelleri 32
3.2.1 Kıyı Profili Modeli 32
3.2.2 Kıyı Çizgisi Değişimi Modeli 33
3.2.3 Üç Boyutlu Kıyı Gelişim Modeli 33
3.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı 34
3.4 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı 38
3.5 Kıyı Çizgisi Değişiminin Sayısal Modelleri 38
3.5.1 LITPACK Sayısal Modeli 38
3.5.1.1 LITSTP 39
3.5.1.2 LITDRIFT 42
3.5.1.3 LITLINE 45

3.5.2 Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesinde Kullanılan Tek Çizgi Teorisi 50
3.5.2.1 1-D Morfoloji Denklemi 51
3.5.2.2 Katı Madde Taşınımı 52
3.5.2.3 Dalga Değişim Hesabı 53
3.6 Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar 53
3.6.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı ile İlgili Çalışmalar 53
3.6.2 Kıyı Çizgisinin Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar 57

4 SAHA ÖLÇÜMLERİ 67

4.1 Giriş 67
4.2 Dalga Ölçümleri 67
4.3 Rüzgar Ölçümleri 74
4.4 Batimetri Ölçümleri 78
4.5 Kıyı Çizgisi Ölçümleri 79
4.6 Uydu Görüntüleri 84
4.7 Katı Madde Özellikleri 85
4.8 Su Seviyesi Değişimi Ölçümleri 89
4.9 Akıntı Ölçümleri 92

5 İSTATİSTİKSEL DALGA MODELİ 103

5.1 Giriş 103
5.2 Rüzgar Ölçümlerinin Değerlendirilmesi 103
5.3 Dalga Ölçümlerinin Değerlendirilmesi 123
5.4 Dalga Tahmin Yöntemleri Yardımıyla Dalga İkliminin Belirlenmesi 136
5.4.1 SPM Yöntemi 136
5.4.2 SMB Yöntemi 142
5.4.3 Sayısal Model (MIKE 21 SW) ve Kalibrasyon 146
5.4.3.1 Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması 152
5.4.3.2 Sayısal Model (MIKE 21 SW) Sonuçları ve Değerlendirme 164
5.5 İstatistiksel Dalga Modeli Kurulumu 185
5.5.1 Dalga Yüksekliğinin Modellenmesi 185
5.5.2 Dalga Periyodunun Modellenmesi 215
5.5.3 Dalga Yönünün Modellenmesi 227
5.6 Değerlendirme 233
5.6.1 Rüzgar Verilerinin Değerlendirilmesi 233
5.6.2 Dalga Verilerinin Değerlendirilmesi 233

6 KIYI ÇİZGİSİNİN SAYISAL MODELLENMESİ 246

6.1 Kıyı Çizgisi Saha Verilerinin Değerlendirilmesi 246
6.1.1 Kıyı Çizgisi Ölçümleri 246
6.1.2 Uydu Görüntüleri 249
6.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Modellenmesi 249
6.2.1 CERC (1984) ve Kamphuis (1991) Yöntemleri ile Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Miktarının Belirlenmesi 249
6.2.2 Katı Madde Taşınımının Sayısal Modellemesi (LITDRIFT) 255
6.2.3 Katı Madde Taşınım Modelleri Sonuçlarının Karşılaştırılması 264
6.3 Kıyı Çizgisinin Modellenmesi 266

7 KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMI MODELİ 274

7.1 Giriş 274
7.2 Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi 274
7.3 Deterministik Model 278
7.4 Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modeli 281
7.5 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modellerinin Değerlendirilmesi 294
8 SONUÇLAR ve ÖNERİLER 298
KAYNAKLAR 305
EKLER 314
Ek 1 ADCP Akıntı Ölçüm Sonuçları 315
ÖZGEÇMİŞ 331

SİMGE LİSTESİ

a'	Katı madde hacminin toplam hacme oranı
b	Bias değeri
c	Faz hızı
c_1	Katsayı
c_2	Katsayı
c_g	Grup dalga hızı
C	Dalga yayılma hızı
C_b	Taban konsantrasyonu
C_{ds}	Köpüklenme parametresi
C_f	Sürtünme katsayısı
Cou	Courant sayısı
C_Q	Kalibrasyon katsayısı
$\overline{C}$	Ortalama konsantrasyon
d_{10}	Katı madde tanelerinin % 10'unun geçtiği çap
d_{16}	Katı madde tanelerinin % 16'sının geçtiği çap
d_{35}	Katı madde tanelerinin % 35'inin geçtiği çap
d_{50}	Katı madde tanelerinin % 50'sinin geçtiği çap
d_{65}	Katı madde tanelerinin % 65'inin geçtiği çap
d_{84}	Katı madde tanelerinin % 84'ünün geçtiği çap
d_{90}	Katı madde tanelerinin % 90'ının geçtiği çap
d_k	Kapama derinliği
$\underline{D}$	Difüzyon katsayısı
E	Spektrum (enerji) yoğunluğu
f	H_0 yüksekliğinde α_0 açısına sahip dalganın bir yılda kıyıda etki etme yüzdesi
$F(\alpha_0)$	Yön terimi
F	Etkili feç mesafesi
f_n	Frekans
f_0	Minimum frekans
g	Yerçekimi ivmesi
h_b	Kırılma derinliği
h_{aktif}	Toplam profil derinliği
$h_{basamak}$	Basamak yüksekliği
h_{kumul}	Kumul yüksekliği
H	Dalga yüksekliği
H_b	Kırılma derinliğindeki dalga yüksekliği
H_{maks}	Maksimum dalga yüksekliği
$H_{1/3}$	Belirli bir dalga kaydındaki 1/3'lük en yüksek dalga yüksekliklerinin ortalaması
$H_{1/10}$	Belirli bir dalga kaydındaki 1/10'luk en yüksek dalga yüksekliklerinin ortalaması
H_o	Derin deniz dalga yüksekliği
H_{ort}	Ortalama dalga yüksekliği
H_{rms}	Potansiyel dalga yüksekliği
H_{rmsb}	Kırılan rms dalga yüksekliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
$H_{s,12}$	12 saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliği
H_{sb}	Kırılma derinliğindeki belirgin dalga yüksekliği
I_l	Birim genişlik ve birim zaman için batık ağırlık katı madde debisi
k	Taban pürüzlülüğü
k_R	Kum dalgacıklarından dolayı oluşan pürüzlülük

K	Boyutsuz katsayı
K'	CERC (1984) formülü katsayısı
K_p	Basınç katsayısı
L	Dalga boyu
L_{0p}	Pik dalga periyoduna karşılık gelen dalga boyu
m_b	Kırılma derinliğindeki kıyı eğimi
m	Kıyı eğimi
N	Hareket yoğunluğu
N_{dalga}	Gelen dalgaların toplamı
p	Bir tabakada tüm partüküllerin hareket etme olasılığı
P_l	Kıyı boyu dalga gücü
q_0	Kıyı boyu doğrultusunda birim mesafede kıyıya dik net katı madde taşınım debisi
q_{b1}	Ortalama akıntı yönündeki sürüntü debisi
q_{b2}	Ortalama akıntı yönüne dik sürüntü debisi
q_s	Askı malzemesinin taşınım miktarı
Q	Kıyı boyu katı madde taşınım debisi
Q_a	Gerçek katı madde taşınım debisi
Q_k	Kaynak veya kuyu taşınım debisi
Q_{net}	Kıyı boyu net katı madde taşınım debisi
Q_p	Potansiyel katı madde taşınım debisi
$Q_{sağ\text{-}sol}$	Sağdan sola taşınan kıyı boyu katı madde debisi
$Q_{sol\text{-}sağ}$	Soldan sağa taşınan kıyı boyu katı madde debisi
Q_{top}	Toplam katı madde taşınım debisi
R	Dünyanın yarıçapı
S	Kaynak terimi
S_{in}	Kaynak teriminde rüzgar girdisi
S_{dis}	Kaynak teriminde köpüklenme sebebiyle enerji azalması
S_{nl}	Kaynak teriminde lineer olmayan transfer
S_{bot}	Kaynak teriminde taban sürtünmesinden dolayı enerji kaybı
S_{surf}	Kaynak teriminde dalga kırılmasından kaynaklanan enerji kaybı
t	Zaman
T_p	Spektrumun pik noktasına karşılık gelen dalga periyodu
T_{maks}	Maksimum dalga periyodu
$T_{1/10}$	Belirli bir dalga kaydındaki 1/3'lük en yüksek dalga periyotlarının ortalaması
$T_{1/3}$	Belirgin dalga periyodu
T_{ort}	Ortalama dalga periyodu
T_w	Rüzgar esme süresi
T_z	Ortalama sıfırı kesme dalga periyodu
U	Deniz seviyesinden 10 m yukarıda ölçülen rüzgar hızı
$u(z)$	z yüksekliğindeki rüzgar hızı
$u(z_0)$	z_0 yüksekliğindeki rüzgar hızı
u_ϕ	Coğrafi alandaki derinlik ortalamalı akıntının ($\vec{U}$) bileşeni
u_λ	Coğrafi alandaki derinlik ortalamalı akıntının ($\vec{U}$) bileşeni
u_{mb}	Kırılan dalgada maksimum yörüngesel hız
U_d	Düzeltilmiş rüzgar hızı değeri
U_f	Kayma hızı(u_*)
U_k	Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait rüzgar hızı değeri
$\vec{U}$	Akıntı hızı vektörü

$\vec{v}$	Dalga grubu yayılma hızı
V	Akıntı hızı
V_a	İzleyici adveksiyon hızı
$\overline{V}_l$	Ortalama kıyı boyu akıntı hızı
w	Katı madde çökelme hızı
W	Surf bölgesi genişliği
x	Kıyı boyu konumu
y	Kıyı çizgisinden açık denize doğru olan uzaklık
y_c	Referans çizgisinden kıyı çizgisine olan dik mesafe
z	Sakin su seviyesinden aşağı doğru alınan derinlik
α	Dalga geliş açısı
α_b	Kırılma derinliğindeki dalga açısı
α_e	Etkili yerel dalga açısı
α_o	Derin deniz dalga geliş açısı
α_s	Kıyı çizgisi açısı
Δt	Zaman aralığı
Δx	Kıyı boyu ağ aralığı
∇	Diferansiyel operatör
ε_s	Katı madde türbülans difüzyon katsayısı
ϕ	Wenthworth ölçeği
$\phi(t)$	Akımın anlık yönü
γ	Kırılma indeksi
η	Dalga profil değeri
λ	Boylam
π_Q	Boyutsuz katı madde taşınım parametresi
ρ_a	Havanın özgül kütlesi
ρ_w	Suyun özgül kütlesi
ρ_s	Katı madde özgül kütlesi
σ	Göreceli açısal frekans
σ_g	Katı madde geometrik standart sapması
σ_{kesme}	Kesme frekansı
σ_{maks}	Maksimum frekans
$\sigma_{\min}$	Minimum frekans
σ_{PM}	Pierson-Moskowitz pik frekansı
$\overline{\sigma}$	Ortalama göreceli frekans
Φ_{b1}	Ortalama akıntı yönündeki boyutsuz sürüntü debisi
Φ_{b2}	Ortalama akıntı yönüne dik boyutsuz sürüntü debisi
Φ_b	Boyutsuz sürüntü debisi
$\Theta_{rüzgar}$	Rüzgar esme yönü
θ	Dalga yönü
θ'	Düzlem taban için Shields parametresi
θ_c	Kritik Shields parametresi
ω	Mutlak açısal frekans

KISALTMA LİSTESİ

ADCP	AquaDopp Current Profiler
CERC	Coastal Engineering Research Center
CHL	Coastal and Hydraulic Laboratory
DGPS	Diferantial Global Positioning System
DHI	Danish Hydraulic Institute
E	East
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EMS	Elliptic Mild Slope
ENE	East North East
ERDC	Engineer Reserch and Development Center
ESE	East South East
EW	East West
GENESIS	Generalized Model for Simulating Shoreline Change
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
HYPA	Hybrid Parametrical
JONSWAP	JOint North Sea WAve Project
LITDRIFT	LITtoral Drift
LITLINE	LITtoral Processes And Coastline Kinetics
LITSTP	LITtoral Sediment TransPort
LSTF	Large scale Sediment Transport Facility
MRI	Meteorological Research Institute
MT	Mud Transport
N	North
NE	North East
NNE	North North East
NNW	North North West
NS	North South
NW	North West
OSS	Ortalama Su Seviyesi
PMS	Parabolic Mild Slope
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real Time Kinematic
S	South
SBEACH	Storm-induced BEAch CHange Model
SE	South East
SMB	Sverdrup-Munk-Bretschneider
SPM	Shore Protection Manual
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SSE	South South East
ST	Sediment Transport
SSW	South South West
SW	Spectral Waves
UTM	Universal Transverse Mercator
W	West
WAM	Wave Ocean Model
WNW	West North West
WSW	West South West

YSA	Yapay Sinir Ağları
1-D	1 Dimensional
2DH	2 Dimensional Horizontal
2DV	2 Dimensional Vertical
3-D	3 Dimensional

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çalışmanın akış diyagramı ... 3
Şekil 2.1 Dijital kayıtların bilgisayar analizi için akış diyagramı ... 17
Şekil 2.2 Ölçülen ve korelasyonla hesaplanan dalga parametreleri ... 19
Şekil 2.3 Rüzgar ve dalga istatistiği arasındaki ilişkinin şematik gösterimi ... 20
Şekil 2.4 Korelasyon fonksiyonu ve %90 güven aralığı ile ölçülen dalga yüksekliğine karşılık ölçülen rüzgar hızları (Rüzgar yönü , Schönhagen bölgesi) ... 22
Şekil 2.5 Lineer regresyon fonksiyonu ve %90 güven aralığı ile hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri, Schönhagen bölgesi ... 23
Şekil 2.6 Ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi ... 24
Şekil 2.7 (Urüzgar>7.5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi ... 24
Şekil 2.8 (7.5 m/s> Urüzgar>5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi ... 25
Şekil 2.9 (Urüzgar<5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi ... 25
Şekil 2.10 Lineer regresyon fonksiyonu ve %90 güven aralığında hesaplanan ve ölçülen dalga yönleri, Schönhagen bölgesi ... 26
Şekil 2.11 Ölçülen dalga yüksekliklerine karşılık ölçülen dalga periyodu,Schönhagen bölg.. 26
Şekil 2.12 Ölçülen ve hesaplanan dalga verisi, Schönhagen bölgesi ... 27
Şekil 2.13 1983 yılı Ocak ayı için elde edilen dalga parametreleri, Schönhagen bölgesi ... 28
Şekil 2.14 Schönhagen bölgesi için aylık eklenik dalga enerji akısı ... 28
Şekil 2.15 Rüzgar-dalga korelasyonunun temel prensibi ... 29
Şekil 2.16 Dalga yüksekliğinin rüzgar-dalga korelasyonu ... 30
Şekil 3.1 Katı madde işlemlerinin zaman ve konum ölçeklerine göre sınıflandırması ... 31
Şekil 3.2 LITDRIFT modülünün akım şeması ... 43
Şekil 3.3 Şematik ayrıklaştırılmış kıyı profili ... 44
Şekil 3.4 LITLINE yazılımında kullanılan koordinat sistemi ... 45
Şekil 3.5 LITLINE modülünün akış şeması ... 47
Şekil 3.6 Referans çizgisi boyunca değişen dalga iklimi ... 48
Şekil 3.7 Kıyı boyu ayrıklaştırma ... 49
Şekil 3.8 Koordinat ekseni ... 50
Şekil 3.9 1-D modeli için kütlenin korunumu şeması ... 51
Şekil 3.10 Hesap şeması ... 53
Şekil 4.1 Dalga ölçerin bulunduğu konum ... 68
Şekil 4.2 Dalga ölçerin bulunduğu konumdan kıyının ve barınağın görünümü ... 68
Şekil 4.3 Dalga ölçer ... 69
Şekil 4.4 Dalga ölçerin parçaları ... 70
Şekil 4.5 Dalga ölçerin pilinin değiştirilmesi ve kurulumu ... 70
Şekil 4.6 Dalga ölçerin dalgıç yardımıyla deniz tabanına yerleştirilmesi ... 71
Şekil 4.7 Dalga ölçerin Karaburun deniz fenerine yerleştirilen Nikon DTM-330 model total station ile konumunun belirlenmesi ... 72
Şekil 4.8 Dalga ölçerin beton platformunu yerleştiren koster ... 73
Şekil 4.9 Dalga ölçerin beton platformunun yerleştirilmesi ... 73
Şekil 4.10 Karaburun fenerinde rüzgar ölçerin konumu ... 74
Şekil 4.11 OTA 111-T model rüzgar hızı ve yönünü algılayan anemometre ... 75
Şekil 4.12 OTA 111-T model anemometre parçaları ... 75
Şekil 4.13 OTA 111-T model anemometre montaj şekli ... 76
Şekil 4.14 OTA 112-2 model kaydedici ... 76

Şekil 4.15 Rüzgar kaydedicisinin iç kısmı 77
Şekil 4.16 HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder (balık bulucu) 78
Şekil 4.17 HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder ile derinlik ölçümü 78
Şekil 4.18 GARMIN GPS 12 model el GPS'i 79
Şekil 4.19 Karaburun kıyı batimetrisi 79
Şekil 4.20 Mevcut nirengi noktaları ve ölçmelerde kullanılan poligon noktaları 81
Şekil 4.21 Poligon noktalarında GPS ölçümü 82
Şekil 4.22 Hareketli GPS alıcısı ile farklı periyotlarda yapılan kıyı çizgisi ölçümleri 82
Şekil 4.23 Karaburun kıyı şeridi 83
Şekil 4.24 Eylül, 2004 yılı IKONOS uydu görüntüsü 84
Şekil 4.25 Temmuz, 2005 yılı IKONOS uydu görüntüsü 85
Şekil 4.26 Katı maddenin granülometrik değişimi (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları) 87
Şekil 4.27 Katı maddenin granülometrik değişimi (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları) 87
Şekil 4.28 Su seviyesi değişimi ölçümü 90
Şekil 4.29 Su seviyesi değişimleri 91
Şekil 4.30 Akıntı ölçüm şamandırası 92
Şekil 4.31 ADCP akıntı ölçüm cihazı (Nortek AS, 2005) 94
Şekil 4.32 Şamandıraya yerleştirilen ADCP akıntı ölçüm cihazı 94
Şekil 4. 33 ADCP akıntı cihazının veri alma hücreleri ve ışın demetleri 95
Şekil 4.34 1. ölçümden elde edilen -1.0 m ve -2.0 m arasındaki ölçüm verisi zaman serileri . 96
Şekil 4.35 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.01) 98
Şekil 4.36 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.05) 99
Şekil 4.37 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.09) 100
Şekil 5.1 Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verileri . 106
Şekil 5.2 NW yönü için Kumköy Meteoroloji İst. ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri 107
Şekil 5.3 NW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 107
Şekil 5.4 NNW yönü için Kumköy Meteoroloji İst. ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri 108
Şekil 5.5 NNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 108
Şekil 5.6 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri . 109
Şekil 5.7 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 109
Şekil 5.8 WNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki 111
Şekil 5.9 WNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 112
Şekil 5.10 NNE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki 113
Şekil 5.11 NNE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 114
Şekil 5.12 NE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki 115
Şekil 5.13 NE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 116
Şekil 5.14 ENE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki 117
Şekil 5.15 ENE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 118

Şekil 5.16 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar ölçümleri arasındaki ilişki 119
Şekil 5.17 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması 120
Şekil 5.18 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verileri 122
Şekil 5.19 30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri (H1/3 ve Hmaks) zaman serisi 125
Şekil 5.20 29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri (H1/3 ve Hmaks) zaman serisi 126
Şekil 5.21 27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri (H1/3 ve Hmaks) zaman serisi 127
Şekil 5.22 16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri (H1/3 ve Hmaks) zaman serisi 128
Şekil 5.23 28 Ekim 2004-17 Aralık 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri (H1/3 ve Hmaks) zaman serisi 129
Şekil 5.24 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması (H1/3'e karşılık Hmaks) 130
Şekil 5.25 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması($H_{1/3}$'e karşılık $H_{1/10}$) 131
Şekil 5.26 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması ($H_{1/3}$'e karşılık H_{ort}) 131
Şekil 5.27 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık T_{maks}). 132
Şekil 5.28 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık $T_{1/10}$).. 132
Şekil 5.29 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık T_{ort}) ... 133
Şekil 5.30 Derin deniz koşullarında H1/3'e karşılık T1/3 değerleri 134
Şekil 5.31 Derin deniz koşullarında H1/3'e karşılık Tort değerleri 134
Şekil 5.32 30 Ağustos2003-17 Aralık2004 tarihleri arasında ortalama su seviyesi değişimi 135
Şekil 5.33 SPM yöntemiyle hesaplanan dalga parametrelerinin ölçüm değerleri ile zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (30 Eylül 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arasında) 140
Şekil 5.34 SPM yöntemiyle elde edilen uzun dönem belirgin dalga yüksekliği olasılık dağılımları (Ocak1990-Eylül2005 yılları arasında 16 yıllık rüzgar verisi ile) 141
Şekil 5.35 SMB yöntemiyle hesaplanan dalga parametrelerinin ölçüm değerleri ile zaman serisi şeklinde karşılaştırılması 144
Şekil 5.36 SMB yöntemiyle elde edilen uzun dönem belirgin dalga yüksekliği olasılık dağılımları (Ocak1990-Eylül2005 yılları arasında 16 yıllık rüzgar verisi ile) 145
Şekil 5.37 Model alanı ağ sistemi 148
Şekil 5.38 Hesaplama alanının batimetrisi 148
Şekil 5.39 Kaba model alanı ağ sistemi 153
Şekil 5.40 k1 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 154
Şekil 5.41 k2 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 155
Şekil 5.42 k3 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 155
Şekil 5.43 k4 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 155
Şekil 5.44 k5 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 156
Şekil 5.45 k6 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 156
Şekil 5.46 k7 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga

yüksekliği 156
Şekil 5.47 k8 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 157
Şekil 5.48 k9 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 157
Şekil 5.49 k10 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 157
Şekil 5.50 k11 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 158
Şekil 5.51 k12 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 158
Şekil 5.52 k13 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 158
Şekil 5.53 k14 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 159
Şekil 5.54 k15 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği 159
Şekil 5.55 Kalibrasyon sonuçları (16/11/2004-22/11/2004 tarihleri arasında) 160
Şekil 5.56 Bir aylık süre için (01/11/2004-30/11/2004) model doğrulamasında elde edilen dalga yükseklikleri 162
Şekil 5.57 Bir aylık süre için (01/11/2004-30/11/2004) model doğrulamasında elde edilen dalga periyotları 163
Şekil 5.58 Model doğrulamasında elde edilen ve ölçülen dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (01/11/2004-30/11/2004 tarihleri arasındaki değerler için) . 164
Şekil 5.59 ECMWF'den elde edilen rüzgar alanı verileriyle 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında elde edilmiş rüzgar gülü 166
Şekil 5.60 Sayısal model ile hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri için 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında elde edilmiş dalga gülü 167
Şekil 5.61 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması 170
Şekil 5.62 Sayısal modelden elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması 172
Şekil 5.63 Sayısal modelden elde edilen ortalama dalga yönü değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması 174
Şekil 5.64 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin toplam, rüzgar dalgası ve soluğan değerlerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılması 176
Şekil 5.65 Farklı zamanlarda elde edilmiş derin deniz dalga enerji spektrumları 178
Şekil 5.66 Sayısal modelden 20.11.2004 tarihinde 135°'lik rüzgar yönü değişimi sırasında elde edilen yönsel spektrum gelişimi 180
Şekil 5.67 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) karşılık ortalama dalga periyodu (T_{ort}) değerleri (Dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlar (N 41.35° E 28.68°) için) 181
Şekil 5.68 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) karşılık ortalama dalga periyodu (T_{ort}) değerleri (Derin deniz koordinatları (N 41.7° E 28.7°) için) 182
Şekil 5.69 Sayısal model ile hesaplanan dalga parametrelerine karşı ölçülen dalga parametreleri 183
Şekil 5.70 Korelasyonda rüzgar yönlerinin sınıflandırılmasının şematik gösterimi 186
Şekil 5.71 Rüzgar yönü $348.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 11.25^\circ$ (N) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 187
Şekil 5.72 Rüzgar yönü $11.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 33.75^\circ$ (NNE) için korelasyon fonksiyonu ve

ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 187
Şekil 5.73 Rüzgar yönü $33.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 56.25^\circ$ (NE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 187
Şekil 5.74 Rüzgar yönü $56.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 78.75^\circ$ (ENE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 188
Şekil 5.75 Rüzgar yönü $78.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 101.25^\circ$ (E) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 188
Şekil 5.76 Rüzgar yönü $281.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 303.75^\circ$ (WNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 188
Şekil 5.77 Rüzgar yönü $303.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 326.25^\circ$ (NW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 189
Şekil 5.78 Rüzgar yönü $326.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 348.75^\circ$ (NNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif) 189
Şekil 5.79 Rüzgar yönü $348.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 33.75^\circ$ (N-NNE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif) 190
Şekil 5.80 Rüzgar yönü $33.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 78.75^\circ$ (NE-ENE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif) 190
Şekil 5.81 Rüzgar yönü $303.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 348.75^\circ$ (NW-NNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif) 190
Şekil 5.82 Rüzgar yönü $11.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 56.25^\circ$ (NNE-NE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif) 191
Şekil 5.83 Rüzgar yönü $56.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 101.25^\circ$ (ENE-E) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif) 191
Şekil 5.84 Rüzgar yönü $281.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 326.25^\circ$ (WNW-NW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif) 191
Şekil 5.85 Rüzgar yönü $326.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 11.25^\circ$ (NNW-N) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonundan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif) 192
Şekil 5.86 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (1. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması..... 192
Şekil 5.87 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (2. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması..... 193

Şekil 5.88 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (3. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması 193
Şekil 5.89 Tüm alternatifler için ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması 194
Şekil 5.90 Rüzgar yönü $348.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 11.25^\circ$ (N) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 195
Şekil 5.91 Rüzgar yönü $11.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 33.75^\circ$ (NNE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 196
Şekil 5.92 Rüzgar yönü $33.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 56.25^\circ$ (NE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 197
Şekil 5.93 Rüzgar yönü $56.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 78.75^\circ$ (ENE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 198
Şekil 5.94 Rüzgar yönü $78.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 101.25^\circ$ (E) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 199
Şekil 5.95 Rüzgar yönü $281.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 303.75^\circ$ (WNW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 200
Şekil 5.96 Rüzgar yönü $303.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 326.25^\circ$ (NW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 201
Şekil 5.97 Rüzgar yönü $326.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 348.75^\circ$ (NNW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları 202
Şekil 5.98 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına (1. alternatif) göre ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliğine süre etkisinin karşılaştırılması 203
Şekil 5.99 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına (1. alternatif) göre ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliklerinde sürelerin karşılaştırılması 204
Şekil 5.100 Rüzgar-dalga yüksekliği modelinde akış diyagramı 206
Şekil 5.101 Regresyonların R^2 (determinasyon katsayıları) ve tahminin standart hatası değerleri 210
Şekil 5.102 Regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003) 213
Şekil 5.103 Regresyon analizi sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında) 218
Şekil 5.104 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde) 219
Şekil 5.105 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde) 220
Şekil 5.106 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde) 220
Şekil 5.107 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde) 221
Şekil 5.108 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde) 222
Şekil 5.109 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde) 222
Şekil 5.110 Ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi 223
Şekil 5.111 Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı

sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında) 226
Şekil 5.112 Regresyon analizi sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında) 229
Şekil 5.113 Ortalama rüzgar yönü ve ortalama dalga yönlerinin ilişkisi 230
Şekil 5.114 Ortak dağılım sonucunda elde edilen ortalama dalga yönü değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması .....
(12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında) 232
Şekil 5.115 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık regresyon analizi sonucunda elde edilen ölçüm derinliğindeki belirgin dalga yükseklikleri 238
Şekil 5.116 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık regresyon analizi sonucunda elde edilen derin deniz belirgin dalga yükseklikleri 238
Şekil 5.117 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ilişkisi 240
Şekil 5.118 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003) 243
Şekil 5.119 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen ortalama dalga periyotları değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003) 244
Şekil 5.120 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen ortalama dalga yönleri değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003) 245
Şekil 6.1 Kıyı çizgisi ölçümünün yapıldığı poligonlar ve kıyı çizgisi değişimi 246
Şekil 6.2 Ölçüm dönemlerine göre kıyı çizgisi değişimi 248
Şekil 6.3 Kıyı çizgisi değişimi sayısal modelinde kullanılan Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005 tarihli kıyı çizgisi ölçümleri 248
Şekil 6.4 Yıllara göre sayısallaştırılmış uydu görüntüleri 249
Şekil 6.5 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yükseklikleri eklenik aşılma olasılığı dağılımları 250
Şekil 6.6 Karaburun kıyısını etkileyen dalga yönleri 252
Şekil 6.7 LITDRIFT katı madde taşınım modülünde kullanılan kıyı çizgisi 256
Şekil 6.8 LITPACK sayısal modelinde kullanılan kıyı çizgisi parametrelerinin şematik gösterimi 257
Şekil 6.9 Kıyı profilleri 258
Şekil 6.10 Referans çizgisinin konumu Şekil 6.11 Karaburun kıyısında referans çizgisinin konumu 261
Şekil 6.12 Aktif kıyı yüksekliği şematik gösterimi 262
Şekil 6.13 Katı madde kaynak noktaları 269
Şekil 6.14 GPS ölçümleri ile sayısal modelin karşılaştırılması 271
Şekil 6.15 Uydu görüntüleri ile sayısal modelin karşılaştırılması 272
Şekil 6.16 GPS ölçümleri ile sayısal modelin ve korelasyon modeli sonuçlarının karşılaştırılması 273
Şekil 7.1 Nöron modeli 275
Şekil 7.2 Biyolojik ve yapay sinir hücresi 276
Şekil 7.3 Kıyı boyu katı madde taşınım modeli için tasarlanan optimum ağlar 285
Şekil 7.4 Verilerin MATLAB yazılımında eğitim, test ve doğrulama kısımlarının korelasyon

sayıları ve ölçüm verileri ile uyumları 287
Şekil 7.5 Model ve Kamphuis (1991) sonuçlarının karşılaştırılması 289
Şekil 7.6 Saha ve laboratuar ölçüm verilerinin (kıyı boyu katı madde taşınım debileri) model sonuçları ile karşılaştırılması 292
Şekil 8.1 YSA yöntemiyle geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modelinin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması 304

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Kıyı boyu katı madde taşınımının genel sınıflandırması 35
Çizelge 3.2 Kıyı boyu taşınım formülleri 37
Çizelge 3.3 Ölçülen ve tahmin edilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarları arasında karşılaştırma 55
Çizelge 3.4 Kıyı boyu katı madde taşınımı deneylerinin dalga koşulları 56
Çizelge 3.5 Ölçülen ve hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınımları arasında karşılaştırma .. 56
Çizelge 3.6 Tek çizgi teorisinin analitik çözümünde kullanılan kabuller ve sınırlamalar 59
Çizelge 3.7 Kıyı çizgisi değişiminde kullanılan bazı sayısal modeller 64
Çizelge 4.1 Dalga ölçerin veri toplama süreleri 69
Çizelge 4.2 Dalga ölçümünden elde edilen verilerin tarihleri ve ölçüm aralıkları 73
Çizelge 4.3 OTA 111-T model anemometrenin özellikleri 77
Çizelge 4.4 Elek analizi sonuçları (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları) 86
Çizelge 4.5 Elek analizi sonuçları (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları) 86
Çizelge 4.6 Katı maddenin granülometrik özellikleri (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları) 86
Çizelge 4.7 Katı maddenin granülometrik özellikleri (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları) 86
Çizelge 4.8 Katı maddenin diğer özellikleri (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları) 88
Çizelge 4.9 Katı maddenin diğer özellikleri (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları) 88
Çizelge 4.10 Katı maddenin geometrik standart sapma değerleri 89
Çizelge 4.11 Wenthworth ölçeğine göre katı maddenin sınıflandırması 89
Çizelge 4.12 Şamandıra ile yapılan ölçümlerden elde edilen akıntı hızı ve yönleri 93
Çizelge 4.13 ADCP cihazı ile yapılan ölçüm zaman ve derinlikleri 95
Çizelge 4.14 Hidrometrik kurala göre akıntı hızı verilerinin belirlendiği derinlikler 96
Çizelge 4.15 Minimum bileşke akıntı hızı 101
Çizelge 4.16 Maksimum akıntı bileşke hızı 101
Çizelge 4.17 Ortalama bileşke akıntı hızı 102
Çizelge 4.18 Yapılan ölçümlerin (1.,2.,3. ve 4. ölçüm) ortalama değerleri (bileşke akıntı hızları) 102
Çizelge 5.1 Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri için düzeltme fonksiyonları 110
Çizelge 5.2 Karaburun bölgesinde yapılan dalga ölçüm verilerinin tarihleri 123
Çizelge 5.3 Belirgin dalga yüksekliği ve periyodunun diğer dalga parametreleri ile arasındaki bağıntılar 130
Çizelge 5.4 Goda'nın (2000) yapmış olduğu çalışmanın bu çalışmadaki dalga ölçüm verileriyle karşılaştırılması 133
Çizelge 5.5 Etkili kabarma alanı (feç) uzunlukları 139
Çizelge 5.6 Hesaplama alanı koordinatları 147
Çizelge 5.7 Simülasyona ait zaman parametreleri 149
Çizelge 5.8 Temel denklemler ve çözümleme tekniği ile ilgili modelde kullanılan parametreler 150
Çizelge 5.9 Modelde kullanılan spektrum ayrıklaştırma parametreleri 150
Çizelge 5.10 Model kalibrasyonunda kullanılan parametreler 154
Çizelge 5.11 Model doğrulanmasında kullanılan parametreler 161
Çizelge 5.12 Sayısal modelden elde edilen parametreler 165

Çizelge 5.13 ECMWF'den elde edilen rüzgar alanı verilerine göre Karaburun bölgesi için rüzgar yönlerine karşılık rüzgar esme yüzdeleri 166
Çizelge 5.14 Karaburun bölgesi için rüzgar hızlarına karşılık rüzgar esme yüzdeleri 167
Çizelge 5.15 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerine göre Karaburun bölgesi için dalga yönlerine karşılık dalga oluşma yüzdeleri 168
Çizelge 5.16 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerine göre Karaburun bölgesi için dalga yüksekliklerine karşılık oluşma yüzdeleri 168
Çizelge 5.17 Sayısal modelden elde edilen genel dalga karakteristikleri (Dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlar (N 41.35° E 28.68°) için) 169
Çizelge 5.18 Sayısal modelden elde edilen genel dalga karakteristikleri (Derin deniz koordinatları (N 41.7° E 28.7°) için) 169
Çizelge 5.19 Rüzgar ve dalga verilerinin ölçüm saatlerine göre karşılaştırılması 205
Çizelge 5.20 Dalga yüksekliği belirlenmesinde kullanılan regresyon alternatifleri 207
Çizelge 5.21 Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları 209
Çizelge 5.22 Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları 211
Çizelge 5.23 Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları 215
Çizelge 5.24 Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları 216
Çizelge 5.25 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak olasılık dağılımı(3 yılda oluşma sayıları)(Derin denizde) 219
Çizelge 5.26 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Derin denizde) 219
Çizelge 5.27 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının birleşik dağılımı (3 yılda) (Derin denizde) 220
Çizelge 5.28 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde) 221
Çizelge 5.29 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde) 221
Çizelge 5.30 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının birleşik dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde) 222
Çizelge 5.31 Ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı 223
Çizelge 5.32 Veri kaynaklarına göre dalga yüksekliği ve periyodu bağıntısına ait katsayılar 224
Çizelge 5.33 Dalga yönü hesaplamasında elde edilen regresyon denklemleri 227
Çizelge 5.34 Ortalama rüzgar yönlerinin ve ortalama dalga yönlerinin birleşik dağılımı 230
Çizelge 5.35 İstatistiksel dalga modeli sonucunda elde edilen ölçüm derinliğindeki dalga parametreleri denklemleri 236
Çizelge 5.36 Derin deniz dalga parametreleri denklemleri 239
Çizelge 5.37 Belirgin dalga yükseklikleri için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri 241
Çizelge 5.38 Ortalama dalga periyotları için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri 241
Çizelge 5.39 Ortalama dalga yönleri için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri 241
Çizelge 6.1 Poligon noktalarına göre kıyıya dik ölçüm mesafeleri 247
Çizelge 6.2 Ölçüm başlangıç tarihine göre diğer dönemlerdeki göreceli kıyı çizgisi değişim miktarı 247
Çizelge 6.3 Uzun dönem derin deniz belirgin dalga yüksekliği olasılık denklemleri 250
Çizelge 6.4 CERC (1984) yöntemi ile yönlere göre katı madde taşınım miktarları 252

Çizelge 6.5 Derin deniz belirgin dalga yüksekliği ortalama değerleri 253
Çizelge 6.6 Kamphuis (1991) yöntemi için yıllık dalga iklimi 254
Çizelge 6.7 Yönlere göre kıyı boyu taşınım miktarları 255
Çizelge 6.8 Karaburun kıyı çizgisi özellikleri(Eylül,2004 yılı GPS ölçümünden elde edilen)257
Çizelge 6.9 Kıyı profili parametreleri..... 259
Çizelge 6.10 LITDRIFT yazılımından farklı dalga parametrelerine göre elde edilen katı madde taşınım debileri 263
Çizelge 6.11 Tüm yöntemlerden elde edilen katı madde taşınım debilerinin karşılaştırılması266
Çizelge 7.1 Kamphuis (2008) ölçüm verileri 281
Çizelge 7.2 Yapay sinir ağları ve Kamphuis (1991) yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan boyutsuz parametreler 283
Çizelge 7.3 Kıyı boyu katı madde taşınımının YSA modelinde kullanılan ağ mimarileri ve aktivasyon fonksiyonları 284
Çizelge 7.4 Kıyı boyu katı madde taşınım modellemesinden elde edilen korelasyon katsayıları ve tahminin standart hatası değerleri 289
Çizelge 7.5 Yapay Sinir Ağları yöntemi için yıllık dalga iklimi..... 294
Çizelge 7.6 Yapay sinir ağları ile modellenen Karaburun saha çalışmasına ait katı madde taşınım debisinin diğer modellerle karşılaştırılması 297

ÖNSÖZ

Lisans, lisansüstü eğitimim ve tez çalışmam süresince her türlü tecrübesini, bilgisini ve desteğini esirgemeyen, öneri ve bilgisine her zaman ihtiyaç duyacağım sayın hocam Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e vermiş olduğu emek ve ayırmış olduğu zaman için tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Lisans üstü eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgilerini ve tecrübesini benimle paylaşan ikinci danışman hocam Prof. Dr. Esin ÇEVİK'e verdiği destek ve ayırdığı zaman için çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitesi sayın üyeleri Prof. Dr. M. Emin KARAHAN ve Prof. Dr. M. Sedat KABDAŞLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Saha çalışmalarını İÇTAG I845 (103I008) nolu proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları Genel Müdürlüğü ve Araştırma Dairesi Başkanlığı ile çalışanlarına saha çalışmalarında vermiş oldukları destekten dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modelinin geliştirilmesi aşamasında vermiş olduğu destekten dolayı Prof. Dr. J. William KAMPHUIS'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamla ilgili önerilerde bulunan ve bilgilerini paylaşan Prof. Dr. Yoshima GODA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübelerini paylaşan Dr. Işıkhan GÜLER ve Prof. Dr. Ahmet Cevdet YALÇINER'e çok teşekkür ederim.

Araştırma görevlisi olarak yedi yıldır sürdürdüğüm görevim sırasında destekleriyle yanımda olan Hidrolik Anabilim Dalı Öğretim Üye ve Yardımcılarına çok teşekkür ederim.

Kıyı çizgisi ölçümleri ve uydu görüntülerinin sayısallaştırılması sırasında yardımcı olan Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü Öğretim Üye ve Yardımcıları Doç. Dr. Bülent BAYRAM, Yrd. Doç. Dr. Uğur DOĞAN, Araş. Gör. Dr. N. Onur AYKUT, Araş. Gör. Dr. Ercenk ATA ve Araş. Gör. Uğur ACAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında vermiş olduğu destek ve yardımlarından dolayı Jeodezi ve Fotogrametri Müh. H. Özgür GÜNER'e çok teşekkür ederim.

Arada kilometreler olsa da koşulsuz sevgi ve desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili ailem; hayatım boyunca her konuda beni desteklediğiniz ve her an maddi manevi yanımda olduğunuz için size minnettarım. Bana verdiğiniz emek ve sevgi için size ne kadar teşekkür etsem azdır...

Ağustos 2009

İnşaat Yük. Müh. H. Anıl ARI

.

ÖZET

Kıyı alanlarında kıyı çizgisi değişimi ve kıyı morfolojisi gelişiminin doğru olarak belirlenmesi "Bütünleşik Kıyı Alanı Yönetimi" için oldukça önemli bir konudur. Kıyı morfolojisi gelişiminin belirlenmesinde en önemli çevresel etkenler olan rüzgar, dalga gibi birçok kıyı parametresinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu parametreler, çoğu zaman doğanın karmaşık davranışından dolayı tam ve doğru olarak tespit edilememektedir. Özellikle uzun dönemli dalga verileri her zaman mevcut olmamakta, dolayısıyla kıyı gelişimini izlemede kullanılacak kıyı boyu katı madde taşınım miktarları doğru tespit edilememektedir. Bu sebeple çalışmada katı madde taşınımını yeterince doğru tahmin edecek bir istatistiksel dalga modeli ve tüm dalga koşullarında uygulanabilcek yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli kurulması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Güneybatı Karadeniz'de bulunan Karaburun kıyı alanı, saha çalışması için örnek bölge olarak seçilmiştir. Saha verilerinin belirlenmesi için bu bölgede rüzgar, dalga, kıyı çizgisi, batimetri, su seviyesi değişimi ve akıntı ölçümleri gerçekleştirilmiş, katı madde özelliklerinin belirlenmesi için bölgeden çeşitli katı madde örnekleri alınarak elek analizi deneyleri yapılmıştır.

Hiç bir spektrum modelinin dünyanın her yerinde ve tüm fırtına koşulları için kullanılamayacağı bilinen bir gerçektir. En doğru dalga ikliminin belirlenmesi o bölgede uzun dönemli dalga ölçümü ile gerçekleşebilmektedir. Ancak dalga ölçümü masraflı ve zaman alan bir işlem olduğundan dalga parametrelerinin zaman serisini genişletecek yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple belirlenen bir bölge için o bölgenin fırtına koşullarına bağlı bir dalga modeli geliştirmek gerçekçi dalga tahminini sağlamaktadır. Çalışmada bu amaçla istatistiksel bir dalga modeli kurulmuştur. Dalga modelinin geliştirilmesi için rüzgar verileri, dalga ölçüm verileri, sayısal ve parametrik yöntemlerden faydalanılmıştır. Bu modelin sonuçları öncelikle dalga ölçüm verileri ile karşılaştırılmış, sonuçların dalga ölçüm verileriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Daha sonra bu modelden elde edilen dalga parametreleri kıyı çizgisi değişimini belirleyen sayısal modelde test edilmiştir. Kıyı çizgisi sayısal modelinin sonuçları ise GPS ölçümleri ve sayısallaştırılmış uydu görüntüleri ile doğrulanmıştır. Kıyı çizgisinin belirlenmesinde istatistiksel dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri kullanılmış ve bu modelin çalışmada kullanılan diğer dalga modellerine kıyasla doğada gözlenen kıyı çizgisi değişimini en iyi tahmin eden dalga modeli olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci adımında ise yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli geliştirilmiştir. Bu modelin sonuçları gerek laboratuar gerekse arazi ölçüm verileri ile karşılaştırıldığında daha küçük RMS (tahminin standart hatası) değerine ve daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Modelin kurulmasında Kamphuis (2008) tarafından verilen ölçüm verilerinden faydalanılmıştır. Ayrıca Kamphuis (1991) yöntemi, CERC (1984) yöntemi, LITDRIFT sayısal modeli ve kıyı çizgisi değişimini belirleyen LITLINE sayısal modellerinden elde edilen sonuçlar geliştirilen modelin kalibrasyonunda kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İstatistiksel dalga modeli, kıyı boyu katı madde taşınımı, kıyı çizgisi değişimi, LITLINE, LITDRIFT, MIKE 21 SW, yapay sinir ağları.

ABSTRACT

Determination of the shoreline change and coastal morphology accurately in coastal zones is a very important issue for the "Integrated Coastal Zone Management". For the assessment of the coastal morphology and shoreline change, the most important environmental parameters as wind, wave, etc. should be well known. However, these parameters can not be detected accurately and properly due to the complicated behaviour of the nature. Especially long-term accurate wave data is not available always, hence the longshore sediment transport rates used for the monitoring of the shoreline evolution can not be determined accurately. In this work, it is aimed to develop a statistical wave model predicting the longshore sediment transport correctly enough and a longshore sediment transport model applicable for all wave conditions. For this purpose, Karaburun coastal zone located at the Southwest coast of the Blacksea was choosen as the study field. For the determination of the field data; wind, wave, shoreline, bathymetry, water level change and current measurements were carried out. For the sediment properties in the region, sieve analysis was performed.

It is well known truth that none of the spectrum models can be used for all storm conditions and is applicable for all regions of the world. The most accurate wave data can be obtained by means of wave measurements. Since the measurement of wave data is expensive and time-consuming, it is necessary to develop approaches to extend time series of wave parameters from the measured wave data. Therefore, the development of a wave model representing the storm conditions of the respective research area should give the realistic wave prediction. For this reason, a statistical wave model representing the local conditions was developed in this study. For the development of the wave model applicable for the study field, wind data, wave measurement data, numerical and parametric wave models were used. The results of this model were compared with the wave measurement data firstly and found very compatible. Secondly the wave parameters obtained from this model were verified in the numerical model determining the shoreline change. Also the results of the shoreline change model were verified with the GPS measurements and digitized satellite images. The parameters obtained from the statistical wave model were used in determination of shoreline change and the model was found to be the best model simulating the change of shoreline in study field compared with the other wave models used in this study.

In the second step of the study, a new longshore sediment transport model was developed by means of artificial neural network. When the results of this model were compared with both field and laboratory measurement data, it was found that the model gave the minimum RMS value and the highest correlation coefficient. The measurement data obtained from Kamphuis (2008) was used during the development of the model. Also Kamphuis (1991) method, CERC (1984) method, numerical sediment transport model (LITDRIFT) and numerical shoreline change model (LITLINE) were used for the calibration of the new longshore sediment transport model introduced in this work.

Key Words: Statistical wave model, longshore sediment transport, shoreline change, LITLINE, LITDRIFT, MIKE 21 SW, artificial neural network

1. GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Yakın kıyı alanları oldukça karmaşık ve dinamik olan bölgelerdir. Deniz tabanındaki dalga ve akıntıların etkisi çoğu zaman kuvvetlidir ve bu sebeple taban malzemesi genelde hareket halindedir. Dalga koşulları değiştiği zaman dalga sebepli kıyı boyu ve kıyıya dik akıntılar da değişmektedir. Aynı zamanda yüksek dinamiklikteki lineer olmayan etkileşimlerle katı madde taşınımı ve kıyı morfolojisinde de değişimler görülmektedir. Genellikle doğal kıyı alanlarındaki kıyı çizgileri stabildir ve kıyı profilleri mevsimsel olarak değişmektedir. Ancak doğaya yapılan müdahalelerle veya kıyı yapıları etkisinde bu alanlarda çok hızlı değişimler gözlenebilmektedir. Sonuç olarak, dalga ve akıntı gibi parametrelerin etkisindeki kıyı dinamiği ve kıyısal işlemler kıyı mühendisleri, deniz jeologları, oşinograflar ve matematikçilerin ilgisini büyük ölçüde çekmektedir. Araştırmacılar bu nedenle dalga kıyı etkileşimini iyi benzeştirecek modeller geliştirmeye çalışmaktadırlar.

Doğal koşullar altında veya yapıların etkisindeki kıyı gelişimini incelemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Temelde bu yöntemler iki başlık altında toplanabilmektedir. Bunlar; fiziksel ve matematiksel modellerdir. Fiziksel modellerde, fiziksel davranışı doğru temsil etmek gibi büyük bir avantajın yanında ölçek problemleri ve kurulum ile modelde değişiklik yapmanın oldukça pahalı ve zahmetli olması gibi dezavantajlar da bulunmaktadır. Buna karşılık matematiksel modeller son zamanlarda oldukça popüler olmuştur. Bu modeller, zaman ve konum ölçeğinin oldukça büyük ve kıyı çizgisi ile kıyı profillerinin değişimi gibi etkilerin incelenmesinin oldukça zor olduğu kıyı gelişimi problemlerinde büyük avantaj sağlamaktadırlar. Sayısal modeller, sadece kıyısal işlemlerde sürekli gelişen bilgi dağarcığının artmasından dolayı değil aynı zamanda kıyı morfoloji problemleri için bilgisayar teknolojisinin oldukça gelişmesinden dolayı da son yıllarda tercih edilmektedirler (de Vriend, 1998; Komar,1998).

Doğal koşullar altında veya farklı deniz yapılarının etkisindeki kıyı çizgisi gelişiminde kıyı boyu katı madde taşınımı önemli bir yer almaktadır ve kıyı mühendisliği açısından da oldukça önemli olduğu için üstünde çok çalışma yapılmış ayrıca farklı şekillerde tanımlanmaya çalışılmıştır (örneğin Komar ve Inman,1970; Bijker, 1971; Sleath, 1984; CERC, 1984; Bird, 1985; Rijn, 1988; Nielsen, 1992; Silvester ve Hsu, 1993; Kamphuis,1991; Fredsøe ve Deigaard, 1992).

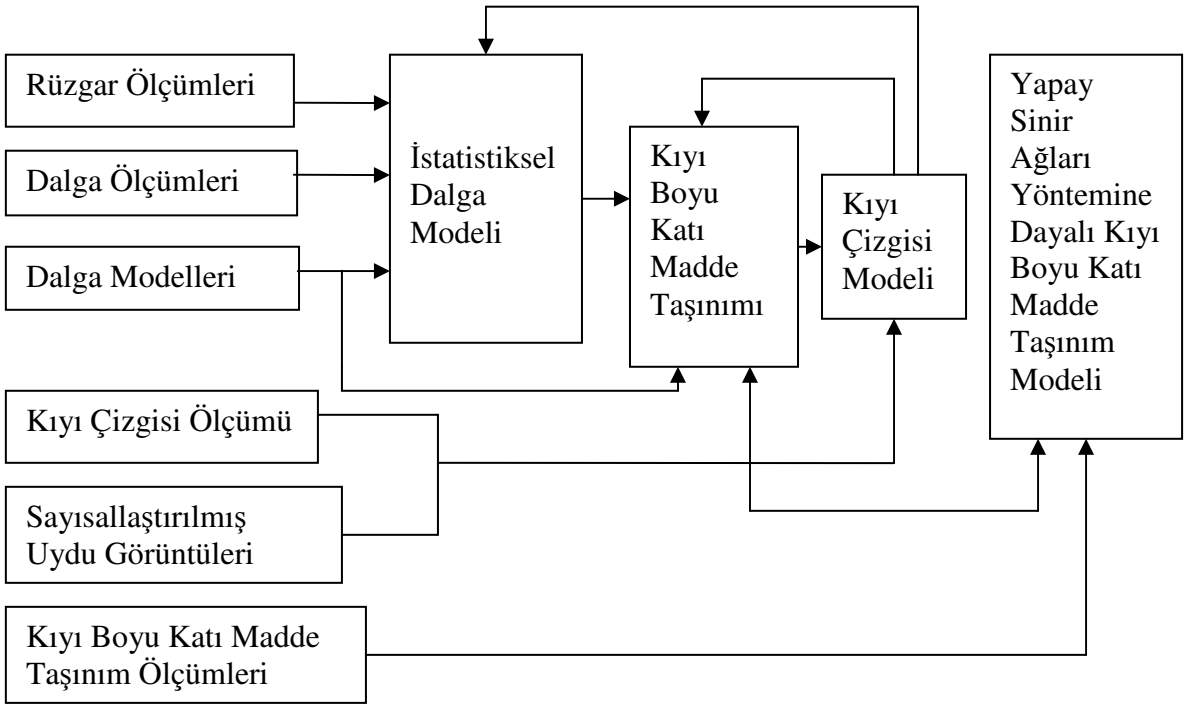
Kıyı mühendisliğinin diğer en önemli konularından biri de deniz dalgalarının kıyı alanına olan hidrodinamik etkisidir. Kıyı yapılarının tasarımı, planlanması ve bunların yanında kıyı çizgisi gelişiminin belirlenmesinde dikkate alınması gereken temel etmenler dalga parametreleridir. Mühendislik uygulamalarında ise belirli bir bölge için dalga iklimini tahmin etmede uzun dönemli dalga verilerine ihtiyaç duyulmaktadır fakat dalga ölçümü masraflı ve zaman alan bir işlem olduğundan dalga parametrelerinin zaman serisini genişletecek yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ise daha uzun dönemde elde edilebilen rüzgar verilerini parametrik veya istatistiksel yöntemlerde kullanarak veya yeni nesil dalga tahmin modelleri kullanarak gerçekleştirilebilmektedir.

Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm çalışma alanındaki dalga verilerinin farklı yöntemlerle modellenmesidir. Bunun için çalışmada parametrik yöntemler, üçüncü nesil dalga tahmin modeli ve bu çalışmada geliştirilen istatistiksel dalga modeli kullanılmıştır. İkinci bölüm ise kıyı boyu katı madde taşınım modelinin geliştirilmesi ve kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesidir. Bu amaçla Kamphuis (1991) yöntemi, CERC (1984) yöntemi, LITDRIFT ve LITLINE sayısal modelleri ve bu çalışmada geliştirilen model için yapay sinir ağları (YSA) tekniğinden faydalanılmıştır. Araştırmada Güneybatı Karadeniz'de bulunan Karaburun kıyı alanı, saha çalışması için örnek bölge olarak seçilmiştir. Saha verilerinin belirlenmesi amacıyla bu bölgede rüzgar, dalga, kıyı çizgisi, batimetri, su seviyesi değişimi ve akıntı ölçümleri gerçekleştirilmiş, katı madde özelliklerinin belirlenmesi için bölgeden çeşitli katı madde örnekleri alınarak elek analizi deneyleri yapılmıştır.

1.2 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Kıyı morfolojisi gelişiminde etkili olan rüzgar, dalga gibi birçok kıyı parametresinin bilinmesi gerekmekte ancak bu parametreler, çoğu zaman olayın karmaşık fiziğinden dolayı tam ve doğru olarak belirlenememektedir. Özellikle uzun dönemli doğru dalga verileri her zaman mevcut olmamakta, dolayısıyla kıyı gelişimini izlemede kullanılacak kıyı boyu katı madde taşınım miktarları doğru tespit edilememektedir. Bu çalışmada ilk olarak doğru katı madde taşınımını tahmin edecek bir istatistiksel dalga modeli kurulması amaçlanmıştır. Bugüne kadar geliştirilmiş olan hiç bir spektrum modeli dünyanın her yerinde ve tüm fırtına koşullarında kullanılamamaktadır. Bu sebeple bir bölgede dalga ikliminin en doğru şekilde belirlenmesi ancak uzun süreli dalga ölçümleri veya o bölgenin fırtına koşullarına bağlı olarak geliştirilmiş bir dalga modeli ile sağlanmaktadır. İkinci olarak ise her türlü bölge koşulunda uygulanabilecek yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar kapsamında dalga modelinin geliştirilmesi için dalga ölçüm verileri, sayısal ve

parametrik yöntemlerden, kıyı boyu katı madde taşınım modelinin geliştirilmesi içinse yine deterministik ve sayısal yöntemlerden faydalanılmıştır. Şekil 1.1'de yapılan çalışmanın akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 1.1 Çalışmanın akış diyagramı

Bu amaçlarla hazırlanan tezin kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır:

Bölüm 1'de doğal koşullar altında veya farklı deniz yapılarının etkisindeki kıyı çizgisi gelişiminde kıyı boyu katı madde taşınımının ve bu taşınımın belirlenmesinde kullanılacak deniz dalgalarının doğru belirlenmesinin önemi anlatılmış, bu çalışmanın amacı ve izlenilecek araştırma yöntemleri açıklanmıştır.

Bölüm 2'de dalga analizi kısaca anlatılmış ve enerji taşınımı denklemine dayanan dalga tahmin modelleri ile parametrik dalga tahmin modellerinden bahsedilmiştir. Çalışmada kullanılan MIKE 21 SW sayısal modelinin bilimsel altyapısı anlatılmıştır. Ayrıca bu konuda literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bölüm 3'te kıyı çizgisi modelleri, kıyı boyu ve kıyıya dik katı madde taşınımı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Çalışmada kıyı boyu katı madde taşımı ve kıyı çizgisi değişminin belirlenmesinde kullanılan LITPACK sayısal modeli ile ilgili kısa bir bilimsel altyapı sunulmuştur. Ayrıca konu ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bölüm 4'te saha çalışmaları anlatılmıştır. Sırasıyla dalga, rüzgar, batimetri, kıyı çizgisi, su seviyesi değişimi ve akıntı ölçümlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan uydu görüntüleri ile katı madde özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler anlatılmıştır.

Bölüm 5'te rüzgar ve dalga iklimi analizi anlatılmıştır. Bölgede yerel olarak gerçekleştirilen rüzgar ve dalga ölçümlerinin değerlendirmesi verilmiştir. Parametrik dalga tahmin yöntemlerinden ve sayısal dalga modelinden elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada geliştirilen istatistiksel modelin altyapısı verilmiş ve bu modelden elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerle karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Bölüm 6'da mevcut kıyı boyu katı madde taşınım modellerinden (CERC, 1984; Kamphuis, 1991) yöntemleri ve LITDRIFT sayısal modeli) elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar öncelikle kendi içlerinde ve daha sonra birbirleriyle karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca çalışma bölgesindeki kıyı çizgisi değişiminin modellenmesi anlatılmıştır.

Bölüm 7'de yapay sinir ağları (YSA) tekniği ile bu çalışmada geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modeli anlatılmıştır. Bu modelin sonuçları ilk olarak kendi içinde daha sonra mevcut diğer modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bölüm 8'de yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında yapılan öneriler sunulmuştur.

2. DALGA ANALİZİ ve TAHMİN YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

Dalga yüksekliklerinin yeterince uzun süreli ölçülmüş değerleri her zaman mevcut değildir. Belirgin dalga yüksekliği ve periyodu meteorolojide mevcut rüzgar verileri ya da varsa dalga ölçüm değerlerinin istatiksel olarak değerlendirilmesiyle belirlenmektedir. Gerek rüzgar verilerinin gerekse ölçülmüş dalga kayıtlarının değerlendirilerek kıyı yapılarının projelendirilmesi veya kıyı gelişiminin belirlenmesi için tasarım dalgalarının bulunması gerekmektedir. Bilindiği gibi gerçekte oldukça düzensiz olan dalga kayıtlarından veya rüzgar verilerinden bunların belirlenmesi sadece istatiksel yöntemlerin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir (Yüksel vd., 1998).

Dalga iklimi; farklı doğrultulardan değişik yükseklik ve periyotlu dalgaların meydana gelme frekanslarının belirlenmesidir. Bu bilgi ise kıyı stabilitesi, erozyonu ve kumlanması ile limanların kumlanması açısından önemlidir.

Dalga şartlarının elde edilebilmesi için iki yöntem vardır:

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

Dalga kayıtlarının analizi içinse yine iki yöntem bulunmaktadır (Gourlay ve Apelt, 1985):

- Her bir dalga kaydının karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametreleri ile tanımlanmaya çalışılması (kısa dönem dalga istatistiği)
- Belirli bir dönem boyunca karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametrelerinin meydana gelme frekansının belirlenmesidir (uzun dönem dalga istatistiği).

2.2 Dalga Tahmin Modelleri

Son otuz yıldır rüzgar kaynaklı sayısal dalga tahmin modelleri açık deniz teknolojileri, gemileri rotalandırma ve özellikle dalga iklimi belirlemede sıkça kullanılmaya başlanmış ve güvenilirlikleri kanıtlanmıştır. Gelci vd. (1957) tarafından geliştirilen modelin öncülüğünde dalga gelişimi, yayılımı ve enerji kaybıyla değişimini tarifleyen birçok dalga modeli

geliştirilmiştir (Massel, 1996). Tüm bu sayısal modellerin temelinde (2.1) eşitliği ile belirtilen yayılım transfer denklemi yani dalga hareketi korunum denklemi yer almaktadır.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla\left(\vec{\mathrm{v}} N\right) = \frac{S}{\sigma} \tag{2.1}$$

burada; σ göreceli (gözlenen) açısal frekans, $N(\vec{x},\sigma,\theta,t)$ hareket yoğunluğu, t zaman, $\vec{x} = (x, y)$ kartezyen koordinatlar, $\vec{\mathrm{v}} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ dört boyutlu faz alanında bir dalga grubunun yayılma hızı, θ dalga yönü ve S enerji denge denklemindeki kaynak terimidir. ∇ ise dört boyutlu diferansiyel operatördür.

Ancak bu yaklaşımın dışında boyut analizine dayanan daha basit yarı ampirik yöntemler de kullanılmaktadır.

2.2.1 Enerji Taşınımı Denklemine Dayanan Dalga Tahmin Modelleri

2.2.1.1 Birinci Nesil Modeller

Enerji transferi denklemine dayanan modeller birinci, ikinci ve üçüncü nesil olarak sınıflandırılmaktadır. 1950'lerin sonunda Gelci vd. (1957) tarafından ilk model geliştirilmiştir. Fakat geliştirilen bu modelde birçok kaynak fonksiyonuyla ilgili belirsizlikler mevcuttur. Ancak, Phillips (1957) ile Miles'ın (1957) sunduğu dalga gelişim ve Hasselmann (1962) tarafından öne sürülen dalga-dalga etkileşiminden dolayı lineer olmayan enerji transferi teorileriyle dalga gelişim modellemesinin iskeleti oluşturulmaya başlanmıştır (Massel, 1996).

1960 ve 1970'lerde birçok yeni model geliştirilmiştir (Pierson vd., 1966; Barnett, 1968; Gelci ve Devillaz, 1970; Ewing, 1971; Gelci ve Chavy, 1978). Bu modellerde kaynak terimi olarak rüzgar girdisi ve enerji kaybı dikkate alınmıştır fakat lineer olmayan etkileşim terimi ihmal edilmiş veya basitçe parametreleştirilmiştir. Bu, birinci nesil dalga modelleri her bir spektrum bileşeninin birbirinden bağımsız geliştiğini göstermektedir. Lineer etkileşimin basitçe dikkate alındığı hallerde ise toplam enerji dengesinde göreceli olarak küçük değişiklik göstermektedir.

Birinci nesil dalga modelleri uzun seneler boyunca uygulanmış ve hala işlevselliğini kaybetmemiştir. Caveleri ve Rizzoli (1981) tarafından geliştirilen VENICE modeli ise tipik bir birinci nesil dalga tahmin modeline örnektir. Bu model ışın tekniğine dayanmakta ve aynı zamanda sığ su koşullarında da kullanılabilmektedir. Bir koordinat sisteminde ışınlar boyunca grup hızındaki bir hareket için yayılım transfer denklemi aşağıdaki basit formu almaktadır:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{S}{\sigma} \tag{2.2}$$

Bu denklem sadece aynı ışın boyunca geçerli olmaktadır. Temel olarak birleştirilmemiş ve lineer olan bu modelde her enerji bileşeni birbirinden ayrı olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple lineer olmayan etkileşimler dikkate alınmamıştır. Fakat bu etki kısmen birleştirme katsayısında (μ) görülmektedir. Barnett (1968) bu katsayıyı (2.3) eşitliğindeki gibi tanımlamaktadır.

$$\mu = 5\frac{\rho_a}{\rho_w} f\left(\frac{U\cos\Theta}{C} - 0.9\right) \tag{2.3}$$

burada ρ_a havanın özgül kütlesi, ρ_w suyun özgül kütlesi, U deniz seviyesinden 10 m yukarıda ölçülen rüzgar hızı, C dalga yayılma hızı, Θ rüzgar ve dalga vektörleri arasındaki açıdır. 0.9 terimi ise gelişen dalgaların rüzgardan daha hızlı yayıldığını ifade etmektedir.

Enerji kaybı spektrumun sınırlanmasıyla basitçe modellenmiş fakat köpüklenme gibi etkiler açık olarak modele dahil edilmemiştir. Yine bu etki de birleştirme katsayısının (μ) içinde dikkate alınmıştır.

Birinci nesil dalga tahmin modellerinden ikincisi ise Meteoroloji Araştırma Enstitüsü (MRI-Meteorological Research Institute) tarafından Japonya'da (SWAMP Grubu, 1985) geliştirilmiştir. Bu modelde kaynak terim olarak rüzgar girdisinin yanında dalga kırılmasına bağlı enerji kaybı da ele alınmıştır. Dalga tahmin işlemi üç deniz aşamasına uymaktadır. Bu aşamalar; gelişim, değişim ve rüzgarın karşı koymasıdır. VENICE modelinde olduğu gibi bu modelde de dalga bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşim dikkate alınmamıştır.

VENICE ve MRI modellerinin ikinci nesil dalga tahmin modelleriyle yapılan karşılaştırmasında dalga alanlarında biraz farklılık görülmektedir. Birinci nesil modeller ikinci nesillere göre daha geniş spektrum dağılımı vermektedirler. Birinci nesil modellerle elde edilen bazı başarılı tahminlerin yanında bu modellerin açık ve doğru olarak tam enerji dengesini ve dalga gelişimini temsil etmediği hakkında şüpheler ortaya çıkmaktadır (Massel, 1996).

2.2.1.2 İkinci Nesil Modeller

İkinci nesil dalga modelleri üç ayrı yaklaşımla değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımlar; ayrık spektrum modelleri (DS-Discrete Spectral Models), parametrik modeller (P-Parametric Models) ve hibrid modellerdir (H-Hybrid Models) (Massel, 1996).

Ayrık Spektrum Modelleri

Bu modeller, Gelci vd. (1957) ve Pierson vd. (1966) tarafından geliştirilmesiyle beraber kullanılmaya başlanılmıştır. Bu modelde spektrum yoğunluk fonksiyonu, ($i\Delta x$, $j\Delta y$) ayrık noktalarında ve $t_0+n\Delta t$ zamanlarında ayrı frekans ve yön bantlarının birleştirilmesini temsil etmektedir. Yayılım transfer denklemi veya dalga hareketi korunum denklemi parabolik başlangıç değer problemiyle sayısal olarak çözümlenmektedir. Tipik uygulamalarda 10-12 frekans ve 12-16 yön kullanılmaktadır.

Ayrık spektrum modellerine örnek olarak üç ayrı çalışma verilebilmektedir. Bu modeller; BMO (The UK Meteorological Office Wave Model), SAIL (Atlantic Oceanographic and Meteorological Lab., NOAA Model) ve DNS (Scripps Institution of Oceanography Model)'tir.

Parametrik Modeller

Spektrum içinde lineer olmayan enerji transferinin gelişmekte olan deniz durumunu kontrol etmesi ve spektrum formunu belirlemesi kaynak fonksiyonunun doğru tanımı ile sayısal teknik için oldukça önemlidir. Fakat lineer olmayan enerji transferi kontrol mekanizması olarak görülse de taşınım denkleminde kaynak terimlerinin geri kalan kısmı lineer olmayan terimlere göre daha detaylı yer almaktadır. Bu kanı, Hasselmann vd. (1976) tarafından önerilen parametrik modelin temelini oluşturmaktadır. Bu modelde rüzgar-dalga spektrumunun oluşumu, birkaç karakteristik spektrum parametresinin gelişimini tanımlayan birleştirilmiş taşınım denklemleriyle sunulmaktadır (Hasselmann vd., 1973).

Hibrid Modeller

Bir dalga alanının parametrik tanımlanması sadece lineer olmayan enerji taşınımının baskın olduğu rüzgar dalgaları spektrumlarında uygun olmaktadır. Halbuki bir dalga spektrumu rüzgar dalgaları spektrumunun yanısıra düşük frekanslı soluğan bileşenlerinin eklenmesiyle oluşmaktadır. Soluğan enerji seviyesi genelde düşük olmaktadır ve soluğan bileşenleri arasındaki lineer olmayan birleştirme ihmal edilebilmektedir. Soluğanın gelişimi temelde adveksiyonla kontrol edilmektedir ve ayrık spektrum modelleriyle sunulabilmektedir.

Soluğan bileşenlerini hesaplamak için parametrik rüzgar-dalga modelleri soluğanın standart ayrık spektrum temsiliyle birleştirilmektedir. Böyle birleşik modeller birleştirilmiş hibrid model olarak isimlendirilmektedir. Bu modele örnek olarak Günther vd. (1979 a,b) tarafından derin deniz için geliştirilen hibrid parametrik modeli (HYPA-Hybrid Parametrical)

verilmektedir. Bu model Hasselmann vd. (1976) tarafından geliştirilen parametrik modelin genişletilmiş halidir.

2.2.1.3 Üçüncü Nesil Modeller

Bir çok uygulamada özellikle ekstrem koşulların belirlenmesinde basit dalga tahmin yöntemleri yeterli olmaktadır. 1980'lerin başında yukarıda anlatılan birinci ve ikinci nesil dalga modellerinin dışında üçüncü nesil olarak nitelendirilen yeni dalga modelleri oluşmuştur (Hasselmann vd., 1985). Birinci, ikinci ve üçüncü nesil dalga modelleri arasındaki farklılık çözümde kullanılan yöntemlerden kaynaklanmaktadır. İkinci nesil dalga modelleri dalga tahmini için spektrum şeklinde kısıtlamalar yaparak lineer olmayan dalga girişimi kaynak terimlerinin geniş ölçekte parametreleştirilmesini kullanmaktadır. Üçüncü nesil dalga modelleri ise daha detaylı lineer olmayan dalga girişimi kaynak terimlerinin parametreleştirilmesini kullanmakta ve spektrum şeklindeki kısıtlamaları azaltmaktadır.

Dünyada bir çok üçüncü nesil dalga modeli kullanılmasına karşılık bunların kökeninde WAM dalga modeli (Wamdi, 1988) olduğu belirtilmektedir (CERC, 2003). Diğer üçüncü nesil dalga modellerine örnek olarak Schwab vd. (1984), Clancy vd. (1986), HISWA modeli (Holthuysen vd., 1989), WAVEWATCH modeli (Tolman, 1991), SWAN modeli (Booij vd., 1996) ve Komen vd. (1994) gösterilebilmektedir.

Üçüncü nesil dalga modellerinin kullanılmaya başlamasının bir nedeni de yönsel dalga spektrumunun benzeşiminde detaylı kaynak terimleri dengesinin doğrudan çözümüyle daha doğru sonuçlar elde edilmesidir. İkinci nesil modeller genel kaynak terimlerinin dengesinde yeterli olamamaktadır. Fakat Van Vledder ve Holthuisen (1993) tarafından yapılan son çalışmada WAM modelinin (Wamdi, 1988) hızlı dönen rüzgarlarda detaylı denge denklemlerinin dalgaları doğru benzeştiremediğini belirtmişlerdir. Üçüncü nesil dalga modellerinin tamamen yeterli olduğunu söylemek için bu alanda daha çok çalışmanın yapılması gerekmektedir (CERC, 2003).

Burada üçüncü nesil dalga modellerinden WAM Modeli kısaca, daha detaylı olarak ise dalga ölçümlerinin değerlendirilmesinde kullanılan ve yine üçüncü nesil spektrum dalga modeli olan MIKE 21 SW sayısal modelinin dayandığı bilimsel altyapı anlatılmıştır.

WAM Modeli

WAM modeli, dalga spektrumunun şeklinde herhangi bir varsayım yapmadan dalga taşınım denklemini açık olarak çözen üçüncü nesil dalga modelidir. İki boyutlu dalga spektumunda

herhangi bir açı sınırlaması yapılmadan (tüm dalga yönlerinde) dalga gelişiminin fiziği sunulmaktadır.

Tavsiye edilen topoğrafik veri setiyle herhangi bir yerel veya küresel ağda model koşturulabilmektedir. Ağ çözünürlüğü mesafe ve zamanda seçmeli olmaktadır. Dalgaların yayılımı enlem-boylam ağında veya kartezyen bir ağda yapılabilmektedir. Modelin çıktıları; belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga yönü ve frekansı, soluğan dalga yüksekliği ve ortalama yönü, dalga kaynaklı gerilmelerin içerilmesiyle düzeltilmiş rüzgar gerilme alanları, seçilen çıktı zamanlarında her ağ düğüm noktası için direnç katsayıları ve seçilen ağ noktalarında ve çıktı zamanlarında iki boyutlu dalga spektrumudur. Model sığ su ve derin deniz koşullarında koşturulabilmektedir ve akıntı ile batimetri değişikliğinden kaynaklanan dalga sapmasını içermektedir.

Kaynak terimler ve dalga yayılımı farklı yöntemlerle ve zaman aralıklarında hesaplanmaktadır. Kaynak terim integrasyonu açık integrasyon şemasıyla yapılırken yayılım şeması birinci derece upwind akı şemasıdır.

Model iki boyutlu dalga spektrumunun gelişimini tanımlamaktadır. Birinci ve ikinci nesil dalga modellerinin tersine spektrum şeklinde herhangi bir kabul yapmamaktadır. Taşınım denkleminin integrasyonuyla iki boyutlu varyans spektrumunu hesaplamaktadır (Günther vd., 1992):

$$\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \phi}c_\phi E+\frac{\partial}{\partial \lambda}c_\lambda E+\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta E=S \qquad (2.4)$$

burada;

E= $(\sigma,\theta,\phi,\lambda)$ 'ya bağlı olarak spektrum (enerji) yoğunluğu

σ = göreceli açısal frekans ($\sigma = 2\pi f_r$)

θ= yön

ϕ = enlem

λ= boylamı ifade etmektedir.

($c_\phi, c_\lambda, c_\theta$), büyük dairesel rotada ilerleyen dalga grubunun yayılma yönünde ve pozisyonundaki değişiklik oranları yani dalga yayılım hızlarıdır.

Kaynak fonksiyonu S, rüzgar girdisinin (S_{in}), köpüklenme sebebiyle enerji azalmasının (S_{dis}) ve lineer olmayan transferin (S_{nl}) toplamıyla ifade edilmektedir.

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} \quad (2.5)$$

MIKE 21 SW Modeli

MIKE 21 SW yazılımı yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu rüzgar-dalga modelidir. Açık deniz ve kıyı alanlarında rüzgar kaynaklı dalga ile soluğan dalgasının gelişimini, transformasyonunu (ilerlemesini) ve enerji kaybederek değişmesini benzeştirmektedir.

MIKE 21 SW iki farklı denklem içermektedir. Bunlar:

- Yönsel ayrılmış parametrik formül,
- Tam spektrum formülüdür.

Yönsel ayrılmış parametrik formül dalga hareketi korunum denkleminin parametreleştirilmesine dayanmaktadır. Parametreleştirme frekans alanında yapılmaktadır. Yani dalga spektrumunun sıfırıncı ve birinci momentleri belirlenmektedir. Tam spektrum formülü ise doğrudan dalga hareketi korunum denklemine dayanmaktadır ve burada yönsel dalga yoğunluk spektrumu bağlı değişkendir. Temel korunum denklemleri küçük ölçekli çalışmalar için kartezyen koordinatlarda, büyük ölçekli çalışmalar için de kutupsal küresel koordinatlarda formüle edilmiştirler (DHI, 2003).

MIKE 21 SW aşağıdaki fiziksel olayları içermektedir:

- Rüzgar nedeniyle dalga gelişimi,
- Lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi,
- Köpüklenmeden kaynaklanan dalga enerji kaybı,
- Taban sürtünmesinden dolayı dalga enerji kaybı,
- Derinliğe bağlı dalga kırılmasından kaynaklanan enerji kaybı,
- Derinlik değişiminden dolayı sığlaşma ve sapma,
- Dalga-akıntı etkileşimi,
- Zamanla değişen su seviyesinin etkisi.

Temel denklemlerin coğrafi ve spektrum alanında ayrıklaştırılması merkezi sonlu hacimler yöntemiyle yapılmaktadır. Coğrafi alanda yapılandırılmamış ağ tekniği kullanılmaktadır. Zaman integrasyonu ise dalga yayılımı için çok serili açık yöntemin uygulandığı küçük adım yaklaşımı ile gerçekleştirilmektedir.

Uygulama Alanları

MIKE 21 SW açık denizde ve kıyı alanlarında dalga iklimi tahmininde kullanılmaktadır.

Temel uygulama alanı açık deniz, kıyı ve liman yapılarının tasarımında kullanılan dalga bilgisinin elde edilmesidir. Bu yapılara etki eden dalga yüklerinin doğru tahmin edilmesi güvenilirlik ve ekonomi açısından oldukça önemlidir.

Büyük ölçüde yerel dalga koşulları ve dalgaların oluşturduğu akıntılar tarafından oluşturulan katı madde taşınımının hesaplanması için surf bölgesi içindeki gerilme akılarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Temel Denklemler

Ağırlık dalgalarının dinamiği dalga hareketi yoğunluğunun taşınım denklemiyle tanımlanmaktadır. Küçük ölçekli uygulamalarda temel taşınım denklemi kartezyen koordinatlarda formüle edilirken, büyük ölçekli uygulamalarda kutupsal küresel koordinatlarda formüle edilmektedirler. Dalga yoğunluk spektrumu zaman ile konumda değişmektedir ve iki dalga fazı parametresinin fonksiyonudur. Bu iki dalga fazı parametresi dalga numarası (k) ve yönü (θ) olabilmektedir. Alternatif olarak bu iki parametre dalga yönü (θ) ve göreceli açısal frekans ($\sigma = 2\pi f_r$) veya mutlak açısal frekans ($\omega = 2\pi f_a$) olabilmektedir. Hareket yoğunluğu N (σ, θ) ile enerji yoğunluğu E (σ, θ) arasındaki bağıntı (2.6) eşitliği ile sağlanmaktadır (DHI, 2004).

$$N = \frac{E}{\sigma} \tag{2.6}$$

Yavaşça değişen derinlik ve akıntılarda dalga yayılımı için göreceli açısal frekans ve mutlak açısal frekans arasındaki ilişki dispersiyon denklemi ile verilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} = \omega - \vec{k}\,\vec{U} \tag{2.7}$$

burada g yerçekimi ivmesi, h su derinliği ve $\vec{U}$ akıntı hızı vektörüdür. Grup hızının şiddeti (c_g) akıntıya bağlı olarak (2.8) eşitliği ile verilmektedir.

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)\frac{\sigma}{k} \tag{2.8}$$

Faz hızı (c) ise akıntıya bağlı olarak (2.9) eşitliği ile verilmektedir.

$$c = \frac{\sigma}{k} \tag{2.9}$$

Frekans spektrumu, minimum frekans ($\sigma_{\min}$) ve maksimum frekans (σ_{maks}) arasında bir aralıkta sınırlandırılmaktadır. Frekans spektrumu kesme frekansının altında ve üstündeki değerlere göre bölünmektedir. Kesme frekansından küçük değerlere sahip taraf deterministik prognostik bölge, büyük değerlere sahip taraf ise analitik diagnostik bölge olarak isimlendirilmektedir. Kesme frekansı WAM 4 modelinde kullanıldığı gibi yerel rüzgar hızı ve ortalama freakans değerine bağlı olmaktadır. Spektrumun deterministik bölümü dalga yoğunluğu için taşınım denkleminin sayısal olarak çözülmesiyle elde edilmektedir. Kesme frekansının üzerinde yani prognostik bölgenin limitinin dışında (2.10) eşitliği ile belirtilen parametrik kuyruk uygulanmaktadır.

$$E(\sigma,\theta) = E(\sigma_{maks},\theta)\left(\frac{\sigma}{\sigma_{maks}}\right)^{-m} \tag{2.10}$$

burada; m sabittir ve modelde m=5 olarak alınmaktadır. Maksimum prognostik frekans (2.11) eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{kesme} = \min\left[\sigma_{maks}, maks\left(2.5\overline{\sigma}, 4\sigma_{PM}\right)\right] \tag{2.11}$$

burada σ_{maks} deterministik dalga modelinde kullanılan maksimum ayrık frekans, $\overline{\sigma}$ ortalama göreceli frekans ve $\sigma_{PM} = g/(28u_{10})$ tamamen gelişmiş deniz durumu için Pierson-Moskowitz pik frekansıdır (u_{10}, ortalama deniz seviyesinin 10 m üzerinde ölçülen rüzgar hızı). Diagnostik kuyruk lineer olmayan taşınım hesaplarında ve kaynak terimlerde yer alan integral parametrelerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Minimum frekansın altında spektrum yoğunluğu sıfır olarak kabul edilmektedir.

Dalga Hareketi Korunum Denklemleri

Dalga hareketi korunum denklemi kartezyen ve küresel koordinatlarda formüle edilmiştir. Sayısal modelde kullanılan, yatay kartezyen koordinatlarda dalga hareketi için korunum denklemi (2.1) eşitliği ile verilmiştir. Bu denklemde kullanılan dört karakteristik dalga yayılım hızları aşağıdaki ifadelerle verilmektedir:

$$\left(c_x, c_y\right) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \tag{2.12}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U}\,\nabla_{\vec{x}} d\right] - c_g \vec{k}\,\frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \tag{2.13}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k}\left[\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k}\,\frac{\partial \vec{U}}{\partial m}\right] \tag{2.14}$$

burada; s dalga yönünde (θ) alan koordinatı ve m s'e dik olan koordinattır. $\nabla_{\vec{x}}$, $\vec{x}$ alanında iki boyutlu diferansiyel operatördür.

Küresel koordinatlarda korunan özellik hareket yoğunluğudur $\hat{N}(\vec{x},\sigma,\theta,t)$. Burada; $\vec{x} = (\phi,\lambda)$ küresel koordinatlardır. ϕ enlem, λ boylamdır. Hareket yoğunluğu ($\hat{N}$) normal hareket yoğunluğu (N) ile (2.15) veya (2.16) eşitliği ile ilişkilendirilmektedir.

$$\hat{N}\,d\sigma\,d\theta\,d\phi\,d\lambda = N\,d\sigma\,d\theta\,dx\,dy \tag{2.15}$$

$$\hat{N} = NR^2\cos\phi = \frac{ER^2\cos\phi}{\sigma} \tag{2.16}$$

burada R dünyanın yarıçapıdır. Küresel koordinatlarda dalga hareketi korunum denklemi aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

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

burada; $\hat{S}(\vec{x},\sigma,\theta,t) = SR^2\cos\phi$ toplam kaynak ve kuyu fonksiyonudur. Dört karakteristik dalga yayılım hızları aşağıdaki denklemlerle verilmektedir:

$$c_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g\cos\theta + u_\phi}{R} \tag{2.18}$$

$$c_\lambda = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g\sin\theta + u_\lambda}{R\cos\phi} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned} c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d}\left[\frac{\partial d}{\partial t} - \frac{d}{R}\left(\frac{1}{\cos\phi}\frac{du_\lambda}{\partial\lambda} + \frac{du_\phi}{\partial\phi} - u_\phi\tan\phi\right)\right] \\ -\frac{kc_g}{R}\left[\begin{array}{l}\cos\theta\left(\sin\theta\dfrac{du_\lambda}{d\phi} + \cos\theta\dfrac{du_\phi}{d\phi}\right) + \dfrac{\sin\theta}{\cos\phi}\left(\sin\theta\dfrac{du_\lambda}{\partial\lambda} + \cos\theta\dfrac{du_\phi}{\partial\lambda}\right) \\ -\cos\theta\tan\phi\left(u_\lambda\sin\phi + u_\phi\cos\theta\right)\end{array}\right] \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{c_g \sin\theta \tan\phi}{R} + \frac{1}{Rk}\frac{\partial\sigma}{\partial d}\left(\sin\theta\frac{\partial d}{\partial\phi} - \frac{\cos\theta}{\cos\phi}\frac{\partial d}{\partial\lambda}\right) + \frac{\sin\theta}{R}\left(\sin\theta\frac{\partial u_\lambda}{\partial\phi} + \cos\theta\frac{\partial u_\phi}{\partial\phi}\right) - \frac{\cos\theta}{R\cos\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial u_\lambda}{\partial\lambda} + \cos\theta\frac{\partial u_\phi}{\partial\lambda}\right) \quad (2.21)$$

burada; (u_ϕ, u_λ) coğrafi alandaki derinlik ortalamalı akıntının ($\vec{U}$) bileşenleridir.

Kaynak Fonksiyonları

Enerji kaynak terimi (S) değişken fiziksel olguları tanımlayan birçok kaynak fonksiyonunun birleşimini temsil etmektedir.

$$S=S_{in}+S_{nl}+S_{dis}+S_{bot}+S_{surf} \quad (2.22)$$

burada; S_{in} rüzgarla enerji üretimini, S_{nl} lineer olmayan dalga-dalga etkilişiminden dolayı dalga enerji transferini, S_{dis} köpüklenmeden dolayı enerji kaybını, S_{bot} taban sürtünmesinden dolayı enerji kaybını ve S_{surf} ise dalga kırılmasından kaynaklanan enerji kaybını belirtmektedir.

2.2.2 Ampirik Tahmin Modelleri

2.2.2.1 SPM Yöntemi

Diğer bir dalga tahmin yöntemi de CERC (1984) tarafından verilen yöntemdir. Bu yöntem SMB yönteminin geliştirilmiş halidir. Fakat bu yöntemde unutulmaması gereken önemli nokta diğer (SMB, JONSWAP) yöntemlerdeki gibi rüzgar hızının değil rüzgar gerilme faktörünün kullanılması gerektiğidir.

Dalga tahminlerinde kullanılacak rüzgar hızları meteorolojik rüzgar kayıtlarından ve sinoptik haritalardan elde edilmektedir. Bu hızların denizden 10 m yükseklikte ölçülmüş olmaları gerekmektedir.

Gelişmekte olan ve tam gelişmiş deniz durumu dalga yüksekliği, periyodu ve esme süresi için ifadeler tanımlanmıştır.

2.2.2.2 SMB Yöntemi

Rüzgar alanlarından dalgaların belirlenmesi için SMB adıyla bilinen yöntem Kuzey Denizi'nde yapılan gözlemlere dayanan yarı ampirik bir yöntemdir ve herhangi bir spektrum analizine dayanmamaktadır. Bu yöntem CERC'te (1977) ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

CERC'te (1984) bu yöntem yerini Hasselmann vd. (1973) tarafından geliştirilen ve frekans spektrum analizine dayanan JONSWAP yöntemine bırakmıştır (Kamphius, 2000).

JONSWAP ve SMB yöntemleri parametrik yöntemlerdir çünkü dalga parametrelerini elde etmek için işlemlerin detaylı fiziğini anlatan tanımlar geliştirmek yerine doğrudan rüzgar parametrelerini kullanmaktadır. Bu yöntemler sadece dalga yüksekliği ve periyodunu vermelerine karşılık parametrik dalga spektrum tahmini için genişletilebilmektedirler.

Parametrik dalga tahmini feç mesafesi (F), rüzgar esme süresi (t) ve üreme bölgesindeki suyun derinliğinden (h) dalga yüksekliği ve periyodunu (H ve T) elde etmektedir.

2.3 Dalga Kayıtlarının Analizi

Düzensiz dalga kayıtlarının analizi iki ayrı yolla yapılmaktadır:

- Analog kayıtlar
- Dijital (sayısal) kayıtlar

2.3.1 Analog kayıtlar

Bu tip kayıtlar en yaygın olarak kullanılan klasik tiplerdir. Bu kayıtlarda dalga ölçme probundan gelen sinyaller dalga kaydedicisi tarafından bir kart üzerine çizilerek kaydedilmektedir. Dalga kayıtlarından dalga yüksekliklerinin okunması için önce ortalama su seviyesinin şerit üzerinde belirlenmesi gerekmektedir. Laboratuar deneylerinde dalgasız konumdaki kayıtlar yaklaşık bu seviyeyi göstermektedir. Buna karşılık açık deniz dalga kayıtlarında bu işlem yaklaşık olarak yapılmaktadır. Açık denizde gel-git ve benzeri su seviyesi değişimi varsa bu çizgi yatay olmamakta ve hatta eğrisel olmaktadır (Kapdaşlı, 1992).

Ortalama su seviyesi belirlendikten sonra sıfırı kesme yöntemi uygulanarak dalga yükseklikleri belirlenmektedir. Belirlenen dalga yükseklikleri kullanılarak çeşitli karakteristik dalga yükseklikleri hesaplanabilmektedir.

2.3.2 Dijital (sayısal) kayıtlar

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak dalga kayıtları da dijital olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Dalga kayıtları dijital olarak üç şekilde elde edilmektedir (Kabdaşlı, 1992):

1. Dalga kayıtları doğrudan dijital olarak manyetik teyplere kayıt edilmektedir ve bilgisayarlardan bunlar çözülerek işlem yapılmaktadır.
2. Analog olarak elde edilen kayıtlar analog-dijital dönüştürücü yardımıyla dijital hale getirilmektedir.
3. Analog olarak kaydedilen kayıtlar doğrudan okunarak bunların dijital değerleri bulunmaktadır.

Yukarıda anlatılan üç farklı dijital kayıtta aşağı şıklara doğru hassasiyet azalmaktadır. Bir dijital dalga verisinin bilgisayardaki analizinde kullanılan adımlar ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.1'de verilmiştir.

Şekil 2.1 Dijital kayıtların bilgisayar analizi için akış diyagramı (Kabdaşlı, 1992)

2.4 Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Witte ve Kohlehase (1998), Almanya'da negatif katı madde bütçesine sahip kum plajların korunması için saha verilerini esas alan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Sylt adası kıyı çizgisinin geri çekilmesinin ana nedeni olarak dalgalar ve gel-git akıntıları öngörülmüştür. Bu sebeple araştırmacılar dalga iklimini incelemişlerdir. Dalga -13 m derinliğe bağlanan şamandırayla ölçülürken, rüzgar verisi ise 1987'den beri mevcuttur. Çeşitli sebeplerden dolayı dalga verilerinde eksiklikler bulunmaktadır. Araştırmacılar dalga verilerindeki bu eksiklikleri kapatmak ve kesintisiz bir zaman serisi elde etmek için rüzgar-dalga korelasyonu kurmuşlardır.

Korelasyon;

- gel-gite bağlı su derinliği,
- rüzgar hızı,
- rüzgar yönünden etkilenmektedir.

Elde edilen korelasyon sonucunda dalga yüksekliği aşağıdaki ifade ile belirlenmiştir:

$$H_i(\overline{\Theta}_U, \overline{U}, h) = \left[a(\overline{\Theta}_U) + b(\overline{\Theta}_U) \times \overline{U}^2 \right] \sqrt{1 - \exp\left[-\left(\frac{\xi \times h}{a(\overline{\Theta}_U) + b(\overline{\Theta}_U) \times \overline{U}^2} \right)^2 \right]} \qquad (2.23)$$

burada;

$a(\overline{\Theta}_U) = a_0 + a_1 \sin 2\overline{\Theta}_U + a_2 \cos 2\overline{\Theta}_U$

$b(\overline{\Theta}_U) = b_0 + b_1 (\mp) \sin 2\overline{\Theta}_U + b_2 (\pm) \cos 2\overline{\Theta}_U$

H_i= -13 m'de ölçülen belirgin dalga yüksekliği

$\overline{\Theta}_U$ = son dört saatteki ortalama rüzgar yönü ($^\circ$)

$\overline{U}$ = son dört saatteki ortalama rüzgar hızı (m/s)

h= -13 m'de ölçülen gel-gite bağlı su derinliği (m)

$a(\overline{\Theta}_U)$ = yöne bağlı regresyon katsayısı (m)

$b(\overline{\Theta}_U)$ = yöne bağlı regresyon katsayısı (s^2/m)

ξ = azaltma katsayısı

Dalga yönü ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmiştir:

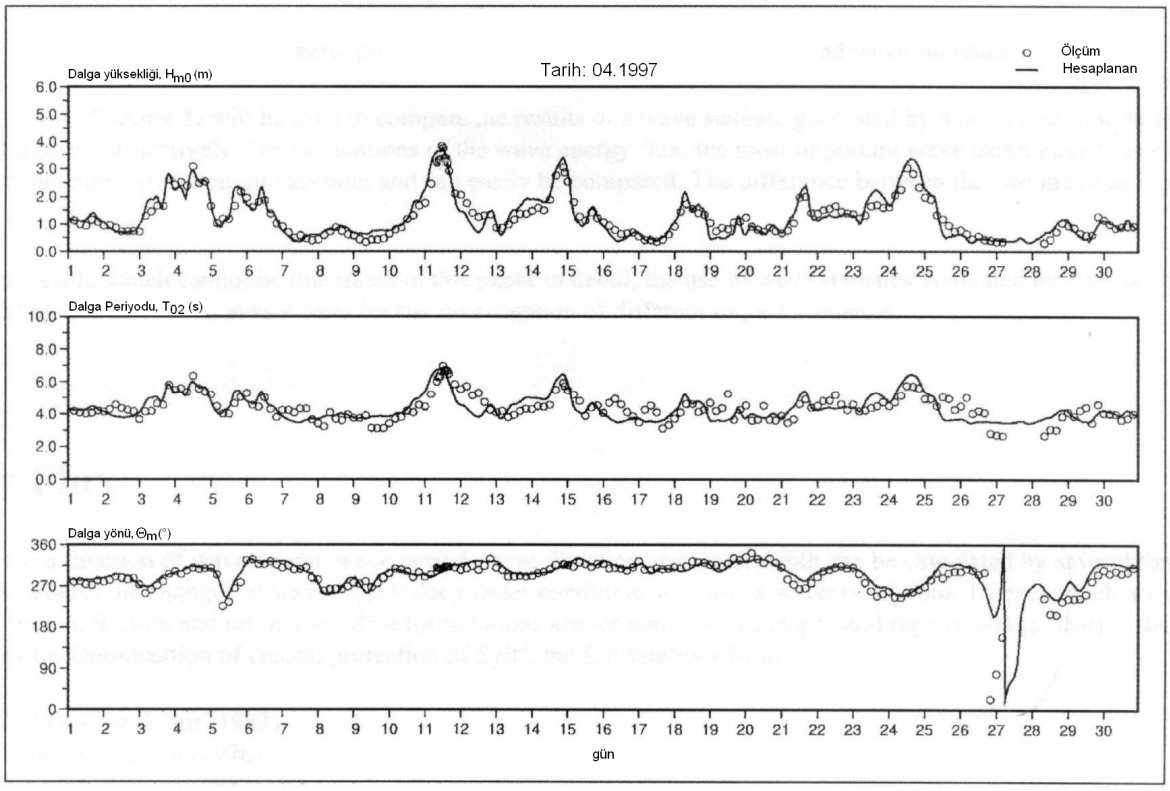
$$\alpha_1 = f(\alpha_0) = a_0 + a_1(\overline{U})\ \alpha_0^1 + a_2(\overline{U})\alpha_0^3 + a_3(\overline{U})\alpha_0^5 \qquad (2.24)$$

α_0 = son altı saatteki ortalama rüzgar yönü (282 ° N) (°)

a_i= rüzgar hızının fonksiyonu olarak regresyon katsayısı

$\overline{U}$ = son altı saatteki ortalama rüzgar hızı (m/s)

Bu korelasyonlarla bilinen rüzgar hızı, rüzgar yönü ve su derinlikleriyle dalga iklimi (dalga yüksekliği, dalga periyodu ile dalga yönü) belirlenebilmektedir. Korelasyonlar Şekil 2.2'de görüldüğü gibi ölçülen ve hesaplanan veriler arasında iyi bir ilişki sağlamıştır.



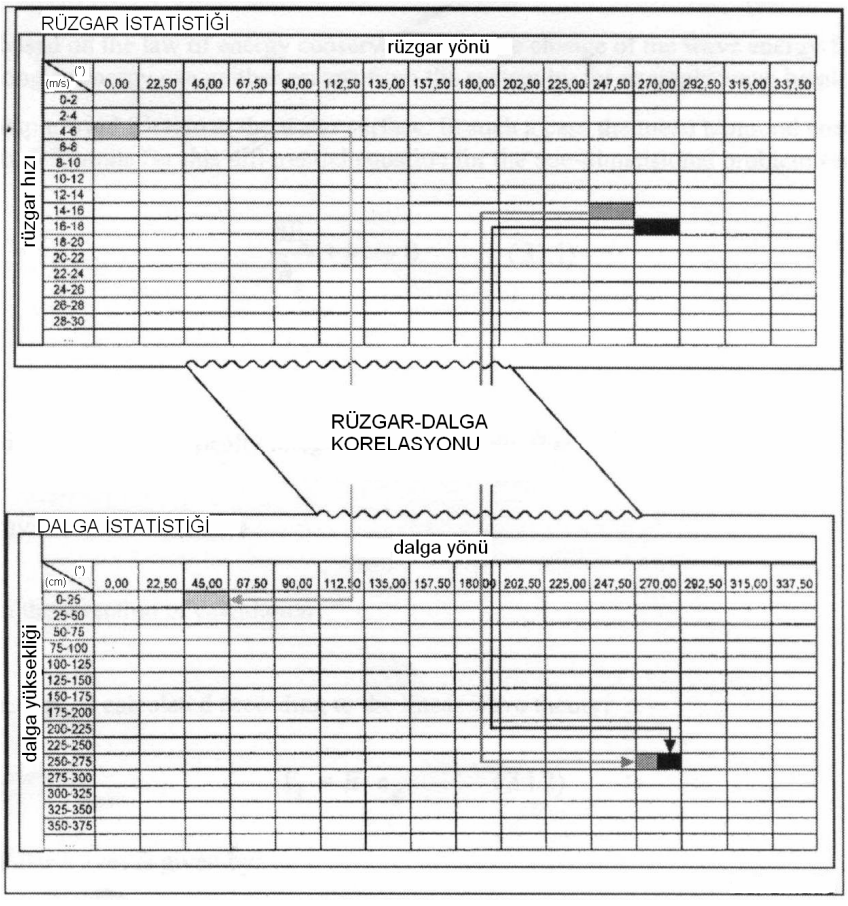
Şekil 2.2 Ölçülen ve korelasyonla hesaplanan dalga parametreleri (Witte ve Kohlehase, 1998)

İklim değişikliğiyle meydana gelen dalga ve su seviyesi değişimi geçmiş veya günümüzdeki olaylardan tahmin edilebilmektedir. Bu sebeple araştırmacılar rüzgar-dalga korelasyonunun zaman serisini istatistiksel korelasyona çevirmişlerdir. Rüzgar-dalga korelasyonunun temeli değiştirilmemiş fakat başka bir bağlamda kurulmuştur. Bu korelasyonda zaman bilgisi bırakılmış yani gel-gite bağlı su seviyesi değişimleri ortalama su seviyesi olarak alınmış fakat rüzgar kabarmasıyla oluşan su seviyesi değişimleri korelasyonun içinde dikkate alınmıştır. İstatistiksel korelasyona örnek Şekil 2.3'te verilmiştir.

Witte ve Kohlehase'nin (1998) çalışmalarında kısaca değinmiş oldukları istatistiksel korelasyon Fröhle ve Fittschen (1998) ve Witte vd.'nin (1999) yaptıkları çalışmada daha detaylı olarak anlatılmıştır.

Fröhle ve Fittschen (1998), Baltık Denizindeki yamaçlarda meydana gelen erozyonu incelemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı arazi incelemeleri ve teorik yaklaşımlar eşliğinde hidrodinamik etki, yamaçların geri çekilmesi ve kıyı gelişimi arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Bu ilişkiyi belirlemek amacıyla araştırmacılar kıyı morfolojisi değişiminde asıl etken faktör olan dalga iklimini analiz etmişler ve elde edilen verileri araştırmaya girdi olarak kullanmışlardır. Dalga ölçümü ve istatistiksel yaklaşımlar kullanarak proje alanını etkileyen uzun dönemli hidrodinamik etmenler tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma alanı olarak Baltık Denizi kıyısında üç ayrı bölge seçilmiştir. Bunlar; Schönhagen, Heiligenhafen ve Brodten bölgeleridir. Bu bölgelerdeki yamaçlar yılda ortalama 2.5 m erozyona uğramaktadırlar ve diğer bölgelerdeki yamaçlara göre erozyona uğrama yüzdeleri daha fazladır.



Şekil 2.3 Rüzgar ve dalga istatistiği arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Witte ve Kohlehase, 1998

Araştırmacılar yönsel dalga ölçümünü tabana zincirle sabitlenen şamandıralarla yapmışlardır. Ölçülen dalga yükseklikleri ile yönleri düşey yönde ve birbirine dik iki yatay yönde ivmelerin ölçümlerinden elde edilmiştir. Dalga ölçerde bir ölçüm her saatte yaklaşık 27 dakika sürmekte ve 256 veri elde edilmektedir. Ölçülen değerler Fourier serisine açılarak yönsel dalga spektrumları elde edilmektedir.

Dalga spektrumuna ait belirgin dalga parametreleri (H_{m0}, T_{02}, T_P ve Θ_m), enerji yoğunluk fonksiyonu ile bir ölçümün dalga yönlerinden ve belirgin dalga parametreleri de ($H_{1/3}$, H_{maks}, T_m ve $T_{H1/3}$) ölçülen zaman serisinden elde edilmektedir. Araştırmacılar uzun dönemli rüzgar ölçümlerini incelemişlerdir. Schönhagen bölgesi için 1981 yılından, Heiligenhafen bölgesi için 1957 yılından itibaren olan rüzgar verileri incelenmiştir. Ayrıca çalışma bölgelerinde su seviyesi değişimlerine de bakılmıştır.

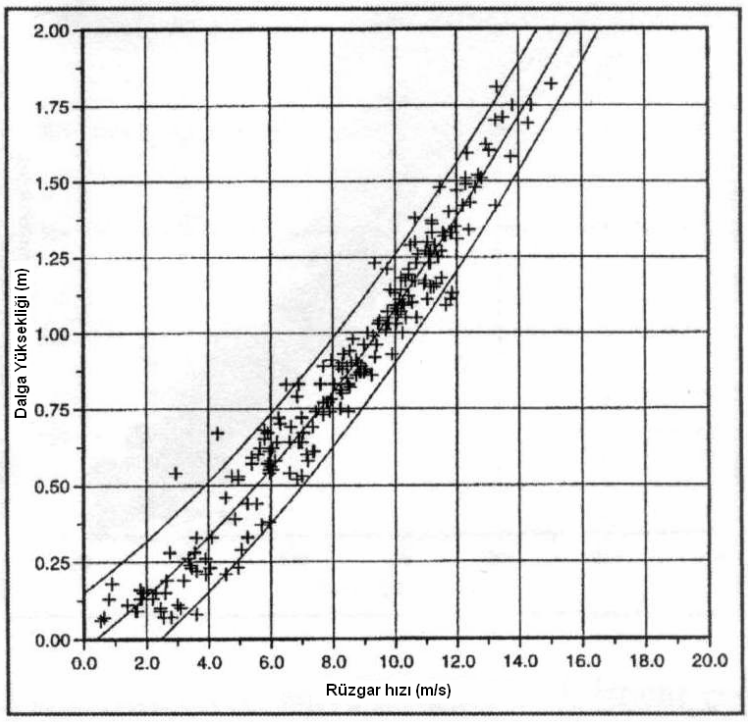
Fröhle ve Fittschen (1998), kısa dönemli dalga ölçümlerinin kıyı morfolojisi gelişimini izlemek açısından yeterli olmadığını belirtmişler fakat bunun yanında dalga ölçümünün de zahmetli ve pahalı bir iş olduğunu vurgulamışlardır. Bu sebeple mevcut rüzgar ölçümlerinden yola çıkarak rüzgar-dalga korelasyonu kurmuşlardır. Rüzgar-dalga korelasyonu ölçülen dalga verilerinin uzun döneme genişletilebilmesini sağlamaktadır.

Rüzgar verilerinden dalga parametrelerini elde etmenin birçok farklı yolu bulunmaktadır. Fakat en uygun yaklaşım elde edilen verilerin kalitesine ve yapılacak çalışmanın amacına göre değişmektedir. Örneğin iki boyutlu sayısal spektrum tahmin modeli için detaylı atmosfer basınç alanları gerekirken, CERC yöntemi olarak bilinen dalga tahmin yönteminde istenen girdi oldukça basittir ve bununla beraber elde edilen çıktı oldukça zayıftır. Sadece belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga yönü elde edilmektedir.

Araştırmacılar rüzgar ölçümlerinden dalga parametrelerini elde edebilmek için istatistiksel yaklaşım kullanmışlardır. Bu yaklaşımda ölçülen dalga verilerinin yanında eş zamanlı ölçülmüş rüzgar verilerinin bulunması gerekmektedir.

İstatistiksel yaklaşım, doğru sonuç vermesinin yanında bazı sınırlamalara sahip olmaktadır. Yerel rüzgar bilgisinden sadece yerel dalga parametreleri elde edilmektedir ve başka bölgelerde kullanılmamalıdır. Araştırmacılar çalışmalarında bu istatistiksel yaklaşımı kullanmışlardır. Yapılan hesaplamalar bir yıllık rüzgar ve dalga ölçümüne dayanmaktadır.

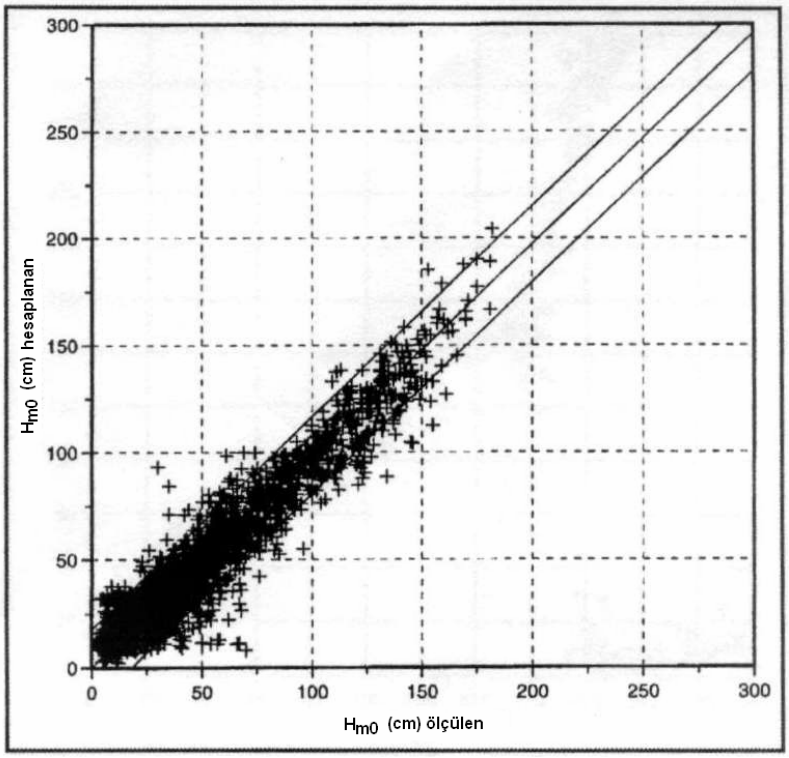
Yapılan hesaplamalarda rüzgar hızı ve dalga yüksekliği arasında bağıntıyı kurabilmek için veriler belirli rüzgar yönü aralığına ayrılmıştır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi dalga yüksekliği ve rüzgar hızı arasındaki korelasyon %90 güven aralığında çizilmiştir.



Şekil 2.4 Korelasyon fonksiyonu ve %90 güven aralığı ile ölçülen dalga yüksekliğine karşılık ölçülen rüzgar hızları (Rüzgar yönü $40^\circ \leq \Theta_{rüzgar} < 60^\circ$, Schönhagen bölgesi) (Fröhle ve Fittschen, 1998)

Araştırmacıların yaptığı detaylı incelemeler rüzgar hızları ve dalga yükseklikleri arasındaki regresyon sonuçlarının geliştirilebileceğini göstermiştir. Sonuçların geliştirilmesiyle istatistiksel yaklaşım, dalga ile rüzgar ölçümleri arasındaki süre farkları, rüzgar parametrelerinin ortalamalarının alındığı süre ve rüzgar yönlerinin sınıflandırma genişliği optimize edilmiştir. Araştırmacılar tarafından, ölçülmüş ve hesaplanmış dalga yükseklikleri arasında en iyi uygunluğun elde edilmesi için güvenilir ölçüt olarak ortalama mutlak sapma öngörülmüştür. Optimizasyon sırasında istatistiksel yaklaşım için birçok fonksiyon denenmiştir (farklı derecelerde üstel ve polinom serileri). Schönhagen bölgesi için ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasında en küçük farkı veren ikinci dereceden polinom fonksiyonunun (en küçük ortalama mutlak sapma) en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Mutlak rüzgar hızı ve yönünün yanında rüzgar esme süresinin de dalgaların gelişiminde önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple araştırmacılar rüzgar hızları ile dalga yükseklikleri arasındaki regresyon hesaplarında rüzgar esme süresi ve periyodun etkisini detaylı olarak analiz etmişlerdir. İncelemeler dalga parametreleri ile eş zamanlı ölçülen gerçek rüzgar parametreleri ve dalga ölçümünden bir, iki, üç ve dört saat önce ölçülmüş rüzgar hızlarının ortalamaları ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar iki saatlik rüzgar parametrelerinin ortalamalarının korelasyonda en uygun sonuç verdiğini göstermiştir. Ayrıca rüzgar yönleri sınıflandırılmış ve en uygun sınıflandırma genişliğinin 30° olduğu görülmüştür.

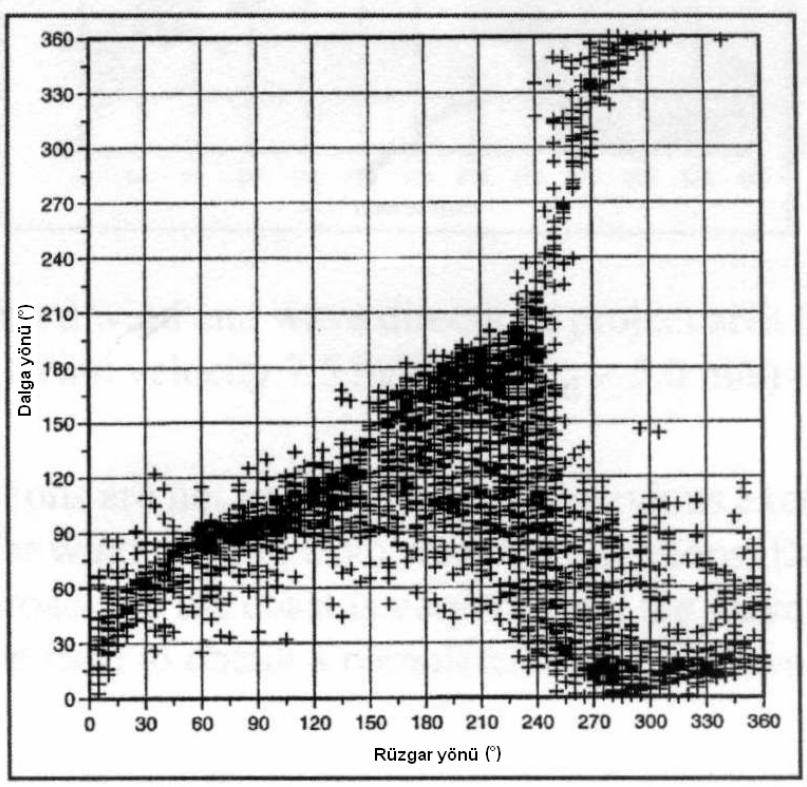
Araştırmacılar yaptıkları incelemeler sonucunda ölçülen ile hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki farkın ortalamada 7 cm'den az ve %90 güven aralığında 15 cm'den az olduğunu görmüşlerdir (Şekil 2.5).



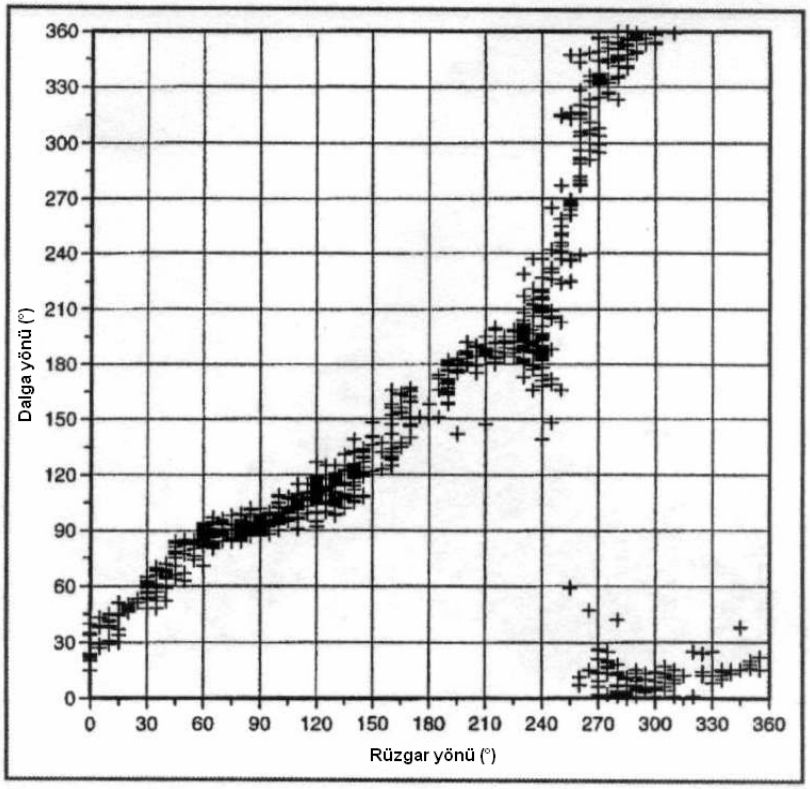
Şekil 2.5 Lineer regresyon fonksiyonu ve %90 güven aralığı ile hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)

Ölçülen rüzgar verisinden ortalama dalga yönü hesaplamaları dalga yüksekliği hesaplamaları ile aynı temele dayanmaktadır. Ancak araştırmacılar dalga yönü hesaplarının dalga yüksekliği hesaplarında olduğu gibi farklı rüzgar verilerinden yeterince etkilenmediğini vurgulamışlardır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi ölçülen rüzgar yönü ve ölçülen dalga yönü arasında doğrudan bir bağıntı bulunmamaktadır. Özellikle karadan denize doğru esen rüzgar için dalga yönü ve rüzgar yönü birbirinden oldukça farklı çıkmaktadır. Fakat araştırmacıların yaptığı detaylı incelemelerde rüzgar yönü ve dalga yönü arasındaki ilişkinin çok da karmaşık olmadığı görülmüştür.

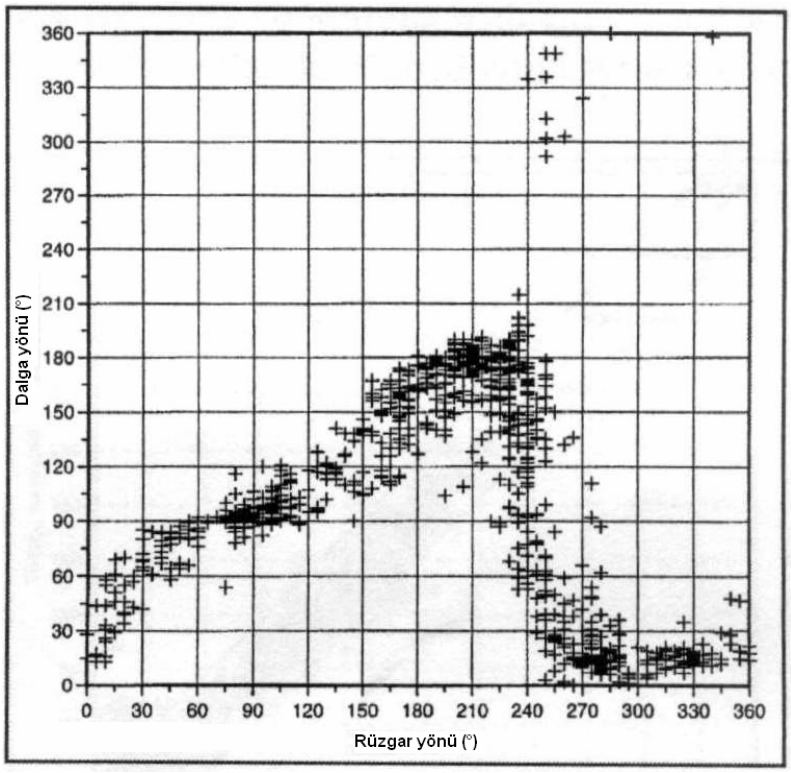
Şiddeti 7.5 m/s'yi geçen rüzgar için rüzgar yönü ve dalga yönü arasında kuvvetli bir ilişki bulunurken, şiddeti 5 m/s ile 7.5 m/s arasında olan rüzgar için daha az kuvvetli ve 5 m/s'den daha küçük hızlar için de zayıf bir ilişki görülmüştür (Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9). Şekil 2.10'da araştırmacıların kurmuş olduğu korelasyon sonucunda ölçülen dalga yönlerine karşılık hesaplanan dalga yönleri arasındaki ilişki görülmektedir.



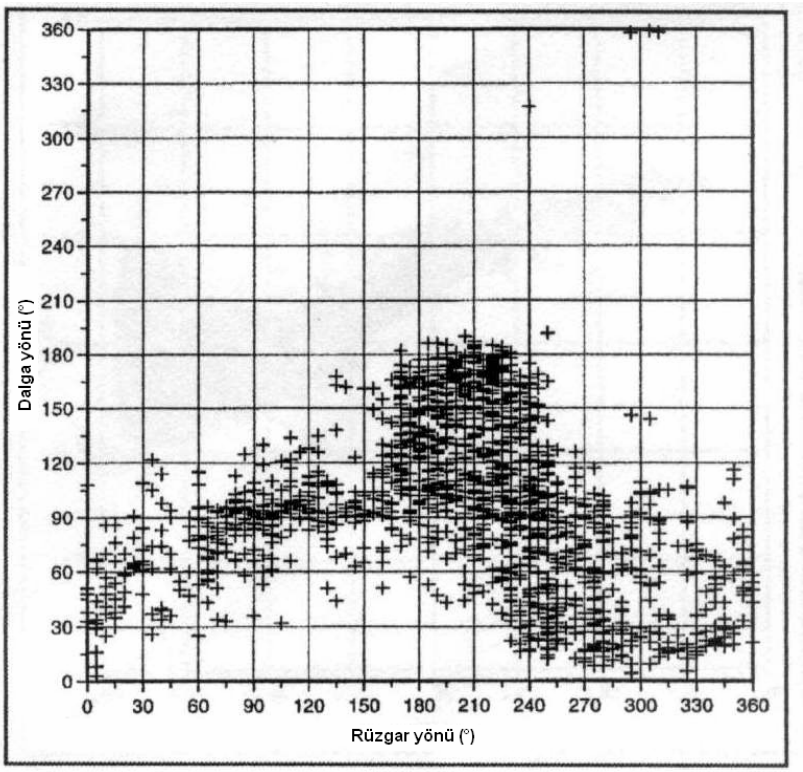
Şekil 2.6 Ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)



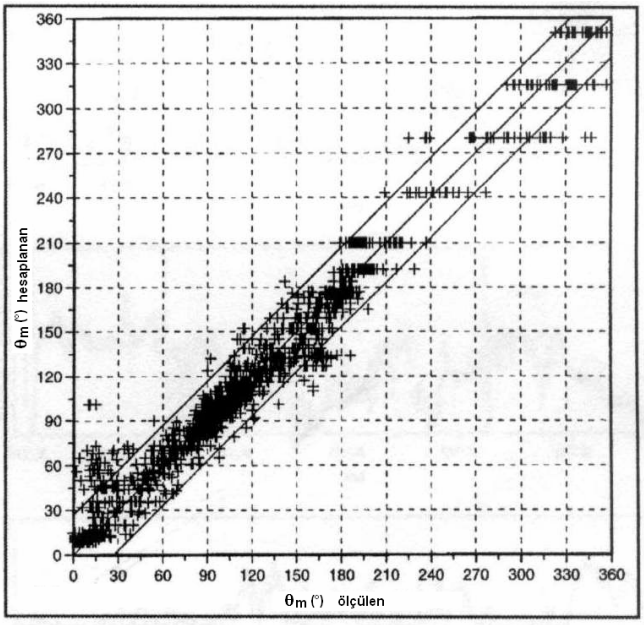
Şekil 2.7 ($U_{rüzgar}$>7.5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)



Şekil 2.8 (7.5 m/s> $U_{rüzgar}$>5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)

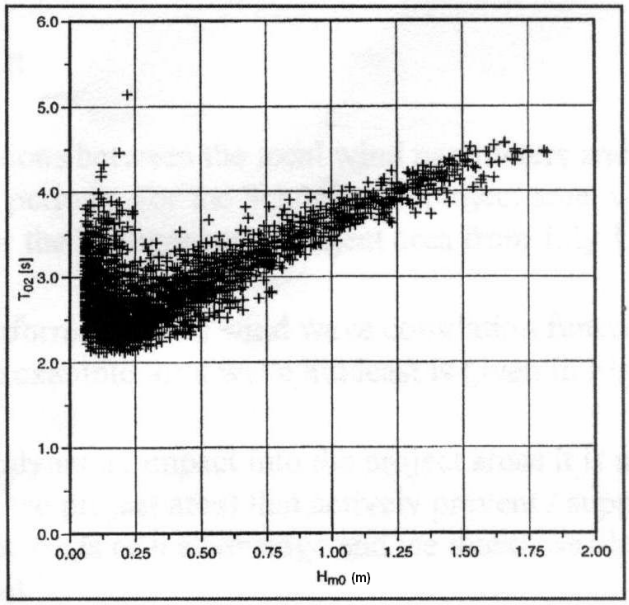


Şekil 2.9 ($U_{rüzgar}$<5 m/s) için ölçülen dalga yönlerine karşılık ölçülen rüzgar yönleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)



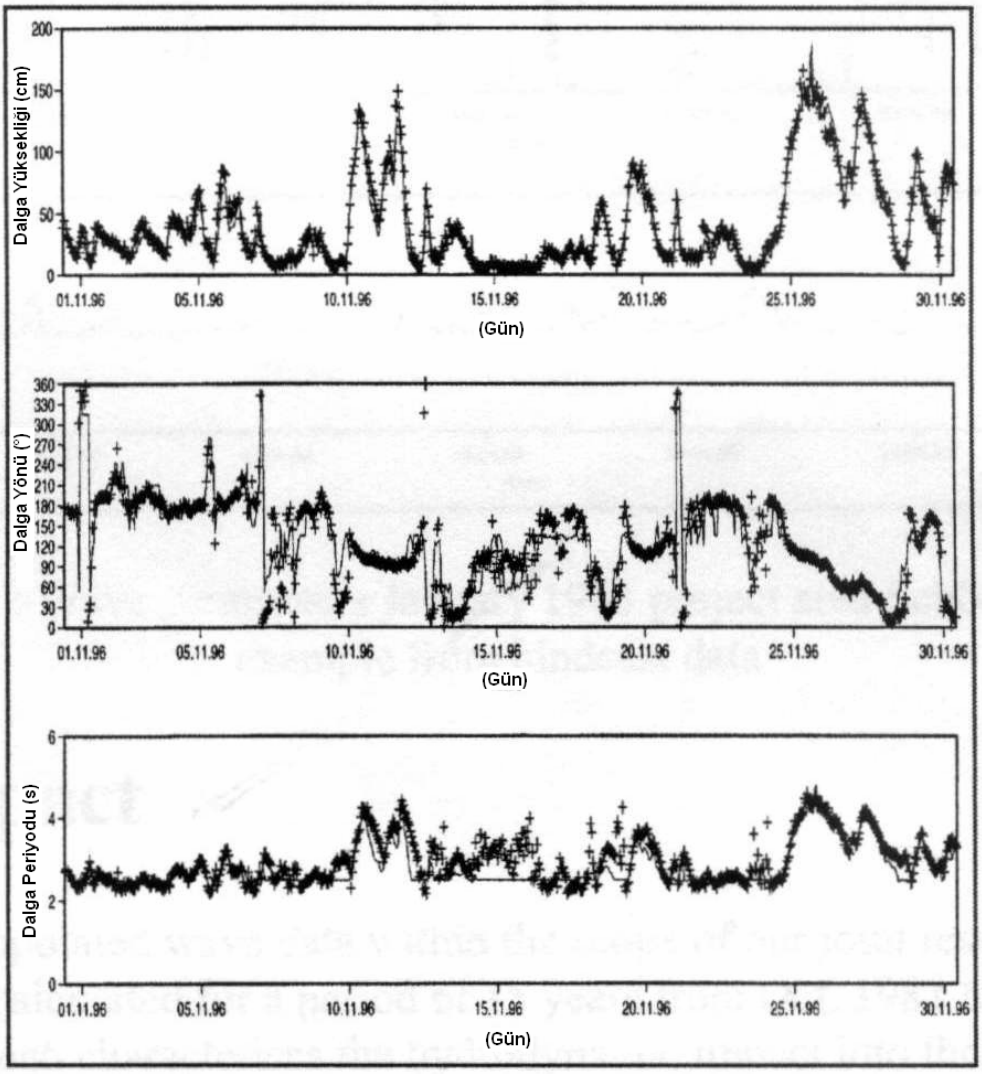
Şekil 2.10 Lineer regresyon fonksiyonu ve %90 güven aralığında hesaplanan ve ölçülen dalga yönleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)

Araştırmacılar rüzgar ölçümlerinden dalga periyodu hesaplamalarını dalga yüksekliği ve dalga periyodu arasındaki ilişkiye dayandırarak yapmışlardır. 0.25 m'yi geçen dalga yükseklikleri için dalga yüksekliği ve periyodu arasındaki ilişki oldukça lineer olmasına rağmen 0.25 m'den küçük dalga yükseklikleri için doğrudan bir korelasyon kurulamamıştır (Şekil 2.11). 0.25 m'den küçük olan dalga yüksekliklerine karşılık gelen periyotların bant genişliğinin büyük olması araştırmacılar tarafından bölgedeki ölü deniz etkisi olarak değerlendirilmiştir.



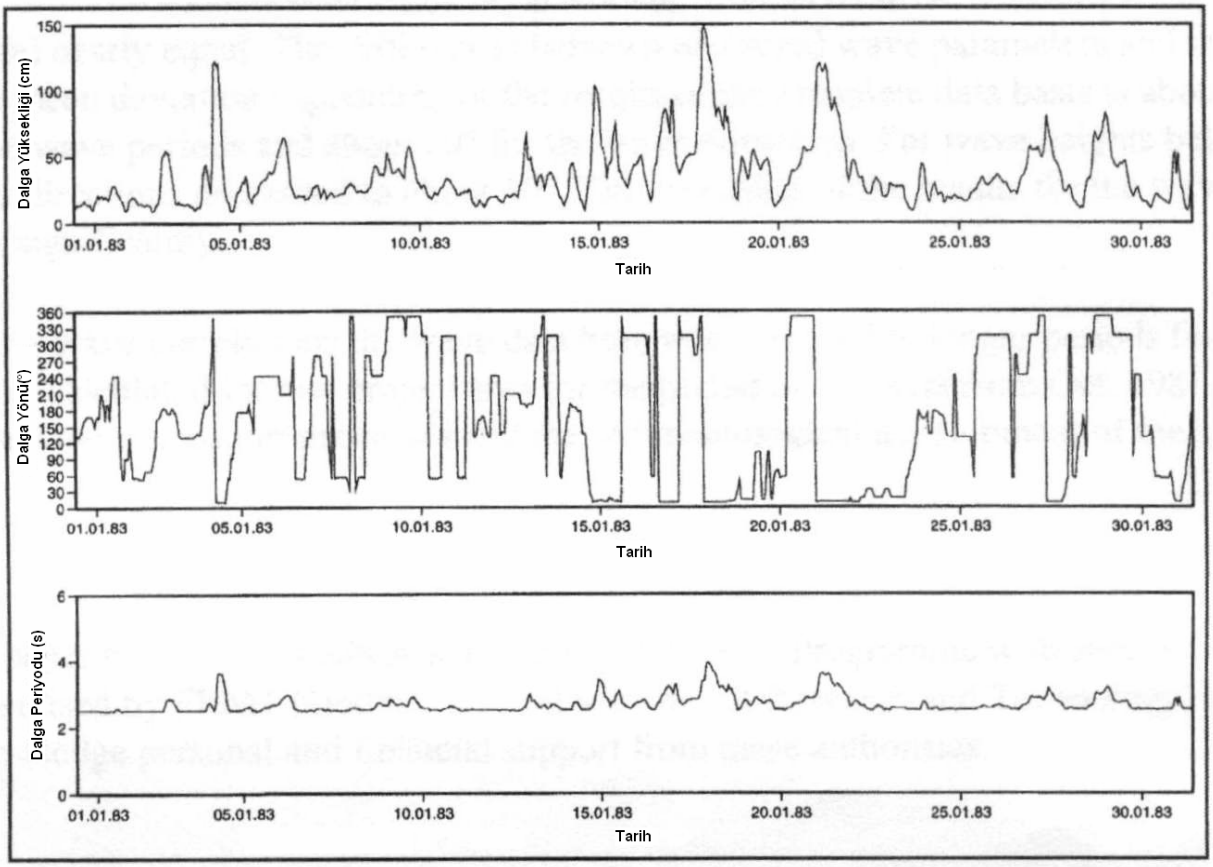
Şekil 2.11 Ölçülen dalga yüksekliklerine karşılık ölçülen dalga periyodu, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)

Şekil 2.12'de araştırmacıların yapmış olduğu korelasyon sonucunda ölçülen rüzgar parametrelerinden hesaplanan 1 aylık dalga yüksekliği, yönü ve periyodu görülmektedir. Sonuçlara göre bu bölge için yapılmış olan rüzgar-dalga korelasyonu oldukça iyi yaklaşımlar vermiştir.

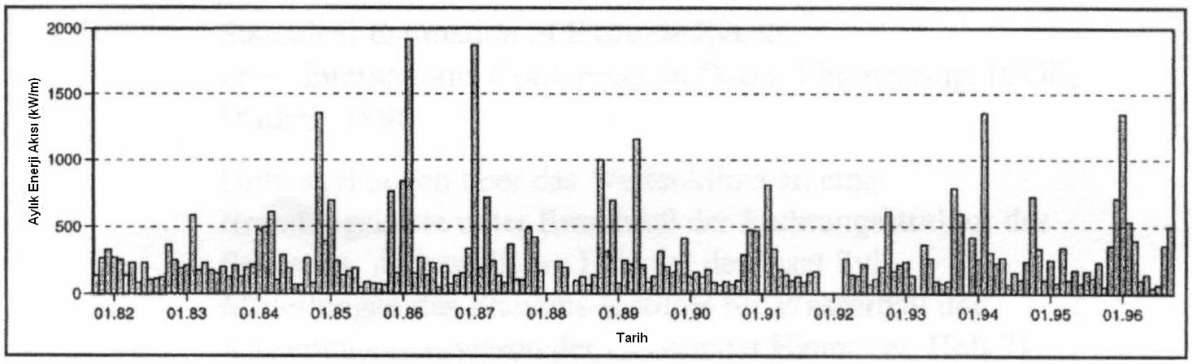


Şekil 2.12 Ölçülen ve hesaplanan dalga verisi, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998) (+: ölçülen dalga verisi, düz çizgi: hesaplanan dalga verisi)

Çalışmada araştırmacılar elde edilen korelasyonla mevcut olan rüzgar verilerinden dalga ölçümü olmayan zaman aralığında dalga verisi elde etmişlerdir. Şekil 2.13'te 1983 yılı için tahmin edilen dalga verileri görülmektedir. Yapılan bu çalışma bir bölge için kurulacak rüzgar-dalga korelasyonu sonucunda eksik verilerin tamamlanabileceği, özellikle bölgenin katı madde bütçesini ve kıyı çizgisi değişimini hesaplayabilmek için gerekli olan uzun dönemli dalga verisinin elde edilebileceğini göstermektedir. Şekil 2.14'te genişletilmiş 15 yıllık dalga verisinden (Ekim 1981-Eylül 1996) Schönhagen bölgesi için hesaplanan aylık dalga enerji akısı görülmektedir.



Şekil 2.13 1983 yılı Ocak ayı için elde edilen dalga parametreleri, Schönhagen bölgesi (Fröhle ve Fittschen, 1998)



Şekil 2.14 Schönhagen bölgesi için aylık eklenik dalga enerji akısı (Fröhle ve Fittschen, 1998)

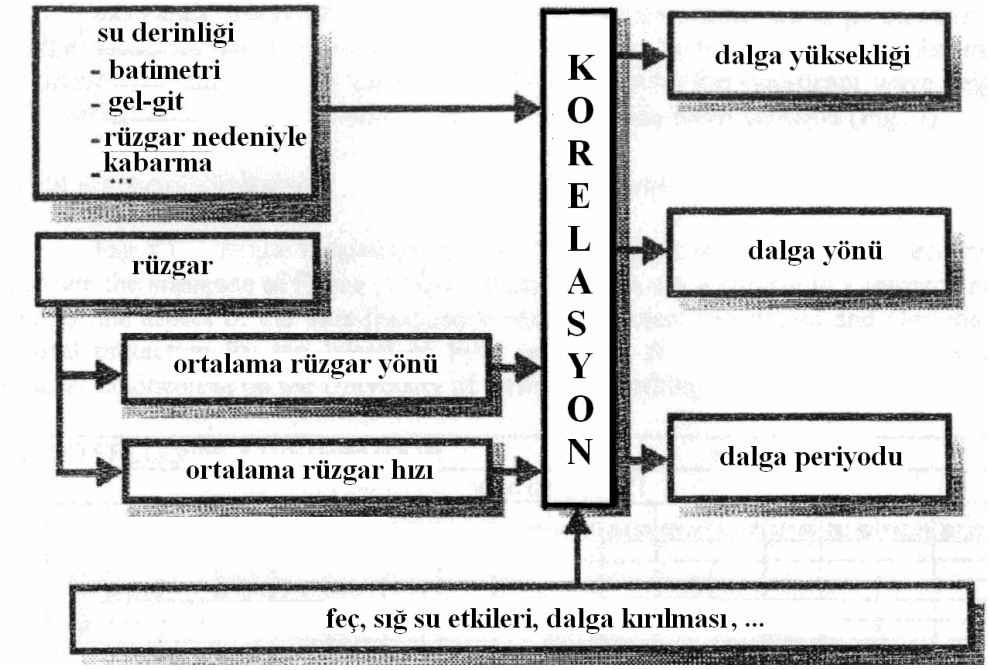
Witte vd. (1999) çalışmalarında yakın kıyı rüzgar-dalga korelasyonundan faydalanarak uzun dönemli yönsel dalga verileri elde etmeye çalışmışlardır. Uzun dönemli dalga tahmini rüzgar verileri kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak dalga-rüzgar korelasyonu, rüzgar verilerine dayanan dalga parametrelerinin zaman serisi şeklinde elde edilmesini sağlamaktadır.

Muhtemel iklim değişikliklerinin gözlenen parametrelerin (su seviyesi, rüzgar hızı, rüzgar yönü ve bunlara karşılık gelen dalgalar gibi) üzerinde etkisi vardır. Rüzgar-dalga korelasyonunun zaman serisi doğrudan bu etkileri hesaplayamamaktadır. Bu nedenle rüzgar-

dalga korelasyonunun zaman serisi rüzgar-dalga korelasyonunun frekans dağılımına çevrilmesini gerektirmektedir.

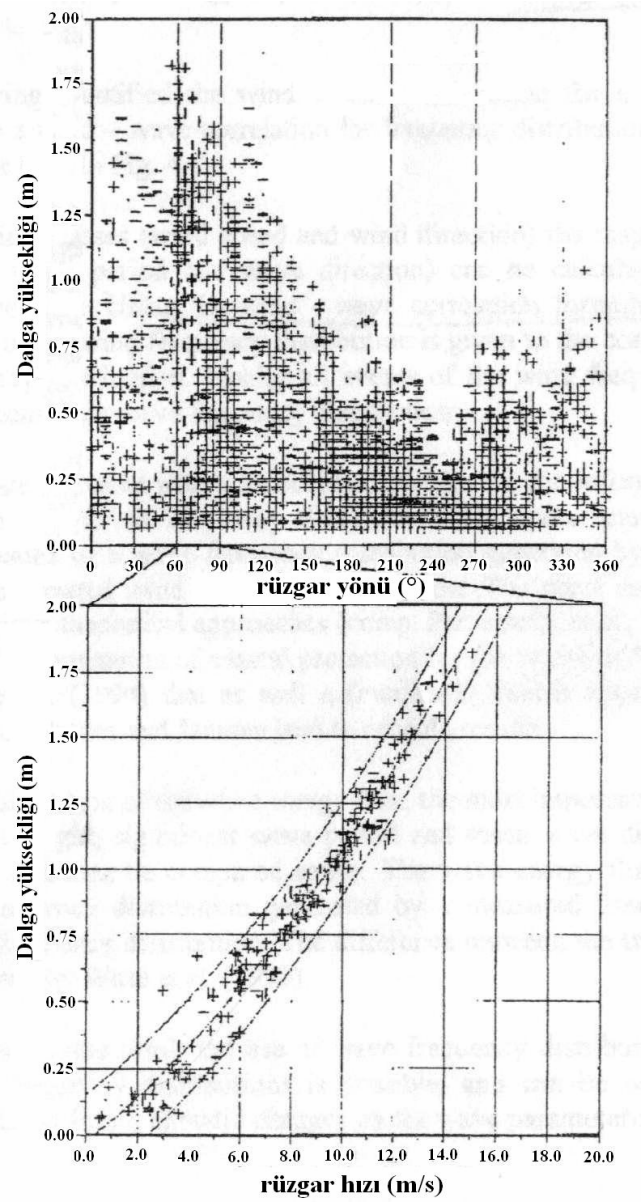
Rüzgar-dalga korelasyonundaki etkili parametreler araştırmacılar tarafından

- su yüksekliği (batimetri, gel-git etkisi ve rüzgar nedeniyle kabarmaya bağlı),
- rüzgar koşulları (zamana bağlı rüzgar hızı ve yönü),
- fiziksel özellikler (feç, sığ su etkileri, dalga kırılması) dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Rüzgar-dalga korelasyonunun temel prensibi (Witte vd., 1999)

Araştırmacılar korelasyonu kurmak için rüzgar yönlerini sınıflandırmışlar (0^o-360^o arasında ve 30^o aralıklarla) ve her sınıfta rüzgar hızına karşılık gelen dalga yüksekliğini çizmişlerdir (Şekil 2.16). Ölçülen ve korelasyonu kurulan dalga parametreleri arasındaki ortalama sapmayı oldukça küçük bulmuşlardır (belirgin dalga yüksekliği için 7 cm, belirgin dalga periyodu için 0.2 s ve ortalama dalga yönü için 10^o).



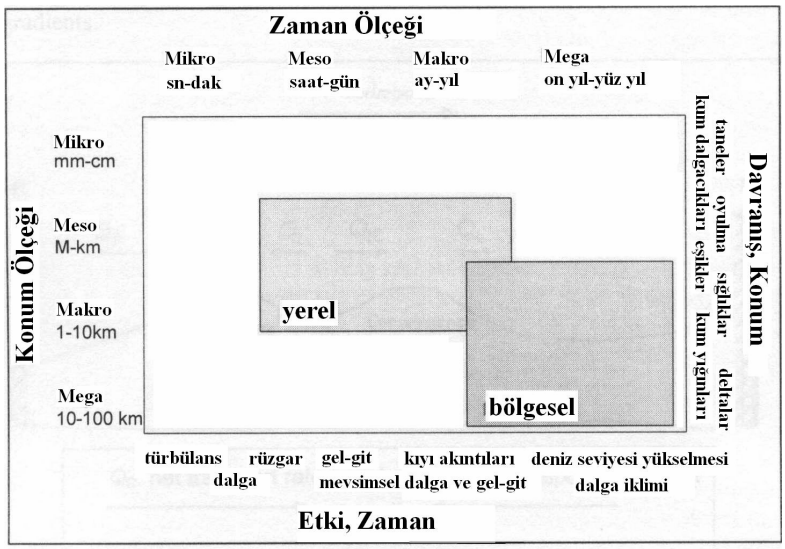
Şekil 2.16 Dalga yüksekliğinin rüzgar-dalga korelasyonu (Witte vd., 1999)

3. KIYI MORFOLOJİSİ MODELLEMESİ

3.1 Giriş

Kıyı alanı yönetiminde çevre, ulaşım, ekonomi ve biyoloji gibi birçok önemli unsur olmasına rağmen kıyı alanlarının tasarımında en önemli etken ve tasarım kriteri katı madde hareketidir (Kamphius, 2000). Kıyısal katı madde işlemleri genellikle türbülans, rüzgar, gel-git, kıyı akıntıları, dalga, deniz seviyesi yükselmesi gibi etkili parametrelerin ve bu etkilere karşı katı madde hareketiyle oluşan erozyon, kumlanma, delta veya eşik oluşumu gibi davranışların ölçeklerine göre sınıflandırılmaktadır. Kıyısal işlemler temelde iki ölçekle incelenebilmektedir. Bunlardan ilki olan yerel ölçek anlık kıyı uygulamalarında kullanılırken, bölgesel ölçek uzun zaman aralığındaki kıyı işlemlerinin incelenmesinde ve kontrolünde kullanılmaktadır. Yerel ölçek 0.01-30 yıl arasında zaman ölçeğine ve 0.1-10 km arasında konum ölçeğine karşılık gelmektedir. Bölgesel ölçek ise 10-250 yıl arasındaki zaman ölçeği ve 1-100 km arasındaki konum ölçeğindeki kıyısal işlemleri içermektedir.

Şekil 3.1 büyük ölçekli spektrumda kıyısal işlemler için yerel ve bölgesel ölçeklerin zaman ile konum aralığında hangi etki ve davranışlara karşılık geldiğini göstermektedir. Buradan da görülebileceği gibi katı madde taşınımı, bir dalga periyoduyla oluşan türbülanstan asırlar boyunca değişen su seviyesi yükselmesine kadar değişim gösteren mekanizmalarla oluşmaktadır. Farklı morfolojik özellikler (kum dalgacıklarından bariyer adalarına kadar) çeşitli ölçekleri içeren bu taşınımla ilişkilidir (Larson vd., 2002).



Şekil 3.1 Katı madde işlemlerinin zaman ve konum ölçeklerine göre sınıflandırması (Larson vd., 2002)

Farklı deniz yapılarının etkisindeki kıyı çizgisi oluşumunda kıyı boyu katı madde taşınımı önemli bir yer almaktadır ve kıyı mühendisliği açısından da oldukça önemli olduğu için üstünde çok çalışma yapılmış ayrıca farklı şekillerde tanımlanmaya çalışılmıştır (örneğin Komar, 1983; Sleath, 1984; Bird, 1985; Rijn, 1988; Nielsen, 1992; Fredsøe ve Deigaard, 1992; Silvester ve Hsu, 1993). 20. yüzyılda kıyı boyu katı madde taşınımının gel-git ve deniz akıntılarından daha çok dalga etkisiyle oluştuğu fikri benimsenmeye başlanmıştır. Son zamanlarda, 80'li ve 90'lı yıllarda detaylı olarak dalga ve buna karşılık gelen gerilme akısıyla katı madde taşınımını hesaplayan karmaşık modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, kıyı boyu akıntısıyla birlikte katı maddenin kıyıya dik dağılımını bulmada yardımcı olmakta ve böylece katı madde taşınımı ve morfolojik değişimleri hesaplayabilmektedirler. Böyle bir modelin tanımı Fredsøe ve Deigaard (1992) tarafından verilmiştir. Bu tür bir modelin uygulaması ise gelişmiş bir şekilde LITPACK yazılımıyla yapılabilmektedir (Perlin ve Kit, 1999).

3.2 Kıyı Çizgisi Modelleri

Kıyı morfolojisinin gelişimi karmaşık fiziksel işlemleri içerdiğinden matematiksel ifadelerle tam olarak tanımlanamamaktadır. Modelleme ifadeleri, bilinen fiziksel kurallarla bulunan deterministik bağıntılar veya laboratuar ya da saha ölçümlerine dayanan ampirik formüller olabilmektedir. Kıyı gelişimi, basit tek boyutlu sayısal modellerden gelişmiş üç boyutlu sayısal modellere kadar değişmektedir. Her tipin uygulanabilirliği, problemin gerektirdiği uzamsal ve zamansal ölçeklere göre değişiklik göstermektedir. Gelişmiş bir 3-D modeli, kıyı profilinin kısa dönem gelişimi çalışmasında kullanılırken, basit bir 1-D modeli kıyı çizgisinin uzun dönem değişiminin zamandan bağımsız simulasyonlarında kullanılmaktadır. Mevcut modeller üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Dabees, 2000):

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

3.2.1 Kıyı Profili Modeli

Kıyı profili değişim modelleri, fırtına nedeniyle oluşan kıyı erozyonu ve yenilenmesi ile dalga hareketine karşı plaj malzemesinin başlangıçtaki davranışını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu tip bir model, kıyıya dik katı madde hareketi ile oluşan kısa dönem profil gelişimini modellemektedir. Kıyı boyu doğrultusundaki katı madde taşınım değişimleri dikkate alınmamaktadır. Eşik oluşumundan ötürü kırılan dalgalara dayanan kıyı profili

değişimini tahmin etmekte kullanılan birçok model geliştirilmiştir (Dally ve Dean, 1984; Kriebel ve Dean, 1984; Larson ve Kraus, 1989). Deterministik kıyıya dik 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.

3.2.2 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 matematiksel modeli Pelnard-Considere'in (1956) tek çizgi teorisi ile verilmiştir. Bu teoride ilk yaklaşım 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 dikkate alınmamaktadır. Tek çizgi teorisi aynı zamanda yaklaşan dalgaların ve kıyı çizgisi değişiminin küçük açılı olduğunu kabul etmektedir. Pelnard-Considere, teorisini geçirimsiz bir mahmuz yanındaki kıyı çizgisi değişimi için uygulamıştır. Analitik çözümler, birçok mühendislik uygulamaları için kıyı çizgisi davranışının ilk tahmininde basit ve çabuk bir yaklaşım sağlamaktadır. Buna karşılık karmaşık sınır şartları içeren durumlarda kıyı çizgisinin sayısal modellemesi yapılmaktadır.

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.

3.2.3 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. 3-D modelleri 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 duyulmaktadır. 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.

Daha önce bahsedilen 3-D kıyı gelişim modelleri bilinen fiziksel kurallarla bulunan tamamen deterministik modellerdir. Böyle modeller uzun bilgisayar çalışma zamanına ve detaylı girdi bilgisine gerek duymaktadır. Bu modellerin yüksek derecedeki gelişmiş hesaplarına ve karmaşıklığına karşı, sonuçlarının doğruluğunda hala soru işaretleri vardır. Diğer taraftan, laboratuar ve saha ölçümlerinden elde edilen ampirik ifadelerin kullanıldığı daha basit modeller yaklaşık ancak daha doğru sonuçlar vermektedir.

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. Bakker (1968), Pelnard-Considere'in tek çizgi teorisini geliştirmiş ve mahmuzların yanındaki kıyı çizgisi değişimini ve mahmuz alanlarının performansını belirlemek için iki-eşderinlik-çizgi modelini geliştirmiştir. Yakın kıyı ve açık deniz arasındaki katı madde taşınımını modellemek için Bakker (1968) kıyı profilini birbirine paralel olması gerekmeyen iki eşderinlik çizgisine bölmüştür. Perlin ve Dean (1987), Bakker'ın (1968) iki çizgi modelini N-çizgi modeline çevirmişlerdir. Bu eşderinlik çizgi modelleri kıyıya dik katı madde taşınımının eklendiği bir grup tek çizgi modeli olarak görülebilmektedir. Katı madde taşınımı mevcut profil ve dengedeki şekli arasındaki farktan hesaplanabilmektedir. Kullanılabilir çok çizgili modeller, kıyı basamakları ve yakın kıyı eşikleri gibi yerel profil şekil değişikliklerini gösterememektedirler. Fakat son zamanlarda geliştirilen çok çizgi modeli (N Çizgi), karmaşık kıyı/yapı konfigürasyonlarında uzun dönem 3-D morfolojik değişimleri benzeştirmekte ve eşik ile basamak gibi yerel profil oluşumlarını göstermektedir.

3.3 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı

Kıyı boyu katı madde taşınımı, kıyı morfolojisini kontrol eden ve kıyının erozyona veya yığılmaya uğrayıp uğramayacağını belirleyen en önemli yakın kıyı olaylarından biridir. Bir kıyı alanı için katı madde taşınımına sebep olan bir çok neden bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi dalga etkisidir. Kıyıya belirli bir açıyla yaklaşan dalgalar kıyı boyunca katı madde taşınımına sebep olan kıyı boyu akıntısını oluşturmaktadırlar. Kıyı boyu katı madde taşınımının genel hatları ile temel mekanizması maddeler halinde verilmiştir (Yüksel, 2005).

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

Kıyı boyu katı madde taşınımı genel bir sınıflandırmayla özet olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kıyı boyu katı madde taşınımının genel sınıflandırması (Yüksel, 2005)

Model	**Sınıflandırma**
CERC (1984)	Enerji modeli
Davies ve Kamphius (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini içerir
Sayao, Nairn ve Kamphuis (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini içerir
Bijker (1971)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Engelund-Hansen (Swart, 1976)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Fleming (1977)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri vardır.
Ackers-White (Van der Graaf ve Van Overeem, 1979)	Hareketin başlangıç kriteri vardır.
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 vardır.
Kamphuis (1991)	Kıyı eğimi, taban malzemesi özelliklerini dikkate alır.

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı genellikle saha ölçümlerinden veya fiziksel modellerden elde edilen ampirik ifadelerden bulunmaktadır. Ancak, bu formüllerin türetilmesi ve uygulanması dört önemli zorluğu içermektedir (Larangeiro, 2003). Bu zorluklar; yakın kıyı alanındaki çevresel koşullardaki büyük değişimler, temel fiziksel işlemlerin karmaşıklığı, formülün kalibre edilmesi için kullanılan verilerdeki hatalar, belirsizlikler ve sınırlı sayıdaki saha verisidir.

Kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan ampirik formüller üç yönteme dayanmaktadır. Bunlar; enerji akısı yöntemi, akım gücü yöntemi ve boyut analizi yöntemidir. Enerji akısı yöntemi, genelde tüm kıyı boyu taşınım hesaplarında kullanılmaktadır. Bu yöntemde birim genişlik ve birim zaman için batık ağırlık katı madde debisi (I_l), kıyı boyu dalga gücü (P_l) ile ilişkili olarak verilmektedir. Akım gücü yöntemi (Bagnold, 1963), katı madde taşınımının fiziksel yorumuna dayanmaktadır. Yani dalganın salınımlı hareketinden kaynaklanan taban kayma gerilmeleri katı madde tanelerini askı haline geçirmekte ve bu taneler herhangi bir ek kayma gerilmesine gerek duymadan akıntı ile birlikte akım doğrultusunda taşınmaktadırlar. Boyut analizi yönteminde ise taşınım mekanizmasını etkileyen fiziksel parametreler boyutsuz hale getirilerek gruplandırılmaktadırlar. Sonuçta elde edilen ifadeler temelde laboratuar deneylerinden bulunmakta ve ölçülen çevresel parametreleri taşınım miktarları ile ilişkilendirmektedir.

Kıyı boyu taşınımının hesaplanmasında sıklıkla kullanılan ifadeler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir. Çizelge 3.2'de verilen eşitliklerden (3.1), (3.2) ve (3.3) eşitlikleri enerji akısı yöntemi ile elde edilmiş ifadelerdir. (3.1) eşitliği oldukça sık kullanılan CERC (1984) ifadesidir. Burada K katsayısı için iki değer verilmiştir. Bunlardan ilki Komar ve Inman'ın (1970) çalışmalarından elde edilen 0.77 değeri, diğeri ise Valle vd. (1993) tarafından (3.2) eşitliği ile verilmiş katı madde tane çapı (d_{50}) ile değişen ampirik ifadedir. (3.2) eşitliğinden (3.13) eşitliğine kadar olan ifadeler ise akım gücü yöntemi ile elde edilmiş denklemlerdir. Komar ve Inman (1970), (3.1) eşitliğinin ampirik olduğunu, Bagnold (1963) tarafından geliştirilen taşınım modeli mekanizmasının ise fiziksel olarak daha gerçekçi bir ilişki verdiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple araştırmacılar (3.4) eşitliğini de önermişlerdir. Bu eşitlikte K' boyutsuz parametresi aracılığı ile birim genişlik ve birim zaman için batık ağırlık katı madde debisi (I_l) ve dalga-akıntı parametreleri ilişkilendirilmektedir. Yine Kraus vd. (1982), Kraus vd. (1988) ve Walton (1980), çalışmalarında farklı tekniklerle elde ettikleri ölçüm sonuçlarından akım gücü yöntemi ile diğer katı madde taşınım ifadelerini sunmuşlardır ((3.5), (3.6), (3.7), (3.8) , (3.9) , (3.10) , (3.11) ve (3.12) eşitlikleri). Boyut analizi yönteminde ise Kamphius (1986), kapsamlı saha ve laboratuar verisi ile (3.13) ampirik eşitliğini elde etmiştir. Bu eşitlikte taban eğimi ve tane çapı etkisi dikkate alınmıştır. Kamphius (1991), daha detaylı laboratuar çalışması yapmış ve boyut analizi ile dalga periyodu etkisini de içeren (3.14) eşitliğini sunmuştur.

Çizelge 3.2 Kıyı boyu taşınım formülleri (Larangeiro, 2003)

Kaynak	Matematiksel İfade	Denklem Numarası
Komar ve Inman (1970)	K=0.77 $Q_l = K\,P_{lb}/\left[(\rho_s-\rho)ga'\right] = K/\left[16\gamma^{1/2}(\rho_s-\rho)a'\right]\rho g^{1/2}H_b^{5/2}\sin(2\alpha_b)$	(3.1)
Valle vd. (1993)	$K = 1.4e^{(-2.5D_{50})}$ $Q_l = K/\left[16\gamma^{1/2}(\rho_s-\rho)a'\right]\rho g^{1/2}H_b^{5/2}\sin(2\alpha_b)$	(3.2) (3.3)
Komar ve Inman (1970)	$K' = 0.28$ $I_l = K'\left(EC_g\right)_b \cos\alpha_b \overline{V}/u_m$	(3.4)
Kraus vd. (1982)	$Q_l = V_a\,h_b\,W$ b=0.027H_b $V_a = 0.014\overline{V}_l$ $Q_l = 3.8\times10^{-4}/(\gamma i)H_b^2\overline{V}_l$	(3.5) (3.6) (3.7) (3.8)
Kraus vd. (1988)	$R = \overline{V}_l W\,H_b$ $I_l = 2.7(R-R_c);\ R_c = 3.9\,m^3/s$	(3.9) (3.10)
Walton (1980)	$(V/V_0)_{LH} = 0.2(X/W)-0.714(X/W)\ln(X/W)$ $P_l = \rho g H_b WVC_f/\left[(5\pi/2)(V/V_0)_{LH}\right]$	(3.11) (3.12)
Kamphius vd. (1986)	$Q_l = 1.28/\left[(\rho_s-\rho)ga'\right]H_b^{7/2}m_b d_{50}^{-1}\sin(2\alpha_b)$	(3.13)
Kamphius (1991)	$Q_l = 2.27H_{sb}^2T_p m_b^{0.75}d_{50}^{-0.25}\sin^{0.6}(2\alpha_b)$	(3.14)

Burada; Q_l = Kıyı boyu katı madde taşınım debisi, ρ_s = Katı madde özgül kütlesi, ρ = Suyun özgül kütlesi, g = Yerçekimi ivmesi, γ = Kırılma indeksi, H_b = Kırılan dalga yüksekliği, α_b = Kırılan dalga açısı, $\left(EC_g\right)_b$ = Kırılma çizgisindeki enerji akısı, $\overline{V}_l$ = Ortalama kıyı boyu akıntı hızı, u_{mb} = Kırılan dalgada maksimum yörüngesel hız, V_a = İzleyici adveksiyon hızı, h_b= Kırılma derinliği, W =Surf bölgesi genişliği, m_b= Deniz tabanı eğimi, $(V/V_0)_{LH}$ = Longuet-Higgins akıntı hızı dağılımı, X = Akıntı hızının ölçüm noktasının kıyı çizgisinden itibaren mesafesi, V = X mesafesinde ölçülen akıntı hızı, C_f = Sürtünme katsayısıdır.

Belirli bir sürede kıyı boyunca taşınan katı madde miktarına kıyı boyu katı madde debisi denmektedir. 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, net katı madde taşınımı kıyıdan açık denize bakıldığında ve sağ sol tanımları yapıldığında (Yüksel, 2005);

$$Q_{net} = (Q_{sağ\text{-}sol} - Q_{sol\text{-}sağ}) \qquad (3.15)$$

ifadesi ile bulunmaktadır. Göz önüne alınan kıyıda, kıyı boyu katı madde hareketine katılan katı maddenin miktarı toplam kıyı boyu katı madde taşınımı olarak adlandırılır.

$$Q_{top}= (Q_{sağ\text{-}sol}+Q_{sol\text{-}sağ}) \quad (3.16)$$

Toplam katı madde taşınımının büyüklüğü o kıyıdaki deniz tabanının hareketliliğini karakterize eder, çünkü Q_{net} sıfır olsa bile Q_{top}'ın büyük olması o kıyıda kıyı yapıları açısından şiddetli bir katı madde hareketinin söz konusu olduğunu göstermektedir.

3.4 Kıyıya Dik Katı Made Taşınımı

Dalgalar kıyı çizgisiyle belli bir açı yaparak kırıldıklarında sahip oldukları enerjinin kıyı çizgisine paralel bileşeni kıyı boyu katı madde taşınımına, kıyı çizgisine dik bileşeni ise kıyıya dik yönde katı madde taşınımına yol açmaktadır. Kıyıya dik katı madde taşınımı kıyı çizgisine dik ortalama bir doğrultuya sahiptir. Herhangi bir dalga etkisi altında kıyıya dik yönde net taşınım açık denize doğru ise kıyıda erozyon, kıyıya doğru ise yığılma meydana gelmektedir.

Surf bölgesi dışında kıyıya dik katı madde taşınımı kıyıya doğrudur. 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 (Dabees, 2000).

3.5 Kıyı Çizgisi Değişiminin Sayısal Modelleri

3.5.1 LITPACK Sayısal Modeli

LITPACK dalga ve akıntı etkisinde koheziv olmayan katı madde taşınımını modellemek için geliştirilmiş olan bir yazılımdır. Yazılımın beş ayrı modülü bulunmaktadır. Bu modüller farklı kıyı çizgisi problemlerinde kullanılmak üzere değişik özellikler içermektedir (DHI, 2003a).

- *LITSTP* yerel katı madde taşınım modeli
- *LITDRIFT* kıyı boyu katı madde taşınım modeli
- *LITLINE* kıyı çizgisi gelişim modeli

- *LITTREN* dengede olmayan hendek kumlanması modeli
- *LITPROF* kıyı profili gelişim modeli

Bu çalışmada kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi için üç modül kullanılmıştır. Bunlar katı madde taşınımını belli bir nokta için belirleyen LITSTP modülü, kıyısal katı madde taşınımını belirleyen LITDRIFT modülü ve kıyı çizgisi gelişimini belirleyen LITLINE modülüdür.

3.5.1.1 LITSTP

LITSTP modülü, dalga ve akıntı etkisinde koheziv olmayan katı madde taşınımını hesaplamaktadır. Programın girdileri belirli bir derinlikteki dalga, akıntı ve katı madde parametreleridir (DHI, 2003b).

LITSTP modülünde toplam katı madde debisi sürüntü ve askı halinde olmak üzere ikiye ayrılmakta ve (3.17) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$q_t=q_b+q_s \tag{3.17}$$

Sürüntü Malzemesi Taşınımı

Koheziv olmayan sürüntü debisinin hesabı Engelund ve Fredsøe (1976) tarafından sunulan modelle yapılmaktadır. Sonradan ortaya çıkan gelişmelerle birlikte bu model, dalga-akıntı kombinasyonunu ve surf bölgesi içindeki koşulları da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Sürüntü debisi (q_b), (3.18) eşitliği ile verilen Shields parametresinin (θ) fonksiyonu olarak belirtilmektedir.

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)\, g\, d_{50}} \tag{3.18}$$

burada;

s= Rölatif katı madde özgül ağırlığı,

g= Yerçekimi ivmesi,

d_{50}= Ortalama tane çapı,

U_f= Kayma hızıdır (u_*).

Sürüntü debisinin, kararsız halde anlık taban kayma gerilmesi ile taşındığı düşünülmektedir (örneğin dalga etkisi altında). Boyutsuz sürüntü debisi (Φ_b) (3.19) eşitliği ile verilen deterministik bir yaklaşımla hesaplanmaktadır.

$$\Phi_b = 5p\left(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}\right) \tag{3.19}$$

burada;

p= (3.20) eşitliği ile hesaplanmaktadır ve bir tabakada tüm partüküllerin hareket etme olasılığıdır.

θ' = Düzlem taban için Shields parametresi,

θ_c = Kritik Shields parametresidir.

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c}\right)^4\right]^{-0.25} \tag{3.20}$$

burada;

β = Taban eğimidir.

(3.19) eşitliği ile verilen boyutsuz sürüntü debisinden aşağıda verilen zamansal ortalaması alınmış nicelikler hesaplanmaktadır.

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T}\int_0^T \Phi_b(t)\cos\left(\phi(t)\right)dt \tag{3.21}$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T}\int_0^T \Phi_b(t)\sin\left(\phi(t)\right)dt \tag{3.22}$$

$$q_{b1} = \Phi_{b1}\sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{3.23}$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2}\sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{3.24}$$

burada;

$\phi(t)$ = Akımın anlık yönü,

Φ_{b1} = Ortalama akıntı yönündeki boyutsuz sürüntü debisi,

Φ_{b2} = Ortalama akıntı yönüne dik boyutsuz sürüntü debisi,

q_{b1} = Ortalama akıntı yönündeki sürüntü debisi,

q_{b2} = Ortalama akıntı yönüne dik sürüntü debisidir.

Sürüntü debisinin hesabında kum dalgacıklarının etkisi dikkate alınmamış, bu yüzden düzlem taban için tanımlanan Shields parametresi (θ'), boyutsuz sürüntü debisi (Φ_b) ve p hesabında kullanılmıştır.

Askı Malzemesi Taşınımı

Askı malzemesinin taşınım miktarı (q_s), düşey türbülans difüzyon denklemiyle belirlenen ile tanımlanmaktadır:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}\right) + w\frac{\partial C}{\partial z} \tag{3.25}$$

burada;

t= Zaman,

z= Düşey koordinat (=0 tabanda),

ε_s = Katı madde türbülans difüzyon katsayısı,

ω = Katı madde çökelme hızıdır.

ε_s; akım alanının eddy viskozitesine eşit alınmaktadır. z=2d'de taban yakınındaki sınır şartı taban konsantrasyonu (C_b) şeklinde verilmektedir. C_b; Bagnold'a (1954) göre θ'nın fonksiyonu olarak belirlenmektedir. Taban konsantrasyonu (C_b) sadece düzlem taban (örneğin tabaka akışı) koşullarında geçerli olmaktadır (θ>0.8). Daha küçük θ değerlerinde, taban kum dalgacıklarıyla kaplanmaktadır. Fredsøe vd. (1985) tarafından yukarıda tanımlanmış olan katı madde taşınım modeli kum dalgacıklarının etkisini dikkate almak için değiştirilmiştir. Değişim, taban konsantrasyonunu, türbülans difüzyonunu ve taban pürüzlülüğünü içermektedir. C_b ve ε değerleri Nielsen'in (1979) laboratuar ölçümlerine dayanmaktadır. Pürüzlülük Raudkivi (1988) tarafından verilen kum dalgacığı boyutlarıyla belirlenmektedir.

Surf bölgesinde dalga enerjisi kırılma nedeniyle azalmaktadır ve türbülansın oluşumu oldukça şiddetlidir. Bu etki bir-denklem türbülans modeli (k model) kullanımıyla dikkate alınmaktadır (Deigaard vd., 1986).

Askı malzemesi taşınım miktarı, q_s (dalga periyoduna göre zamansal ortalaması alınmış) katı madde konsantrasyonu ve akıntının hızı ile hesaplanmaktadır (Hedegaard vd., 1988):

$$q_s = \frac{1}{T}\int_0^T \int_{2d}^{D} C\,U\,dy\,dt \tag{3.26}$$

Bunlara ilave olarak askı debisi, Lagrangian taşınımı ve geri dönüş akımından kaynaklanan katkıları da içermektedir.

Lagrangian taşınım ve geri dönüş akımından kaynaklanan askı debisi, ortalama hız ($\overline{U}$) ve ortalama konsantrasyon profilinden ($\overline{C}$) hesaplanmaktadır:

$$q_{s,ek} = \int_{2d}^{D} \overline{C}\,\overline{U}\,dy \tag{3.27}$$

Askı halindeki katı madde suyla birlikte hareket etmekte ve katı madde taşınımı Lagrangian akım hızına göre belirlenmektedir. Bu sebeple (3.26) eşitliğinde verilen U hızı, Eulerian akıntı hızı (U) ve Lagrangian sürükleme hızının (U_d) toplamı olarak alınmaktadır.

Bu modülde konumsal olarak elde edilen taşınım debileri LITDRIFT modülü ile hesaplanacak kıyı bölgesindeki katı madde hareketini belirlemek için oldukça önemlidir. Yani LITDRIFT modülü bir katı madde bütçesinde oluşacak kıyı boyu hareketini hesaplamak için LITSTP modülünden faydalanmaktadır. LITSTP modülünde derinliğe göre konumsal olarak hesaplanan debiler dikkate alınarak LITDRIFT modülünde integre edilmektedir.

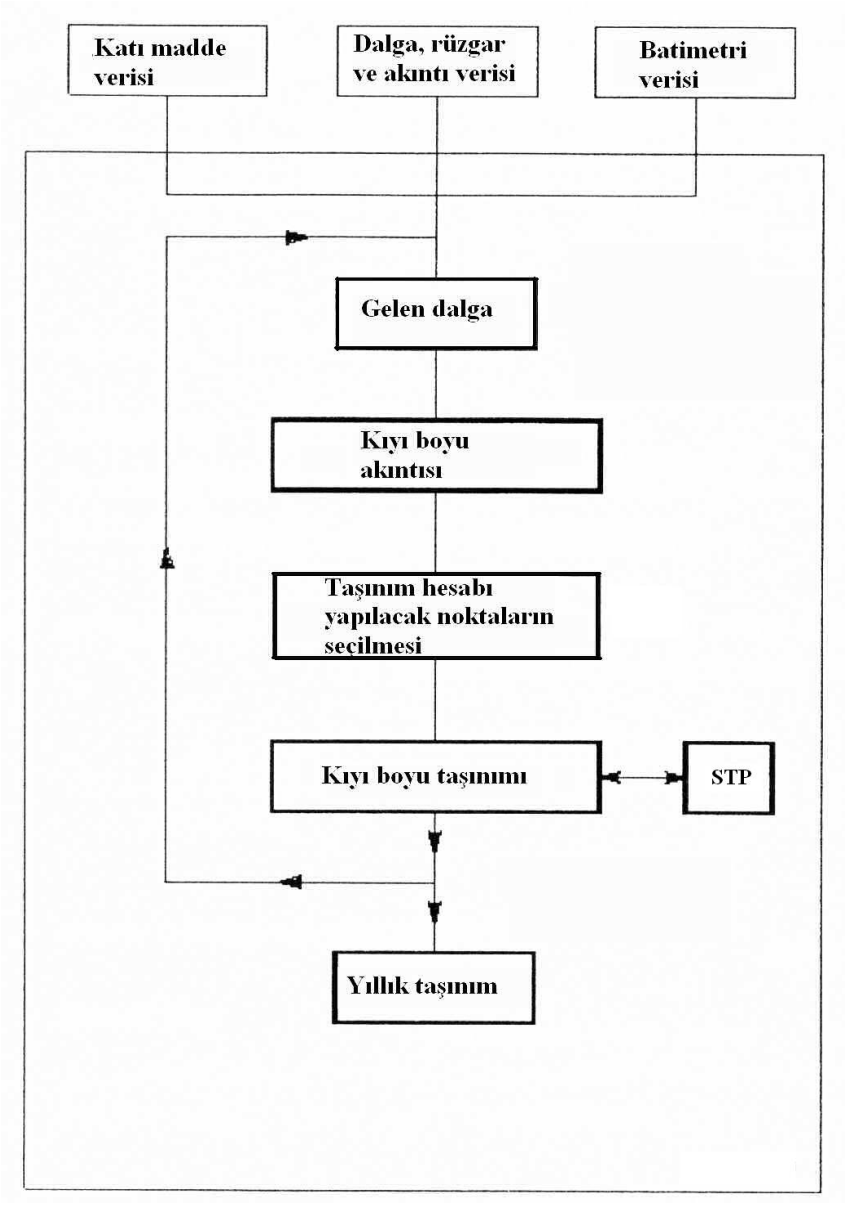
3.5.1.2 LITDRIFT

LITDRIFT tüm kıyı morfoloji çalışmalarında önemli bir yere sahip olan katı madde bütçe analizini içermektedir. Bu modül, bir kıyı profili için dalga yüksekliğinin kıyıya dik dağılımını, dalga kabarmasını ve kıyı boyu akıntısını modellemektedir. LITDRIFT modülünde yer alan hidrodinamik model dalgaların kırılması, düzenli ve düzensiz dalga koşulları altında herhangi bir batimetri için kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımını vermektedir. Modül, kıyı boyu kum eşiklerini içeren karmaşık kıyı profillerinde de uygulanabilmektedir (DHI, 2003c).

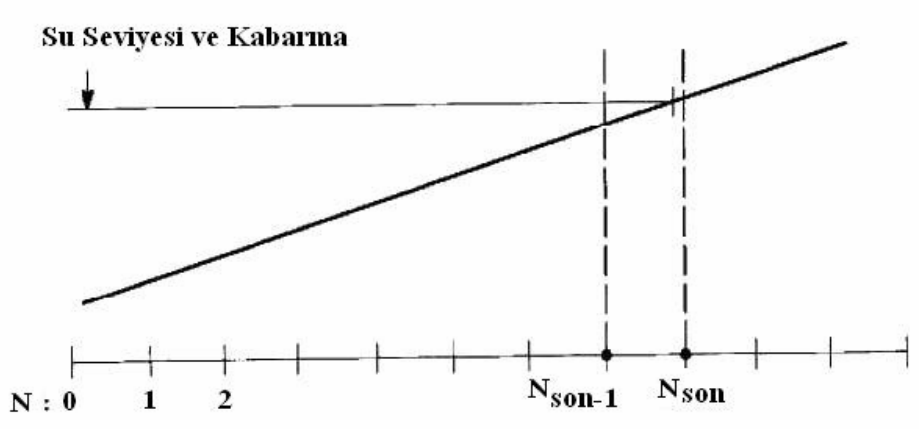
Hidrodinamik modül tarafından kıyı boyu akıntısı hesaplandıktan sonra kıyı boyu katı madde taşınımı için temsili noktalar seçilmektedir. Seçilen noktalarda katı madde taşınım hesapları LITSTP modülü tarafından gerçekleştirilmektedir. Kıyı boyunca toplam katı madde taşınımında ise dalga kırılmasının gerçekleştiği alanlar etkin olmaktadır. Bu sebeple taşınım hesabının yapılacağı noktaların seçiminde bu etki dikkate alınmaktadır. Eğer profilde kum eşiği mevcut ise seçilen noktalardan biri bu eşiğin üzerinde olmaktadır.

Şekil 3.2'de LITDRIFT modülünün akış şeması görülmektedir.

LITDRIFT modülünde kıyı profili 0'dan N'e kadar ardışık noktalardan oluşan bir dizi şeklinde tanımlanmaktadır. Profilin son noktasının (N_{son}) kıyıda bulunması gerekmektedir ve değeri 10'dan büyük olmalıdır. Su seviyesi ve kabarma hesapları N_{son-1} ve N_{son} noktaları arasında yeni bir kıyı çizgisi vermektedir. Kıyı çizgisinde hidrodinamik parametreler sıfır olarak alınmaktadır. Şekil 3.3'te şematik bir kıyı profili görülmektedir.



Şekil 3.2 LITDRIFT modülünün akım şeması (DHI, 2003c)



Şekil 3.3 Şematik ayrıklaştırılmış kıyı profili (DHI, 2003c)

Hidrodinamik ve katı madde taşınım modellerinin, dalga kırılma bölgesine yakın ve kıyı boyu akıntısının maksimum olduğu bölgelerde katı madde taşınım kapasitesini en büyük değerde verdiği bilinmektedir. Çünkü;

- Taşınım akıntı hızıyla artmaktadır.
- Kıyı boyu akıntı hızı profilindeki en büyük değer sığ su koşullarında dalga kırılması ile oluşmaktadır. Bu nedenle taşınım yüksek taban kayma gerilmeleriyle ve kırılan dalgalarla oluşan yüksek türbülans nedeniyle artmaktadır.

Katı madde taşınım hesaplarının yapılacağı noktalar (3.28) eşitliği ile verilen nokta seçim parametresi (S) ile bulunmaktadır.

$$S = \frac{V^3}{d_{50}^{3/2}} \frac{H}{h} (m) \tag{3.28}$$

burada;

h= Su derinliği,

H=Dalga yüksekliği,

d_{50}= Ortalama tane çapı,

V= Akıntı hızıdır.

Seçilen noktalardaki katı madde taşınım hesaplarından sonra, taşınım profil boyunca interpole ve integre edilmektedir. Taşınımın seçilen noktalar arasında lineer değiştiği kabul edilmektedir.

(3.29) eşitliğinde verildiği gibi taşınan katı madde miktarına boşluk suyu dahil edilerek taşınan ıslak katı madde hacmi bulunmaktadır.

$$Q_{s,ıslak} = \frac{1}{(1\text{-porozite})} Q_{s,kuru} \tag{3.29}$$

Yıllık taşınım miktarı ise bir yıl boyunca oluşan her dalga olayının taşınıma katkısı ile hesaplanmaktadır. Dalga iklimi modüle zaman serisi şeklinde verilmektedir ve her bir zaman adımında gelen bir dalgayı tarifleyen dalga parametreleri ile dalganın gelme süresi bulunmaktadır. (3.30) eşitliğinde yıllık taşınım tarifleyen ifade yer almaktadır.

$$Q_{yıllık} = \sum_{i=1}^{N_{dalga}} Q_{si} \times \text{Süre(i)} \tag{3.30}$$

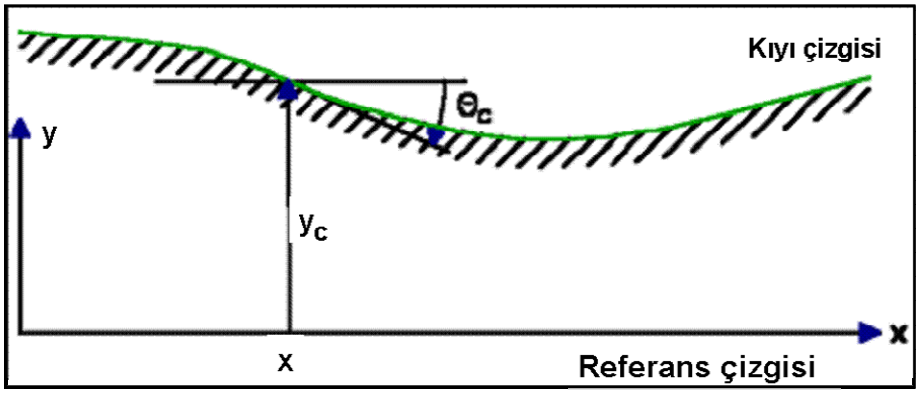
burada;

N_{dalga}= Gelen dalgaların toplamıdır.

3.5.1.3 LITLINE

LITPACK yazılımının LITLINE modülü, farklı kıyı yapıları ve kaynak/kayıp etkileri altında kıyı çizgisi gelişiminin belirlenmesinde kullanılan bir sayısal modeldir. LITLINE modülü kıyı çizgisi konumunu zaman serisi şeklinde tanımlanan dalga iklimine göre hesaplamaktadır. Model, kıyıya dik profilin erozyon veya yığılma olması durumunda değişmediğini kabul eden tek çizgi teorisine dayanmaktadır. Bu sebeple kıyı morfolojisi sadece kıyı çizgisinin konumu ve kıyıya dik profillerle tanımlanmaktadır.

LITLINE modülünde hesaplamalar Şekil 3.4'te görülen koordinat sistemine dayanmaktadır. Bu koordinat sisteminde x ekseni referans çizgisidir ve kıyı çizgisine paralel şekilde belirlenmektedir. y ekseni ise referans çizgisinden itibaren açık deniz doğrultusundadır. Şekilde görülen y_c ise x eksenine bağlı olarak referans çizgisinden kıyı çizgisine olan dik mesafeyi vermektedir.



Şekil 3.4 LITLINE yazılımında kullanılan koordinat sistemi (DHI, 2003d)

LITLINE yazılımında kullanılan temel ifade (3.31) eşitliği ile verilen katı madde taşınımı için süreklilik denklemidir.

$$\frac{\partial y_c(x)}{\partial t} = -\frac{1}{h_{aktif}(x)}\frac{\partial Q(x)}{\partial x} + \frac{Q_k(x)}{h_{aktif}(x)\Delta x} \tag{3.31}$$

burada;

$y_c(x)$= Referans çizgisinden kıyı çizgisine olan dik mesafe,

t= Zaman,

h_{aktif}= Kıyı profilinin aktif yüksekliği,

Q(x)= Kıyı boyu katı madde taşınım debisi,

x= Kıyı boyu konumu,

Δx= Kıyı boyu ağ aralığı,

$Q_k(x)$= Kaynak veya kuyu taşımın debisidir.

(3.31) eşitliğinde verilen aktif kıyı profili yüksekliği basamak yüksekliği ($h_{basamak}$), kumul yüksekliği (h_{kumul}) ve kapama derinliğini (d_k) içermektedir.

$$h_{aktif} = h_{kumul} + h_{basamak} + d_k \tag{3.32}$$

Sayısal modelde h_{aktif} ve $Q_k(x)$ kullanıcının programda tanımladığı değerlere göre hesaplanırken, kıyı boyu katı madde taşınımı (Q(x)) kırılma durumundaki hidrodinamik koşullara göre belirlenmektedir. Ağ aralığı (Δx), yine kullanıcının belirlediği değerdir ancak Δt zaman adımı stabilite koşuluna göre program tarafından hesaplanmaktadır. Başlangıç kıyı çizgisine göre yeni y_c değerleri (3.31) eşitliğinin kapalı Crank-Nicholson şeması ile çözülmesiyle belirlenmektedir. Şekil 3.5'te ise LITLINE yazılımının kullandığı akış diyagramı görülmektedir.

Belirli bir konumdaki kıyı boyu katı madde taşınım debisi dalga iklimi, akıntı, kıyıya dik profil, katı madde özellikleri ve kıyı çizgisi konumunun fonksiyonudur. Bu sebeple LITLINE yazılımında taşınım debisinin belirlenmesi için bölgeye ait dalga ikliminin doğru olarak tanımlanması gerekmektedir. Programda tanımlanan başlıca dalga parametreleri:

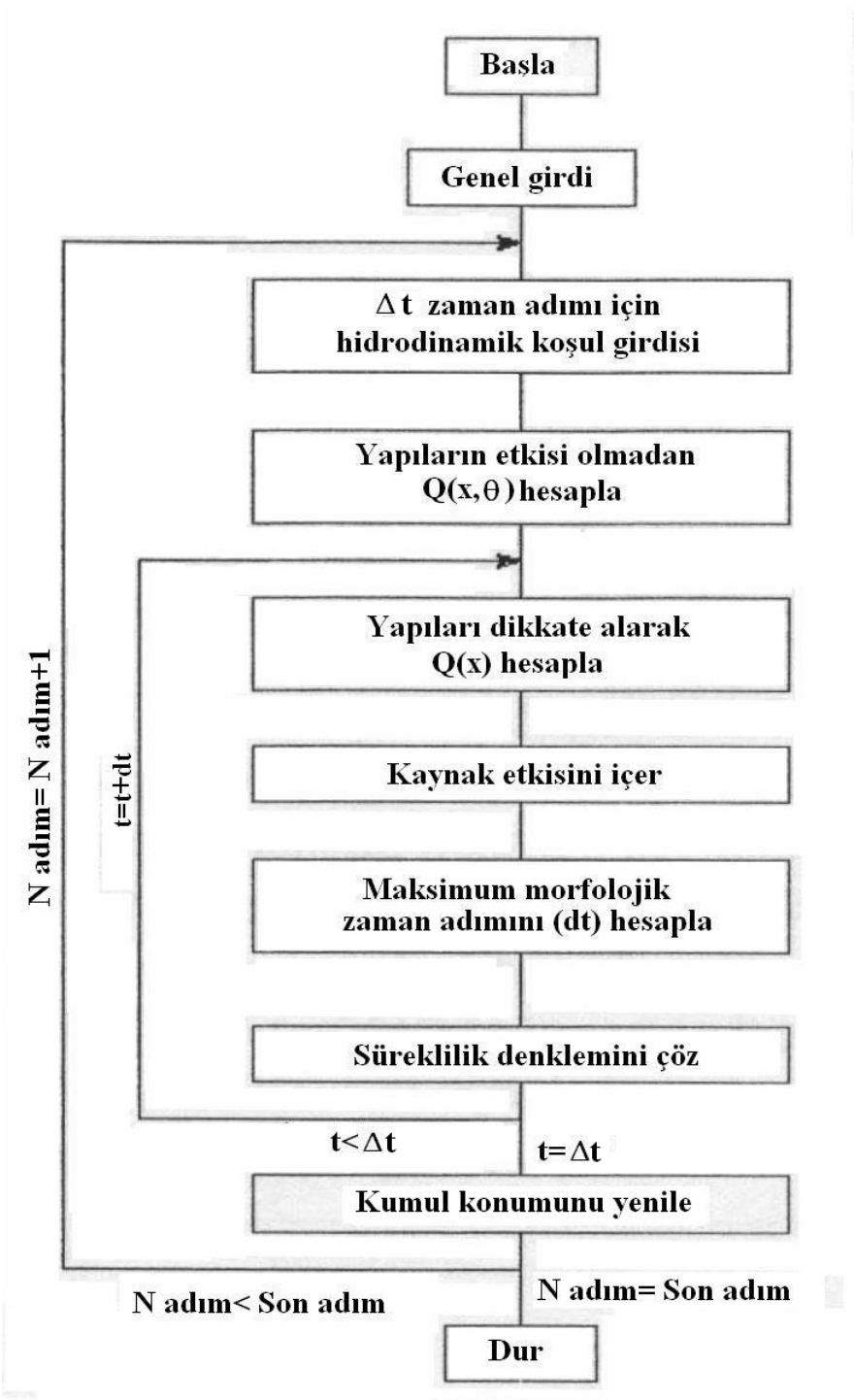
H_0= Referans derinliğindeki dalga yüksekliği (Düzensiz dalga için H_{rms}),

α_0= Referans derinliğindeki dalga geliş açısı,

T= Dalga periyodu,

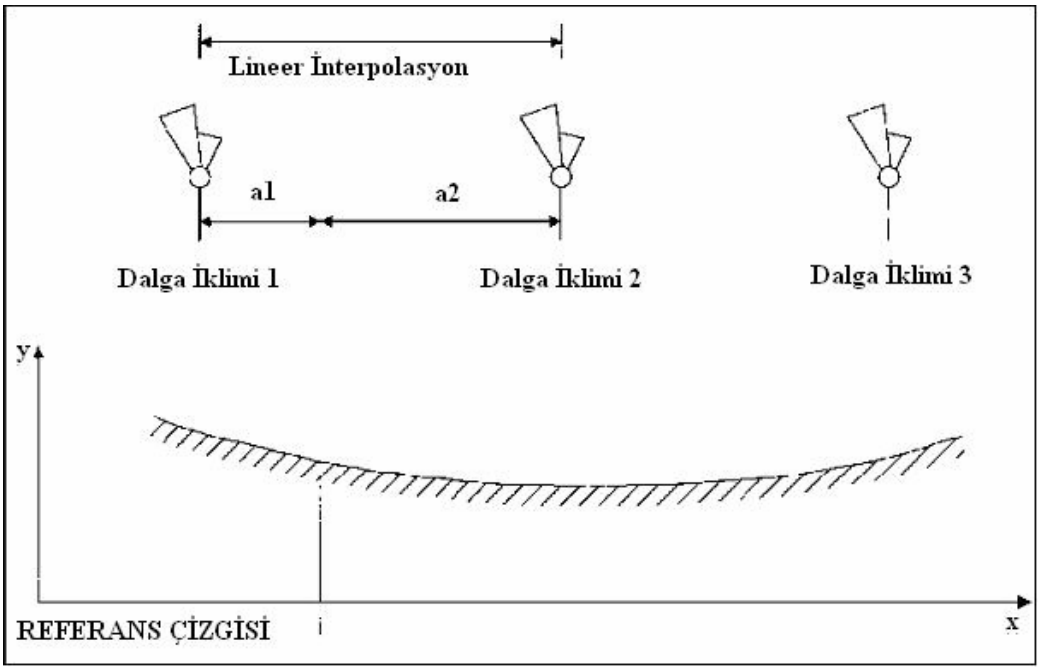
SS= Ortalama su seviyesinden itibaren su seviyesinde gözlenen fark,

V_c= Akıntı hızıdır.



Şekil 3.5 LITLINE modülünün akış şeması (DHI, 2003d)

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere bir referans çizgisi boyunca birden çok dalga iklimi belirlenebilmektedir. Sayısal model bu dalga iklimleri arasında lineer interpolasyon yaparak ara noktalardaki dalga iklimi parametrelerini hesaplayabilmektedir.



Şekil 3.6 Referans çizgisi boyunca değişen dalga iklimi (DHI, 2003d)

Belirlenen bir kıyı boyu konumunda (x_i), dalga sapma ve sığlaşmaya uğratılarak kırılma bölgesine iki adımda getirilmektedir. Sapma, (3.33) eşitliği ile verilen Snell yasasına göre belirlenmektedir.

$$\sin(\alpha_2) = \frac{L_2}{L_1}\sin(\alpha_1) \tag{3.33}$$

burada;

L= Dalga boyu,

α = Dalga geliş açısıdır.

Sığlaşma hesapları ise (3.34) eşitliği ile verilen, dalga ortogonalleri boyunca enerji akısı dengesine dayanmaktadır.

$$H_2 = H_1\sqrt{\frac{\cos(\alpha_1)(1+G_1)\tanh(k_1h_1)}{\cos(\alpha_2)(1+G_2)\tanh(k_2h_2)}} \tag{3.34}$$

burada;

k= Dalga numarası (k=2π/L),

h= Su derinliğidir.

$$G = \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \tag{3.35}$$

LITLINE yazılımındaki her zaman adımı (Δt) kıyı boyu taşınım debisindeki maksimum değişime göre hesaplanmaktadır. (3.36) eşitliğinde Courant sayısı verilmektedir. Modelde kabul edilen Courant sayısı 1'dir. Bu değerden daha büyük sayılar hesapları hızlandırmakta ancak stabilite problemi oluşturmaktadır.

$$Cou_{maks} = \frac{\left|\frac{\partial y}{\partial t}\right|_{maks} \Delta t}{\Delta y} = \frac{\left(\frac{\Delta Q_{maks}}{\Delta x\, h_{aktif}}\right)\Delta t}{\Delta y} \tag{3.36}$$

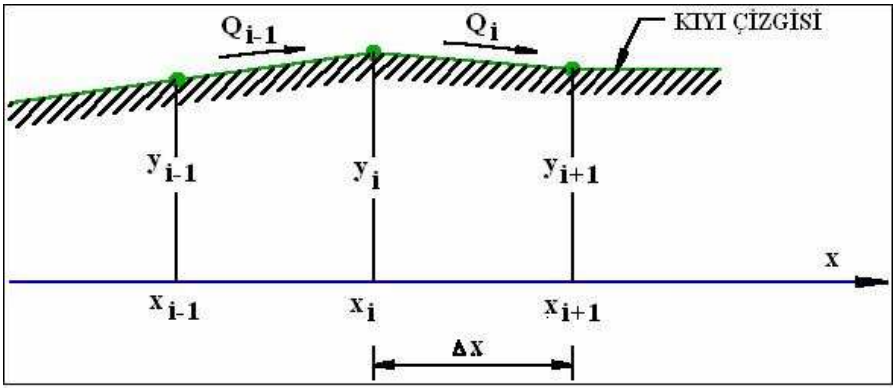
Yazılıma Courant sayısı girdi olarak tanımlanmakta ve (3.37) eşitliğine göre morfolojik zaman adımı hesaplanmaktadır.

$$\Delta t = \frac{Cou_{maks}\, \Delta y\, \Delta x\, h_{aktif}}{\Delta Q_{maks}} \tag{3.37}$$

burada;

$$\Delta Q_{maks} = \left|Q(i) - Q(i-1)\right|_{maks} \tag{3.38}$$

(3.31) eşitliği ile verilen katı madde taşınımı için süreklilik denklemi kapalı Crank-Nicholson şeması kullanılarak çözülmektedir. Şekil 3.7'de kıyı boyu doğrultusundaki ayrıklaştırma görülmektedir.



Şekil 3.7 Kıyı boyu ayrıklaştırma (DHI, 2003d)

Q_i, x_i ve x_{i+1} arasındaki taşınım miktarını belirtmektedir. "t" alt indisi şu andaki zamanı gösterirken "t+1" alt indisi gelecek zamanı belirtmektedir. "t+1" zamanına karşılık gelen taşınım debisi (3.39) eşitliğinde verilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$a_i y_{i-1,t+1} + b_i y_{i,t+1} + c_i y_{i+1,t+1} = d_i \tag{3.39}$$

burada;

$a_i=(1-\alpha)dQ_{i-1}$ (3.40)

$c_i=(1-\alpha)dQ_i$ (3.41)

$$b_i=\frac{\Delta x^2 h}{\Delta t}-a_i-c_i \quad (3.42)$$

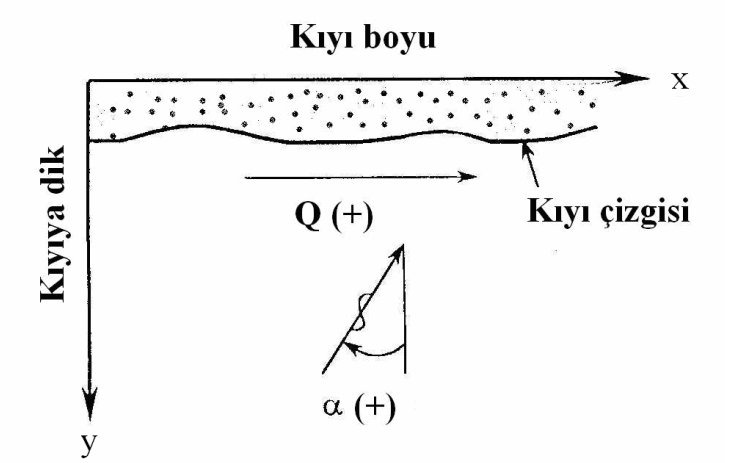
$d_i= a_i y_{i-1,t}+b_i y_{i,t}+c_i y_{i+1,t} -\Delta x\ (Q_{i,t}-Q_{i-1,t}-QS_i)$ (3.43)

a_i, b_i, c_i ve d_i, iki sınır şartı ve şimdiki zaman adımı için hesaplanmaktadır. Tüm kıyı boyu doğrultusundaki denklem sistemleri Gauss eliminasyon yöntemiyle çözülmektedir. (3.40) ve (3.41) eşitliklerindeki α parametresi Crank-Nicholson faktörüdür. Bu faktör çözüm şemasının ne kadar kapalı olacağına karar vermektedir. Faktör değerinin 1 olması tam bir kapalı çözümü verirken, 0 olması tam bir açık şemayı vermektedir.

3.5.2 Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesinde Kullanılan Tek Çizgi Teorisi

Kıyı boyu katı madde taşınımı nedeniyle kıyı çizgisi boyunca yığılma ya da erozyon meydana gelebilmektedir. Erozyon ve yığılma nedeniyle kıyı çizgisinde meydana gelecek değişim "Tek Çizgi Teorisi" yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Bir boyutlu (1-D veya tek çizgi) kıyı morfoloji modeli tüm sayısal kıyı modellerinin içinde en pratik olanıdır. Bu modelde, Şekil 3.8'de gösterilen koordinat sistemi kullanılmaktadır. Bir 1-D modeli iki basit 1-D denklemini çözmektedir. Birinci denklem (1-D morfoloji denklemi) kütlenin korunumunu tariflemekte ve kıyı boyu değişimini uzaklığın fonksiyonu olarak belirlemektedir. İkinci denklem katı madde hareketi denklemidir. Bu denklem, dalga iklimi ve kıyı parametrelerinin fonksiyonu olarak kıyı boyu hacimsel katı madde miktarını belirlemektedir (Kamphius, 2000).

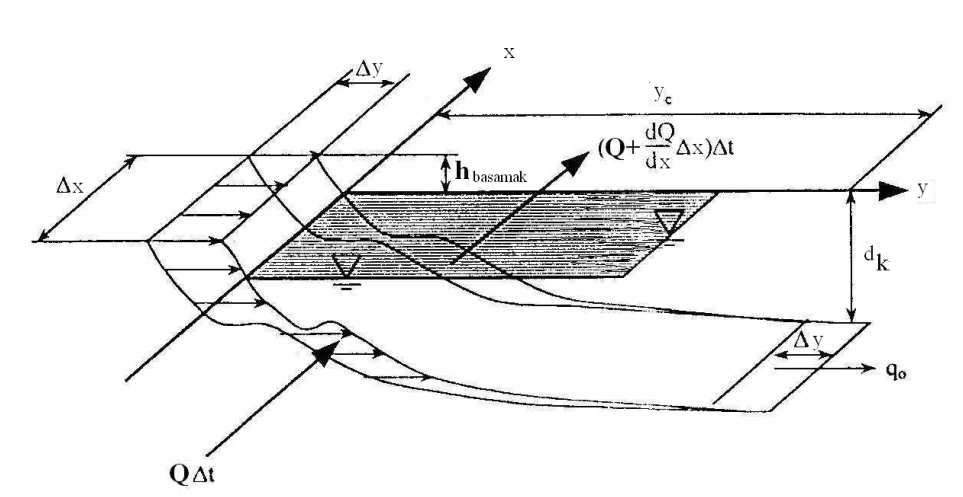


Şekil 3.8 Koordinat ekseni (Kamphius, 2000)

3.5.2.1 1-D Morfoloji Denklemi

Bir boyutlu morfoloji denklemi, sabit şekilli kıyı profili tabanının kapama derinliğinde (d_k) yatay olduğunu kabul etmektedir. Bu Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Kapama derinliği (d_k): Normal koşullarda oluşan dalga şartlarında kıyı profilinin değişmediği derinliktir. Bu derinlik kıyı profillerinden veya hidroğrafik grafiklerden ölçülebilmektedir. Aynı zamanda dalga ikliminden de tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3.9 1-D modeli için kütlenin korunumu şeması (Kamphius, 2000)

Erozyon, profilin kara tarafına kaymasına, yığılma ise deniz tarafına kaymasına sebep olmaktadır. Profil aynı kaldığından dolayı tüm eşderinlik eğrileri aynı mesafeyi katetmektedir ve bir eşderinlik eğrisi tüm kıyı hareketini simgelemektedir. Bu nedenle 'tek çizgi' yöntemi olarak da bilinmektedir.

Kıyı boyu kütle korunumunu gösteren denklem;

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{h_{aktif}}\left\{\frac{dQ}{dx} - q_0\right\} = -\frac{1}{\left(h_{kumul} + h_{basamak} + d_k\right)}\left\{\frac{dQ}{dx} - q_0\right\} \tag{3.44}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

burada;

y: Kıyı çizgisinden açık denize doğru olan uzaklık,

h_{aktif}= Toplam profil derinliği,

$h_{basamak}$= Basamak yüksekliği,

h_{kumul}= Kumul yüksekliği,

d_k= Kapama derinliği,

Q: Kıyı boyu katı madde taşınım debisi,

q_0: Kıyı boyu doğrultusunda birim mesafede kıyıya dik net kum taşınımıdır.

3.5.2.2 Katı Madde Taşınımı

Potansiyel Katı Madde Taşınımı

Daha önce geliştirilen hacimsel ifadelerle kıyı boyu katı madde taşınımı hesaplanabilmektedir. Bu ifadelerin basitleştirilmesi ile birçok hesap uzun zaman gerektirmeden yapılabilmektedir. Kıyı parametreleri ve dalga verileri büyük ölçüde belirsizlik içerdiğinden, hacimsel katı madde taşınım ifadeleri kullanarak basitleştirme gerçekleştirilmektedir.

Hacimsel katı madde taşınımı için CERC (1984) veya Kamphius (1991) ifadeleri kullanılabilmektedir.

Kamphius'ün (1991) ifadesi ile katı madde taşınım debisi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q = 7.3\, H_{sb}^{2}\, T_{p}^{1.5}\, m_{b}^{0.75}\, d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}\alpha_{b} \quad (\mathrm{m}^3/\mathrm{yıl}) \tag{3.45}$$

Eğer yapıların koruma bölgesinde olduğu gibi dalga yüksekliğinde kıyı boyu gradyanı mevcutsa dalga açısı terimi değiştirilerek dikkate alınabilmektedir.

$$\left[\sin^{c_1} 2\alpha_b - \frac{c_2}{m_b}\cos\alpha_b \frac{dH_{sb}}{dy}\right] \tag{3.46}$$

c_1= 1 (CERC (1984)ifadesi)

c_1= 0.6 (Kamphius (1991) ifadesi)

c_2= 1-2 (Hanson ve Kraus, 1989)

Gerçek Katı Madde Taşınım Miktarı

Katı madde taşınım ifadeleri potansiyel katı madde taşınımını hesaplamaktadır. Pratikte, fırtına koşulları hızlı değişmektedir ve kumun hacim olarak değişimini hesaplamak sınırlıdır. Bu sebeple daha önceden verilen debi denklemleri gerçek katı madde taşınımını tahmini olarak hesaplamaktadır.

$$Q_a = C_Q . Q_p \tag{3.47}$$

burada;

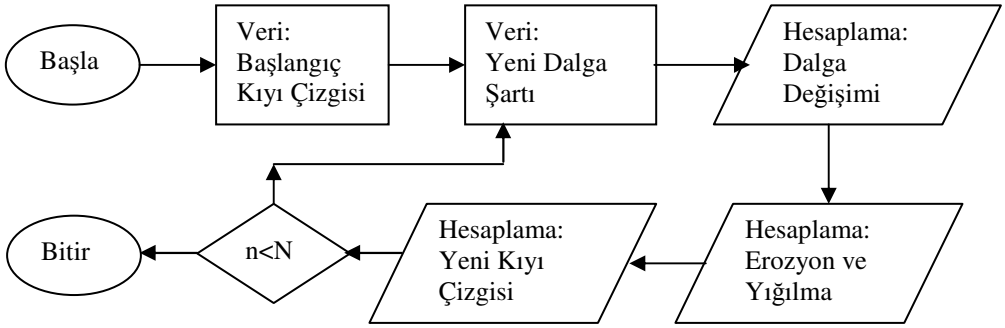
Q_a= Gerçek debi

Q_p= Potansiyel debi

C_Q= İkinci kalibrasyon sayısıdır. $0 \le C_Q \le 1$

3.5.2.3 Dalga Değişim Hesabı

Şekil 3.10'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 tanımlanır. 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 yapılır ve t_f=N. Δt süresinde sonlanır. Hesapların sürekli tekrarlanmasından dolayı bir 1-D modeli, basit dalga değişim hesaplarını kullanmaya ihtiyaç duymaktadır. Daha karmaşık sapma hesapları kullanılabilmektedir fakat bu daha fazla zaman gerektirecektir (Kamphius, 2000).



Şekil 3.10 Hesap şeması (Kamphius, 2000)

3.6 Konu ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar

3.6.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı ile İlgili Çalışmalar

Bölüm 3.3'te kıyı boyu katı madde taşınımı ile ilgili yapılan çalışmalar özet olarak anlatılmıştır. Kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin elde edilmesinde kullanılan modeller ve bu modellerde kullanılan eşitlikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de sınıflandırılmıştır. Ancak tüm kullanılan bu modellerde mevcut olan sınırlamalar ve/veya eksikler çeşitli araştırmacılar tarafından eleştirilmektedir.

Wang vd. (2002), çalışmalarında dalga kırılma tipinin (spilling veya plunging tipi) kıyı boyu katı madde taşınım miktarındaki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, Birleşik Devletler Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi (ERDC) Kıyı ve Hidrolik Laboratuarı'nda (CHL) kurulan Büyük Ölçekli Katı Madde Taşınım Düzeneği'nde (LSTF)

deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney düzeneği 50 m genişliğinde (kıyı boyu mesafesi), 30 m uzunluğunda (kıyıya dik mesafe) ve 1.4 m yüksekliğindedir. Katı madde taşınım deneylerinin gerçekleştirilmesi için deney düzeneğinin ortasına kuvartz kumundan hareketli bir taban, üniform bir sahili benzeştirecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu sahil 35 m genişliğinde, 20 m uzunluğunda ve 20 cm kalınlığındadır. Dört adet senkronize çalışan dalga üreteci açık deniz tarafında tek yönlü uzun dalga üretimi amacı ile yerleştirilmiştir. Kıyı boyu akıntısı ve katı madde taşınımı sağlamak amacıyla 20 adet akım kanalı düzenekte bulunmaktadır (Hamilton vd., 2001). Bu düzenekte yapılan deneyler dalga kırılma tipinin etkisini belirlemenin yanında yapılan ölçümlerle mevcut katı madde taşınım modellerinin doğruluğunu araştırmak için gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar iki türlü dalga kırılma tipinde gerçekleştirilmiştir. Her iki kırılma tipi için de geniş spektruma sahip olan düzensiz dalgalar kullanılmıştır. Spilling tipi kırılmada kırılan belirgin dalga yüksekliği (H_{sb}=0.27 m), pik spektral periyod (T_p=1.5 s) ve kırılan ortalama dalga yönü (α_b=6.5°) olarak, plunging tipi kırılmada kırılan belirgin dalga yüksekliği (H_{sb}=0.24 m), pik spektral periyod (T_p=3.0 s) ve kırılan ortalama dalga yönü (α_b=6.4°) olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kum iyi sınıflanmış ve 0.15 mm ortalama tane çapına sahiptir. Kıyı boyu katı madde taşınım ölçümleri kıyı denge konumuna ulaştıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Spilling tipi kırılmada kıyı 14 saatte denge konumuna ulaşırken, plunging tipi kırılmada büyük dalga periyodundan dolayı 4 saatte ulaşmıştır.

Araştırmacılar toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarını düzeneğin aşağı kıyısına yerleştirilen katı madde kapanlarında ölçülen birim genişlikteki katı madde akılarının basit olarak toplanması ile elde etmişlerdir. Çizelge 3.3'te ölçülen ve farklı yöntemlerle hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım miktarları verilmektedir.

Araştırmacıların yaptığı deney sonuçları ve diğer katı madde taşınım yöntemleri karşılaştırıldığında CERC (1984) yönteminin oldukça büyük tahmin yaptığı gözlemlenmektedir. Kamphuis (1986) yöntemi kıyı boyu katı madde taşınımında (3.48) eşitliğini kullanmaktadır.

$$Q = 1.28 \frac{H_{sb}^{3.5} m}{d_{50}} \sin\left(2\alpha_b\right) \tag{3.48}$$

Kamphuis (1991) yönteminde ise (3.48) eşitliğine dalga periyodu eklenmiştir. Bu sebeple bu yöntemde farklı kırılma tipleri için tutarlı tahminler elde edilmiştir. Dispersiyon denklemiyle

dalga boyuna bağlı olan dalga periyodunun dalga dikliği, dolayısıyla dalga kırılma tipinde önemli bir etkisi olduğu araştırmacılar tarafından gözlenmiştir.

Çizelge 3.3 Ölçülen ve tahmin edilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarları arasında karşılaştırma (Wang vd., 2002)

Kırılma Tipi	**Spilling**	**Plunging**
	Taşınım Miktarı (m^3/yıl)	
Ölçüm	2660	7040
CERC Yöntemi	18040	23850
Kamphuis (1986) Yöntemi	8130	9100
Kamphuis (1991) Yöntemi	1870	5360
Kraus (1988) Yöntemi	2670	3150
	Fazla (+) veya Az (-) Tahmin Yüzdesi (%)	
CERC Yöntemi	+578	+239
Kamphuis (1986) Yöntemi	+206	+29
Kamphuis (1991) Yöntemi	-30	-24
Kraus (1988) Yöntemi	0	-55

Çalışmada maksimum kıyı boyu katı madde taşınımın spilling tipi kırılmada tırmanma bölgesinde, plunging tipi kırılmada ise tırmanma bölgesine ek olarak kırılma çizgisinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca araştırmacılar çalışmaları sırasında CERC (1984) yönteminin kıyı boyu katı madde taşınım debisini deney ölçümlerine göre oldukça fazla miktarda tahmin ettiğini ve bu yöntemin düşük enerjili dalga koşullarında değil fırtına koşullarında uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Katı madde debisini daha küçük tahmin eden Kamphuis (1991) yönteminin ise düşük enerjili dalga koşullarında kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Smith vd. (2004), Wang vd.'nin (2002) yapmış oldukları çalışmayı devam ettirmişler aynı büyük ölçekli katı madde taşınım düzeneğinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar dört farklı dalga koşulunun (Çizelge 3.4) kıyı boyu katı madde taşınımı üzerindeki etkisini ve diğer model (CERC, 1984; Kamphuis, 1991; Bailard, 1984; del Walle vd., 1993) sonuçları ile karşılaştırmasını gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge 3.4'te verilen H_{m0} dalga üretecinin yanında ölçülen spektral belirgin dalga yüksekliğidir. Dalga koşulları enerji seviyelerine göre gruplandırılmıştır. Deney 1 ve Deney 3 yüksek enerji koşulunu simgeleyen, birbirine yakın değerlerde dalga yükseklikliklerini içerirken, Deney 5 ve Deney 6 düşük enerji seviyesindeki dalga yükseklikliklerini içermektedir. Dalga üreteçleri 0.9 m derinliğinde konumlandırılmıştır. Deneylerin sonucunda Çizelge 3.5'te verilen katı madde taşınım debileri elde edilmiştir. Çizelgede her deneyin sonucunda ölçülen kıyı boyu katı madde debileri ve diğer modellerle hesaplanan kıyı boyu katı madde debileri

gösterilmektedir. Wang vd.'nin (2002) yapmış olduğu çalışmadaki gibi toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarı düzeneğin aşağı kıyısına yerleştirilen katı madde kapanlarında ölçülen birim genişlikteki katı madde akılarının basit olarak toplanması ile elde edilmiştir.

Çizelge 3.4 Kıyı boyu katı madde taşınımı deneylerinin dalga koşulları (Smith vd., 2004)

Deney No	**Kırılma Tipi**	**H_{m0} (m)**	**H_{sb} (m)**	**T_p (s)**	**d (m)**	**α_b (°)**	**m_b (-)**
1	Spilling	0.25	0.26	1.5	0.9	6.5	0.031
3	Plunging	0.23	0.27	3.0	0.9	6.4	0.024
5	Spilling	0.16	0.18	1.5	0.9	6.7	0.025
6	Plunging	0.19	0.21	3.0	0.9	6.4	0.020

Çizelge 3.5 Ölçülen ve hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınımları arasında karşılaştırma (Smith vd., 2004)

Deney No	**Ölçüm (m^3/yıl)**	**CERC (1984) (m^3/yıl)**	**Kamphuis (1991) (m^3/yıl)**	**Bailard (1984) (m^3/yıl)**	**Del Walle vd. (1993) (m^3/yıl)**
1	2660	20740	2390	10660	20570
3	7040	22900	6060	14570	3300
5	1130	8400	1010	4500	7760
6	4040	12040	3160	5250	11010

Araştırmacılar bu çalışmada da CERC (1984) yönteminin ölçüm sonuçlarına göre oldukça büyük tahminler yaptığını (Spilling tipi kırılmada yaklaşık 7-8 kat, plunging tipi kırılmada ise 3 kat) belirtmişlerdir. Ancak CERC (1984) yönteminde kullanılan K katsayısının kalibre edilmesiyle bu oranlar ölçümlere yaklaştırılabilmektedir. Çizelge 3.5'te verilen değerler K katsayısının 0.39 alınmasıyla bulunnan değerlerdir. Spilling tipi kırılmada K=0.05 alındığında CERC (1984) yöntemi ile elde edilen katı madde debileri ve ölçüm değerleri arasındaki fark %5 oranına kadar azaltılabilmektedir. Aynı durum Plunging tipi kırılmada da söz konusudur. Eğer K=0.13 değeri kullanılırsa ölçüm ve hesaplanan değerler arasındaki fark %8 oranına düşürülebilmektedir. Araştırmacılar Kamphuis (1991) yönteminin yine ölçüm sonuçları ile daha uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Çalışmada kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımı için üç bölge belirtilmiştir: kırılmanın başladığı bölge, surf bölgesinin içi ve tırmanma bölgesidir. Plunging tipi kırılmada en çok taşınım kırılmanın başladığı bölgede meydana gelmektedir. Bu kırılma tipinde taşınım için daha fazla katı maddenin askıya

geçtiğini göstermektedir. Surf bölgesi içinde ise dalga yüksekliği, taşınımı belirleyen ana parametredir ve burada taşınım dalga periyodundan bağımsızdır. Tırmanma bölgesi ise taşınımın büyük bir yüzdesinin oluştuğu, dalga yüksekliği, dalga periyodu ve kıyı eğiminin etkili olduğu bir bölgedir.

3.6.2 Kıyı Çizgisi Değişiminin Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar

Kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesinde kullanılan tek çizgi teorisi ilk olarak Pelnard-Considere (1956) tarafından sunulmuştur. Araştırmacı dengede bir kıyı profili kullanarak düz bir kıyının gelişiminin belirlenmesi için analitik tek çizgi teorisini kullanmıştır. Sabit dalga yönü ve küçük yaklaşım açısı kabulü ile kıyı boyu katı madde taşınım debisi (3.49) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$Q=Q_0 \sin 2\alpha_e = Q_0 \sin 2(\alpha_b - \frac{dy}{dx}) \tag{3.49}$$

burada;

Q_0, daha önce CERC (1984) veya Kamphuis (1991) tarafından verilen kıyı boyu katı madde debisidir.

Herhangi bir zamanda, orijinal doğrusal kıyı çizgisine göre yerel kıyı çizgisi doğrultusu dy/dx'dir ve dönen kıyı çizgisine göre etkili yerel kırılma açısı (α_e) aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\alpha_e=\alpha_b - \frac{dx}{dy} \tag{3.50}$$

Analitik olarak morfoloji problemini çözmek için α_e çok küçük kabul edilmektedir.

$$\sin 2\alpha_e \rightarrow 2\alpha_e \tag{3.51}$$

Yapılan küçük açı kabulu ile (3.51) eşitliği şu hale gelmektedir:

$$Q= 2\, Q_0 (\alpha_b - \frac{dy}{dx}) \tag{3.52}$$

(3.51) eşitliğinin diferansiyelinin alınması aşağıdaki sonucu vermektedir.

$$\frac{dQ}{dx} = -2Q_0 \frac{d^2 y}{dx^2} \tag{3.53}$$

q_0=0 kabul edilerek, (3.44) eşitiliğinde yerine konmasıyla difüzyon denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{dy}{dt} - \underline{D}\frac{d^2y}{dx^2} = 0 \tag{3.54}$$

burada;

$$\underline{D} = \frac{2Q_0}{h_{aktif}} = \frac{Q}{\alpha_b h_{aktif}} \tag{3.55}$$

Q= m^3/saat, $\underline{D}$ = m^2/saat'tir.

Le Mehaute ve Soldate (1977), tek çizgi teorisi kabullerini incelemişler ve kıyı çizgisi değişimi için birçok analitik çözüm geliştirmişlerdir. Araştırmacılar uzun dönem kıyı çizgisi gelişimini belirlemek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu model su seviyesi değişimi, dalga sapması, dalga sığlaşması, rip akıntıları, kıyı yapıları ve kıyı yenileme gibi çeşitli etkileri içermektedir.

Walton ve Chiu (1979) ve Walton (1994) üç adet tek çizgi modeli geliştirmişlerdir. Bunlardan ikisi lineerleştirilmiş kıyı çizgisi modeli diğeri farklı yaklaşımlar kullanan lineer olmayan modeldir. Tüm bu modeller parabolik difüzyon denklemleridir. Bu denklemlerin çözümleri farklı geometrilerdeki kıyı şekillerine uygulanacak olan kıyı yenilemesi ile bağlantılıdır. Walton ve Chiu (1979) tarafından geliştirilen yeni çözümler dört senaryo içermektedir: üçgen kıyı dolgusu, dikdörtgen kıyı dolgusu, bir açıklık ile uzun dolgu ve tek taraflı uzun dolgu.

Larson vd. (1987) ve Larson vd. (1997), bir kıyının gelişimini benzeştirebilmek için detaylı olarak 25 adet önceden geliştirilmiş analitik modeli incelemişlerdir. Sonuçta kıyı yapılarıyla veya herhangi bir kıyı yapısı olmadan kıyı gelişimi için Laplace taşınım tekniğini kullanan genel bir çözüm yöntemi üretmişlerdir. Sınır şartlarına bağlı olarak bu yöntemler farklı koşullar içermektedir. Bunlar: kıyı yenileme, kum taraması, nehir deşarjları, mahmuzlar ve jettyler, ardışık dalgakıranlar ve kıyı duvarlarıdır.

Dabees (2000) çalışmasında analitik kıyı çizgisi değişimi çözümlerinin, değişik problemlere karşı kıyının davranışını belirlemede kolay ve ekonomik çözümler sağladığını belirtmiştir. Analitik çözümlerde kıyı profilinin sabit kaldığını düşünmenin yanında temel denklemlere matematiksel çözüm sağlamak için bir çok kabul daha yapılmaktadır. Çizelge 3.6'da araştırmacının belirtmiş olduğu tek çizgi teorisinin analitik çözümünde yapılan kabuller görülmektedir.

Çizelge 3.6 Tek çizgi teorisinin analitik çözümünde kullanılan kabuller ve sınırlamalar (Dabees, 2000)

	Kabul	**Sınırlama**
1	Sabit profil şekli	Profilin zamana ve konuma göre değişimi belirtilemez.
2	Kıyıya dik taşınım yok $q_0=0$	Fırtına sebepli açık deniz kayıpları ve mevsimsel değişikler belirlenemez.
3	Küçük kırılma açısı ($\sin 2\alpha_b = 2\alpha_b$)	Sadece küçük kırılma açılarında geçerli.
4	Küçük kıyı çizgisi değişim açısı $(\alpha_s = (\partial y / \partial x))$	Sadece düz kıyı çizgileri için geçerli. Yapıların yakınlarında hatalı sonuçlar vermektedir.
5	Konuma göre sabit dalga şartı	Kırılma ve dönme nedeniyle kıyı boyu dalga yüksekliğindeki değişimler belirlenemez.
6	Zamana göre sabit dalga şartı	Kırılmanın hesaba katılmaması, düz olmayan kıyı çizgileri için kıyı çizgisi tahmininde hatalı sonuçlar vermektedir.
7	Basit sınır şartları	Q'nun sınırda belirtildiği basit örnekler için geçerlidir. Birden çok yapı için çözüm yapılamaz.

Son zamanlarda Dean (2002) önceki çalışmalarını (Dean, 1984) genişleterek kıyı çizgisi değişiminin analitik çözümünü kıyı yenileme çalışmalarına uygulamıştır. (3.54) eşitliği ile verilen difüzyon denklemine farklı geometri, başlangıç ve sınır şartları tanımlayarak çözümler üretmeye çalışmıştır. Bu çözümler dört farklı kıyı yenileme senaryosunu içermektedir: düz bir kıyıda dikdörtgen kıyı dolgusu, düz bir kıyıda trapez kıyı dolgusu, bariyer adada dikdörtgen kıyı dolgusu ve uzun bariyer adada körfez yanında dikdörtgen kıyı dolgusu. Dean (2002), mahmuz veya kıyı duvarı, kum geçişi veya kıyı yenileme olması durumuna göre kıyı çizgisinin davranışının (3.54) eşitliğinde verilen difüzyon katsayısı ile yorumlanabileceğini belirtmiştir.

Kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi analitik çözümlerin dışında sayısal modellerle de gerçeklekleştirilmektedir. Günümüze kadar birçok araştırmacının yapmış olduğu farklı formüller, başlangıç ve sınır şartlarını içeren tek çizgi modelleri literatürde yer almaktadır.

Price vd. (1972), ilk sayısal tek çizgi modelini kullanan araştırmacılardır. Modellerinde temel sayısal denklemleri elde etmek için iki yaklaşımda bulunmuşlardır. Bunlardan ilki, dalga enerjisinin, kıyı boyu koordinatının (x) ve küçük yaklaşım açısının (α) fonksiyonu olduğudur. Kıyı boyu katı madde taşınım debisi (Q) lineerleştirilebilmektedir. Bu

lineerleştirmenin sonucunda katı madde süreklilik denklemi ile birlikte, kıyı çizgisi hareketini tanımlayan açık sonlu farklar denklemi ortaya çıkmaktadır. İkinci yaklaşımda ise kıyı boyu katı madde taşınım debisi farklar formuna çevrilmektedir. Bu, kıyı boyu katı madde taşınım debisini, kıyı çizgisi koordinatlarını ve dalga açısını sonlu farklar denkleminde ifade edebilme kolaylığını sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşımın sınır şartlarının kurulması açısından dezavantajı bulunmaktadır. Araştırmacılar tarafından bu model ilk olarak laboratuarda bulunan dalga baseninde uzun bir mahmuz yanındaki kıyı çizgisi değişimini tahmin etmekte kullanılmıştır.

Komar vd. (1976), çalışmalarında Oregon kıyısında net kıyı boyu taşınımının sıfır olduğu bir alanda jetty inşaasıyla meydana gelen kıyı çizgisi değişimini incelemişlerdir. Bu bölgede inşaa edilen jetty sebebiyle kıyı çizgisinde erozyon ve yığılma meydana gelmiştir. Sayısal model 20 yıl için koşturulmuş, elde edilen sonuçlar ölçümlerle karşılaştırıldığında oldukça iyi sonuç vermiştir. Koy ve jettylerden dolayı meydana gelen dalga sapması modelde yer almamıştır. Ayrıca sayısal model tüm dalga iklimini de içermemektedir. Bu basitleştirmelerden kaynaklanan hataları en aza indirmek için kıyı boyu katı madde taşınım debisi 1/10 oranında azaltılmıştır. Araştırmacılar kalibrasyon için sahada ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin mevcut olması durumunda daha uygun sonuçların elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Perlin ve Dean (1978), kıyıya dik geçirimli ve geçirimsiz jettylerin olması durumunda kıyı çizgisi davranışını incelemişlerdir. Ayrıca dengedeki kıyıda bir mahmuz sistemi ve açık deniz dalgakıranı bulunmaktadır. Araştırmacılar çalışmalarında üç ayrı sayısal model kullanmışlardır. Bunlar: tek çizgi açık model, tek çizgi kapalı model ve iki çizgi açık modeldir. Ayrıca basitleştirilmiş dönme ve sapma şemaları da model içine dahil edilmiştir. Kıyı çizgisi değişiminde ilk olarak kapalı model kullanılmıştır. Jettylerin etkisinde hesaplanan kıyı çizgisi değişimi laboratuar verisi ile karşılaştırılmıştır. Açık deniz dalgakıran etkisindeki kıyı çizgisi değişimi ise katı maddenin biriktiği ve sürekli tarandığı Kanal Adası Limanı'ndaki (Kaliforniya) saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Tek çizgi modeli laboratuar ölçümleri ile uyum sağlamıştır. Ancak bölgede dalga ölçüm verisi bulunmadığı için ve uygun bir tahmin sonucu elde edebilmek için katı madde taşınım debisindeki katsayı dört ile çarpılmıştır.

Hanson ve Kraus (1985), araştırmalarında sayısal kıyı çizgisi modelinde (tek çizgi) kıyı duvarı etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmada tek çizgi modelinin temel denklemleri çerçevesinde kıyı duvarını içeren yeni bir yöntem sunmuşlardır. Birçok çalışmada kıyı duvarı etkisi tek çizgi sayısal modelinde dikkate alınmıştır. Bu çalışmalarda ya kıyı boyu

katı madde taşınımı kıyı çizgisinin kıyı duvarı ile kesiştiği yerde sıfır alınmış ya da keyfi bir işlem uygulanmıştır. Hanson ve Kraus'un (1985) amacı ise tek çizgi modelinde kıyı duvarı etkisini gösteren yöntemin ana hatlarını belirtmek olmuştur. Kıyı duvarı etkisinin dikkate alınması yöntemini diğerlerinden ayıran özellik kum hacmini ve kıyı boyu kum hacmi taşınım yönünü korumasıdır. Araştırmacılar çalışmalarında dalga yansıması ile oturma, oyulma, ötelenme ve muhtemel kıyı duvarı çökmesini dikkate almamışlardır. Tek çizgi modelinde kıyı duvarının bulunduğu alanda net kum kazanımı olmamaktadır fakat böyle bir alanda sınır şartlarından geçen katı madde hareketi gözlenmektedir. Bu sebeple bu bölgede net kıyı boyu taşınım miktarını sıfıra eşitlemek yanlış olmaktadır. Taşınım debisi, toplam katı madde hacmini ve taşınım yönünü korumak amacıyla, katı maddeyi transfer eden kıyı duvarı civarındaki bölgelerin hesaplaması yapılacak şekilde ayarlanmalıdır. Araştırmacılar, kıyı duvarında kıyı seviyesi su seviyesinin altına düşerse yöntemin uygulanamayacağını vurgulamışlardır. Sonuç olarak, araştırmacıların sunduğu bu yöntem yardımıyla yapılacak olan kıyı çizgisi sayısal modelinde kıyı duvarını içeren durumlarda modeli geliştirmeyi sağlayacak esaslar ortaya çıkmıştır. Örneğin kıyı değişiminin çok çizgili modellerinde, kıyı duvarının önünde oluşacak kıyı eğimi değişimlerini açıklamak bu yöntemle mümkün olmaktadır.

Jayakumar ve R. Mahadevan (1993), çalışmalarında tek çizgi model denkleminin çözümü için iki sayısal yöntemden faydalanmışlardır. Bunlar açık ve kapalı sonlu farklar yöntemidir. Ayrıca araştırmacılar kıyı çizgisi gelişiminde, belirli bir düzen izlemeyen dalga yüksekliği, yönü ve periyodu gibi açık deniz parametreleri kombinasyonunun oluşma sırasının etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada Hindistan'ın doğu ve batı sahillerinde bulunan Madras ve Beypore limanları yanındaki kıyı çizgisi gelişimi sunulmuş ve kıyı çizgisi gelişimi tahmininde kullanılan tek çizgi benzeşim modelindeki sınırlamalar belirtilmiştir. Yapılan çalışmada, Lemehaute ve Soldate (1980) ve Kraus ve Harikai'nin (1983) kıyı çizgisi benzeşimi için kullandıkları sayısal şemalar tekrar edilmiştir. Kıyı çizgisi gelişiminin tahmininde sayısal şemalar kullanıldığında dalga istatistiği zaman serisi formunda gerekmektedir. Fakat açık denizde dalga parametrelerinin hangi sırada oluşacağını bilmek pek mümkün değildir. Bu sebeple modelin dalga parametrelerindeki sıra değişimine gösterdiği davranış sayısal deneylerle çalışılmaktadır. Araştırmacılar iki örnek saha üzerinde çalışmışlar (Madras ve Beypore Limanı) ve belirli dalga parametreleri verisinde kıyı çizgisi gelişimindeki kararsızlığı gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalar için dalga parametreleri (α, T, H_0) zaman serisi formunda veri olarak gerekmektedir. Bu pek mümkün olamadığı için araştırmacılar gereken bilgiyi aylık istatistiksel verilerden ve yakın kıyı rejimindeki dalga güllerinden elde etmişlerdir. Bu aylık

veriler ortalama dalga yüksekliği, yönü ve periyodu belirlemek için kullanılmıştır. Modelin dalga parametrelerindeki sıra değişimine gösterdiği davranışı incelemek için yapılan tüm sayısal deneylerde, başlangıç kıyı çizgisi düz alınmıştır. Ayrıca kıyıda kıyıyla bağlantılı ve kıyıya dik bir dalgakıran bulunmaktadır. Deneylerde kıyıya dik taşınım miktarı q_0=0 olarak alınmıştır. Deneyler parametrelerden birini değiştirip diğerlerinin sabit tutulmasıyla gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak dalgakırana yakın kıyı çizgisinin gelişiminde dalga geliş yönü sırasının belirgin bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

Loentyev (1997), kıyıya dik yapıların etkisinde fırtına koşulunda kıyı çizgisinin kısa dönemli gelişimini benzeştirmek amacıyla tek çizgi modeli geliştirmiştir. Araştırmacı kıyı çizgisi değişimi üzerinde iskele tipi yapıların etkisini incelemek için hibrid model kullanmıştır. Modelinde dalga yüksekliği kıyıya dik enerji denge denklemi ile elde edilmiştir. Dalga nedeniyle kabarma ve kıyı boyu akıntıları kıyıya dik ve kıyı boyu momentum denklemleri ile hesaplanmıştır. İskele etkisinden dolayı kıyı çizgisi değişimi yapının aşağı ve yukarı kıyısında olmak üzere iki kısımda incelenmiştir.

Baidei vd. (1994), Loentyev'in (1997) geliştirmiş olduğu modeli tek ve iki mahmuz için laboratuar koşullarında test etmiştir. Çalışmasında yukarı kıyı çizgisi aşağı kıyı çizgisi değişimine göre daha iyi modellenmiştir.

Perlin ve Kit (1999), çalışmalarında İsrail'in Ashdod ve Haifa şehirlerinde dalga ölçümü gerçekleştirmişler ve elde edilen yüksek kalitedeki yönsel dalga verisinin istatiksel analiziyle bu verileri İsrail kıyısındaki herhangi bir bölgenin katı madde taşınım hesabında kullanılabilir hale getirmişlerdir. Her iki veride de dalga yüksekliklerinin farklı aralıkları için yönsel değişimin detaylı hesabı korelasyon analizi kullanılarak sağlanmıştır. Kıyı boyunca farklı bölgelerdeki dalga yönü düzeltmeleri lineer interpolasyonla yapılmış ve her bölgedeki katı madde akısı hesaplamalarında bu dalga verilerinin her ikisi içinde (Ashdod ve Haifa) mükemmel uyum yakalanmıştır. Katı madde taşınım hesaplarında araştırmacılar LITPACK yazılımının LITDRIFT modülünü kullanmışlardır. Çalışma yapılan kıyı, Nil Kıyı bölgesine aittir ve Haifa körfezinin katı madde kaynağı Nil deltasıdır. Bu bölgedeki kıyı Haifa körfezindeki burun dışında genelde hafif eğrilik yapan düz bir kıyıdır. Sonuçlar dalga değişimini doğru belirlemenin oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır. LITPACK yazılımının katı madde taşınım hesaplarında kullanılması yönsel dalga değişimlerinin düzenlenmesi işlemini kolaylaştırmıştır. Bu yöntemle İsrail kıyısı için dalga yüksekliği ve yönlerini içeren düzeltilmiş dalga iklimi elde edilmiştir. Düzeltilmiş dalga verileriyle herhangi bir bölge için hesaplanan katı madde taşınım oranları bir kaç yüzdeyle uyum içindedir.

Szmytkiewicz vd. (2000), Polonya'da Wadysawowo Limanı'ndaki kıyı çizgisi değişimini belirlemek amacıyla dört ayrı model kullanarak bu modellerin karşılaştırmalarını gerçekleştirmiştir. Kıyı çizgisi gelişiminin belirlenmesinde kullanılan modeller, GENESIS, LITPACK, UNIBEST ve SAND94'tür. Araştırmacılar model sonuçlarını saha ölçümleri ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca saha ölçümlerine göre modellerin kendi aralarında karşılaştırılması da yapılmıştır. Sonuçlarda tüm modellerden elde edilen kıyı çizgisi değişimleri saha ölçümleri ile uyum sağlamaktadır. Ancak birbirleri ile karşılaştırıldığı zaman GENESIS modelinin en az tatmin edici sonucu verdiği gözlenmiştir. GENESIS modeli dalga orijinli bir modeldir. Örneğin katı madde taşınım debisi kırılan dalga yüksekliği ile doğrudan orantılıdır. Modelde çok az katı madde taşınım parametresi mevcuttur ve bu modeli kullanıcı açısından daha az esnek hale getirmektedir. LITPACK modeli ise kıyı boyu katı madde taşınımı açısından çok daha fazla parametre (kıyı profilleri, taban pürüzlülüğü, su seviyesi değişimi, detaylı dalga iklimi vb.) içermektedir. Ancak detaylı taşınım parametrelerine karşılık kıyı çizgisi gelişiminde net katı madde taşınımının etkin olduğu tek çizgi modelini kullanmasından dolayı bazı eksiklikler görülmektedir.

Kıyı morfolojisi gelişimini tahmin etmek için birçok sayısal model kullanılmaktadır. Hollanda Kıyı ve Deniz Yönetimi Ulusal Enstitüsü tarafından 2004 yılında hazırlanan raporda bu modeller uygulama alanları ve sınırlamalarıyla beraber sınıflandırılmıştır (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7 Kıyı çizgisi değişiminde kullanılan bazı sayısal modeller (Directorate General Environment European Commission, 2004)

Adı	Tanımı	Uygulama Limitleri
MIKE 21 PMS	MIKE 21 PMS (parabolic mild slope), yumuşak eğimli batimetri üzerinde yayılan lineer dalgaların sapma, sığlaşma, dönme ve yansımasını dikkate alan EMS (elliptic mild slope) denkleminin parabolik yaklaşımı üzerine kurulmuştur. Bir hakim dalga doğrultusu (x doğrultusu) kabulu ve bu doğrultuda geri dönüş akımı ve dönmenin ihmaliyle bu yaklaşım elde edilmiştir. PMS modülü, kıyısal katı madde taşınımının hesabında oldukça önemli olan dalga etkisindeki akıntıların benzeşiminde kullanılan gerilme akılarını da elde etmektedir.	Yansıma ve dönmenin hakim dalga doğrultusu boyunca ihmal edilebildiği yumuşak eğimli batimetriye sahip açık kıyı alanlarında uygulanmaktadır.
MIKE 21 ST	MIKE 21 ST (sediment transport), koheziv olmayan katı maddenin akıntı veya dalga-akıntı etkisindeki taşınım ve taban seviyesi değişimlerinin hesabında kullanılmaktadır. Model, Engelund-Hansen, Zyserman-Fredsie, Meyer-Peter ve Müller, Ackers-White ve Bijker tarafından verilen farklı taşınım teorilerinin sonuç ve karşılaştırmalarını vermektedir.	Koheziv olmayan katı maddeye uygulanmaktadır.
MIKE 21 MT	MIKE 21 MT (Mud Transport), akıntı ve dalga hareketi altında çamur ve kum/çamur karışımlarının erozyon, taşınım ve yığılmasını belirlemektedir.	MIKE 21 MT, kohezyonlu malzemeler veya kum/çamur karışımları için katı madde taşınım çalışmalarında, liman, ulaşım kanalları, akarsu ve haznelerin kumlanma problemlerinde ve tarama çalışmalarında kullanılabilmektedir.
SBEACH	SBEACH (Storm-induced BEAch CHange Model) fırtına dalgaları ve su seviye değişimleri ile oluşan kıyıya dik kumsal, eşik ve basamak erozyonunu modellemektedir. Modelin en son sunumu sert tabandaki eşik erozyonunu benzeştirebilmektedir.	

Çizelge 3.7 Devam

Adı	Tanımı	Uygulama Limitleri
UNIBEST-DE	Malzeme kaybı oluşan bir kıyıda fırtına sırasında gelişen kıyıya dik profili hesaplamak için oluşturulan bir modeldir. Fırtına kabarması dikkate alınmaktadır. Kırılan dalgalarla oluşan türbülans büyük miktarda katı maddeyi askıya geçirir ve askı malzemesinin taşınımı bu şartlar altında hakim taşınım mekanizmasıdır. Model, fiziksel modeller ve arazi verileriyle doğrulanmıştır ve değişken ağ boyutuna sahip bir boyutlu ağ üzerinde kıyıya dik taşınımları göstermektedir. Dalga ve su seviyelerinin zaman serilerinin tanımlanması gerekmektedir.	Model aşağıdaki uygulamalarda kullanılabilmektedir: - Ekstrem şartlar altında eşik erozyonu ve kıyı profili değişimi - Kıyı yenileme - Eşik kaplamalarının tasarımı
UNIBEST-TC	UNIBEST-TC, dalga hareketi, kıyı boyu gel-git akıntısı ve rüzgar etkisinde herhangi bir kıyı profili boyunca profil değişimini ve kıyıya dik katı madde taşınımını hesaplamaktadır. Model, taban sürtünmesi ve dalga kırılmasına bağlı dalga yayılması ve sönümlenmesini, asimetrik salınımlı akımı, uzun dalgaların ve dalga gruplarının etkisini, dalga etkisindeki geri dönüş akımını, Van Rijn'a göre katı madde taşınımını, rüzgarın oluşturduğu akıntıları modellemektedir.	Model çok miktarda girdi ve sayısal kaynağa gereksinim duymaktadır.
UNIBEST CL+	UNIBEST-CL+, kıyı boyunca belirli bölgelerde hesaplanan kıyı boyu taşınımının kıyı çizgisi değişiminde kullanıldığı katı madde denge modelidir. Kıyısal erozyon ve sebeplerini anlamak ve kıyı yapılarının etkisini belirlemek için kıyı sistemlerinde büyük ölçekli morfolojik analiz yapmaktadır. Ancak model aynı zamanda daha küçük ölçekli uygulamalarda da (mahmuzlar, kaplamalar, akarsu ağzı düzenlemesi, ardışık dalgakıranlar gibi) kullanılabilmektedir. Katı madde kaynak ve kuyuları, kara çökmesi veya deniz seviyesi yükselmesi, açık deniz katı madde kaybı, yapay kum geçişi ve kıyı taramasının etkisini benzeştirmek için herhangi bir yerde tanımlanabilmektedir.	
GENESIS	GENESıS (GENEralized model for SImulating Shoreline change), dalga hareketinin neden olduğu uzun dönem kıyı çizgisi değişiminin hesaplanması için tasarlanan bir modeldir. Tek-çizgi teorisini esas almaktadır. Model mahmuz, jeti, ardışık dalgakıranlar, kıyı duvarı ve plaj dolgusunun etkilerini de dikkate almaktadır. Yapılar etrafındaki dönme etkisi de dikkate alınmaktadır.	Genelde 1-100 km uzunluğundaki kıyılarda ve 1-100 ay arasındaki zaman ölçeğinde kullanılmaktadır. Kıyı boyu akıntısı modellenmemiştir (Szmytkiewicz vd., 2000).

Çizelge 3.7 Devam

Adı	Tanımı	Uygulama Limitleri
DELFT-3D	Delft-3D hidrodinamik dalga, su kalitesi, morfoloji, katı madde taşınımı ve ekoloji proseslerinin zamansal ve uzamsal değişimlerinin simulasyonunu yapmaktadır. Kıyı, akarsu ve haliçlerin modellenmesi için çok uygundur.	
LITPACK	Dalga ve akıntı etkisinde kıyı çizgisi boyunca katı madde taşınımını, kıyı çizgisi değişimini, kıyıya dik profil gelişimini, bir noktada katı madde konsantrasyonunun düşey profilini, limanlarda kumlanma problemini modellemektedir. Dalga transformasyonu Battjes-Janssen metoduna göre yapılmaktadır. Kıyı yenileme, mahmuz, jeti, açık deniz dalgakıranlar, kıyı duvarı ve kaplamaların etkisi dikkate alınmaktadır. Ayrıca yapılar etrafındaki dönme etkisi de modelleme içinde yer almaktadır. Kıyı boyu akıntısı Longuet-Higgins'e göre modellenmektedir (DHI, 2003a)	Koheziv olmayan katı maddeye uygulanır.
ESTMORF	Üç boyutlu etkileri içeren tek boyutlu körfez morfoloji modelidir. Ampirik ve fiziksel kurallara dayanmaktadır. Morfolojik denge dünyanın bir çok körfezinde yapılan incelemelerden elde edilen ampirik ifadelere dayanmaktadır. Körfezin en kesiti üç parçaya ayrılarak modelleme yapılmaktadır. Bunlar; ana kanal, düşük ve yüksek kottaki düzlüklerdir.	Başlangıçta Western Scheldt körfezi için geliştirilmiştir. Gel-git basenlerine uygulanabilir fakat diğer tipteki kıyılara uyumlu değildir.
SAND 94	Dalga, dalga kaynaklı akıntı, katı madde taşınımı ve kıyı gelişimini modellemektedir. Eğer ölçülmüş dalga verisi yoksa rüzgar parametrelerinden dalga tahmini yapmaktadır. Kıyı çizgisi gelişim modülü tek çizgi teorisine dayanmaktadır. Dalga transformasyonu Battjes-Janssen metoduna göre yapılmaktadır. Kıyı yenileme, mahmuz, jeti, kıyı duvarı ve kaplamaların etkisi dikkate alınmaktadır. Kıyı boyu akıntısı Longuet-Higgins'e göre modellenmektedir.	Açık deniz dalgakıranlarının ve yapılar etrafındaki dönme etkisi dikkate alınmamaktadır.

4. SAHA ÖLÇÜMLERİ

4.1 Giriş

Kıyı çalışmalarının bütün türleri tipik olarak kapsamlı, doğru ve yakın kıyı ölçüm verisine ihtiyaç duymaktadır. Böyle verileri elde etmek yoğun emek, zaman ve maliyet gerektirmektedir. Genellikle çalışmanın sonucunda başarılı ve kaliteli veri setine ulaşmak oldukça zor olmaktadır. Bunun yanında ortaya çıkan problemlerin doğayla uyumlu şekilde çözülmesi isteniyorsa, yine doğadan elde edilecek veriler yardımıyla çözüme gidilmelidir. Bu sebeple modelleme çalışmalarında dikkate alınan Karaburun kıyı alanında meydana gelen katı madde taşınımının belirlenmesinde ve kıyı çizgisi gelişiminin incelenmesinde saha ölçümlerine ihtiyaç duyulmuştur. İlk olarak kıyı çizgisi modellemesinde en önemli veri olan dalga ölçümü ile modelin doğrulanabilmesi için kıyı çizgisi ve batimetri ölçümleri yapılmıştır. Yerel olarak rüzgar ölçümleri belirli zaman aralığında yapılmış ve Karaburun kıyısından alınan kum örnekleriyle kıyının katı madde özellikleri de ortaya çıkarılmıştır.

4.2 Dalga Ölçümleri

Kıyı mühendisliğinde en önemli unsurlardan biri deniz dalgalarının etkisidir. Kıyı yapılarının planlanması, tasarımı, inşaasında ve bunların yanında kıyı çizgisi değişimi ile gelişiminin belirlenmesinde dikkate alınacak ana faktörler dalga parametreleridir. Bu sebeple kıyılarla ilgili herhangi bir düzenleme yapılırken, o bölgedeki dalga karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Düzensiz deniz dalgalarını karakterize eden parametreler; dalganın yüksekliği, periyodu ve yönüdür. Bu parametrelerin belirlenmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de yerel dalga ölçümüdür. Bu yolla elde edilen dalga verileri diğer yöntemlere göre daha sağlıklıdır çünkü hata sadece ölçüm aletlerinden kaynaklanabilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise pahalı bir yöntem olması ve analiz için uzun süreli ölçüm yapılması zorunluluğudur.

Dünyada da sıklıkla kullanılmakta olan yerinde dalga ölçümlerinin uzun kıyı şeridine sahip olan ülkemizde de kullanılması kıyıların doğru şekilde yönetilebilmesi ve değerlendirilmesi için gerekmektedir. Bu çalışmada ise Karaburun kıyı çizgisini modelleyebilmek ve dalga ikliminin kalibrasyonu amacıyla yerinde dalga ölçümleri yapılmıştır. Batı Karadeniz'de bulunan Karaburun kıyısında dalga karakteristiklerinin belirlenmesi için balıkçı barınağının kuzey batısında -16 m derinliğe ultrasonik ve basınç tipi DL2 model dalga ölçer

yerleştirilmiştir (Şekil 4.1 ve 4.2). Şekil 4.1 ve 4.2'de dalga ölçerin konumu karadan ve denizden çekilen fotoğraflar üzerinde gösterilmiştir. Dalga ölçer dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga yönü ve akıntı hızını belirlemektedir (Şekil 4.3). Ayrıca yönsel dalga spektrumunu hesaplayan yazılım ve diğer programlarla uyumlu çalışmaktadır. Dalga ölçerde örnekleme aralıkları 0.1, 0.2, 0.5 ve 1.0 saniye, gözlem süresi 1-100 dakika arasında ve sürekli gözlem aralığı 2-999 dakika arasında seçilebilmektedir.

Şekil 4.1 Dalga ölçerin bulunduğu konum

Şekil 4.2 Dalga ölçerin bulunduğu konumdan kıyının ve barınağın görünümü

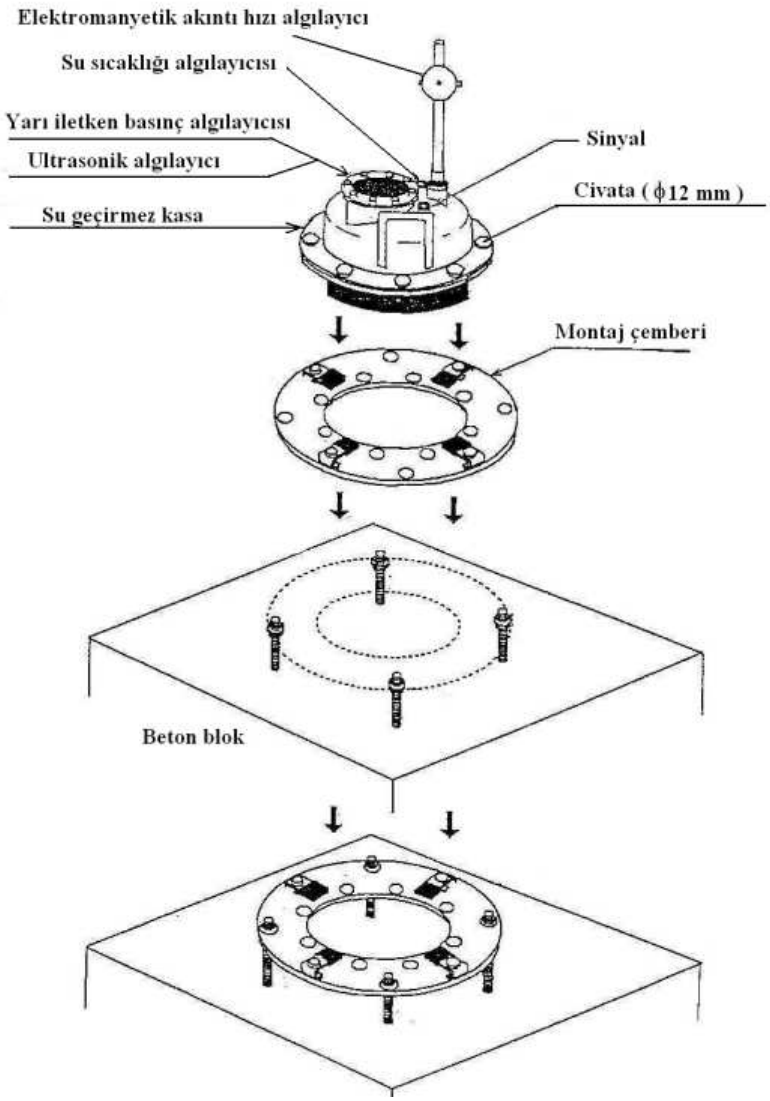
Şekil 4.3 Dalga ölçer

Dalga ölçüm cihazında dalga yüksekliğini belirleyebilmek için iki tip algılayıcı bulunmaktadır (Şekil 4.4); bunlar ultrasonik algılayıcı ve yarı iletken basınç algılayıcısıdır. DL2 model dalga ölçerlerde ultrasonik algılayıcı hidrolik basınç algılayıcısı ile birlikte kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Alet yüzeydeki dalga yüksekliğini büyük bir hassasiyetle ölçebilmektedir. Bu algılayıcının ölçüm hataları % 0.3'ün altındadır. Yarı iletken basınç algılayıcısının ise işletme hassasiyeti ultrasonik algılayıcıya göre daha düşüktür. Ultrasonik algılayıcı ile birlikte kullanıldığından arazi verilerini daha hassas olarak elde etme avantajına sahiptir ve ayrıca hidrolik basınçtaki değişimleri ölçmektedir. Dalga ölçerdeki bu algılayıcıların dışında akıntı hızını ölçmek için elektromanyetik akıntı hızı algılayıcısı ve sıcaklığı belirlemek için de su sıcaklığı algılayıcısı bulunmaktadır (Şekil 4.4).

Karaburun kıyısında yapılan ölçümlerde her 2 saatte bir, her saatin son 10 dakikalık süresi boyunca ölçümler esas alınmıştır. Örnekleme aralığı ise 0.5 saniye olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Dalga ölçüm cihazının kayıt süresi için kayıt aralığı ve cihazın pillerinin durumu esas alındığından, ortalama olarak her 2 ayda bir dalgıç yardımıyla kaset ve pil değişimi gerçekleştirilmesi gerekmiştir (Şekil 4.5 ve 4.6).

Çizelge 4.1 Dalga ölçerin veri toplama süreleri

Ölçüm aralığı	2 saat
Ölçüm süresi	10 dakika (iki saatin son 10 dakikası)
Örnekleme aralığı	0.5 saniye



Şekil 4.4 Dalga ölçerin parçaları

Şekil 4.5 Dalga ölçerin pilinin değiştirilmesi ve kurulumu

Şekil 4.6 Dalga ölçerin dalgıç yardımıyla deniz tabanına yerleştirilmesi

Karaburun'da -16 metrelik derinliğe yerleştirilen dalga ölçer ile aralıklı olarak 18.5 ay süreyle ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda bölgedeki;

- su düzeyi değişimi,
- su sıcaklığı,
- dalga yükseklik ve yön değerleri,
- dalga periyot değerleri,
- cihazın bulunduğu derinliğe ait akıntı yön ve hız değerleri

belirlenmiştir.

Kaydedilen 0.5 s aralıktaki hidrolik basınç değerleri bilgisayar ortamında aşağıdaki denklem kullanılarak dalga profiline dönüştürülebilmektedir:

$$\frac{P}{\rho g} = K_p \eta - z \tag{4.1}$$

burada;

η = Dalga profil değeri,

z= Sakin su seviyesinden aşağı doğru alınan derinlik,

K_p= Basınç katsayısıdır.

Basınç katsayısı ise aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$K_p = \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi(h)}{L}} \tag{4.2}$$

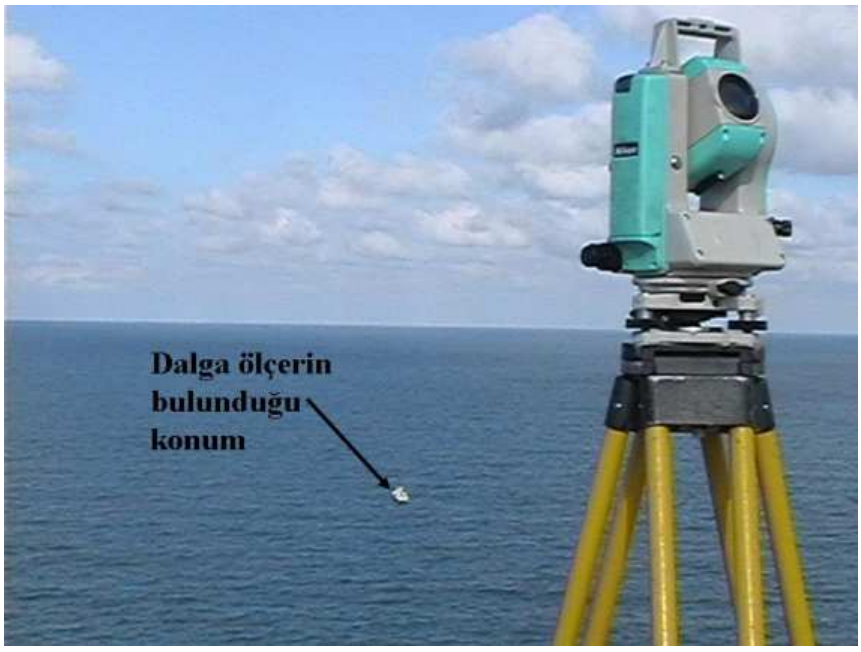
burada;

h= Su derinliği,

L= Dalga boyudur.

Verilerin analiz edilmesiyle dalga yüksekliği parametrelerinden (H_{maks}, $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ ve H_{ort}) değerleri, dalga periyodu parametrelerinden (T_{maks}, $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ ve T_{ort}) değerleri, dalga yönü, akıntı hızı ve yönü elde edilmektedir.

Dalga ölçer 30 Ağustos 2003'te kum kosteri yardımıyla yerleştirilmiş (Şekil 4.8) ve ilk veriler bu tarihten itibaren alınmaya başlanmıştır. Cihaz yerleştirilmeden önce 41°20′51.9577″ N ve 28°40′59.2418″E koordinatlarında bulunan Karaburun deniz fenerinden (Şekil 4.2) "Nikon DTM-330" model total station ile cihazın yerleştirildiği konum belirlenmiştir (Şekil 4.7). Dalga ölçeri deniz tabanına konumlandırabilmek için ilk önce 1.5 ton ağırlığında bir beton platform yerleştirilmiş ardından dalga ölçer bu platformun üzerine monte edilmiştir (Şekil 4.4 ve 4.9). 30 Ağustos 2003-18 Mart 2005 tarihleri arasındaki 18.5 aylık dönem içerisinde 8.5 aylık veri toplanmıştır. Çizelge 4.2'de dalga ölçerin yerleştirildiği ve çıkarıldığı tarih, ölçüm alınan zaman aralıkları ve ölçüm süreleri belirtilmiştir.



Şekil 4.7 Dalga ölçerin Karaburun deniz fenerine yerleştirilen Nikon DTM-330 model total station ile konumunun belirlenmesi

Şekil 4.8 Dalga ölçerin beton platformunu yerleştiren koster

Şekil 4.9 Dalga ölçerin beton platformunun yerleştirilmesi

Çizelge 4.2 Dalga ölçümünden elde edilen verilerin tarihleri ve ölçüm aralıkları

Ölçüm no:	Ölçüm tarih aralıkları	Ölçüm yapılan gün sayısı
1	30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003	42 gün
2	10 Ekim 2003-29 Aralık 2003	Veri alınamadı
3	29 Aralık 2003-22 Ocak 2004	25 gün
4	22 Ocak 2004-27 Mart 2004	Veri alınamadı
5	27 Mart 2004-25 Haziran 2004	91 gün
6	25 Haziran 2004-16 Eylül	Veri alınamadı
7	16 Eylül 2004-28 Ekim 2004	43 gün
8	28 Ekim 2004-17 Aralık 2004	51 gün
9	17 Aralık 2004-18 Mart 2005	Veri alınamadı

4.3 Rüzgar Ölçümleri

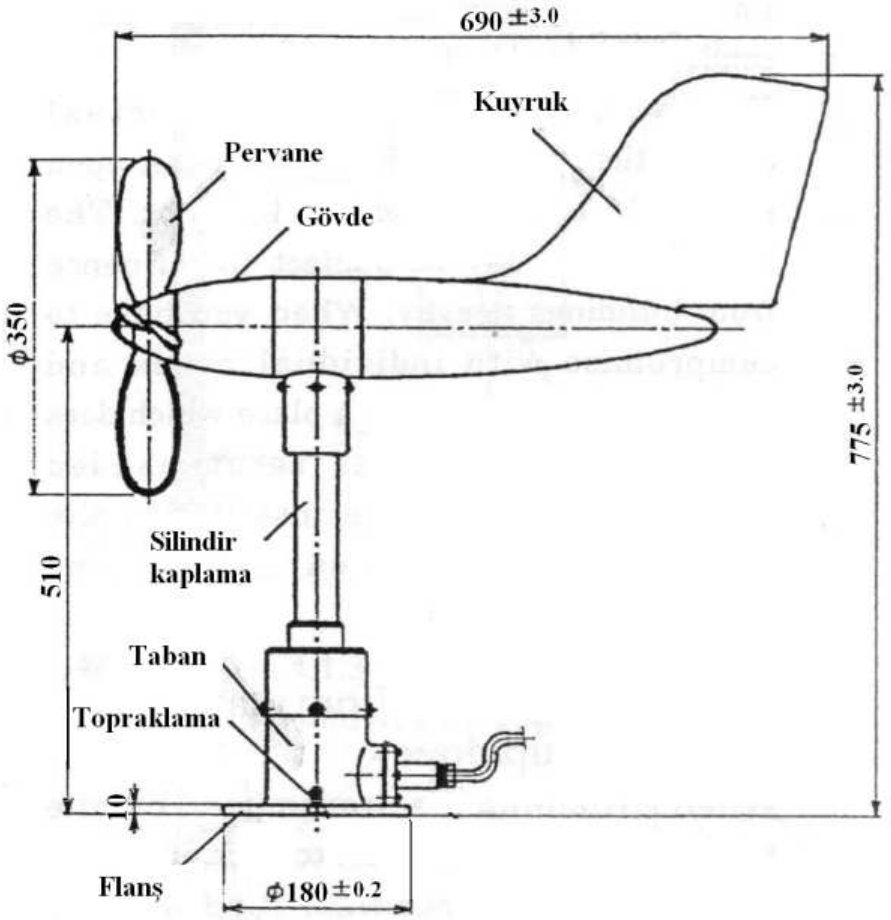
Dalga iklimi, dalga ölçümlerinden elde edildiği gibi yerel rüzgar ölçümlerinden de tahmin edilebilmektedir. Fakat yerel rüzgar ölçümleri her zaman doğru sonuç vermemektedir. Örneğin bölgede bulunan bir meteoroloji istasyonunun yanlış konumlandırılması, çalışma bölgesine yeteri yakınlıkta bulunmaması, karada konumlanması gibi sebeplerden dolayı rüzgar verileri yardımıyla elde edilen dalga karakteristikleri doğayla uyumlu olmayabilmektedir. Karaburun bölgesindeki uzun dönemli dalga iklimini tahmin edebilmek için en yakın meteoroloji istasyonu olan Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerinden faydalanılmış fakat bu veriler incelendiğinde doğadaki değişim üzerindeki etkileri yeterince yansıtmadığı anlaşılmıştır. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen verilerin doğrulanması amacıyla çalışma bölgesinde yerel olarak rüzgar ölçümü yapılmıştır. OTA111-T model bir rüzgar ölçer kuzeyli rüzgarları algılayacak biçimde 23.06.2004 tarihinde Karaburun deniz fenerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.10).

a) b)

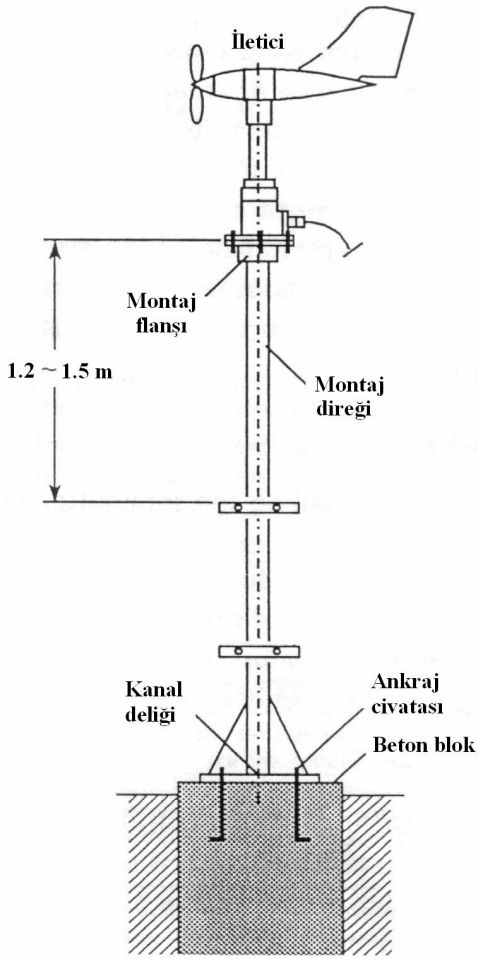
Şekil 4.10 Karaburun fenerinde rüzgar ölçerin konumu

Rüzgar ölçer iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım fenerin üstünde bulunan OTA 111-T model, pervane ve kuyruktan oluşan rüzgarın yönünü ve şiddetini algılayan anemometre (Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13), ikinci kısım ise fenerin içinde bulunan OTA 112-2 model kaydedicidir (Şekil 4.14).

Şekil 4.11 OTA 111-T model rüzgar hızı ve yönünü algılayan anemometre



Şekil 4.12 OTA 111-T model anemometre parçaları



Şekil 4.13 OTA 111-T model anemometre montaj şekli

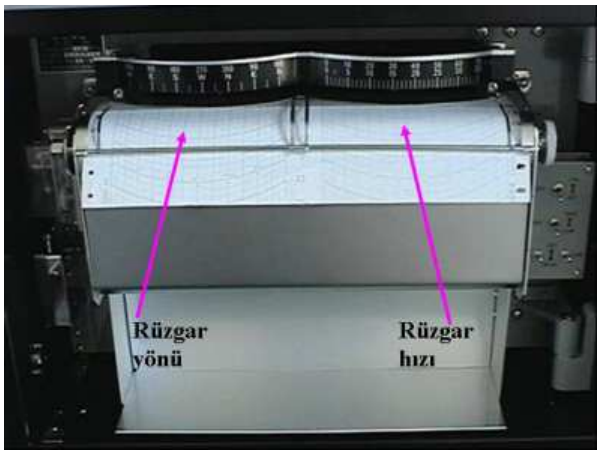
Şekil 4.14 OTA 112-2 model kaydedici

OTA 111-T model anemometre rüzgar şiddetini algılayan pervane ve rüzgar yönünü algılayan kuyruktan oluşmaktadır. Çizelge 4.3'te rüzgar hızı ve yönünü belirleyen anemometrenin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 OTA 111-T model anemometrenin özellikleri

Tip	Rüzgar hızı algılayıcı: Pervane tipi Rüzgar yönü algılayıcı: Kuyruğa yerleştirilmiş dümen tipi
Ölçüm aralığı	Rüzgar hızı: 2.0 m/s-70 m/s Rüzgar yönü: 0°-540° (16 yön)
Çıkış sinyali	Anlık rüzgar hızı: 0-70 m/s Anlık rüzgar yönü : 0°-540°
Maksimum rüzgar hızı algılaması	90 m/s
Doğruluk	Rüzgar hızı: ± 0.5 m/s (rüzgar hızı 10 m/s veya daha az olduğundan) Rüzgar yönü: ± 5° veya daha az
Güç kaynağı	DC12V(DC11-18V) 3.5 mA
Çevresel gereksinim	-30°- +60° arasında tüm hava koşullarında çalışabilmektedir
Ağırlık	Yaklaşık 5.9 kg (kablolar hariç)

Rüzgar ölçerin kaydedicisi rüzgar yönü ve şiddeti olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi kayıt için kullanılan özel kağıt, kaydedicinin iç kısmına yerleştirilmekte ve bu kağıt üzerine sol tarafta rüzgar yönü sağ tarafta rüzgar hızı olmak üzere 2 özel mürekkepli kalemle kayıt alınmaktadır. Kaydedicinin sağ tarafında bulunan ayarlar kullanılarak anlık veya ortalama rüzgar hızı ve yönü elde edilebilmektedir.



Şekil 4.15 Rüzgar kaydedicisinin iç kısmı

Karaburun bölgesinde yapılan rüzgar ölçümleri 23.06.2005 tarihinde başlatılmış ve 12.04.2006 tarihinde bitirilmiştir.

4.4 Batimetri Ölçümleri

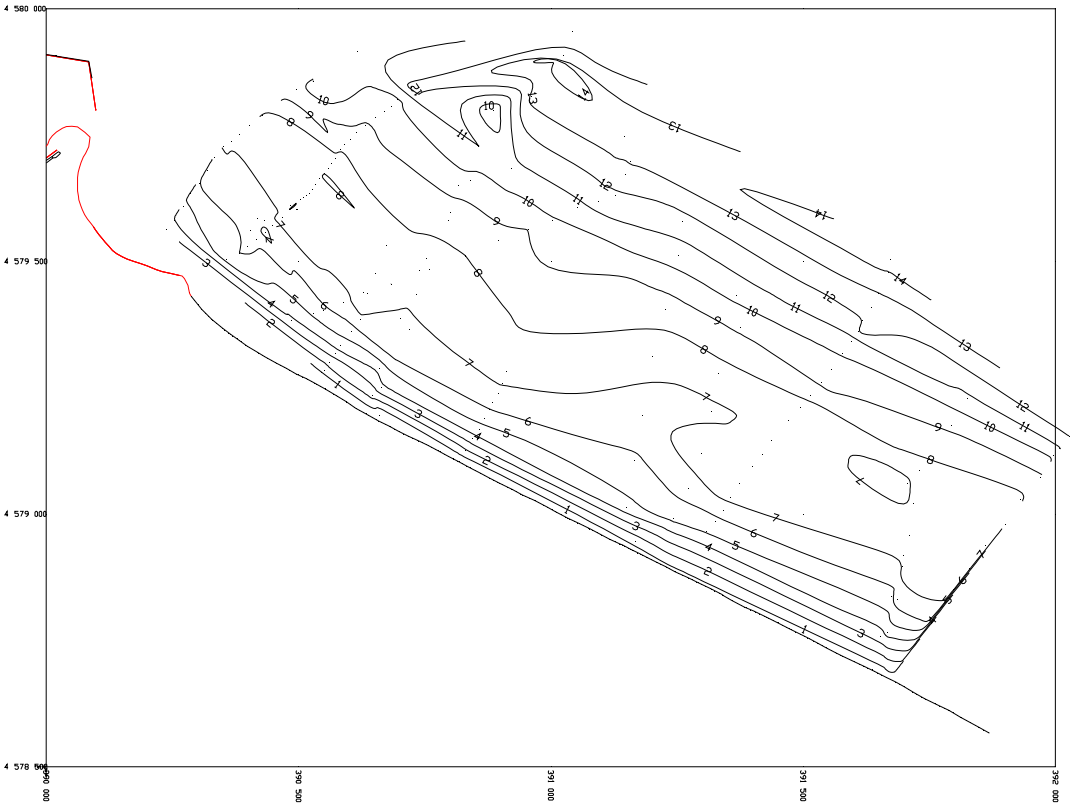
Karaburun yakın kıyı alanının batimetrisini belirleyebilmek amacıyla bölgede derinlik ölçümleri yapılmıştır. Derinlik ölçümlerinde HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir balık bulucu aletinden yararlanılmış olup, konum ölçmeleri GARMIN GPS12 model bir el GPS (Global Positioning System) aletiyle yapılmıştır.

Derinlik ölçümleri denizin dalgasız olduğu zamanlarda yapılmış olup, 10 m'de bir hem derinlik hem de konum verisi toplanmıştır. Böylelikle eş zamanlı olarak noktaların derinlik ve konum verisi elde edilmiştir. Derinlik ölçmelerinde kullanılan iskandil (echosounder) aleti Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de, konum ölçmelerinde kullanılan GPS aleti ise Şekil 4.18'de görülmektedir. Şekil 4.19'da Karaburun kıyı alanının yaklaşık 2000 m'lik kıyı şeridini kapsayan batimetri ölçüm sonucu görülmektedir.

Şekil 4.16 HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder (balık bulucu)

Şekil 4.17 HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder ile derinlik ölçümü

Şekil 4.18 GARMIN GPS 12 model el GPS'i



Şekil 4.19 Karaburun kıyı batimetrisi

4.5 Kıyı Çizgisi Ölçümleri

Kıyı çizgisi değişiminin incelenmesi için, değişimin doğru belirlenmesi ve kıyı çizgisinin doğru ölçülmesi gerekmektedir. Doğayla uyumlu olarak sayısal modelleme yapabilmek için tasarlanan modellemede kullanılacak verilerin de sağlıklı olması gerekmektedir. Modellerin doğru sonuçlara ulaşabilmesi için bu verilerden biri olan kıyı çizgisinin belirlenmesi de önem taşımaktadır.

Kıyı çizgisinin ölçülmesinde Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) GPS yönteminden yararlanılmıştır. Önceleri yersel yöntemler kullanılarak açı ve uzunluk ölçümleri yardımıyla belirlenen kıyı çizgileri, teknolojinin de gelişmesine paralel olarak günümüzde artık Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) ile ölçülmektedir.

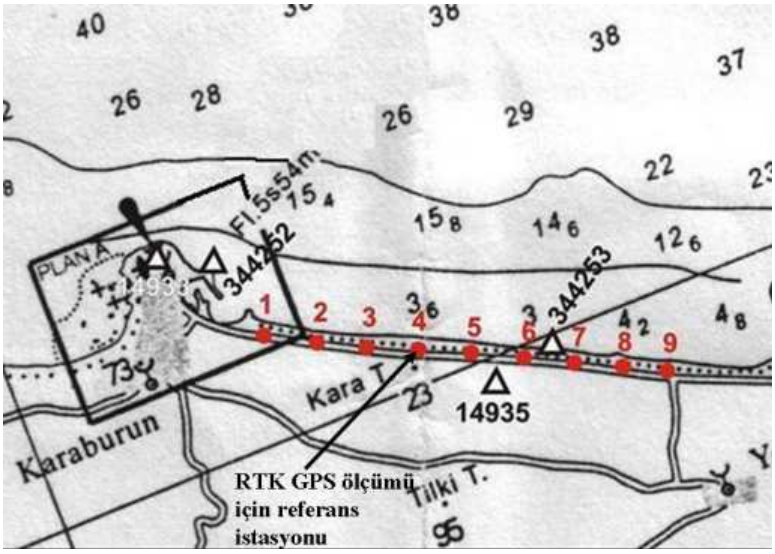
Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından öncelikle askeri amaçlar için geliştirilen GPS, uydu teknikleri arasında en çok kullanılan bir sistemdir. Rusya'nın GLONASS ile AB Ülkelerinin geliştirdiği ve yakın bir gelecekte faaliyete geçmesi beklenen GALILEO sistemi de dünya üzerindeki herhangi bir noktada uydular yardımıyla konum belirlemeye olanak sağlamaktadır.

GPS ile bir noktanın koordinatları mutlak, bağıl ve diferansiyel olarak belirlenebilmektedir. Mutlak konum belirlemede tek bir alıcı ile kod gözlemleri yapılarak uydu-alıcı uzaklıkları ölçülmekte ve alıcının bulunduğu noktanın koordinatları belirlenmektedir. Bölgenin batimetrik durumunun belirlenmesinde kullanılan GARMIN GPS 12 model GPS aleti ile mutlak konum belirlenmiştir. Ölçmelerdeki yatay doğruluk 1-10 metre aralığındadır. Bağıl konum belirlemede, alıcılar arasındaki baz vektörü çözülerek bir alıcının bulunduğu noktanın koordinatlarına dayalı olarak diğer alıcının bulunduğu noktanın koordinatları ölçme sonrası yapılan değerlendirme ile belirlenmektedir. Bu yöntemde konum belirleme doğruluğu yatayda santimetre mertebesinin altındadır (Aydın vd., 2005).

Gerçek zamanlı kinematik yöntem eş zamanlı ölçümlere olanak sağlayan ve bu amaçlar için kullanılmak üzere tasarlanmış bir ölçü yöntemidir (Aydın vd., 2004). İşleyiş ve konfigürasyon açısından Diferansiyel GPS (DGPS)'e benzerlik göstermekte olan bu yöntemde (Aykut vd., 2005), koordinatları daha önceden bilinen bir noktada GPS alıcılarından biri sabit olarak sürekli gözlem yaparken, diğer hareketli GPS alıcısı da konum çözümünü gerçekleştirmektedir. Sabit alıcı ile uydu arasındaki herhangi bir t zamanında ölçülen taşıyıcı faz uzunluğuyla, uydu-alıcı arasındaki koordinat farklarından hesaplanan geometrik uzunluk karşılaştırılmaktadır. Taşıyıcı faz ölçülerine getirilecek düzeltme ve düzeltme oranı hesaplanarak gezici alıcılara radyo dalgalarıyla iletilmektedir. RTK GPS uygulamalarında, hareketli alıcılar, kodlanarak radyo dalgaları üzerine modüle edilmiş olan düzeltmeleri alarak, kendi taşıyıcı faz ölçülerine düzeltme olarak getirmekte ve böylelikle hareketli alıcıların hassas olarak konumları belirlenmektedir (Aydın vd., 2004). Bu yöntem ile konum belirlemedeki yatay doğruluk 2-3 cm civarında olmakla beraber referans ile hareketli alıcı arasındaki uzunluğa bağlı olarak değişmektedir.

Karaburun'da kıyı çizgisi değişimini belirleyebilmek amacıyla kıyıya paralel olacak şekilde aralarında yaklaşık 400 m bulunan poligon noktaları tesis edilmiştir (Şekil 4.20). Bir değişimin belirlenmesi için koordinatları değişmeyen ya da değişim miktarı ölçülen noktalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sebeple yaklaşık 3.5 km uzunluğundaki kıyı çizgisi boyunca yeni noktalar yerleştirilmiştir. Bu noktaların koordinatları, yukarıda açıklanan bağıl konum belirleme yöntemiyle seçilmiştir.

a) (Google Earth)



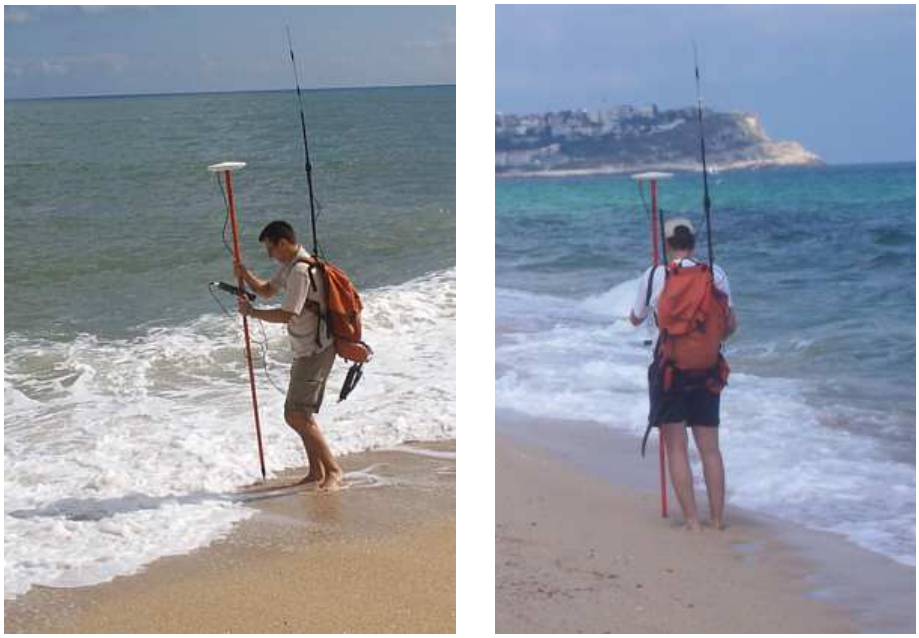
b) (181 no.lu Deniz haritası)

Şekil 4.20 Mevcut nirengi noktaları ve ölçmelerde kullanılan poligon noktaları

Kıyı boyunca tesis edilen 9 adet poligon noktasının koordinatlarını belirleyebilmek amacıyla 08.09.2004 ve 16.09.2004 tarihlerinde 6 adet GPS alıcısı ile N.14933 ile kıyı boyunca tesis edilmiş olan 9 adet poligon noktasında GPS ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.21).

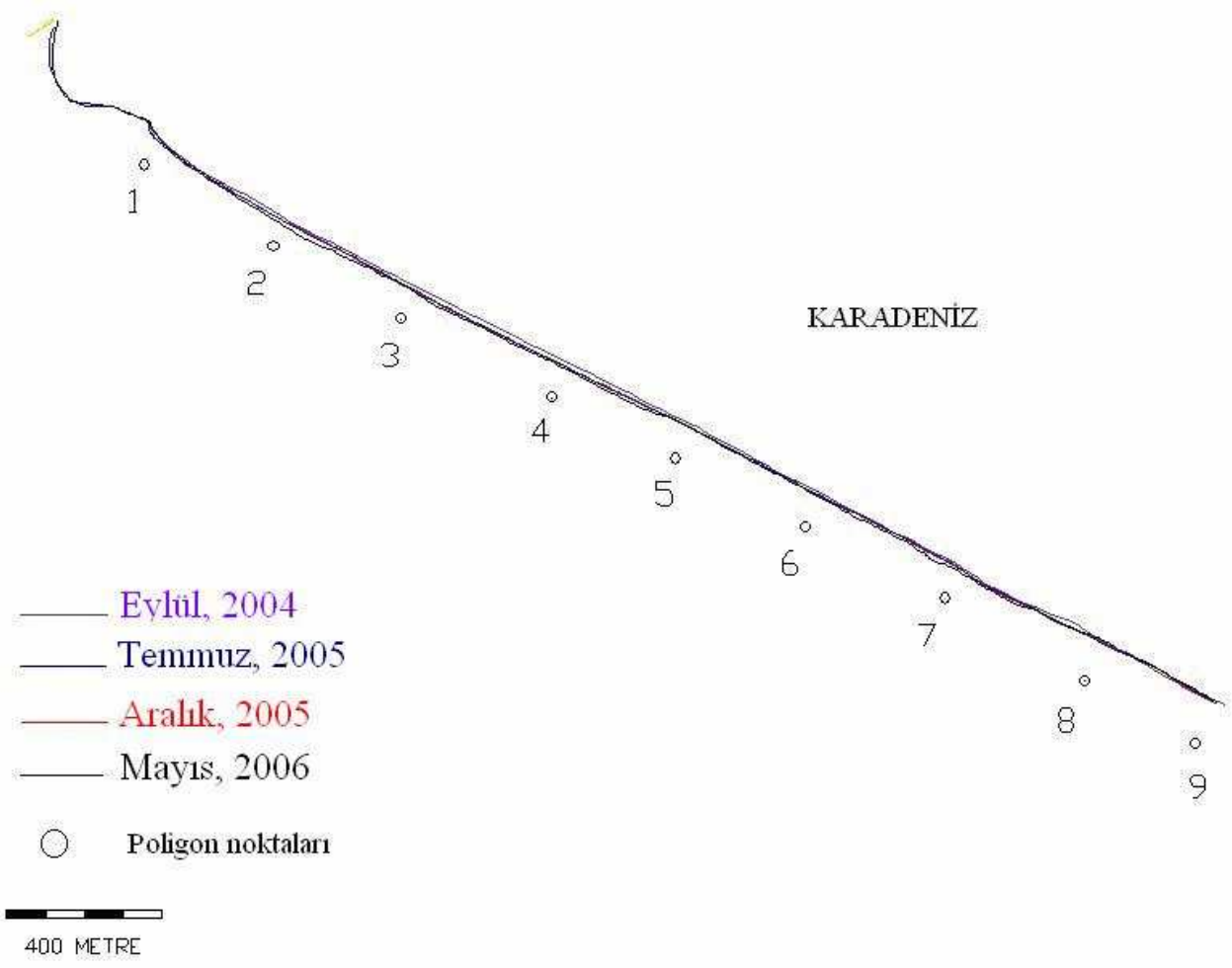
Toplanan veriler Bernese 4.2 GPS yazılımında değerlendirilmiş ve kıyı çizgisi ölçümlerinde kullanılan poligon noktalarının koordinatları ve koordinat değişimleri belirlenmiştir.

Şekil 4.21 Poligon noktalarında GPS ölçümü



Şekil 4.22 Hareketli GPS alıcısı ile farklı periyotlarda yapılan kıyı çizgisi ölçümleri

Koordinatları hesaplanan bu noktalardan bazıları referans nokta seçilmek üzere 16.09.2004, 21.07.2005, 06.12.2005 ve 19.05.2006 tarihlerinde yukarıda detaylı olarak açıklanan RTK GPS yöntemiyle kıyı çizgisi üzerinde yürüyerek, yaklaşık her 10 metrede veri toplayarak kıyı çizgisi ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.22). Tüm kıyı çizgisi ölçümleri, diğer ölçmeler ile bütünlük sağlaması açısından ülke koordinat sisteminde yapılmıştır. Arazide bir el bilgisayarı yardımıyla kaydedilen veriler aktarılarak Netcad yazılımında kıyı çizgisi çizilmiştir (Şekil 4.23).

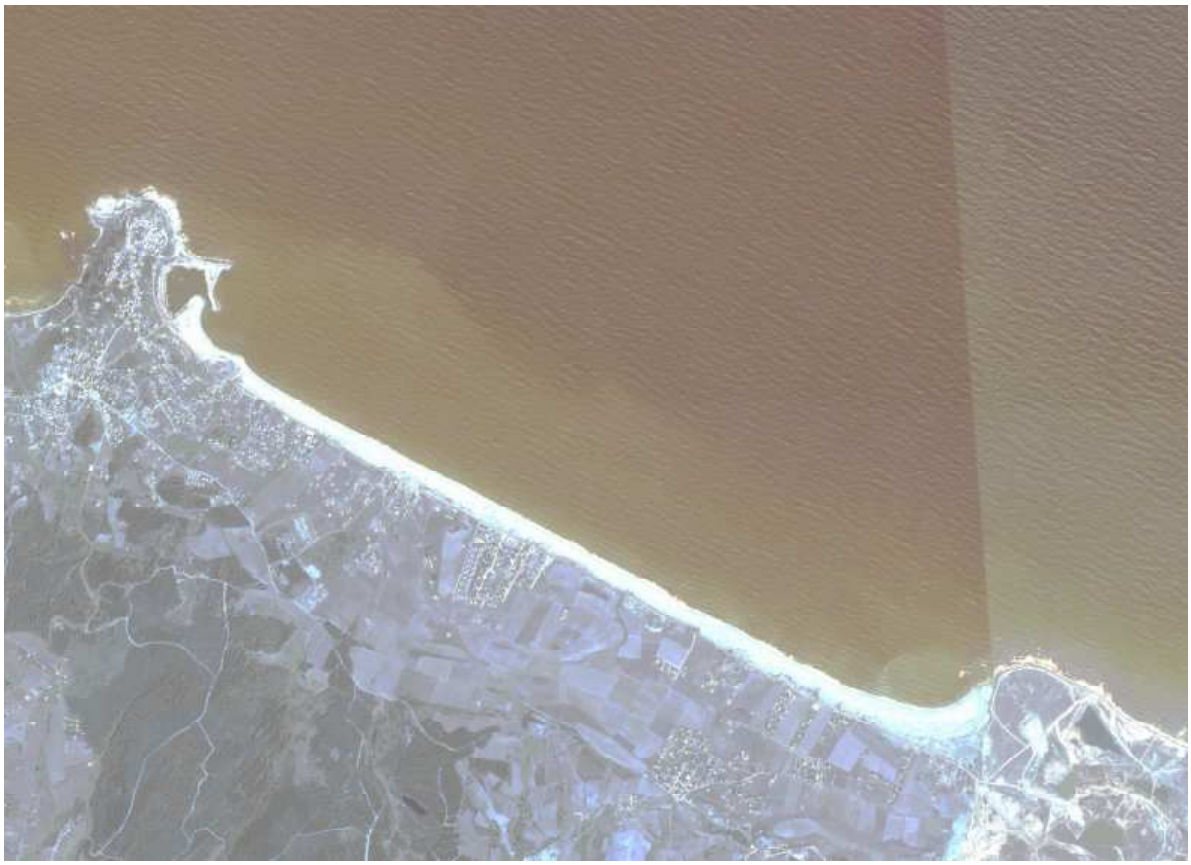


Şekil 4.23 Karaburun kıyı şeridi

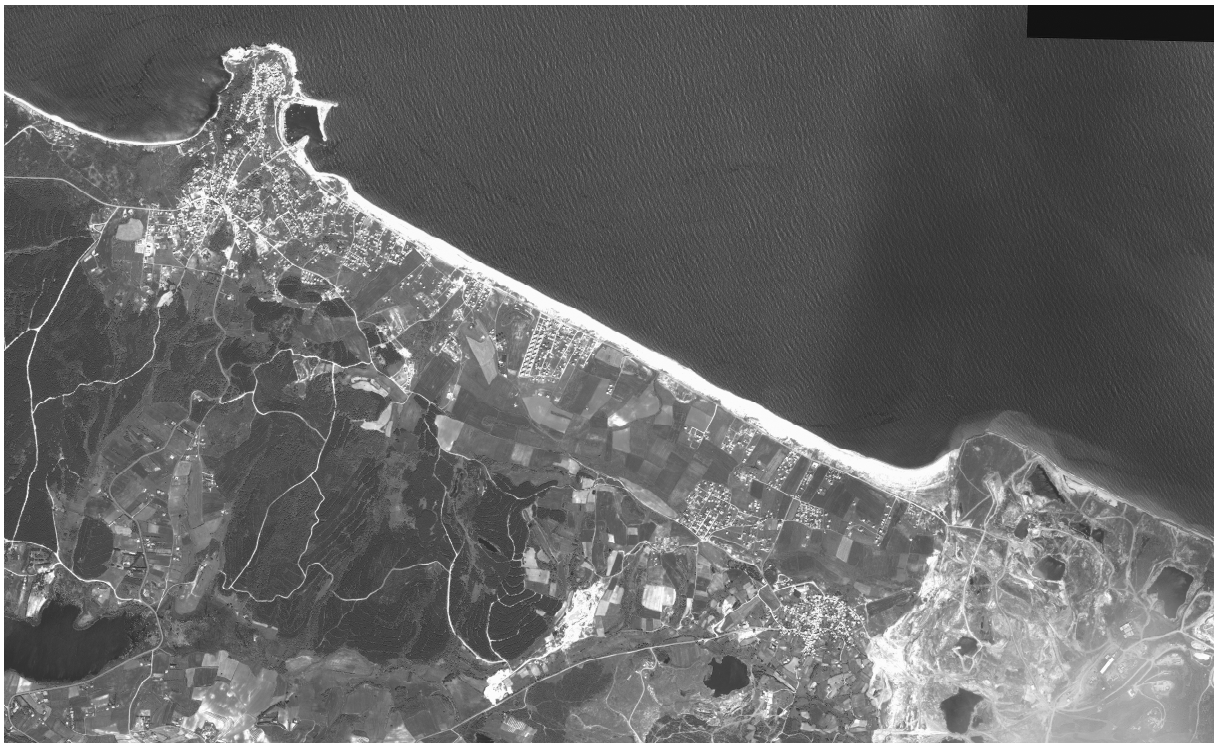
4.6 Uydu Görüntüleri

Kıyı çizgisinin uydu görüntüleriyle haritalanması ve kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi kıyı alanları yönetimi, kıyısal çevrenin korunumu, kıyısal kaynakların belirlenmesi ve sürdürülebilir kıyı gelişimi ile planlaması için oldukça önemlidir (Di vd., 2003). Uzaktan algılama uygulamaları çevresel inceleme için yerel veya global olarak hızlı ve ekonomik şekilde olanaklar sağlamaktadır (Lin vd., 2001). Uzaktan algılama bir olay, nesne veya alan hakkında belirli bir mesafeden ölçümlerle bilgi edinmeyi sağlamaktadır. 1999 yılında ilk defa uzaya fırlatılan IKONOS uydusuyla yüksek çözünürlükte uydu görüntüleri elde edilebilmektedir (Mironga, 2004). IKONOS uydusu iki sensöre sahiptir. Bunlardan pankromatik olanı (0.45-0.90 μm) 1 m çözünürlüğe sahipken multispektral sensör (0.45-0.88 μm) 4 m çözünürlüğe sahip olmaktadır. Her iki sensörün de radyomatik çözünürlükleri 11 bit'tir.

Çalışmada çok zamanlı ve coğrafi referanslı IKONOS uydu görüntüleri (Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005) kullanılmıştır (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Karaburun kıyı çizgisi bu tarihlerdeki uydu görüntüleri ve ERDAS yazılımı kullanılarak sayısallaştırılmıştır.



Şekil 4.24 Eylül, 2004 yılı IKONOS uydu görüntüsü



Şekil 4.25 Temmuz, 2005 yılı IKONOS uydu görüntüsü

4.7 Katı Madde Özellikleri

Karaburun bölgesindeki katı madde özelliklerinin belirlenmesi için yığılma bölgesi (ikincil dalgakıran yanı) ve dalga ölçerin bulunduğu derinlikten katı madde numuneleri alınmıştır. Katı madde granülometrik özelliklerinin belirlenebilmesi için altı veya sekiz örneğin taban yüzeyinden 5 cm kalınlığında alınması gerekmektedir (Yüksel, 2005). İki farklı bölgeden altı örnek alınmış ve granülometrik özellikler belirlenmiştir.

Karaburun Balıkçı Barınağı yanındaki kıyıdan ve dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan kumun granülometrik özelliklerinin belirlenmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda elek analizi deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi tamamen kuru numunelerle yapılmaktadır, bu sebeple deneylere başlamadan önce kum etüvde kurutularak hazır hale getirilmiştir. İlk önce 4 mm'lik elek ile eleme işlemine başlanmıştır. Daha sonra sıra ile 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm ve 0.125 mm'lik elekler kullanılmıştır. Bu yapılan deneylerle kumun granülometrik özellikleri ve değişimi belirtilmiştir (Çizelge 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7 ve Şekil 4.26 ve 4.27).

Çizelge 4.4 Elek analizi sonuçları (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları)

1000 gr kum için				
Elek (mm)	Kalan (gr)	Geçen (gr)	% Geçen	100-% Geçen
4	1	999	99.9	0.1
2	151.6	847.4	84.74	15.26
1	738.2	109.2	10.92	89.08
0.5	54	55.2	5.52	94.48
0.25	42	13.2	1.32	98.68
0.125	12.3	0.9	0.09	99.91
0.125 altı	0.9	-	-	-

Çizelge 4.5 Elek analizi sonuçları (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları)

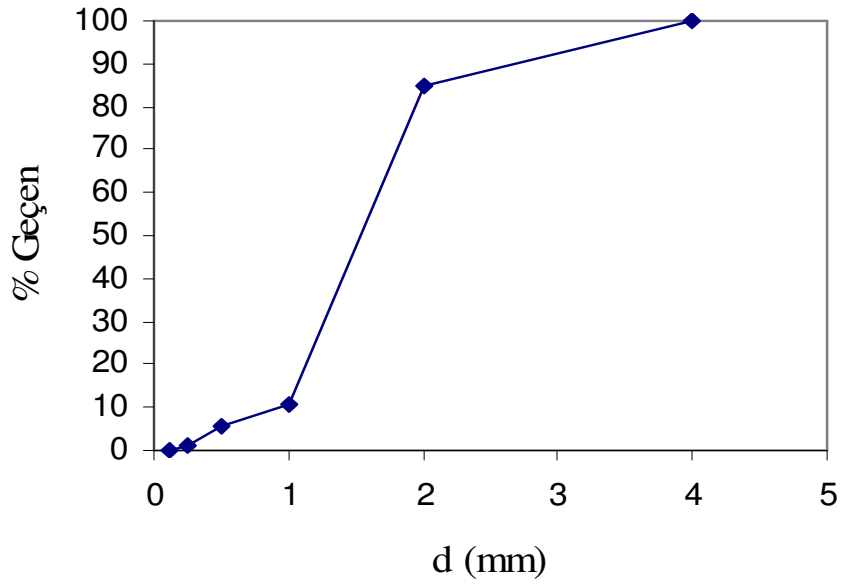
1000 gr kum için				
Elek (mm)	Kalan (gr)	Geçen (gr)	% Geçen	100-% Geçen
4	2.1	997.9	99.79	0.21
2	196.1	801.8	80.18	19.82
1	735.9	65.9	6.59	93.41
0.5	60.7	5.2	0.52	99.48
0.25	5.2	-	-	-

Çizelge 4.6 Katı maddenin granülometrik özellikleri (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları)

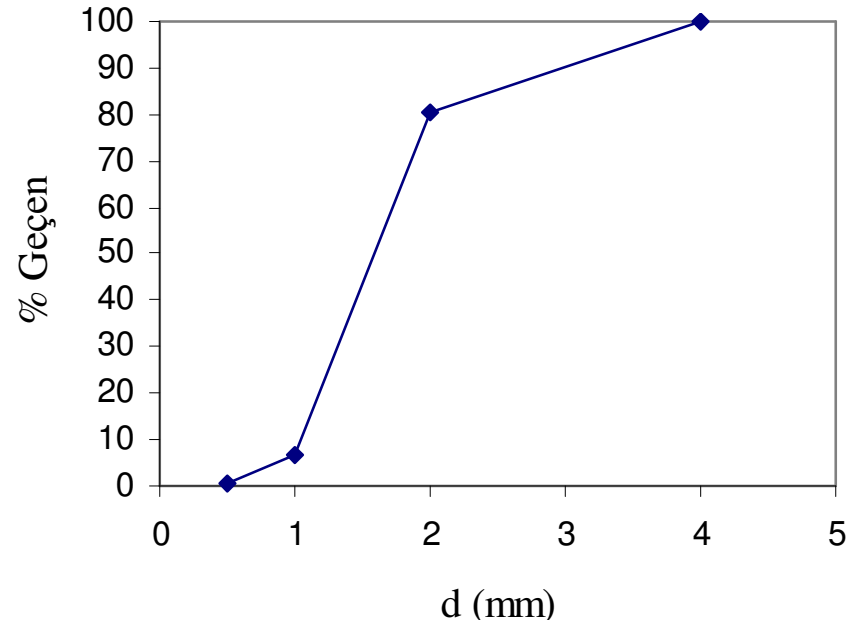
d_{10} (mm)	d_{16} (mm)	d_{35} (mm)	d_{50} (mm)	d_{65} (mm)	d_{84} (mm)	d_{90} (mm)
0.83	1.08	1.33	1.53	1.74	1.99	2.69

Çizelge 4.7 Katı maddenin granülometrik özellikleri (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları)

d_{10} (mm)	d_{16} (mm)	d_{35} (mm)	d_{50} (mm)	d_{65} (mm)	d_{84} (mm)	d_{90} (mm)
1.05	1.13	1.39	1.59	1.79	2.39	3.00



Şekil 4.26 Katı maddenin granülometrik değişimi (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları)



Şekil 4.27 Katı maddenin granülometrik değişimi (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları)

Kumun diğer özelliklerinin belirlenebilmesi için birim hacim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Katı maddenin diğer özellikleri (İkincil dalgakıranın yanındaki kıyıdan yani yığılma bölgesinden alınan numune sonuçları)

Kuru	Özgül Ağırlık (gr/cm^3) (Boşluksuz Birim Hacim Ağırlık)	2.61
	Yoğunluk (gr/cm^3) (Boşluklu Birim Hacim Ağırlık)	1.79
Suya Doygun Yüzeyi Kuru	Özgül Ağırlık (gr/cm^3) (Boşluksuz Birim Hacim Ağırlık)	2.86
	Yoğunluk (gr/cm^3) (Boşluklu Birim Hacim Ağırlık)	1.88
	İncelik Modülü (-)	3.98

Çizelge 4.9 Katı maddenin diğer özellikleri (Dalga ölçerin bulunduğu derinlikten alınan numune sonuçları)

Kuru	Özgül Ağırlık (gr/cm^3) (Boşluksuz Birim Hacim Ağırlık)	2.80
	Yoğunluk (gr/cm^3) (Boşluklu Birim Hacim Ağırlık)	1.62
Suya Doygun Yüzeyi Kuru	Özgül Ağırlık (gr/cm^3) (Boşluksuz Birim Hacim Ağırlık)	2.88
	Yoğunluk (gr/cm^3) (Boşluklu Birim Hacim Ağırlık)	1.89
	İncelik Modülü (-)	2.13

Kum içeriğinin anlaşılması için bir miktar kuma sülfirik asit damlatılmıştır. Köpürme meydana geldiği için katı maddenin silis esaslı kalker karışık kum olduğu görülmüştür.

Ayrıca d_{10}>0.06 mm olduğu için katı maddenin koheziv özellik taşımadığı görülmüştür. Her iki örnek bölgedeki (ikincil dalgakıran yanı ve dalga ölçerin bulunduğu derinlik) numunelerin geometrik standart sapması (σ_g) aşağıdaki denklem kullanılarak bulunmuştur (Çizelge 4.10).

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \tag{4.3}$$

Çizelge 4.10 Katı maddenin geometrik standart sapma değerleri

	İkincil dalgakıran yanı	Dalga ölçerin bulunduğu derinlik
Geometrik standart sapma (σ_g)	1.36	1.45

Genellikle taban malzemesi çapı için Wenthworth ölçeği kullanılmaktadır. ϕ birim ölçeği olarak verilmiştir (Yüksel, 2005).

$$\phi = -\log_2 d \tag{4.4}$$

Çizelge 4.11'de örnek numunelerin Wenthworth ölçeğine göre ϕ değerleri ve bu ölçeğe göre hangi katı madde sınıfında olduğu verilmiştir.

Çizelge 4.11 Wenthworth ölçeğine göre katı maddenin sınıflandırması

	İkincil dalgakıran yanı	Dalga ölçerin bulunduğu derinlik
Wenthworth ölçeği (ϕ)	-0.61	-0.67
Malzeme sınıfı	Çok kaba kum	Çok kaba kum

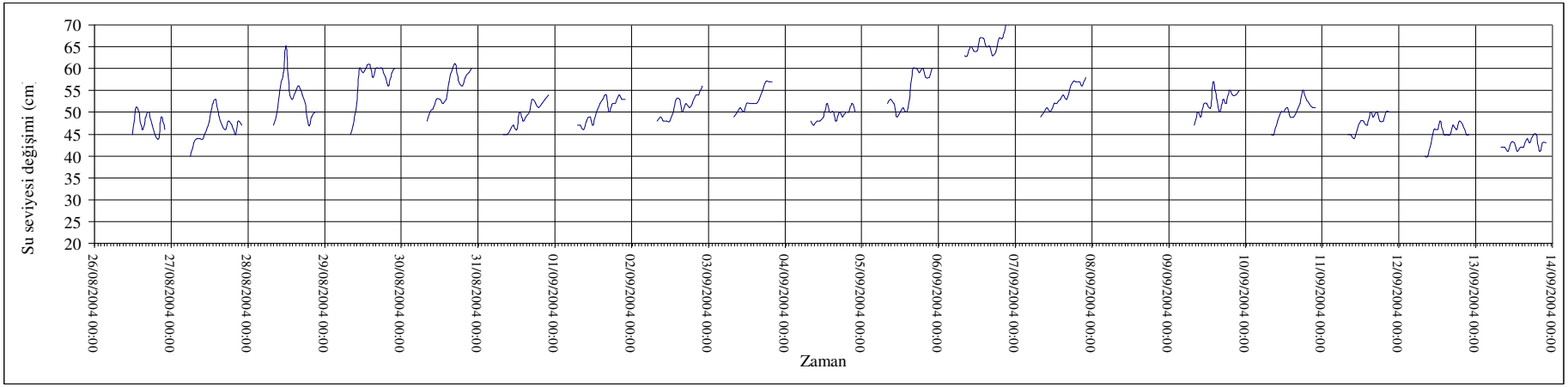
Her iki bölgede de $\frac{d_{84}}{d_{16}}$ oranı 2'den küçük çıktığı için taban malzemesinin çok iyi sınıflanmış olduğu görülmüştür. Ayrıca Wenthworth ölçeğine göre her iki bölgede de malzemenin çok kaba kum olduğu belirlenmiştir.

4.8 Su Seviyesi Değişimi Ölçümleri

Karaburun bölgesinde günlük su seviyesi değişimini incelemek amacıyla Karaburun Balıkçı Barınağı'nın iç kısmındaki rıhtım duvarına 100 cm yüksekliğinde bir ölçme şeridi

yerleştirilmiştir (Şekil 4.28). 26.08.2004 tarihinde başlayan kısa süreli bu ölçüm 13.09.2004 tarihinde sona erdirilmiştir. Gün içerisindeki ve tüm ölçüm günlerindeki toplam su seviyesi değişiminin hangi değerler arasında olduğunu belirlemek için sabah saat sekiz ile akşam saat on arasında saat başı, belirlenen referans seviyesine göre ölçüm alınmıştır. Şekil 4.29 günlere göre su seviyesi değişimlerini göstermektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde günlük maksimum 18 cm, minimum 4 cm ve ortalama 10 cm su seviyesi değişimi görülmüştür. Bu kayıt süresi içerisinde tüm ölçüm günlerinin birlikte değerlendirilmesi durumunda gözlenen maksimum ve minimum su seviyeleri arasındaki fark 30 cm olduğu belirlenmiştir.

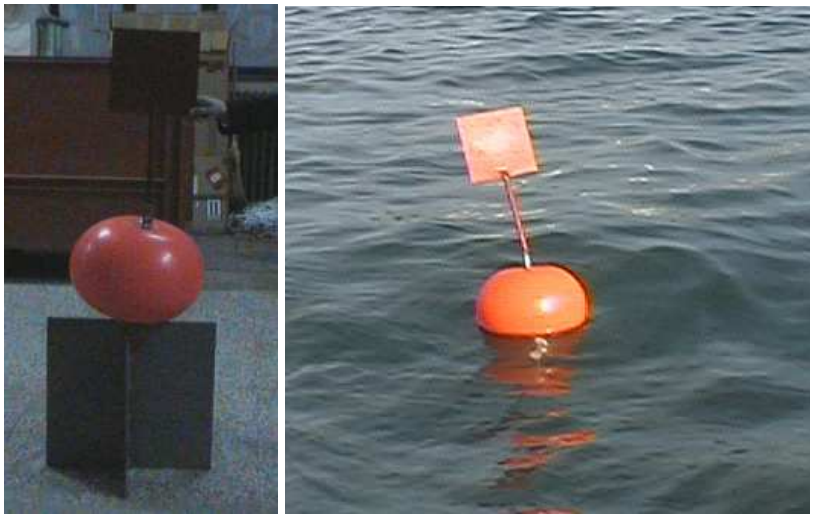
Şekil 4.28 Su seviyesi değişimi ölçümü



Şekil 4.29 Su seviyesi değişimleri

4.9 Akıntı Ölçümleri

Karaburun kıyısında akıntı hız ve yönünün belirlenmesi amacıyla iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki şamandıralarla akıntı parametrelerinin belirlenmesi, diğeri ise ADCP (Aquadopp Current Profiler) cihazı ile akıntı parametrelerinin ölçülmesidir. İlk yöntemde üç farklı şamandıranın ucuna akıntı kuvvetini alacak biçimde demirden çapraz levha yerleştirilmiştir (Şekil 4.30). Bu çapraz levhalar şamandıralara sırasıyla 1m, 3m ve 5m uzunluğunda olmak üzere iplerle bağlanmıştır. Böylece sakin su seviyesine göre 1m, 3m ve 5m derinliklerde akıntı ölçümü yapılmıştır.



a) b)

c)

Şekil 4.30 Akıntı ölçüm şamandırası

Şamandıralarla ilk olarak 16.09.2004 tarihinde akıntı ölçümü yapılmıştır. Daha sonra 28.10.2004, 07.09.2005 tarihlerinde ve son olarak da 14.04.2006 tarihinde bu ölçümler tekrarlanmıştır. Tekne yardımıyla yapılan bu ölçümlerde şamandıralar Karaburun kıyısında

belirli derinliğe ulaşıldıktan sonra bırakılmıştır. Şamandıralar bırakılırken GPS ile konumları, HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder ile de bulundukları derinlik belirlenmiştir. Belirli bir süre sonra üç farklı şamandıra bulundukları yerlerden, konumları ve derinlikleri belirlenerek alınmıştır. Çizelge 4.12'de tarihleriyle beraber akıntı ölçüm hızları ve yönleri görülmektedir.

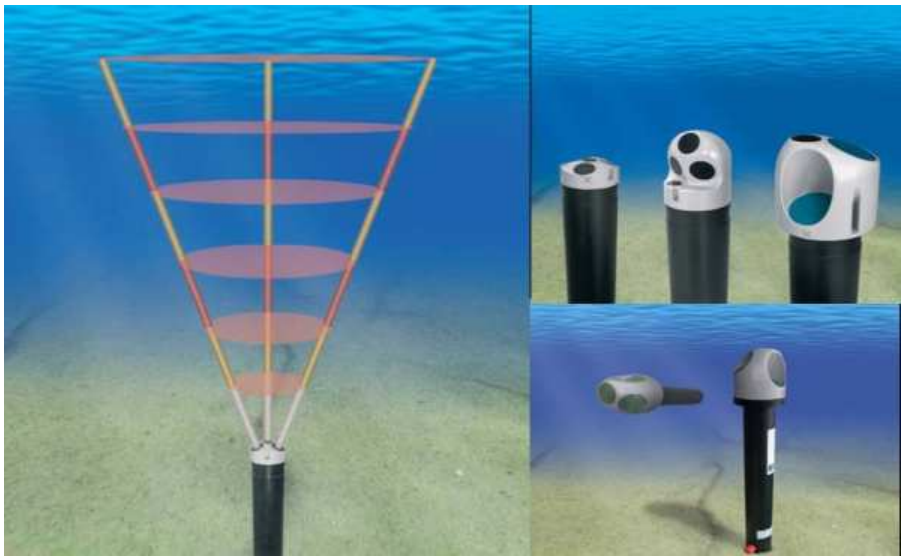
Çizelge 4.12 Şamandıra ile yapılan ölçümlerden elde edilen akıntı hızı ve yönleri

Ölçüm Tarihi	**Su seviyesi (m)**	**Hız**		**Yön (Akıntı doğrultusunun kuzeyle yaptığı açı) (°)**	**Meteorolojik Rüzgar Durumu**
		m/s	**km/saat**		
16/09/2004	-1	0.046	0.166	237	Yıldız ve Poyraz
	-3	0.039	0.140	249	
	-5	0.043	0.155	256	
28/10/2004	-1	0.081	0.292	73	Kıble ve Lodos
	-3	0.084	0.302	86	
	-5	0.081	0.292	92	
07/09/2005	-1	0.209	0.752	263	Yıldız ve Poyraz
	-3	0.183	0.659	267	
	-5	0.186	0.670	266	
07/09/2005	-1	0.191	0.688	270	Yıldız ve Poyraz
	-3	0.174	0.626	274	
	-5	0.182	0.655	272	
14/04/2006	-4.2	0.112	0.403	145	Yıldız ve Karayel

Farklı tarihlerde yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde ortalama akıntı hızının 0.046 m/s ile 0.193 m/s arasında olduğu görülmektedir. Maksimum akıntı hızı 0.209 m/s olarak belirlenirken minimum akıntı hızı ise 0.039 m/s olarak gözlemlenmiştir. Ortalama akıntı yönü ise üç ölçümde de etkili olan ENE-WSW doğrultusudur. Yani etkin akıntı yönü doğudan batıya doğrudur.

Akıntı hızının belirlenmesinde izlenen diğer yöntem ise ADCP (Aquadopp Current Profiler) akıntı cihazının kullanılmasıdır. ADCP akıntı cihazı akustik Doppler teknolojisini kullanarak suda akıntı profilini ölçmeye yaramaktadır (Şekil 4.31). Durağan uygulamalar için üretilmiş olup, deniz tabanına, şamandıraya veya tekneye yerleştirilebilmektedir (Nortek AS, 2005).

ADCP, 25° eğime sahip üç adet ışın demeti ve kullanıcının seçtiği sayı ile boyutta hücre kullanarak akıntı profilini ölçmektedir. İçsel eğiklik (tilt) ve pusula sensörleri akıntı yönünü verirken yüksek çözünülürlükteki basınç sensörü derinliği vermektedir.



Şekil 4.31 ADCP akıntı ölçüm cihazı (Nortek AS, 2005)

Karaburun kıyısında ADCP ile akıntı ölçümü 14.04.2006 tarihinde yapılmıştır. Yaklaşık onar dakikalık dört ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümler şamandıraya ADCP cihazının yerleştirilmesiyle yapılmıştır (Şekil 4.32). Ölçümlere başlamadan önce Nortek AS tarafından geliştirilen AquaPro yazılımı ile cihazın ayarları yapılmaktadır. AquaPro yazılımı ADCP'den elde edilen verilerin planlanması, yürütülmesi, cihazdan temin edilmesi ve işlenmesi için geliştirilmiş olan bir programdır. AquaPro yardımıyla veri alma aralığı, cihazın veri alma şekli (tabana yerleştirilmesi, şamandırayla kullanılması veya tekne kenarına monte edilmesi gibi), profil ölçerken kullanılan hücre aralıkları ve sayısı gibi bilgiler ölçümden önce girdi olarak programa tanımlanmaktadır. Ölçüm bittikten sonra ise tekrar yine bu yazılımla ADCP'de depolanan bilgiler geri alınabilmektedir. Elde edilen akıntı verileri ise yine Nortek AS tarafından geliştirilen Surge yazılımı ile işlenmektedir.

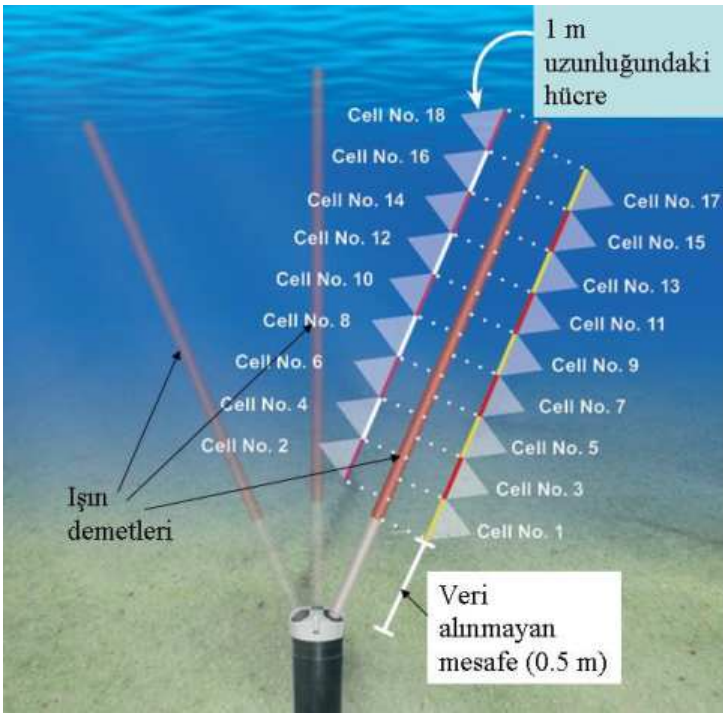
Şekil 4.32 Şamandıraya yerleştirilen ADCP akıntı ölçüm cihazı

Akıntı ölçümlerinde cihaz NS, EW doğrultularında ve düşey doğrultuda hız bileşenlerini vermektedir. Bu verilerin yanında sıcaklık, derinlik, bileşke hız ile bu hız vektörünün doğrultusundaki akıntı yönünü de belirleyebilmektedir. Çizelge 4.13'te ölçüm zamanları ve ölçümün yapıldığı derinlikler görülmektedir.

Çizelge 4.13 ADCP cihazı ile yapılan ölçüm zaman ve derinlikleri

Ölçüm no	Ölçüm Tarihi	Ölçüm Saati	Derinlik (m)
1	14.04.2006	12.00-12.10	7.0
2		12.16-12.27	7.0
3		12.33-12.40	10.0
4		12.44-12.52	7.0

Akıntı profilleri 1 m uzunluğundaki hücre aralıklarından oluşan üç adet ışın demeti kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.33). Örnekleme aralığı ise 2 saniye olarak belirlenmiştir.



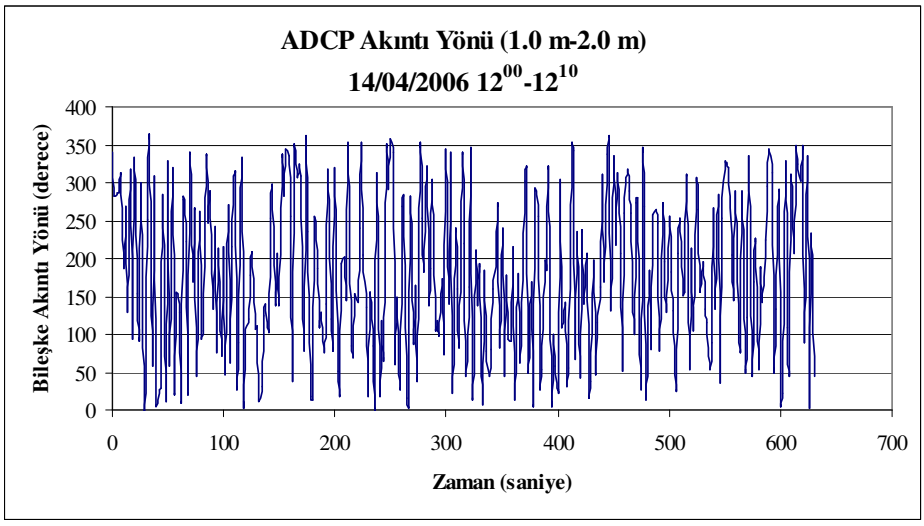
Şekil 4.33 ADCP akıntı cihazının veri alma hücreleri ve ışın demetleri (Nortek AS, 2005)

ADCP akıntı cihazı şamandıraya dik olarak yerleştirilmiştir. Şekil 4.32'den de görüldüğü üzere şamandıra yüzerken akıntı cihazının bir kısmı da su içine batmıştır. Bu değer basınç ölçümünden yaklaşık 0.5 m olarak elde edilmiştir. Cihaz Şekil 4.33'te görüldüğü gibi belirli bir mesafeden sonra veri almaya başlamaktadır. Bu değer AquaPro yazılımında 0.5 m olarak tanımlanmıştır. Bu sebeple ADCP akıntı cihazı sakin su seviyesinden 1 m aşağıda her 1 m'de bir olmak üzere ölçüm almıştır. Hidrometrik kurala göre ortalama akıntı hızını belirlemek için

su yüzeyinden itibaren 0.2h, 0.6h ve 0.8h mesafelerde akıntı hızı ölçümlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.14'te bu derinlikler verilmiştir. Bu sebeple zaman serisi şeklinde elde edilen akıntı hızı bileşenleri, yönü ile bileşke hızları bu derinliklere karşılık gelen mesafelerde belirlenmiş ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 4.34 ve Ek 1). Şekil 4.34'te 1. ölçümden elde edilen, -1.0 m ve -2.0 m derinlikleri arasındaki bileşke akıntı yönü, bileşke akıntı hızı, NS doğrultusundaki akıntı hızı bileşeni ve EW doğrultusundaki akıntı hızı bileşeni değerlerinin zaman serileri görülmektedir. Akıntı yönlerinde kuzey 0° tanımlanarak verilmiştir.

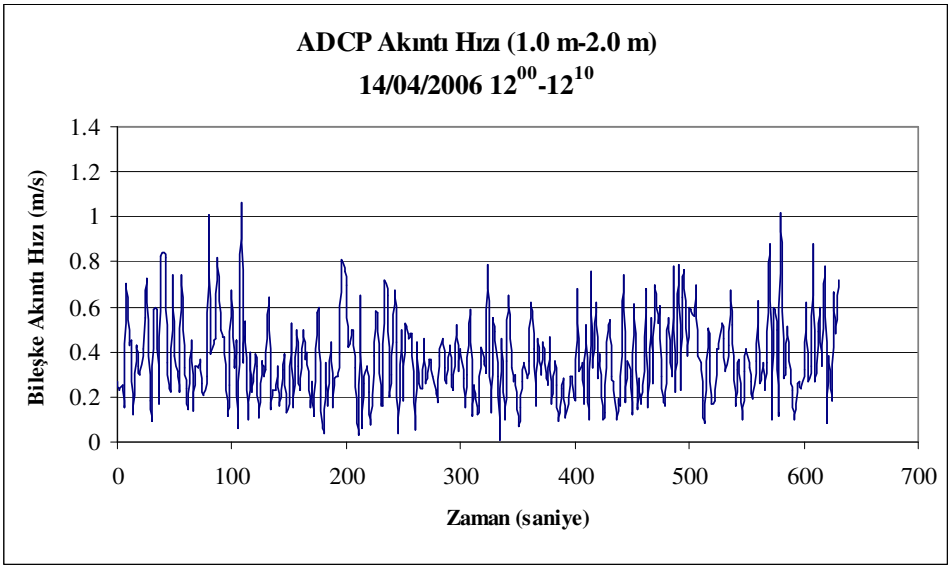
Çizelge 4.14 Hidrometrik kurala göre akıntı hızı verilerinin belirlendiği derinlikler

Ölçüm no	Derinlik (m)	0.2h(m)	0.6h (m)	0.8h (m)
1	7.0	1.4	4.2	5.6
2	7.0	1.4	4.2	5.6
3	10.0	2.0	6.0	8.0
4	7.0	1.4	4.2	5.6

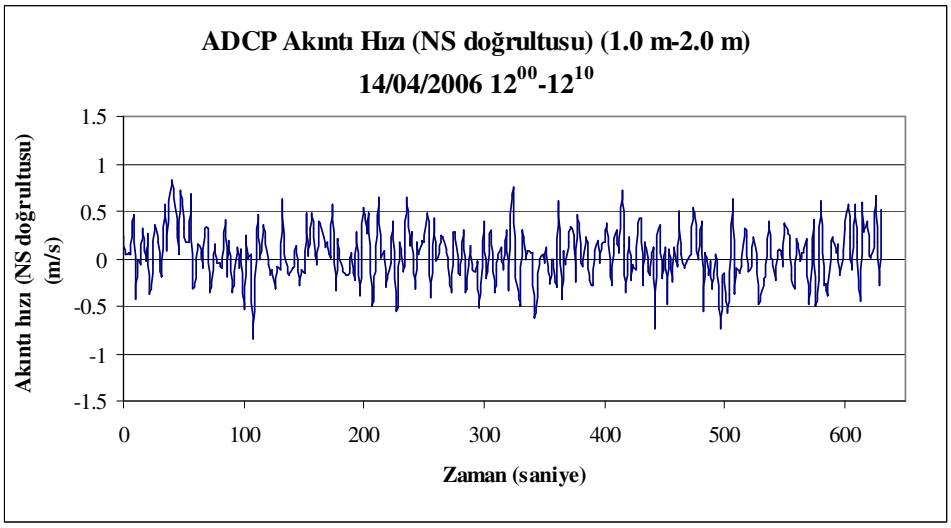


a) Akıntı yönü

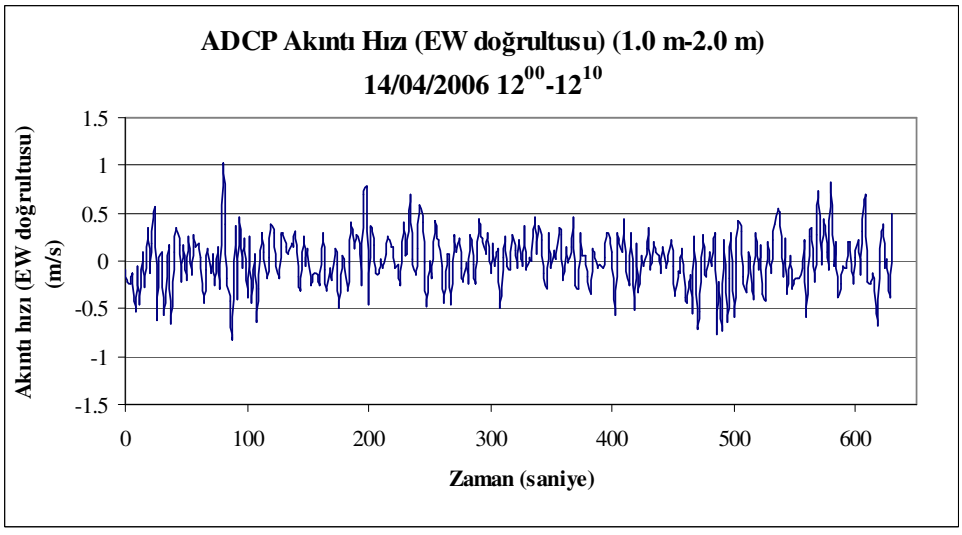
Şekil 4.34 1. ölçümden elde edilen -1.0 m ve -2.0 m arasındaki ölçüm verisi zaman serileri



b) Bileşke akıntı hızı



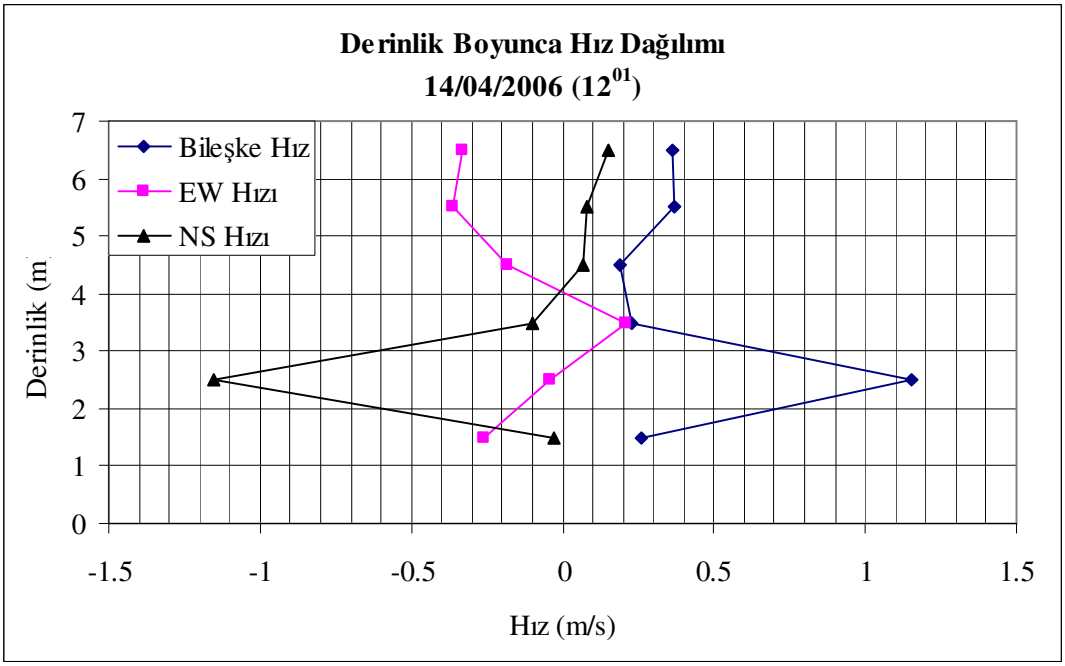
c) Akıntı hızı (NS doğrultusu)



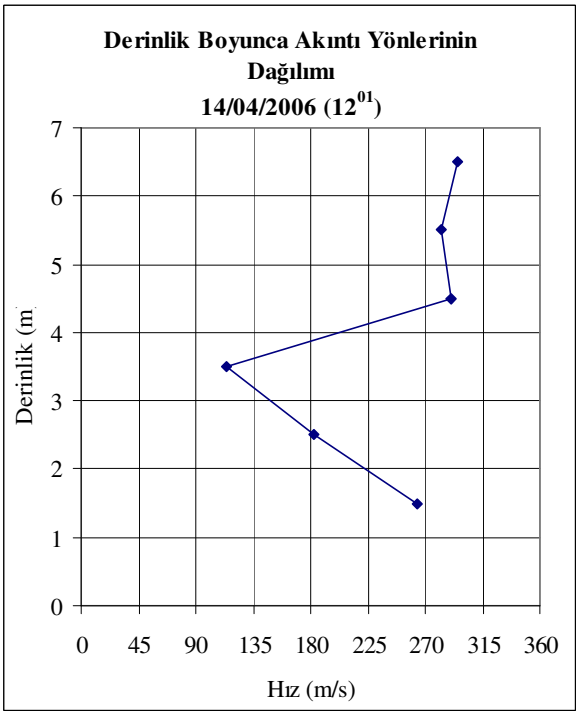
d) Akıntı hızı (EW doğrultusu)

Şekil 4.34 Devam

Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37'de anlık akıntı ölçüm değerlerinin derinlik boyunca değişimlerine ait örnekler görülmektedir. Bu veriler 1. ölçümden seçilmiş, derinlikle değişen anlık akıntı hızı ve yönüdür. NS, EW doğrultularındaki akıntı hızı bileşenleri ile bileşke hız ve yönünün derinlikle değişimi görülmektedir.

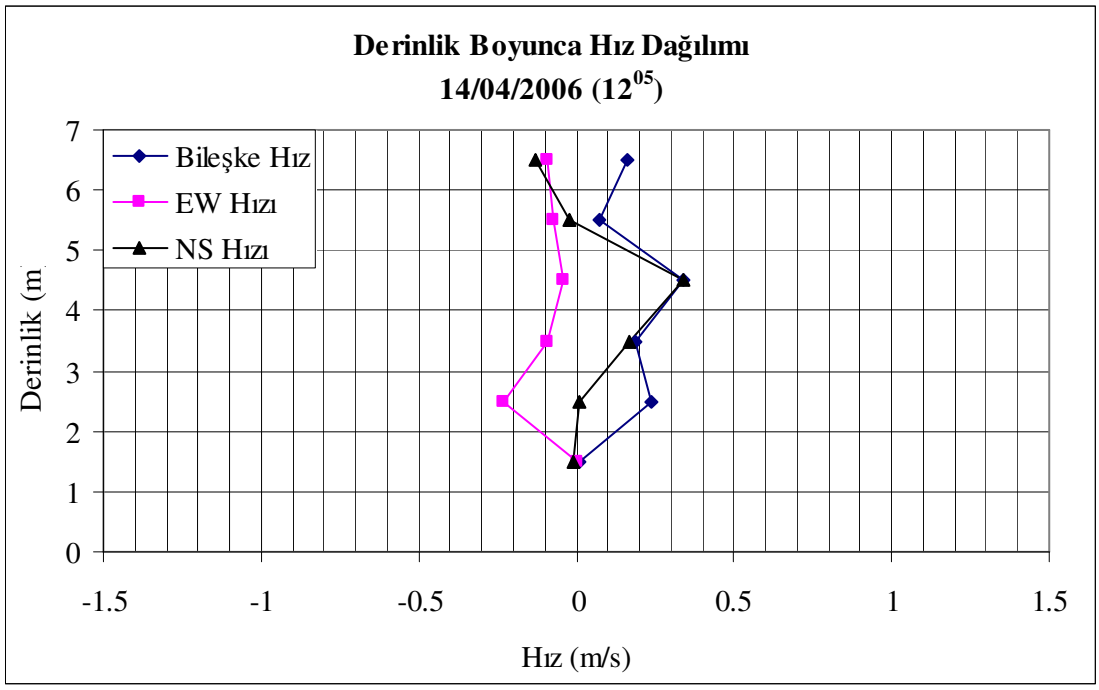


a)

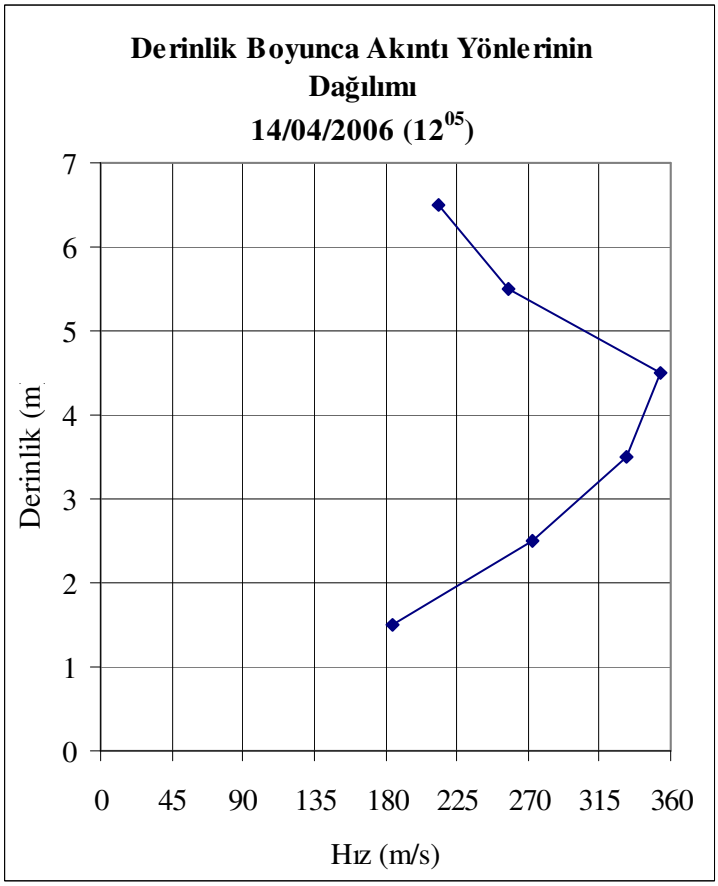


b)

Şekil 4.35 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.01) a) Hız profili b) Yönsel değişim

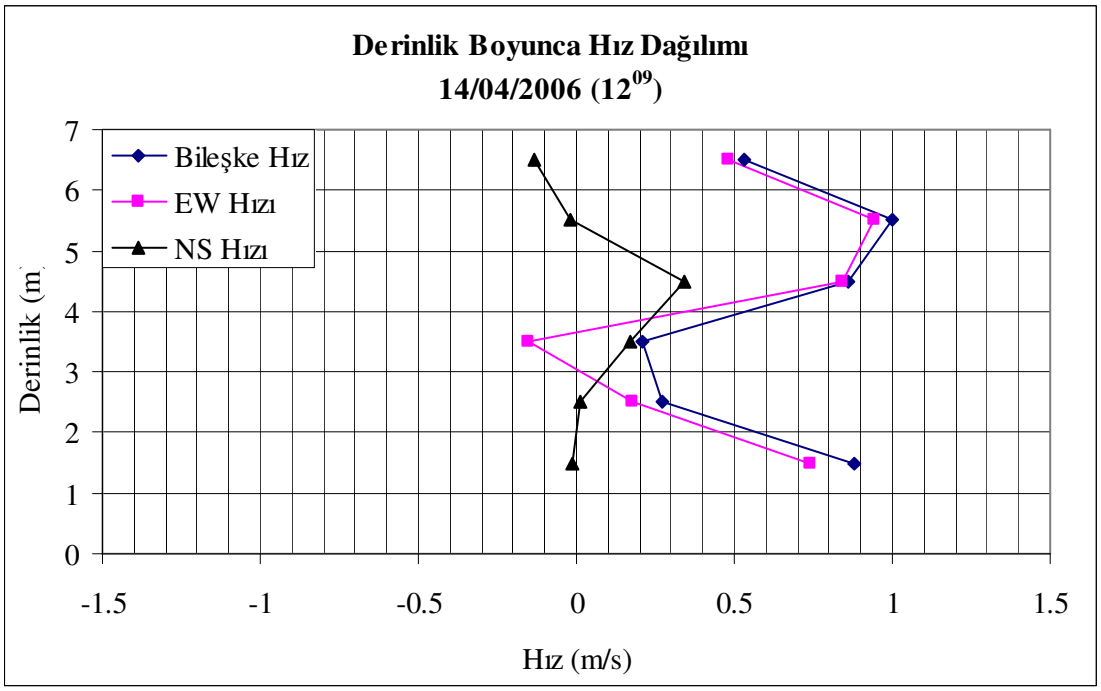


a)

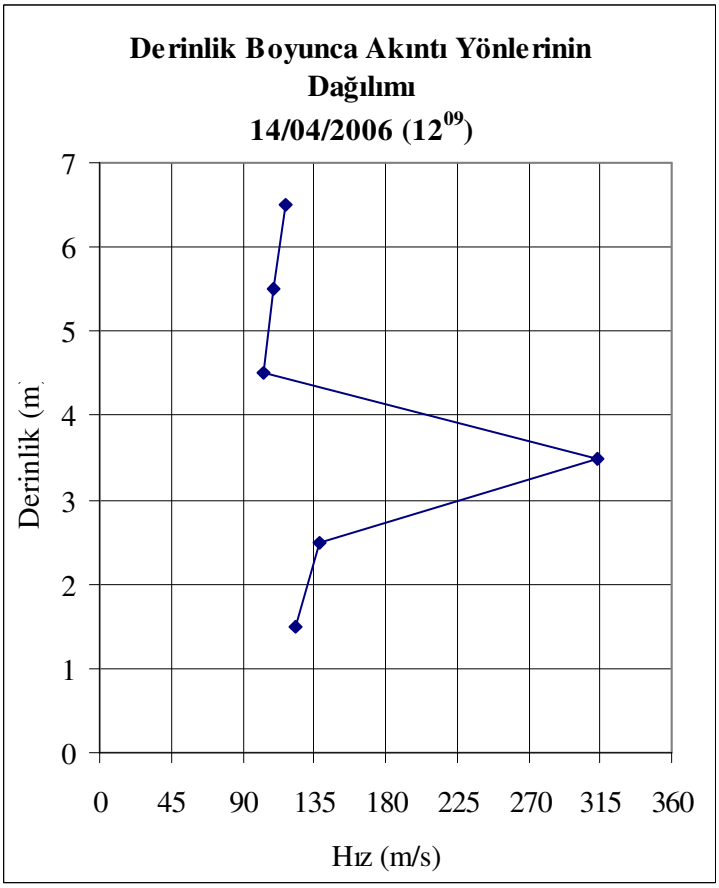


b)

Şekil 4.36 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.05) a) Hız profili b) Yönsel değişim



a)



b)

Şekil 4.37 Karaburun kıyısında akıntı ölçüm değerleri 14.04/2006 (12.09) a) Hız profili b) Yönsel değişim

ADCP akıntı cihazı ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen zaman serisi şeklindeki akıntı bileşke hızları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme hidrometrik kurala göre yapılmıştır. Çizelge 4.14'te verilen derinliklerdeki zaman serisi şeklindeki bileşke akıntı hızlarının ortalama, maksimum ve minimum değerleri alınmıştır. Bu yapılan her ölçüm için tekrar edilmiş ve sonuçta tüm değerlerin ortalaması alınarak yaklaşık 40 dakikalık bir ölçüm sonucunda bileşke akıntı hızının şiddetiyle ilgili bilgiler edinilmiştir (Çizelge 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18). Maksimum ve minimum akıntı bileşke hızı değerleri hesaplanırken bir ölçüm boyunca en büyük veya en küçük %10'luk değerlerin ortalaması alınmıştır. Böylece ölçüm hatalarından kaynaklanan yanlış değerler de giderilmektedir.

Çizelge 4.15 Minimum bileşke akıntı hızı

	Minimum Bileşke Akıntı Hızı (m/s)			
Ölçüm derinliği	1. ölçüm 14.04.2006 $12.^{00}$-$12.^{10}$	2. ölçüm 14.04.2006 $12.^{16}$-$12.^{27}$	3. ölçüm 14.04.2006 $12.^{33}$-$12.^{40}$	4.ölçüm 14.04.2006 $12.^{44}$-$12.^{52}$
0.2 h	0.09	0.095	0.08	0.075
0.6 h	0.089	0.1	0.107	0.077
0.8 h	0.078	0.083	0.087	0.074
Ortalama minimum bileşke hız değeri	0.086	0.093	0.091	0.074

Çizelge 4.16 Maksimum akıntı bileşke hızı

	Maksimum Bileşke Akıntı Hızı (m/s)			
Ölçüm derinliği	1. ölçüm 14.04.2006 $12.^{00}$-$12.^{10}$	2. ölçüm 14.04.2006 $12.^{16}$-$12.^{27}$	3. ölçüm 14.04.2006 $12.^{33}$-$12.^{40}$	4.ölçüm 14.04.2006 $12.^{44}$-$12.^{52}$
0.2 h	0.78	0.86	0.83	0.80
0.6 h	0.71	0.75	0.77	0.73
0.8 h	0.68	0.74	0.76	0.69
Ortalama maksimum bileşke hız değeri	0.723	0.783	0.787	0.74

Çizelge 4.17 Ortalama bileşke akıntı hızı

	Ortalama Bileşke Akıntı Hızı (m/s)			
Ölçüm derinliği	1. ölçüm 14.04.2006 $12.^{00}$-$12.^{10}$	2. ölçüm 14.04.2006 $12.^{16}$-$12.^{27}$	3. ölçüm 14.04.2006 $12.^{33}$-$12.^{40}$	4.ölçüm 14.04.2006 $12.^{44}$-$12.^{52}$
0.2 h	0.369	0.390	0.396	0.381
0.6 h	0.349	0.352	0.367	0.368
0.8 h	0.336	0.343	0.367	0.330
Ortalama bileşke hız değeri	0.351	0.362	0.377	0.36

Çizelge 4.18 Yapılan ölçümlerin (1.,2.,3. ve 4. ölçüm) ortalama değerleri (bileşke akıntı hızları)

	V_{min}	V_{maks}	V_{ort}
Bileşke akıntı hızı değerleri (m/s)	0.086	0.758	0.363

Karaburun kıyısında şamandıra yöntemi ve ADCP akıntı cihazı ile eş zamanlı akıntı ölçümü yapılmıştır. Bu yöntemler karşılaştırıldığı zaman birbirine yaklaşık değerler verdiği görülmektedir. ADCP ile akıntı ölçüm sonuçları incelendiğinde ortalama akıntı hızının 0.363 m/s, şamandıra ile yapılan ölçüm sonucunda ise ortalama akıntı hızının 0.112 m/s olduğu belirlenmiştir.

Akıntı yapısının meteorolojik koşullar dikkate alınarak incelenmesi sonucunda, akıntının rüzgar kaynaklı yapılandığı söylenebilmektedir. Özellikle yüzeyden itibaren 3m içinde gözlenen akıntı yönü NNE-ESE yönleri arasındadır. Bu saatler içinde rüzgar poyraz ve gündoğusundan esmiştir.

5. İSTATİSTİKSEL DALGA MODELİ

5.1 Giriş

Kıyı mühendisliğinin en önemli konularından biri deniz dalgalarının kıyı alanına olan hidrodinamik etkisidir. Kıyı yapılarının planlanması, tasarımı, inşasında ve bunların yanında kıyı çizgisi değişimi ile gelişiminin belirlenmesinde dikkate alınacak ana faktör dalga parametreleridir. Bu sebeple kıyılarla ilgili herhangi bir düzenleme yapılırken, o bölgedeki dalga karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Mühendislik uygulamalarında ise belirli bir bölge için dalga iklimini tahmin etmede uzun dönemli dalga verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak dalga ölçümü masraflı ve zaman alan bir işlem olduğundan dalga parametrelerinin zaman serisini genişletecek yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ise daha uzun dönemde elde edilebilen rüzgar verilerinden sağlanabilmektedir.

Saha ölçümlerinin yapıldığı bölgede kıyı boyu katı madde taşınımının doğru olarak belirlenmesi ve bu bölge için yeni bir istatistiksel dalga modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple çalışma alanında dalga parametreleri farklı yöntemlerle elde edilmiş ve geliştirilecek dalga modelinin doğrulanması için kullanılmıştır. Bu yöntemler;

- Dalga ölçümü (Karaburun kıyısında -16 m'ye yerleştirilen dalga ölçer yardımıyla),
- Rüzgar verilerinden dalga tahmin yöntemleri:

  - SMB Yöntemi

  - SPM Yöntemi

  - Sayısal modelleme (MIKE 21 SW)

Bu çalışmanın birinci aşaması olarak bu bölümde yukarıda bahsedilen yöntemlerle elde edilen dalga parametreleri analiz edilecek ve yöresel rüzgar-dalga korelasyon bağıntıları yani istatistiksel bir dalga modeli elde edilecektir.

5.2 Rüzgar Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Herhangi bir bölgenin uzun dönemli dalga ölçümünün bulunmadığı durumlarda dalga iklimini tahmin etmek için rüzgar verilerinden faydalanılmaktadır. Özellikle kıyı çizgisi değişimi ile ilgili çalışmalarda kullanılan modellerde dalga verilerinin modele doğru girilmesi, doğru sonuç alınabilmesi için kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebeple dalga ölçümü yoksa kullanılan rüzgar verilerinin doğruluğunun analiz edilmesi gerekir.

Karaburun bölgesindeki uzun dönemli dalga iklimini tahmin edebilmek için en yakın meteoroloji istasyonu olan Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinden faydalanılmış fakat bu veriler incelendiğinde doğadaki değişim üzerindeki etkileri yeterince doğru yansıtmadığı anlaşılmıştır. Kumköy Meteroloji İstasyonu'ndan elde edilen verilerin doğrulanması amacıyla çalışma bölgesinde yerel olarak rüzgar ölçümü yapılmıştır. OTA111-T model bir rüzgar ölçer kuzeyli rüzgarları algılayacak biçimde 23.06.2004 tarihinde Karaburun fenerine yerleştirilmiş ve sürekli rüzgar ölçümleri alınmaya başlanmıştır. Yerel olarak yapılan rüzgar ölçümü Nisan 2005 tarihine kadar sürdürülmüştür.

Bu çalışmada Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait Ocak 1990-Eylül 2005 tarihleri arasındaki rüzgar verileri kullanılmıştır. Bunun yanında Karaburun bölgesine ait Haziran 2004–Nisan 2005 dönemini kapsayan yaklaşık 11 aylık sürekli rüzgar ölçümü elde edilmiştir.

Çalışmada ölçülen rüzgar verileri ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan değerlerde farklılıklar görülmüştür. Bu farklılık özellikle kuzey doğulu yönlerde ortaya çıkmaktadır. Ölçümler Şekil 5.1'de görüldüğü gibi zaman serisi şeklinde karşılaştırıldığında genelde aynı eğilime sahiptirler fakat kuzey doğulu yönlerde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun değerlerinin yerel ölçümlere göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda kuzey doğulu yönlerdeki saatlik ortalama rüzgar hızlarındaki sapmalar Şekil 5.1'de daire içerisinde gösterilmektedir. Bu nedenle Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerini kalibre etmek amacıyla iki ölçüm arasında regresyon analizi yapılmış ve bu veriler için düzeltme fonksiyonları belirlenmiştir.

Rüzgar verilerinden dalga verileri elde edilirken deniz seviyesinden 10 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızlarının kullanılması gerekmektedir. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait rüzgar verilerinin deniz seviyesinden 40 m, Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin ise deniz seviyesinin 62 m üzerinde olmasından dolayı bu verilerin karşılaştırılabilmesi ve dalga verilerinin elde edilmesinde kullanılabilmeleri için deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızlarının bulunması gerekmektedir.

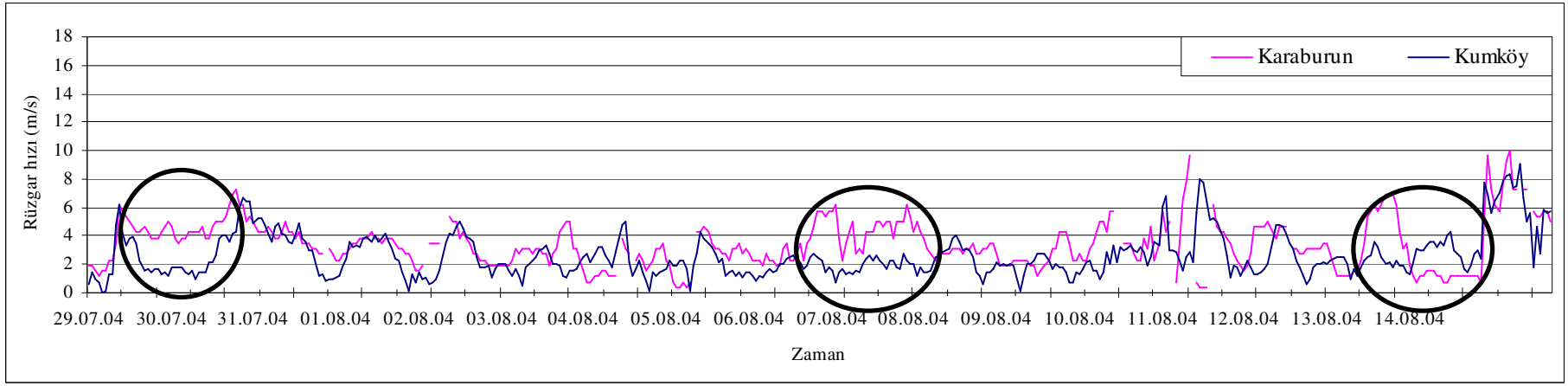
Rüzgarlar yeryüzündeki sürtünme nedeniyle yavaşlarlar, bundan dolayı yükseklik arttıkça rüzgar hızında da artma gözlemlenmektedir. Bitki örtüsü yüksekliği az ve düzgün araziler için (5.1) ifadesi kullanılarak farklı yükseklikteki rüzgar hızları belirlenebilmektedir.

$$\frac{u(z)}{u(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{1/7} \tag{5.1}$$

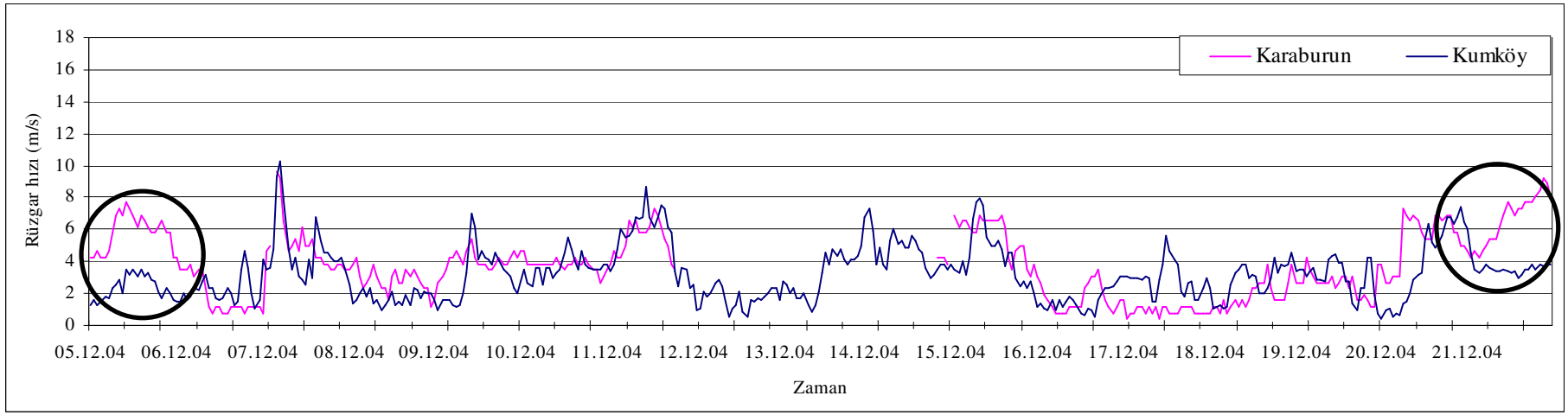
Burada, z rüzgar hızı belirlenmek istenen noktanın yüksekliği, u(z) bu noktadaki rüzgar hızı, z_0 ve $u(z_0)$ ise referans yüksekliği ve rüzgar hızını göstermektedir.

İki ölçüme ait veriler incelendiğinde bazı zaman aralıklarında iki ölçüm arasında büyük farkların olduğu görülmüştür (Şekil 5.1). Farkların hangi yönlerden kaynaklandığını araştırmak için veriler rüzgar yönlerine göre sınıflandırılmış ve o yönlere ait Kumköy ile Karaburun verileri karşılaştırılmıştır.

Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ve Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırmasını veren Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7'den görüldüğü gibi NW, NNW ve N yönleri için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri birbirlerine oldukça yakın değerler vermektedir. Bu sebeple belirtilen yönlerden gelen rüzgar hızları için herhangi bir düzeltme fonksiyonu belirlenmemiştir. Şekil 5.2 ve 5.3'te NW yönü, Şekil 5.4 ve 5.5'te NNW yönü, Şekil 5.6 ve 5.7'de ise N yönü için rüzgar hızları arasındaki ilişki ve verilerin karşılaştırılması görülmektedir.

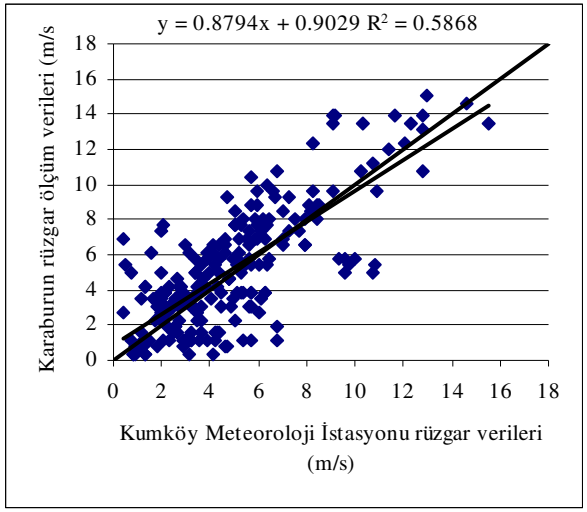


a) 29.07.04 – 15.08.2004 tarihleri arasında rüzgar hızları

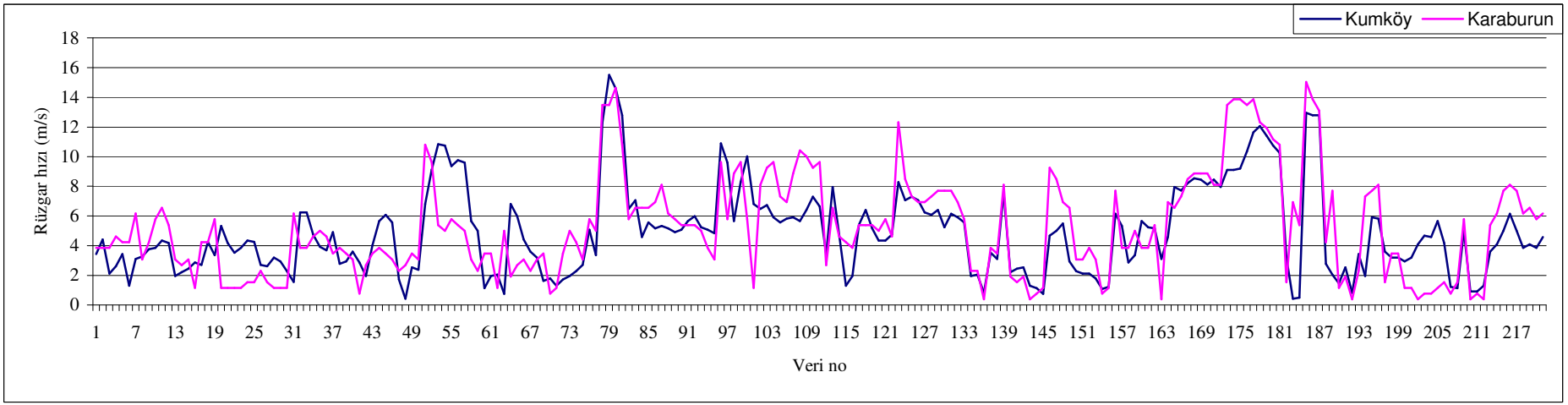


b) 05.12.04 – 22.12.04 tarihleri arasında rüzgar hızları

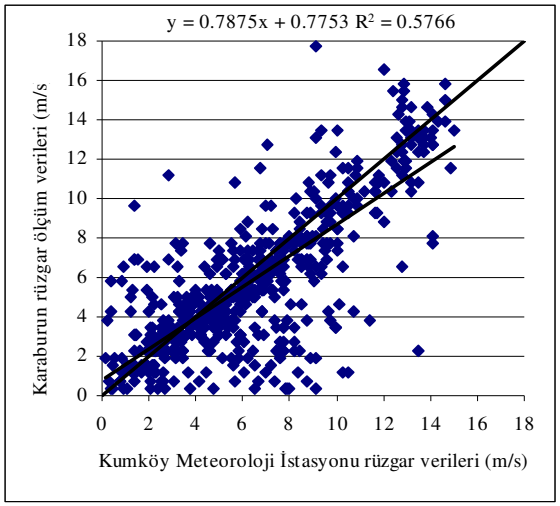
Şekil 5.1 Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verileri



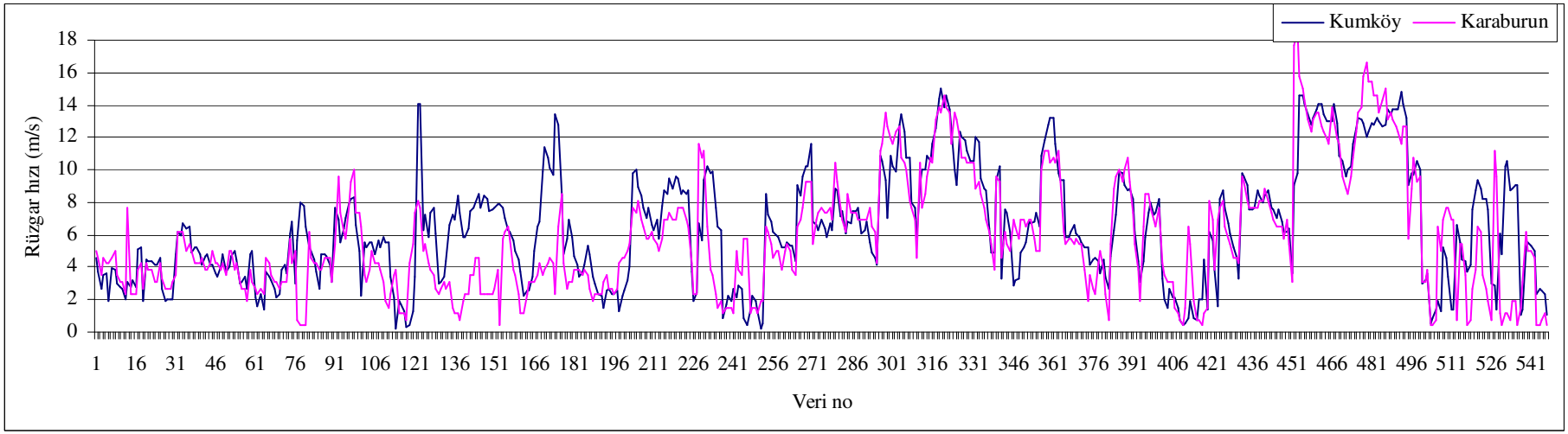
Şekil 5.2 NW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri



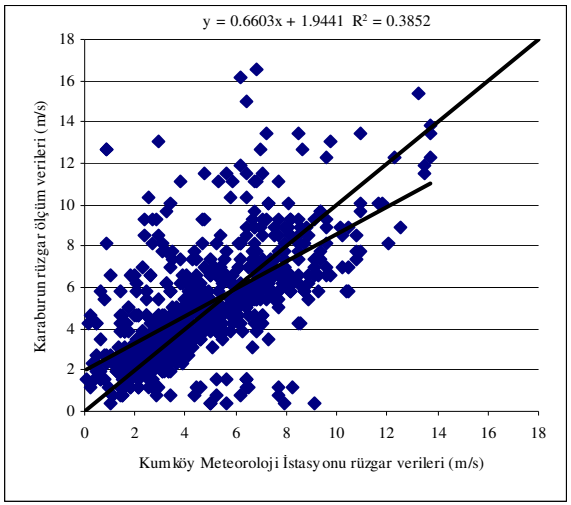
Şekil 5.3 NW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması



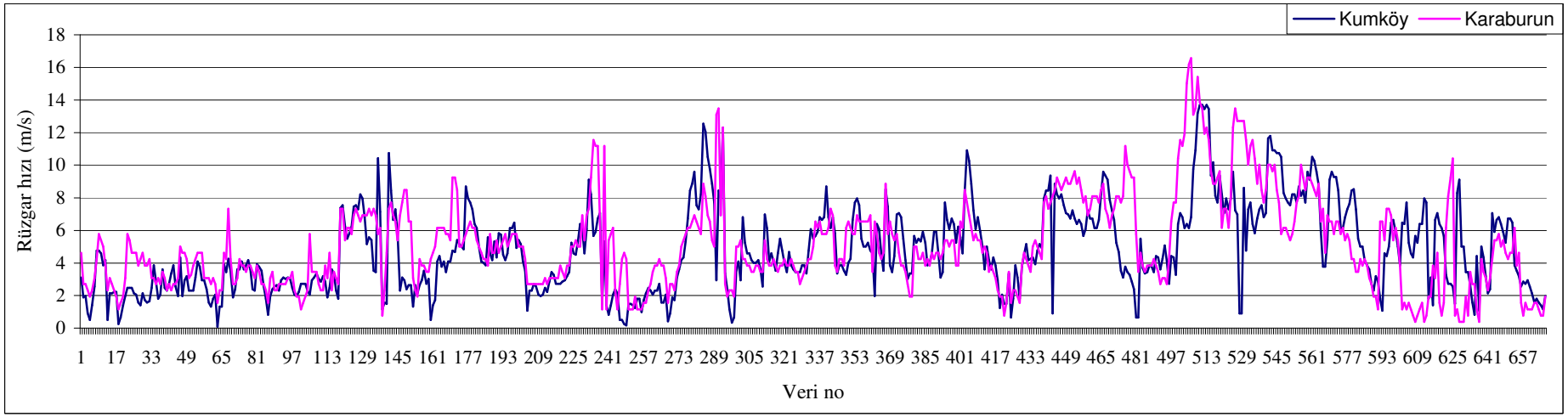
Şekil 5.4 NNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri



Şekil 5.5 NNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.6 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri



Şekil 5.7 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

Rüzgar verileri arasında N, NNW ve NW yönlerinde uyum gözlenirken (Şekil 5.3, 5.5 ve 5.7) diğer yönler için aynı uyum yeterince görülmemektedir (Şekil 5.9(a), 5.11(a), 5.13(a), 5.15(a) ve 5.17(a)). Özellikle doğulu yönlerde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun, güneyli yönlerde ise Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin oldukça düşük rüzgar hızı değerleri verdiği görülmüştür. Karaburun fenerine yerleştirilen rüzgar ölçerin güneyli yönlere kapalı olmasından dolayı bu yönlerde Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerinin doğru olduğu kabul edilmiştir. Fakat Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin, uzun dönem dalga istatistiği ve dalga iklimi tahmininde kullanılabilmesi için yerel rüzgar ölçüm değerlerine göre farklı değerler verdiği yönlerde düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu nedenle kıyıyı etkileyen bazı yönler (WNW, NNE, NE, ENE ve E) için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun verileri arasında ilişki araştırılmıştır. İki istasyon rüzgar verisi arasındaki ilişkiyi veren çeşitli fonksiyonlar değerlendirilmiş ve ikinci dereceden polinom fonksiyon WNW, NNE, ENE ve E yönleri için en iyi sonucu verirken, NE yönü için üstel fonksiyonun en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar hızı verilerinin kalibre edilmesi için kullanılan korelasyon fonksiyonları Çizelge 5.1'de yönlere göre görülmektedir.

Çizelge 5.1 Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri için düzeltme fonksiyonları

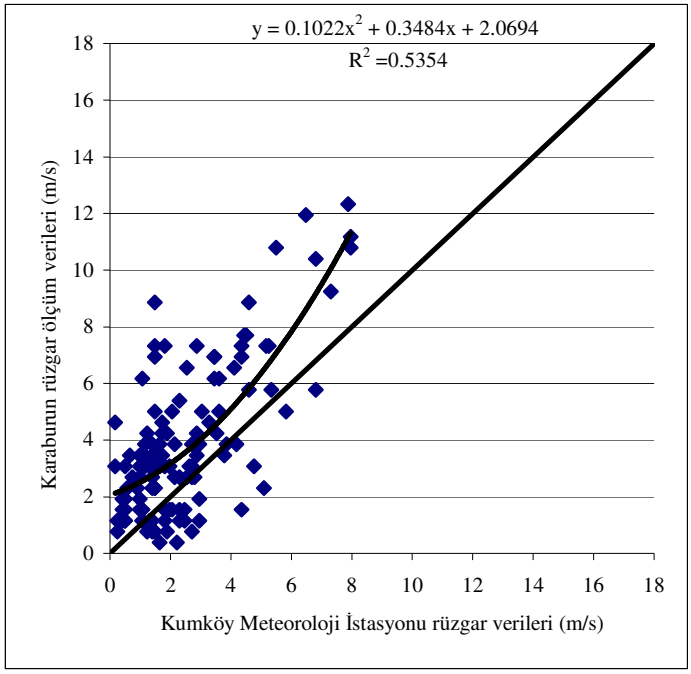
Yönler	U_d (m/s)
WNW	$0.1022U_k^2 + 0.3484U_k + 2.0694$
NNE	$0.0731U_k^2 + 0.4347U_k + 2.3507$
NE	$2.6271e^{0.2375U_k}$
ENE	$0.0527U_k^2 + 1.4155U_k + 1.7582$
E	$0.15U_k^2 + 0.7351U_k + 2.1913$

burada;

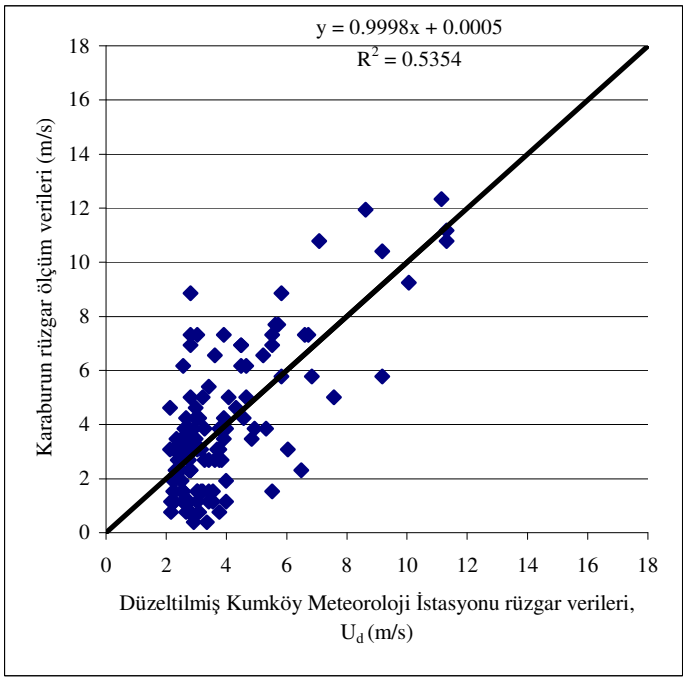
U_k : Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait rüzgar hızı değerleri,

U_d : Düzeltilmiş rüzgar hızı değerleridir.

Şekil 5.8 ve 5.9'da WNW yönü, Şekil 5.10 ve 5.11'de NNE yönü, Şekil 5.12 ve 5.13'te NE yönü, Şekil 5.14 ve 5.15'te ENE yönü, Şekil 5.16 ve 5.17'de ise E yönü için düzeltme yapılmadan önce ve düzeltme yapıldıktan sonraki rüzgar hızları arasında mevcut olan ilişki ile rüzgar hızlarının karşılaştırılması verilmiştir.

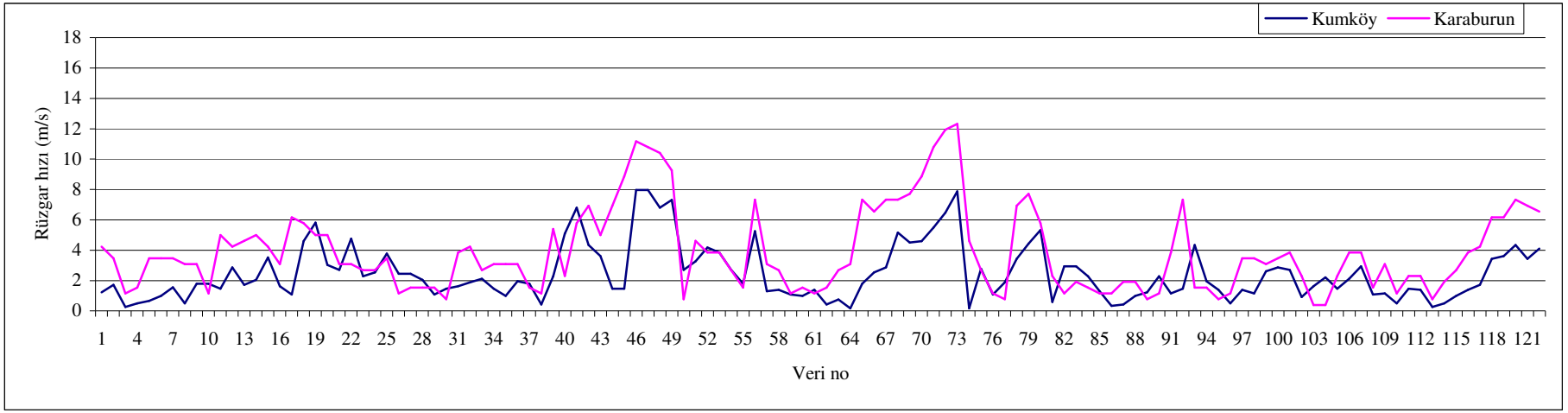


(a) Düzeltilmemiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

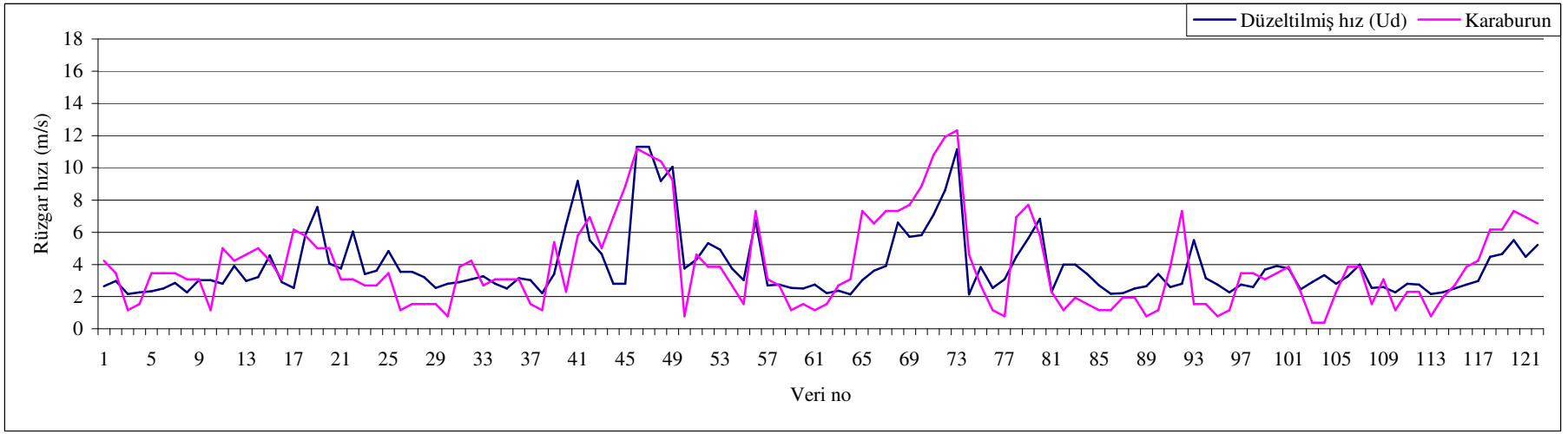


(b) Düzeltilmiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

Şekil 5.8 WNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki

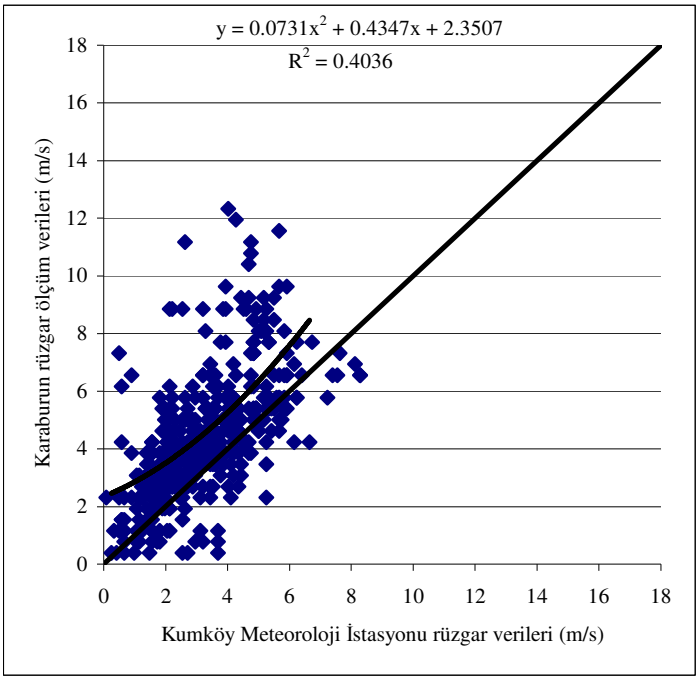


a) Düzeltilmemiş rüzgar verileri ile

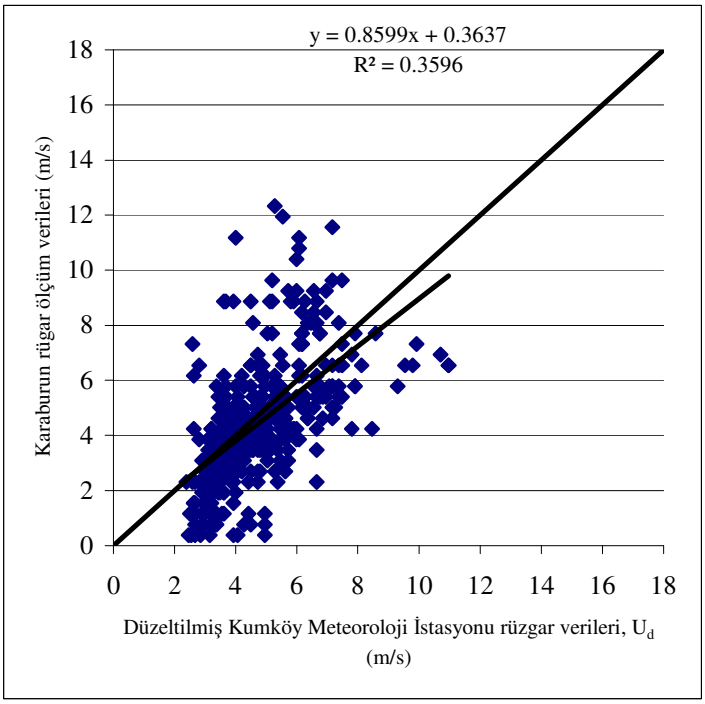


b) Düzeltilmiş rüzgar verileri ile

Şekil 5.9 WNW yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

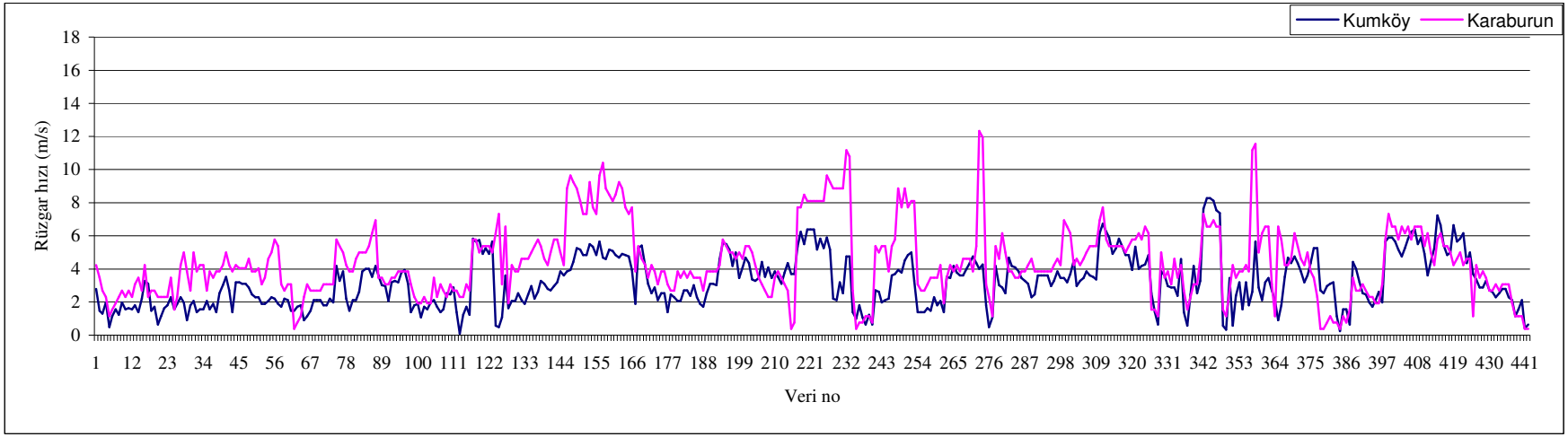


(a) Düzeltilmemiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

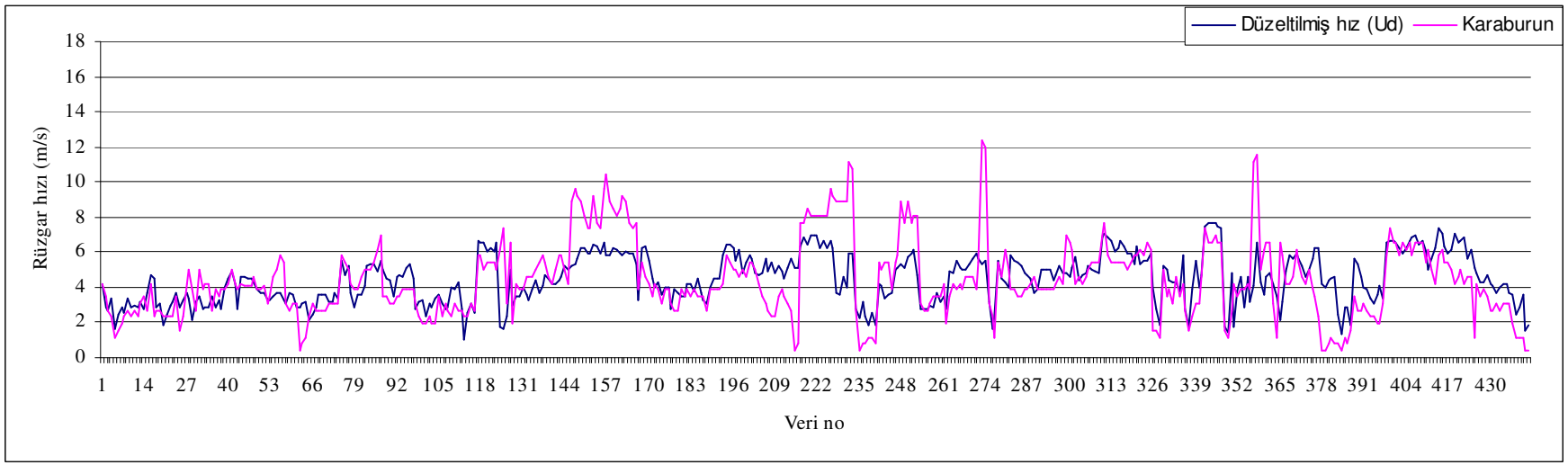


(b) Düzeltilmiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

Şekil 5.10 NNE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki

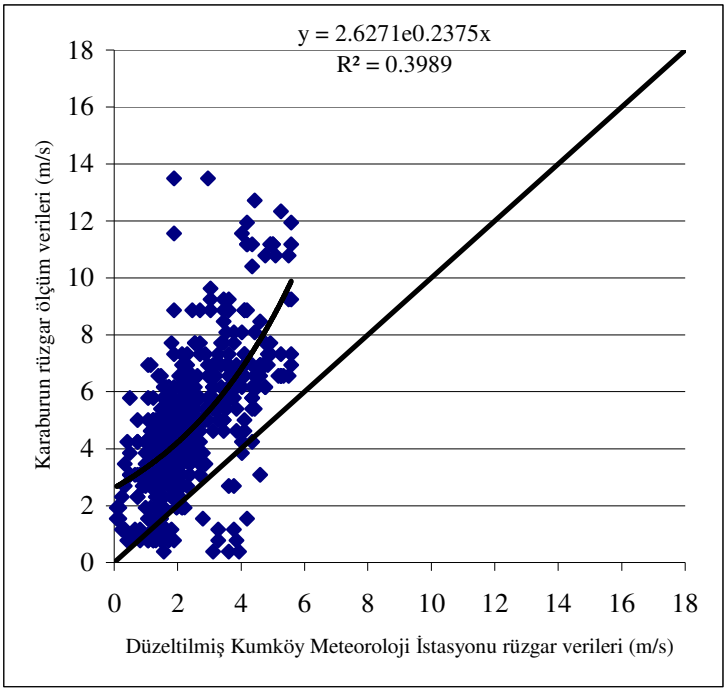


a) Düzeltilmemiş rüzgar verileri ile

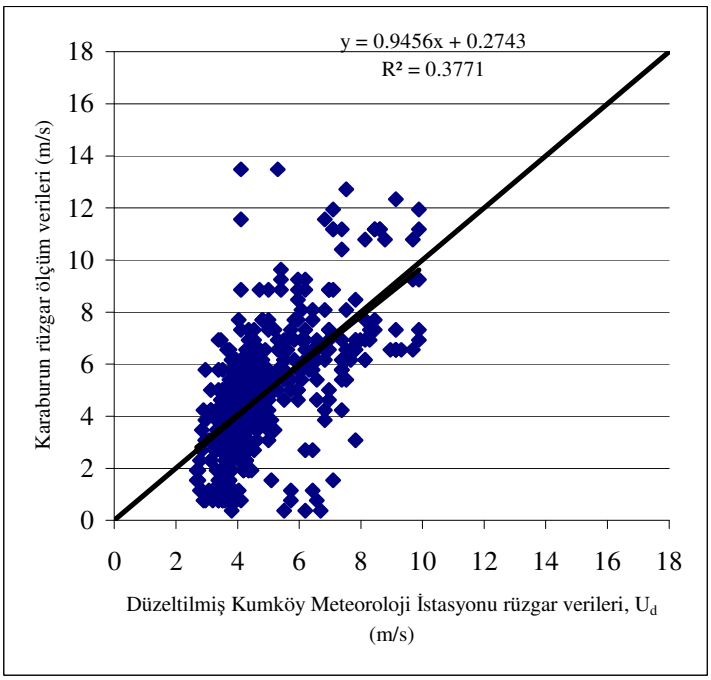


b) Düzeltilmiş rüzgar verileri ile

Şekil 5.11 NNE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

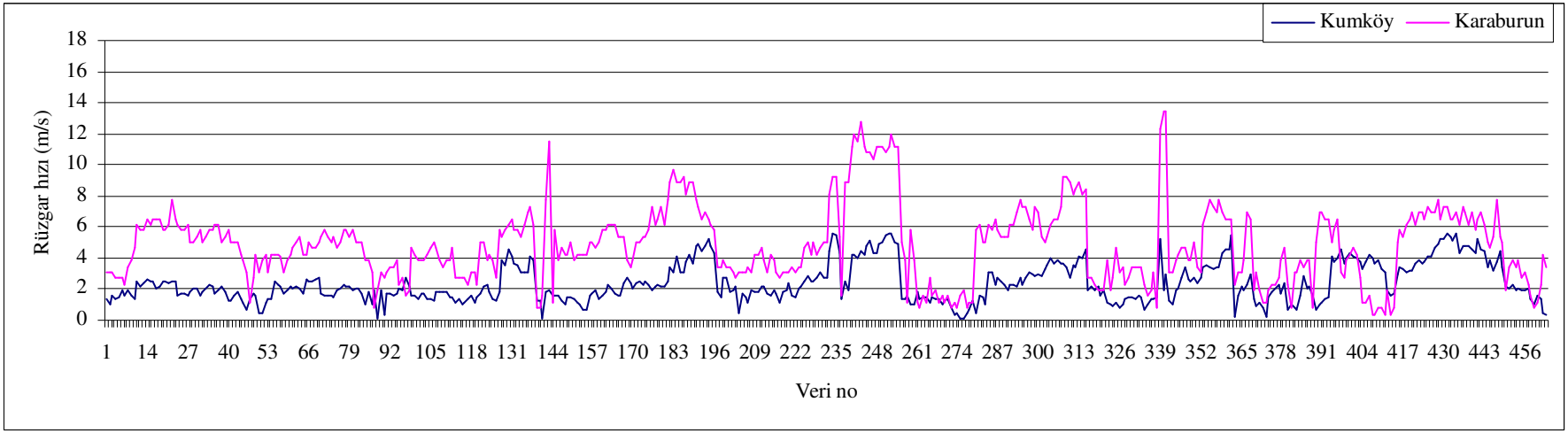


(a) Düzeltilmemiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

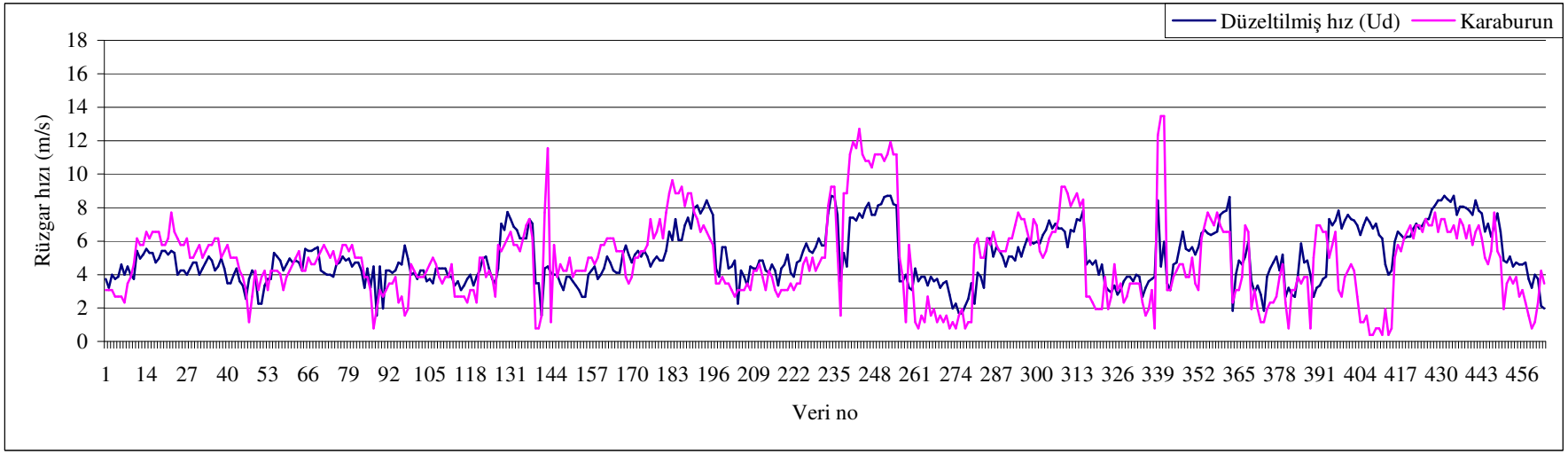


(b) Düzeltilmiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

Şekil 5.12 NE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki

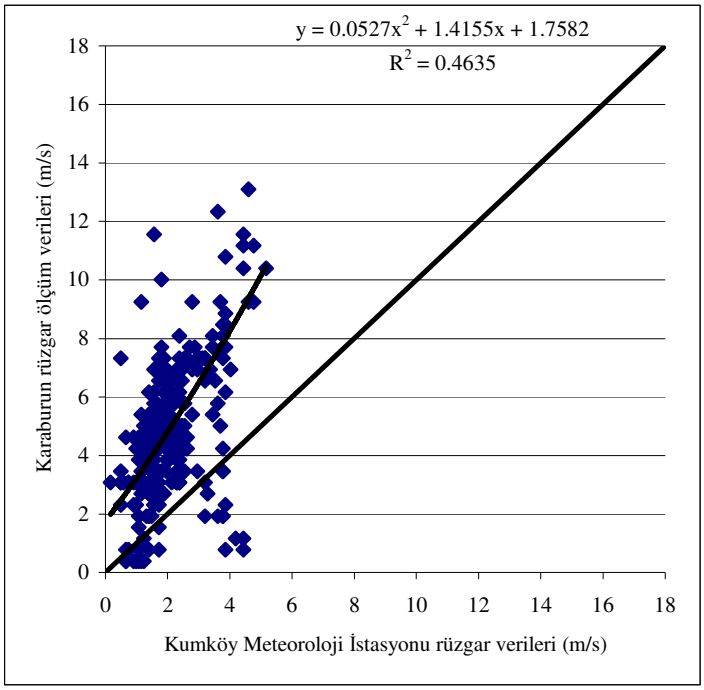


a) Düzeltilmemiş rüzgar verileri ile

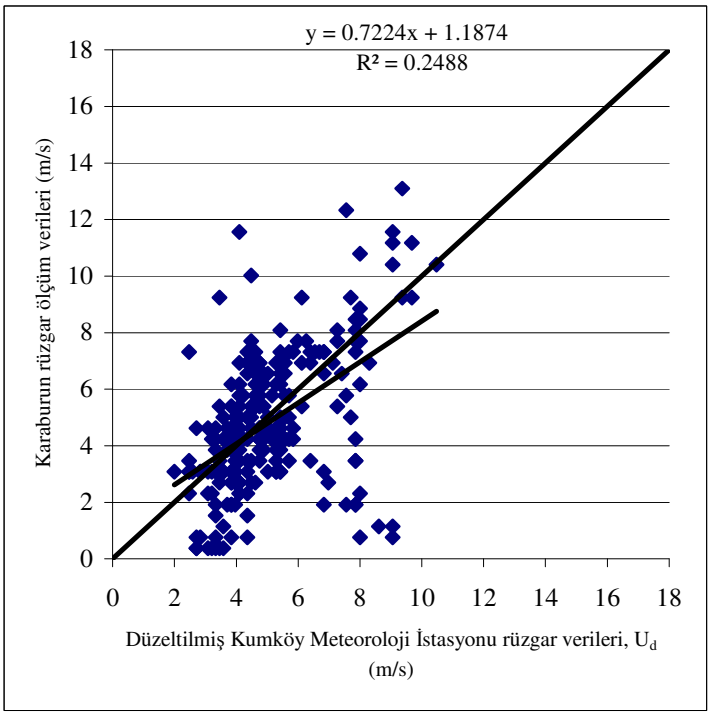


b) Düzeltilmiş rüzgar verileri ile

Şekil 5.13 NE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

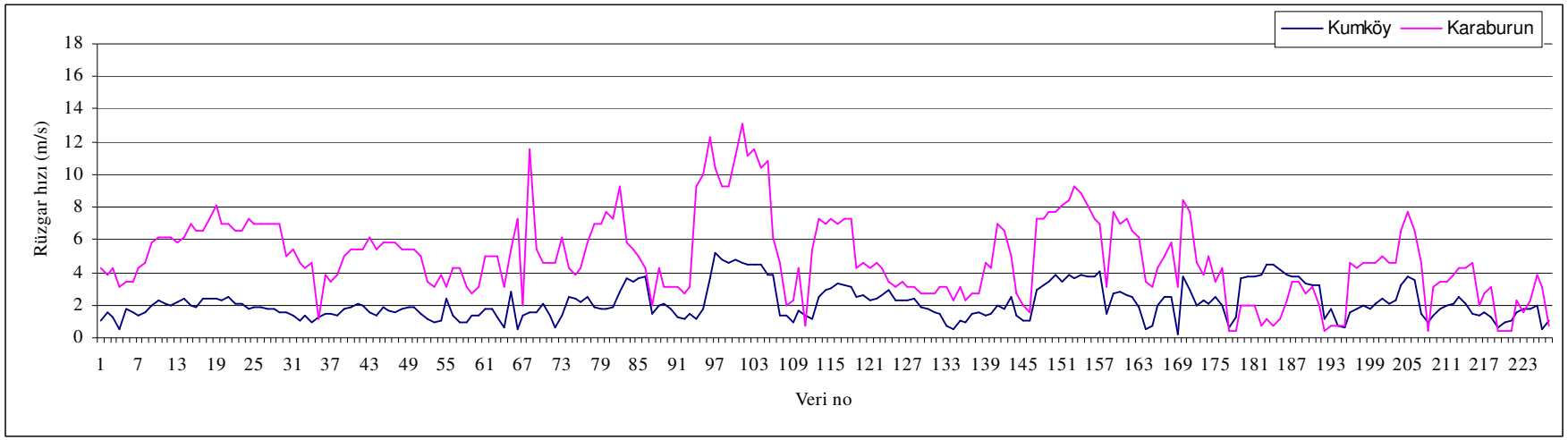


(a) Düzeltilmemiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

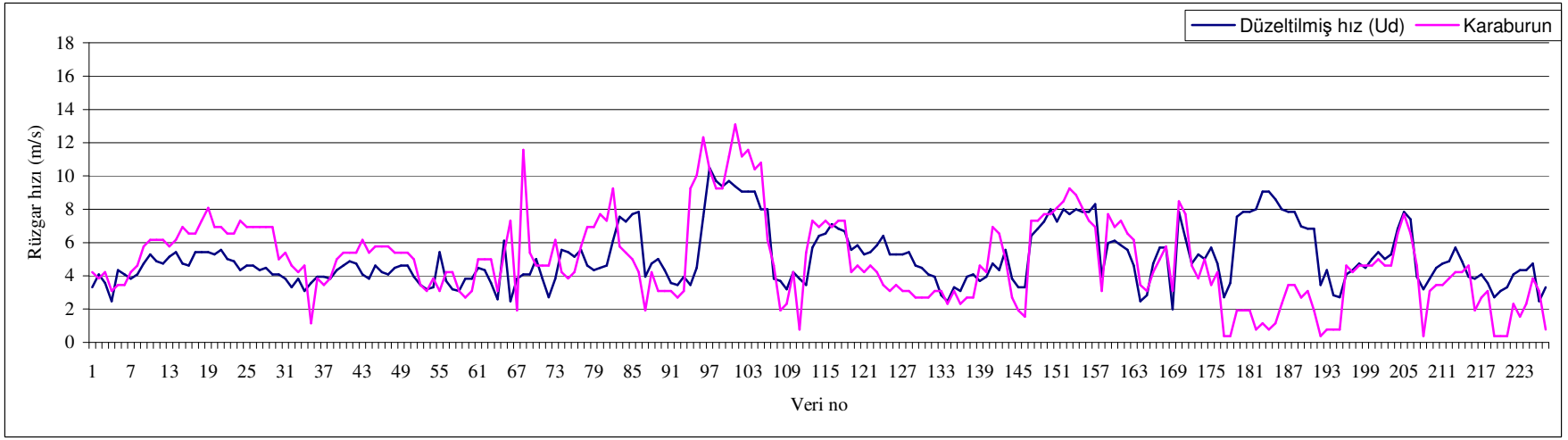


(b) Düzeltilmiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

Şekil 5.14 ENE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar hızı ölçümleri arasındaki ilişki

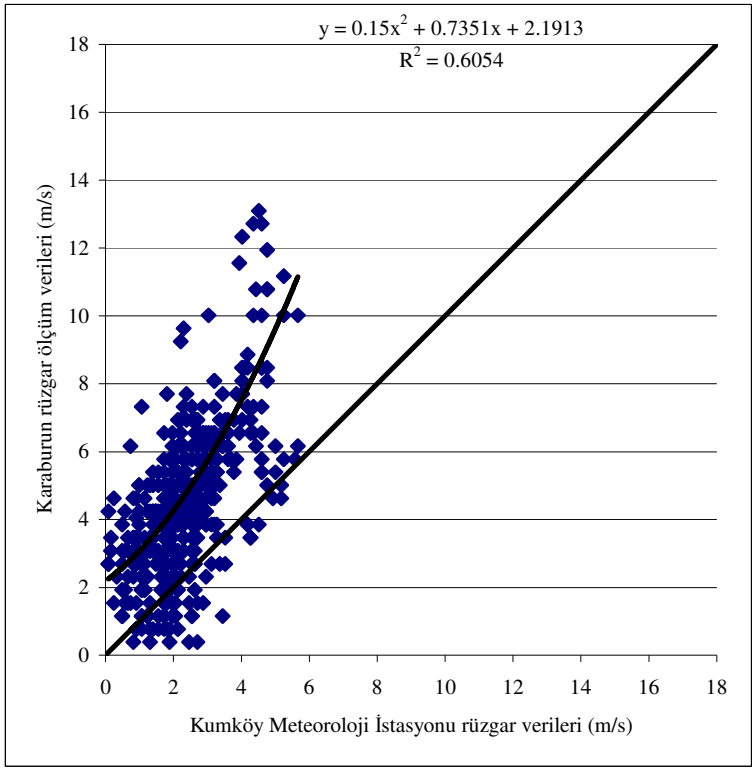


a) Düzeltilmemiş rüzgar verileri ile

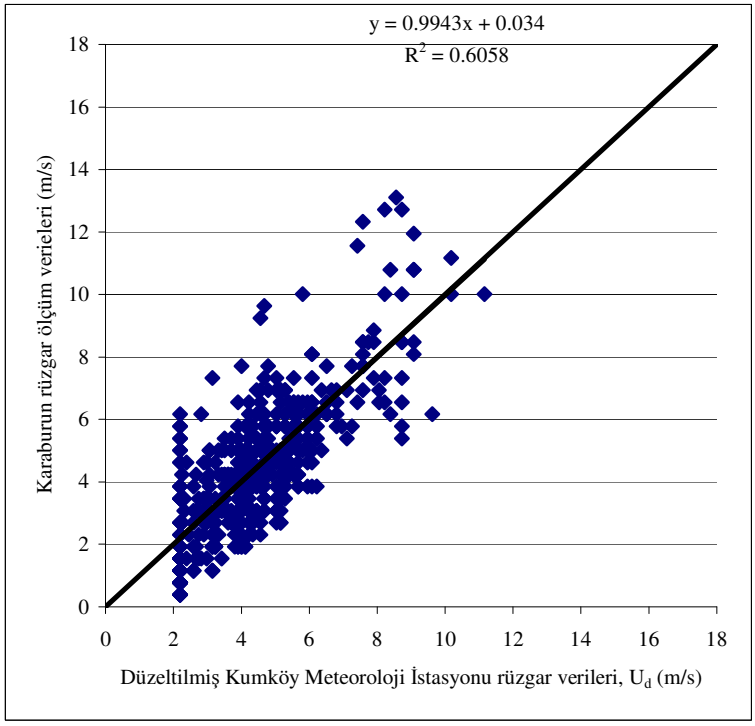


b) Düzeltilmiş rüzgar verileri ile

Şekil 5.15 ENE yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

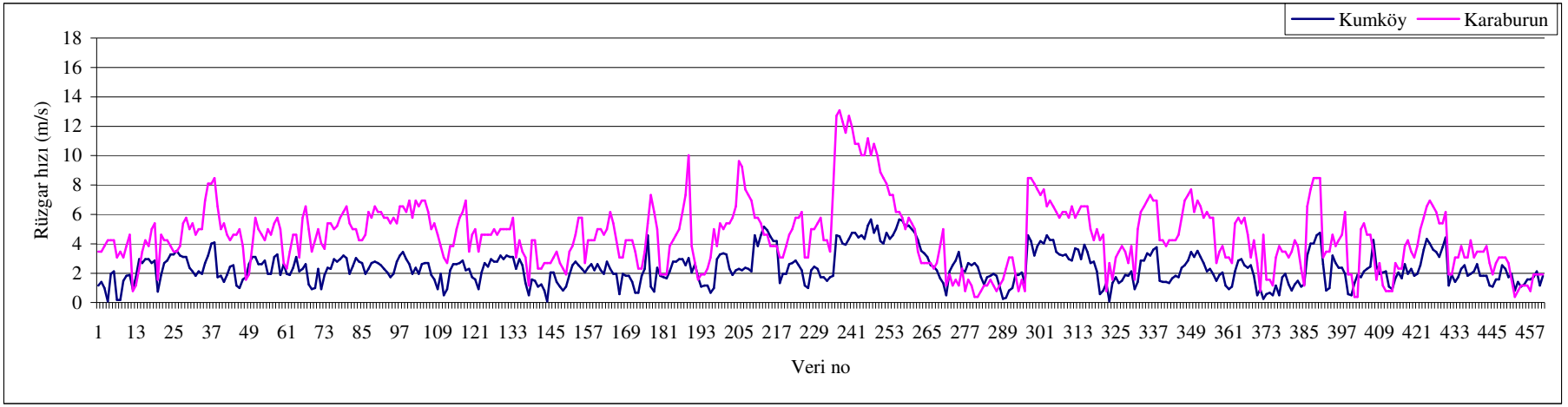


(a) Düzeltilmemiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

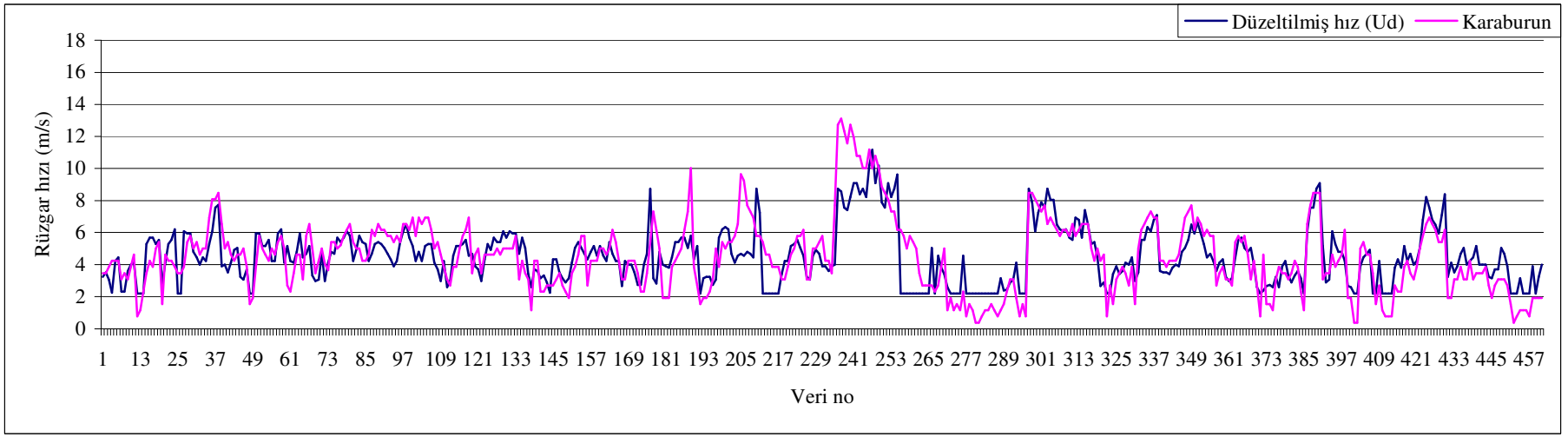


(b) Düzeltilmiş rüzgar hızı verileri arasındaki ilişki

Şekil 5.16 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar ölçümleri arasındaki ilişki



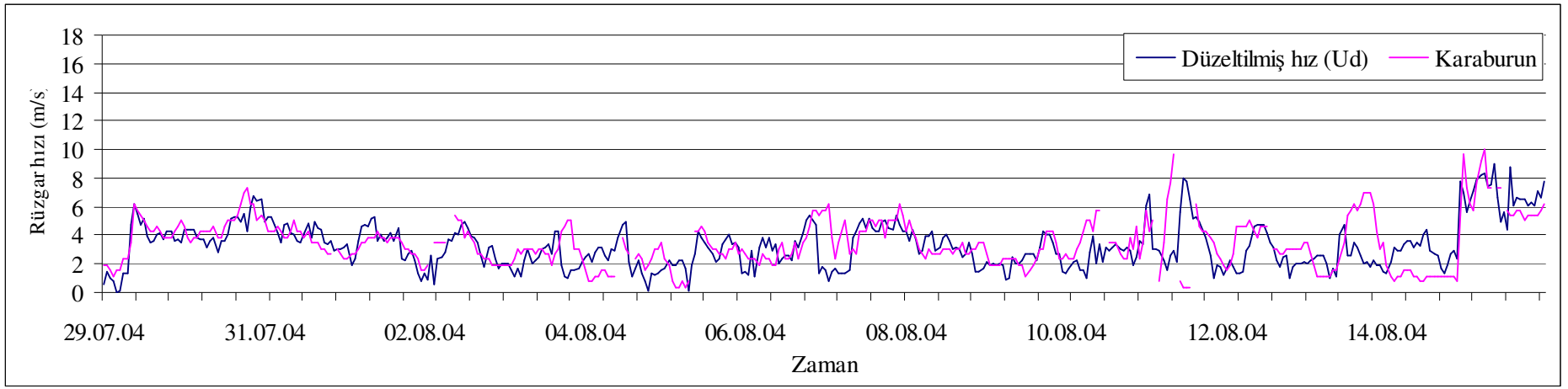
a) Düzeltilmemiş rüzgar verileri ile



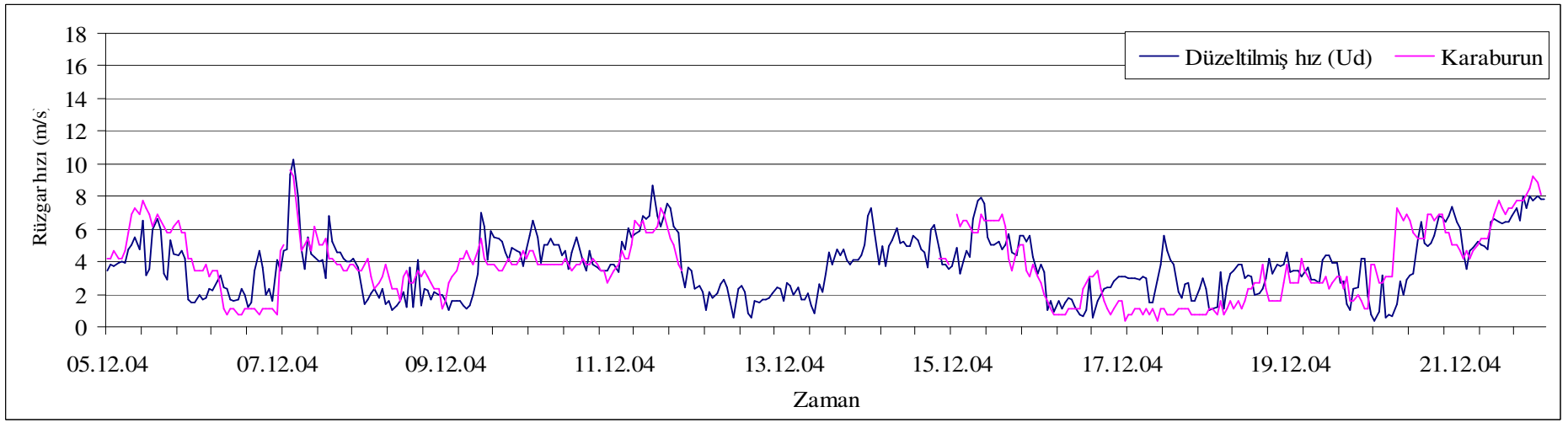
b) Düzeltilmiş rüzgar verileri ile

Şekil 5.17 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.9, 5.11, 5.13, 5.15 ve 5.17'den de görüldüğü gibi düzeltme fonksiyonları yardımıyla (Çizelge 5.1) belirlenen Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar hızı verilerinin yeniden çizilmesiyle yapılan karşılaştırmalarda iki ayrı ölçüm verisinin değerleri birbiri ile uyumlu hale gelmişlerdir. Bu çalışmada yapılan uzun dönem dalga analizinde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen düzeltilmiş rüzgar verileri (WNW, NNE, NE, ENE ve E yönlerinde) kullanılacaktır. Şekil 5.18'de düzeltilmiş verilerle elde edilmiş zaman serileri görülmektedir. Bu zaman serisinde sadece belirtilen beş yön için düzeltilmiş değerler kullanılmış, diğer yönler için rüzgar hızları aynen alınmıştır. Tüm yönleri içeren Karaburun ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar hızlarına ait zaman serisini gösteren ve Şekil 5.18'de verilen grafikler (düzeltilmiş ve aynen alınan rüzgar hızları birlikte) incelendiğinde rüzgar hızlarının birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.



a) 29.07.04 – 15.08.2004 tarihleri arasında rüzgar hızları



b) 05.12.04 – 22.12.04 tarihleri arasında rüzgar hızları

Şekil 5.18 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar hızı ölçüm verileri

5.3 Dalga Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Çalışma alanına ait istatistiksel bir dalga modeli geliştirmek ve bölgede meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımını modelleyebilmek için -16 m derinliğe yerleştirilen ultrasonik ve basınç tipi DL2 model dalga ölçer yardımıyla dalga ölçümleri yapılmıştır. 30 Ağustos 2003 tarihinde başlayan dalga ölçümleri aralıklarla/kesikli olarak 18 Mart 2005 tarihinde tamamlanmıştır. Bu tarihler arasında ölçülen beş adet veri seti bulunmaktadır. Çizelge 5.2'de veri setlerinin tarihleri görülmektedir. Toplam 8.5 ay sürekli dalga kaydı yapılmıştır.

Çizelge 5.2 Karaburun bölgesinde yapılan dalga ölçüm verilerinin tarihleri

Veri seti no	**Veri seti tarih aralıkları**
1	30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003
2	29 Aralık 2003-22 Ocak 2004
3	27 Mart 2004-25 Haziran 2004
4	16 Eylül 2004-28 Ekim 2004
5	28 Ekim 2004-17 Aralık 2004

Dalga ölçüm cihazında dalga parametrelerini belirleyebilmek için iki tip algılayıcı bulunmaktadır. Bunlar ultrasonik algılayıcı ve yarı iletken basınç algılayıcısıdır. Basınç algılayıcısı ile 0.5 s aralıklarla kaydedilen basınç değerleri bilgisayar ortamında aşağıdaki denklem kullanılarak dalga profiline dönüştürülmektedir:

$$\frac{P}{\rho g} = K_p \eta - z \qquad (4.1)\ (5.2)$$

burada;

η = Su yüzü deplasmanı/ Su yüzü profili

z= Sakin su seviyesinden aşağı doğru alınan derinlik

K_p= Basınç katsayısı

Basınç katsayısı ise aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$K_p = \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi(h)}{L}} \qquad (4.2)\ (5.3)$$

burada;

h= Su derinliği

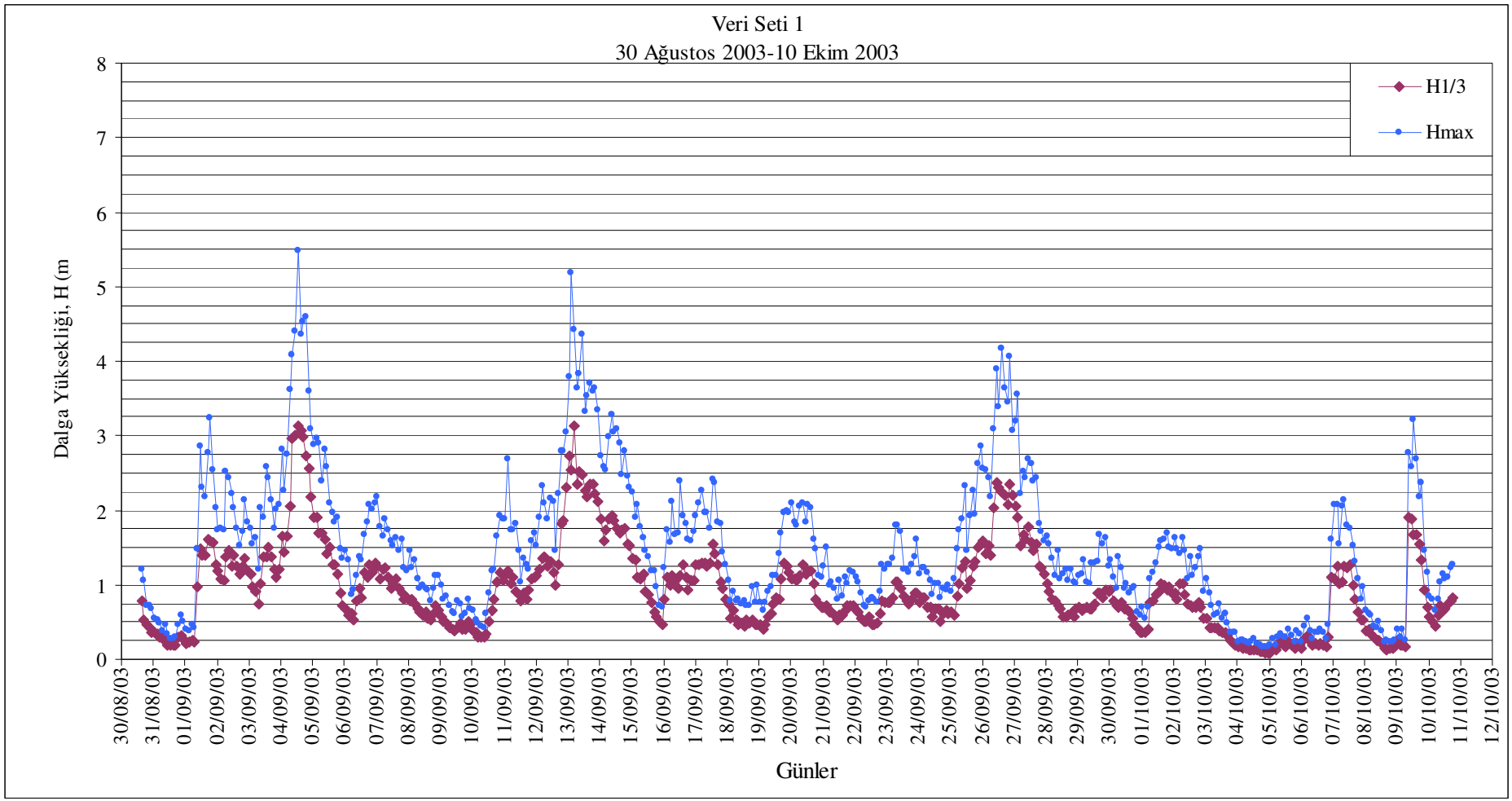
L= Dalga boyudur.

Dalga ölçer, 2 saatte bir 10 dakika süreyle ölçüm alacak biçimde ayarlanmıştır. Veri toplama aralığı ise 0.5 s'dir. Birinci veri setinde 495, ikinci veri setinde 285, üçüncü veri setinde 1075, dördüncü veri setinde 500 ve beşinci veri setinde 600 adet 10'ar dakikalık dalga ölçümleri sonucunda farklı dalga parametreleri hesaplanmıştır. Her on dakikalık dalga kaydı sonucunda dalga ölçerden elde edilen veriler:

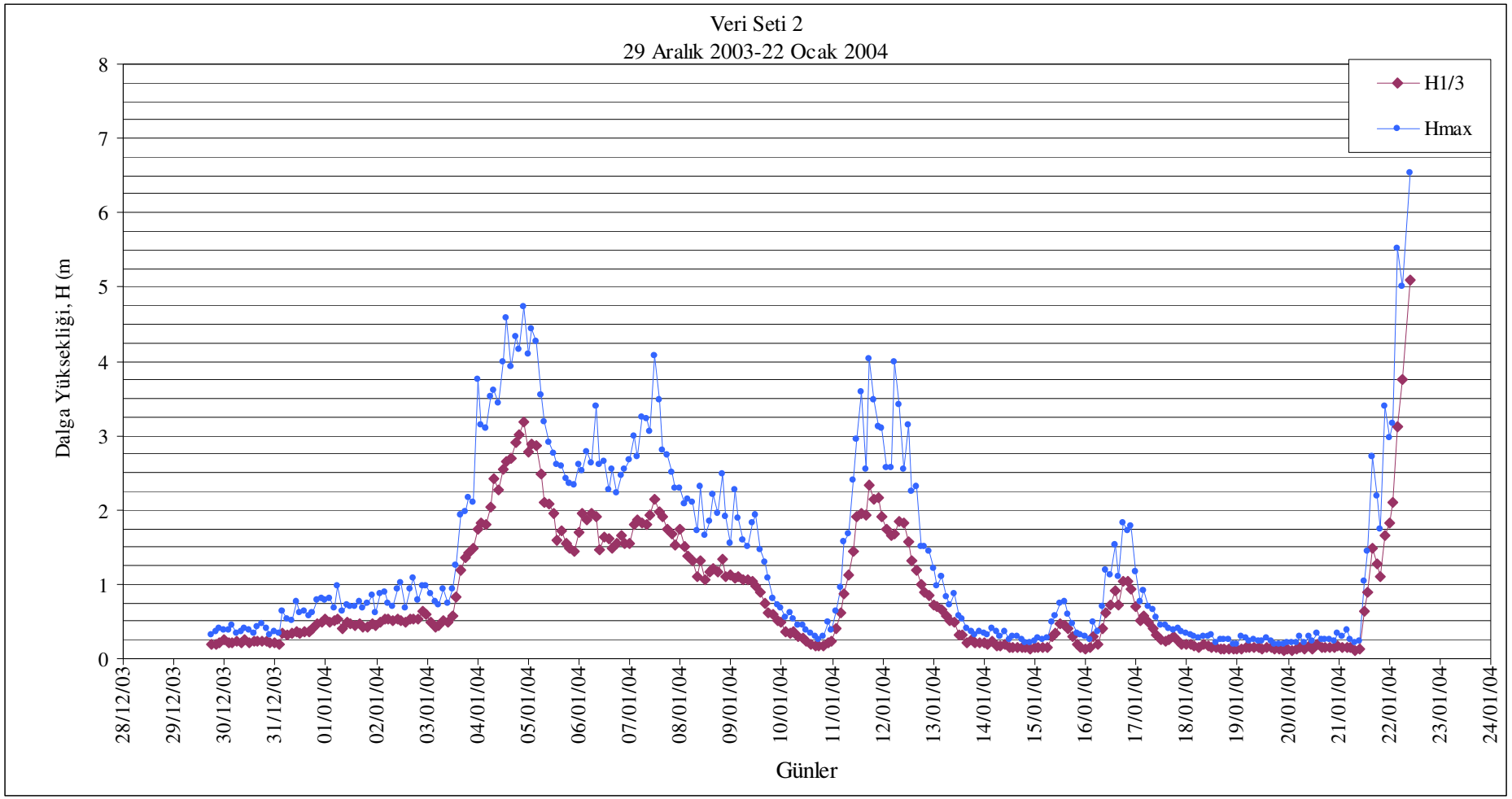
- Su sıcaklığı
- Ortalama su derinliği
- Kaydedilen dalga sayısı
- Dalga yüksekliği (H_{maks}, $H_{1/10}$, $H_{1/3}$ ve H_{ort})
- Dalga periyodu (T_{maks}, $T_{1/10}$, $T_{1/3}$ ve T_{ort})
- Dalga yönü
- Akıntı hızı
- Akıntı yönü
- Akıntı hızı bileşenleridir.

Dalga ölçer veri kayıtlarından üç tip dosya elde edilmektedir. Bunlar basınç tabanlı dalga parametreleri, ultrasonik tabanlı dalga parametreleri ve akıntı dosyalarıdır. Bu dosyalardaki ham veriler işlenerek her on dakikalık kayıt sonrasında yukarıda belirtilen dalga ve akıntı parametreleri hesaplanmaktadır.

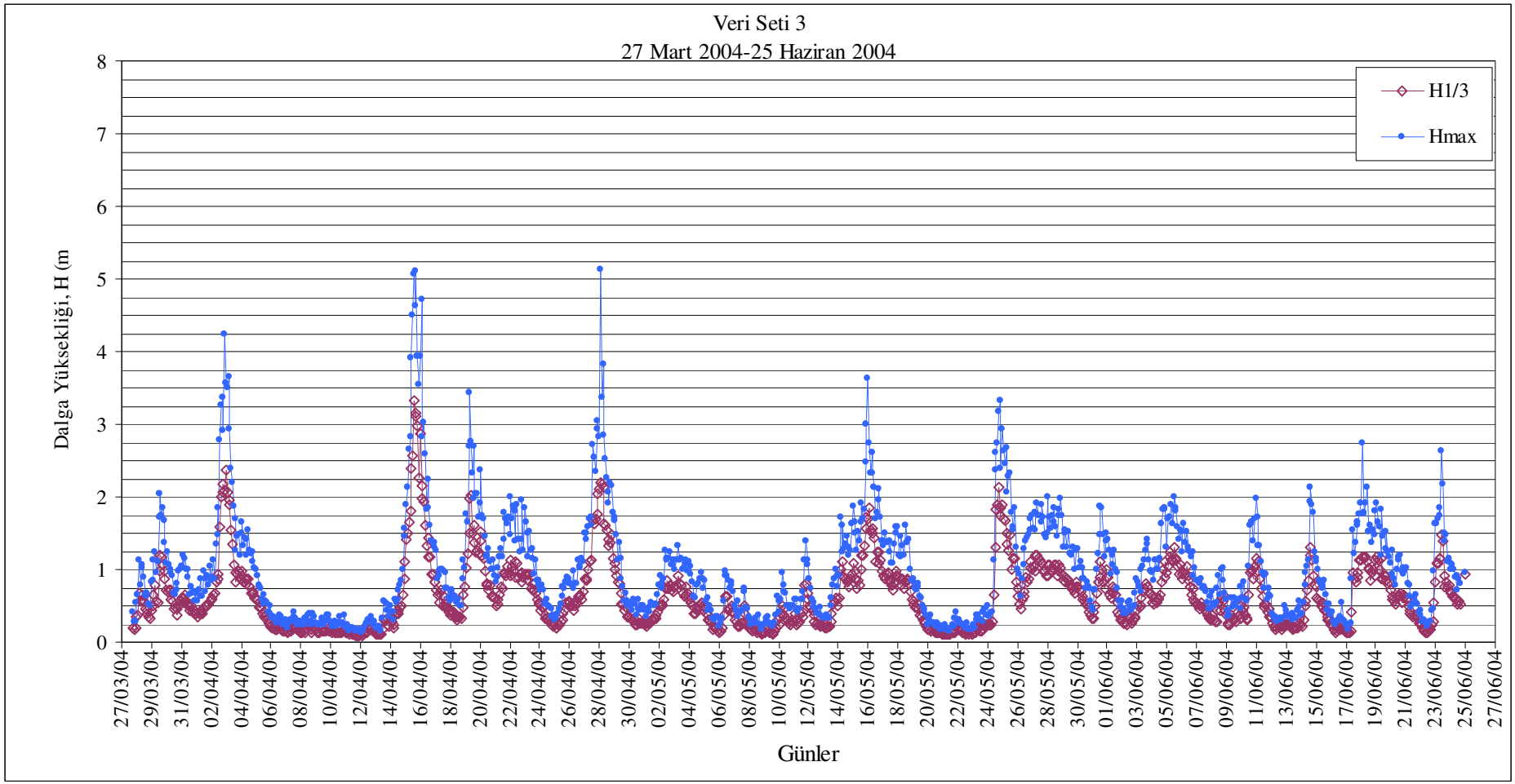
Şekil 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 ve 5.23'te bu parametrelere örnek olarak beş ayrı veri seti için zaman serisi halinde verilen belirgin ve maksimum dalga yükseklikleri görülmektedir.



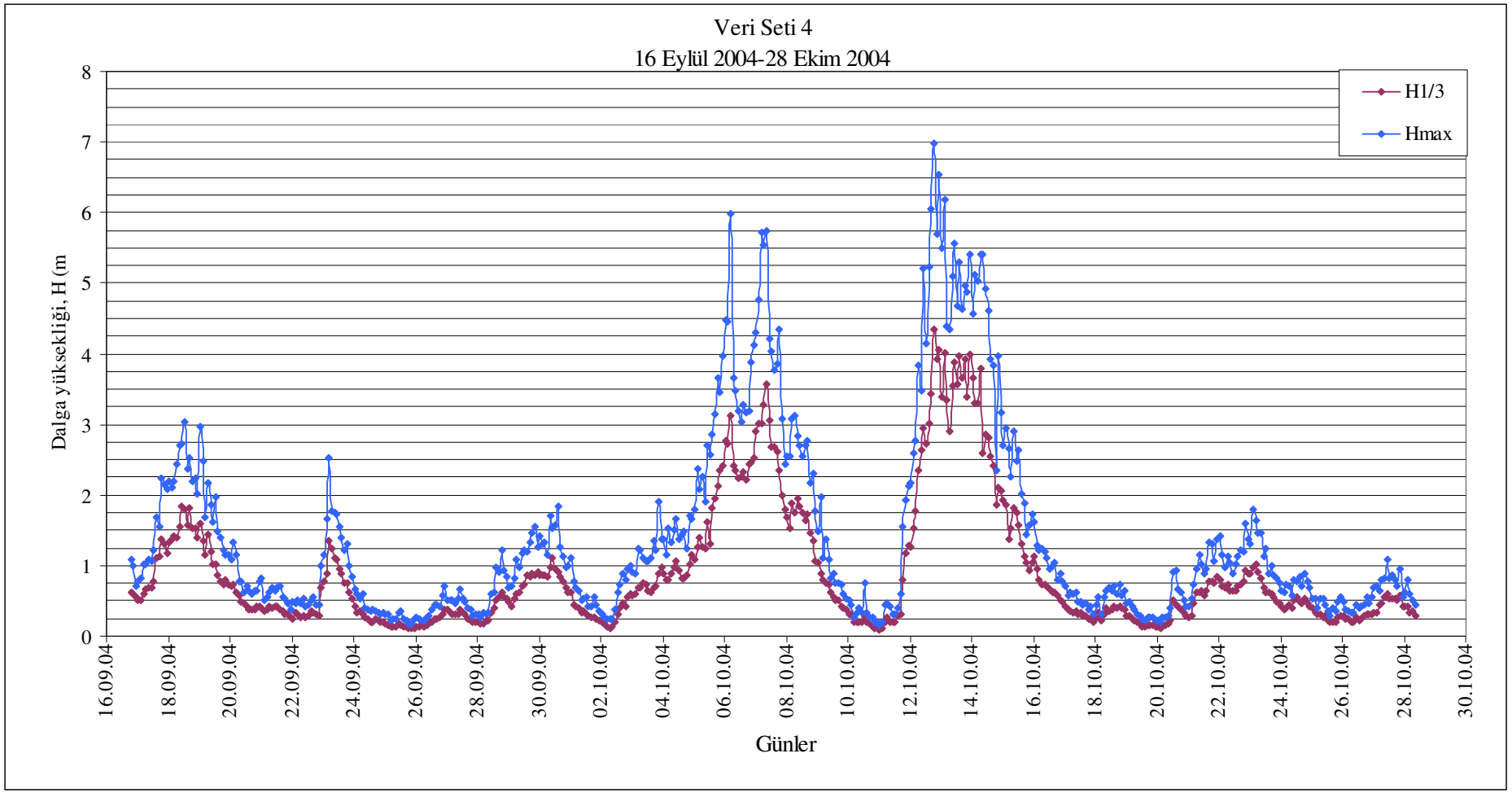
Şekil 5.19 30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri ($H_{1/3}$ ve H_{maks}) zaman serisi



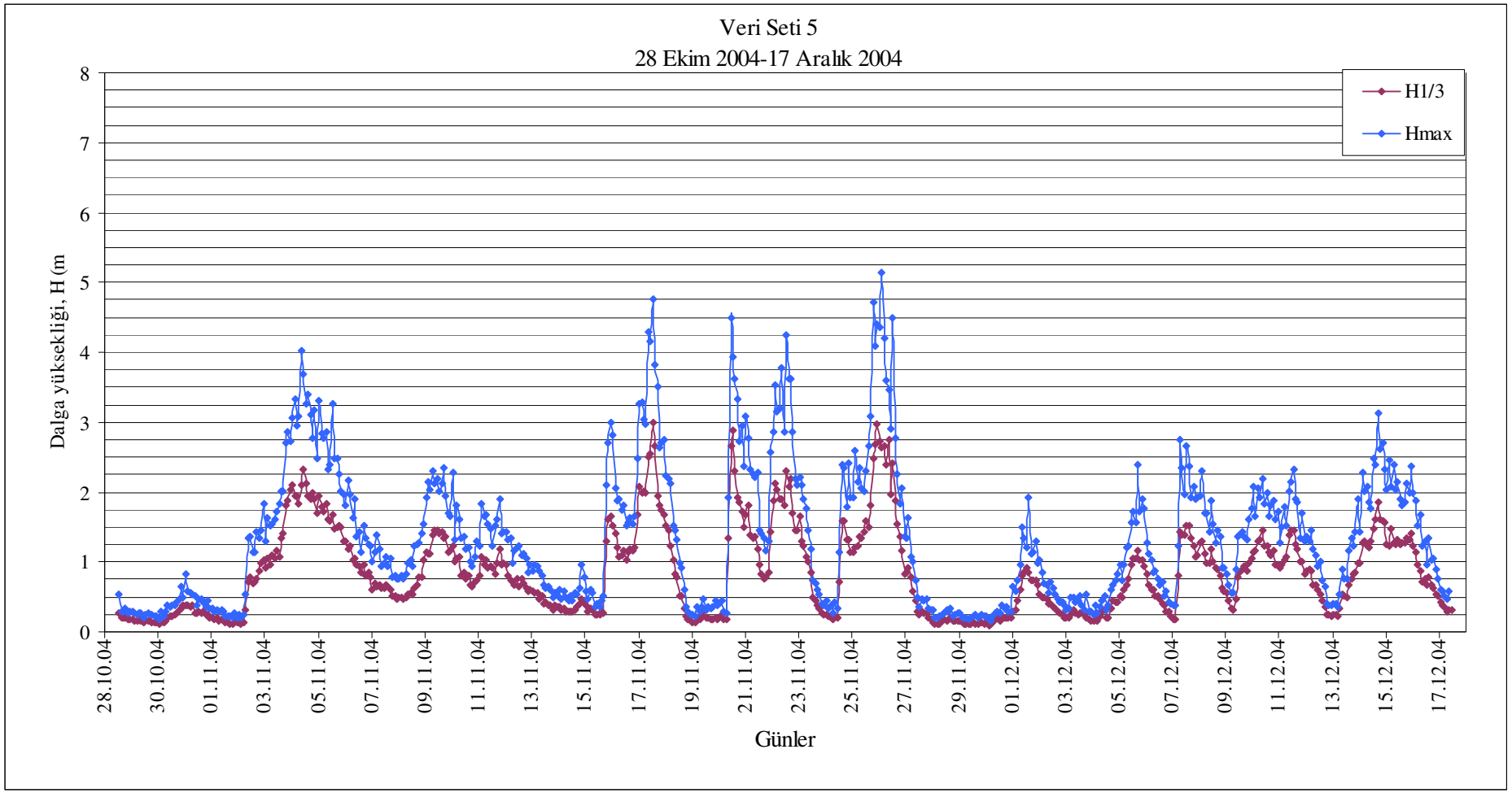
Şekil 5.20 29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri ($H_{1/3}$ ve H_{maks}) zaman serisi



Şekil 5.21 27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri ($H_{1/3}$ ve H_{maks}) zaman serisi



Şekil 5.22 16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri ($H_{1/3}$ ve H_{maks}) zaman serisi



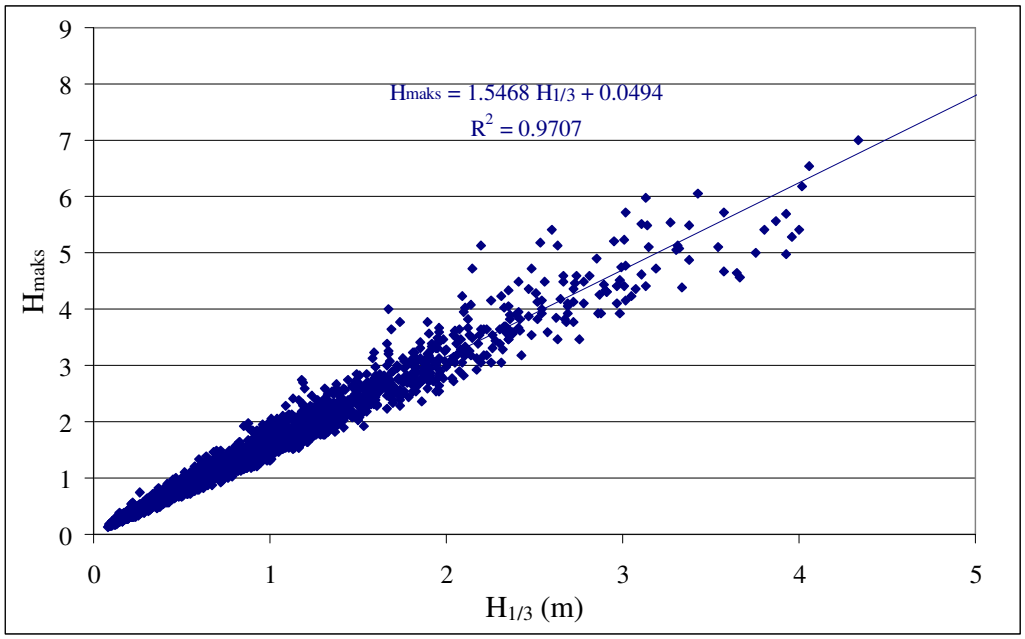
Şekil 5.23 28 Ekim 2004-17 Aralık 2004 tarihleri arasında ölçülen dalga yükseklikleri ($H_{1/3}$ ve H_{maks}) zaman serisi

Goda (2000), belirgin dalga yüksekliği ve periyodu ile diğer dalga parametreleri arasında ($H_{1/10}$, H_{ort}, H_{maks} ile $T_{1/10}$, T_{ort}, T_{maks}) bağıntı elde etmek için 171 farklı dalga kaydını incelemiş ve Rayleigh dağılımı yardımıyla bu değerler arasında katsayılar bulmuştur. Goda'nın (2000) belirgin dalga yüksekliği ve diğer dalga parametreleri arasında bağıntı elde etmek için yapmış olduğu çalışmada bulunan sonuçlar Çizelge 5.3'teki gibidir.

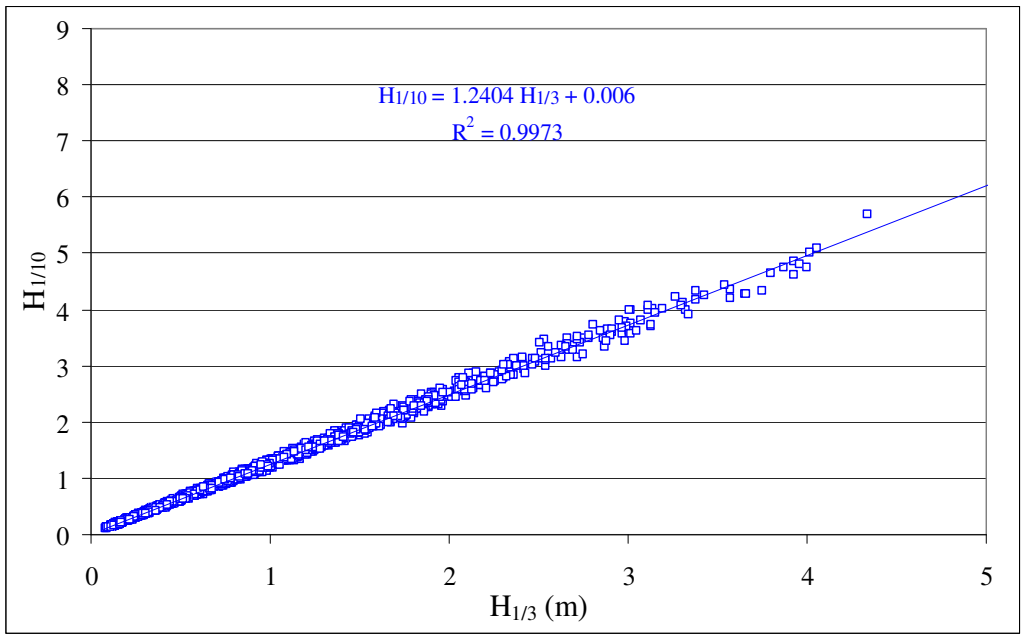
Çizelge 5.3 Belirgin dalga yüksekliği ve periyodunun diğer dalga parametreleri ile arasındaki bağıntılar (Goda, 2000)

Dalga yükseklikleri	**Aralık**	**Dalga periyotları**	**Aralık**
$H_{ort}/H_{1/3}$	0.57-0.71	$T_{ort}/T_{1/3}$	0.71-1.11
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.15-1.45	$T_{1/10}/T_{1/3}$	0.9-1.1
$H_{maks}/H_{1/3}$	1.1-2.4	$T_{maks}/T_{1/3}$	0.6-1.3

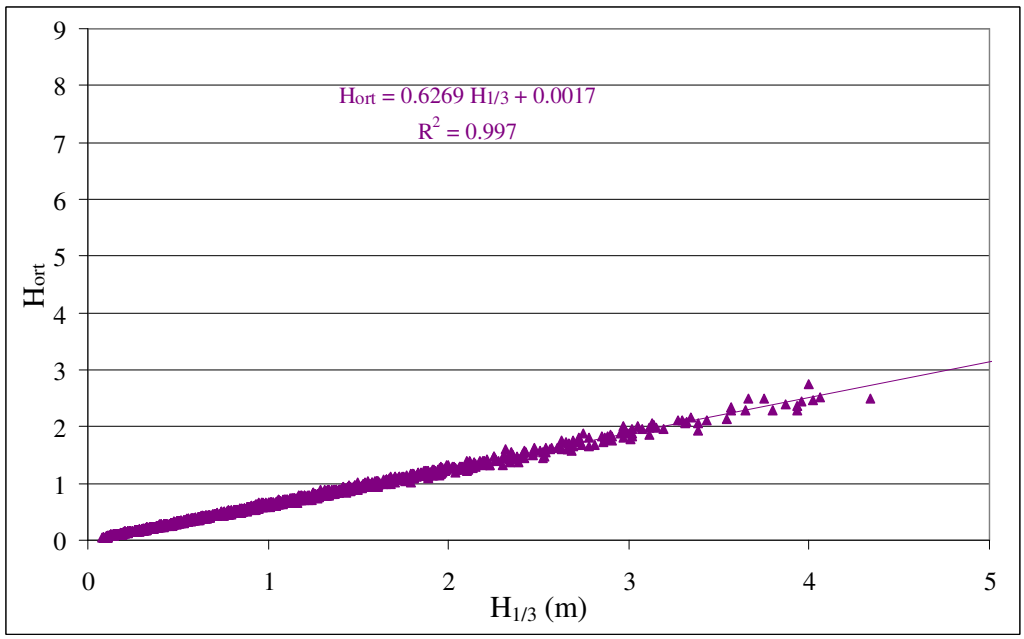
Karaburun bölgesinde yapılan dalga ölçüm sonuçlarında, belirgin dalga yüksekliği $H_{1/3}$ ile diğer dalga yüksekliği parametreleri (H_{maks}, $H_{1/10}$ ve H_{ort}), belirgin dalga periyodu $T_{1/3}$ ise diğer dalga periyodu parametleri ile (T_{maks}, $T_{1/10}$ ve T_{ort}) karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.4). Şekil 5.24, 5.25 ve 5.26'da $H_{1/3}$ değerlerine karşılık gelen diğer dalga yüksekliği parametreleri ile elde edilmiş grafikler görülmektedir. Her grafikte farklı dalga yüksekliği parametreleri arasında bağıntılar elde edilmiştir. Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi tüm veriler için bağıntılar bulunmuş, bunlar Goda'nın (2000) değerleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.24 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması ($H_{1/3}$'e karşılık H_{maks})

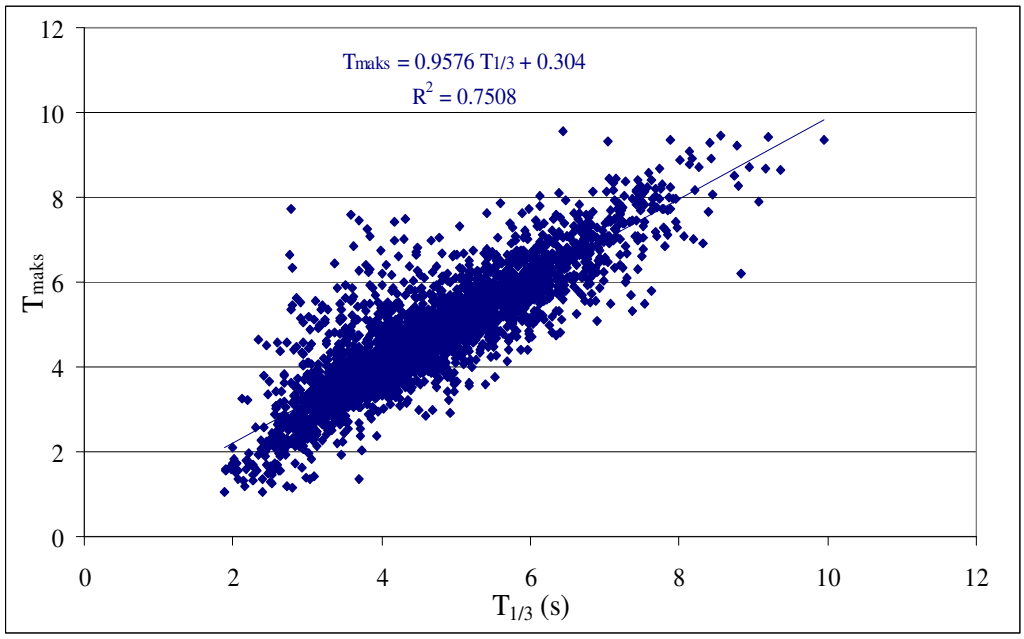


Şekil 5.25 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması ($H_{1/3}$'e karşılık $H_{1/10}$)

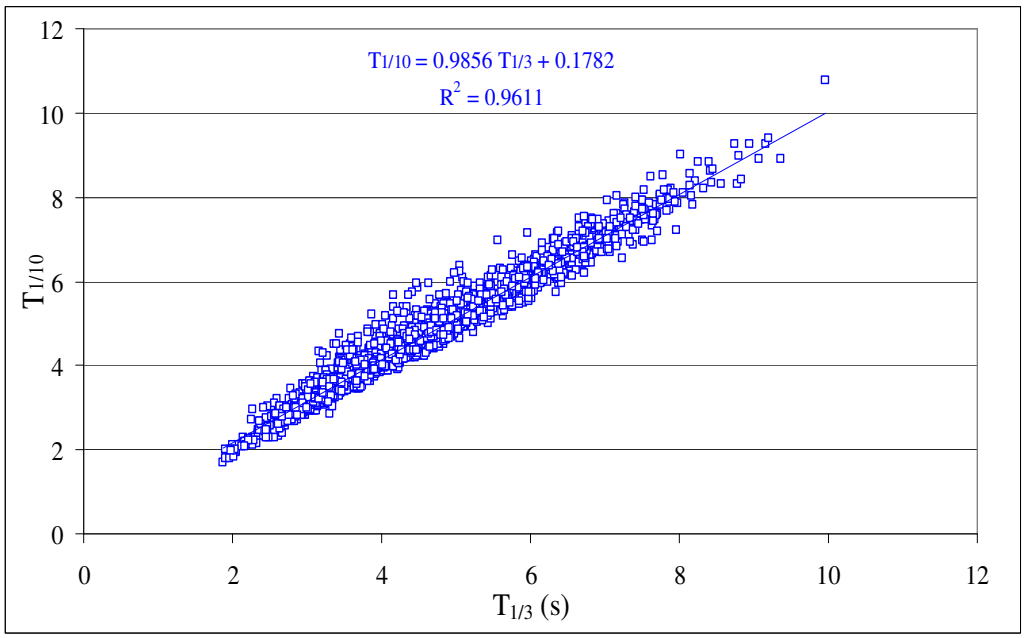


Şekil 5.26 Ölçülen dalga yüksekliği parametrelerinin karşılaştırılması ($H_{1/3}$'e karşılık H_{ort})

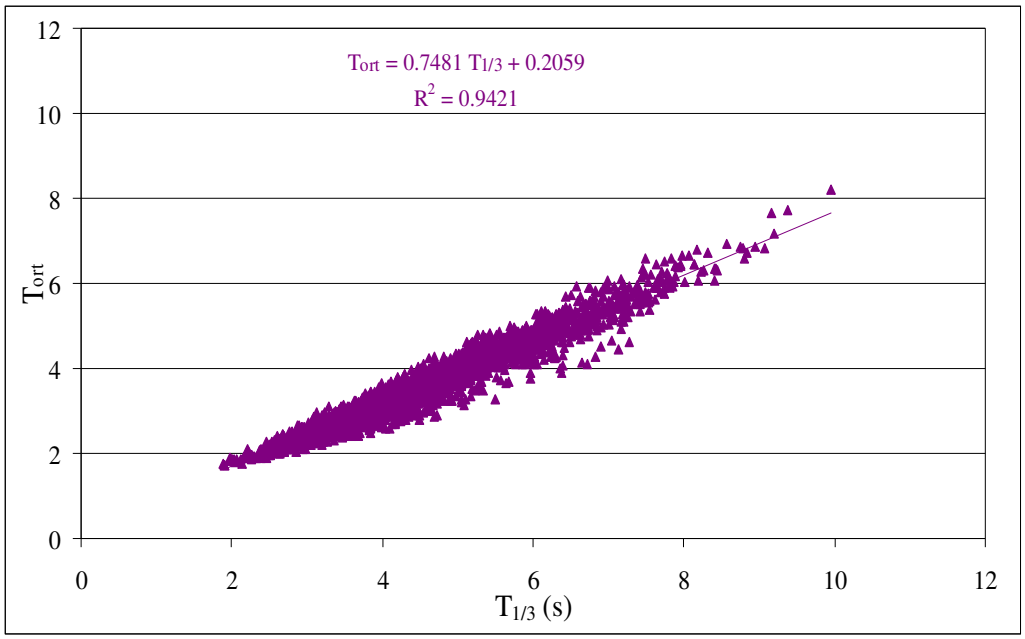
Şekil 5.27, 5.28 ve 5.29'da ise dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması görülmektedir. Elde edilen denklemlerdeki katsayılar Goda'nın (2000) yapmış olduğu çalışmanın sonuçlarıyla Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.27 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık T_{maks})



Şekil 5.28 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık $T_{1/10}$)



Şekil 5.29 Ölçülen dalga periyodu parametrelerinin karşılaştırılması ($T_{1/3}$'e karşılık T_{ort})

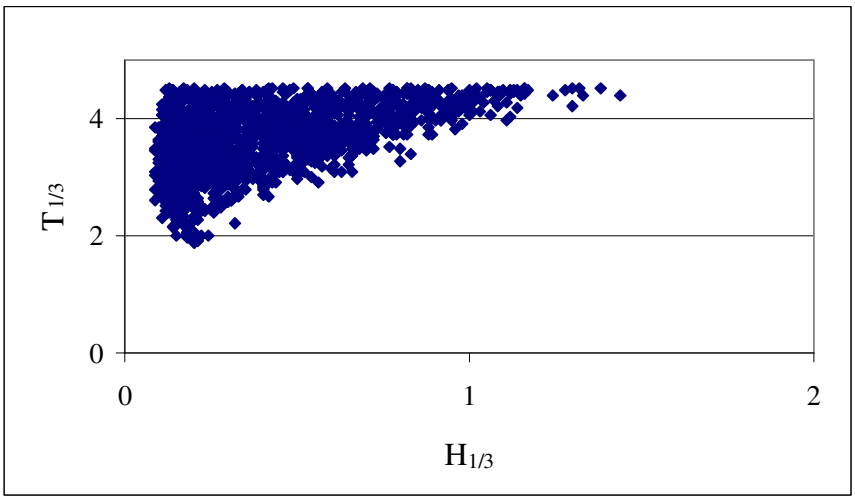
Çizelge 5.4 Goda'nın (2000) yapmış olduğu çalışmanın bu çalışmadaki dalga ölçüm verileriyle karşılaştırılması

Karaburun dalga ölçüm sonuçları	**Dalga yükseklikleri**	**Goda (2000)**	**Bu çalışma**
$H_{ort}=0.63\ H_{1/3}+0.0017$	$H_{ort}/H_{1/3}$	0.57-0.71	0.63
$H_{1/10}=1.24\ H_{1/3}+0.006$	$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.15-1.45	1.24
$H_{maks}=1.55\ H_{1/3}+0.0494$	$H_{maks}/H_{1/3}$	1.1-2.4	1.55
Karaburun dalga ölçüm sonuçları	**Dalga periyotları**	**Goda (2000)**	**Bu çalışma**
$T_{ort}=0.75\ T_{1/3}+0.2059$	$T_{ort}/T_{1/3}$	0.71-1.11	0.75
$T_{1/10}=0.99\ T_{1/3}+0.1782$	$T_{1/10}/T_{1/3}$	0.9-1.1	0.99
$T_{maks}=0.96\ T_{1/3}+0.304$	$T_{maks}/T_{1/3}$	0.6-1.3	0.96

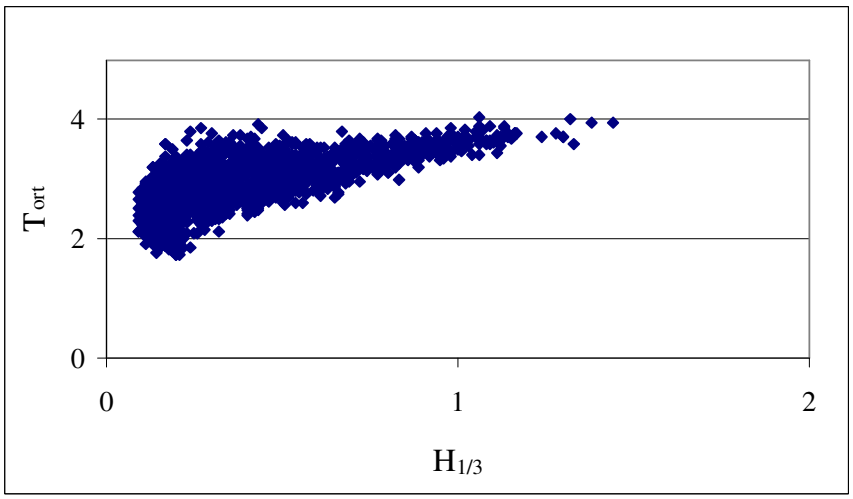
Çizelge 5.4'ten görüldüğü gibi dalga ölçümü sonucunda dalga yüksekliği ve periyodu parametrelerinin karşılaştırılmasıyla bulunan değerler Goda'nın (2000) verdiği aralıklarda kalmıştır. Karaburun bölgesi için ($H_{1/3}$ ve $T_{1/3}$) değerleri elde edildiğinde ($H_{1/10}$, H_{ort}, H_{maks} ile $T_{1/10}$, T_{ort}, T_{maks}) değerleri Çizelge 5.4'te verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Belirgin dalga yüksekliği ($H_{1/3}$) ile dalga periyodu parametreleri ($T_{1/3}$, T_{ort}) arasındaki ilişkiler Şekil 5.30 ve 5.31'de verilmiştir. 30 Ağustos 2003 ve 17 Aralık 2004 tarihleri arasında ölçülen veriler kullanılarak hazırlanan bu grafikler herhangi bir dalga yüksekliğiyle eşleşebilir dalga periyotlarının tahmin edilmesi için kullanılmaktadır.

Dalga ölçümü -16 m derinlikte yapıldığı için belirgin dalga yüksekliği ve periyoduna göre ölçülen dalgaların tamamı derin deniz dalga karakteristiklerine sahip değildir. Bu sebeple dalga yüksekliği ve periyodu arasındaki ilişkinin belirlenmesi derin deniz koşullarına göre yapılmış, sığlaşma ile sapmaya uğrayan dalga parametreleri elenmiştir. Bu nedenle Şekil 5.30 ve 5.31'de görüldüğü gibi dalga verisi yarı yarıya azalmıştır.

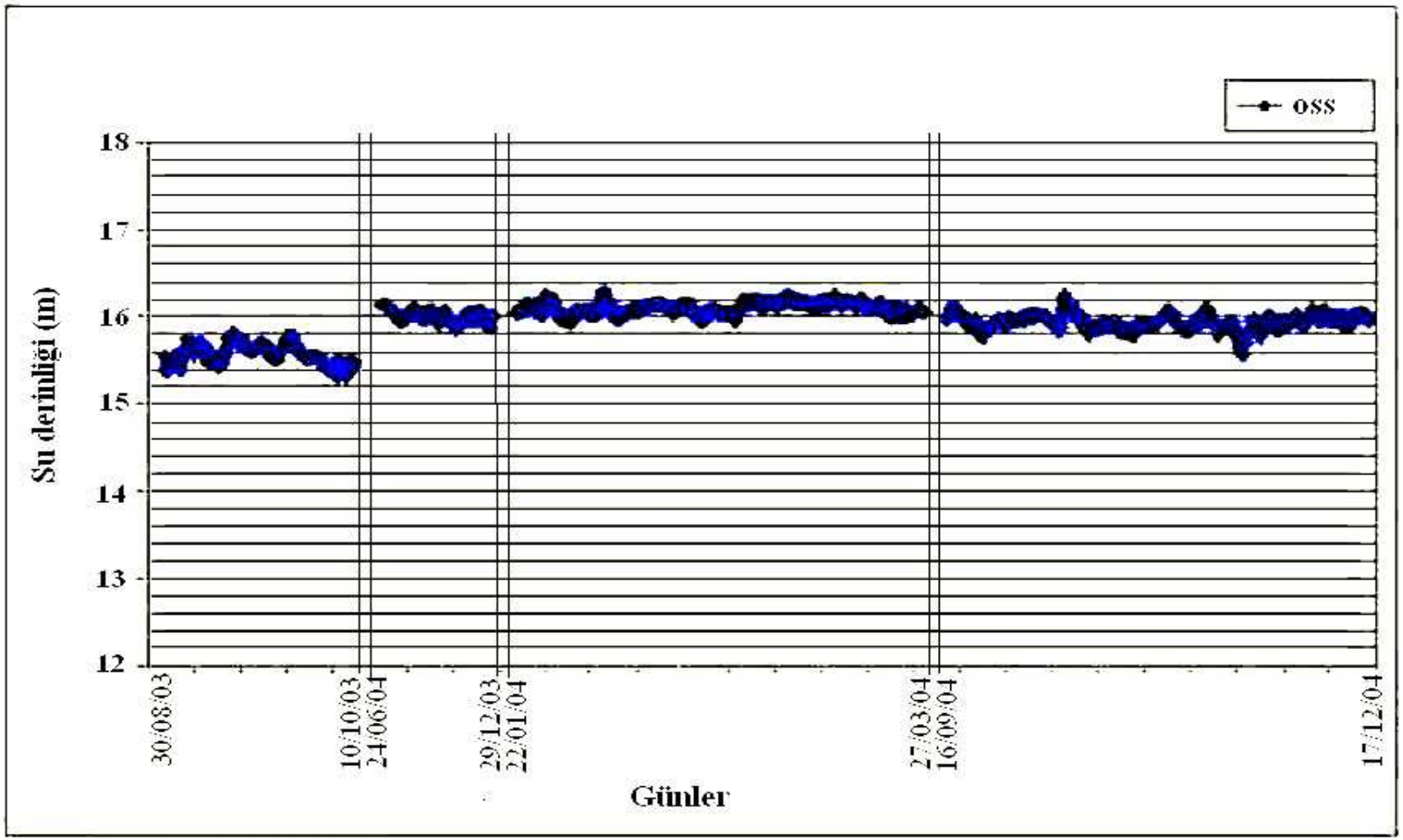


Şekil 5.30 Derin deniz koşullarında $H_{1/3}$'e karşılık $T_{1/3}$ değerleri



Şekil 5.31 Derin deniz koşullarında $H_{1/3}$'e karşılık T_{ort} değerleri

Ayrıca dalga ölçerden ortalama su seviyeleri de elde edilmiştir. 30 Ağustos 2003 ve 17 Aralık 2004 tarihleri arasında zaman serisi şeklinde ortalama su seviyeleri Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.32 30 Ağustos 2003-17 Aralık 2004 tarihleri arasında ortalama su seviyesi değişimi

Şekil 5.32'den de görüldüğü gibi dalga ölçer ilk olarak -15.6 m su derinliğine yerleştirilmiştir. İlk ölçüm verilerinde (30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003) ortalama su derinliği 15.6 m değeri civarında değişiklik göstermesine rağmen ikinci ve daha sonraki ölçüm verilerinde su derinliği 16 m'ye ulaşmıştır. Dalgıç yardımıyla yapılan incelemelerde dalga ölçerin yerleştirildiği platformun kum tabana gömüldüğü belirlenmiştir. Bu sebeple dalga kayıtlarından elde edilen ortalama su seviyelerinde ilk ölçümden sonra belirgin bir artış görülmüş ve daha sonra ise değişmemiştir. Bu durum dikkate alındığında ölçüm dönemi boyunca ortalama su seviyesindeki değişim ortalama 30 cm civarında gözlenmiştir.

5.4 Dalga Tahmin Yöntemleri Yardımıyla Dalga İkliminin Belirlenmesi

Rüzgar verilerinden dalga parametrelerini elde etmek için farklı yöntemler bulunmaktadır. Ancak en uygun yaklaşım; elde edilen verilerin kalitesine ve yapılacak çalışmanın amacına göre değişmektedir. Örneğin iki boyutlu sayısal spektrum tahmin modeli için detaylı atmosfer basınç alanları gerekirken SPM yöntemi olarak bilinen dalga tahmin yönteminde istenen girdi oldukça basittir ve bununla beraber elde edilen çıktı oldukça zayıf olabilir. Sadece belirgin dalga parametreleri ve ortalama dalga yönü elde edilmektedir (Fröhle ve Fittschen, 1998).

Bu sebeple yapılan çalışmalarda elde edilmek istenen sonuca göre dalga tahmin yöntemi kullanılmaktadır. Karaburun bölgesinde rüzgar verilerinden dalga tahmini için iki yöntem kullanılmıştır. Bunlar parametrik SPM ile SMB yöntemleri ve sayısal modellemedir (MIKE 21 SW). SPM ve SMB yöntemlerinde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri kullanılırken sayısal modelde ECMWF'ten (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) elde edilen 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında üç yıllık rüzgar alanları (Karadeniz için) kullanılmıştır. Böylece her iki yöntemden elde edilen sonuçların yöresel rüzgar-dalga korelasyon bağıntıları için uygunluğu analiz edilecektir.

Rüzgar alanı verileri kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modelleme ile elde edilen dalga iklimi, dalga ölçüm verileri kullanılarak kalibre edilecektir. Böylelikle Karaburun bölgesi için yöresel dalga iklimi elde edilecek, bulunan sonuçlar yardımı ile rüzgar-dalga korelasyonu tanımlanacaktır.

5.4.1 SPM Yöntemi

Çalışma kapsamında kullanılan dalga tahmin yöntemlerinden biri de CERC (1984) tarafından verilen SPM yöntemidir. Bu yöntem ampirik dalga tahmin modellerinin arasında olup SMB yönteminin geliştirilmiş halidir. Bölüm 2.2.2.1'de anlatılan bu tahmin yöntemi ile diğer

modellere kıyasla ölçülmüş dalga verileri ile daha az uyumlu belirgin dalga parametreleri ve ortalama dalga yönü elde edilmektedir.

SPM yöntemi ile dalga tahmininde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan Ocak 1990-Eylül 2005 tarihlerine ait rüzgar verileri kullanılmıştır. Bu rüzgar verileri Bölüm 5.2'de anlatıldığı gibi iki farklı şekilde modele girdi olarak verilmiştir. Bunlar meteoroloji İstasyonu'ndan doğrudan alınan rüzgar değerleri ve yerel olarak yapılan rüzgar ölçümüyle kalibre edilmiş rüzgar değerleridir. Kalibre edilen rüzgar hızı değerleri, farklılık gözlenen beş yön için elde edilen düzeltilmiş rüzgar hızı değerleridir.

SPM yöntemi ile dalga tahmininde iki farklı rüzgar verisi için de izlenen yöntem aşağıdaki şekildedir:

- Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar verileri ile bölgede oluşan fırtınalar tespit edilerek rüzgarın esme süreleri ve ortalama hızları her yön için elde edilmiştir. Bu aşamada hızın 3 m/s'nin üzerine çıktığı değerler dikkate alınmıştır. Fırtına süreleri, tayini dikkate alınan bu hızların üstünde (3 m/s üzerindeki) aynı yönde sürekli esmesine göre belirlenmiştir.
- Bilinen feç mesafelerine göre etkin rüzgar yönleri dışında kalan yönler hesaplarda dikkate alınmamıştır. Etkili feç mesafeleri Çizelge 5.5'te verilmektedir.
- Tüm bu işlemlerden sonra CERC'te (1984) verilen ifadeler yardımıyla bütün yönlerde belirlenen fırtınaların belirgin dalga yükseklikleri (H_s), belirgin dalga periyotları (T_s) ve ortalama dalga yönleri hesaplanmıştır.
- Hesaplanan bu değerler fırtına süresi ve zamanına bağlı olarak zaman serisi şeklinde elde edilmiştir (Şekil 5.33).
- Her yön için belirgin dalga yüksekliğinin eklenik aşılma olasılığı hesaplanarak uzun dönem olasılık dağılımları elde edilmiştir. Herhangi bir bölgede dalga yüksekliklerinin değerlendirilmesi için önerilen çeşitli olasılık dağılımları mevcuttur. Burada "log-normal olasılık dağılımı" kullanılmıştır (Şekil 5.34).

İki farklı rüzgar verisiyle (doğrudan kullanılan ve kalibre edilen) hesaplama yapılan SPM yönteminden elde edilen sonuçlar zaman serisi şeklinde incelendiğinde (Şekil 5.33), belirlenen dalga parametrelerinin ölçüm değerlerine çok yakın olmadığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuç SPM yönteminden ve SPM yönteminin hesaplanmasında kullanılan rüzgar verilerinden kaynaklanmaktadır. SPM yönteminde kullanılan Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri Bölüm 5.2'de detaylı olarak incelenmiştir. Bu rüzgar verileri saha incelemeleri

ve Karaburun'da yapılan yerel rüzgar ölçümleri ile karşılaştırıldığında bazı yönlerde farklılık göstermektedir. Bu nedenle Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri her ne kadar yerel ölçümle kalibre edilmiş olsalar da tam olarak doğanın etkisini yansıtmadığı için SPM yöntemi ile hesaplanan dalga parametreleri dalga ölçüm sonuçlarından farklı bulunmuştur. Ayrıca SPM yöntemi ile hesaplanan sonuçlar derin deniz dalga parametrelerini vermektedir. Ancak Karaburun'da yapılan dalga ölçümü -16m'de olup tüm dalgalar için derin deniz koşulunu sağlamamaktadır. SPM yöntemi parametrik bir yöntemdir. Bu yöntemin temeli boyutsuz dalga parametreleri arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Ancak yöntem gözlemlere dayandığı ve üçüncü nesil dalga tahmin yöntemlerinde olduğu gibi fiziksel olarak dalga gelişimi, değişimi, enerji kaybı ve lineer olmayan dalga-dalga etkileşimini benzeştiremediği için mevcut deniz koşullarını tam olarak yansıtamamaktadır. CERC'te (1984) belirtildiği gibi bu yöntem feç mesafelerinin kısa olduğu (80-120 km arasında) koşullarda uygun sonuçlar vermektedir. Ancak Karaburun bölgesinde Çizelge 5.5'ten de görüldüğü üzere 600 km'nin üzerinde feç mesafesi bulunmaktadır. Yine CERC'te (1984) belirtildiği gibi SPM yöntemi, rüzgar parametrelerinin yani hız ve yönünün ani olarak değişmediği durumlarda ve soluğan etkisinin fazla gözlenmediği deniz koşullarında uygun sonuçlar vermektedir. Fakat Karaburun bölgesinde soluğan etkisi oldukça fazladır ve rüzgar feç mesafesi boyunca sabit ve uniform olmamaktadır. Tüm bu etkiler değerlerlendirildiğinde SPM yönteminden elde edilen sonuçların dalga ölçüm verileri ile daha az uyum içerisinde olması kaçınılmaz bir durumdur.

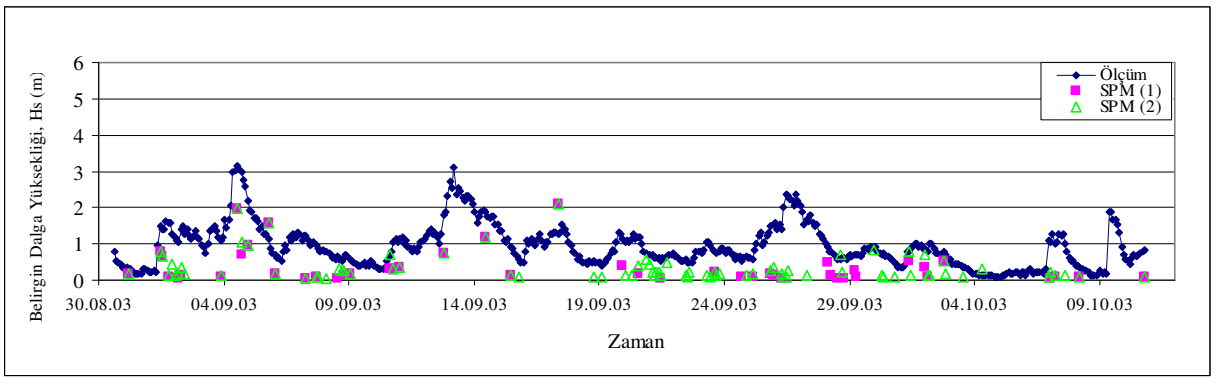
Şekil 5.33(a)'da belirgin dalga yüksekliklerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil incelendiğinde düzeltilmiş rüzgar verileri kullanılarak hesaplanan SPM yönteminden (SPM(2)) elde edilen sonuçların, tahminin standart hatası değerleri karşılaştırıldığında biraz daha ölçüm verilerine yakın olduğu belirlenmektedir. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yönteminde (SPM(1)) elde edilen tahminin standart hatası değeri 0.87 iken bu rüzgar verilerinin düzeltilerek kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yönteminde (SPM(2)) elde edilen tahminin standart hatası değeri 0.84 olarak hesaplanmıştır. Yani rüzgar verilerinin düzeltilmesi ile hesaplama yapılan SPM yönteminde ölçüm sonuçlarına daha yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 5.33(a)). Şekil 5.33(b)'de ise belirgin dalga periyotlarının zaman serisi, Şekil 5.33(c)'de ise ortalama dalga yönlerinin zaman serisi görülmektedir. Yine her iki grafikte de SPM yöntemiyle elde edilen sonuçların ölçüm değerleri ile yeterince uyumlu olmadığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.5 Etkili kabarma alanı (feç) uzunlukları

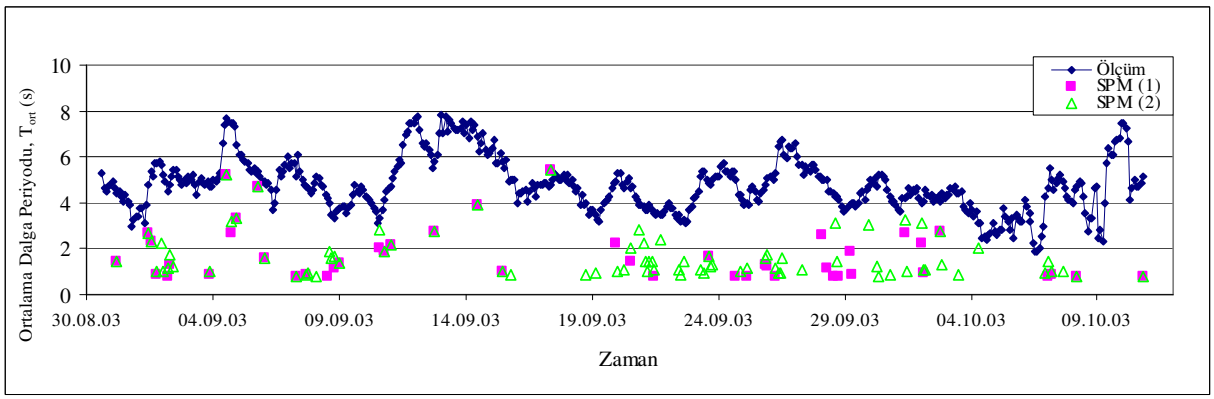
Yön	**F_{etkili} (km)**
N	373.14
NNE	526.95
NE	666.82
ENE	636.01
E	350.40
ESE	54.82
WNW	30.58
NW	100.87
NNW	198.26

Her yön için elde edilen uzun dönem olasılık dağılımlarını gösteren Şekil 5.34 incelendiğinde, doğrudan alınan Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile hesaplanan SPM sonuçları için (Şekil 5.34(a)) etkin dalga yönünün NNW olduğu görülmektedir. İkinci etkin yön olarak N yönü, üçüncü olarak ise NNE yönü belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğanın yarattığı etkileri (özellikle katı madde taşınımı açısından ve saha gözlemleri ile dalga analizi sonuçları değerlendirildiğinde) yansıtmamaktadır. Düzeltilmiş rüzgar verileri ile hesaplanan SPM yönteminden elde edilen olasılık dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.34(b)) ise sonuçların değiştiği görülmektedir. Yani Şekil 5.34(a)'da etkin yön olan NNW yönü yerini büyük dalga yüksekliklerinde NNE yönüne bırakmıştır. Ayrıca NE yönünün etkisi bu olasılık dağılımında artmıştır.

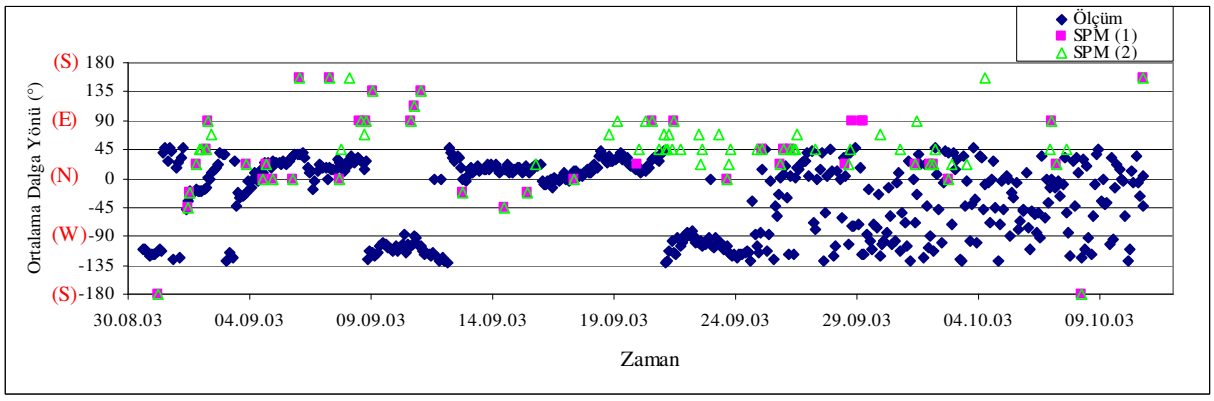
Bu sonuçlara göre doğrudan kullanılan Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerinin doğa etkilerini tam yansıtmadığı belirlenmiş, düzeltilmiş rüzgar verileri ile elde edilen sonuçların doğa ile biraz daha uyum içinde olduğu belirlenmiştir.



a) Belirgin dalga yükseklikleri



b) Belirgin dalga periyotları



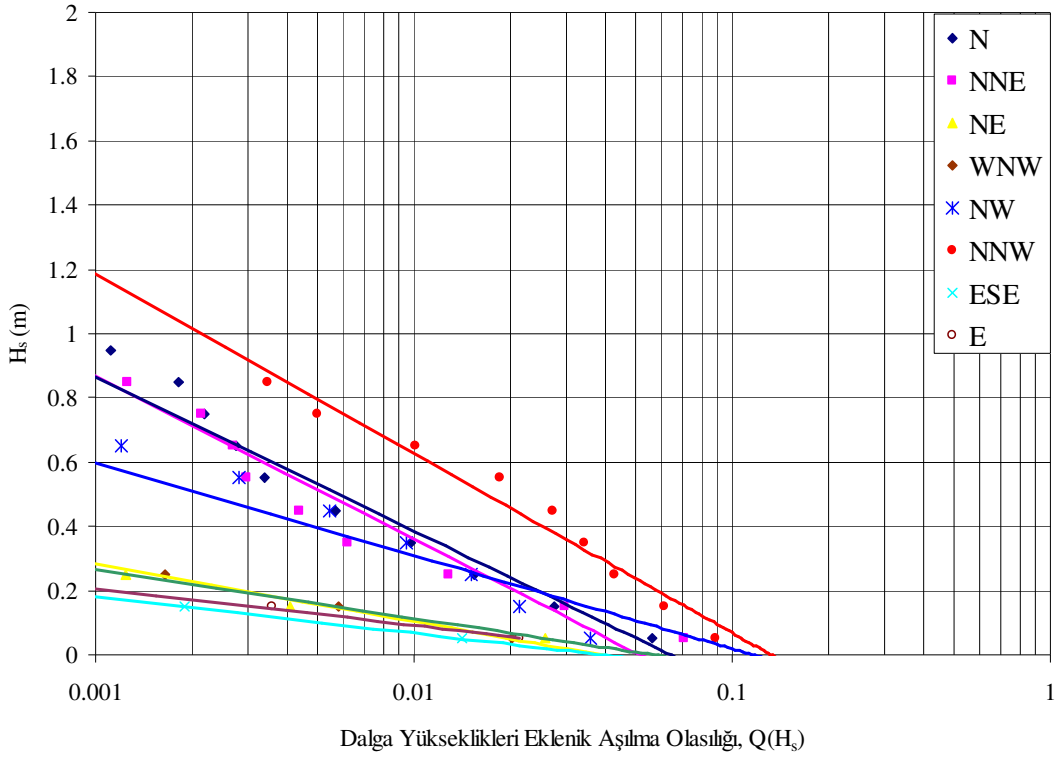
c) Ortalama dalga yönleri

Şekil 5.33 SPM yöntemiyle hesaplanan dalga parametrelerinin ölçüm değerleri ile zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (30 Eylül 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arasında)

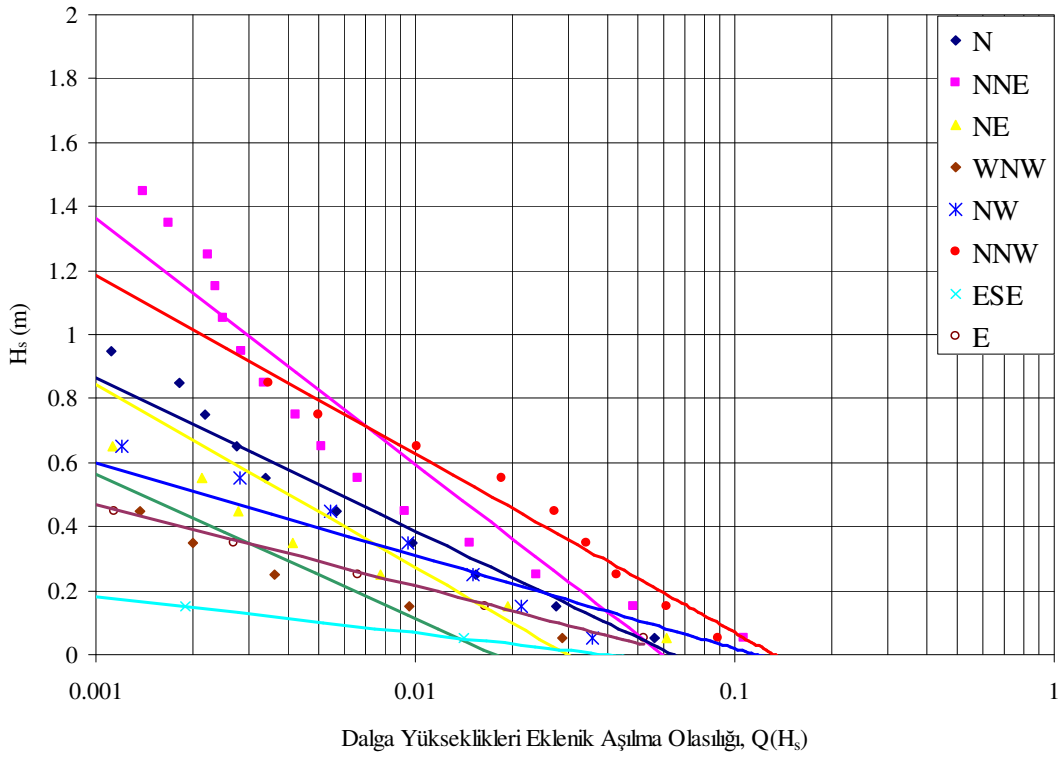
burada;

SPM (1): Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin doğrudan kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yöntemi,

SPM (2): Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin düzeltilerek kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yöntemidir.



a) Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin doğrudan kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yöntemi



b) Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin düzeltilerek kullanılması ile hesaplama yapılan SPM yöntemi

Şekil 5.34 SPM yöntemiyle elde edilen uzun dönem belirgin dalga yüksekliği olasılık dağılımları (Ocak 1990-Eylül 2005 yılları arasında 16 yıllık rüzgar verisi ile)

5.4.2 SMB Yöntemi

Karaburun bölgesi dalga iklimini tahmin etmede kullanılan diğer bir yöntem de SMB yöntemidir. Bölüm 2.2.2.2'de anlatılan bu tahmin yöntemi gözlemlere dayanan yarı ampirik bir tahmin sistemidir ve herhangi bir spektrum analizine dayanmamaktadır.

SMB yöntemi ile dalga tahmininde SPM yönteminde olduğu gibi Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan Ocak 1990-Eylül 2005 tarihlerine ait rüzgar verileri kullanılmıştır. Rüzgar verileri aynı şekilde düzeltilmemiş ve düzeltilmiş değerler olarak SMB yönteminde de girdi olarak verilmiştir.

SMB yöntemi ile dalga tahmininde iki farklı rüzgar verisi için de izlenen yöntem aşağıdaki şekildedir:

- Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar verileri ile bölgede oluşan fırtınalar tespit edilerek rüzgarın esme süreleri ve ortalama hızları her yön için elde edilmiştir. Bu aşamada hızın 3 m/s'nin üzerine çıktığı değerler dikkate alınmıştır.
- Bilinen feç mesafelerine göre hakim rüzgar yönleri dışında kalan yönler hesaplarda dikkate alınmamıştır. Etkili feç mesafeleri Bölüm 5.4.1'de Çizelge 5.5'te verilmektedir.
- Mevcut rüzgar verilerinden T_w (rüzgar esme süresi), U (rüzgar esme hızı) ve F (etkili feç mesafesi) belirlendikten sonra bu değerlere göre (5.4) eşitliği ile verilen feç parametreleri belirlenmiştir.

$$\phi = \frac{gF}{U^2} \tag{5.4}$$

$\frac{gT_w}{U}$ süre parametreleri hesaplanmıştır.

Belirgin dalga yüksekliği (5.5) ifadesi, belirgin dalga periyodu ise (5.6) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.283 \tanh(0.0125\phi^{0.42}) \tag{5.5}$$

$$\frac{gT_s}{U} = 7.540 \tanh(0.077\phi^{0.25}) \tag{5.6}$$

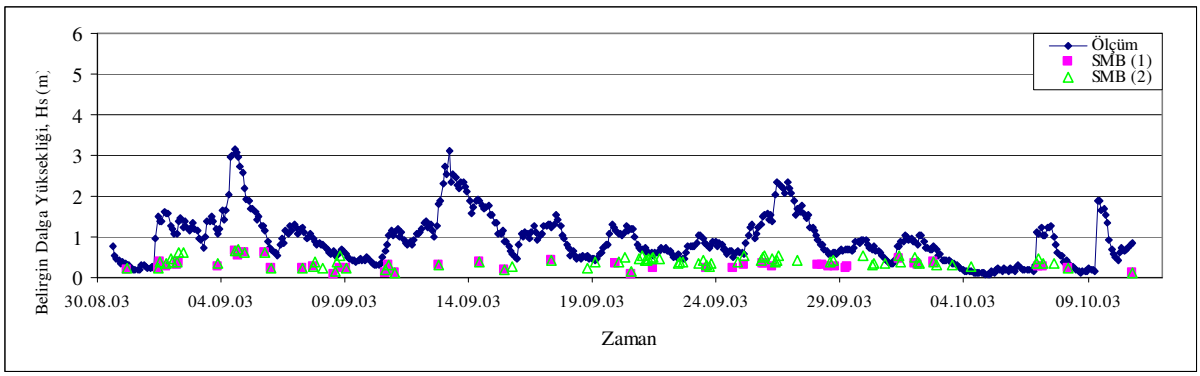
Eğer fırtına feç limitli ise (5.4) eşitliği ile hesaplanan feç parametresi (5.5) ve (5.6) ifadelerinde yerine konarak dalga parametreleri hesaplanmaktadır. Eğer süre limitli ise

belirlenen süre parametresinden (5.7) ifadesi yardımı ile yeniden bir feç parametresi belirlenmektedir ve belirlenen yeni feç parametresi ile dalga parametreleri hesaplanmaktadır (Yüksel vd.,1998).

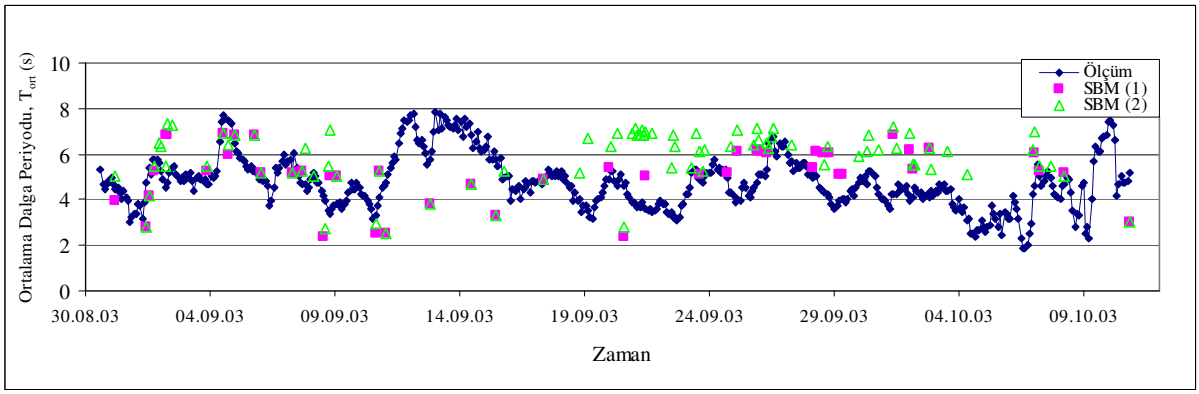
$$\frac{gT_w}{U} \geq 6.5885 \exp\left\{\left[0.0161(\ln\phi)^2 - 0.3692\ln\phi + 2.2024\right]^{1/2} + 0.8798\ln\phi\right\} \qquad (5.7)$$

- Hesaplanan bu değerler fırtına süresi ve zamanına bağlı olarak zaman serisi şeklinde elde edilmiştir (Şekil 5.35).
- Her yön için belirgin dalga yüksekliğinin eklenik aşılma olasılığı hesaplanarak uzun dönem olasılık dağılımları elde edilmiştir (Şekil 5.36).

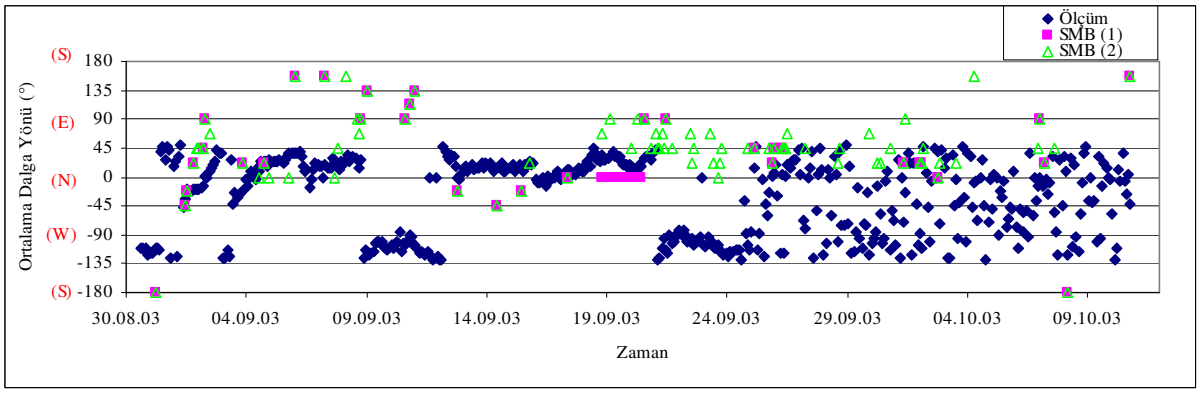
Doğrudan kullanılan ve düzeltilmiş rüzgar verileri ile olmak üzere iki farklı şekilde SMB yöntemi ile dalga parametreleri hesaplanmıştır. Dalga parametreleri zaman serisi şeklinde incelendiğinde (Şekil 5.35), elde edilen değerlerin ölçüm değerlerine çok yakın olmadığı bu yöntem sonucunda da görülmektedir. SMB yöntemi SPM yöntemi gibi parametrik ve basitleştirilmiş bir dalga tahmin yöntemidir. Dalga parametrelerini elde etmek için işlemlerin detaylı fiziğini anlatan tanımlar geliştirmek yerine doğrudan rüzgar parametrelerini kullanmaktadır. Tüm basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinde olduğu gibi bu yöntemde de doğru sonuç elde edibilmek için bazı uygun koşulların bulunması gerekmektedir. Bölüm 5.4.1'de anlatılan SPM yönteminde olduğu gibi uygun feç mesafesi (80-120 km) ve rüzgar koşullarında (rüzgar yönü ve şiddetinin genelde üniform olduğu durumlar) doğayla uyumlu sonuçlar vermektedir. Ancak çalışma bölgesindeki feç mesafeleri (Çizelge 5.5) bu değerlerin dışında yer almakta ve rüzgar yönü ile şiddeti ani olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle elde edilen parametreler birebir yapılan dalga ölçümleri ile uyumsuz olmaktadır. Ayrıca SPM ve SMB yöntemleri arasında da farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklardan ilki SMB yöntemi ile hesaplanan dalga yüksekliği değerleri SPM yöntemine göre daha küçük çıkmaktadır. İkincisi ise SMB yöntemi ile hesaplanan dalga periyotları SPM yöntemine göre daha büyük elde edilmektedir.



a) Belirgin dalga yükseklikleri



b) Belirgin dalga periyotları



c) Ortalama dalga yönleri

Şekil 5.35 SMB yöntemiyle hesaplanan dalga parametrelerinin ölçüm değerleri ile zaman serisi şeklinde karşılaştırılması

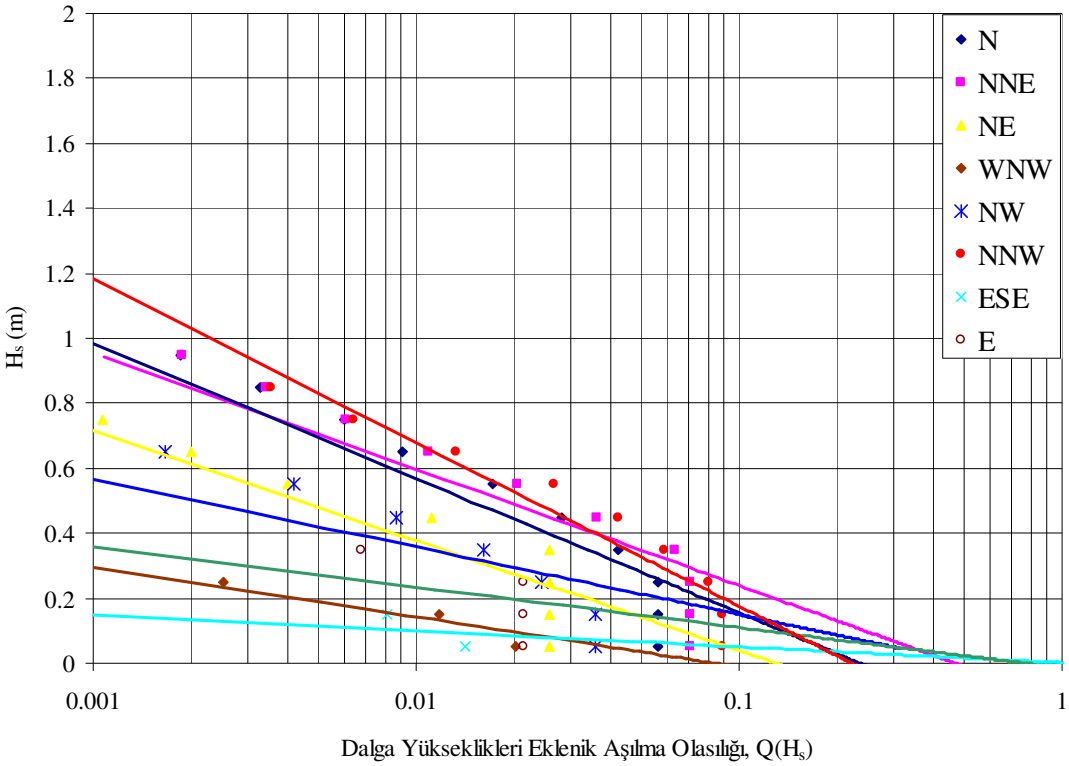
burada;

SMB (1): Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile hesaplama yapılan SMB yöntemi**,**

SMB (2): Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile hesaplama yapılan SMB yöntemidir.

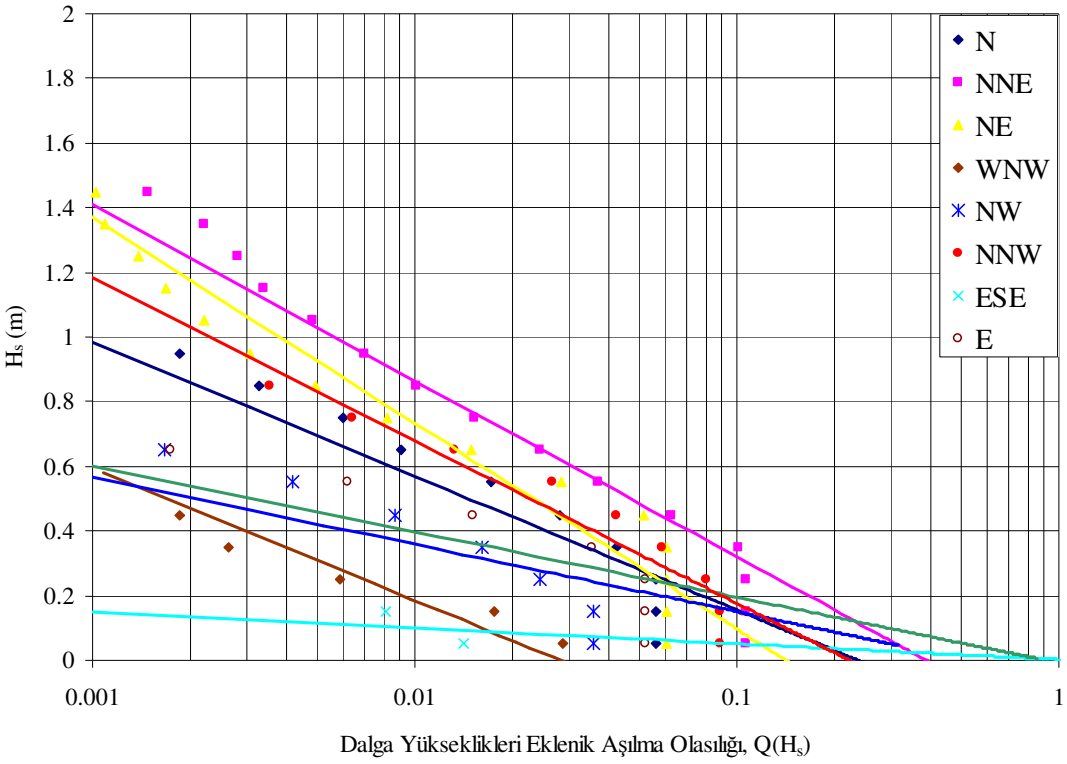
SMB yöntemi ile hesaplanan uzun dönem olasılık dağılımlarını gösteren Şekil 5.36 incelendiğinde, düzeltilmiş rüzgar değerleri ile bulunan olasılık dağılımında (Şekil 5.36(a))

etkin yön NNW olarak görülmektedir. İkinci etkin yön ise SPM yönteminden farklı olarak SMB yönteminde NNE yönü olarak belirlenmiştir. Ayrıca NE yönünün etkisi bu olasılık dağılımında yine SPM yöntemine göre daha fazla bulunmuştur (Şekil 5.36(a)). Düzeltilmiş rüzgar değerleri ile hesaplanan olasılık dağılımında (Şekil 5.36(b)) ise NNE yönünün etkisi daha fazla belirginleşmiş ve en etkin yön olarak bulunmuştur. Bu yönü ikinci olarak NE yönü takip etmektedir. Bu durumda düzeltilmiş rüzgar hızları ile hesaplanan SMB yönteminin dalga yüksekliği bakımından düşük değerler vermesine rağmen yönlerin etkisi dikkate alındığında doğa ile daha uyumlu olduğu görülmektedir.



a) Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin doğrudan kullanılması ile hesaplama yapılan SMB yöntemi

Şekil 5.36 SMB yöntemiyle elde edilen uzun dönem belirgin dalga yüksekliği olasılık dağılımları (Ocak 1990-Eylül 2005 yılları arasında 16 yıllık rüzgar verisi ile)



b) Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin düzeltilerek kullanılması ile hesaplama yapılan SMB yöntemi

Şekil 5.36 Devam

5.4.3 Sayısal Modelleme (MIKE 21 SW) ve Kalibrasyon

Karaburun kıyısında dalga tahmini için kullanılan diğer bir yöntem de üçüncü nesil dalga modelini kullanan MIKE 21 SW sayısal modelidir. MIKE 21 yazılımının SW (Spectral Waves) modülü açık deniz ve kıyı alanlarında dalga tahmini için kullanılmaktadır. MIKE 21 SW sayısal modeli Bölüm 2'de açıklandığı gibi yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu rüzgar-dalga modelidir. Açık deniz ve kıyı alanlarında rüzgar kaynaklı dalga ile soluğan dalgasının gelişimini, transformasyonunu ve enerji harcanımıyla değişimini benzeştirmektedir.

MIKE 21 SW iki farklı denklem içermektedir. Bunlar:

- Yönsel ayrılmış parametrik formül,
- Tam spektrum formülüdür.

Yönsel ayrılmış parametrik formül dalga hareketi korunum denkleminin parametreleştirilmesine dayanmaktadır. Parametreleştirme frekans alanında yapılmaktadır. Yani Bölüm 2.2.1.3'te detaylı olarak anlatıldığı gibi dalga spektrumunun sıfırıncı ve birinci momentleri belirlenmektedir. Tam spektrum formülü ise doğrudan dalga hareketi korunum

denklemine dayanmaktadır ve burada yönsel dalga yoğunluk spektrumu bağlı değişkendir. Temel korunum denklemleri küçük ölçekli çalışmalar için kartezyen koordinatlarda, büyük ölçekli çalışmalar için de kutupsal küresel koordinatlarda formüle edilmişlerdir (DHI, 2003).

Hesaplama alanı ve batimetri

MIKE 21 SW sayısal modelinde Karaburun kıyısının da bulunduğu Karadeniz kapalı alanı kullanılmıştır. Bu hesaplama alanının programda kullanılabilmesi için Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanan 10(INT 310) nolu harita sayısallaştırılarak MikeZero yazılımına girilmiştir. Ağ sistemi MikeZero Ağ Üretici modülü ile oluşturulmuştur. Batimetri dosyası ve hesaplama alanı oluşturulurken Karadeniz'in Hazar Denizi'ne ve Marmara Denizi'ne olan girişleri kapatılmıştır. Hesaplama alanı koordinatları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Hesaplama alanı koordinatları

	x (Boylam)	y (Enlem)
Minimum koordinat (°)	27.62	40.97
Maksimum koordinat (°)	41.78	46.68

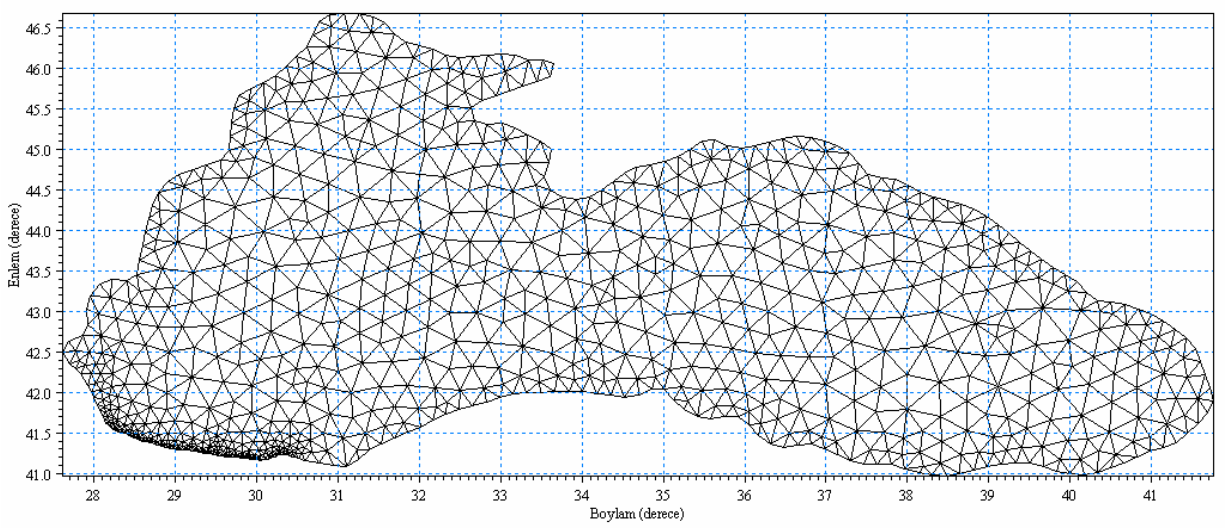
Oluşturulan ağ sistemi Çizelge 5.6'da verilen koordinatlar arasında yer almaktadır. Maksimum derinlik ise -2200 m'yi bulmaktadır. Alanda tüm sınırlar kapalıdır ve herhangi bir sınır şartı verilmemiştir. Ağ sistemi oluşturulurken Courant sayısının 0.5'ten küçük olmasına dikkat edilmiştir. Courant sayısı dalga yayılma hızına bağlıdır ve dalga hareketi taşınımının doğru tanımlanması için tüm hesaplama noktalarında 0.5'ten küçük olmalıdır. Tam spektrum formülü ve kartezyen koordinatlar için Courant sayısı (5.8) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$C_r = \left| c_x \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| + \left| c_y \frac{\Delta t}{\Delta y} \right| + \left| c_\sigma \frac{\Delta t}{\Delta \sigma} \right| + \left| c_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \theta} \right| < 0.5 \qquad (5.8)$$

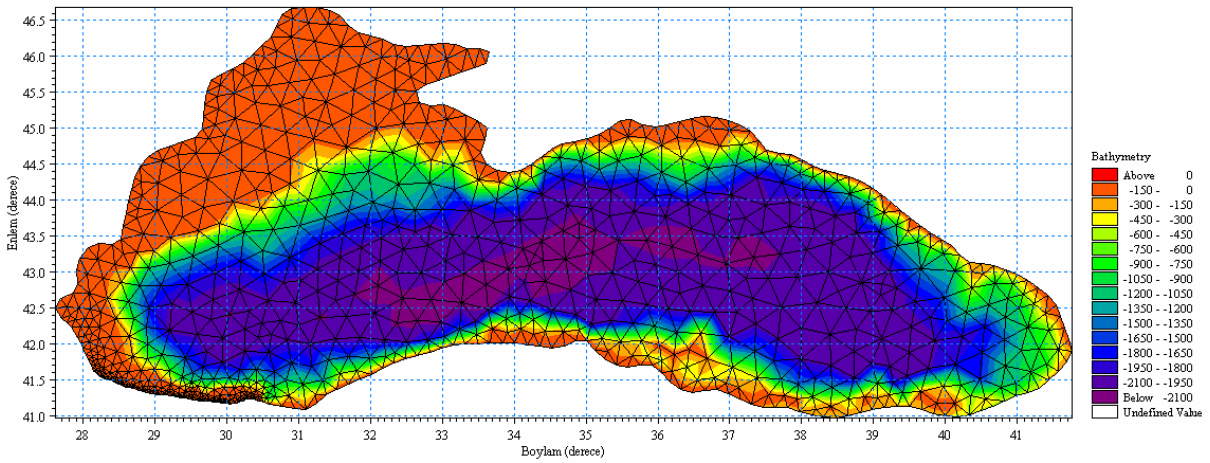
burada c_x, c_y, c_σ ve c_θ dört boyutlu faz alanında (x, y, σ ve θ) dalga grubunun yayılma hızlarıdır. Δx ve Δy bir eleman için x ve y doğrultularında karakteristik uzunluk ölçekleri, $\Delta\sigma$ ve $\Delta\theta$ ise yön ve frekans alanında ayrık aralıklardır.

Ağ sistemi oluşturulurken iki türlü koordinat sisteminden faydalanılabilmektedir. Bu sistemler; UTM (Universal Transverse Mercator Projection) veya coğrafik koordinat sistemidir. UTM, kartezyen koordinat sistemi kullanırken diğeri ise küresel koordinat sistemi kullanmaktadır. Örneğin 100 km'den küçük ölçekli yerel alan uygulamalarında UTM sistemi, bölgesel ve global büyük ölçekli uygulamalarda ise küresel koordinat sistemi kullanılması

önerilmektedir. Karadeniz kapalı alanı büyük ölçekli bir uygulama olduğu için model ağının oluşturulmasında küresel koordinatlar seçilmiştir. Şekil 5.37 ve 5.38'de oluşturulan model ağ sistemi ve batimetrisi görülmektedir.



Şekil 5.37 Model alanı ağ sistemi



Şekil 5.38 Hesaplama alanının batimetrisi

MikeZero Ağ Üreticisi hesaplama alanını oluştururken yapılandırılmamış ağ sistemi kullanmaktadır. Geleneksel olarak üçüncü nesil dalga tahmin modelleri dikdörtgen olarak yapılandırılmış ağ sistemi kullanmaktadırlar. Fakat bu ağ sistemi günümüzün teknolojik bilgisayarlarında bile oldukça uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir. Ayrıca kırılma bölgesi, bariyer adalar, kanallar, vb. oldukça ince çözüm ağına gerek duymaktadırlar fakat dikdörtgen şeklinde yapılandırılmış ağ sistemiyle bu bölgeleri daha detaylı çözmek mümkün olamamaktadır. Üçgenlerden oluşan yapılandırılmamış ağ sistemiyle istenilen bölgelerde çözünürlük artırılırken diğer bölgelerde daha kaba ağ kullanılabilmektedir. Karaburun kıyısında dalga tahmini yapmak için oluşturulan ağ sisteminde de bu özellikten

faydalanılmıştır. Batı Karadeniz Bölgesi'nin (Karaburun kıyısının bulunduğu kıyı alanı) belirli bir mesafesinde daha sık ağ yapısı kullanılırken Karadeniz ortalarında ve diğer bölgelerde daha seyrek ağ oluşturulmuştur (Şekil 5.37). Tüm model ağında 977 düğüm noktası bulunurken, 1663 adet eleman (üçgen) bulunmaktadır.

Zaman

Programa girilen simülasyon süresi toplamda üç yıldır. Bu simülasyon zamanı ECMWF'ten alınan rüzgar verilerinin toplam süresine eşit olarak alınmıştır. Yani her altı saatte bir elde edilen üç yıllık rüzgar verisi MIKE 21 SW sayısal modeline girdi olarak verilmiştir. Bunun sonucunda da yine üç yıllık dalga parametreleri zaman serisi olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.7'de simülasyon parametreleriyle ilgili bilgiler bulunmaktadır.

Çizelge 5.7 Simülasyona ait zaman parametreleri

Zaman adımı sayısı	946080
Zaman adımı aralığı	100 s
Simülasyon başlama tarihi	01/01/2003 00:00
Simülasyon bitiş tarihi	31/12/2005 00:00

Temel Denklemler ve Çözüm Yöntemleri

MIKE 21 SW Bölüm 2.2.1.3'te daha detaylı olarak anlatıldığı gibi dalga alanının yoğunluk spektrumu N(σ,θ) ile temsil edildiği dalga hareketi denge denklemine dayanmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi iki türlü spektrum formülü kullanılabilmektedir. Bunlar; tam spektrum formülü ve yönsel ayrılmış parametrik formüldür. Yönsel ayrılmış parametrik formülle rüzgar-dalga üretimi gerçekleştirilememektedir. Bu sadece tam spektrum formülü ile sağlanmaktadır. Bu sebeple Karadeniz model alanı için tam spektrum formülünden faydalanılmıştır (Çizelge 5.8).

Çizelge 5.8 Temel denklemler ve çözümleme tekniği ile ilgili modelde kullanılan parametreler

Temel denklemler	Spektrum formülü	Tam spektrum formülü	
	Zaman formülü	Kararlı olmayan formül	
Çözüm tekniği	Hesaplama sınırları	Taşınım hesabındaki maksimum zaman adımı sayısı	32
		Kaynak hesabındaki adım sayısı	1

Spektral moddaki bağımlı değişken her düğüm noktasındaki yönsel frekans dalga spektrumudur. Modelde spektrum hesaplamada kullanılan frekans ve yön aralıkları girilmektedir. Sadece tam spektrum formülünde kullanılan frekans ayrıklaştırması iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar; logaritmik ve eş aralıklı ayrıklaştırmadır. Genelde frekansların logaritmik olarak ayrıklaştırılması tavsiye edilmektedir. Logaritmik ayrıklaştırma (5.9) ifadesiyle verilmektedir:

$$f_n = f_0 c^n, \qquad n = 1, 2, ... \tag{5.9}$$

burada f_n frekans, f_0 minimum frekans ve c frekans faktörüdür (varsayılan değer olarak 1.1'e eşit alınmaktadır).

Frekans aralığı hesaplama alanında oluşması beklenen dalga frekanslarını içermelidir. Tipik açık deniz uygulamalarında dalga periyotları 4s ve 25 s (0.25 Hz-0.04 Hz) arasında bulunmaktadır. Çizelge 5.9'da modelde kullanılan frekans ayrıklaştırma değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.9 Modelde kullanılan spektrum ayrıklaştırma parametreleri

Frekans Ayrıklaştırması			
Ayrıklaştırma Tipi	Frekans Sayısı	Minimum Frekans	Frekans Faktörü
Logaritmik	25	0.055	1.1
Yönsel Ayrıklaştırma			
Ayrıklaştırma Tipi	Yön sayısı		
360°'lik gül	16		

Sayısal modelde yine iki türlü yönsel ayrıklaştırma mevcuttur. Bunlar; 360°'lik gül ve yönsel daire dilimidir. Genelde değişken rüzgar/dalga/soluğan yönleri için 360°'lik güller seçilmektedir. Fakat beklenen rüzgar/dalga/soluğan yönleri belirli bir aralıkta yoğunlaşıyorsa yönsel daire diliminin kullanılması hesaplama zamanını kısalttığından dolayı tavsiye edilmektedir.

Dalgaların yönsel değişimini çözmek için ayrıklaştırılmış yönlerin sayısı yeterince fazla olmalıdır. Çizelge 5.9'da modelde kullanılan yönsel ayrıklaştırma değerleri görülmektedir.

Coğrafik ve spektral alanda ayrıklaştırma hücre merkezli sonlu hacim yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Coğrafik alanda yapılandırılmamış ağ kullanılırken, uzamsal alanda ayrıklaştırma üstüste binmeyen ağ elemanlarının sürekliliğinin bölünmesiyle gerçekleştirilmektedir. Konvektif değişimler birinci derece upwinding şema kullanılarak hesaplanmaktadır.

Model iki farklı zaman formülü kullanmaktadır. Bunlar:

- Yarı kararlı formül,
- Kararlı olmayan formüldür.

Kararlı olmayan formülde, zamanda integrasyon kesirli zaman adımı yaklaşımına dayanmaktadır. İlk olarak kaynak terimler olmadan temel korunum denklemini çözerek yeni zaman adımında yaklaşık sonuca ulaşan yayılım adımı oluşturulmakta, ikinci olarak ise sadece kaynak terimlerin etkisi dikkate alınarak tahmin edilen sonuçtan yeni sonucu hesaplayan kaynak terimi adımı oluşturulmaktadır. Yayılım adımı açık Euler şeması çözülerek gerçekleştirilmektedir. Açık şemadaki katı stabilite kısıtlamalarının üstesinden gelmek için ise Vislmeier ve Hänel'in (1995) görüşleri doğrultusunda bir çoklu-seri integrasyon şeması kullanılmaktadır. Böylelikle maksimum zaman adımı, integrasyon adımları (adım sayısı ağ elemanları arasında değişebilmektedir) serisinin yerel olarak kullanılmasıyla yükseltilebilmektedir.

Yayılım hesabında kullanılan maksimum zaman adımı sayısı 32'dir. Bu maksimum zaman adımına (Δt) ve minimum zaman adımına ($\Delta t/32$) karşılık gelmektedir. Kaynak integrasyon adımı ise Komen vd. (1994) ve Hersbach (1999) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kaynak hesabında zaman adımı sayısının 1 olarak kabul edilmesi tavsiye edilmektedir (Çizelge 5.8).

Yarı-kararlı zaman integrasyonunda her zaman adımındaki kararlı hal çözümü kararlı olmayan haldeki temel denklemlerin kararlı sınır şartları ve etkileri dikkate alınarak

hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Kararlı olmayan haldeki aynı zaman integrasyon işlemi bu modda da uygulanmaktadır.

5.4.3.1 Modelin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

Model kurulumu ve kullanılacak parametreler belirlendikten sonra dalga tahmini için simülasyonlara başlamadan önce modelin kalibrasyonu ve doğrulanmasının yapılması gerekmektedir. Kalibrasyonun amacı belirli bir durumda bilinen veya ölçülen şartların yeniden oluşturulması için modeli ayarlamak yani doğru parametrelerle çalıştırmaktır. Kalibre edilen veya ayarlanan modelin artık herhangi bir parametresi değiştirilmeden daha uzun veya farklı dönemlerde koşturularak doğrulanması gerekmektedir.

MIKE 21 SW sayısal modelinde bulunan kalibrasyon parametreleri (DHI, 2003):

- Taban sürtünmesi

  Sığ su derinliklerinde taban sürtünme katsayısındaki yükselme, enerji kaybına ve bununla beraber dalga yüksekliğinin azalmasına ve periyodun artmasına sebep olmaktadır. Bunun tam tersi bir durum taban sürtünme katsayısının azaltılmasıyla oluşturulabilmektedir. Derin suda ise taban sürtünme katsayısının etkisi dalga tabanı hissetmeyeceği için ihmal edilmektedir.

- Kırılma parametreleri

  Bazı durumlarda kırılma parametreleri kalibrasyon parametreleri olarak kullanılmaktadır. Fakat bu parametrelerin seçiminde oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Sayısal modelde tanımlanan α parametresi kırılmadan sonra enerji kaybı oranını kontrol ederken γ parametresi derinlikle ilgili kırılma miktarını kontrol etmektedir. α parametresindeki yükselme enerji kaybı miktarını artırırken, γ parametresindeki yükselme ise derinliğe bağlı dalga kırılma miktarını azaltmaktadır.

- Köpüklenme

  Genelde köpüklenme için sayısal modelde tanımlanan parametreler kullanılmaktadır (C_{ds}=4.5 ve δ=0.5). Fakat hesaplanan dalga yükseklikleri/periyotları ölçülen dalga yüksekliklerine/periyotlarına göre küçük çıkıyorsa C_{ds} katsayısı azaltılarak model kalibre edilebilmektedir.

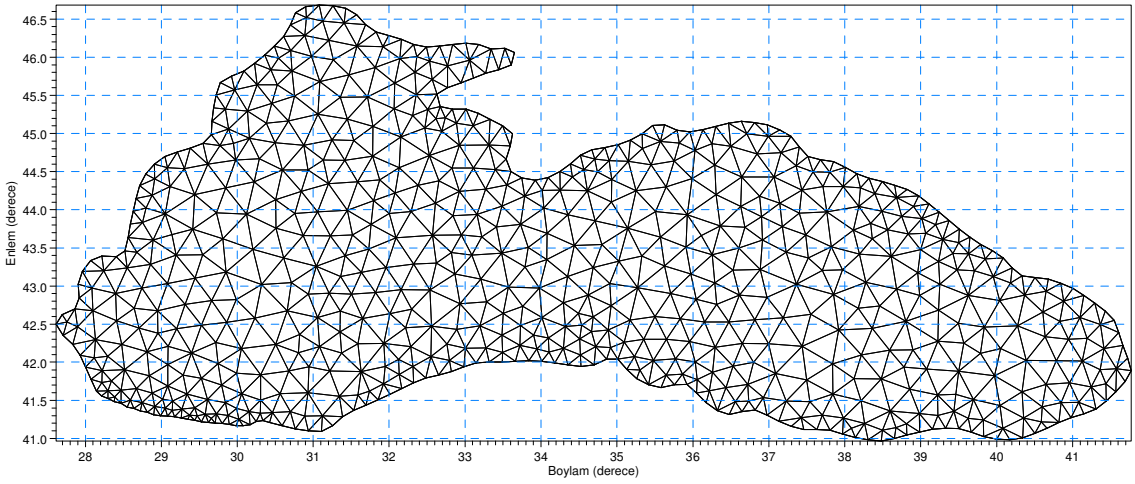
- Rüzgar verisi

  MIKE 21 SW modelinin doğruluğu rüzgar verisinin doğruluğuna bağlıdır. Rüzgar hızında %10 hata dalga yüksekliğinde %20'lik bir hataya neden olmaktadır.

- Akıntı ve su seviyesi değişimi verileri

Genellikle sığ su simülasyonlarında bu verilerin doğruluğu model için önemli olmaktadır.

Karaburun kıyısında dalga tahmini için kullanılan MIKE 21 SW sayısal modelinin kalibrasyonu için öncelikle bir haftalık dönem seçilmiştir. İlk olarak oluşturulan hesaplama alanı ve batimetri dosyası üzerinde kalibrasyon işlemi uygulanmıştır. Kaba ağ sistemi ile oluşturulan model alanında (Şekil 5.39) 751 düğüm noktası, 1273 adet eleman (üçgen) bulunurken daha ince ağ sistemi ile oluşturulan model alanında ise 977 düğüm noktası, 1663 adet eleman (üçgen) bulunmaktadır (Şekil 5.37). İki model alanı arasındaki fark asıl olarak Karaburun bölgesinin bulunduğu alanda daha ince ağ sistemi kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu kıyı şeridi ince ağ sisteminde çok daha küçük üçgen elemanlara bölünmüştür.



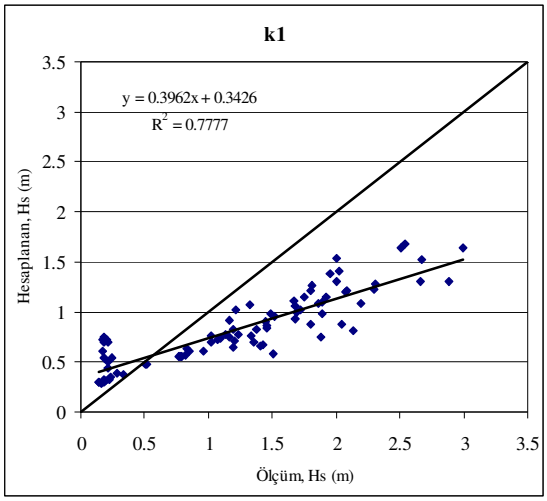
Şekil 5.39 Kaba model alanı ağ sistemi

Her iki model alanı için MIKE 21 SW sayısal modeli aynı parametrelerle koşturulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.10'da k1 ve k2 isimleriyle verilen kalibrasyonlarda bu iki ağ sisteminin hangi parametrelerle koşturulduğu görülmektedir. Şekil 5.40 ve 5.41 ise yine bu iki ağ sisteminin modelde koşturulmaları sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği grafiklerinde elde edilen eğilim çizgileri ve regresyon katsayıları görülmektedir. İnce ağ sisteminin daha uygun sonuçlar verdiği belirlendikten sonra diğer kalibrasyon parametreleri denenmiştir. Taban sürtünmesi ve kırılma parametrelerinin değiştirilmesinin kalibrasyon sonuçlarında birbirlerine çok yakın değerler vermesi üzerine modelde bu parametrelerin sayısal modelde varsayılan değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Fakat köpüklenme parametresi (C_{ds}) 4.5 değerinden kademeli olarak 0.5'e kadar azaltılmış en iyi sonucun 0.5 değerinde verdiği gözlenmiştir (Şekil 5.41 ve

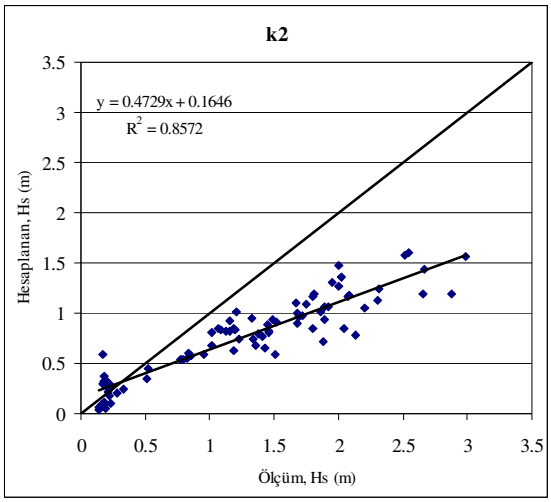
Şekil 5.54 arası). Şekil 5.40'tan 5.54'e kadar olan grafiklerde her bir kalibrasyonun sonucu ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği şeklinde verilmiştir. Bu grafiklerden ve Şekil 5.55'ten görüldüğü üzere en uyumlu sonucun köpüklenme parametresi değerinin 0.5 olduğu kalibrasyonlar (k13, k14 ve k15) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.10 Model kalibrasyonunda kullanılan parametreler

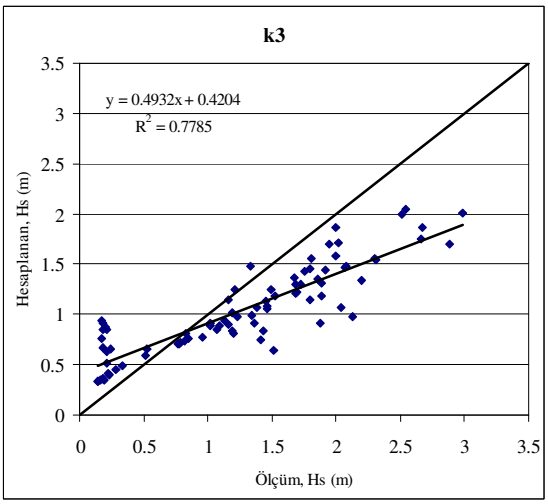
Kalibrasyon	Ağ Sistemi	Derinlik (m)	Taban Sürtünmesi	Kırılma Parametreleri		Köpüklenme Parametreleri	
				α	γ	C_{ds}	δ
k1	Kaba	-50	0.04	1	0.8	4.5	0.5
k2	İnce	-16	0.04	1	0.8	4.5	0.5
k3	Kaba	-50	0.04	1	0.8	2	0.5
k4	İnce	-16	0.04	1	0.8	2	0.5
k5	İnce	-16	0.04	1	0.8	1.8	0.5
k6	İnce	-16	0.04	1	0.8	1.5	0.5
k7	İnce	-16	0.04	1	0.8	1.5	0.7
k8	İnce	-16	0.04	1	0.8	1.5	0.3
k9	İnce	-16	0.04	1	0.8	1	0.5
k10	İnce	-16	0.04	1	0.85	1	0.5
k11	İnce	-16	0.04	1	0.9	1	0.5
k12	İnce	-16	0.01	1	0.8	1	0.5
k13	İnce	-16	0.04	1	0.8	0.5	0.5
k14	İnce	-16	0.01	1	0.8	0.5	0.5
k15	İnce	-16	0.005	1	0.8	0.5	0.2



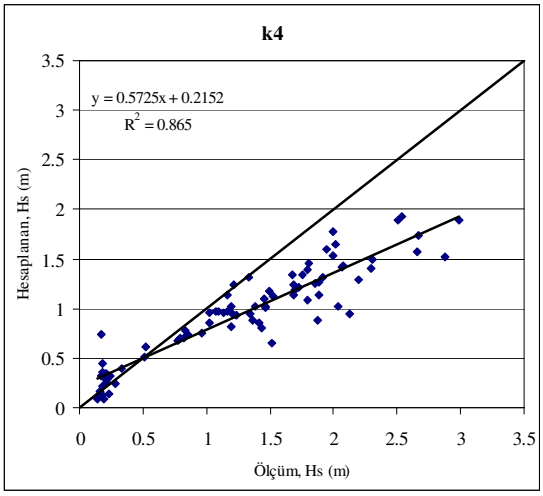
Şekil 5.40 k1 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



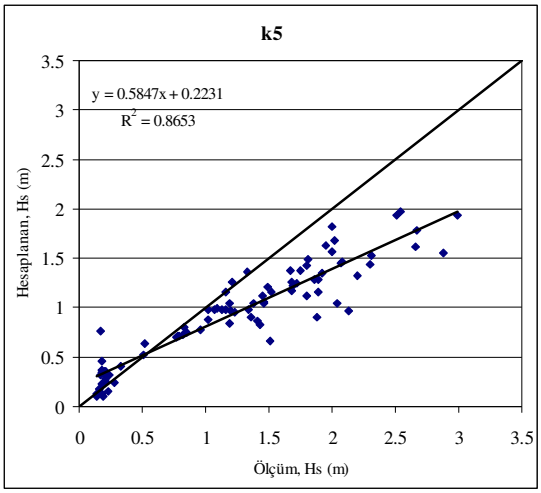
Şekil 5.41 k2 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



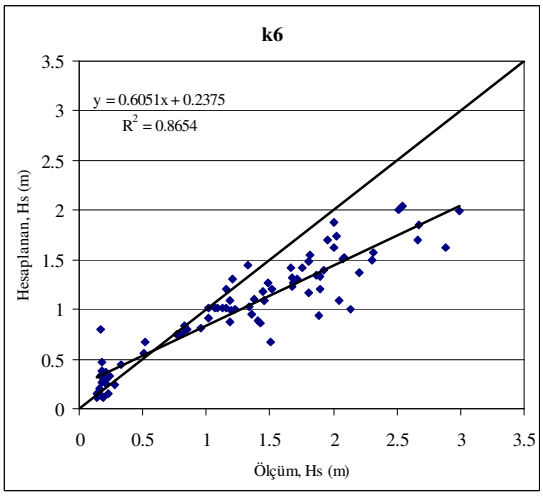
Şekil 5.42 k3 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



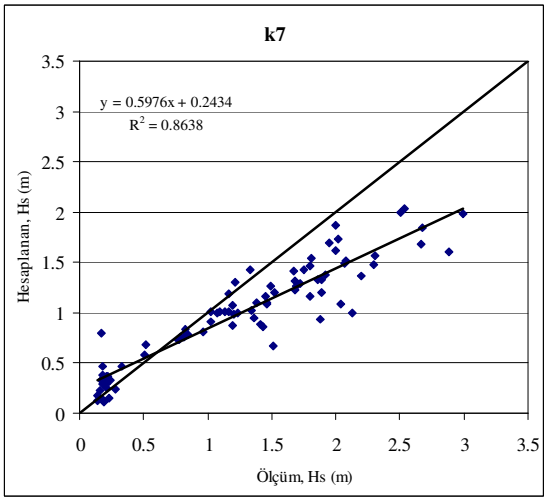
Şekil 5.43 k4 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



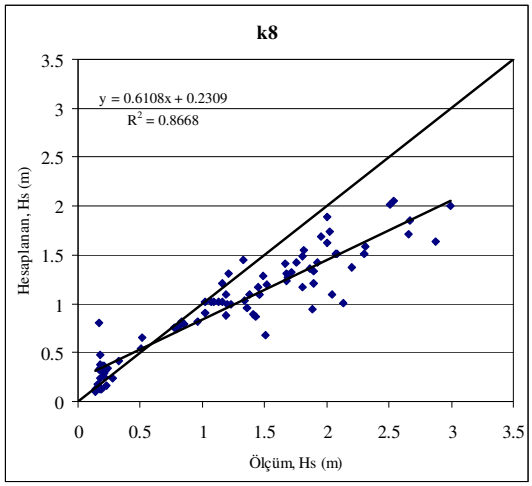
Şekil 5.44 k5 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



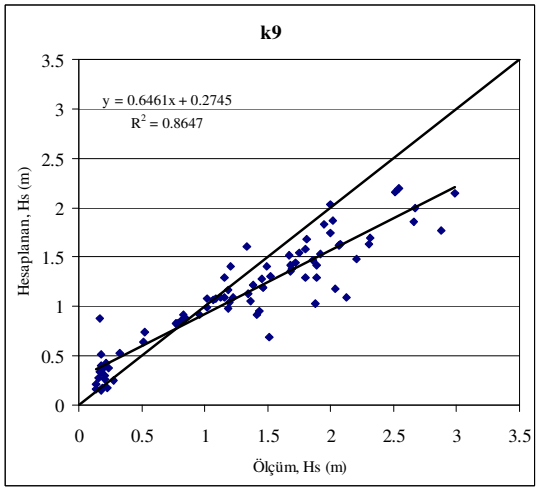
Şekil 5.45 k6 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



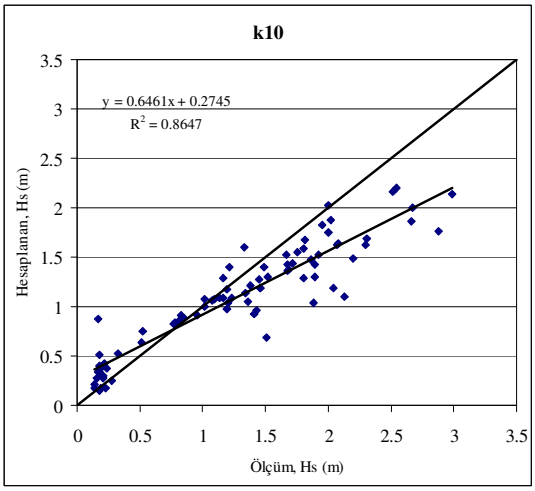
Şekil 5.46 k7 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



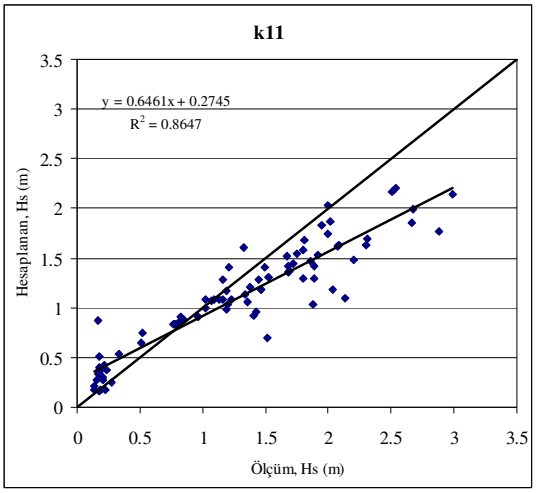
Şekil 5.47 k8 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



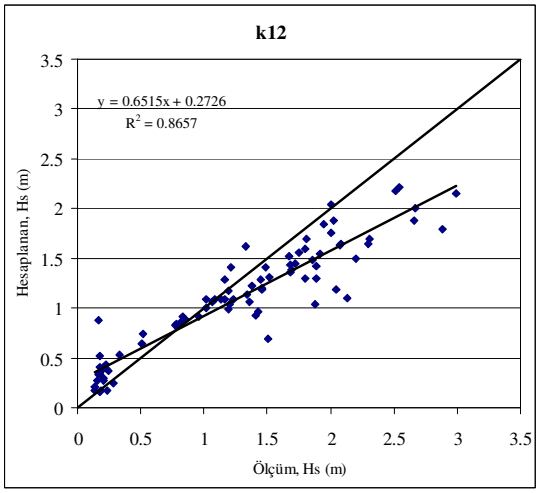
Şekil 5.48 k9 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



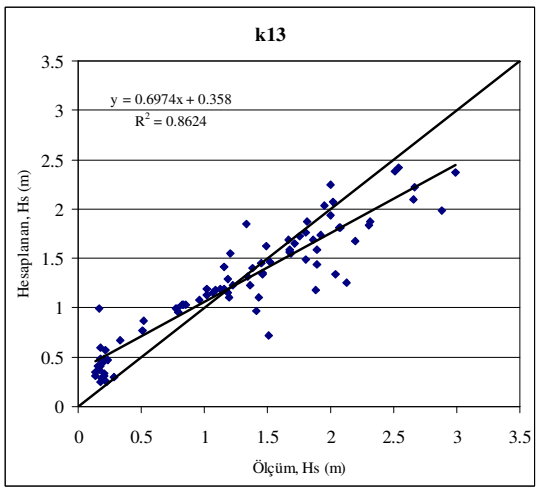
Şekil 5.49 k10 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



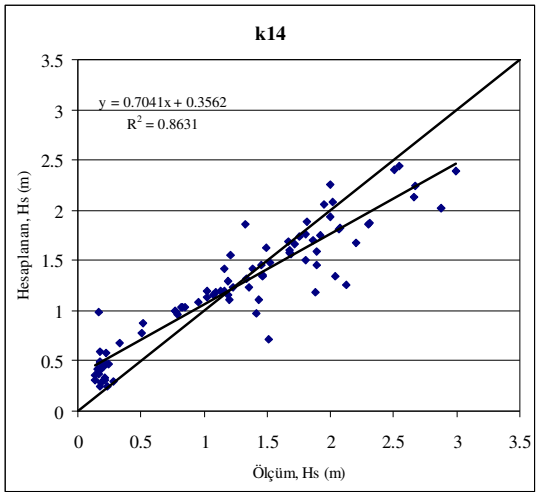
Şekil 5.50 k11 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



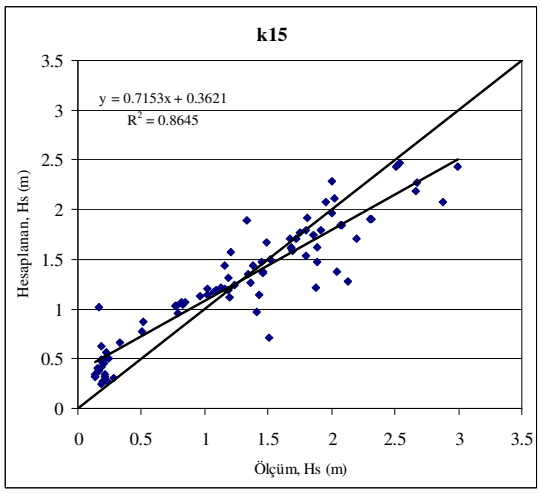
Şekil 5.51 k12 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



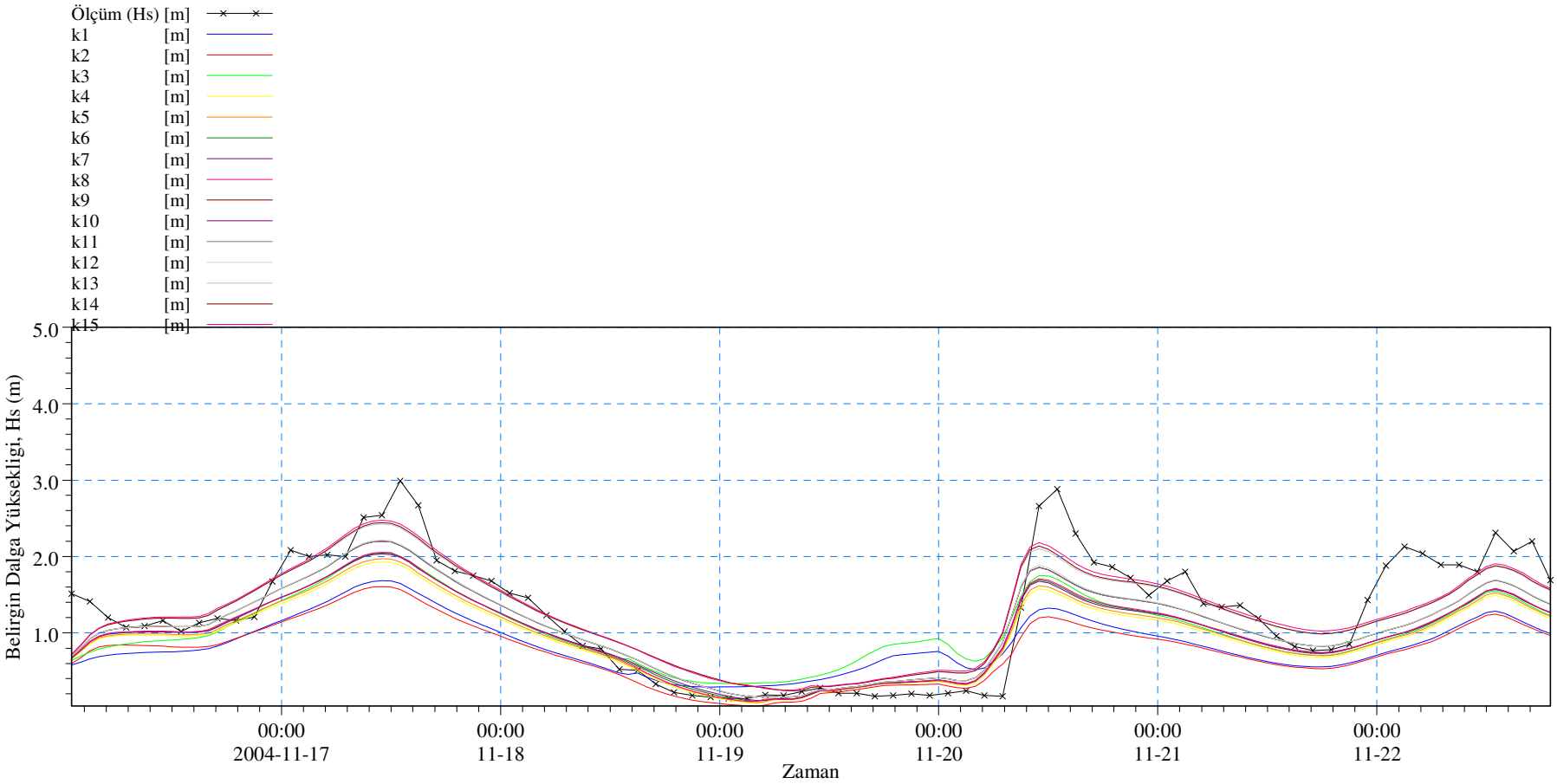
Şekil 5.52 k13 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



Şekil 5.53 k14 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



Şekil 5.54 k15 kalibrasyonu sonucunda ölçülen dalga yüksekliklerine karşı hesaplanan dalga yüksekliği



Şekil 5.55 Kalibrasyon sonuçları (16/11/2004-22/11/2004 tarihleri arasında)

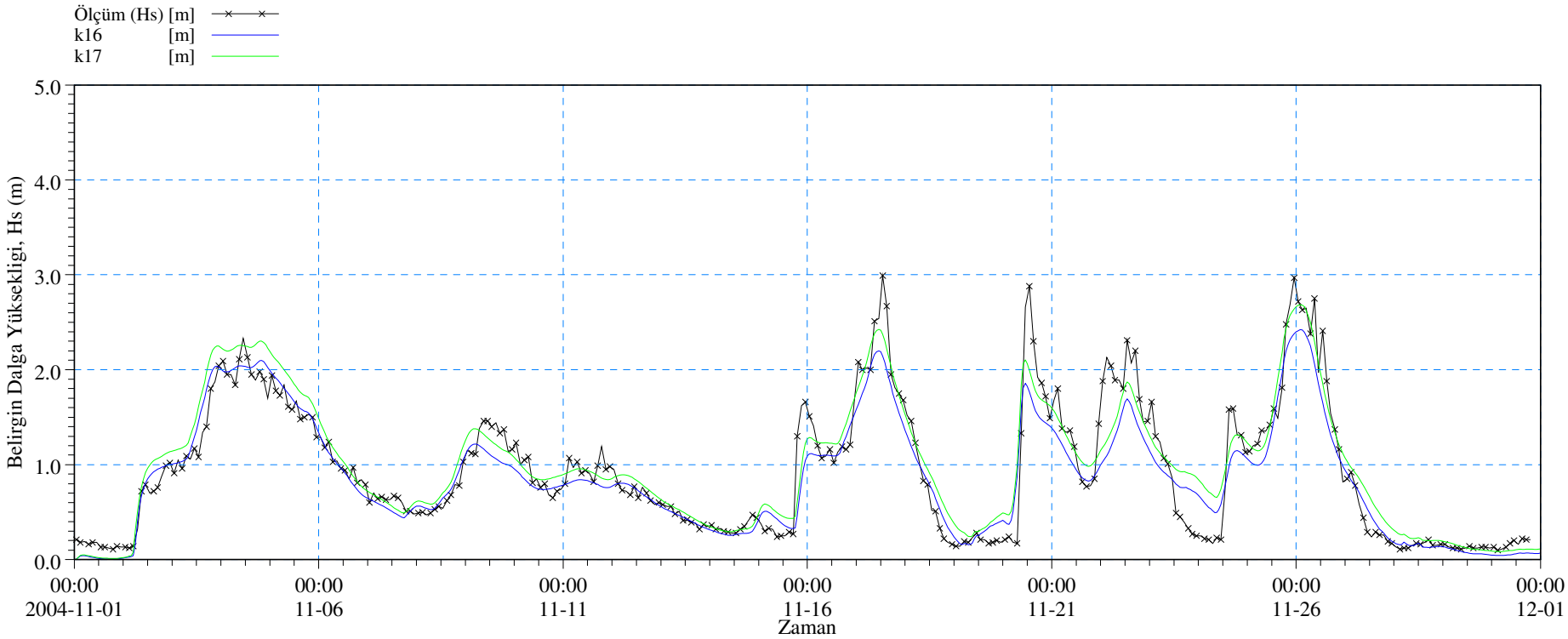
Model kalibrasyonundan sonra modelin doğrulanması işlemine geçilmiştir. Bunun için bir aylık simülasyon periyodu (01/11/2004-30/11/2004) seçilerek iki köpüklenme parametresi (C_{ds}= 0.5 ve C_{ds}= 1) için doğrulama gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.11'de doğrulama işleminin parametreleri görülmektedir.

Çizelge 5.11 Model doğrulanmasında kullanılan parametreler

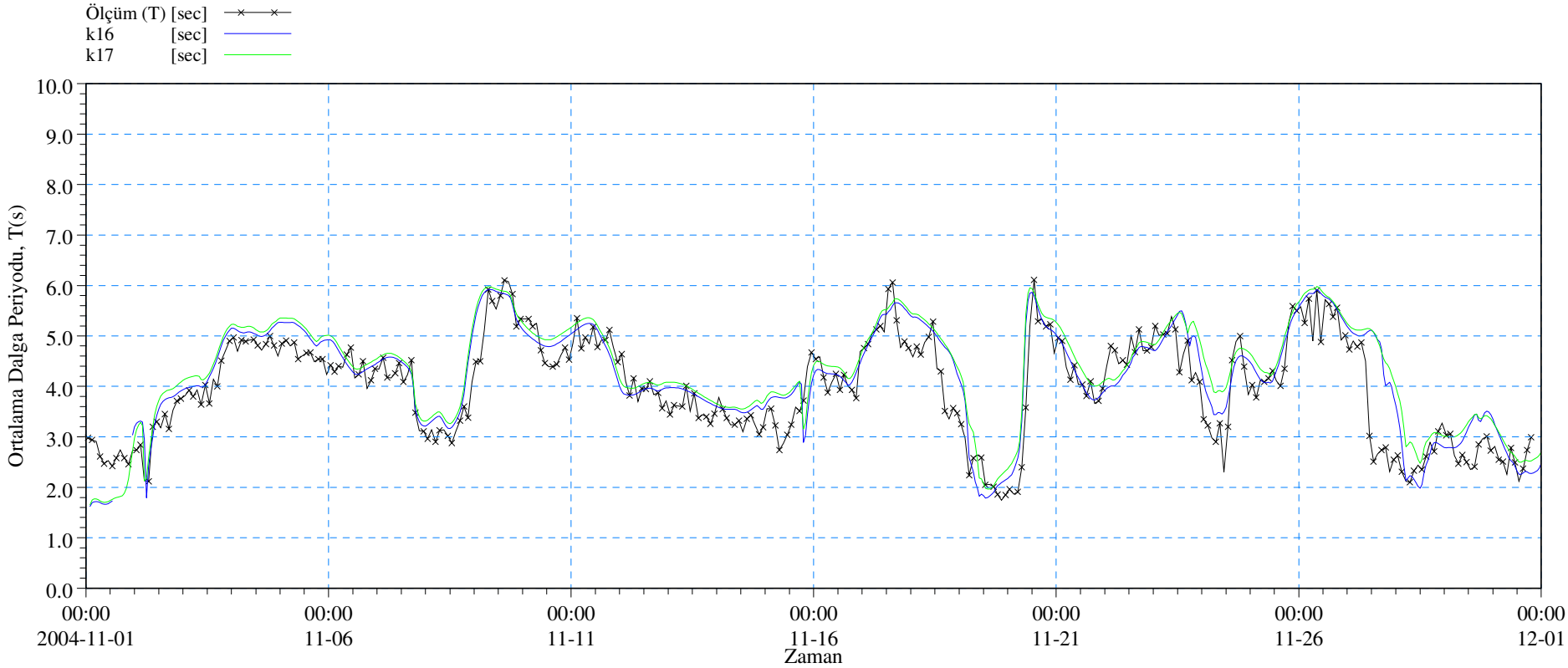
Doğrulama	Ağ Sistemi	Derinlik (m)	Taban Sürtünmesi	Kırılma Parametreleri		Köpüklenme Parametreleri	
				α	γ	C_{ds}	δ
k16	İnce	-16	0.04	1	0.8	1	0.5
k17	İnce	-16	0.04	1	0.8	0.5	0.5

Şekil 5.56 ve 5.57 incelenirse her iki köpüklenme parametresinin birbirlerine yakın değerler verdiği görülmektedir. Fakat köpüklenme parametresinin C_{ds}=0.5 olduğu (k17) doğrulaması, büyük dalga değerlerinde ölçülen dalga yüksekliklerine daha yakın değerler verirken küçük dalga yüksekliklerinde daha uzak değerler vermektedir. Bu durumun soluğanın etkin olduğu dalga yüksekliklerinde daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak soluğanın etkin olduğu şartların pik dalga yüksekliklerinin olduğu durumlara göre daha az olmasından dolayı ve bu bir aylık değerlerin korelasyon analizinden sonra (Şekil 5.58) köpüklenme parametresinin 0.5 alınarak modelin koşturulmasına karar verilmiştir. Şekil 5.58 incelenirse determinasyon katsayısı değerlerinin her iki kalibrasyon için de yaklaşık aynı olmasına karşılık köpüklenme parametresinin 0.5 olduğu k17 doğrulamasının ölçümlerle daha uyumlu sonuç verdiği eğilim çizgisinin eğiminden de görülmektedir.

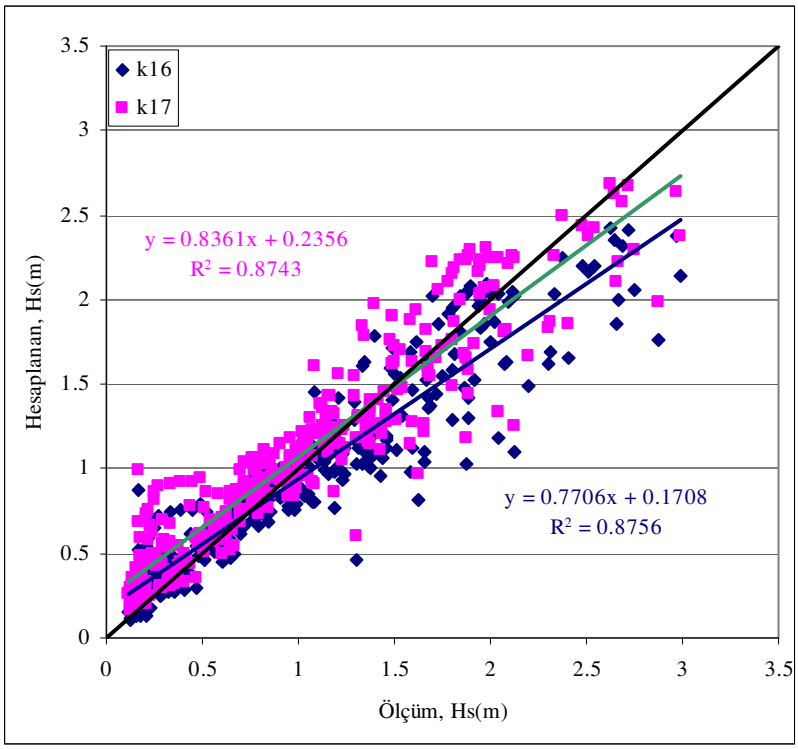
Şekil 5.58'de bir aylık süre için ölçülen dalga yüksekliklerine karşı her iki doğrulama durumunda (k16 ve k17) hesaplanan dalga yükseklikleri grafik olarak çizdirilmiş ve değerler arasındaki determinasyon katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 5.56 Bir aylık süre için (01/11/2004-30/11/2004) model doğrulamasında elde edilen dalga yükseklikleri



Şekil 5.57 Bir aylık süre için (01/11/2004-30/11/2004) model doğrulamasında elde edilen dalga periyotları



Şekil 5.58 Model doğrulamasında elde edilen ve ölçülen dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması (01/11/2004-30/11/2004 tarihleri arasındaki değerler için)

5.4.3.2 Sayısal Model (MIKE 21 SW) Sonuçları ve Değerlendirme

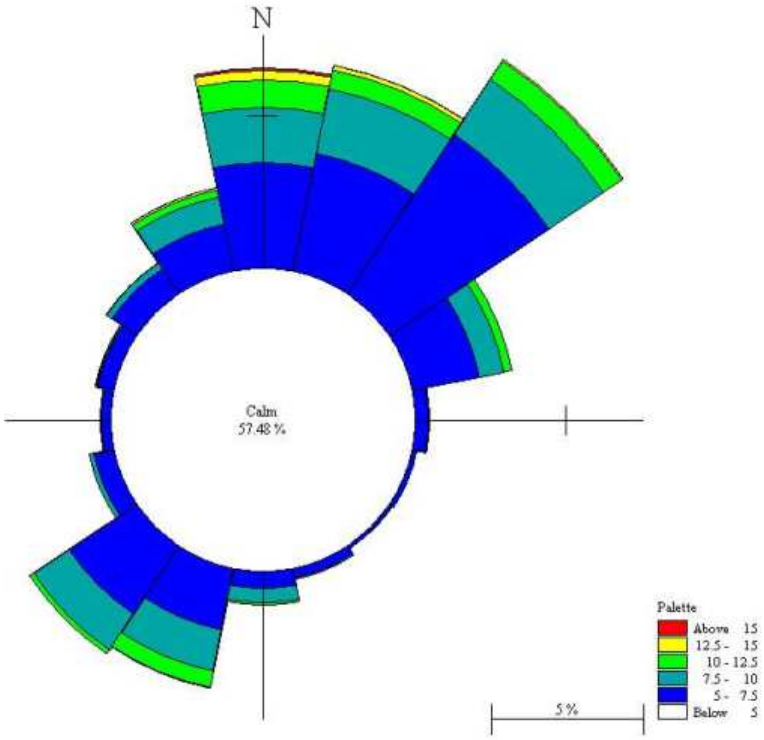
Sayısal modelde ECMWF'ten elde edilen 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında üç yıllık rüzgar alanı verisi kullanılmıştır. Sayısal model yukarıda anlatılan (Bölüm 5.4.3.1) kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinden sonra koşturulmuştur. Simülasyon sonucunda saatlik olarak toplam, soluğan ve rüzgar dalgası parametreleri (Çizelge 5.12) elde edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen bu parametreler derin deniz (N 41.7° E 28.7°) ve Karaburun bölgesinde dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlar (N 41.35° E 28.68°) olmak üzere iki ayrı noktada bulunmuştur. Ayrıca modelden spektrum parametreleri de elde edilebilmektedir. Karaburun bölgesi için yine aynı koordinatlarda yönsel spektrum ve frekans spektrumu da saatlik olarak koşturulan model sonucunda elde edilmiştir.

Çizelge 5.12 Sayısal modelden elde edilen parametreler

Parametreler	**Toplam**	**Rüzgar Dalgası**	**Soluğan**
Belirgin dalga yüksekliği (m)	√	√	√
Pik dalga periyodu (s)	√	√	√
Ortalama dalga periyodu (s)	√	√	√
Sıfırı kesme dalga periyodu (s)	√	√	√
Dalga enerjisi periyodu (s)	√	√	√
Pik dalga yönü (°)	√	√	√
Ortalama dalga yönü (°)	√	√	√
Yönsel standart sapma (°)	√	√	√
Dalga hızı bileşenleri (m/s)	√	√	√
Gerilme akısı (N/m)	√	√	√
Courant sayısı	√	√	√

Sayısal modele girdi olarak verilen 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasındaki üç yıllık ECMWF rüzgar alanı verisi sayısal modelde belirlenen koordinatlarda zaman serisi şeklinde elde edilebilmektedir. N 41.7° E 28.7° derin deniz koordinatlarında rüzgar hızı şiddeti ve yönü şeklinde elde edilen bu değerlerden rüzgar gülü oluşturulmuştur (Şekil 5.59). Yıllık rüzgar gülü yüzeysel rüzgar hızının (su yüzeyinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızı, U_{10}) tüm yıl boyunca değişik yönlerden oluşma oranlarını göstermektedir. Rüzgarın nereden geldiğini gösteren yön dilimleri coğrafik yönlerle aynı seçilmiştir. Rüzgar ölçeği gülün yanında verilmiştir. Eğer rüzgar hızı 5 m/s'den küçükse rüzgar durumu durgun olarak kabul edilmiştir. Bu durumda herhangi bir rüzgar yönü belirtilmemekte ve oluşma oranı gülün ortasındaki çember içinde verilmektedir. Ölçekte görüldüğü üzere rüzgar gülünün hız sınıfları 5-7.5, 7.5-10, 10-12.5, 12.5-15 ve >15 m/s olarak belirlenmiştir.

Bu rüzgar gülü incelendiğinde tüm yönlerden esen rüzgarların oluşma yüzdesi belirlenebilmektedir. Çizelge 5.13'te tüm yönler için rüzgar esme yüzdeleri verilmiştir. %9.3'le en çok NE yönünden rüzgar esmektedir. Bu yönü %6.8 ile NNE yönü takip ederken, %6.5 ile N yönünden rüzgarların estiği görülmektedir. Bu sonuçlar Karaburun bölgesinde yapılan saha gözlemlerini doğrulamaktadır. Çizelge 5.14'te ise rüzgar hızlarına karşılık oluşma yüzdeleri görülmektedir. 5 m/s'nin altındaki rüzgar oluşma yüzdesi %51.48 oranında iken 15 m/s'nin üstünde hıza sahip rüzgar oluşma yüzdesi %0.08 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.59 ECMWF'ten elde edilen rüzgar alanı verileriyle 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında elde edilmiş rüzgar gülü

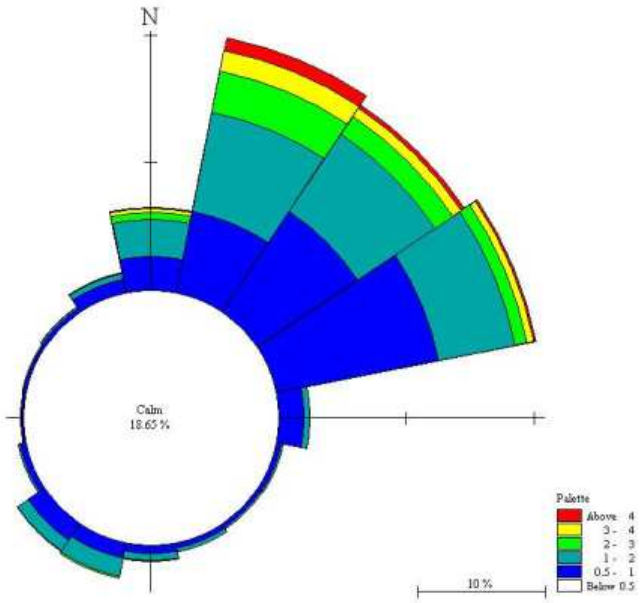
Çizelge 5.13 ECMWF'ten elde edilen rüzgar alanı verilerine göre Karaburun bölgesi için rüzgar yönlerine karşılık rüzgar esme yüzdeleri

Rüzgar Yönü	**Oluşma Yüzdesi (%)**
N	6.5
NNE	6.8
NE	9.3
ENE	4.0
E	0.5
ESE	0.15
SE	0.12
SSE	0.3
S	1.1
SSW	3.9
SW	4.2
WSW	0.8
W	0.3
WNW	0.6
NW	1.25
NNW	2.7

Çizelge 5.14 Karaburun bölgesi için rüzgar hızlarına karşılık rüzgar esme yüzdeleri

Rüzgar Hızı (m/s)	Oluşma Yüzdesi (%)
<5	57.48
5-7.5	25.12
7.5-10	10.82
10-12.5	6.0
12.5-15	0.5
>15	0.08

Sayısal modelden saatlik olarak dalga parametreleri elde edilmiştir. Bu parametrelerden belirgin dalga yüksekliklerine göre üç yıllık veriyi kapsayan dalga gülü oluşturulmuştur. Şekil 5.60'ta derin denizde elde edilen dalga gülü görülmektedir. Yıllık dalga gülü belirgin dalga yüksekliğinin tüm yıl boyunca değişik yönlerden oluşma oranlarını göstermektedir. Dalga gülü ölçeği yine gülün yanında verilmiştir. Eğer dalga yüksekliği 0.5 m'nin altındaysa deniz durumu durgun olarak kabul edilmiştir. Bu durumda herhangi bir dalga yönü belirtilmemekte ve oluşma oranı gülün ortasındaki çember içinde verilmektedir. Ölçekte görüldüğü gibi dalga yüksekliği sınıfları 0.5-1, 1-2, 2-3, 3-4 ve >4 m olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.60 Sayısal model ile hesaplanan belirgin dalga yükseklikleri için 01/01/2003 ve 31/12/2005 tarihleri arasında elde edilmiş dalga gülü

Karaburun bölgesi için elde edilen bu dalga gülü incelendiğinde %20.7 ile ENE yönünden %20.6 ile NNE yönünden ve %19.7 ile NE yönünden en fazla dalgaların oluştuğu görülmektedir (Çizelge 5.15). Bu yönlerden sonra %6.5 ile en fazla N yönünden dalgalar geldiği belirlenmiştir. Dalga yüksekliklerinin meydana gelme olasıkları incelenirse (Çizelge

5.16) %40.8 oranı ile en fazla 0.5-1.0 m arasında yüksekliğe sahip dalgaların oluştuğu gözlenmiştir. Bunu %29 ile 1.0-2.0 m arasındaki dalgalar takip ederken, %18.65 ile 0.5 m'nin altında dalga yüksekliği oluşmaktadır. Karaburun bölgesi derin deniz için oluşturulan dalga gülü incelendiğinde, dalga yönlerinin kendi içindeki dalga yüksekliği oluşma yüzdelerine bakılırsa N ve NNE yönlerinde büyük dalga yüksekliği oluşma yüzdeleri daha fazla iken NE ve ENE yönlerinde bu durum tersine çevrilmektedir (Şekil 5.60). Yani özellikle ENE yönünde daha küçük dalga yükseklikleri oluşmaktadır.

Çizelge 5.15 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerine göre Karaburun bölgesi için dalga yönlerine karşılık dalga oluşma yüzdeleri

Dalga Yönü	**Oluşma Yüzdesi (%)**
N	6.5
NNE	20.6
NE	19.7
ENE	20.7
E	2.4
ESE	0.5
SE	0.5
SSE	0.65
S	1.25
SSW	2.8
SW	2.6
WSW	0.6
W	0.25
WNW	0.3
NW	0.5
NNW	1.5

Çizelge 5.16 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerine göre Karaburun bölgesi için dalga yüksekliklerine karşılık oluşma yüzdeleri

Belirgin Dalga Yüksekliği (m)	**Oluşma Yüzdesi (%)**
<0.5	18.65
0.5-1.0	40.80
1.0-2.0	29.00
2.0-3.0	6.9
3.0-4.0	3.0
>4.0	1.65

Sayısal modelden alınan dalga parametrelerinin genel karakteristikleri incelendiğinde (Çizelge 5.17 ve 5.18) derin denizde ortalama belirgin dalga yüksekliği 1.1 m iken dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlarda 0.9 m olarak belirlendiği görülmektedir. Maksimum dalga yüksekliği ise yine derin denizde 8.3 m olarak hesaplanırken ölçümün yapıldığı koordinatlarda 6.5 m olarak gözlemlenmiştir. Çizelge 5.17 ve 5.18'de sırasıyla ölçümün yapıldığı koordinatlar ve derin deniz koordinatları olmak üzere sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu, pik dalga periyodu ve ortalama dalga yönü için hesaplanan minimum, maksimum, ortalama değerleri ve bu parametrelerin standart sapmaları verilmiştir.

Çizelge 5.17 Sayısal modelden elde edilen genel dalga karakteristikleri (Dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlar (N 41.35° E 28.68°) için)

Parametre	**Minimum**	**Maksimum**	**Ortalama**	**Standart Sapma**
H_s (m)	0.1	6.5	0.9	0.7
T_{ort} (s)	1.0	8.9	4.1	1.0
T_p (s)	1.5	12.7	5.7	1.5
Ortalama Dalga Yönü	0	360	56	64

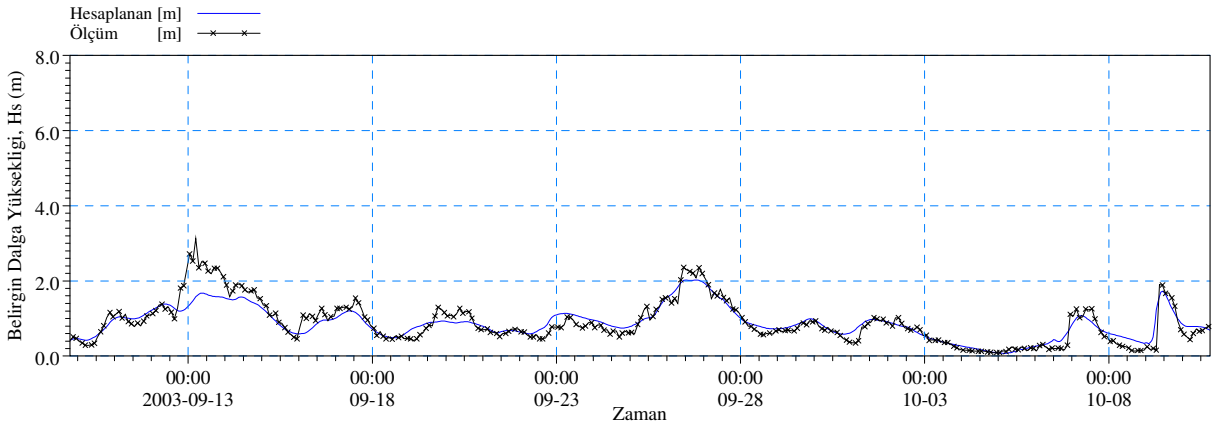
Çizelge 5.18 Sayısal modelden elde edilen genel dalga karakteristikleri (Derin deniz koordinatları (N 41.7° E 28.7°) için)

Parametre	**Minimum**	**Maksimum**	**Ortalama**	**Standart Sapma**
H_s (m)	0.1	8.3	1.1	0.9
T_{ort} (s)	1.0	9.1	4.1	1.0
T_p (s)	1.5	12.5	5.6	1.5
Ortalama Dalga Yönü	0	360	78	80

Kalibrasyon ve model doğrulaması sonucunda koşturulan sayısal modelden elde edilen dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü) Karaburun bölgesinde yapılan dalga ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Zaman serisi şeklinde yapılan bu karşılaştırılmalar sonucunda değerlerin (özellikle belirgin dalga yüksekliği için) birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.61, Şekil 5.62 ve Şekil 5.63). Şekil 5.61 belirgin dalga yüksekliklerinin karşılaştırılmasını, Şekil 5.62 ortalama dalga periyotlarının karşılaştırılmasını ve Şekil 5.63 ortalama dalga yönlerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılmasını vermektedir. Sonuçların birbirine oldukça yakın çıkmasının sebebi modelin

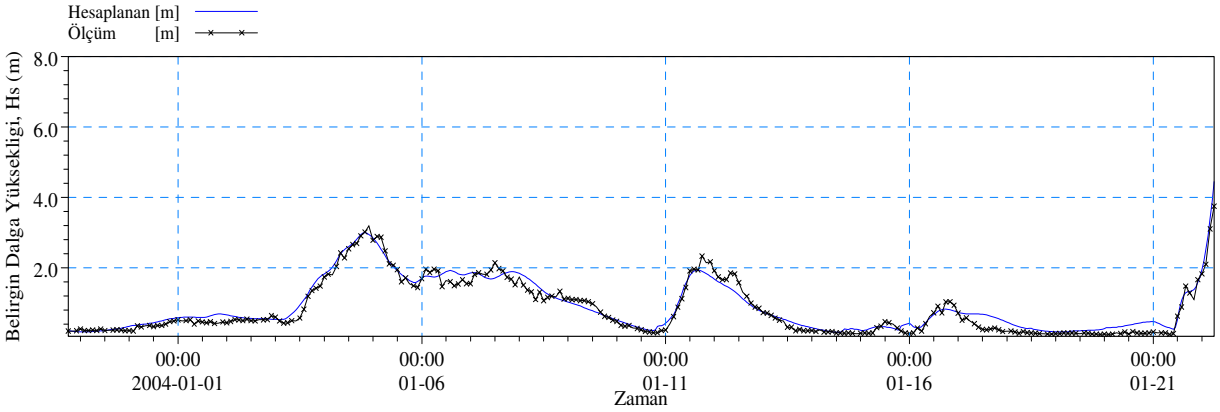
iyi kalibre edilmesi ve doğrulanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yeni üçüncü nesil sayısal spektral model açık deniz ve kıyı alanlarında yapılandırılmamış ağ sistemi kullanmaktadır. Yapılandırılmamış ağ sistemindeki yüksek derecedeki esneklik sebebiyle farklı ölçeklerdeki problemler oldukça rahat çözümlenebilmektedir. Yani açık deniz bölgelerinde kaba ağ kullanılabilirken kıyı bölgelerinde ağ sisteminin inceltilebilmesi elde edilen sonuçlar için daha fazla doğruluk sağlamaktadır. Karadeniz kapalı alanı için de aynı yönteme başvurulmuştur. Açık denizde ağ sistemi aralıklı tutulurken kıyı alanında özellikle dalga ölçümünün yapıldığı bölgelerde ağ sıklaştırılarak daha yüksek çözünürlük elde edilmiştir.

Sonuçların dalga ölçümleri ile oldukça uyumlu elde edilmesinin ana sebebi ise sayısal modelin üçüncü nesil dalga tahmin modeli olmasıdır. Üçüncü nesil dalga modelleri yönsel dalga spektrumunun benzeşiminde detaylı kaynak terimleri dengesinin doğrudan çözümüyle daha doğru sonuçlar elde etmektedir. Yani rüzgar nedeniyle dalga gelişimi, lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi, köpüklenmeden kaynaklanan dalga enerji kaybı, taban sürtünmesinden dolayı dalga enerji kaybı, derinliğe bağlı dalga kırılmasından kaynaklanan enerji kaybı, derinlik değişiminden dolayı sığlaşma ve sapma, dalga-akıntı etkileşimi, zamanla değişen su seviyesinin etkisi gibi dalga gelişimini etkileyen fiziksel olaylar üçüncü nesil tahmin modellerinde detaylı olarak çözümlenmektedir. Ayrıca bu modeller birinci ve ikinci nesil dalga tahmin modellerine göre daha detaylı lineer olmayan dalga girişimi kaynak terimlerinin parametreleştirilmesini kullanmakta ve spektrum şeklindeki kısıtlamaları azaltmaktadır.

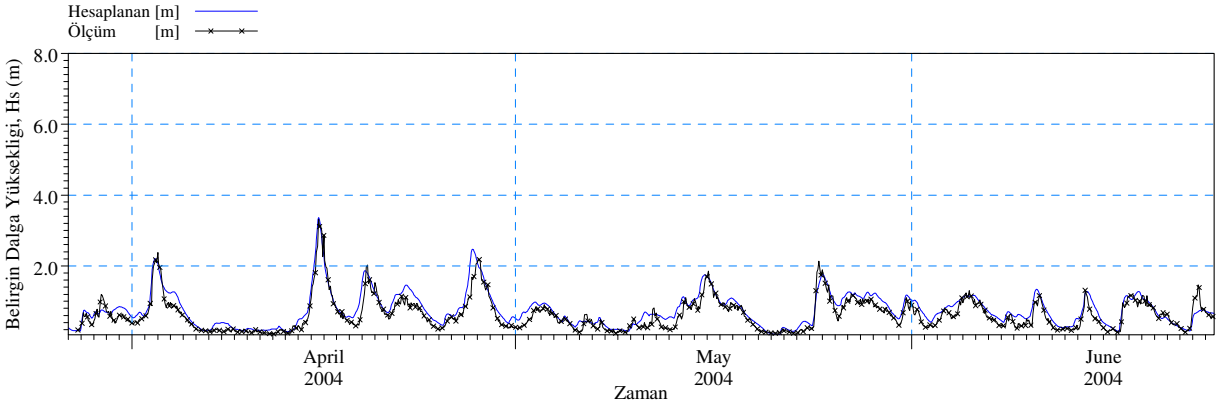


a) Veri seti 1 (30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arası)

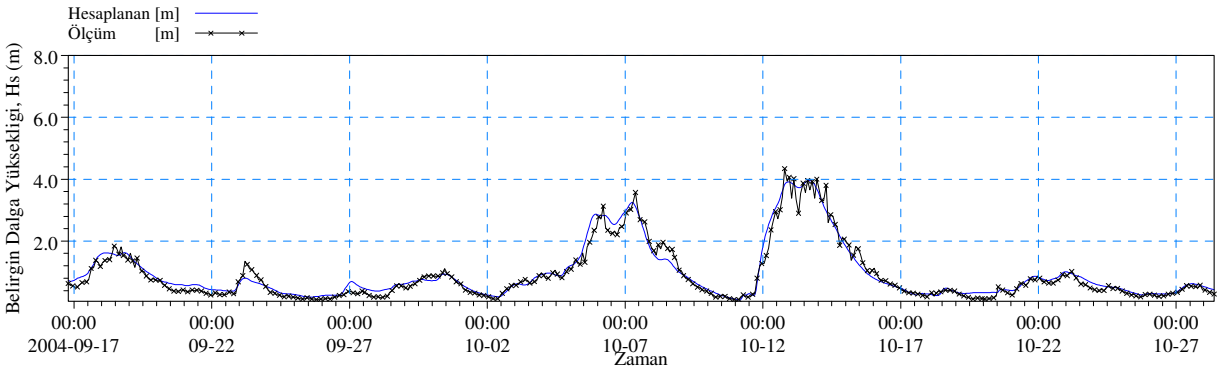
Şekil 5.61 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması



b) Veri seti 2 (29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arası)

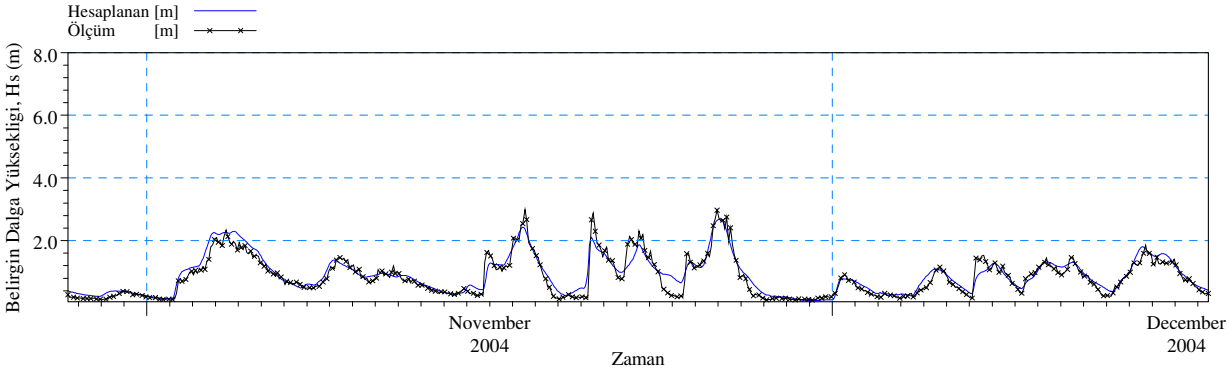


c) Veri seti 3 (27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arası)



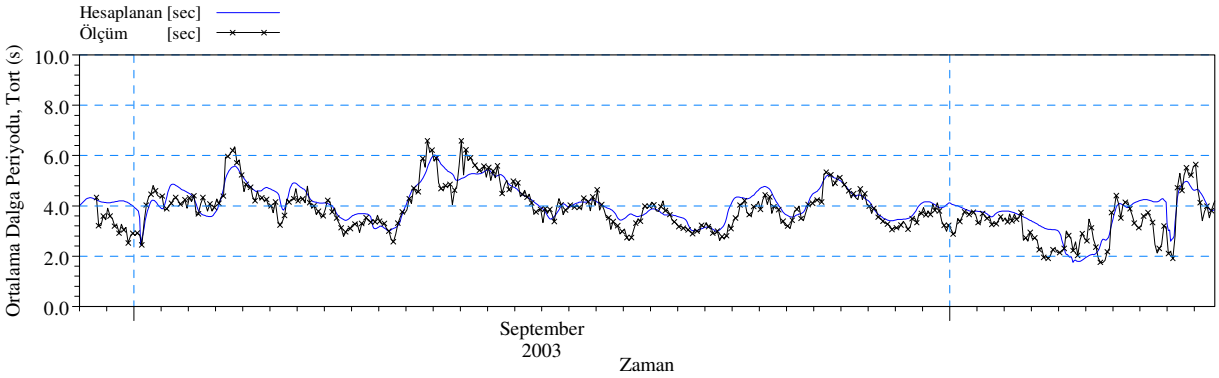
d) Veri seti 4 (16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arası)

Şekil 5.61 Devam

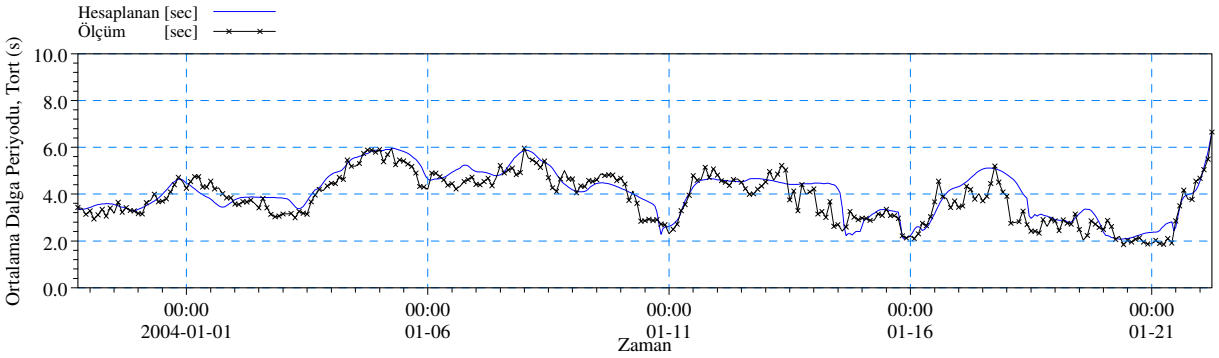


e) Veri seti 5 (28 Ekim 2004-17 Aralık 2004 tarihleri arası)

Şekil 5.61 Devam

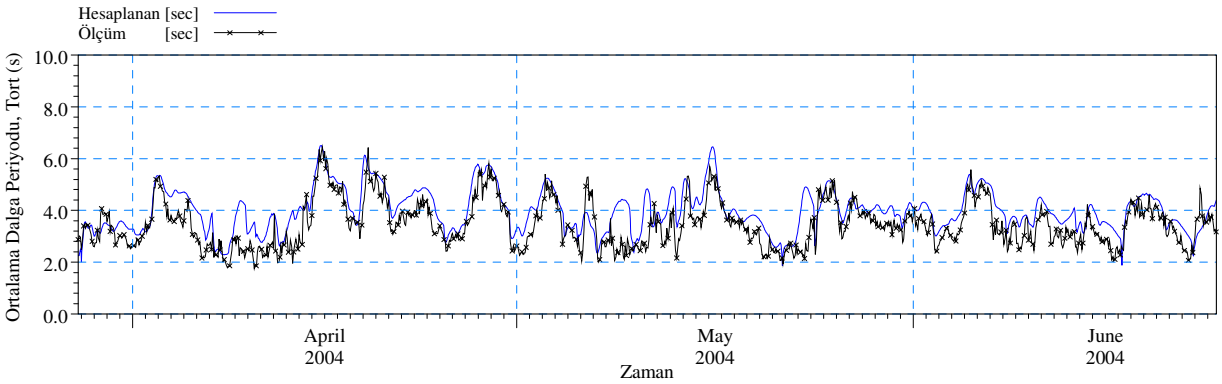


a) Veri seti 1 (30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arası)

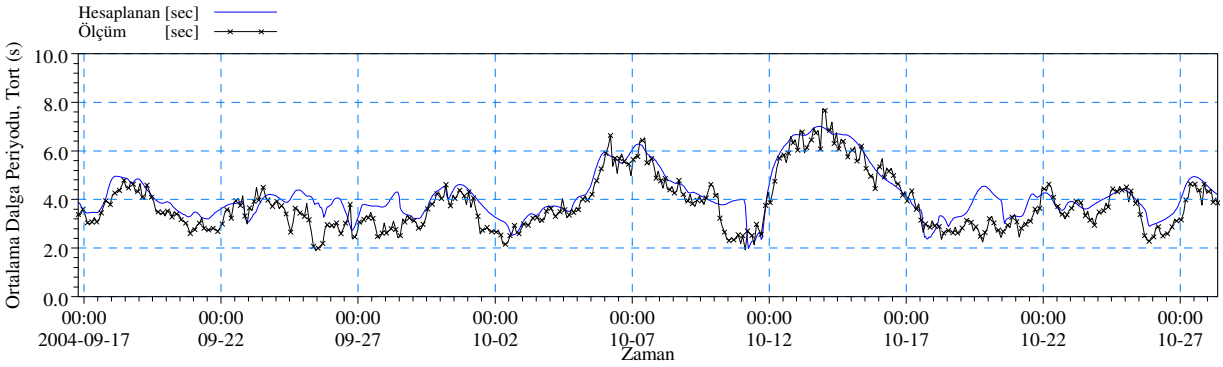


b) Veri seti 2 (29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arası)

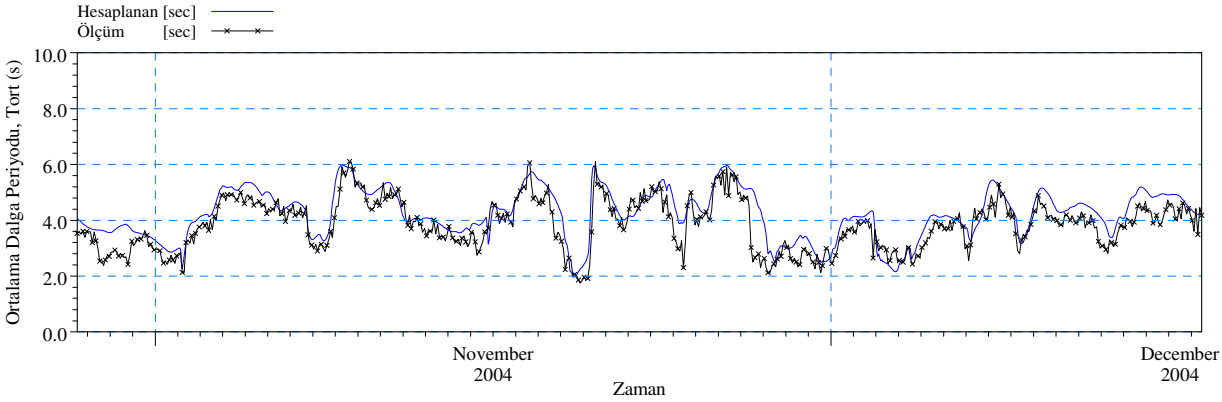
Şekil 5.62 Sayısal modelden elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması



c) Veri seti 3 (27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arası)

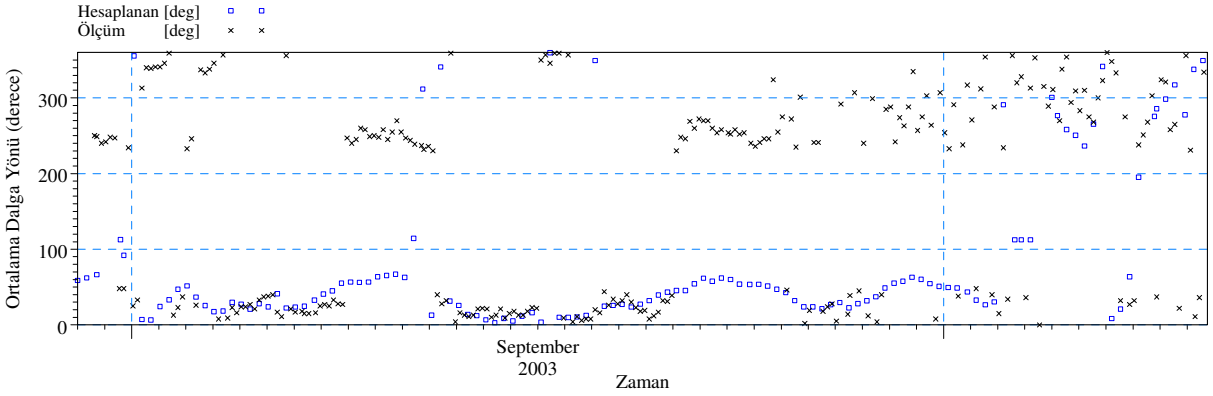


d) Veri seti 4 (16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arası)

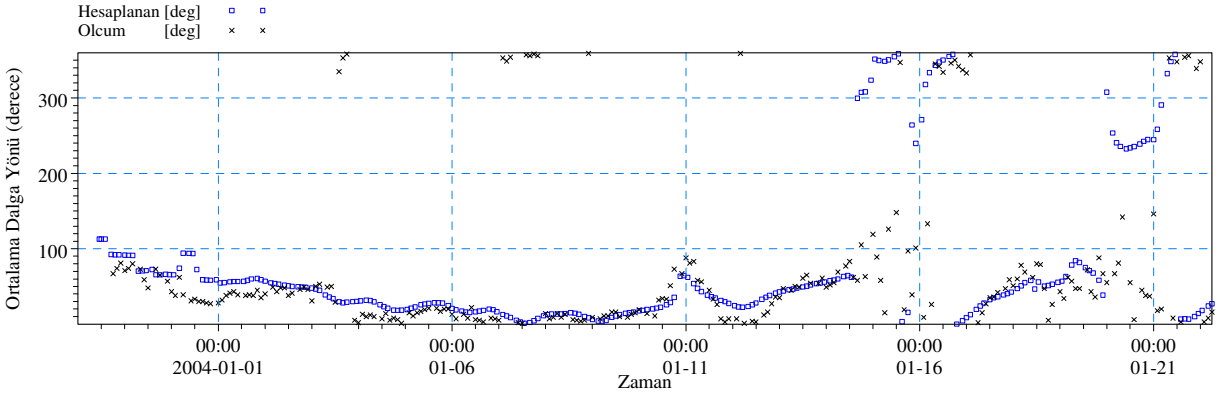


e) Veri seti 5 (28 Ekim 2004-17 Aralık 2004 tarihleri arası)

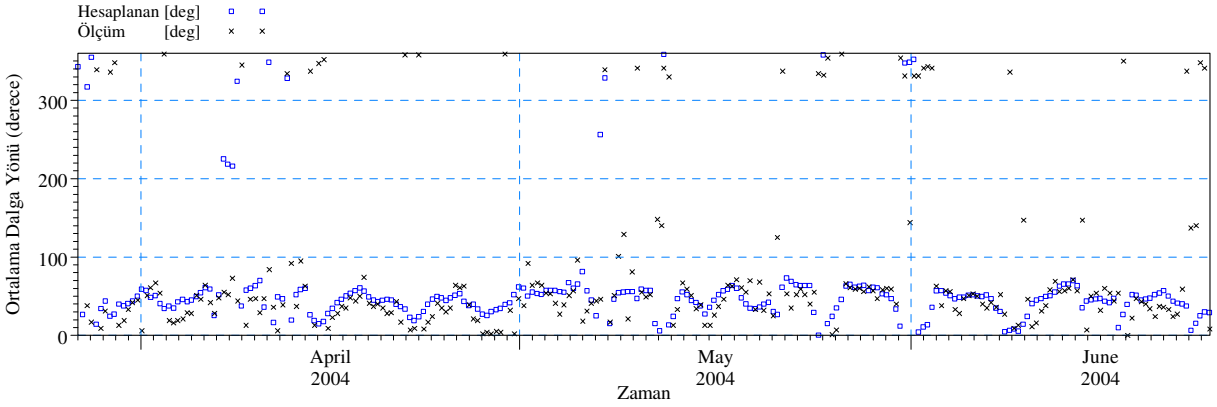
Şekil 5.62 Devam



a) Veri seti 1 (30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arası)

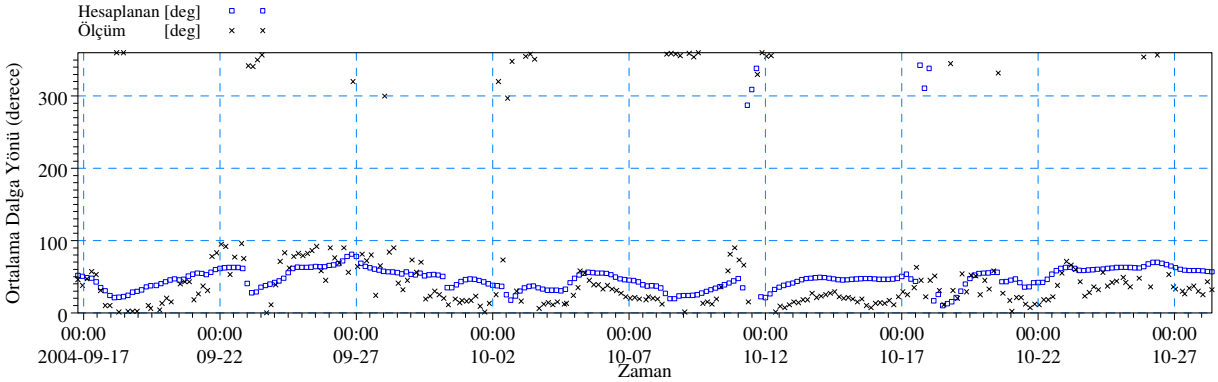


b) Veri seti 2 (29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arası)

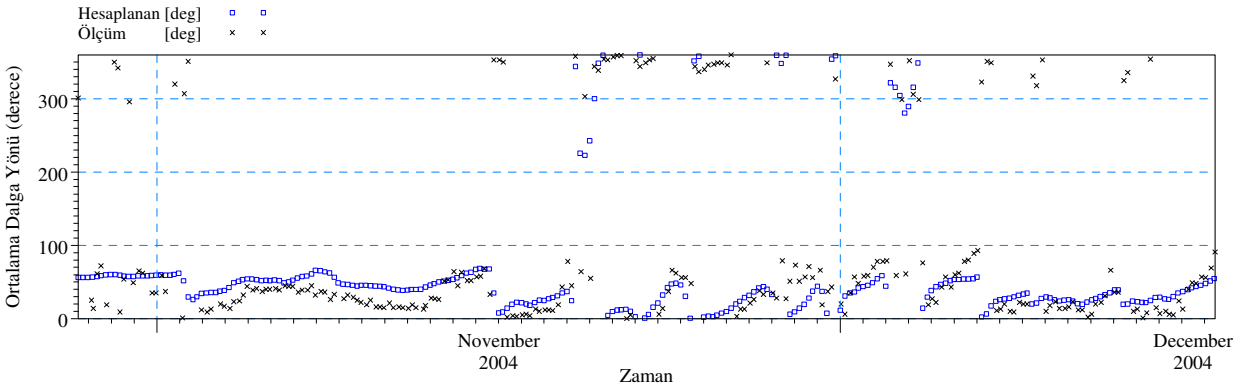


c) Veri seti 3 (27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arası)

Şekil 5.63 Sayısal modelden elde edilen ortalama dalga yönü değerlerinin ölçüm değerleriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması



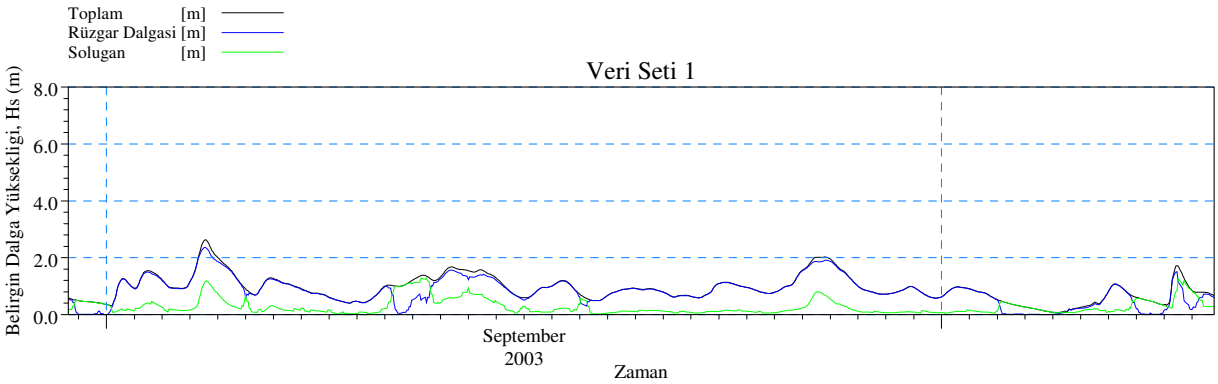
d) Veri seti 4 (16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arası)



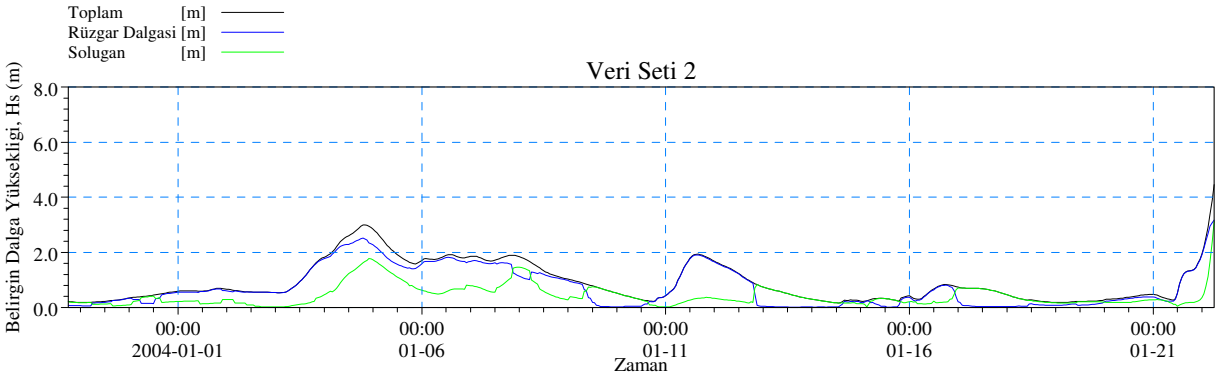
e) Veri seti 5 (28 Ekim 2004-17 Aralık 2004 tarihleri arası)

Şekil 5.63 Devam

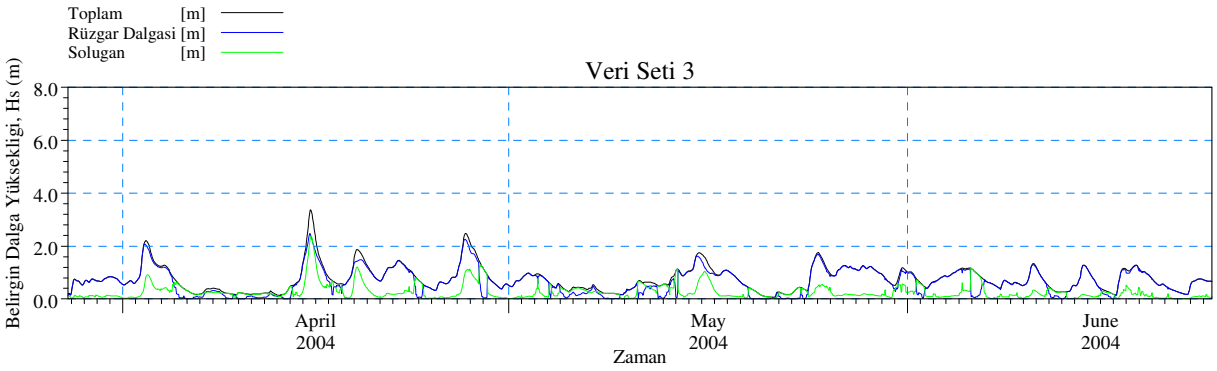
Karadeniz kapalı alanı soluğan dalgalarının oluşması açısından oldukça elverişli bir bölgedir. Gerek feç mesafelerinin fazla olması gerekse bu bölgede şiddetli fırtınaların oluşması sebebiyle rüzgar dalgalarının yanında soluğan etkisine de sıkça rastlanmaktadır. Karaburun bölgesinde yapılan ölçüm sonuçlarından soluğan etkisi (yani soluğan dalgalarının yüksekliği, periyodu ve yönü) doğrudan tespit edilememiştir fakat sayısal modelleme ile soluğan ve rüzgar dalgaları ayrılabilmektedir. Ayrıca soluğan dalgalarının yüksekliği, periyodu ve yönü sayısal modelden elde edilebilmektedir. Şekil 5.64'te ölçüm yapılan tarihlerde belirgin dalga yüksekliği için toplam, rüzgar dalgası ve soluğan değerleri zaman serisi olarak verilmiştir.



a) Veri seti 1 (30 Ağustos 2003-10 Ekim 2003 tarihleri arası)

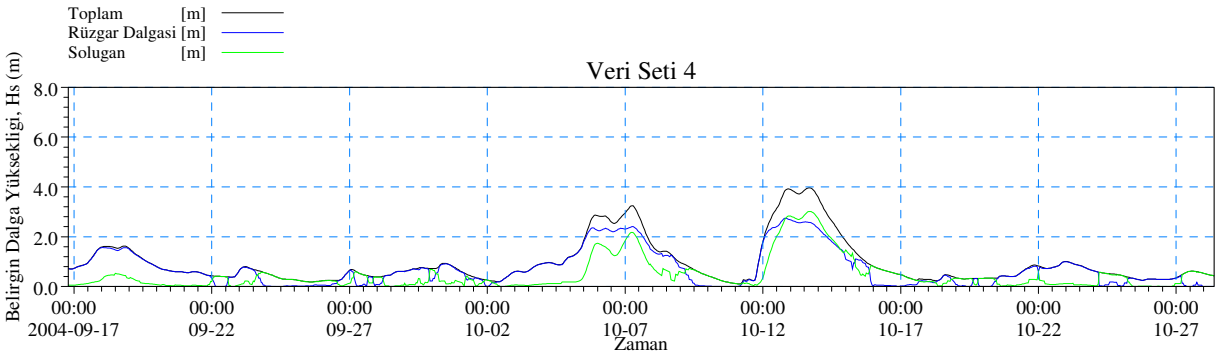


b) Veri seti 2 (29 Aralık 2003-22 Ocak 2004 tarihleri arası)

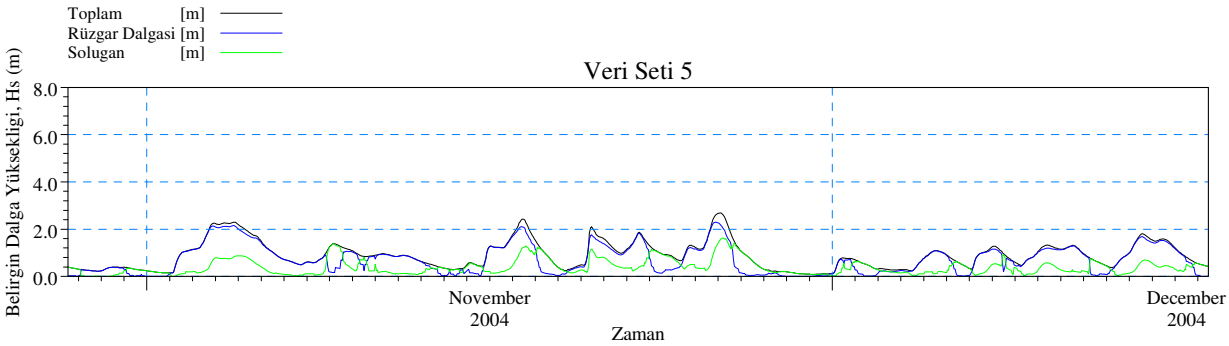


d) Veri seti 3 (27 Mart 2004-25 Haziran 2004 tarihleri arası)

Şekil 5.64 Sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin toplam, rüzgar dalgası ve soluğan değerlerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılması



d) Veri seti 4 (16 Eylül 2004-28 Ekim 2004 tarihleri arası)

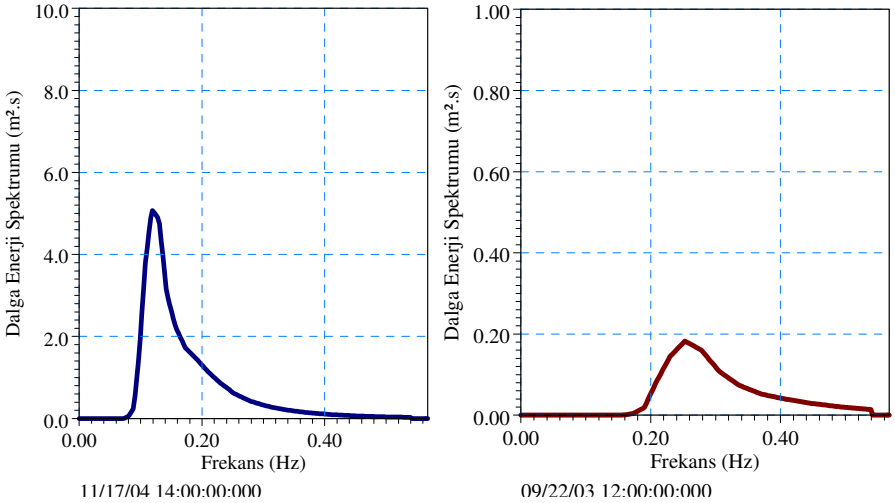


Şekil 5.64 Devam

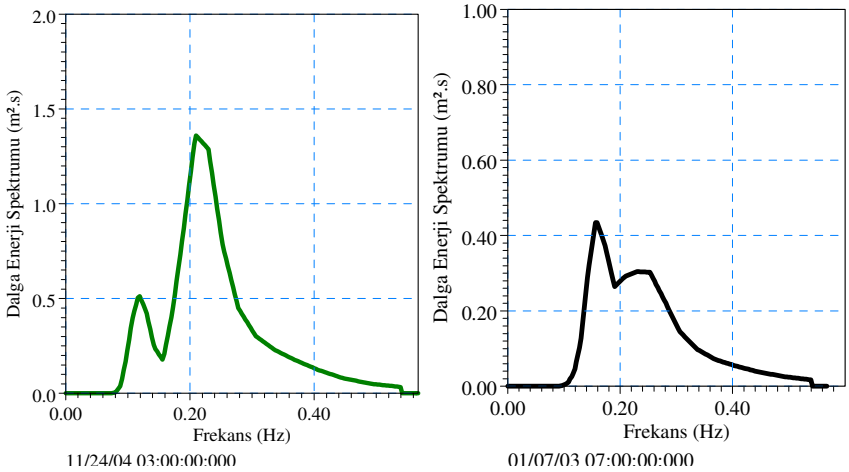
Deniz yüzeyinin rastgele salınımı genellikle rüzgardan deniz yüzeyine enerji transferi olmasına bağlanmaktadır. Dalga formasyonunu oluşturan hava ve deniz arasındaki bu etkileşim oldukça ilginç bir olgudur. Fakat dalgaların gelişim ve büyüme mekanizması veya rasgele dalgaların potansiyel ve kinetik enerjileri dalga spektral yoğunluk foksiyonu veya daha basit tanımıyla dalga enerji spektrumu ile temsil edilebilmektedir. Dalga enerji spektrumu rasgele dalgaların istatistiksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Denizde gözlenen dalgaların düzensizliğinde genellikle yerel rüzgar rol almaktadır fakat bazen soluğan dalgaları da bu düzensizliğe eşlik etmektedir. Yani rüzgar tarafından üretilen dalgaların üretim alanının dışında yayılmasıyla soluğan dalgaları meydana gelmektedir. Soluğan dalgaları rüzgar dalgalarına katıldığı zaman genellikle bu olay dalga kayıtları tarafından kolayca ayırt edilememektedir. Karaburun bölgesinde yapılan dalga ölçümlerinde de yukarıda bahsedildiği gibi soluğan etkisi kayıtlarda ayırt edilememiştir. Fakat bu etki dalga spektrumu ile belirlenebilmektedir. Sayısal modelleme yardımıyla soluğan ve rüzgar dalgalarını ayırabilmesinin yanında hesapladığı dalga enerji spektrumlarıyla da bu etki kolayca belirlenebilmektedir.

Sayısal model saatlik olarak hesaplanan her zaman adımında derin deniz ve ölçümün yapıldığı koordinatlarda olmak üzere dalga enerji ve hareket spektrumunu belirlemiştir. Saatlik olarak verilen bu spektrumlarla yine bu yöreye ait dalga karakteristikleri belirlenebilmektedir. Dalga spektrumları yönsel spektrum ve yönsel olarak integre edilmiş frekans spektrumları şeklinde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 5.65'te farklı zaman adımlarında elde edilen derin deniz frekans spektrumları verilmiştir.



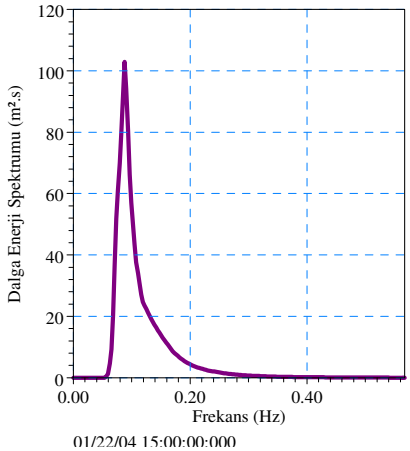
a) Sadece soluğan b) Sadece rüzgar dalgası



c) Soluğan ve rüzgar dalgası (Rüzgar dalgası etkin)

d) Soluğan ve rüzgar dalgası (Soluğan dalgası etkin)

Şekil 5.65 Farklı zamanlarda elde edilmiş derin deniz dalga enerji spektrumları

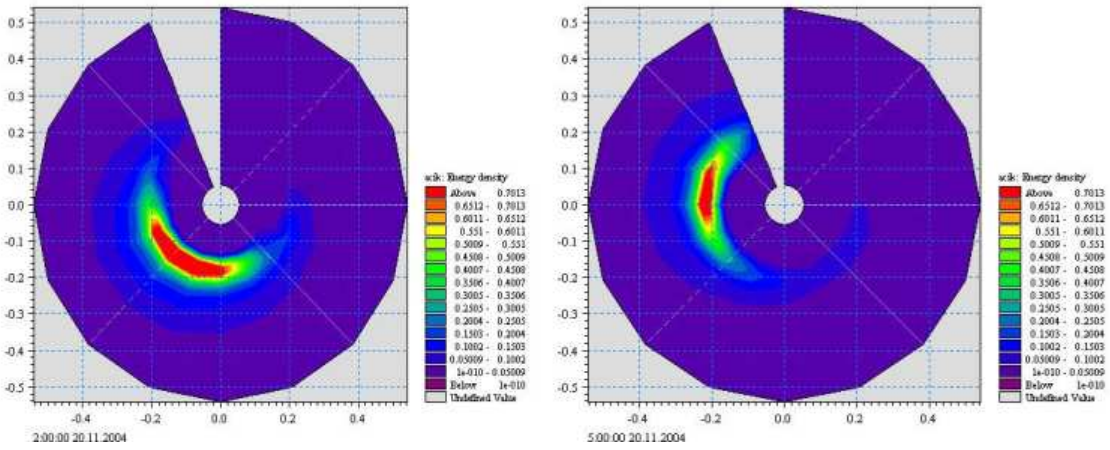


e) Fırtına durumu

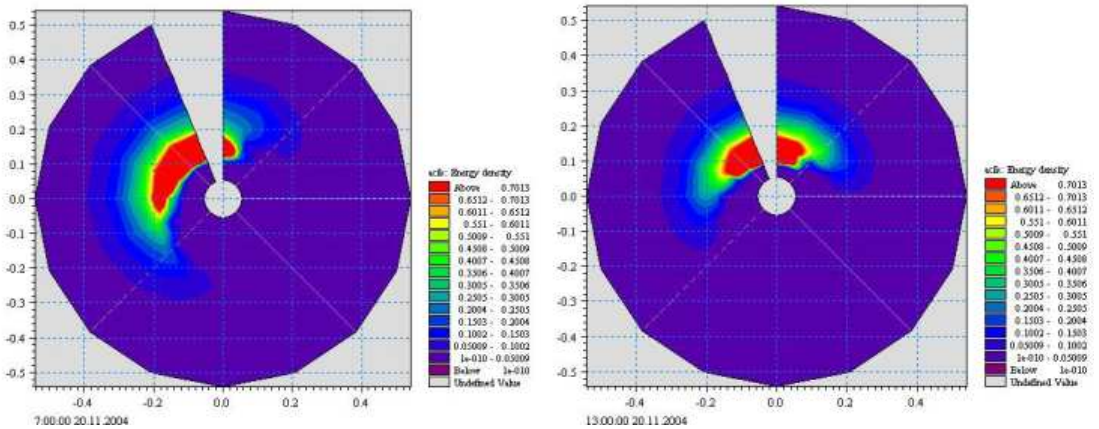
Şekil 5.65 Devam

Şekil 5.65(a)'da 5.1 m².s pik spektrum yoğunluğuna sahip sadece soluğan dalgasının etkin olduğu enerji spektrumu görülmektedir. Spektrum pikine dikkat edildiği zaman dalga periyodunun 7.7 s mertebelerinde olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.65(b)'de rölatif olarak daha düşük enerji seviyesine sahip (pik 0.18 m².s) sadece rüzgar dalgasının etkin olduğu enerji spektrumu verilmiştir. Spektrumun pik noktası 4 s mertebelerinde dalga periyodunu göstermektedir. Şekil 5.65(c) ve 5.65(d)'de ise rüzgar ve soluğan dalgasının her ikisinin birden etkin olduğu enerji spektrumları görülmektedir. Fakat iki spektrum arasındaki fark hangi dalganın (soluğan veya rüzgar dalgası) daha etkin olduğu konusundan kaynaklanmaktadır. Şekil 5.65(c)'de rüzgar dalgası daha büyük etkiye sahipken Şekil 5.65(d)'de soluğan dalgasının daha büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Son olarak Şekil 5.65(e)'de ise fırtına durumunu gösteren bir enerji spektrumu verilmiştir. Enerji yoğunluğuna bakıldığı zaman pik değerin 104 m².s olduğu belirlenmiştir. Bu zaman adımı 22 Ocak 2004 tarihine karşılık gelmektedir ve sayısal model sonuçlarından elde edilen zaman serisi incelendiğinde bu tarihlerde belirgin dalga yüksekliğinin maksimum değerlere ulaşmış olduğu görülmektedir.

Sayısal modellemeden yönsel olarak integre edilmiş frekans spektrumlarının yanında yönsel enerji spektrumları da elde edilebilmektedir. Şekil 5.66'da 135°'lik rüzgar yönü değişimi sırasında elde edilen derin deniz yönsel dalga enerji spektrumlarına örnek görülmektedir.



a) Saat 02:00 b) Saat 05:00

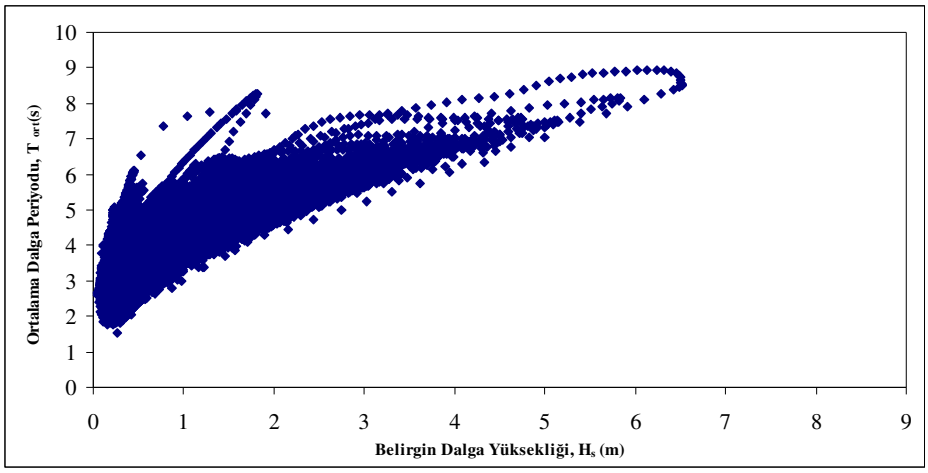


c) Saat 07:00 d) Saat 13:00

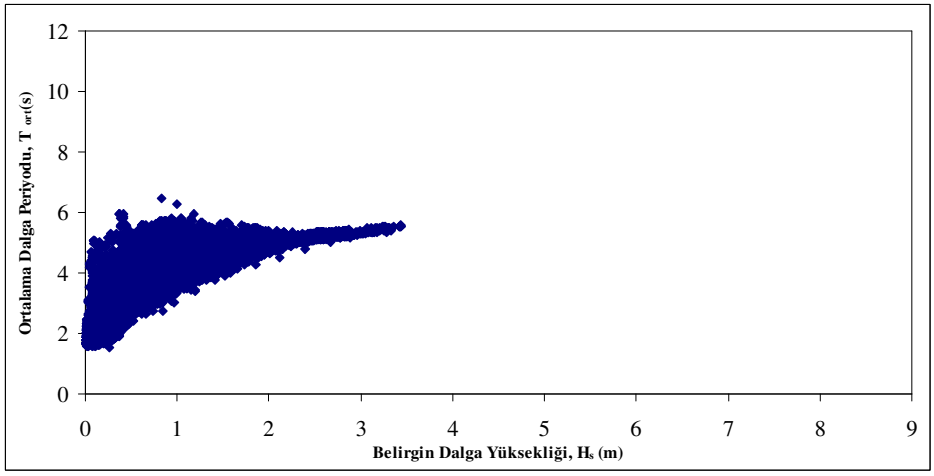
Şekil 5.66 Sayısal modelden 20.11.2004 tarihinde 135°'lik rüzgar yönü değişimi sırasında elde edilen yönsel spektrum gelişimi

Belirgin dalga yüksekliği (H_s) ile ortalama dalga periyodu arasında ilişkilendirme herhangi bir dalga yüksekliğiyle eşleşebilir dalga periyotlarının tahmin edilmesi için kullanılabilmektedir. Bu nedenle belirgin dalga yüksekliği ile ortalama dalga periyodu arasındaki ilişki serpilme diyagramlarıyla belirlenebilmektedir. Karaburun bölgesi için de böyle bir ilişkilendirme belirleyebilmek için sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yükseklikleri değerlerine karşılık ortalama dalga periyodu değerleri serpilme diyagramı şeklinde çizdirilmiştir. Bu değerler her iki koordinat (derin deniz ve ölçümün yapıldığı koordinat) için de mevcuttur. Bu sebeple bu grafikler her iki koordinatta elde edilen değerler için çizdirilmiştir. Şekil 5.67'de dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlardaki dalga yüksekliğine karşı dalga periyodu değerleri görülürken Şekil 5.68'de derin deniz koordinatlarındaki değerler serpilme diyagramı haline getirilmiştir. Her iki şekilde de dalga parametreleri toplam, rüzgar dalgası ve soluğan dalgası olmak üzere ayrı ayrı çizdirilmiştir. Belirgin dalga yüksekliğine karşılık ortalama dalga periyodunu gösteren bu şekiller incelendiğinde her iki koordinatta da (derin deniz ve ölçüm

derinliği) soluğan değerlerinin fazla olduğu görülmektedir. Yani dalga yüksekliği ve periyodu rüzgar dalgasına göre soluğan dalgasında daha fazla bulunmuştur. Serpilme diyagramlarında gözlenen bu fark bölgenin karakterini de ortaya çıkarmaktadır. Çalışma bölgesi genelde soluğan dalgasının hakim olduğu bir kıyı alanıdır. Bu sonuçları yine sayısal modelden elde edilen yönsel integre edilmiş frekans spektrumları da desteklemektedir (Şekil 5.65).

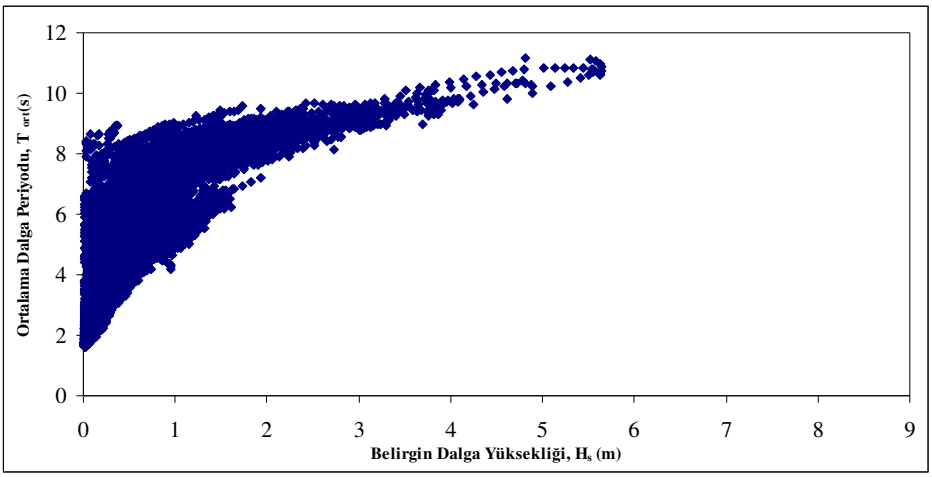


a) Toplam dalga



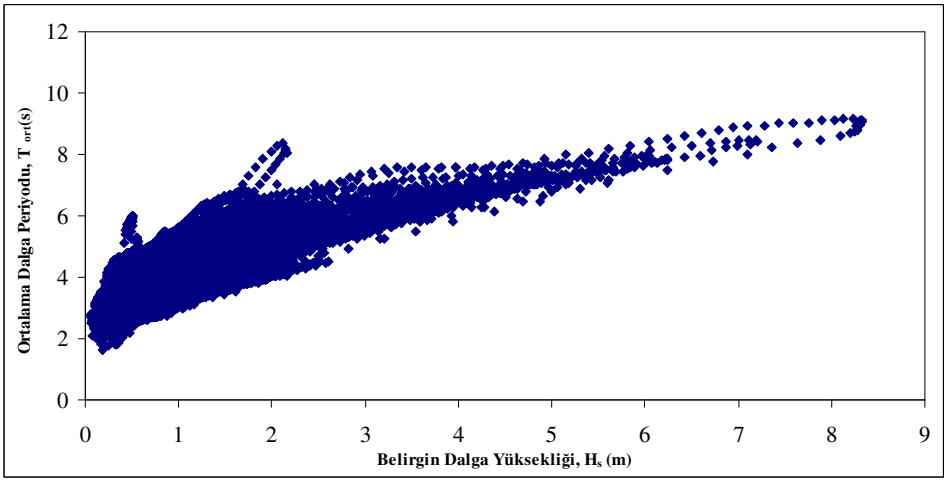
b) Rüzgar dalgası

Şekil 5.67 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) karşılık ortalama dalga periyodu (T_{ort}) değerleri (Dalga ölçümünün yapıldığı koordinatlar (N 41.35° E 28.68°) için)

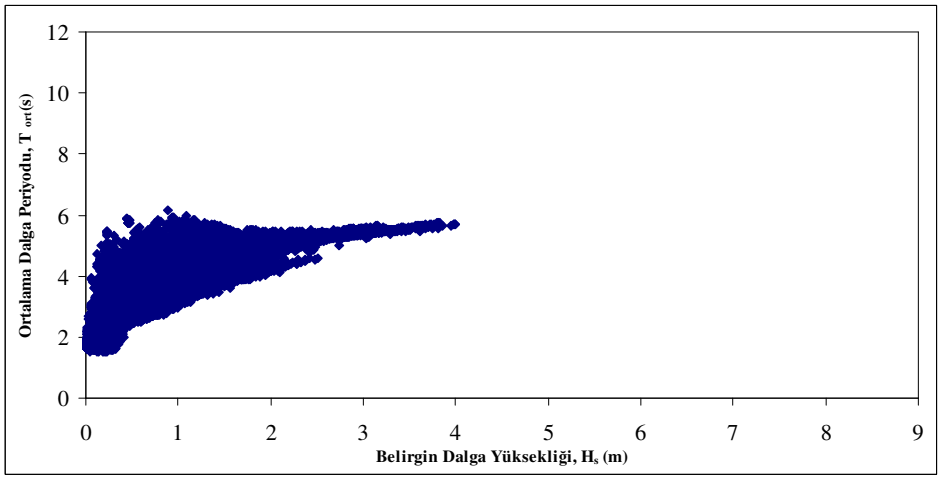


c) Soluğan dalgası

Şekil 5.67 Devam

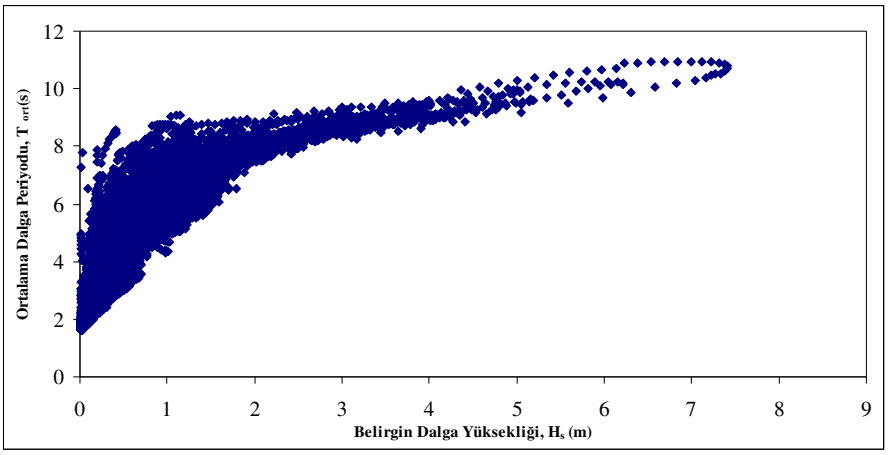


a) Toplam dalga



b) Rüzgar dalgası

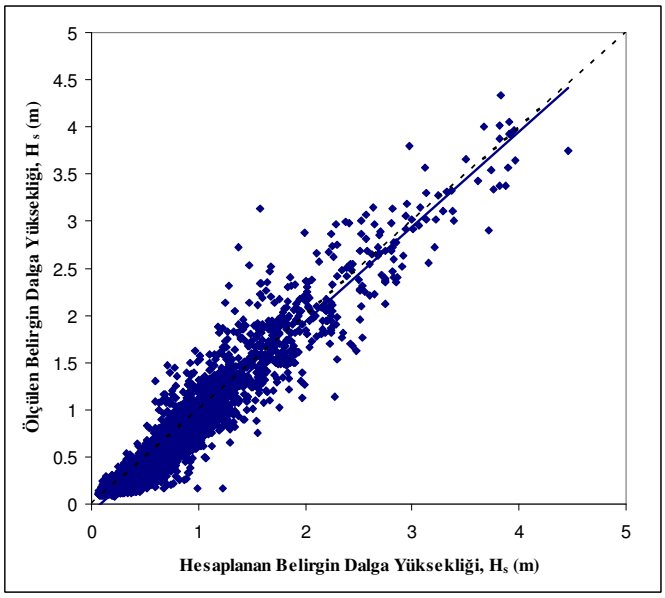
Şekil 5.68 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) karşılık ortalama dalga periyodu (T_{ort}) değerleri (Derin deniz koordinatları (N 41.7° E 28.7°) için)



c) Soluğan dalgası

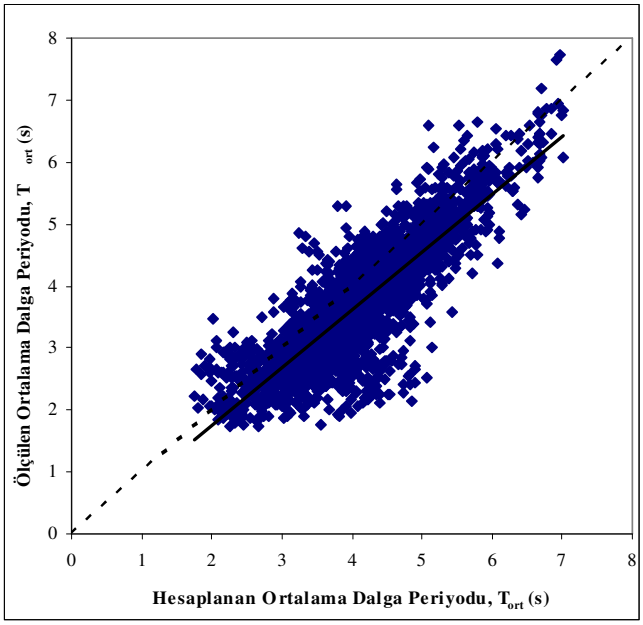
Şekil 5.68 Devam

Sayısal modelden elde edilen dalga parametreleri zaman serisi şeklinde incelendiğinde ölçümlerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Zaman serisi şeklinde incelemenin dışında ölçüm yapılan zamanlardaki değerler ve hesaplanan dalga parametreleri arasında yapılan regresyon analizinde de oldukça yüksek korelasyon katsayısına sahip bir ilişki belirlenmiştir. Şekil 5.69 ölçülen ve sayısal model ile hesaplanan belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü arasındaki ilişkileri göstermektedir. Zaman serilerinde de (Şekil 5.61, 5.62 ve 5.63) görülebileceği üzere en iyi uyum belirgin dalga yüksekliğinde yakalanmıştır. Ortalama dalga periyotlarında da yüksek korelasyon katsayısı elde edilmesine rağmen, ortalama dalga yönlerinde aynı sonuca ulaşılamamıştır.

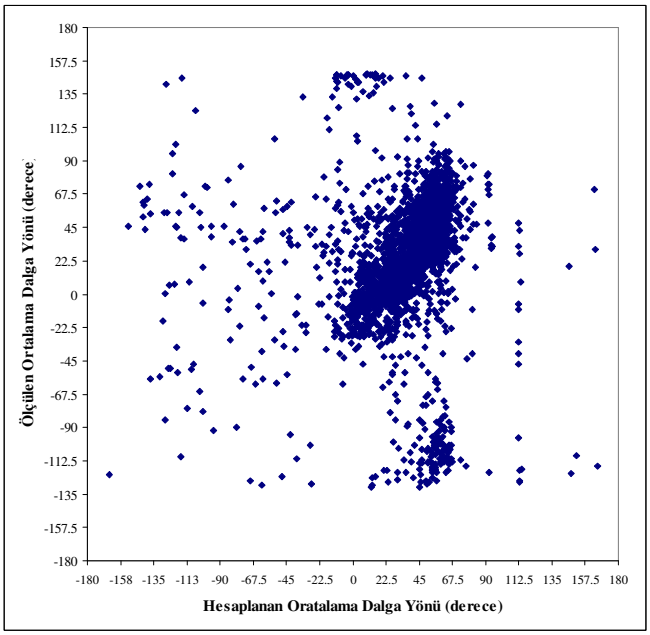


a) Belirgin dalga yükseklikleri

Şekil 5.69 Sayısal model ile hesaplanan dalga parametrelerine karşı ölçülen dalga parametreleri



b) Ortalama dalga periyotları



c) Ortalama dalga yönleri

Şekil 5.69 Devam

5.5 İstatistiksel Dalga Modeli Kurulumu

Kısa dönemli dalga verilerinin kıyı morfolojisi gelişimini izlemek açısından yeterli olmadığı bilinen bir gerçektir. Bu sebeple farklı yöntemlerle elde edilmiş mevcut rüzgar ölçümlerinden (daha uzun ölçümlerin bulunması nedeniyle) faydalanarak uzun dönem dalga iklimi tahmin edilebilmektedir. Bu yöntemlerden biri de çalışma bölgesine ait rüzgar-dalga korelasyon modellerinin kurulmasıdır. Bu korelasyonla bilinen rüzgar hızı, rüzgar yönü ve su derinlikleriyle dalga iklimi (dalga yüksekliği, dalga periyodu ile dalga yönü) belirlenebilmektedir (Witte vd., 1999).

Bu çalışma kapsamında Güneybatı Karadeniz'de bulunan Karaburun kıyısında dalga ölçümleri yapılmıştır. Ancak ölçüm zorluklarından dolayı ölçümlerde süreksizlik mevcuttur ve yeteri uzunluğa sahip değildir (8.5 ay). Bu sebeple mevcut veri boşluklarının giderilmesi ve verilerin daha uzun döneme genişletilebilmesi amacıyla çalışma bölgesi için istatistiksel dalga modeli geliştirilmiştir.

Rüzgar-dalga korelasyonu için Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar verileri ile Bölüm 5.2'de kalibre edilerek düzeltilmiş rüzgar verilerinden faydalanılmıştır. Bu veriler Ocak 1990-Ağustos 2005 tarihleri arasında 15 yıl 8 aylık bir dönemi kapsamaktadır. Buna karşın dalga ölçüm verileri ise toplam 8.5 aylık dönemi kapsamaktadır. Kurulacak korelasyon modelinde bu 8.5 aylık döneme karşılık gelen rüzgar verileri kullanılacaktır. Ayrıca sayısal modellemeden elde edilen dalga verilerinden de bu model çalışmasında faydalanılacaktır. Çünkü sayısal modelden daha uzun süreli dalga verisi elde etmek mümkün olmaktadır.

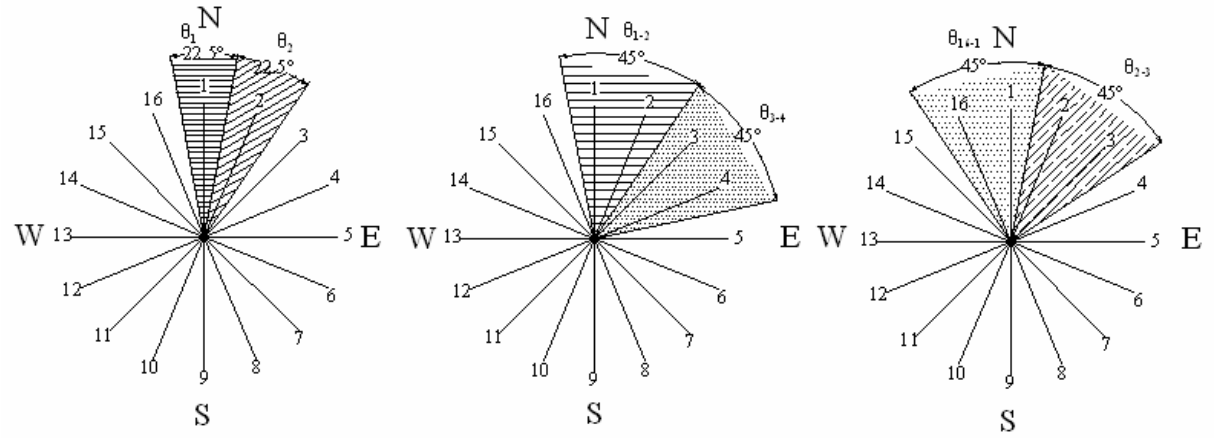
5.5.1 Dalga Yüksekliğinin Modellenmesi

Dalga yükseklikliklerinin korelasyonunda rüzgar esme yön ve süreleri ayrı ayrı analiz edilmiştir.

i) Rüzgar Esme Yönlerinin Değerlendirilmesi

Rüzgar hızı ve dalga yüksekliği arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan hesaplamalarda rüzgar yönleri belirli aralıklara ayrılmıştır. Bunun için iki rüzgar yönü aralığı ile üç alternatif seçilmiştir. Rüzgar verileri 22.5° ve 45° aralıklarda sınıflandırılmıştır. 45°'lik sınıflandırma için iki farklı aralık belirlenmiştir (Şekil 5.70). Burada 45°'lik sınıflandırmada iki farklı alternatifin denenmesi, ardışık her yön için 45°'lik bant içinde kalabilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır.

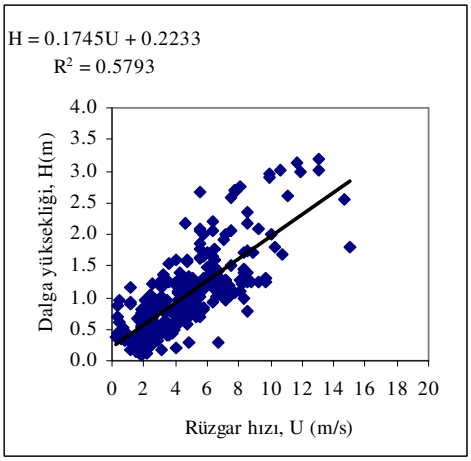
Rüzgar hızlarına karşılık çizdirilen dalga yüksekliği grafiklerinde rüzgar hızı olarak Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri, dalga yüksekliği olarak Karaburun ölçüm verileri kullanılmıştır. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri deniz seviyesinden 40 m yüksekte ölçülen rüzgar hızlarıdır ve herhangi bir düzeltme fonksiyonu ile kalibre edilmemiştir.



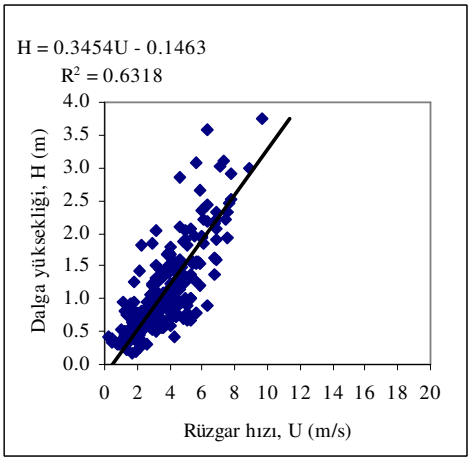
a)1. Alternatif (22.5°'lik rüzgar yönü aralığı) b) 2. Alternatif (45°'lik rüzgar yönü aralığı) c) 3. Alternatif (45°'lik rüzgar yönü aralığı)

Şekil 5.70 Korelasyonda rüzgar yönlerinin sınıflandırılmasının şematik gösterimi

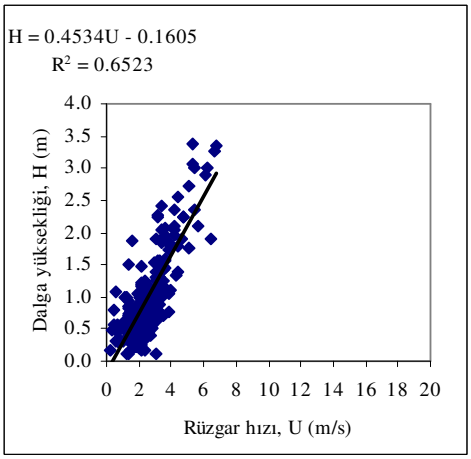
Rüzgar ölçümlerinden dalga parametrelerinin elde edilebilmesi için farklı istatistiksel yaklaşımlar denenmiştir. Ölçülmüş ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasında en iyi uygunluğun elde edilmesi için güvenilir ölçüt olarak ortalama mutlak sapma öngörülmüştür. Ortalama mutlak sapma, verilerin ortalama değerlerinden sapma miktarlarının ortalaması olarak belirtilmektedir yani bir veri setinde değişkenliğin ölçütüdür. Ortalama mutlak sapma ne kadar küçük olursa verilerin birbirine o kadar uyumlu olduğu veya veri seti içinde değişkenliğin o kadar az olduğu görülmektedir. İlk olarak eş zamanlı ölçümlerde (dalga ölçümleriyle aynı zamandaki rüzgar ölçüm saatlerinde) 22.5° aralıklardaki (1. alternatif) rüzgar yönleri için farklı fonksiyonlar denenmiştir. Lineer, üstel, logaritmik ve farklı derecelerdeki polinom serileri arasında 22.5° için en uygun yaklaşım lineer fonksiyon olarak elde edilmiştir. Şekil 5.71'den Şekil 5.78'e kadar 22.5°'lik rüzgar aralıkları için elde edilen en uygun korelasyon fonksiyonları ve rüzgar hızlarına karşı ölçülen dalga yükseklikleri görülmektedir.



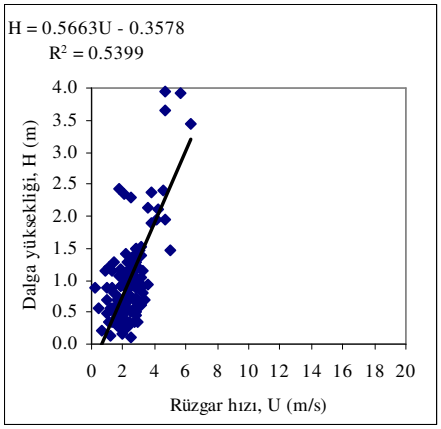
Şekil 5.71 Rüzgar yönü $348.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 11.25^{\circ}$ (N) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



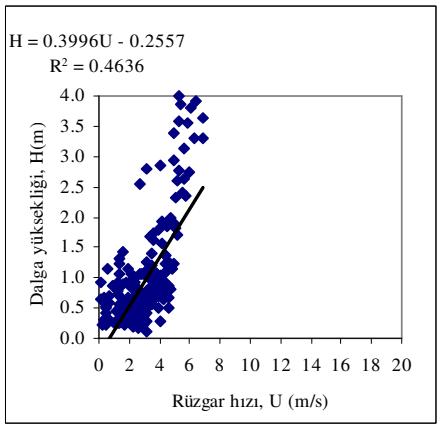
Şekil 5.72 Rüzgar yönü $11.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 33.75^{\circ}$ (NNE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



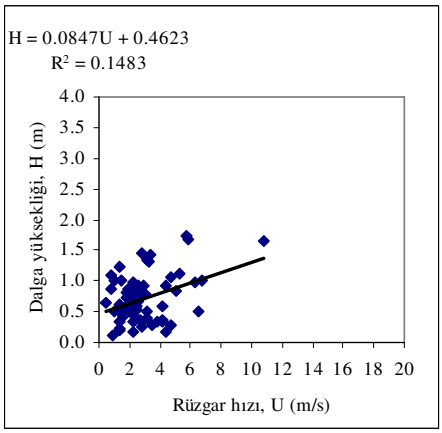
Şekil 5.73 Rüzgar yönü $33.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 56.25^{\circ}$ (NE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



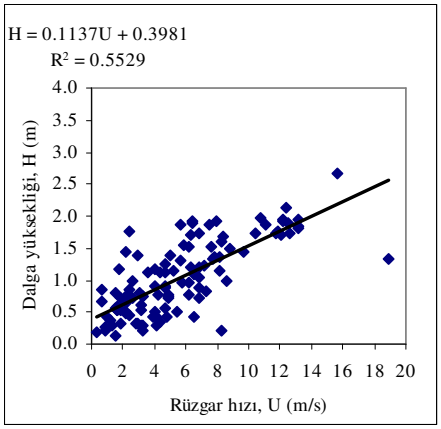
Şekil 5.74 Rüzgar yönü $56.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 78.75^{\circ}$ (ENE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



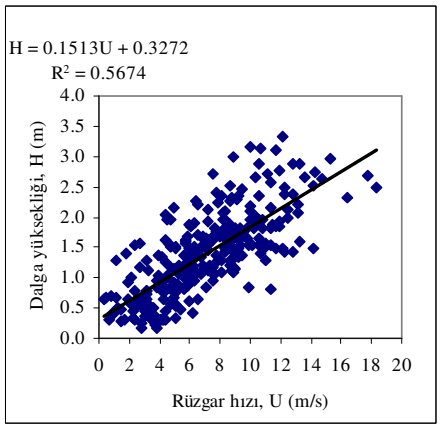
Şekil 5.75 Rüzgar yönü $78.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 101.25^{\circ}$ (E) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



Şekil 5.76 Rüzgar yönü $281.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 303.75^{\circ}$ (WNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



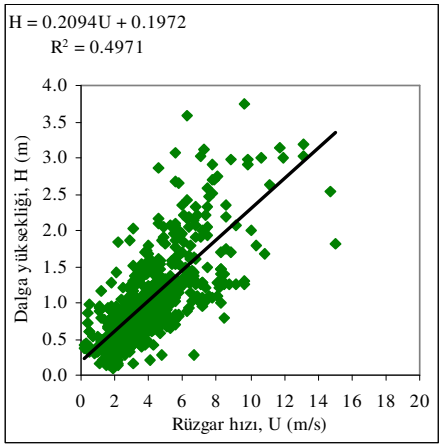
Şekil 5.77 Rüzgar yönü $303.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 326.25^{\circ}$ (NW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)



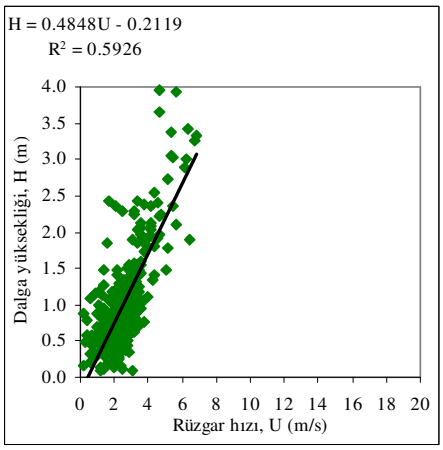
Şekil 5.78 Rüzgar yönü $326.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 348.75^{\circ}$ (NNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (1. alternatif)

Yine 22.5°'de olduğu gibi 45° aralıklardaki rüzgar yönleri (2.alternatif ve 3. alternatif) için de farklı fonksiyonlar uygulanmıştır. Bu fonksiyonlar lineer, üstel, logaritmik ve farklı derecelerdeki polinom serileridir. En uygun yaklaşımın lineer fonksiyon olduğu çizilen grafiklerde belirlenmiştir. Karaburun kıyısını etkileyen karadan esen rüzgar yönleri için herhangi bir korelasyon fonksiyonu kullanılarak ilişkilendirme yapılmamıştır.

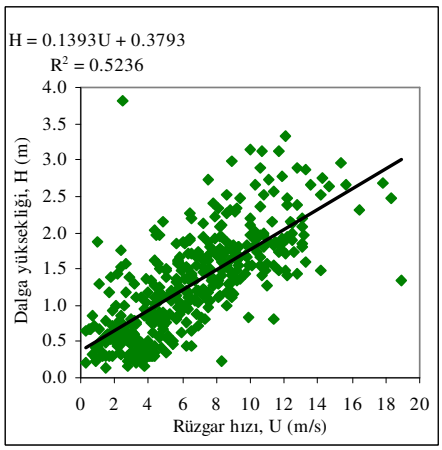
Şekil 5.79'dan Şekil 5.85'e kadar 2. ve 3. alternatifler (45°'lik rüzgar aralıkları) için elde edilen en uygun korelasyon fonksiyonları ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızlarına karşı ölçülen dalga yükseklikleri görülmektedir.



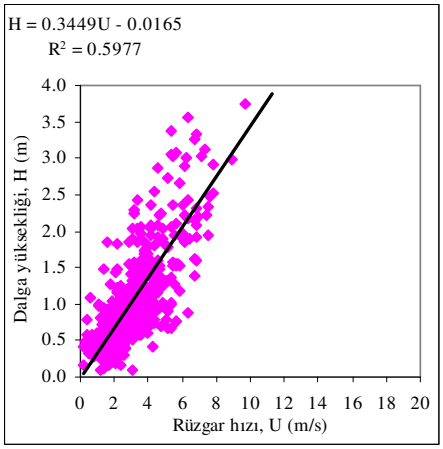
Şekil 5.79 Rüzgar yönü $348.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 33.75^{\circ}$ (N-NNE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif)



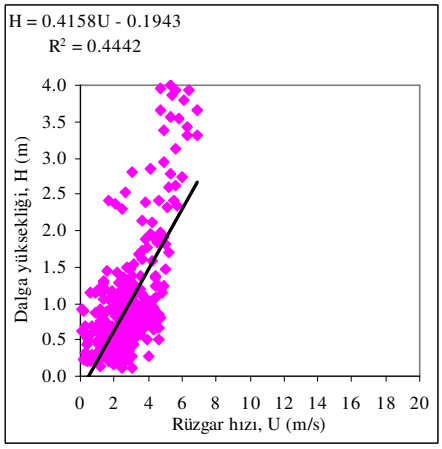
Şekil 5.80 Rüzgar yönü $33.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 78.75^{\circ}$ (NE-ENE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif)



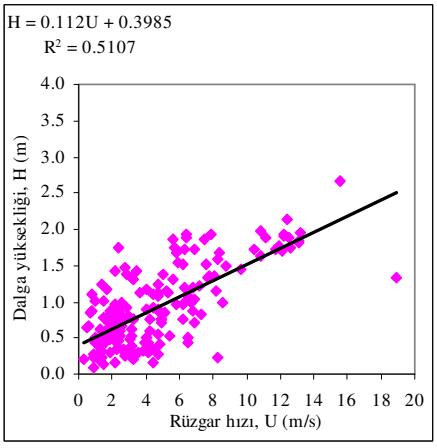
Şekil 5.81 Rüzgar yönü $303.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 348.75^{\circ}$ (NW-NNW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (2. alternatif)



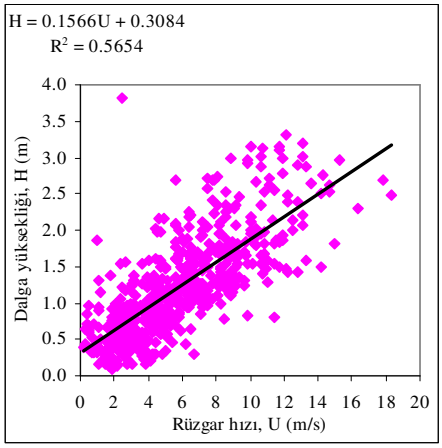
Şekil 5.82 Rüzgar yönü $11.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 56.25^{\circ}$ (NNE-NE) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif)



Şekil 5.83 Rüzgar yönü $56.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 101.25^{\circ}$ (ENE-E) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif)

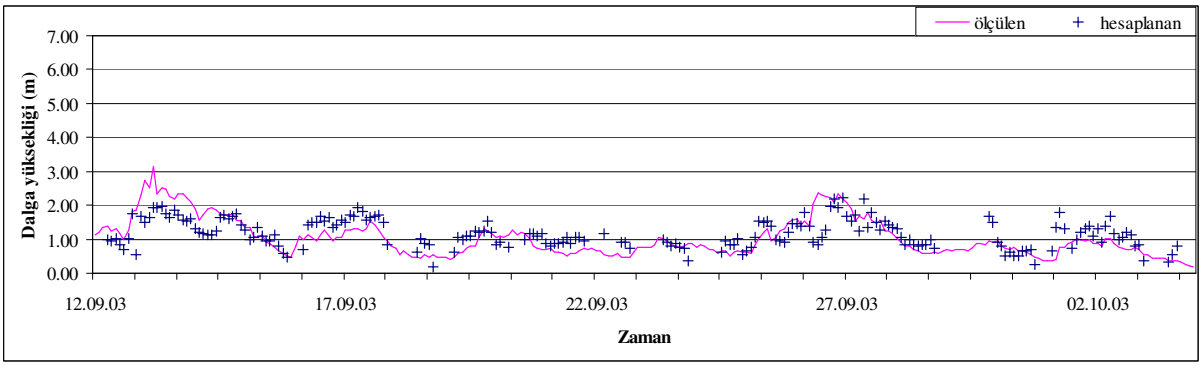


Şekil 5.84 Rüzgar yönü $281.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 326.25^{\circ}$ (WNW-NW) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif)

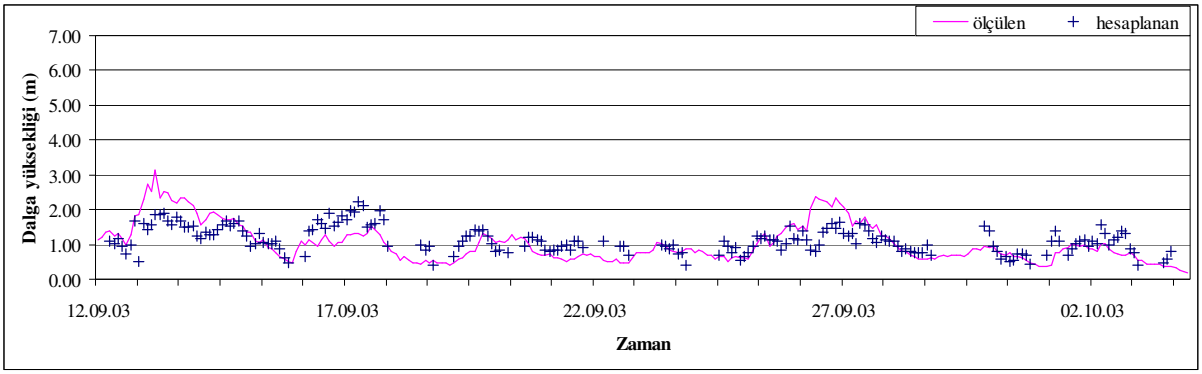


Şekil 5.85 Rüzgar yönü $326.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 11.25^{\circ}$ (NNW-N) için korelasyon fonksiyonu ve ölçülen dalga yüksekliğine karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar hızları (3. alternatif)

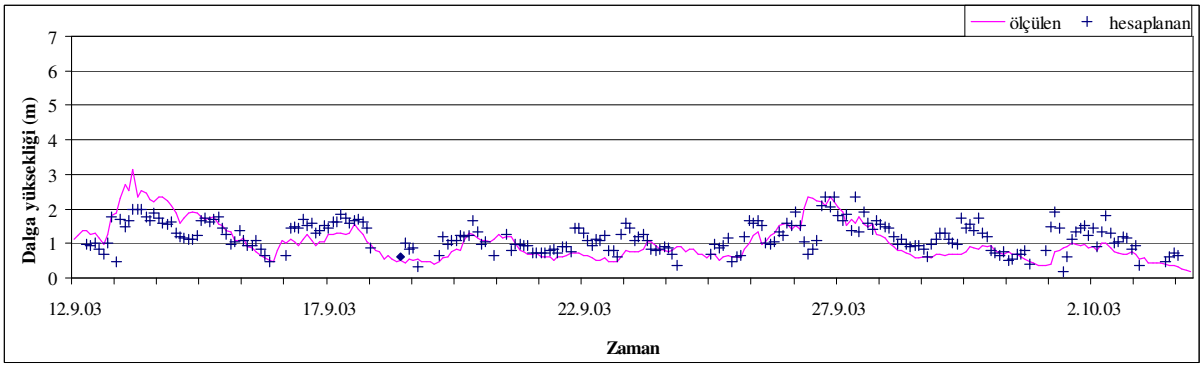
Elde edilen bu fonksiyonlarla dalga yükseklikleri hesaplanmış ve ölçülen dalga yüksekliklerine karşılık zaman serisi şeklinde çizdirilmiştir. Şekil 5.86'da 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırmasına göre (1. alternatif) dalga yüksekliklerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırması, Şekil 5.87'de 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırmasına (2. alternatif) göre, Şekil 5.88'de ise 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırmasına (3. alternatif) göre dalga yüksekliklerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 5.86 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (1. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması

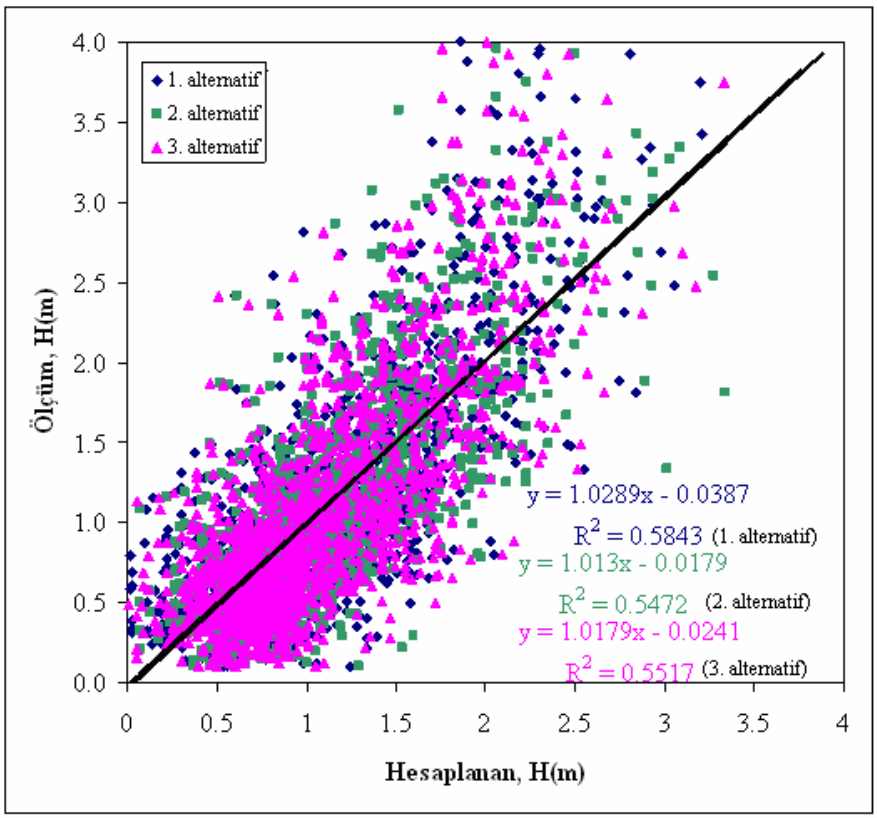


Şekil 5.87 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (2. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.88 45°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına göre (3. alternatif) ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması

Zaman serisi şeklinde çizdirilen bu grafiklerden hangisinin ölçülen dalga yüksekliklerini en iyi şekilde temsil ettiğini anlamak için regresyon analizi yapılmıştır. Ölçülen dalga yüksekliklerine karşılık her alternatif için yeni korelasyon fonksiyonlarıyla hesaplanan dalga yükseklikleri çizdirilmiş ve bunların arasında seçim yapılmıştır.



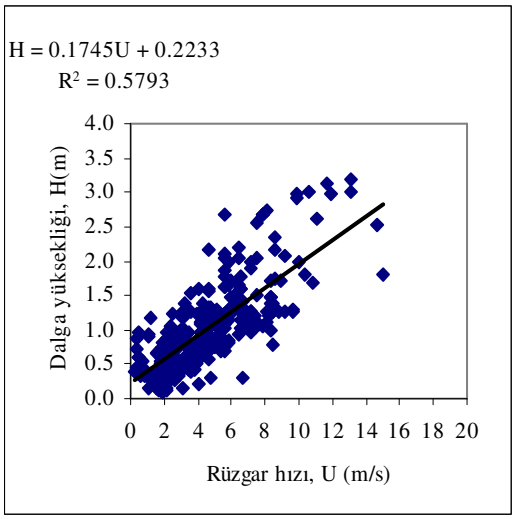
Şekil 5.89 Tüm alternatifler için ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.89'da üç alternatife ait (1. altenatif, 2. alternatif ve 3 alternatif) hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki regresyon doğrularının denklemi ve determinasyon katsayıları görülmektedir. Sadece bu denklemlere ve determinasyon (R^2) katsayılarına bakıldığı zaman en iyi sonucun 1. alternatife (22.5°'lik rüzgar yönü aralığı) ait olduğu görülebilmektedir. Ancak bu yeterli bir karar verme ölçütü olmadığı için tahminin standart hatası değerleri de incelenmiştir. Sırası ile bu değerler 1. alternatif için 0.47, 2. alternatif için 0.48 ve 3. alternatif için 0.49 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırması 45°'lik sınıflandırma aralıklarına göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Bu sebeple rüzgar-dalga korelasyonunda 22.5°'lik rüzgar yönü aralığı kullanılmıştır.

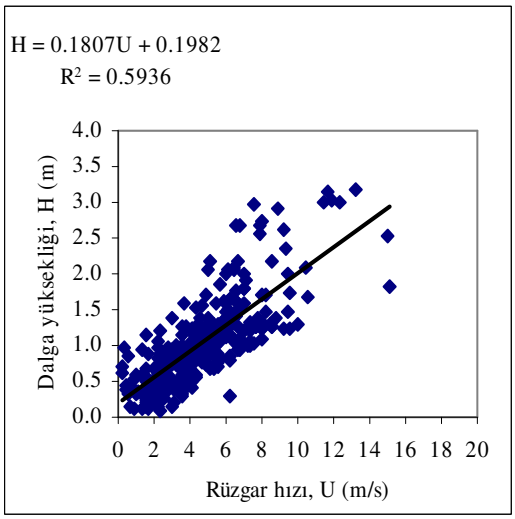
ii) Rüzgar Esme Sürelerinin Değerlendirilmesi

Dalgaların gelişiminde rüzgar hızı ve yönünün yanında esme süresi de oldukça etkilidir. Rüzgar esme sürelerinin etkisini araştırmak amacıyla rüzgar parametreleri 1, 2, 3 ve 4 saatlik ortalamalara göre değerlendirilmiştir. Şekil 5.71'den Şekil 5.85'e kadar olan grafiklerde rüzgar hızları dalga ölçümleriyle aynı zamanda ölçülen rüzgar hızlarıdır yani bir saatlik ortalama rüzgar hızlarıdır. Daha detaylı inceleme için rüzgar hızları iki, üç ve dört saatlik ortalamalara ayrılmıştır. Yani dalga ölçüm saatinden iki, üç ve dört saat önce esen rüzgar

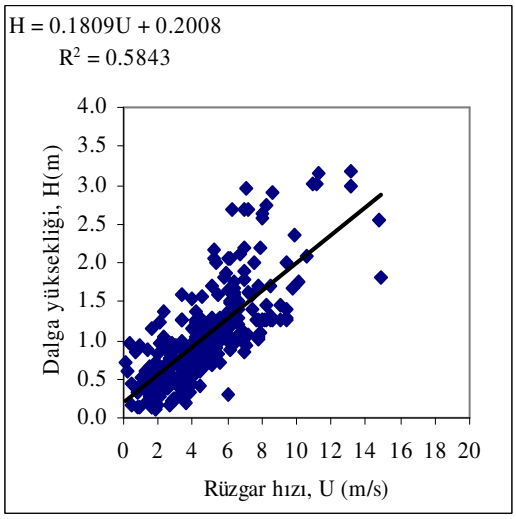
hızlarının ortalamaları alınarak korelasyon kurulmaya çalışılmıştır. Esme süresinin etkisi daha önce belirlenen ve en uygun sonucu veren lineer fonksiyon ile 22.5°'lik rüzgar yönü aralığı kullanılarak N, NNE, NE, ENE, E, WNW, NW ve NNW yönleri için analiz edilmiştir.



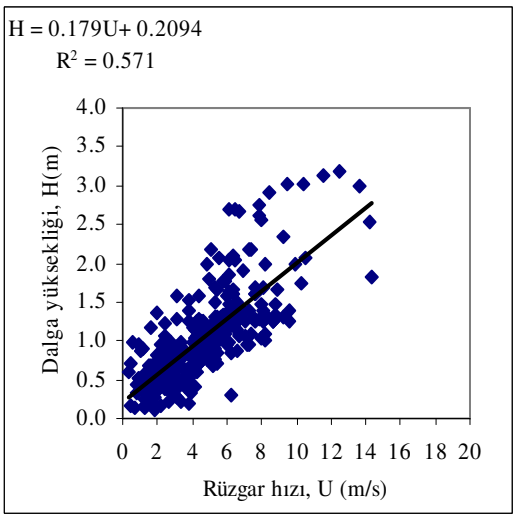
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

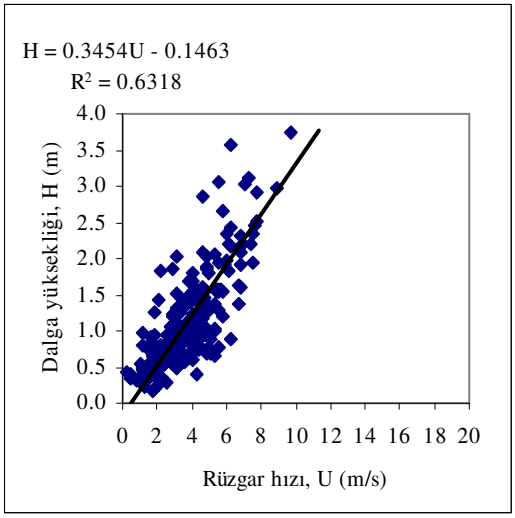


c) Üç saatlik ortalama

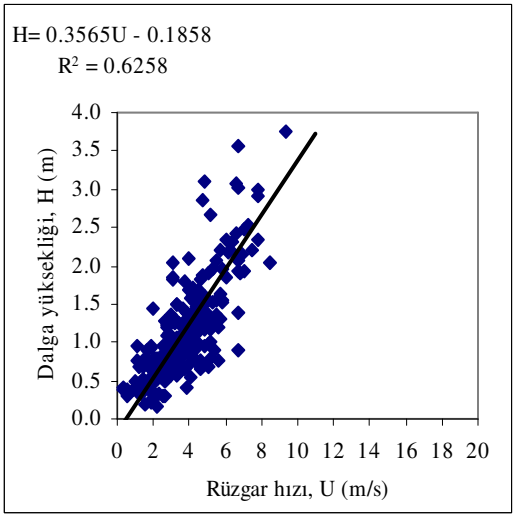


d) Dört saatlik ortalama

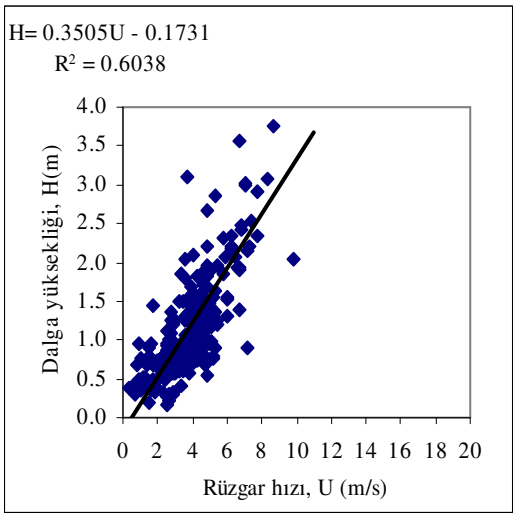
Şekil 5.90 Rüzgar yönü $348.75^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 11.25^\circ$ (N) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



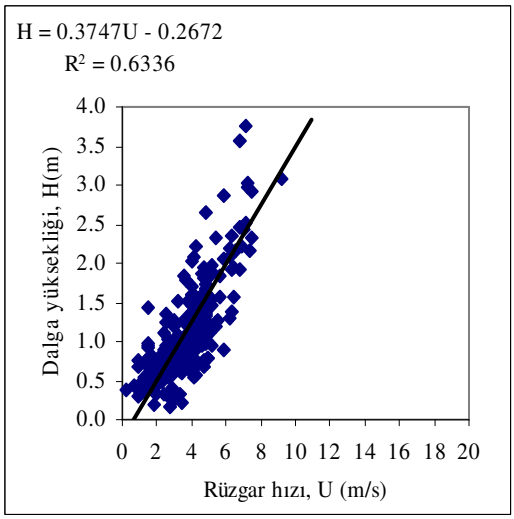
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

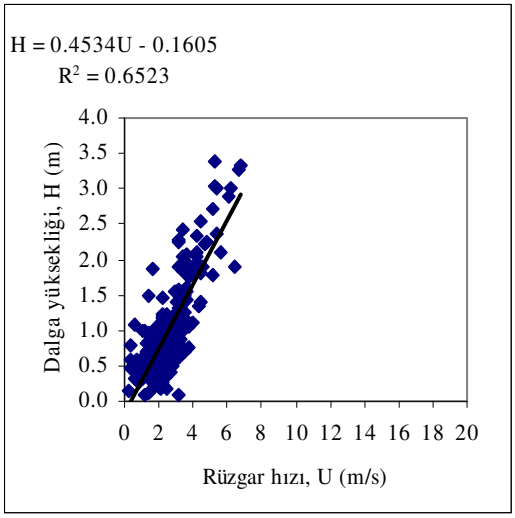


c) Üç saatlik ortalama

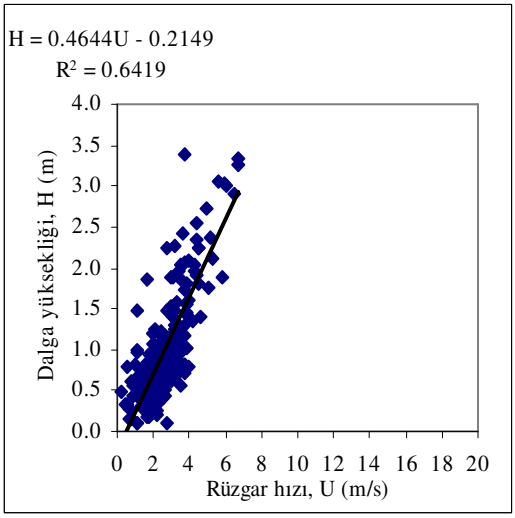


d) Dört saatlik ortalama

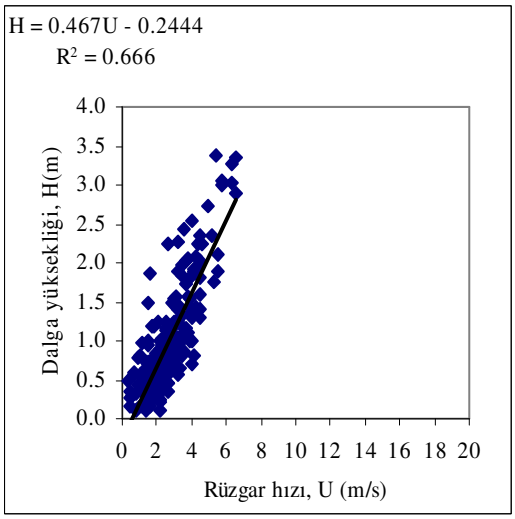
Şekil 5.91 Rüzgar yönü $11.25^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 33.75^{\circ}$ (NNE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



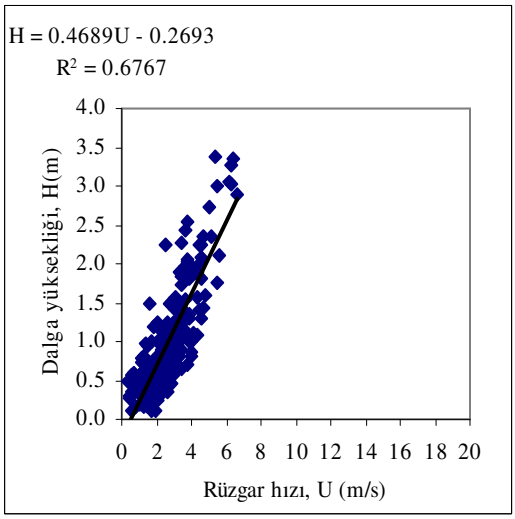
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

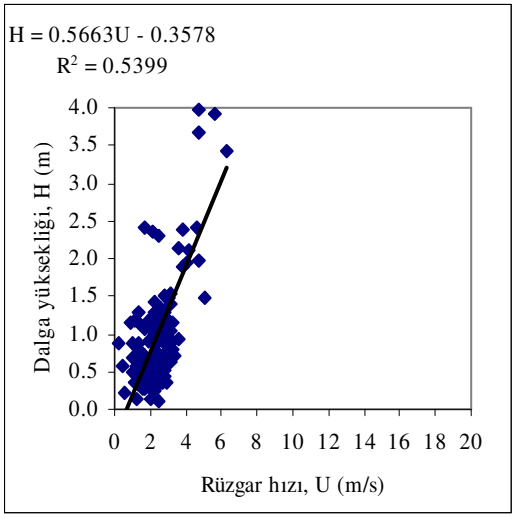


c) Üç saatlik ortalama

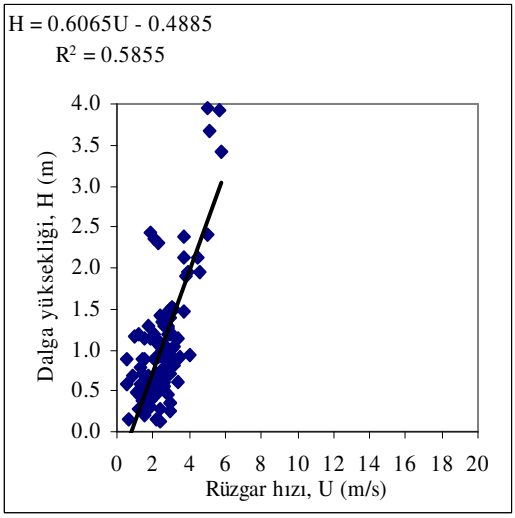


d) Dört saatlik ortalama

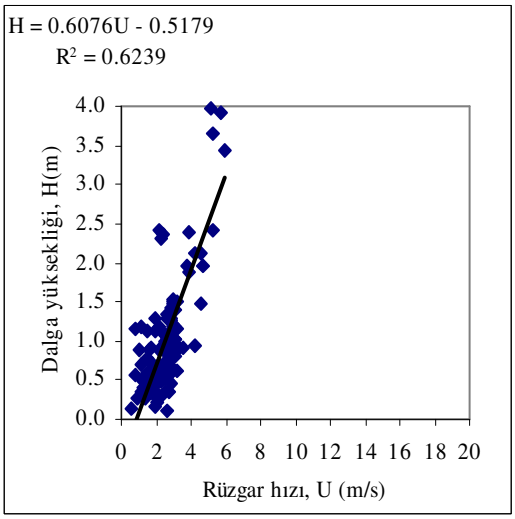
Şekil 5.92 Rüzgar yönü $33.75^{\circ} \leq \Theta_{rüzgar} < 56.25^{\circ}$ (NE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



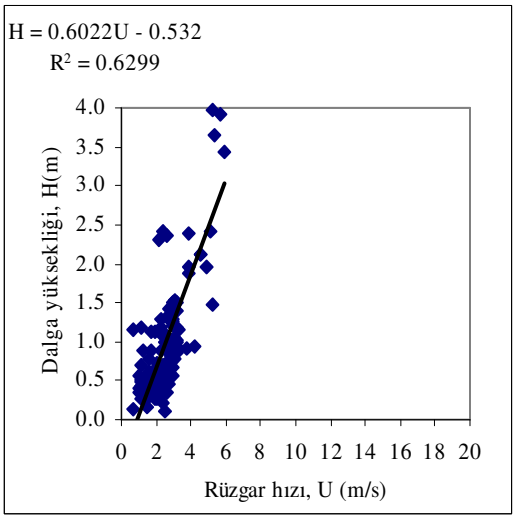
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

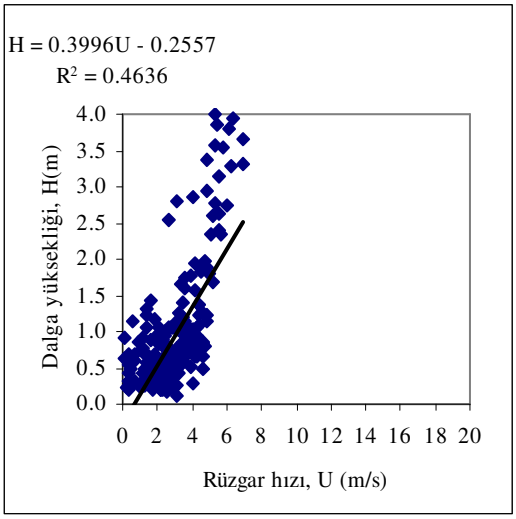


c) Üç saatlik ortalama

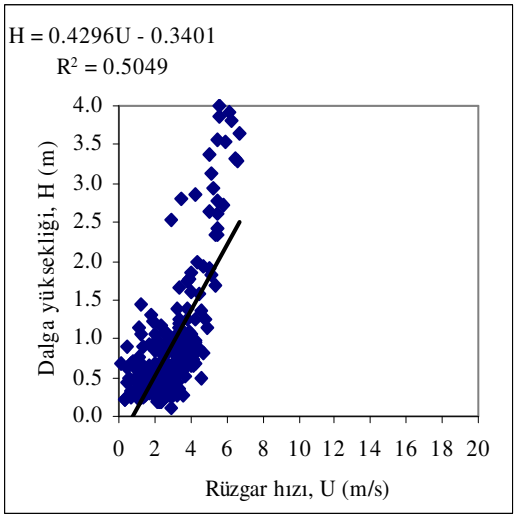


d) Dört saatlik ortalama

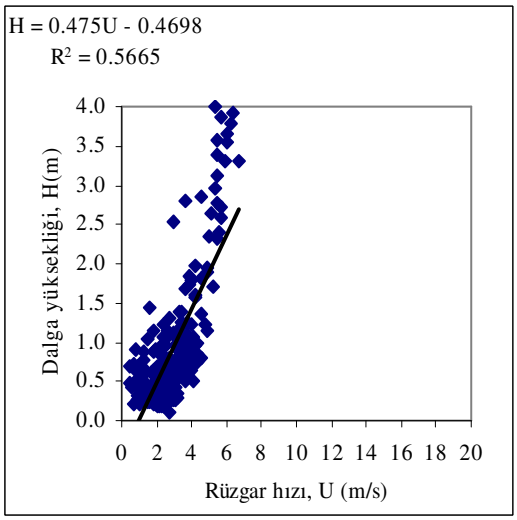
Şekil 5.93 Rüzgar yönü $56.25^\circ \le \Theta_{rüzgar} < 78.75^\circ$ (ENE) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



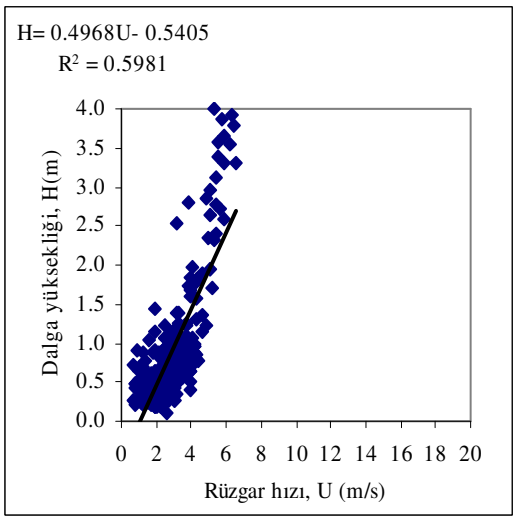
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

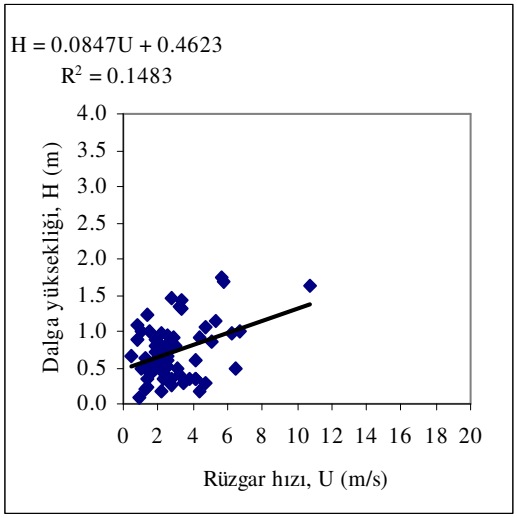


c) Üç saatlik ortalama

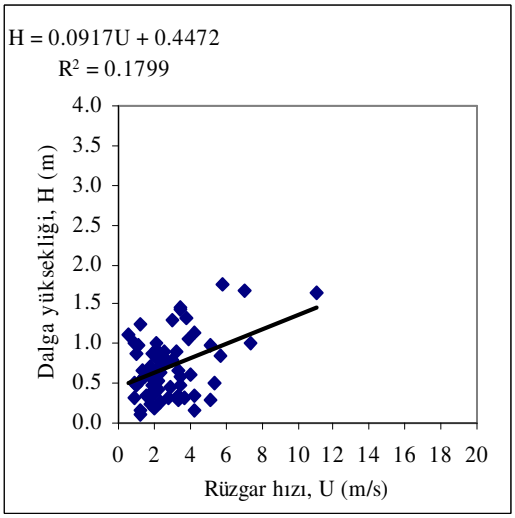


d) Dört saatlik ortalama

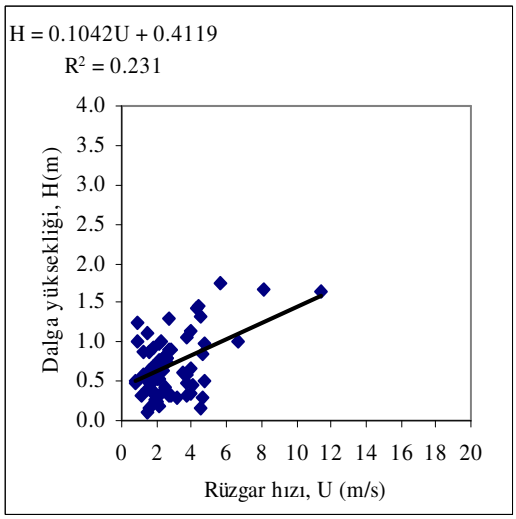
Şekil 5.94 Rüzgar yönü $78.75^{\circ} \le \Theta_{rüzgar} < 101.25^{\circ}$ (E) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



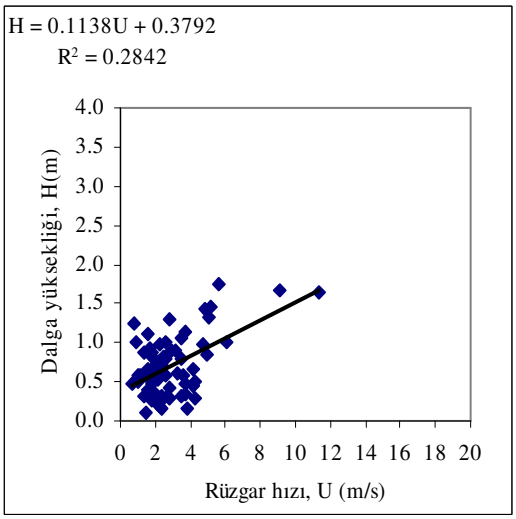
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

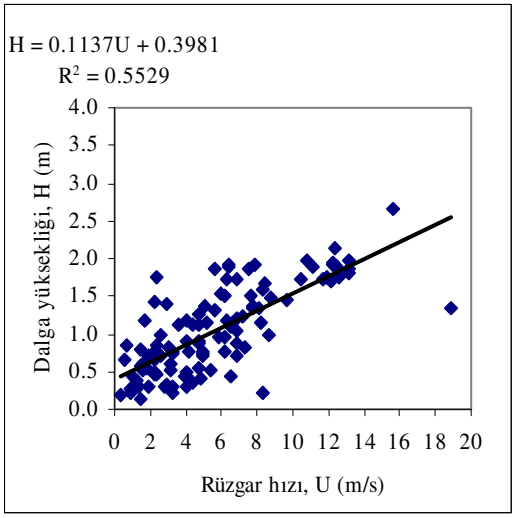


c) Üç saatlik ortalama

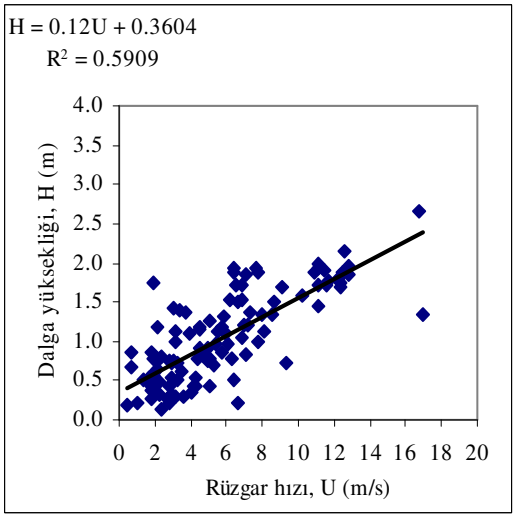


d) Dört saatlik ortalama

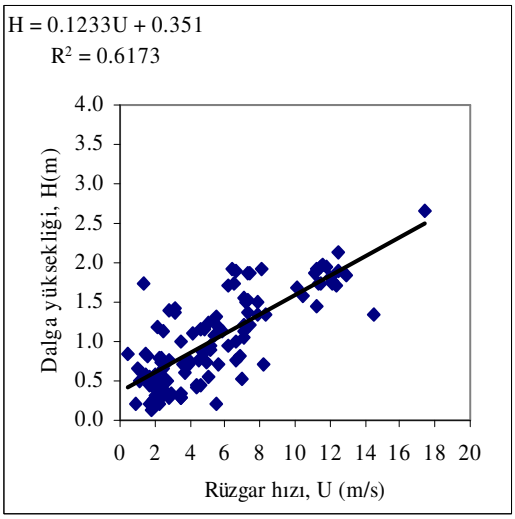
Şekil 5.95 Rüzgar yönü $281.25^{\circ} \le \Theta_{rüzgar} < 303.75^{\circ}$ (WNW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



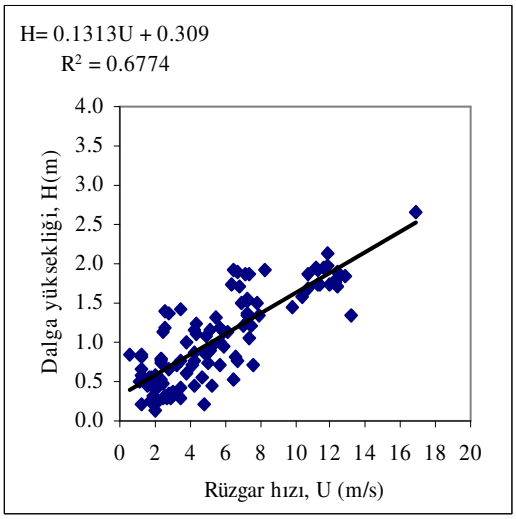
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama

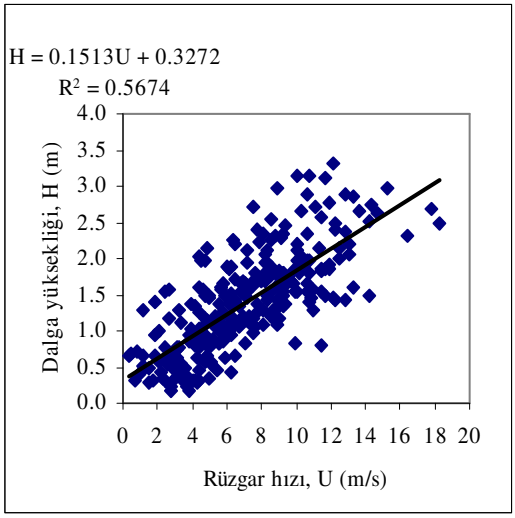


c) Üç saatlik ortalama

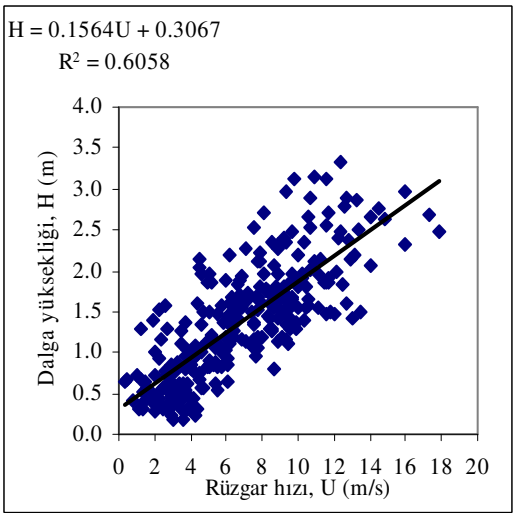


d) Dört saatlik ortalama

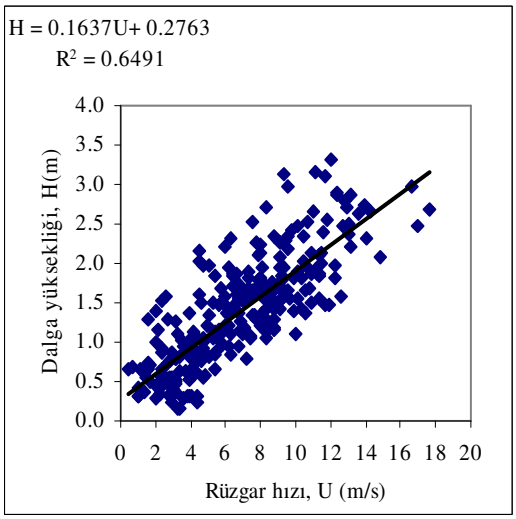
Şekil 5.96 Rüzgar yönü $303.75^{\circ} \le \Theta_{rüzgar} < 326.25^{\circ}$ (NW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları



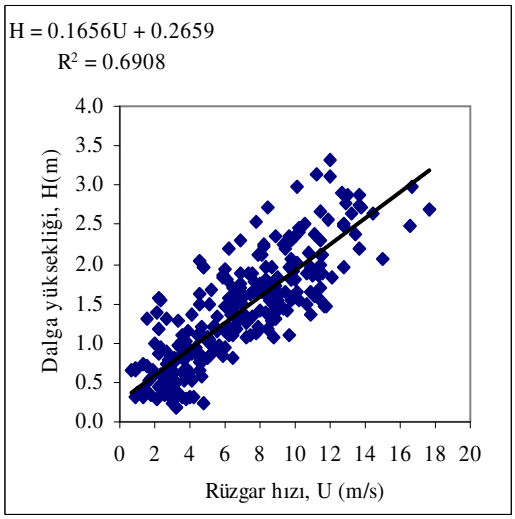
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama



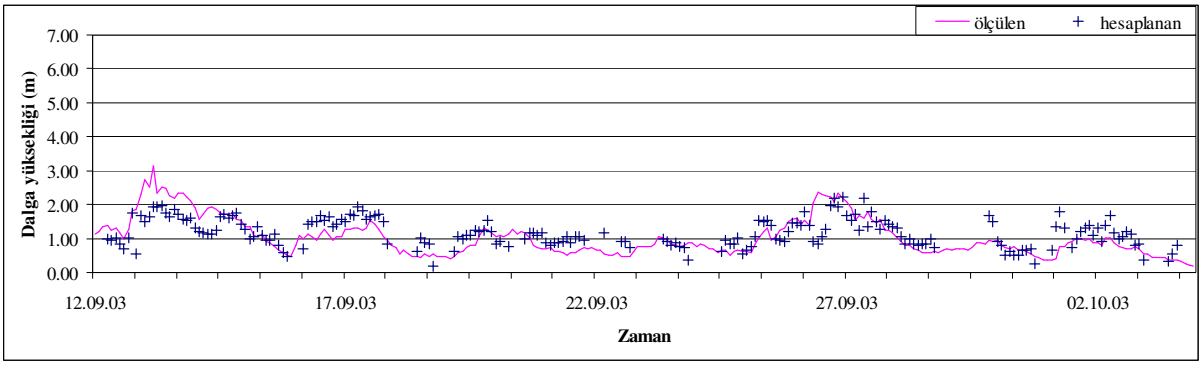
c) Üç saatlik ortalama



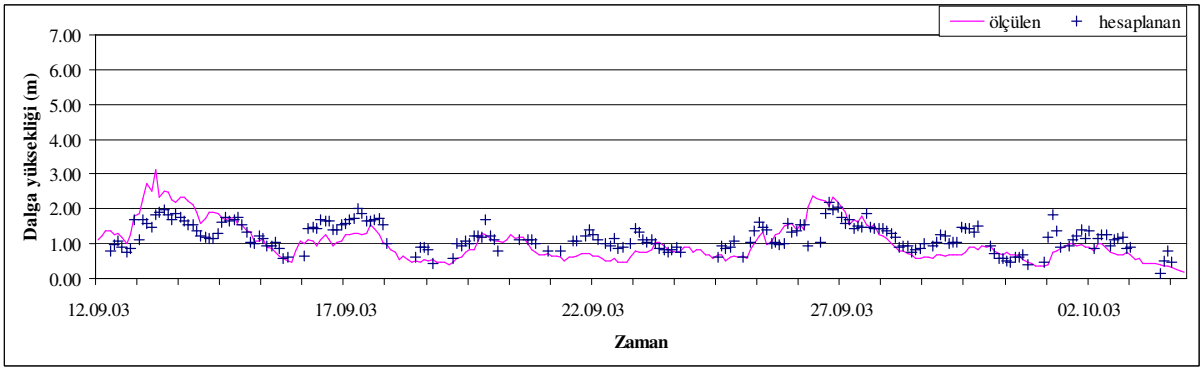
d) Dört saatlik ortalama

Şekil 5.97 Rüzgar yönü $326.25^{\circ} \le \Theta_{rüzgar} < 348.75^{\circ}$ (NNW) için saatlik ortalamalara göre korelasyon fonksiyonları

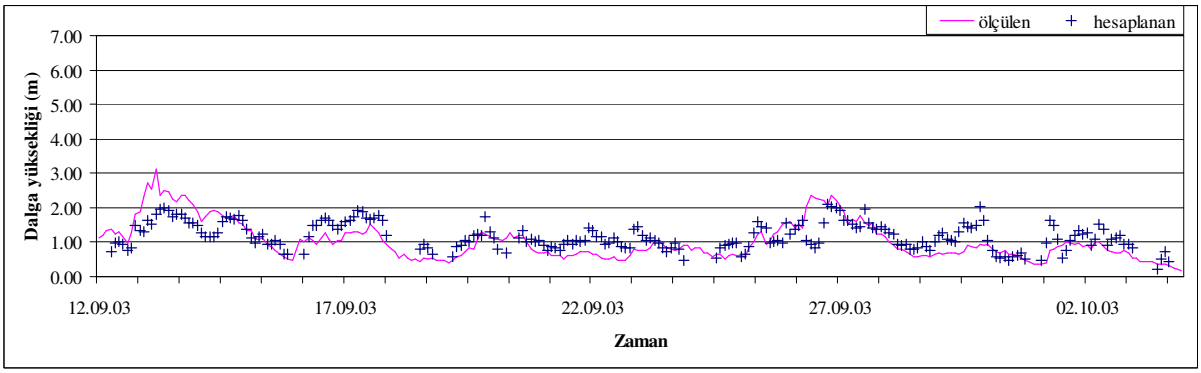
Şekil 5.90'dan Şekil 5.97'ye kadar olan şekiller incelendiğinde N yönünde 2 saatlik, NNE yönünde 1 saatlik, NE yönünde 3 saatlik diğer beş yönde ise 4 saatlik rüzgar hızlarının ortalamasıyla elde edilen regresyon katsayılarının en büyük olduğu belirlenmiştir. Fakat ayrı ayrı yönlerin incelemesiyle elde edilen bu sonuçların yeterli olmadığı anlaşıldığından zaman serisi şeklindeki tüm saatlik ortalamalar için karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 5.98).



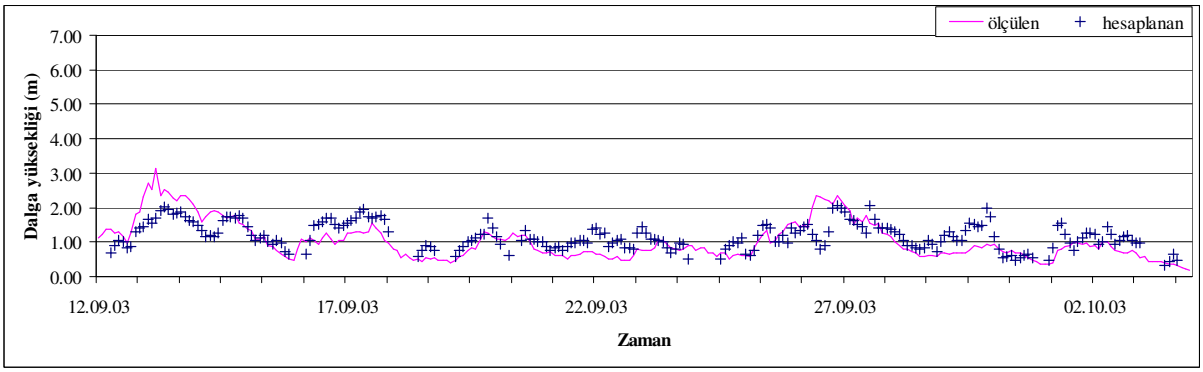
a) Bir saatlik ortalama



b) İki saatlik ortalama



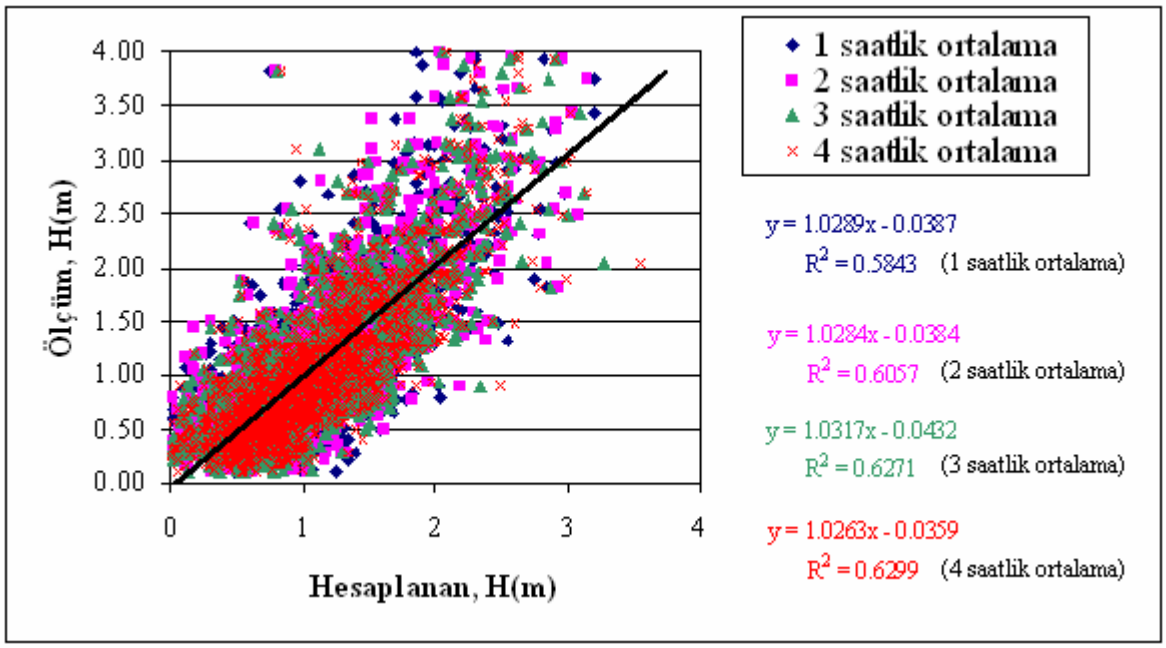
c) Üç saatlik ortalama



d) Dört saatlik ortalama

Şekil 5.98 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına (1. alternatif) göre ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliğine süre etkisinin karşılaştırılması

Şekil 5.99'da saatlik ortalamalara ait (1 saatlik, 2 saatlik, 3 saatlik ve 4 saatlik ortalama) hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki regresyon doğrularının denklemleri ve determinasyon katsayıları görülmektedir. Regresyon denklemlerinin eğimleri ve determinasyon katsayıları incelendiğinde en iyi ilişkinin 4 saatlik ortalama sonuçlarında olduğu görülmektedir. Daha detaylı bilgi edinmek amacıyla tahminin standart hatası değerlerine bakıldığı zaman bir saatlik ortalama rüzgar verilerine göre yapılan regresyon analizinde elde edilen tahminin standart hatası değeri 0.66, iki saatlik ortalamada 0.64, üç saatlik ortalamada 0.63 ve dört saatlik ortalamada ise 0.62 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara en düşük tahminin standart hatası değerini veren dört saatlik ortalamanın en uygun yaklaşım olduğu görülmüştür (Şekil 5.99).



Şekil 5.99 22.5°'lik rüzgar yönü sınıflandırma aralığına (1. alternatif) göre ölçülen ve hesaplanan dalga yüksekliklerinde sürelerin karşılaştırılması

iii) Genel Değerlendirme ve Dalga Yüksekliği Modeli

Çalışma bölgesi için istatistiksel bir dalga modelinin kurulabilmesi amacıyla ilk olarak rüzgar yönü daha sonra rüzgar esme süresinin etkisi analiz edilmiştir. Yapılan detaylı araştırmalar sadece denizden esen rüzgar yönleri içindir ve yukarıdaki aşamalarda karadan esen rüzgar yönleri için herhangi bir inceleme yapılmamıştır. Bu kısıma kadar olan inceleme sonuçlarından ise rüzgar yönünün 22.5°'lik aralıklara bölünerek regresyon analizinin yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Esme süresinde yapılan incelemede ise en uygun sonucu dört saatlik rüzgar hızı ortalaması alınarak kurulan regresyonun verdiği belirlenmiştir. Bu

analizlerin sonucunda daha detaylı olarak yani denizden esen yönlerin yanında karadan esen rüzgar yönleri de regresyona dahil edilerek incelemeler yapılmıştır.

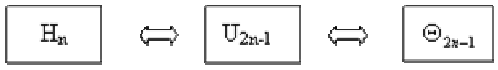
İlk olarak Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan doğrudan alınan rüzgar verileri (herhangi bir düzeltme yapılmamış rüzgar verileri) ve ölçülen belirgin dalga yükseklikleri ile regresyon analizi yapılmıştır. Bu kısımda da dalga yüksekliği için herhangi bir korelasyon kurulmadan önce rüzgar esme süresi ve yönünün etkileri incelenmiştir. İnceleme aşamaları aşağıda belirtildiği şekildedir:

- Öncelikle veriler dalga ölçüm zamanlarına göre düzenlenmiştir. Karaburun bölgesinde her iki saatte bir onar dakikalık dalga ölçümleri mevcuttur. Fakat rüzgar ölçümleri saatlik olarak meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilmiştir. Bu sebeple dalga ölçüm saatlerine ve aradaki saatlere karşılık gelen rüzgar esme hızları ve yönleri tablolaştırılmıştır. Çizelge 5.19'da rüzgar ve dalga verilerinin tablolaştırılmasına örnek verilmiştir.

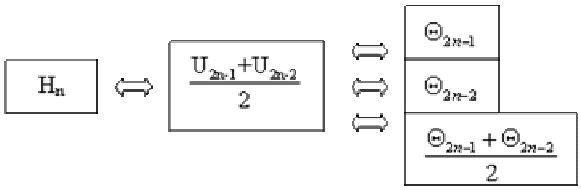
  Çizelge 5.19 Rüzgar ve dalga verilerinin ölçüm saatlerine göre karşılaştırılması

Ölçüm Zamanı No	Belirgin Dalga Yüksekliği, H_i (m)	Rüzgar Hızı, U_i (m/s)	Rüzgar Yönü, Θ_i (°)
1	H_1	U_1	Θ_1
2		U_2	Θ_2
3	H_2	U_3	Θ_3
4		U_4	Θ_4
5	H_3	U_5	Θ_5
.....		.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....		.....	.....
.....	.....	.....	.....
2n-4		U_{2n-4}	Θ_{2n-4}
2n-3	H_{n-1}	U_{2n-3}	Θ_{2n-3}
2n-2		U_{2n-2}	Θ_{2n-2}
2n-1	H_n	U_{2n-1}	Θ_{2n-1}

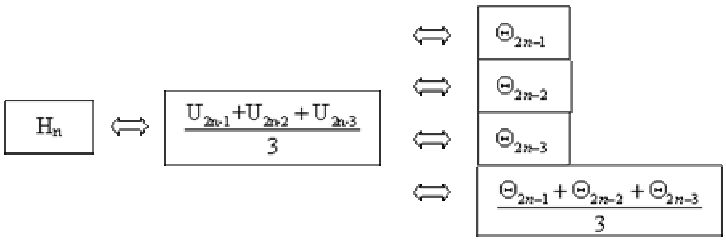
- Veriler düzenlendikten sonra rüzgar hızı ve yönü değerlerinin etkileri incelenmiştir. Bu amaçla farklı alternatifler düşünülmüştür. Alternatiflerde ilk olarak rüzgar hızlarının etkisi gözönüne alınmıştır. Yani rüzgar hızlarının eş zamanlı, iki saat, üç saat ve dört saat ortalaması alınarak denenmiştir. Aynı zamanda rüzgar esme yönleri de rüzgar hızı ortalamalarına bağlı olarak farklı şekillerde regresyon analizinde girdi olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.100'de regresyon analizine ait alternatifler gösterilmektedir.



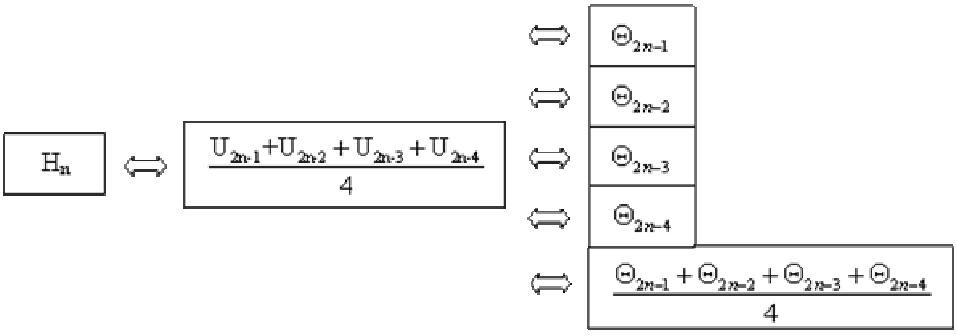
a) Eş zamanlı



b) İki saat ortalama



c) Üç saat ortalama



d) Dört saat ortalama

Şekil 5.100 Rüzgar-dalga yüksekliği modelinde akış diyagramı

Regresyon analizinde ilk aşamada dalga ölçüm zamanı ile eş zamanlı rüzgar hızı ve bu zamana karşılık gelen rüzgar yönü (Şekil 5.100(a)) denenmiştir. Daha sonra yine dalga ölçüm yüksekliği ve son iki saatin ortalama rüzgar hızına karşılık üç farklı rüzgar yönü (22.5°) alternatifi denenmiştir. Bunlar son iki saatin ortalama rüzgar yönü, sondan bir saat önceki rüzgar yönü ve son saatteki rüzgar yönleridir (Şekil 5.100(b)). Dalga ölçüm yüksekliği ve son

üç saatin ortalama rüzgar hızına karşılık ise son üç saatin ortalama rüzgar yönü, sondan iki saat önce, sondan bir saat önce ve son saatte esen rüzgar yönü alınmıştır (Şekil 5.100(c)). Son olarak dalga ölçüm yüksekliği ve son dört saatin ortalama rüzgar hızına karşılık, son dört saatin ortalama rüzgar yönü, sondan üç saat, iki saat, bir saat önce ve son saatte esen rüzgar yönleri dikkate alınarak her alternatif için çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.100(d)). Şekil 5.100'de şematik olarak anlatılan çoklu regresyon aşamaları Çizelge 5.20'de herbir regresyon kodlanarak verilmiştir.

Çizelge 5.20 Dalga yüksekliği belirlenmesinde kullanılan regresyon alternatifleri

Regresyon No	**Dalga Yüksekliği**	**Rüzgar Hızı**	**Rüzgar Yönü**
R1	H_n	U_{2n-1}	Θ_{2n-1}
R2	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}}{2}$	Θ_{2n-1}
R3	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}}{2}$	Θ_{2n-2}
R4	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}}{2}$	$\frac{\Theta_{2n-1}+\Theta_{2n-2}}{2}$
R5	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}}{3}$	Θ_{2n-1}
R6	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}}{3}$	Θ_{2n-2}
R7	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}}{3}$	Θ_{2n-3}
R8	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}}{3}$	$\frac{\Theta_{2n-1}+\Theta_{2n-2}+\Theta_{2n-3}}{3}$
R9	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}+U_{2n-4}}{4}$	Θ_{2n-1}
R10	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}+U_{2n-4}}{4}$	Θ_{2n-2}
R11	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}+U_{2n-4}}{4}$	Θ_{2n-3}
R12	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}+U_{2n-4}}{4}$	Θ_{2n-4}
R13	H_n	$\frac{U_{2n-1}+U_{2n-2}+U_{2n-3}+U_{2n-4}}{4}$	$\frac{\Theta_{2n-1}+\Theta_{2n-2}+\Theta_{2n-3}+\Theta_{2n-4}}{4}$

Dalga ölçüm ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri Çizelge 5.20'de görüldüğü gibi düzenlendikten sonra çoklu regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon analizleri SPSS isimli istatistik programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SPSS programında gerçekleştirilen çoklu regresyon analizi lineerdir. Lineer çoklu regresyon bağımlı değişkenin tahmin edilen bir veya birden fazla parametreyle olan lineer ilişkiye bağlı olarak modellenmesinde kullanılmaktadır.

Geliştirilecek dalga modelindeki çoklu regresyon analizi aşamalarında rüzgar hızı ve rüzgar yönünün yanısıra o yönden esen rüzgarın oluşturduğu etkili feç mesafesi de dikkate alınmıştır. Hangi rüzgar yönü dikkate alındıysa o yönde oluşacak etkili feç mesafesi tahmin parametresi olarak regresyon analizinde hesaba katılmıştır.

Birleşik bir seriyi en küçük kareler yöntemine göre doğrusal veya eğrisel bir fonksiyon ile ifade ettikten sonra teorik ve fiili değerler arasında fark bulunması doğal kabul edilmektedir. Regresyon analizi ile yapılmak istenen farkların karelerinin toplamını en aza indirmektir. Serpilme diyagramı ile regresyon doğruları veya eğrileri arasındaki uyumun derecesini ve dolayısıyla doğru ve eğrilerin tahmin yapmadaki yeterliliklerini gözle bir noktaya kadar anlayabilmek mümkün ise de, bunun için matematiksel bir ölçüye ihtiyaç vardır. En küçük kareler yöntemi ile hesaplanmış olan teorik tahmin değerleri (H_{tahmin}) ile gözlemlerle elde edilmiş fiili H değerleri arasında fark bulunması doğaldır. ($H-H_{tahmin}$)'lerin karelerinin ortalamasının karekökü yani (5.10) eşitliği ile verilen tahminin standart hatası, fiili H değerlerinin regresyon yüzeyi etrafında ne kadar uzağa dağıldıklarını ölçmektedir (Köksal, 2003). Tahminin standart hatası değerleri dışında R (çoklu korelasyon katsayısı) ve R^2 (determinasyon katsayısı, korelasyon katsayısının karesi) değerleri, yapılan regresyon analizinin ve dolayısıyla kurulan korelasyonun güçlülüğü hakkında bilgi vermektedir. R (korelasyon katsayısı) ne kadar büyükse kurulan korelasyonun da o kadar kuvvetli olduğu bilinen bir gerçektir. Fakat sadece bu değerlerin büyük olması modelin doğruluğu veya anlamlılığı hakkında yeterli bilgiyi vermemektedir. Bu sebeple mutlaka anlamlılık testlerinin yapılması gerekmektedir. SPSS programında lineer regresyon analizinde F testi yapılmaktadır. Bu test R katsayısının anlamlılığının testi olarak da yorumlanmaktadır. Programda belirli bir güven aralığı değeri verilmektedir. Bu güven aralığı değerine karşılık kritik F değeri F tablosu (Köksal, 2003) yardımıyla hesaplanmaktadır. Regresyon modeline göre hesaplanan ve (5.11) eşitliği ile verilen F değeri, F tablosundan elde edilen kritik F değerinden fazla ise model anlamlı olarak kabul edilmektedir. Programda güven aralığı %95 olarak verilmiştir.

$$S=\sqrt{\frac{\sum\left(H-H_{tahmin}\right)^2}{n}} = \text{Tahminin standart hatası} \quad (5.10)$$

$$F=\frac{\text{Regresyona bağlı ortalama kare}}{\text{Regresyon denkleminden sapmaların varyansı}} = \text{F değeri} \quad (5.11)$$

(5.11) eşitliğinde belirtilen "regresyon denkleminden sapmaların varyansı" aynı zamanda tahminin standart hatasının karesine de eşit olmaktadır. Model sonuçları ve anlamlılık testleri değerlendirildiğinde yapılan tüm regresyon sonuçlarının anlamlı olduğu görülmüştür. Yani tüm F değerleri belirlenen güven aralığında kritik değerden büyük elde edilmiştir.

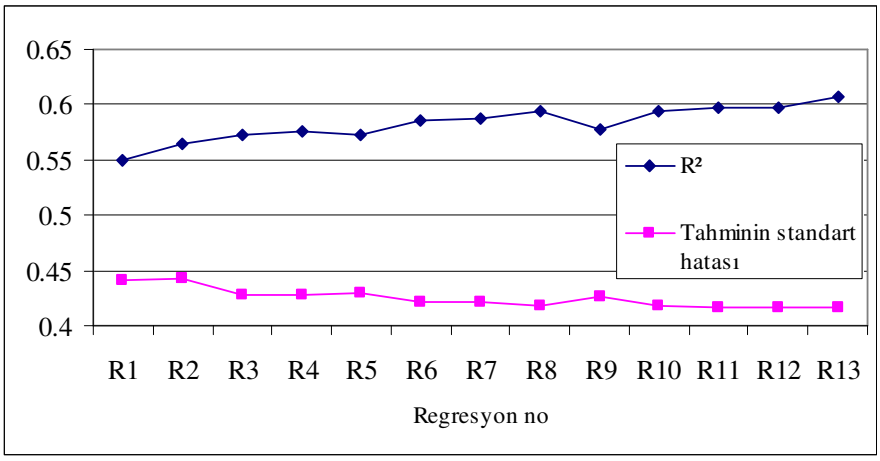
Çizelge 5.21'de lineer regresyon analizi sonucunda her bir alternatif için (R1, R2, R3...gibi) elde edilen denklemler, R² (determinasyon katsayısı) değerleri ve tahminin standart hatası verilmiştir.

Çizelge 5.21 Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları

Regresyon No	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Tahminin Standart Hatası
R1	$H=0.01UF^{0.5}+0.037U\sin\Theta+0.029U\cos\Theta-0.013F^{0.5}+0.483$	0.549	0.4407
R2	$H=0.01UF^{0.5}+0.038U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.015F^{0.5}+0.483$	0.564	0.4435
R3	$H=0.01UF^{0.5}+0.037U\sin\Theta+0.031U\cos\Theta-0.014F^{0.5}+0.482$	0.573	0.4286
R4	$H=0.01UF^{0.5}+0.035U\sin\Theta+0.030U\cos\Theta-0.014F^{0.5}+0.474$	0.576	0.4273
R5	$H=0.011UF^{0.5}+0.038U\sin\Theta+0.027U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.482$	0.573	0.4290
R6	$H=0.011UF^{0.5}+0.039U\sin\Theta+0.029U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.476$	0.586	0.4220
R7	$H=0.011UF^{0.5}+0.033U\sin\Theta+0.027U\cos\Theta-0.014F^{0.5}+0.463$	0.588	0.4210
R8	$H=0.011UF^{0.5}+0.033U\sin\Theta+0.031U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.474$	0.594	0.4182
R9	$H=0.011UF^{0.5}+0.037U\sin\Theta+0.027U\cos\Theta-0.017F^{0.5}+0.482$	0.577	0.4270
R10	$H=0.011UF^{0.5}+0.039U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.017F^{0.5}+0.475$	0.594	0.4183
R11	$H=0.011UF^{0.5}+0.036U\sin\Theta+0.025U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.461$	0.598	0.4164
R12	$H=0.011UF^{0.5}+0.032U\sin\Theta+0.027U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.465$	0.597	0.4167
R13	$H=0.011UF^{0.5}+0.029U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.455$	0.608	0.4160

Şekil 5.101'de Çizelge 5.21'de denklemler ile belirtilen regresyonların R² değerleri ve regresyon analizi sonucunda oluşan tahminin standart hataları verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere en yüksek determinasyon katsayısı R13 koduyla verilen çoklu regresyon modelinde elde edilmiştir. Yine tahminin standart hatası değerlendirilecek olursa en düşük

hata R13 regresyonunda bulunmuştur. Bu sonuçlara göre rüzgar hızının son dört saatteki ortalaması üç saat ortalama, iki saat ortalama ve eş zamanlı rüzgar hızı saatine göre daha kuvvetli regresyon bağıntısı sağlamaktadır. Rüzgar esme yönü ilişkisine bakılacak olursa, regresyonlarda iki saat önce esen rüzgar yönünün alınması bir saat ve eş zamanlı rüzgar yönüne göre daha kuvvetli ilişki vermektedir. Üç saat önce esen rüzgar yönü ise iki saatliğe göre daha zayıf bir bağıntıya sebep olmaktadır. Bu sonuçlara göre rüzgar dalgasının oluşmasında iki saat önce esen rüzgar eş zamanlı ve bir saat önce esen rüzgara göre daha etkilidir. Fakat tüm çoklu regresyon analizi sonuçları incelendiğinde yine son dört saat esen rüzgar yönlerinin ortalamasının alınması en iyi sonucu vermektedir.



Şekil 5.101 Regresyonların R² (determinasyon katsayıları) ve tahminin standart hatası değerleri

Dalga yüksekliğinin hesaplanabilmesi için düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan çoklu regresyon analizinden elde edilen denklem (5.12) bağıntısıyla verilmiştir.

$$H=0.011UF^{0.5}+0.029U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.455 \quad (5.12)$$

burada;

H= Tahmin edilen belirgin dalga yüksekliği (m)

U= Son dört saatte esen rüzgar hızı ortalaması (m/s)

Θ = Son dört saatte esen rüzgar yönü ortalaması (°)

F= Son dört saatte esen rüzgar yönü ortalamasına karşılık gelen etkili feç mesafesi (km)

olarak verilmektedir.

Bölüm 5.2'de kalibre edilen (düzeltilmiş) rüzgar hızları ile ölçülen dalga yüksekliği arasında da yukarıda tanımlanan modele benzer olarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Fakat düzeltilmiş rüzgar hızlarında sadece bir önceki çoklu regresyon analizi (R13) esas alınarak

işlemler gerçekleştirilmiştir. Yani sadece son dört saatin ortalama rüzgar hızı ile yine son dört saatin ortalama rüzgar yönü ve bunlara karşılık gelen etkili feç mesafesi regresyon analizinde bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Eş zamanlı, iki ve üç saat ortalamaya sahip rüzgar hızları düşük korelasyon katsayısı verdiği için bu regresyonda dikkate alınmamıştır. Çizelge 5.22'de R14 koduyla verilen regresyon analizi sonuçları görülmektedir.

Çizelge 5.22 Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları

Regresyon No	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Tahminin Standart Hatası
R14	$H=0.009UF^{0.5}+0.012U\sin\Theta+0.068U\cos\Theta-0.039F^{0.5}+0.658$	0.655	0.38522

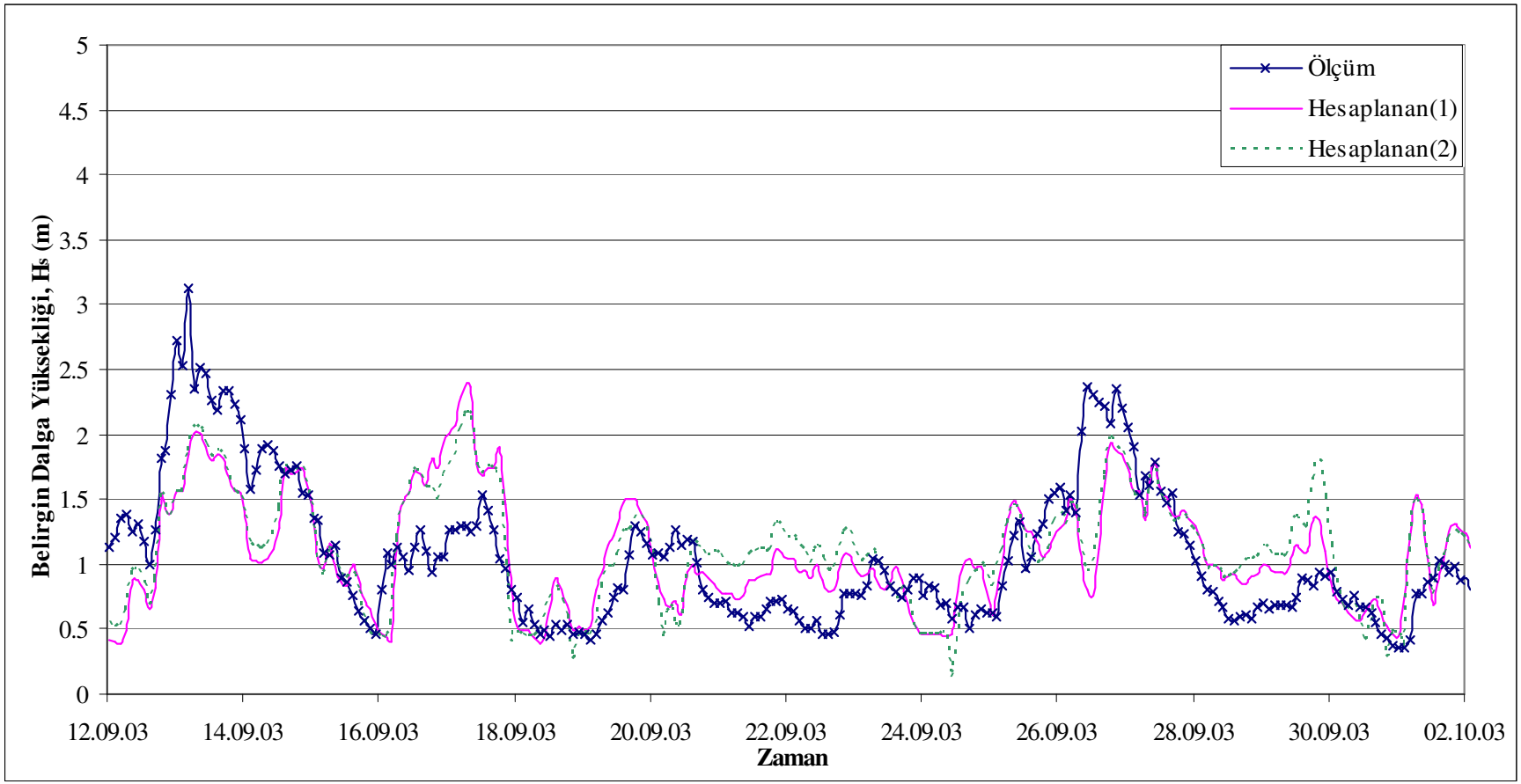
Çizelge 5.22 incelendiğinde determinasyon katsayısının (R^2) düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizinden elde edilen sonuçlara göre daha yüksek, yine tahminin standart hatasının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç ise dalga modellerinde kullanılan rüzgar ölçüm değerlerinin doğru olması gerektiğini göstermektedir.

Dalga yüksekliğinin hesaplanabilmesi için düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan çoklu regresyon analizinden elde edilen ve dalga yüksekliği modelini veren denklem (5.13) aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$H=0.009UF^{0.5}+0.012U\sin\Theta+0.068U\cos\Theta-0.039F^{0.5}+0.658 \quad (5.13)$$

Şekil 5.102'de Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen düzeltilmemiş ve düzeltilmiş rüzgar verileriyle yapılmış olan çoklu regresyon analizlerine ait model sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerleri görülmektedir. Her iki veri sonucunun da ölçüm değerleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.102(a)'da regresyon analizi sonuçlarının zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 5.102(b) ve Şekil 5.102(c)'de ise regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği verilerinin ölçüm sonuçları ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 5.102(b) ve Şekil 5.102(c)'de görülen bu serpilme diyagramları incelendiğinde özellikle düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile yapılan regresyon sonuçlarının ölçüm değerleri ile oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülebilmektedir. Karaburun bölgesinde uzun dönemli dalga yüksekliği verisi elde etmek isteniyorsa mevcut Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileriyle (5.12) veya (5.13) denklemleri kullanılarak uzun dönemli belirgin dalga yüksekliği

zaman serisi şeklinde hesaplanabilecektir. Bu denklemlerin elde edilmesi, çalışma bölgesinde uzun dönemli dalga verisine duyulan ihtiyacı karşılaması açısından oldukça önemlidir. Çünkü bu bölgede ölçülmüş dalga verisi yeterince uzun değildir ve süreksizdir.

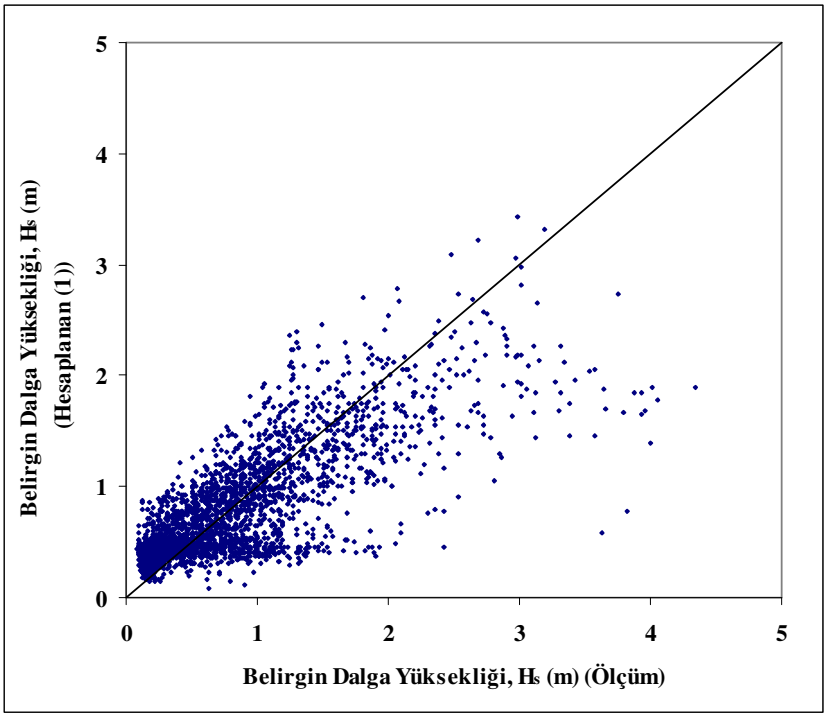


a) Regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003)

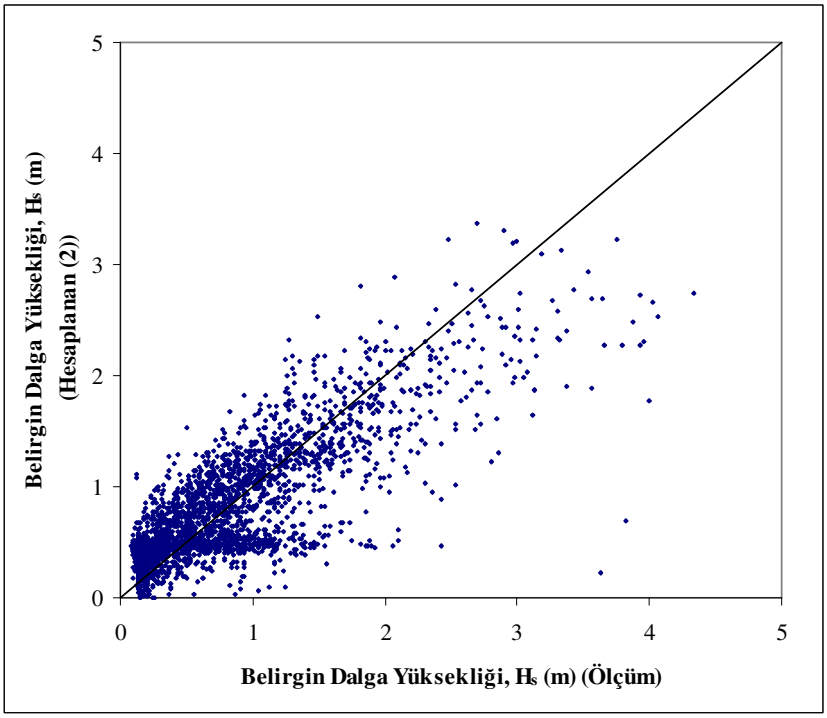
Şekil 5.102 Regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması

Hesaplanan(1): Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga yüksekliği değerleri

Hesaplanan(2): Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga yüksekliği değerleri



b) Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması



c) Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması

Şekil 5.102 Devam

5.5.2 Dalga Periyodunun Modellenmesi

Rüzgar verileriyle dalga periyodunun elde edilmesi için ilk olarak Bölüm 5.5.1'de anlatılan çoklu regresyon analizinden faydalanılmıştır. Yani Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar verileriyle ortalama dalga periyodu arasında ilişkinin kurulmasında belirgin dalga yüksekliği modellenmesinde kullanılan bağımsız değişkenler ele alınmıştır. Yine son dört saatin ortalama rüzgar hızı, son dört saatin ortalama rüzgar yönü ve bu yöne karşılık bulunan etkili feç mesafeleri kullanılmıştır. Rüzgar verileri ile ortalama dalga periyodu arasında rüzgar verileri ile belirgin dalga yüksekliği arasında olduğu kadar kuvvetli bir ilişki saptanmamıştır. Çizelge 5.23'te bu verilerle elde edilen en iyi çoklu regresyon sonuçları ve denklemleri görülmektedir. Aynı zamanda determinasyon katsayıları ve tahminin standart hataları da regresyon analizinin karar verme ölçütü olarak çizelgede yer almaktadır.

Çizelge 5.23 Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları

Regresyon No	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Tahminin Standart Hatası
T1	$T=0.276(UF)^{1/4}+0.339U^{1/4}\sin\Theta+0.553U^{1/4}\cos\Theta-0.61F^{1/4}+4.343$	0.218	0.85191
T2	$T=0.124(UF)^{1/3}+0.277U^{1/3}\sin\Theta+0.449U^{1/3}\cos\Theta-0.287F^{1/3}+4.090$	0.239	0.84172
T3	$T=0.027(UF)^{1/2}+0.169U^{1/2}\sin\Theta+0.288U^{1/2}\cos\Theta-0.067F^{1/2}+3.822$	0.258	0.82945
T4	$T=0.018UF^{1/4}+0.101U\sin\Theta+0.142U\cos\Theta-0.195F^{1/4}+4.006$	0.287	0.81326
T5	$T=0.013UF^{1/3}+0.092U\sin\Theta+0.131U\cos\Theta-0.10F^{1/3}+3.861$	0.288	0.81293
T6	$T=0.006UF^{1/2}+0.077U\sin\Theta+0.115U\cos\Theta-0.03F^{1/2}+3.725$	0.288	0.81250

Çizelge 5.23'te görüldüğü gibi rüzgar verileriyle yapılan regresyon analizinde en yüksek determinasyon katsayısı T5 ve T6 regresyonlarından sağlanmıştır. Fakat tahminin standart hatasına bakıldığı zaman en düşük hatayı T6 regresyonu vermektedir. Bu sebeple rüzgar verilerinden ortalama dalga periyodu bulunmak istendiğinde çok yüksek determinasyon katsayısına sahip olmasa da (5.14) ifadesi kullanılabilmektedir.

$$T=0.006UF^{1/2}+0.077U\sin\Theta+0.115U\cos\Theta-0.03F^{1/2}+3.725 \quad (5.14)$$

burada;

T= Tahmin edilen ortalama dalga periyodu (s)

U= Son dört saatte esen rüzgar hızı ortalaması (m/s)

Θ = Son dört saatte esen rüzgar yönü ortalaması (°)

F= Son dört saatte esen rüzgar yönü ortalamasına karşılık gelen etkili feç mesafesi (km)

olarak verilmektedir.

Düzeltilmiş rüzgar hızları ile yapılan regresyon analizinin sonucu ise Çizelge 5.24'te verilmiştir. Bu durumda elde edilen determinasyon katsayısı değeri düzeltilmemiş rüzgar verileriyle yapılan analize göre daha yüksek, tahminin standart hatası ise daha düşük elde edilmiştir.

Çizelge 5.24 Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon analizi sonuçları

Regresyon No	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Tahminin Standart Hatası
T7	$T=0.005UF^{1/2}+0.069U\sin\Theta+0.145U\cos\Theta-0.055F^{1/2}+3.899$	0.318	0.79557

(5.15) ifadesi T7 regresyon analizi sonucunda elde edilen denklemi belirtmektedir.

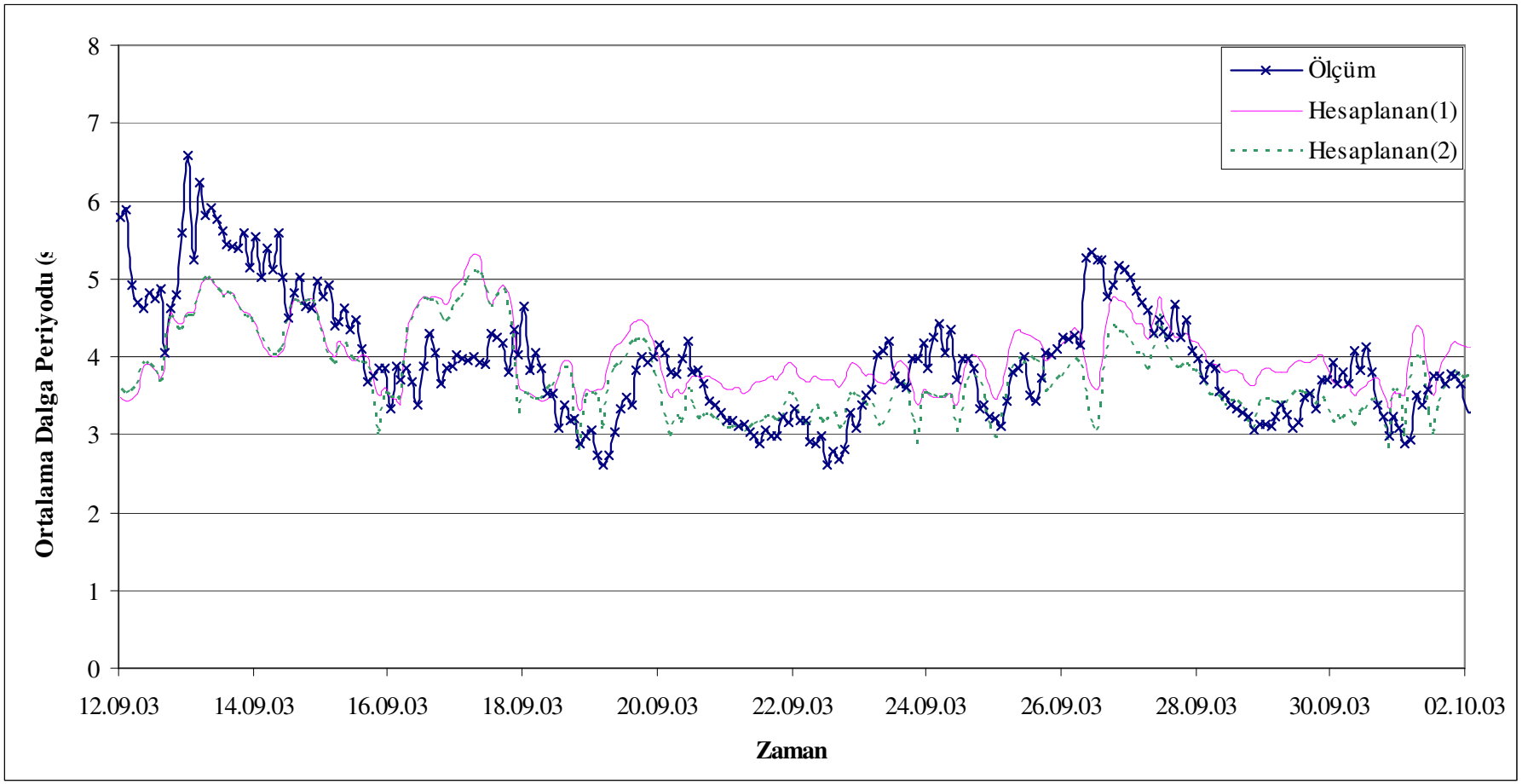
$$T=0.005UF^{1/2}+0.069U\sin\Theta+0.145U\cos\Theta-0.055F^{1/2}+3.899 \quad (5.15)$$

Şekil 5.103'te Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen düzeltilmemiş ve düzeltilmiş rüzgar verileriyle yapılmış olan regresyon ve korelasyon analizinin sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerleri görülmektedir. Şekil 5.103 incelendiğinde ortalama dalga periyodunda ölçüm ve hesaplanan değerler arasında dalga yüksekliğinde olduğu kadar yeterince uyum bulunmadığı belirlenmiştir.

Bu sebeple dalga periyodunun modellenmesinde diğer bir yöntem tanımlanmıştır. Bu yöntem ortak dalga periyodu-dalga yüksekliği dağılımıdır. Dalga periyodu ile ilerleme açısını ölçmek ve tahmin etmek dalga yüksekliğini ölçmek ve tahmin etmekten çok daha zor olduğu için genelde ortak dağılımlar kullanarak belirlenmiş dalga yüksekliği ve diğer parametreler arasında ilişki kurulmaktadır (Kamphius, 2000).

Karaburun bölgesi için de ortak dağılım kullanılarak dalga periyodu modellenmeye çalışılmıştır. İlk olarak sayısal modelden elde edilen sonuçlar arasında daha sonra da ölçüm sonuçları arasındaki ilişki belirlenmiştir.

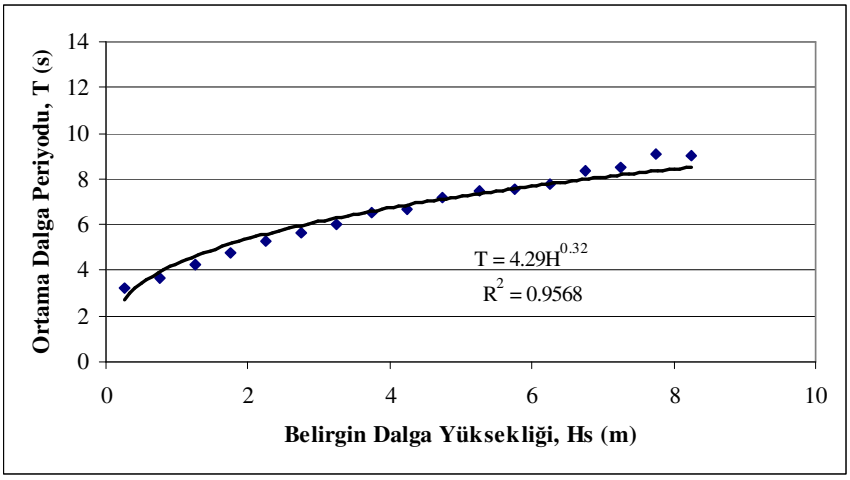
Bölüm 5.4.3.2'de verilen Şekil 5.67 ve Şekil 5.68'de, serpilme diyagramı şeklinde görülen sayısal modelden elde edilen sonuçlar toplam, rüzgar dalgası ve soluğan dalgası olmak üzere ayrıca derin deniz ve ölçümün yapıldığı koordinatlar olmak üzere ayrılmıştır. Bu sınıflama sonucunda sayısal modelden elde edilen bağıntılar ve çizelgeler ayrı ayrı belirtilmiştir. Şekil 5.104'ten Şekil 5.109'a kadar sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi verilmektedir. Çizelge 5.25'ten Çizelge 5.30'a kadar ise sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının 3 yıllık oluşma sayılarına göre birleşik dağılımları görülmektedir. Çizelgeler oluşturulurken dalga periyotları 1 saniye aralıklara ve bunlara karşılık ise dalga yüksekliği değerleri 0.5 m aralıklara bölünmüştür. Her iki aralığa karşılık gelen dalga sayısı dikkate alınan bölgede göz önüne alınmıştır. Dalga periyodu ve yüksekliği arasındaki ilişkiyi veren şekiller ise her dalga yüksekliğine (örneğin 0.25m, 0.75 m, 1.25m ....gibi) karşılık periyotların ağırlıklı ortalaması alınarak çizdirilmiştir (Şekil 5.104 ve Şekil 5.110 arası).



Şekil 5.103 Regresyon analizi sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında)
Hesaplanan(1): Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga periyodu değerleri
Hesaplanan(2): Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga periyodu değerleri

Çizelge 5.25 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak olasılık dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Derin denizde)

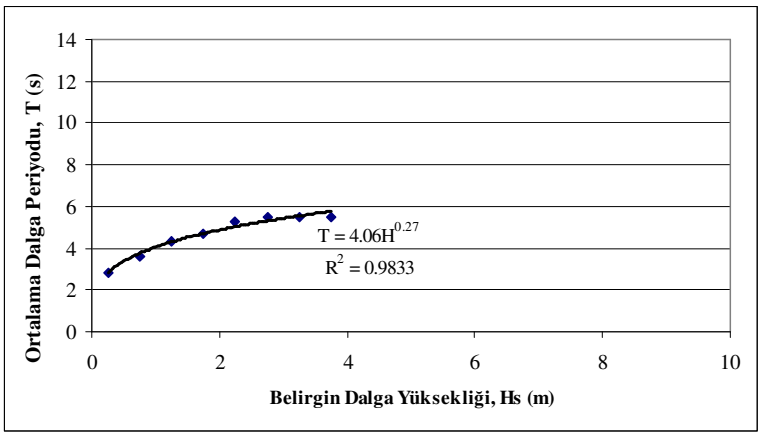
	Dalga Periyodu, T (s)								
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
0.25	12	1690	2786	400	13	0	0	0	0
0.75	1	1268	6449	2665	238	2	0	0	0
1.25	0	1	1853	2850	603	48	0	0	0
1.75	0	0	206	1398	612	115	7	1	0
2.25	0	0	0	394	650	90	4	6	0
2.75	0	0	0	8	527	102	6	0	0
3.25	0	0	0	0	296	243	10	0	0
3.75	0	0	0	0	13	274	17	0	0
4.25	0	0	0	0	0	138	23	0	0
4.75	0	0	0	0	0	34	78	0	0
5.25	0	0	0	0	0	2	60	1	0
5.75	0	0	0	0	0	0	32	3	0
6.25	0	0	0	0	0	0	14	5	0
6.75	0	0	0	0	0	0	2	10	0
7.25	0	0	0	0	0	0	1	7	1
7.75	0	0	0	0	0	0	0	2	3
8.25	0	0	0	0	0	0	0	6	6



Şekil 5.104 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde)

Çizelge 5.26 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Derin denizde)

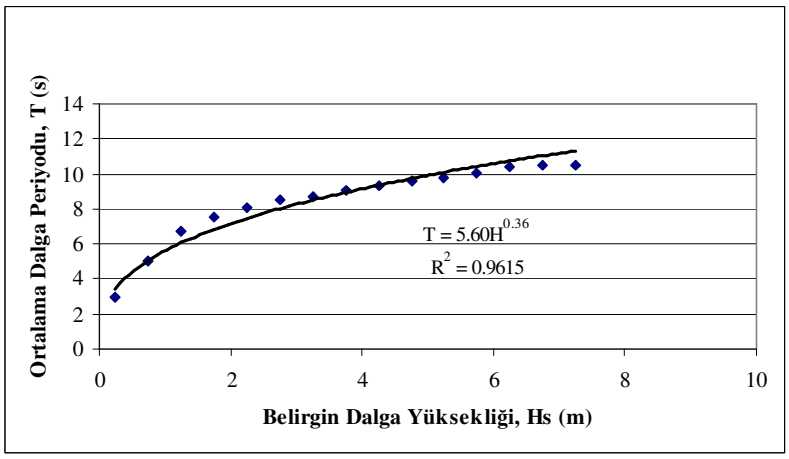
	Dalga Periyodu, T (s)						
Hs (m)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
0.25	0	865	3656	2242	446	30	0
0.75	1	0	1389	5573	2154	253	1
1.25	0	0	0	1313	3104	507	0
1.75	0	0	0	116	1528	595	0
2.25	0	0	0	0	280	945	0
2.75	0	0	0	0	2	882	0
3.25	0	0	0	0	0	223	0
3.75	0	0	0	0	0	39	0



Şekil 5.105 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde)

Çizelge 5.27 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının birleşik dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Derin denizde)

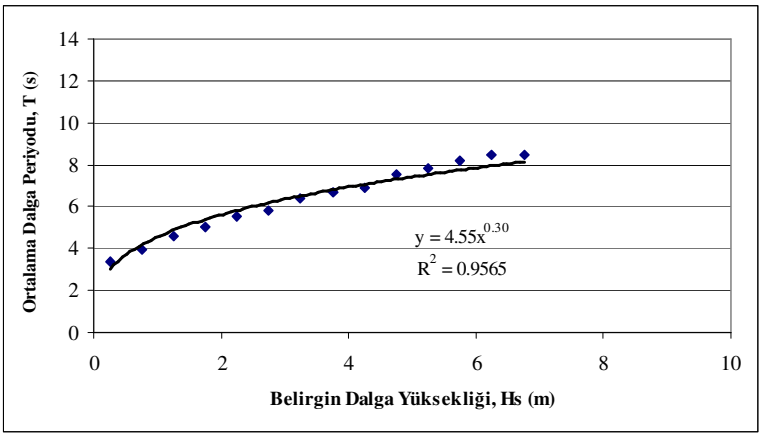
	Dalga Periyodu, T (s)									
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
0.25	1821	9008	5688	1852	285	104	31	11	0	0
0.75	1	0	390	2098	1282	492	129	23	0	0
1.25	0	0	0	9	251	523	363	83	3	0
1.75	0	0	0	0	1	52	536	88	0	0
2.25	0	0	0	0	0	0	144	211	2	0
2.75	0	0	0	0	0	0	1	212	14	0
3.25	0	0	0	0	0	0	0	131	28	0
3.75	0	0	0	0	0	0	0	47	57	0
4.25	0	0	0	0	0	0	0	8	49	0
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	28	3
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	12	5
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12



Şekil 5.106 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Derin denizde)

Çizelge 5.28 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde)

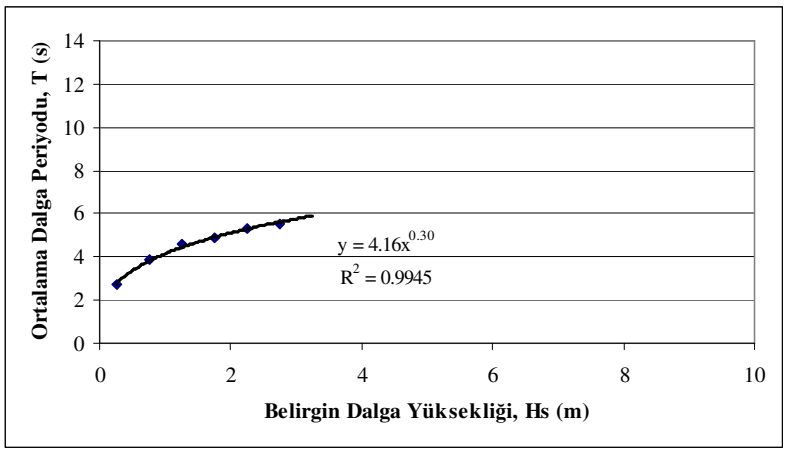
	Dalga Periyodu, T (s)										
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
0.25	3075	7027	5483	2764	707	350	178	49	0	0	0
0.75	0	0	39	1459	956	639	418	165	1	0	0
1.25	0	0	0	5	205	171	513	289	17	0	0
1.75	0	0	0	0	0	16	111	353	22	0	0
2.25	0	0	0	0	0	0	8	223	74	0	0
2.75	0	0	0	0	0	0	0	76	82	0	0
3.25	0	0	0	0	0	0	0	11	78	0	0
3.75	0	0	0	0	0	0	0	1	29	11	0
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	0
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	1
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0



Şekil 5.107 Sayısal modelden elde edilen belirgin toplam dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde)

Çizelge 5.29 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde)

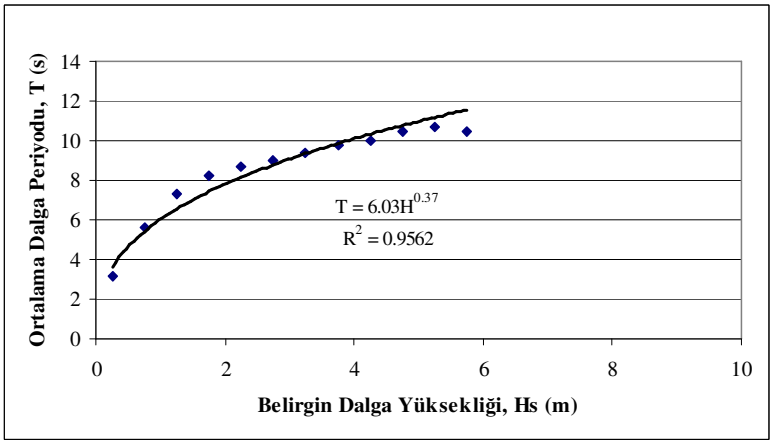
	Dalga Periyodu, T (s)				
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
0.25	2346	3631	2767	648	57
0.75	0	238	4889	2638	347
1.25	0	0	348	3196	600
1.75	0	0	2	1251	721
2.25	0	0	0	212	994
2.75	0	0	0	0	345
3.25	0	0	0	0	56



Şekil 5.108 Sayısal modelden elde edilen belirgin rüzgar dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde)

Çizelge 5.30 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının birleşik dağılımı (3 yılda oluşma sayıları) (Ölçüm derinliğinde)

	Dalga Periyodu, T (s)							
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
0.25	66	2221	4218	1283	89	8	0	0
0.75	0	323	5334	3686	509	4	1	0
1.25	0	0	527	2922	822	86	7	0
1.75	0	0	0	1011	733	102	9	7
2.25	0	0	0	118	714	123	6	0
2.75	0	0	0	0	501	167	16	0
3.25	0	0	0	0	59	255	19	0
3.75	0	0	0	0	1	133	22	1
4.25	0	0	0	0	0	56	27	3
4.75	0	0	0	0	0	2	33	3
5.25	0	0	0	0	0	0	11	6
5.75	0	0	0	0	0	0	5	10
6.25	0	0	0	0	0	0	0	11
6.75	0	0	0	0	0	0	0	5

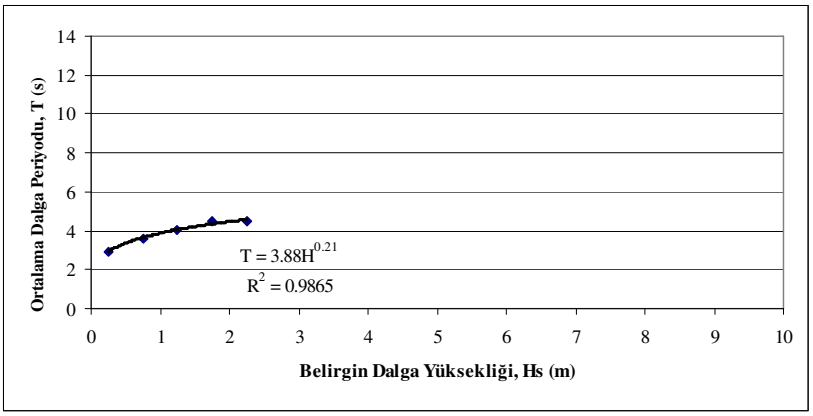


Şekil 5.109 Sayısal modelden elde edilen belirgin soluğan dalgası yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi (Ölçüm derinliğinde)

Sayısal modelden elde edilen bağıntıların yanında ölçüm sonuçlarından da aynı ilişki çıkarılmaya çalışılmıştır. Ölçüm süresi 8.5 aydır ve sayısal model sonuçlarının yanında daha az veriyi içermektedir. Karaburun bölgesi dalga yüksekliği ve periyodu arasındaki daha detaylı bilgiyi elde etmek için ölçüm verilerinden de faydalanılmıştır. Bu analiz sadece ölçüm derinliğindeki derin deniz dalgası olan dalga parametreleri arasında yapılmıştır. Çizelge 5.31'de ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının birleşik dağılımı, Şekil 5.110'da ise ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 5.31 Ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı

	Dalga Periyodu, T (s)			
Hs (m)	1.5	2.5	3.5	4.5
0.25	36	680	417	73
0.75	0	75	567	155
1.25	0	0	146	178
1.75	0	0	0	58
2.25	0	0	0	1



Şekil 5.110 Ölçüm sonuçlarından elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ilişkisi

Dalga periyodu ve yüksekliği arasında kurulan ilişkiler sonucunda (5.16) eşitliği ile verilen genel bir denklem elde edilmektedir.

$$T = c_1 H^{c_2} \tag{5.16}$$

burada;

T= Ortalama dalga periyodu (s)

H= Belirgin dalga yüksekliği (m)

c_1, c_2= Katsayılardır.

Çizelge 5.32'de sayısal model verilerinden ve ölçüm verilerinden elde edilen dalga yüksekliği ve dalga periyodu arasındaki ilişkileri belirten denklemlerin c_1 ve c_2 katsayıları yer almaktadır.

Çizelge 5.32 Veri kaynaklarına göre dalga yüksekliği ve periyodu bağıntısına ait katsayılar

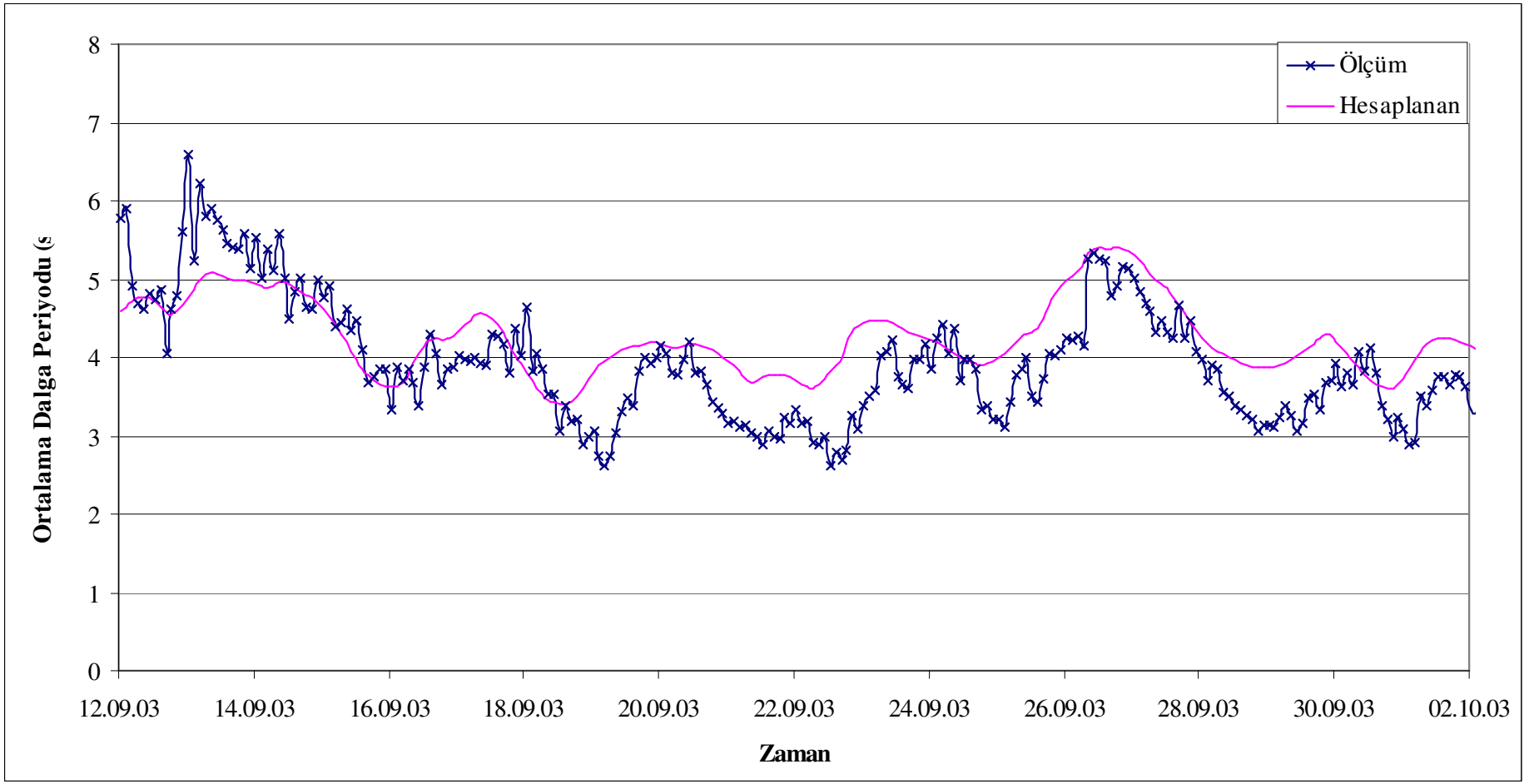
Veri Kaynağı	**c_1**	**c_2**
Sayısal model (Derin deniz toplam dalga)	4.29	0.32
Sayısal model (Derin deniz rüzgar dalgası)	4.06	0.27
Sayısal model (Derin deniz soluğan dalgası)	5.60	0.36
Sayısal model (Ölçüm derinliğindeki toplam dalga)	4.55	0.30
Sayısal model (Ölçüm derinliğindeki rüzgar dalgası)	4.16	0.30
Sayısal model (Ölçüm derinliğindeki soluğan dalgası)	6.03	0.37
Ölçüm verisi	3.88	0.21

Sayısal modelden elde edilen veriler arasında kurulan ortalama dalga periyodu ve belirgin dalga yüksekliği arasındaki ortak dağılım sonucu elde edilen ilişkiler incelendiğinde derin deniz ve ölçüm derinliğindeki bağıntılar arasında farklılıklar görülmektedir. Yine aynı şekilde bu veriler toplam, rüzgar ve soluğan dalgası olarak ayrıldığında da toplam, rüzgar ve soluğan dalga parametreleri arasındaki ilişkiyi veren denklemler de farklılık göstermektedir. Özellikle soluğan dalga parametreleri arasındaki bağıntıyı gösteren katsayıların diğerlerinden büyük olduğu Çizelge 5.32 incelendiğinde fark edilmektedir. Bunun sebebi soluğan dalgasında dalga yüksekliği değeri küçük olsa bile periyodun genelde büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Karaburun bölgesi için genel olarak dalga yüksekliği ve periyodu arasında bir ilişki elde edilmek istendiğinde derin deniz için toplam dalga ifadelerine bakılması gerekmektedir. Bu ifadeler yukarıda anlatıldığı gibi iki şekilde modellenmiştir. Sayısal model sonuçlarından derin denizde toplam dalga için Çizelge 5.32'de katsayıları verilen (5.17) ifadesi ve ölçüm sonuçlarından ölçümün yapıldığı derinlikte derin deniz dalgası olarak kabul edilen toplam dalga için (5.18) ifadesi verilmiştir.

$$T = 4.29H^{0.32} \tag{5.17}$$

$$T = 3.88H^{0.21} \tag{5.18}$$

İki ifade incelendiğinde derin deniz toplam dalga için bağıntılar arasında farklılık gözlenmektedir. Bunun sebeplerinden biri sayısal modelden derin deniz koordinatlarında toplam üç yıl süreyle saatlik veri elde edilirken ölçüm sonuçlarından ise 8.5 ay süreyle iki saatte bir veri elde edilmiş olmasıdır. Ayrıca ölçümden elde edilen veri sayısı yarıya indirilmiştir çünkü ölçüm noktası tüm dalgalar için derin deniz durumunu tanımlamamaktadır. Şekil 5.111'de (5.17) ifadesi ile elde edilen ortalama dalga periyotlarının ölçüm sonuçları ile zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir. Regresyon analizinde olduğu gibi bu yöntemde de tahminin standart hatası hesaplanmış ve 0.61 olarak bulunmuştur. Dalga periyodu belirlemek için yapılan çoklu regresyon analizi sonuçları ile karşılaştırma yapılırsa, düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan en iyi regresyon sonucunda tahminin standart hatası 0.81, düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan regresyon sonucunda ise 0.80 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.111 Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının ortak dağılımı sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında)

5.5.3 Dalga Yönünün Modellenmesi

Mevcut rüzgar verisinden ortalama dalga yönünün hesaplaması için dalga yüksekliğinde izlenen çoklu regresyon analizleri ile aynı yöntem uygulanmıştır. Fakat dalga yönü verilerinin dalga yüksekliğinde olduğu gibi doğrudan rüzgar verileri ile ilişkisi bugüne kadar tam olarak tanımlanamamıştır. Bu nedenle aralarında yeterli bir bağıntı verilmemiştir. Ancak yapılan analizlerden rüzgar verileri ve dalga yönü arasında oldukça zayıf bir bağıntı bulunmuştur. Bu çalışmada yapılan çoklu regresyon analizlerinden yine rüzgar hızının son dört saat ortalaması ve son dört saat saatlik rüzgar yönünün ortalaması en iyi ilişkiyi vermiştir.

Çizelge 5.33'te düzeltilmemiş ve düzeltilmiş rüzgar hızlarına göre rüzgar hızlarına göre elde edilen en yüksek çoklu regresyon sonuçları görülmektedir. Y1 koduyla verilen regresyon denklemi düzeltilmemiş rüzgar verisine göre yapılmıştır. Y2 koduyla verilen regresyon denklemi ise düzeltilmiş rüzgar verilerinden elde edilmiştir.

Çizelge 5.33 Dalga yönü hesaplamasında elde edilen regresyon denklemleri

Regresyon No	Denklem	Determinasyon Katsayısı (R^2)	Tahminin Standart Hatası
Y1	$\theta=-0.086\,U\Theta^{1}+3.15\times10^{-6}U\Theta^{3}-1.9\times10^{-11}\Theta^{5}+88.950$	0.055	82.4
Y2	$\theta=0.013\,U\Theta^{1}+2.07\times10^{-8}U\Theta^{3}-6.8\times10^{-13}\Theta^{5}+81.329$	0.045	85.5

burada;

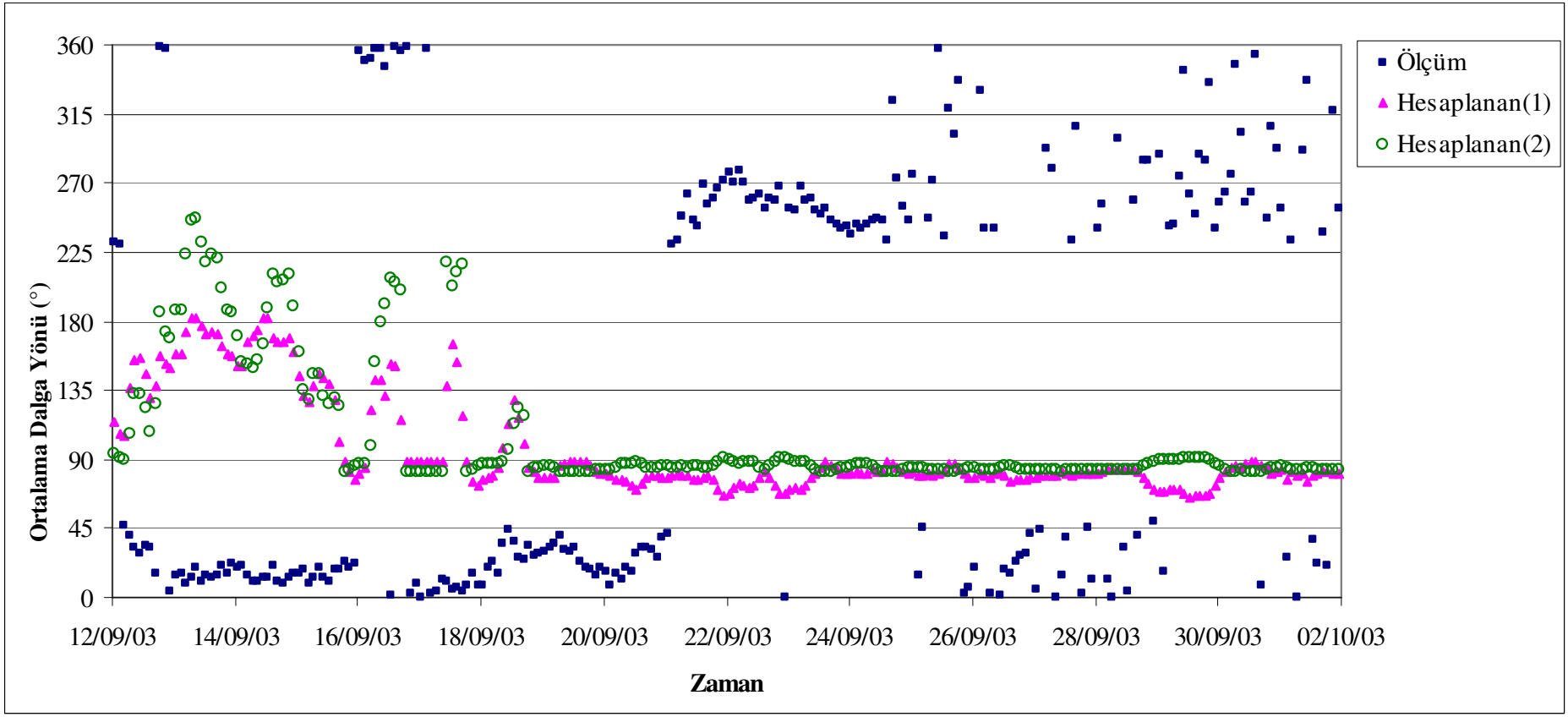
θ = Ortalama dalga yönü (°)

U= Son dört saatte esen rüzgar hızı ortalaması (m/s)

Θ = Son dört saatte esen rüzgar yönü ortalaması (°)'dır.

Çizelge 5.33'ten de görüldüğü üzere rüzgar hızı değerinin dalga yönü üzerinde çok büyük etkisinin önemli olmadığı regresyonlar arasındaki farklardan belirlenmektedir. Y1 regresyonu düzeltilmemiş rüzgar hızları ile hesaplanmış olmasına karşılık daha yüksek determinasyon katsayısı ve daha düşük tahminin standart hatası değeri vermiştir. Her iki regresyon analizi sonucu incelendiğinde ise Karaburun bölgesi için rüzgar verilerinden dalga yönü korelasyonu yakalanmasının oldukça güç olduğu belirlenmektedir. Bunun sebebi dalga ölçümü yapılan koordinatların meteoroloji istasyonuna olan uzaklığı ve soluğan dalgalarının etkisi olabilmektedir.

Şekil 5.112'de ölçüm verileri ile regresyon analizi sonucunda elde edilen ortalama dalga yönlerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere dalga yönleri arasında yeteri uyum yakalanamamıştır.



Şekil 5.112 Regresyon analizi sonucunda elde edilen ortalama dalga periyodu değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında)

Hesaplanan(1): Düzeltilmemiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga periyodu değerleri

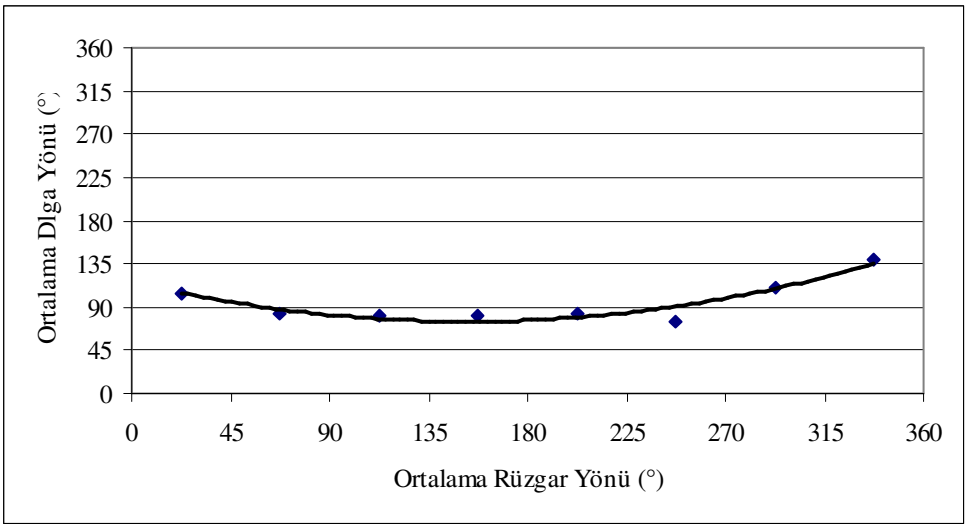
Hesaplanan(2): Düzeltilmiş rüzgar hızlarıyla yapılan korelasyon sonucunda elde edilen dalga periyodu değerleri

Korelasyon yöntemi ile elde edilen dalga yönleri ve ölçüm dalga yönleri arasında iyi bir uyum sağlanamadığı için dalga periyodunda olduğu gibi dalga yönünü belirleyebilmek amacıyla ortak ortalama dalga yönü-ortalama rüzgar yönü dağılımı yöntemine başvurulmuştur.

Bu yöntemde ölçülen ortalama dalga yönleri 45° aralıklara ve yine bu verilere karşılık Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen ortalama rüzgar yönleri 45° aralıklara bölünmüştür (Çizelge 5.34). Şekil 5.113 saatlik ortalama rüzgar yönü ve ortalama dalga yönlerinin ilişkisini vermektedir. Çizelge 5.34'te ise ortalama rüzgar yönlerinin ve ortalama dalga yönlerinin dalga ölçüm süresinde (8.5 ay) oluşma sayılarına göre ortak dağılımı görülmektedir.

Çizelge 5.34 Ortalama rüzgar yönlerinin ve ortalama dalga yönlerinin birleşik dağılımı

	Ortalama Dalga Yönü (°)							
Ortalama Rüzgar Yönü (°)	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5
22.5	306	85	1	1	0	28	15	84
67.5	207	112	1	3	0	21	9	30
112.5	201	109	3	2	0	26	8	20
157.5	206	150	10	1	0	38	7	26
202.5	171	190	19	3	0	12	17	26
247.5	57	29	6	5	0	4	5	22
292.5	57	20	0	10	0	1	0	29
337.5	223	28	3	11	0	0	1	129



Şekil 5.113 Ortalama rüzgar yönü ve ortalama dalga yönlerinin ilişkisi

Çizelge 5.35 incelendiğinde bölgede 0°-90° aralığındaki yani N-E yönleri arasındaki dalgaların etkin olduğu görülmektedir. Ölçüm yapılan süre içerisinde dalga oluşma sayılarına bakıldığı zaman özellikle 0°-45° yani N-NE yön dilimindeki dalgaların çoğunluğu oluşturduğu görülmektedir. Bu yön dilimini NE-E aralığı takip ederken kuzey batılı yönlerde

ise NW-N yön diliminin etkin olduğu belirlenmektedir. Bu sonuç Bölüm 5.4.3.2'de anlatılan dalga gülü ile de temsil edilmektedir.

Ortalama rüzgar yönü ve ortalama dalga yönü arasındaki ortak dağılımdan elde edilen korelasyon sonucunda (5.19) ifadesi elde edilmiştir.

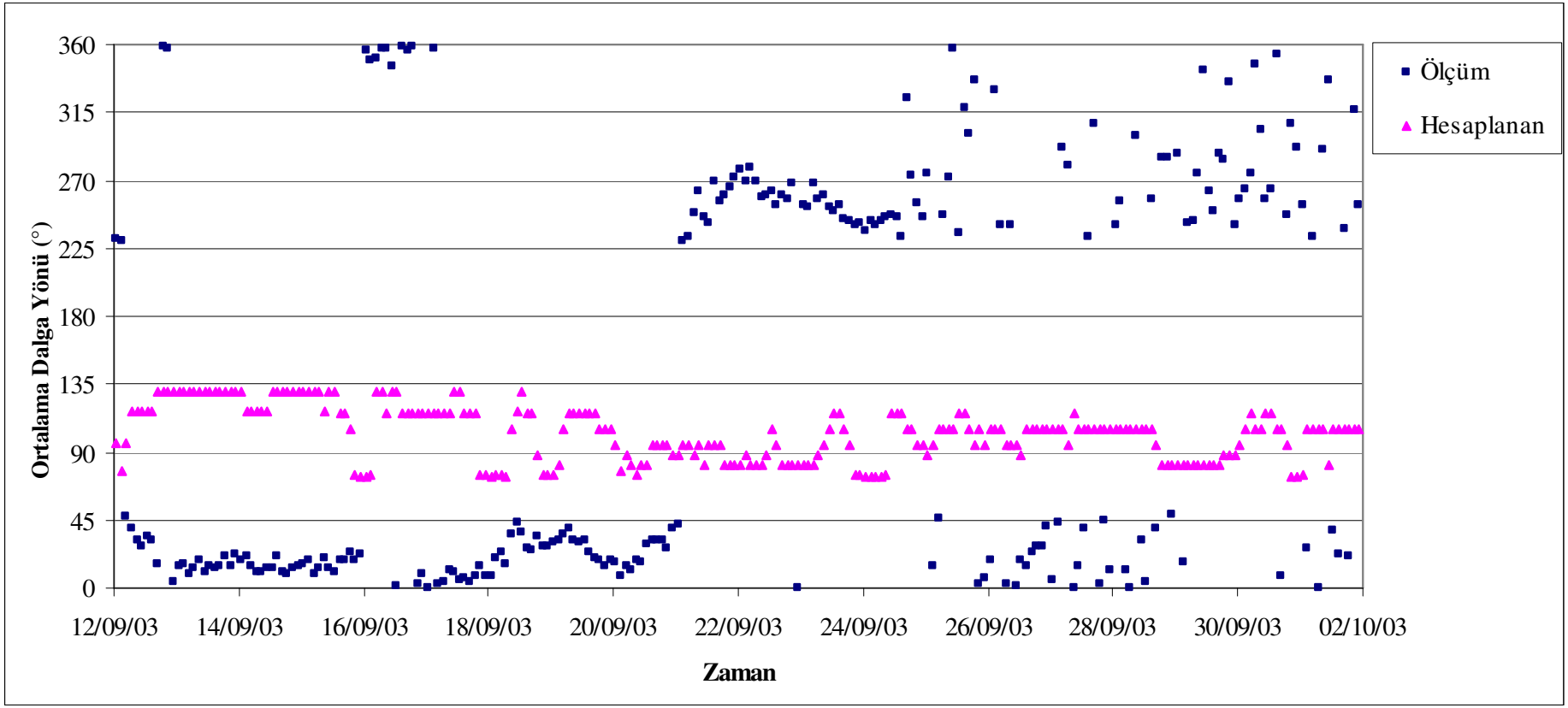
$$\theta = 0.0017\Theta^2 - 0.533\Theta + 115.72 \tag{5.19}$$

burada;

θ = Ortalama dalga yönü (°)

Θ = Saatlik ortalama rüzgar yönü (°)

Bu korelasyon sonucunda elde edilen tahminin standart hatası değeri 83.4° olarak belirlenmiştir. Şekil 5.114'te ölçüm verileri ile ortak dağılım sonucunda elde edilen ortalama dalga yönlerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 5.114 Ortak dağılım sonucunda elde edilen ortalama dalga yönü değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-2 Ekim 2003 tarihleri arasında)

5.6 Değerlendirme

5.6.1 Rüzgar Verilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında rüzgar verileri dalga tahmin yöntemlerinde kullanılacağı için öncelikle bu verilerin doğruluğu araştırılmıştır. Çalışma bölgesine en yakın uzaklıkta bulunan Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri, çalışma bölgesinde yapılan yerel rüzgar ölçümleri ile kalibre edilmiştir. Yapılan detaylı incelemeler Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ve yerel ölçüm rüzgar verileri arasında farklılıklar ortaya çıkarmıştır (Şekil 5.1). Özellikle kuzey doğulu yönlerde (NNE, NE, ENE, E ve WNW) ortaya çıkan bu farklılıklar Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin Çizelge 5.1'de verilen düzeltme fonksiyonları ile kalibre edilmesi ile kaldırılmaya çalışılmıştır (Şekil 5.18). Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan doğrudan alınan ve düzeltme yapılarak elde edilen rüzgar verileri parametrik dalga tahmin yöntemlerinde (SMB, SPM) ve bu çalışmada geliştirilen rüzgar-dalga korelasyon modelinde ayrı ayrı kullanılmıştır.

5.6.2 Dalga Verilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma bölgesinde -16 m derinliğinde ultrasonik ve basınç tipi DL2 model dalga ölçer yardımıyla 30 Ağustos 2003 tarihinde başlayıp 18 Mart 2005 tarihinde tamamlanan dalga ölçümleri aralıklı olarak gerçekleştirilmiştir. Toplamda 8.5 ay süreyle sürekli dalga verisi elde edilmiştir. Ancak dalga modellemesinin gerçekleştirilebilmesi için daha uzun süreli dalga verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple uzun dönemde ve sürekli dalga tahmininde farklı yöntemlere başvurulmuştur. Parametrik dalga tahmin modellerinden (SPM, SMB), üçüncü nesil tahmin modeline (MIKE21 SW) ve rüzgar verilerinden elde edilen rüzgar-dalga korelasyonuna kadar çeşitli yöntemler denenmiş, bu yöntemler sonucunda elde edilen dalga parametreleri ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır.

Bu aşamada tüm dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen sonuçlar belirgin dalga yükseklikleri, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü açısından değerlendirilecektir.

Çalışma kapsamında ilk olarak dalga tahmin yöntemlerinden parametrik yöntemlerle dalga verileri elde edilmiştir. Bunlar SPM ve SMB yöntemleridir. Ancak SPM ve SMB yöntemleri basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri olduğu için elde edilen sonuçlarda ölçüm verileri ile iyi bir uyum sağlanamamıştır. Her iki yöntemde de kalibrasyon fonksiyonları ile düzeltilmiş ve doğrudan elde edilen Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri kullanılmıştır. Parametrik yöntemlerde elde edilen tahminin standart hatası değerleri yüksek bulunmuştur.

Dalga yüksekliklerinde; SPM yönteminde doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 0.87 m, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 0.84 m olarak bulunmuştur. SMB yönteminde ise doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 0.94 m, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 0.81 m olarak bulunmuştur (Çizelge 5.37). Elde edilen dalga periyodu verilerinde ise SPM yönteminde doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 2.84 s, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 2.85 s olarak bulunmuştur. SMB yönteminde ise doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 2.72 s, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 3.6 s olarak bulunmuştur (Çizelge 5.38). Dalga yönlerinde ise SPM yönteminde doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 88.4°, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 100.1° olarak bulunmuştur. SMB yönteminde ise doğrudan kullanılan rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 84.8°, düzeltilmiş rüzgar verileri ile yapılan hesaplamada 99.5° olarak bulunmuştur (Çizelge 5.39).

İkinci olarak sayısal modelleme ile üç yıllık rüzgar verisi (ECMWF'den elde edilen rüzgar alanları) kullanılarak Ocak 2003-Aralık 2005 tarihleri arasında toplam üç yıllık dalga verisi elde edilmiştir. Sayısal modelin ilk olarak kalibrasyonu sonrasında ise doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon aşamasında sayısal model parametreleri (taban sürtünmesi, kırılma parametreleri, köpüklenme parametresi) ve modelde kullanılan yapılandırılmamış ağ boyutları değiştirilerek model çıktılarının bu parametrelerden ne kadar etkilendiği incelenmiştir. Kalibrasyon temelde model çıktıları ile saha ölçümlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. En önemli prensip ise model sonuçları ve saha ölçümleri arasında ne kadar az sapma varsa kurulan modelin o kadar iyi olduğudur. Model sonuçları ve saha ölçümleri arasındaki sapmalar bir çok faktörden etkilenebilmektedir (Van Waveren vd., 1999). Bunlar;

- *Kavramsal hatalar* (modelin tanımlanmasındaki hatalar, matematiksel tanımlamada veya sayısal modelin uygulanmasındaki hatalar). Çalışmada kullanılan sayısal model üçüncü nesil dalga tahmin modeli olup yapılandırılmamış ağ sistemi kullanmaktadır. Üçüncü nesil dalga modelleri Bölüm 5.4.3.2'de anlatıldığı gibi yönsel dalga spektrumunun benzeşiminde detaylı kaynak terimleri dengesinin doğrudan çözümüyle daha doğru sonuçlar elde etmektedir. Ayrıca üçüncü nesil dalga modelleri günümüzde oldukça sık kullanılmaktadır ve modelin güvenilirliği kanıtlanmış durumdadır.
- *Parametre değerleri* (bir çok model tam olarak değeri bilimeyen çok sayıda parametre içermektedir). Çalışmada (taban sürtünmesi, kırılma parametreleri, köpüklenme parametresi) parametrelerinin değerleri değiştirilerek model sonuçları incelenmiştir.

Model sonuçlarını etkileyecek en önemli parametrenin köpüklenme parametresi(C_{ds}) olduğu belirlenmiştir. Köpüklenme parametresi 4.5 değerinden kademeli olarak 0.5 değerine indirilmiş ve en uygun sonuç 0.5 değerinde elde edilmiştir. Diğer parametrelerin ise (taban sürtünmesi ve kırılma parametreleri) model sonuçlarında önemli (fark edilmeyecek kadar) değişikliğe sebep olmadığı belirlenmiş, bu sebeple sayısal model koşturulurken bu parametrelerde bir değişiklik yapılmadan modelin varsayılan değerleri kullanılmıştır.

- *Etkin kuvvetlerdeki hatalar* (örneğin sınır şartlarındaki hatalar).
- Saha ölçümlerindeki hatalar.

Çalışmada sayısal modelin kalibrasyonu ve doğrulanmasından sonra dalga ölçüm verileri ile sayısal model sonuçları zaman serisi şeklinde karşılaştırılmıştır (Şekil 5.61, Şekil 5.62 ve Şekil 5.63). İki veri arasında oldukça yüksek bir uyum elde edilmiştir. Tahminin standart hatası değerleri ise dalga yüksekliklerinde 0.23m (Çizelge 5.37), dalga periyotlarında 0.68 s (Çizelge 5.38) ve dalga yönlerinde ise 70.2° olarak bulunmuştur (Çizelge 5.39).

Sayısal model ve parametrik yöntemlerden sonra çalışma bölgesi için istatistiksel bir dalga modeli kurulmuştur. Bunun için rüzgar-dalga korelasyonundan faydalanılmıştır. Böylelikle korelasyon sonucunda elde edilen denklemlerle bu yöre için mevcut rüzgar verilerinden doğrudan dalga tahmin edilebilecektir. Bu sebeple rüzgar-dalga korelasyonunda etkili olacak parametreler incelenmiştir. Dalga verilerinin elde edilmesinde en önemli faktör rüzgar parametreleridir. Ancak bu parametrelerin yanında su seviyesi değişimleri, gel-git, feç mesafesi gibi parametrelerde etkin olmaktadır. Fakat çalışma bölgesinde yapılan incelemeler sonucunda (günlük su seviyesi değişimleri belirli bir süre boyunca ölçülmüştür) su seviyesi değişimlerinin çok değişken olmadığı gözlenmiştir. Bölüm 4.8'de detaylı olarak anlatıldığı gibi ölçüm sonuçları incelendiğinde günlük maksimum 18 cm, minimum 4 cm ve ortalama 10 cm su seviyesinde değişim mevcut olduğu görülmektedir. Tüm ölçüm günleri değerlendirildiğinde ise maksimum ve minimum su seviyeleri arasındaki farkın 30 cm olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple kurulan korelasyonda su seviyesi değişimi ve gel-git etkilerini içeren su derinliği parametresi dikkate alınmamıştır. Rüzgar parametreleri ise iki kısımda incelenmiştir. İlk olarak rüzgar yönü etkisi incelenmiştir. Rüzgar yönleri için üç farklı alternatif seçilmiş (22.5° ve farklı yönleri içeren iki adet 45° olasılıkları (Şekil 5.70)) ve bunların dalga yükseklikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda en uygun yaklaşımın 22.5°'lik rüzgar yönü aralığı olduğu belirlenmiştir. Rüzgar yönü aralığının incelenmesinden sonra rüzgar esme sürelerinin etkisine geçilmiştir. Rüzgar

esme sürelerinde ise son dört saatte esen rüzgar hızlarının ortalaması alınarak gerçekleştirilen çoklu regresyon analizi sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla en iyi uyumu verdiği gözlenmiştir. Rüzgar-dalga korelasyonu parametrik yöntemlerde olduğu gibi iki farklı rüzgar verisiyle gerçekleştirilmiştir. Bunlar; Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan doğrudan alınan rüzgar verileri ve kalibre edilmiş rüzgar verileridir. Çoklu regresyon analizleri sonucunda elde edilen dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga yönü denklemleri Çizelge 5.35'te verilmektedir. Çizelgede denklemlerin yanında bulunan (1) sayısı Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonucu, (2) sayısı ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonucu olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 5.35 İstatistiksel dalga modeli sonucunda elde edilen ölçüm derinliğindeki dalga parametreleri denklemleri

Belirgin Dalga Yüksekliği	(1)	$H=0.011UF^{0.5}+0.029U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.455$
	(2)	$H=0.009UF^{0.5}+0.012U\sin\Theta+0.068U\cos\Theta-0.039F^{0.5}+0.658$
Ortalama Dalga Periyodu	(1)	$T=0.006UF^{1/2}+0.077U\sin\Theta+0.115U\cos\Theta-0.03F^{1/2}+3.725$
	(2)	$T=0.005UF^{1/2}+0.069U\sin\Theta+0.145U\cos\Theta-0.055F^{1/2}+3.899$
Ortalama Dalga Yönü	(1)	$\theta=-0.086\,U\Theta^{1}+3.15\times10^{-6}U\Theta^{3}-1.9\times10^{-11}\Theta^{5}+88.950$
	(2)	$\theta=0.013\,U\Theta^{1}+2.07\times10^{-8}U\Theta^{3}-6.8\times10^{-13}\Theta^{5}+81.329$

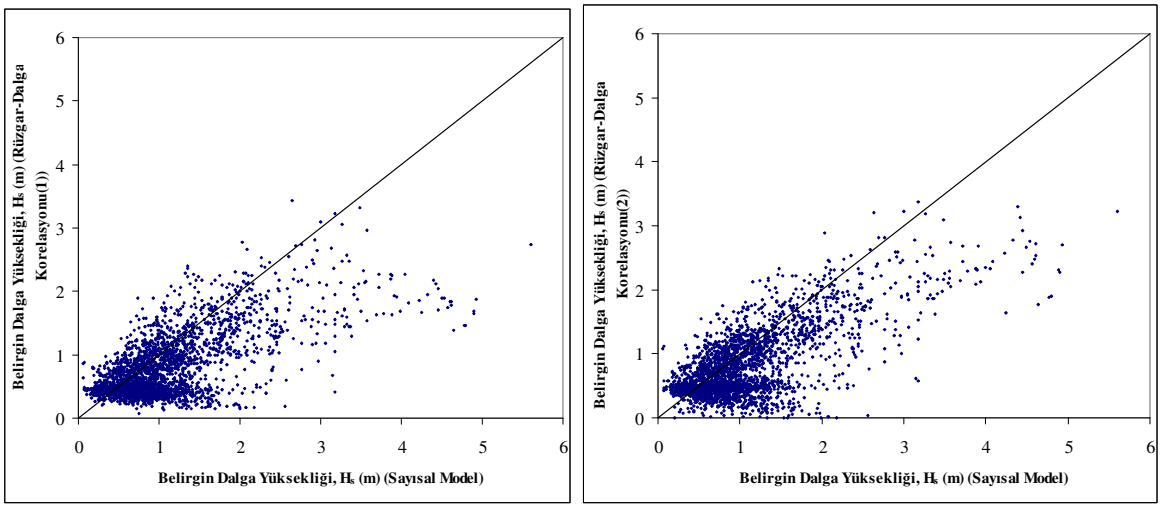
Geliştirilen istatistiksel dalga modeli sonucunda elde edilen dalga parametreleri incelendiğinde dalga yüksekliklerinde tahminin standart hatası değerleri sırasıyla 0.42 m ve 0.39 m (Çizelge 5.37), dalga periyotlarında 0.81 s ve 0.80 s (Çizelge 5.38), dalga yönlerinde ise 85.5° ve 82.4° olarak bulunmuştur (Çizelge 5.39).

Çizelge 5.35'te verilen denklemler kullanılarak Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ve bilinen feç mesafeleri ile Karaburun bölgesi için dalga parametreleri elde edilebilmektedir. Bu ifadeler farklı şekillerde yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda en yüksek determinasyon katsayısı ve en düşük tahminin standart hatasını veren denklemlerdir. Böylelikle yörede istenen uzunlukta mevcut dalga ölçüm verileri olmadığında bu ifadeler

kullanılarak dalga parametreleri elde edilebilecektir. Ancak dalga periyodu ve yönü açısından belirlenen tahminin standart hatası değerleri sayısal model sonuçlarına göre daha yüksek bulunmuştur.

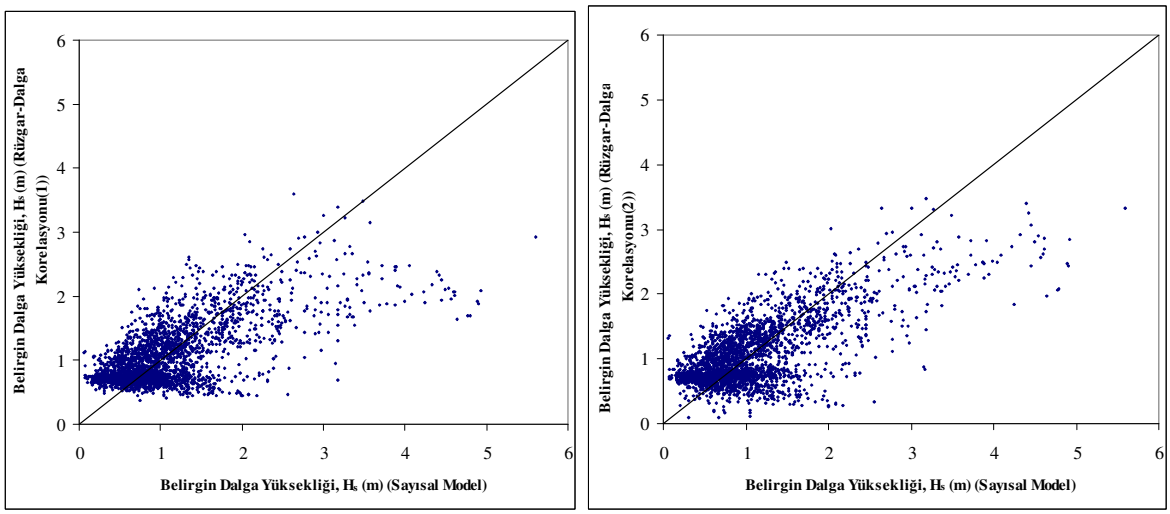
Rüzgar-dalga korelasyonu analizi sonucunda elde edilen denklemlerden hesaplanan dalga parametreleri ölçüm derinliği dalga parametreleridir. Yani 16 m derinliğinde bulunan dalga parametreleridir. Bu sebeple derin deniz belirgin dalga yüksekliklerini elde edebilmek için sayısal modelden hesaplanan derin deniz belirgin dalga yükseklikleri ile 16m'de regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yükseklikleri arasında korelasyon kurulmuştur. Sayısal model ile korelasyon kurulmasının sebebi bu modelden 16 m derinlikte elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçları ile oldukça iyi bir uyum içinde olmasıdır (Tahminin standart hatası değeri 0.23m'dir) (Şekil 5.61 ve Şekil 5.69a).

Şekil 5.115'te sayısal modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliklerine karşılık regresyon analizi sonucunda elde edilen belirgin dalga yükseklikleri görülmektedir. Şekil 5.115(a)'da Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonuçları ile sayısal model sonuçları arasındaki ilişki Şekil 5.115(b)'de ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonuçları ve sayısal model sonuçları arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 5.116'da ise sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık korelasyon sonucunda elde edilen derin deniz belirgin dalga yükseklikleri görülmektedir. Yine Şekil 5.116(a)'da Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile kurulan istatistiksel dalga modeli sonuçları ile sayısal model sonuçları arasındaki ilişki Şekil 5.116(b)'de ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonuçları ve sayısal model sonuçları arasındaki ilişki verilmektedir.



a) b)

Şekil 5.115 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık regresyon analizi sonucunda elde edilen ölçüm derinliğindeki belirgin dalga yükseklikleri



a) b)

Şekil 5.116 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık regresyon analizi sonucunda elde edilen derin deniz belirgin dalga yükseklikleri

Sonuç olarak çalışma bölgesi için derin deniz belirgin dalga yüksekliği hesaplanmasında Çizelge 5.36'da verilen denklemler kullanılabilmektedir. Çizelgede denklemlerin yanında bulunan (1) sayısı Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonucu, (2) sayısı ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile kurulan rüzgar-dalga korelasyon sonucu olduğunu belirtmektedir. Eğer rüzgar parametreleri ve feç mesafeleri belli ise bu denklemler yardımı ile bu bölgede derin deniz belirgin dalga yükseklikleri hesaplanabilir.

Çizelge 5.36 Derin deniz dalga parametreleri denklemleri

Belirgin Dalga Yüksekliği	(1)	$H=0.01UF^{0.5}+0.028U\sin\Theta+0.026U\cos\Theta-0.015F^{0.5}+0.74$
	(2)	$H=0.009UF^{0.5}+0.011U\sin\Theta+0.065U\cos\Theta-0.038F^{0.5}+0.93$

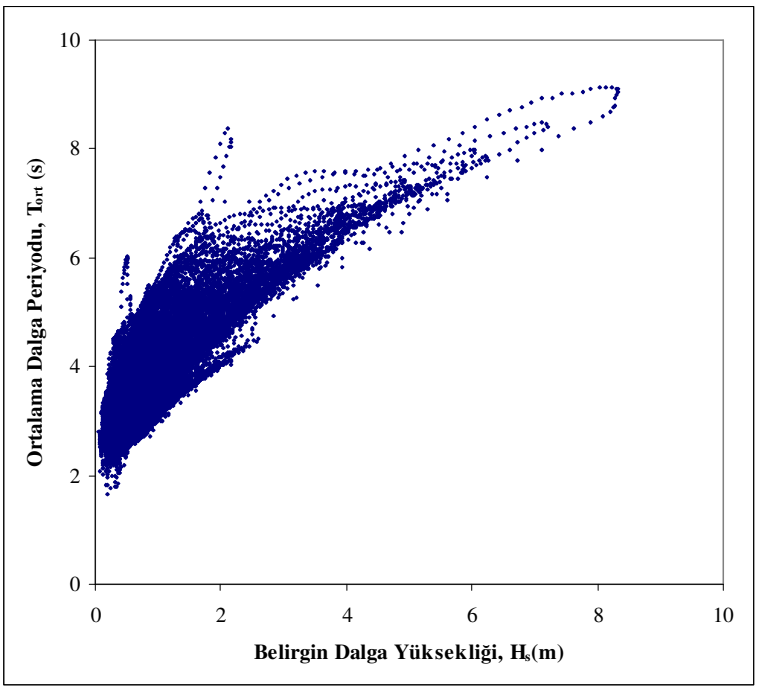
Dalga periyotlarının belirlenmesinde yukarıda anlatılan yöntemlerin dışında ortak dalga periyodu-dalga yüksekliği dağılımı yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntemde sayısal model sonuçlarından elde edilen dalga periyotlarına karşılık dalga yüksekliklerinin ortak dağılımı belirlenmiştir. Ortak dağılım sonucunda (5.17) ifadesiyle belirtilen aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$T = 4.29H^{0.32}$$

Bu yöntemden bulunan tahminin standart hatası değeri (0.61 s) ise diğer yöntemlerden bulunan tahminin standart hatası değerlerine göre düşük elde edilmiştir (Çizelge 5.38).

Dalga periyotlarını yukarıda anlatılan yöntemler dışında belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu ilişkisinden de hesaplamak mümkündür. Bunun için sayısal model sonuçlarından derin deniz belirgin dalga yüksekliğine karşılık ortalama dalga periyodu değerleri saçılım grafiği çizdirilmiştir (Şekil 5.117). Bu değerlerden yani toplam üç yıllık derin deniz belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ilişkisinden dalga dikliği parametresi elde edilmiştir. Çalışma bölgesinde elde edilen dalga dikliği (5.20) ifadesi ile verilmektedir.

$$\frac{H_{s0}}{L_0} = 0.043 \qquad (5.20)$$



Şekil 5.117 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ilişkisi

Aynı şekilde dalga yönlerinin belirlenmesinde yukarıda anlatılan yöntemlerin dışında ortak rüzgar yönü-dalga yönü dağılımı kullanılmıştır. Saatlik olarak elde edilen Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar esme yönlerine karşılık dalga ölçüm yönlerinin ortak dağılımı belirlenmiştir. Bu dağılım sonucunda aşağıda belirtilen (5.19) ifadesiyle verilen dalga yönü denklemi elde edilmiştir.

$$\theta = 0.0017\Theta^2 - 0.533\Theta + 115.72$$

Dalga yönünün belirlenmesinde kullanılan bu yöntemde ise tahminin standart hatası değeri 83.9° olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.39).

Çizelge 5.37, Çizelge 5.38 ve Çizelge 5.39'da sırasıyla belirgin dalga yükseklikleri, ortalama dalga periyotları ve ortalama dalga yönleri için farklı dalga tahmin yöntemlerinin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen tahminin standart hatası değerleri görülmektedir. Burada dalga tahmin yöntemlerinin yanında bulunan (1) sayısı Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin doğrudan kullanılması ile yapılan hesaplama yöntemi olduğunu, (2) sayısı ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar değerlerinin düzeltilerek kullanılması ile yapılan hesaplama yöntemi olduğunu belirtmektedir. Çizelge 5.37 incelendiğinde en düşük tahminin standart hatası değerini veren yöntemin sayısal model olduğu görülmektedir. Bu değeri çalışma bölgesi için kurulan istatistiksel dalga modeli takip etmektedir. Çizelge 5.38 incelendiğinde ise dalga periyotları

için en düşük tahminin standart hatası değeri ortak dağılım yönteminde bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemi sayısal model ve daha sonrasında rüzgar-dalga korelasyonu takip etmektedir. Çizelge 5.39'da dalga yönleri için elde edilen tahminin standart hatası değerleri görülmektedir. Burada da sayısal modelden elde edilen tahminin standart hatası değerinin en düşük olduğu belirlenmektedir.

Çizelge 5.37 Belirgin dalga yükseklikleri için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri

Tahmin Yöntemi	**Tahminin Standart Hatası (m)**
SMB(1)	0.94
SMB(2)	0.81
SPM(1)	0.87
SPM(2)	0.84
İstatistiksel Dalga Modeli(1)	0.42
İstatistiksel Dalga Modeli(2)	0.39
Sayısal Modelleme (MIKE 21 SW)	0.23

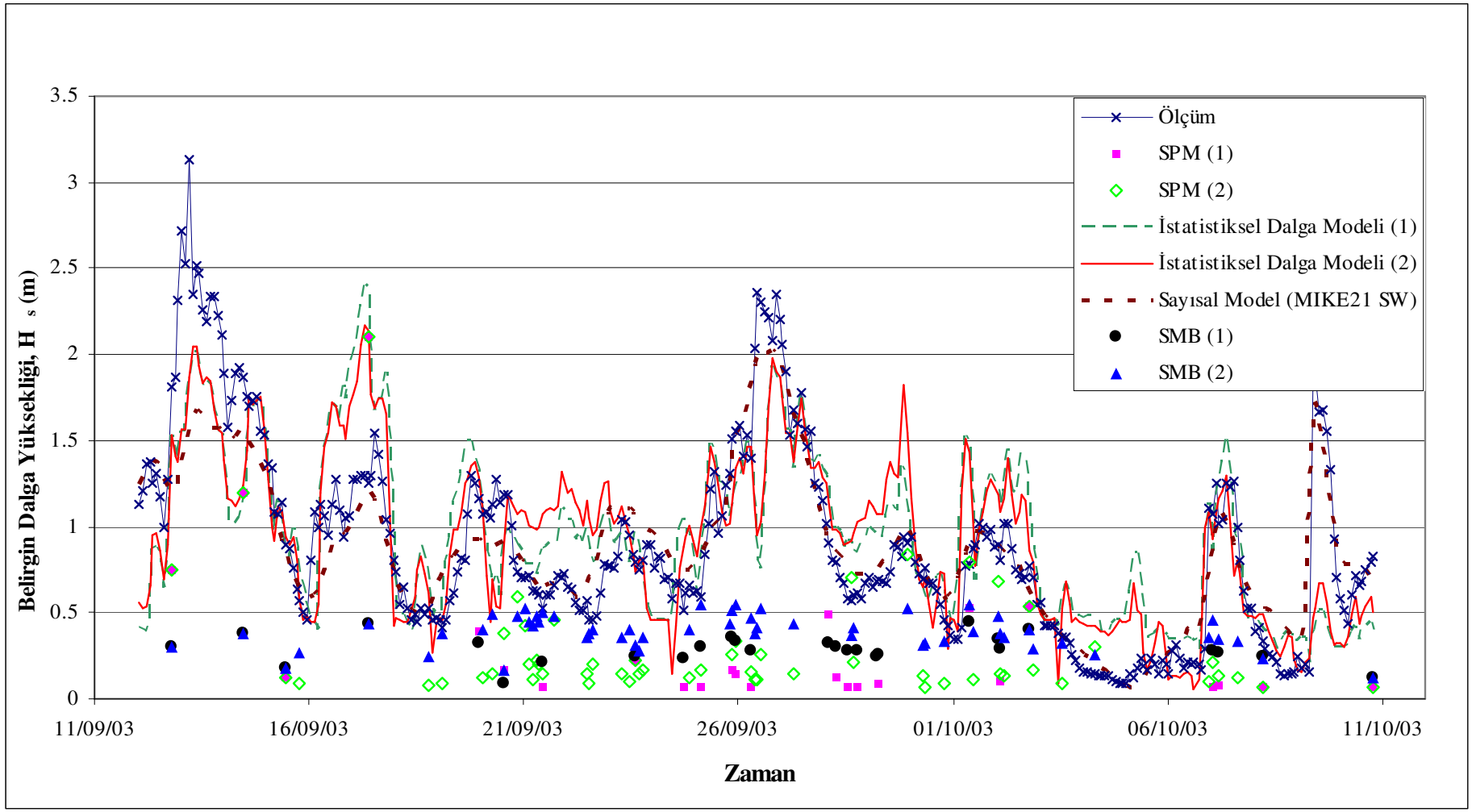
Çizelge 5.38 Ortalama dalga periyotları için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri

Tahmin Yöntemi	**Tahminin Standart Hatası (s)**
SMB(1)	2.72
SMB(2)	3.6
SPM(1)	2.84
SPM(2)	2.85
İstatistiksel Dalga Modeli(1)	0.81
İstatistiksel Dalga Modeli(2)	0.80
Sayısal Modelleme (MIKE 21 SW)	0.68
Ortak Dağılım	0.61

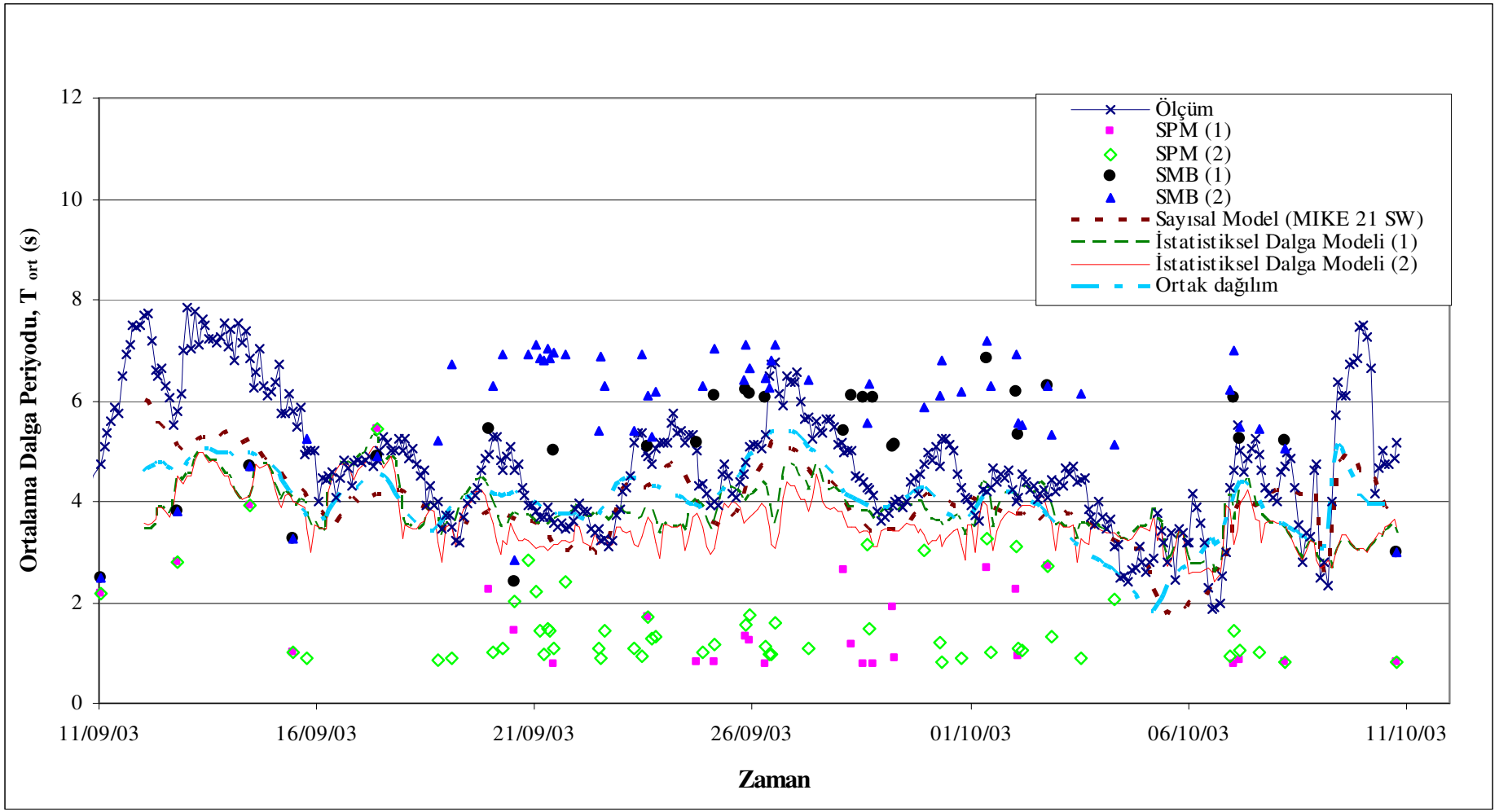
Çizelge 5.39 Ortalama dalga yönleri için dalga tahmin yöntemlerinden elde edilen tahminin standart hatası değerleri

Tahmin Yöntemi	**Tahminin Standart Hatası (°)**
SMB(1)	84.8
SMB(2)	99.5
SPM(1)	88.4
SPM(2)	100.1
İstatistiksel Dalga Modeli(1)	85.5
İstatistiksel Dalga Modeli(2)	82.4
Sayısal Modelleme (MIKE 21 SW)	70.2
Ortak Dağılım	83.9

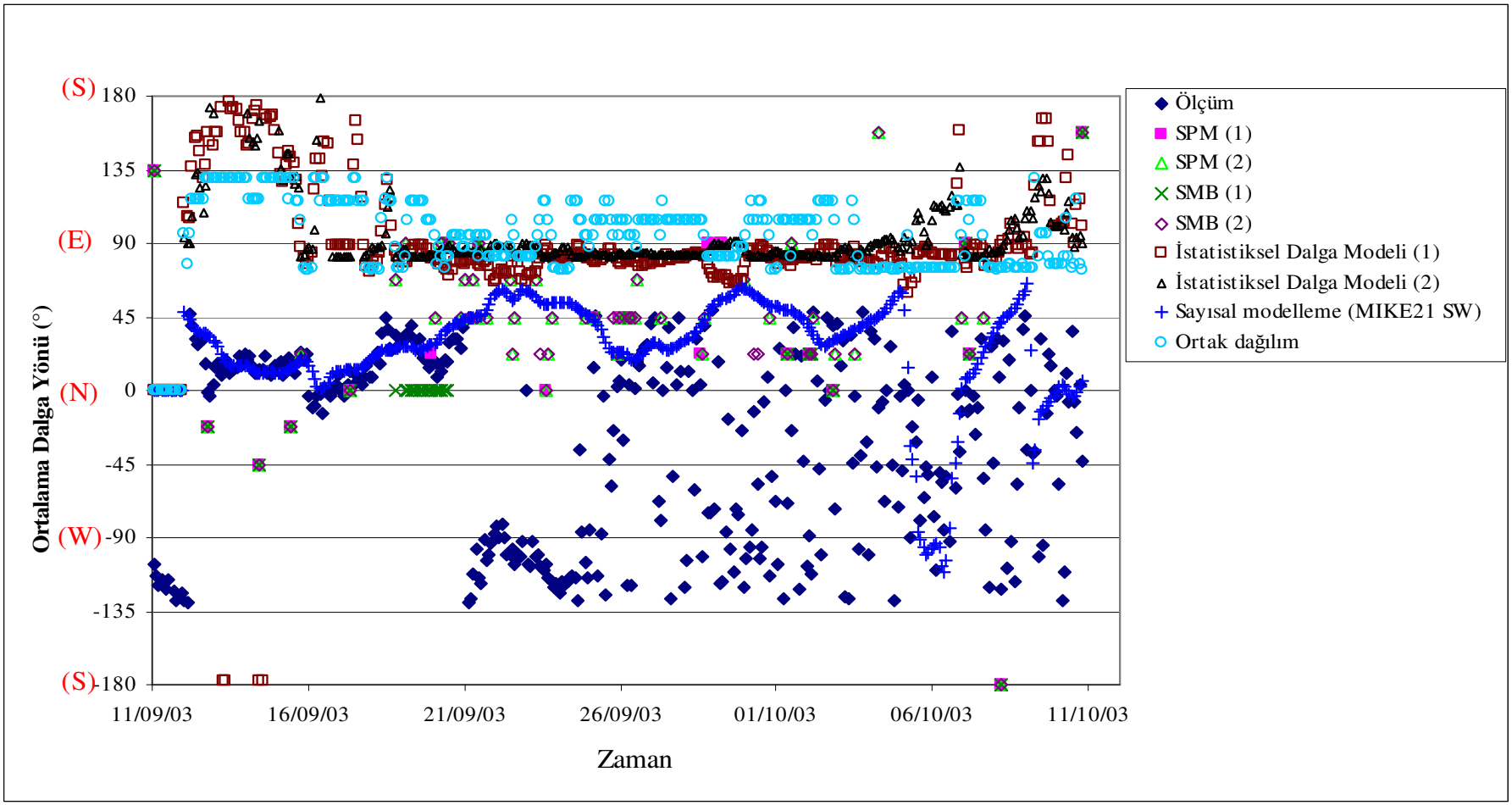
Şekil 5.118, Şekil 5.119 ve Şekil 5.120'de sırasıyla belirgin dalga yükseklikleri, ortalama dalga periyotları ve ortalama dalga yönleri için çalışma bölgesi dalga tahmininde kullanılan tüm yöntemlerin ölçüm verileriyle zaman serisi şeklinde karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 5.118 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003)



Şekil 5.119 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen ortalama dalga periyotları değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003)



Şekil 5.120 Dalga tahmin yöntemleri sonucunda elde edilen ortalama dalga yönleri değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla zaman serisi şeklinde karşılaştırılması (12 Eylül 2003-11 Ekim 2003)

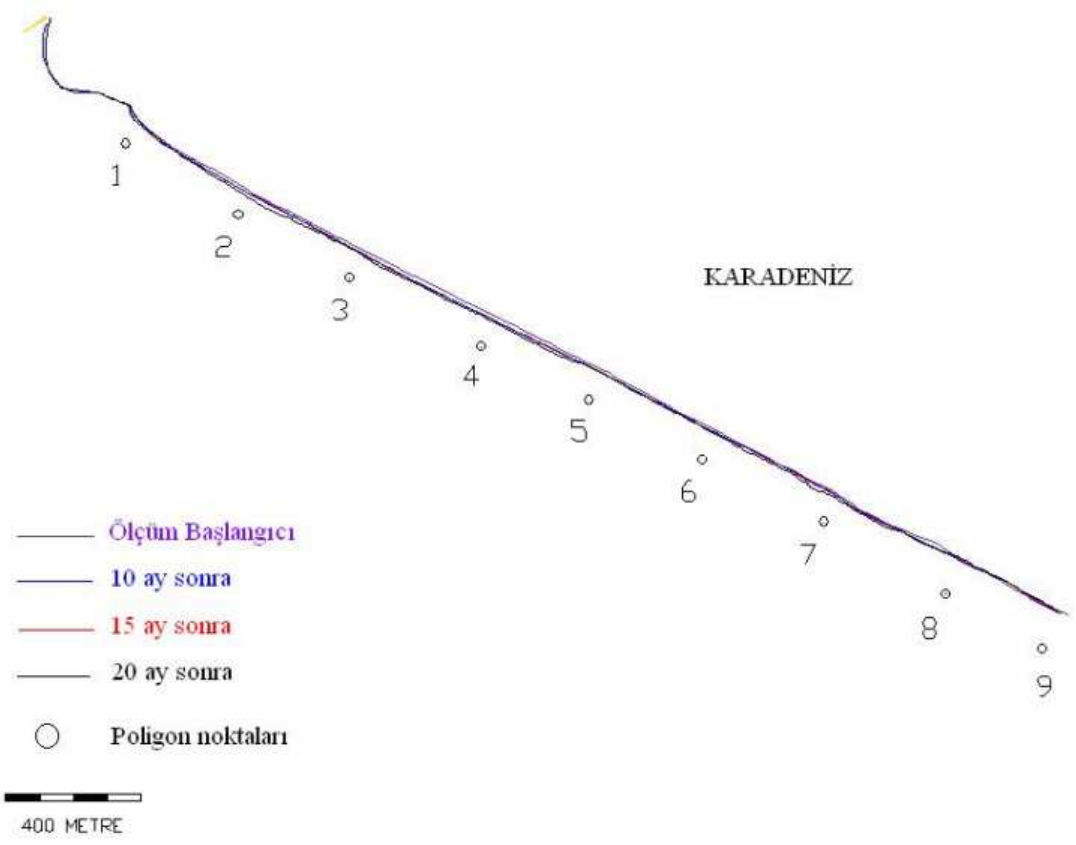
6. KIYI ÇİZGİSİNİN SAYISAL MODELLENMESİ

6.1 Kıyı Çizgisi Saha Verilerinin Değerlendirilmesi

6.1.1 Kıyı Çizgisi Ölçümleri

Karaburun bölgesinde dört farklı tarihte Bölüm 4.5'te detaylı olarak anlatılan Real Time Kinematic (RTK) GPS yöntemiyle kıyı çizgisinin ölçümü yapılmıştır. Farklı dönemlerde yapılan ölçümlerle kıyı çizgisinin mevsimsel olarak değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Kıyı çizgisi ölçümü Eylül 2004-Mayıs 2006 arasında (Eylül 2004, Temmuz 2005, Aralık 2005 ve Mayıs 2006) gerçekleştirilmiştir.

Toplanan veriler nokta dosyası olarak Netcad haritacılık yazılımında birleştirilerek, dört farklı döneme ait kıyı çizgileri şekilde görüldüğü gibi belirlenmiştir. Şekil 6.1'de poligon noktalarının kıyıdaki konumları görülmektedir.



Şekil 6.1 Kıyı çizgisi ölçümünün yapıldığı poligonlar ve kıyı çizgisi değişimi (Çevik vd., 2006)

Poligon noktalarından kıyı çizgisinin kıyıya dik ölçümleri kıyı çizgisi değişimini vermektedir. Seçilen hat boyunca aralarında yaklaşık 400 m olacak şekilde 9 adet poligon noktası

seçilmiştir. Böylece başlangıç poligonundan (1 nolu poligon) itibaren kıyı boyu doğrultusunda 3200 m mesafe boyunca ölçümler gerçekleştirilmiştir.

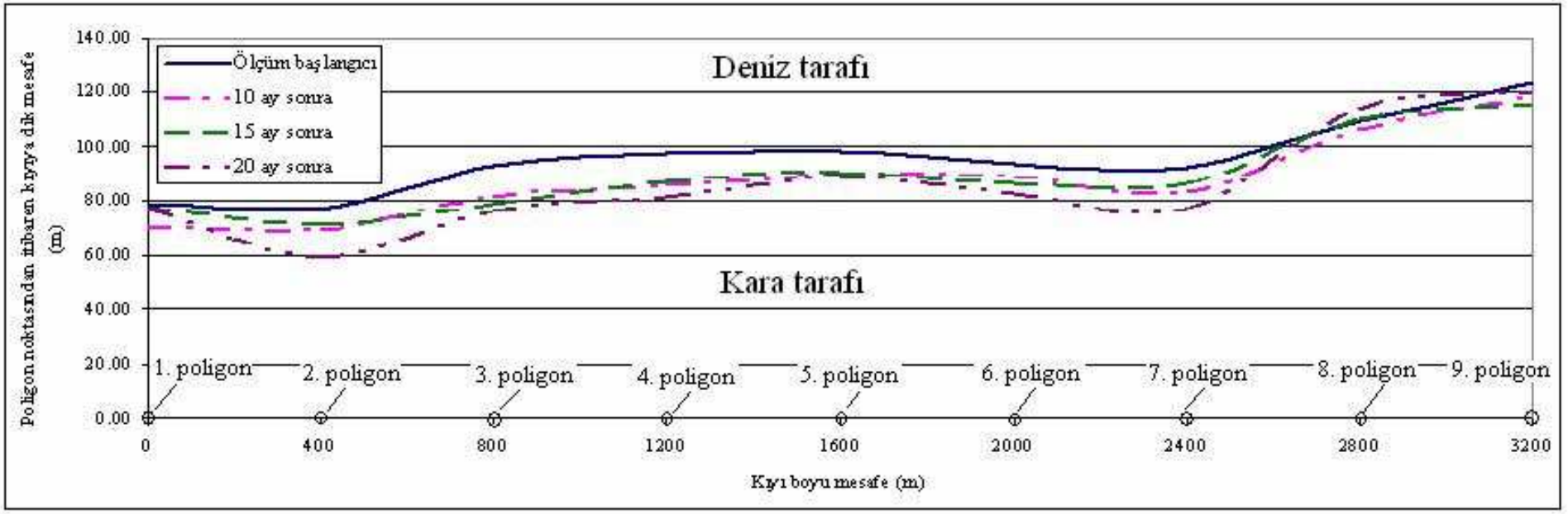
Çizelge 6.1'de poligon noktalarından itibaren ölçülen kıyıya dik mesafeler Çizelge 6.2'de ise ilk ölçüme göre 10 ay, 15 ay ve 20 ay sonra gözlenen kıyı çizgisinin göreceli değişim miktarları görülmektedir. Çizelge 6.1 ve 6.2'ye göre 8. poligonun dışında tüm poligonlarda erozyon gözlenmiştir. Yani kıyı çizgisi değişimi kara tarafına doğru çekilme şeklinde gerçekleşmiştir. Fakat yukarı kıyı tarafında (8. ve 9. poligon mevkilerinde) diğer poligon noktalarına göre kıyıda daha az geri çekilme gözlenmiştir. Şekil 6.2'de Çizelge 6.1'de belirtilen değerlerin grafik olarak gösterimi verilmektedir. Şekil 6.3'te ise kıyı çizgisi değişiminin sayısal modelinde kullanılan Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005 tarihlerine ait kıyı çizgileri görülmektedir.

Çizelge 6.1 Poligon noktalarına göre kıyıya dik ölçüm mesafeleri (Çevik vd., 2006)

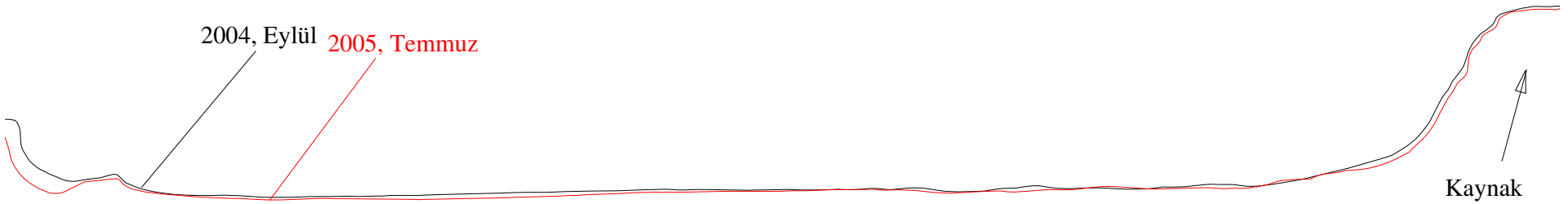
	Dönemlere Göre Ölçüm Mesafeleri (m)			
Poligon no	Ölçüm Başlangıcı	10 ay sonra (Temmuz, 2005)	15 ay sonra (Aralık, 2005)	20 ay sonra (Mayıs, 2006)
1	79.15	70.49	77.62	77.62
2	77.26	69.53	71.05	58.88
3	92.83	81.54	78.79	76.11
4	97.53	85.69	87.10	81.36
5	98.19	89.43	90.16	89.27
6	93.49	88.94	86.25	82.62
7	92.09	83.13	86.66	76.97
8	109.53	106.16	110.12	113.93
9	123.51	118.26	115.61	120.56

Çizelge 6.2 Ölçüm başlangıç tarihine göre diğer dönemlerdeki göreceli kıyı çizgisi değişim miktarı (Çevik vd., 2006)

	Kıyı çizgisi değişim miktarı (m)		
Poligon no	10 ay sonra (Temmuz, 2005)	15 ay sonra (Aralık, 2005)	20 ay sonra (Mayıs, 2006)
1	-8.66	-1.53	-1.53
2	-7.73	-6.21	-18.38
3	-11.29	-14.04	-16.72
4	-11.84	-10.43	-16.17
5	-8.76	-8.03	-8.92
6	-4.55	-7.24	-10.87
7	-8.96	-5.43	-15.12
8	-3.37	0.59	4.4
9	-5.25	-7.9	-2.95



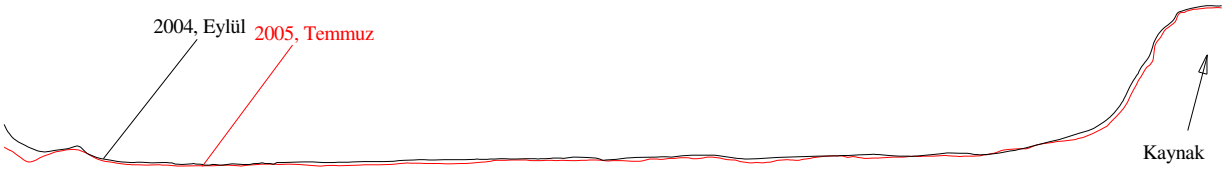
Şekil 6.2 Ölçüm dönemlerine göre kıyı çizgisi değişimi (Çevik vd., 2006)



Şekil 6.3 Kıyı çizgisi değişimi sayısal modelinde kullanılan Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005 tarihli kıyı çizgisi ölçümleri

6.1.2 Uydu Görüntüleri

Çalışmada Bölüm 4.6'da anlatıldığı gibi çok zamanlı ve coğrafi referanslı IKONOS uydu görüntüleri (Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005 ölçümleri) kullanılmıştır (Şekil 4.25, 4.26). Karaburun kıyı çizgisi bu tarihlerdeki uydu görüntüleri kullanılarak ERDAS yazılımı yardımıyla sayısallaştırılmıştır. IKONOS uydusu iki sensöre sahiptir. Pankromatik sensör 1 m çözünürlüğe sahipken multispektral sensör 4 m çözünürlüğe sahiptir. Şekil 6.4'te Eylül, 2004 ve Temmuz, 2005 tarihlerine ait uydu görüntülerinin sayısallaştırılmış şekli görülmektedir. En sol kısımda Karaburun Balıkçı Barınağı'na ait ikincil dalgakıran, en sağda ise bu kıyı şeridinde bulunan katı madde kaynağı gibi çalışan kömür ocaklarının bulunduğu burun görülmektedir.

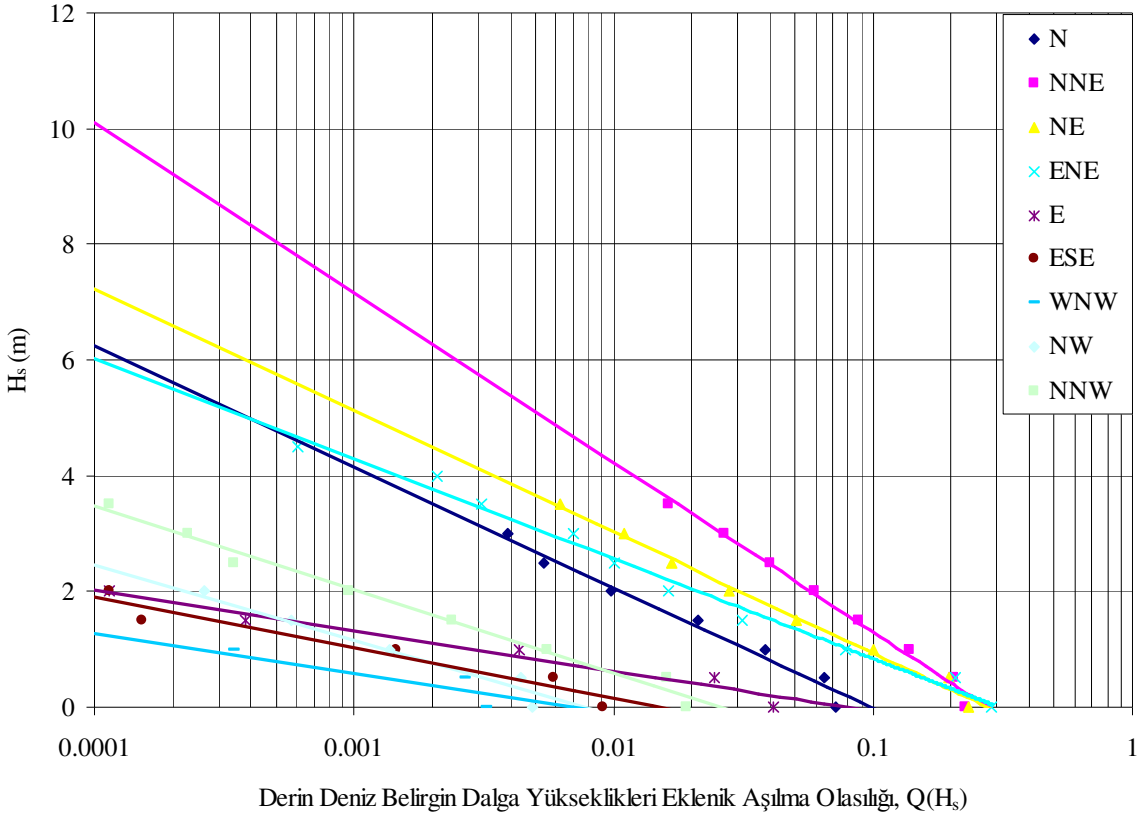


Şekil 6.4 Yıllara göre sayısallaştırılmış uydu görüntüleri

6.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Modellenmesi

6.2.1 CERC (1984) ve Kamphuis (1991) Yöntemleri ile Kıyı Boyu Katı Madde Miktarının Belirlenmesi

Karaburun kıyısında gerçekleşen kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için uzun dönemli dalga iklimi çalışmasına gerek duyulmaktadır. Bu sebeple Bölüm 5'te detaylı olarak analizleri anlatılan dalga verilerinden yararlanılmıştır. Sayısal model sonuçlarından derin deniz için elde edilen belirgin dalga yükseklikleri eklenik aşılma olasılıkları Şekil 6.5'te görülmektedir. Şekilde Karaburun kıyısını etkileyen dalga yönleri için aşılma olasılıkları verilmiştir. Derin deniz belirgin dalga yükseklikleri toplam üç yıllık sayısal model sonuçlarından elde edilmiş ve uzun dönem aşılma olasılıkları hesaplanmıştır.



Şekil 6.5 Sayısal modelden elde edilen derin deniz belirgin dalga yükseklikleri eklenik aşılma olasılığı dağılımları

Çizelge 6.3'te sayısal modelden elde edilen dalga verilerine göre uzun dönem derin deniz belirgin dalga yükseklikleri olasılık denklemleri verilmiştir.

Çizelge 6.3 Uzun dönem derin deniz belirgin dalga yüksekliği olasılık denklemleri (Şekil 6.5'e göre)

Yön	**Derin Deniz Belirgin Dalga Yüksekliği Denklemi (m)**
N	H_s= -0.9062 Ln Q(H_s)-2.1079
NNE	H_s= -1.2719 Ln Q(H_s)-1.6299
NE	H_s= -0.9101 Ln Q(H_s)-1.1674
ENE	H_s= -0.7499 Ln Q(H_s)-0.8891
E	H_s= -0.3026 Ln Q(H_s)-0.7723
ESE	H_s= -0.3790 Ln Q(H_s)-1.5964
WNW	H_s= -0.2963 Ln Q(H_s)-1.45889
NW	H_s= -0.5656 Ln Q(H_s)-2.7577
NNW	H_s= -0.6240 Ln Q(H_s)-2.2837

Katı madde taşınımın hesaplarında sayısal modelden elde edilen ve kıyı çizgisi ölçüm dönemleri ile aynı tarihlere karşılık gelen bir yıllık dalga verisi kullanılmıştır.

CERC(1984) Yöntemi

Bir dalga enerji modeli olan CERC (1984) ifadesi, kırılma bölgesinin birim genişliği için toplam kum taşınımını tanımlayan bir ifadedir. En yaygın kullanılan ifade olmasına rağmen taban malzemesi, kıyı eğimi özellikleri ve kırılma bölgesi genişliğini dikkate almadığı için bazı problemler için uygun olmayan sınırlamalara sahiptir.

$$Q = 2.03\,10^{6}\, H_0^{5/2} \sin 2\alpha_0 \qquad (\mathrm{m}^3/\mathrm{yıl}) \tag{6.1}$$

Göz önüne alınan kıyı bölgesinde dalga iklimindeki değişimler nedeniyle bir yıllık bir dönemde etkin kıyı boyu katı madde taşınımını belirlemek için katı madde hareketine yol açacak dalgaların yükseklikleri, yönleri ve etki süreleri belirlenmelidir. Böylece H_0 yüksekliğinde α_0 açısına sahip dalganın bir yılda kıyıda etki etme yüzdesi f ise (6.1) ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir (CERC, 1984):

$$Q = 2.03\,10^{6}\, f\; H_0^{5/2}\, F(\alpha_0) \tag{6.2}$$

burada;

$$\mathrm{F}(\alpha_0) = \left[(\cos\alpha_0)^{1/4} (\sin 2\alpha_0) \right] \tag{6.3}$$

F(α_0): Yön terimi (Yüksel, 2005)

$\alpha_0 = 0^{o}$ için F(α_0)= 0.37

$\alpha_0 = 45^{o}$ için F(α_0)= 0.822

$\alpha_0 = 90^{o}$ için F(α_0)= 0.261

Karaburun kıyısını etkileyen dalga yönleri Şekil 6.6'da görülmektedir. CERC (1984) yöntemi ile yukarıdaki veriler doğrultusunda bu kıyıdaki net ve toplam katı madde miktarı hesaplanmıştır (Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5). CERC'e (1984) göre hesaplamalarda etki etme sürelerinin yüzdesi %1'den küçük olan dalgalar dikkate alınmamıştır.

Hesaplamalara göre kıyı boyu taşınan toplam ve net katı madde miktarları:

$Q_{sağ\text{-}sol}$= (NNE+NE+ENE+E+ESE)

= (97047+215176+280088+15510+0)=607821 m^3/yıl

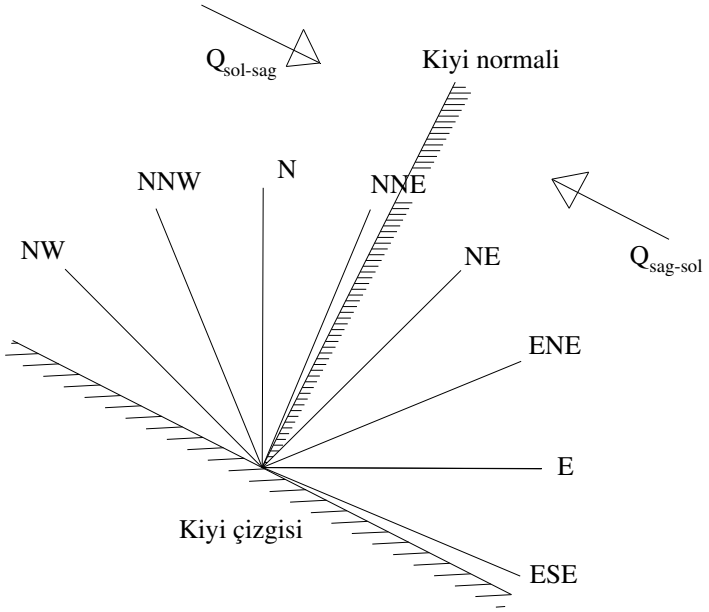
$Q_{sol\text{-}sağ}$= (NNE+N+NNW+NW)

= (97047+57473+10009+0)=164529 m^3/yıl

Q_{net}= 443292 m^3/yıl

Q_{top}= 772350 m^3/yıl

olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü gibi Karaburun kıyı çizgisi boyunca kırılma bölgesi içinde 443292 m^3/yıl toplam katı madde ESE yönünden WNW yönüne taşınmaktadır. Bir yıl içinde taşınan toplam katı madde ise 772350 m^3/yıl'dır.



Şekil 6.6 Karaburun kıyısını etkileyen dalga yönleri

Çizelge 6.4 CERC (1984) yöntemi ile yönlere göre katı madde taşınım miktarları

H (m)	Hort (m)	N			NNE			NE		
		F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)	F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)	F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)
0-0.5	0.25	0.78601	0.00936	466.7	0.15631	0.02568	254.7	0.58046	0.03973	1462.8
0.5-1.0	0.75	0.78601	0.01644	12777.2	0.15631	0.06199	9581.7	0.58046	0.08699	49931.0
1.0-1.5	1.25	0.78601	0.01587	44229.3	0.15631	0.0484	26830.6	0.58046	0.04224	86943.9
1.5-2.0	1.75				0.15631	0.02557	32872.5	0.58046	0.0161	76838.1
2.0-2.5	2.25				0.15631	0.01142	27507.1			
Toplam (m^3/yıl)				57473			97047			215176

Çizelge 6.4 Devam

H (m)	Hort (m)	ENE			E			NNW		
		F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)	F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)	F(αo)	f(%)	Q (m³/yıl)
0-0.5	0.25	0.92232	0.07774	4548.5	0.66408	0.01404	591.5			
0.5-1.0	0.75	0.92232	0.11781	107449.9	0.66408	0.02272	14918.2	0.88666	0.01142	10009.2
1.0-1.5	1.25	0.92232	0.02386	78035.9						
1.5-2.0	1.75	0.92232	0.01187	90053.7						
2.0-2.5	2.25									
Toplam (m^3/yıl)				280088			15510			10009

Kamphuis (1991) Yöntemi

Kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan ampirik formüllerden biri de Kamphuis (1991) ifadesidir. Bu formülün elde edilmesinde boyut analizi yöntemi kullanılmıştır. Kamphuis (1991), (6.4) eşitliği ile kıyı boyu taşınımında dalga dikliği (veya periyodu), kıyı eğimi ve tane çapının etkisini de dikkate almaktadır.

$$Q = 6.4\times10^{4} \times H_{sb}^{2} \times T_{p}^{1.5} \times m^{0.75} \times d_{50}^{-0.25} \times \sin^{0.6}\left(2\alpha_{b}\right) \tag{6.4}$$

burada;

Q= Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı (m^3/yıl)

H_{sb}= Kırılma derinliğindeki belirgin dalga yüksekliği (m)

T_p= Pik dalga periyodu (s)

m= Kıyı eğimi

d_{50}= Ortalama tane çapı (m)

Çalışmada ilk olarak Kamphuis (1991) ifadesinde kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Dalga yüksekliği değerlerinin hesaplanması için Şekil 6.5'te verilen uzun dönem dalga istatistiğinden ölçüm dönemine karşılık gelen bir yıllık dalga verisinin oluşma yüzdeleri belirlenmiştir. Kıyı çizgisi değişimi belirlenirken her yönden gelecek en büyük dalga yüksekliği değerlerinden çok, ortalama dalga yükseklikleri değerleri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.3'te kıyıyı etkileyen dalga yönleri için derin deniz belirgin dalga yükseklikleri ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.5 Derin deniz belirgin dalga yüksekliği ortalama değerleri

Yön	**$H_{s0,ort}$**
N	1.31
NNE	1.33
NE	1.21
ENE	0.93
E	0.61
ESE	0.79
NW	0.84
NNW	0.89

Kamphuis (1991) ifadesinde kırılma bölgesindeki belirgin dalga yükseklikleri kullanılmaktadır. Bu sebeple kırılma hesapları yapılarak Çizelge 6.5'te verilen ortalama dalga yüksekliklerinin ve dalga geliş açılarının kırılma bölgesindeki değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.6).

Çizelge 6.5'te verilen dalga yüksekliği değerlerine karşılık dalga periyotlarının belirlenmesi gerekmektedir. Dalga periyodu değerlerinin bulunabilmesi için ise Bölüm 5.6.2'de detaylı olarak anlatılan ve (6.5) eşitliği ile verilen dalga dikliği parametresinden faydalanılmıştır.

$$\frac{H_{s0}}{L_0} = 0.043 \qquad (5.20)\ (6.5)$$

(6.5) eşitliği ile verilen dalga dikliği parametresi sayısal modelden elde edilen toplam üç yıllık derin deniz belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu ilişkisinden bulunmuştur. Bu ifade kullanılarak hesaplanan derin deniz belirgin dalga yüksekliklerine karşılık ortalama dalga periyodu değerleri elde edilmiştir (Çizelge 6.6). Ancak Kamphuis (1991) ifadesinde pik dalga periyodu kullanılmaktadır. Bu sebeple Goda'nın (2000) farklı spektrum modelleri için verdiği (6.6) eşitliği ile ortalama dalga periyotları ve pik dalga periyotları arasında bir bağıntı elde edilmiş ve eşitlikteki katsayı bu çalışma için 1.1 olarak alınmıştır.

$$T_p = (1.05 \sim 1.7)\, T_{ort} \qquad (6.6)$$

Çizelge 6.6'da kırılma bölgesindeki dalga yükseklikleri, dalga geliş açıları, ortalama dalga periyotları ve pik dalga periyotları verilmektedir.

Çizelge 6.6 Kamphuis (1991) yöntemi için yıllık dalga iklimi

Yön	**H_{sb}**	**α_b**	**T_{ort}**	**T_p**	**Frekans (%)**
N	1.24	15	4.42	4.86	5.54
NNE	1.31	3	4.45	4.89	19.33
NE	1.17	11	4.24	4.67	21.76
ENE	0.84	22	3.73	4.10	25.55
E	0.45	28	3.01	3.31	3.95
ESE	0.27	22	3.43	3.77	1.19
NW	0.53	27	3.54	3.89	0.51
NNW	0.76	25	3.64	4.01	1.79

Kamphuis (1991) eşitliği incelendiği zaman kırılan dalga yükseklikleri, dalga kırılma açısı, pik dalga periyodunun yanında kıyı eğimi ve ortalama tane çapına da gereksinim duyulduğu görülmektedir. Karaburun kıyı eğimi m=0.05 ve ortalama tane çapı d_{50}=1.53 mm olarak hesaplanmıştır.

(6.4) eşitliği ile verilen Kamphuis (1991) ifadesi her bir dalga yönü için oluşma frekansları ile çarpılarak uygulanmış ve katı madde taşınım debileri hesaplanmıştır.

Hesaplamalara göre kıyı boyu taşınan toplam ve net katı madde miktarları:

$Q_{sağ\text{-}sol}$= (NNE+NE+ENE+E+ESE)= (31670+57035+41128+1472+174)=131479 m^3/yıl

$Q_{sol\text{-}sağ}$= (NW+NNW+N+NNE)= (334+2421+20606+31670)=55031 m^3/yıl

Q_{net}= 76448 m^3/yıl

Q_{top}= 186510 m^3/yıl

Çizelge 6.7'de her yönden gelen katı madde taşınım debileri verilmiştir.

Çizelge 6.7 Yönlere göre kıyı boyu taşınım miktarları

Yön	**Q (m^3/yıl)**
N	20606
NNE	31670
NE	57035
ENE	41128
E	1472
ESE	174
NW	334
NNW	2421

6.2.2 Katı Madde Taşınımının Sayısal Modellemesi (LITDRIFT)

Katı madde taşınımı, CERC (1984) ve Kamphuis (1991) yöntemlerine ek olarak sayısal model yardımıyla LITDRIFT yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Kıyı morfolojisi çalışmalarında önemli bir yere sahip olan katı madde bütçe analizini içeren LITDRIFT modülü bir kıyı profili için dalga yüksekliğinin kıyıya dik dağılımını, dalga kabarmasını ve kıyı boyu akıntısını modellemektedir. Deterministik bir sayısal model olan bu modül hesaplamalarda iki temel modelden faydalanmaktadır (DHI, 2003c):

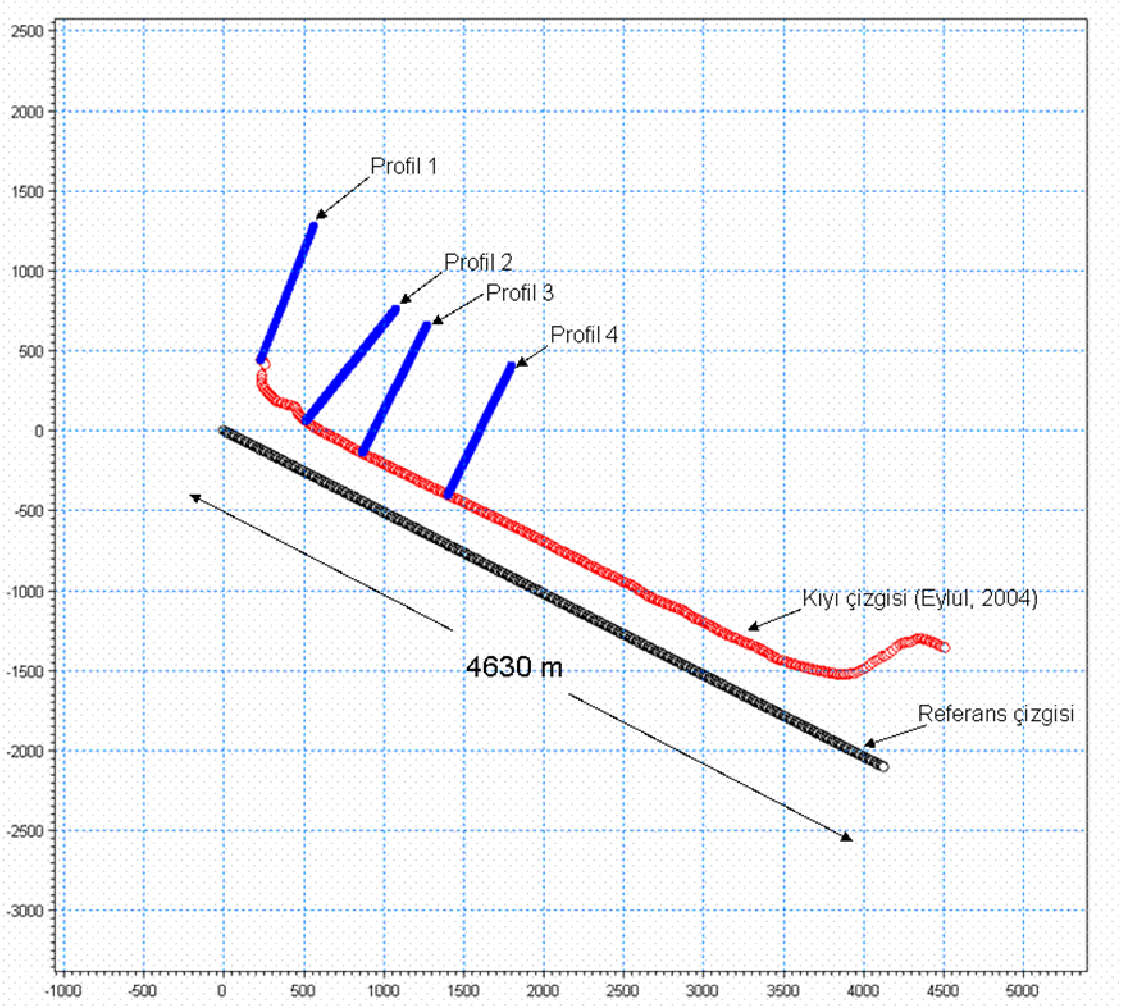
- Hidrodinamik model,
- Katı madde taşınım modeli.

LITDRIFT, uzun ve üniform bir kıyı boyunca dalga kaynaklı akıntı ve koheziv olmayan kıyı boyu katı madde taşınımı çalışmalarında kullanılabilmektedir.

LITDRIFT modülü ile;

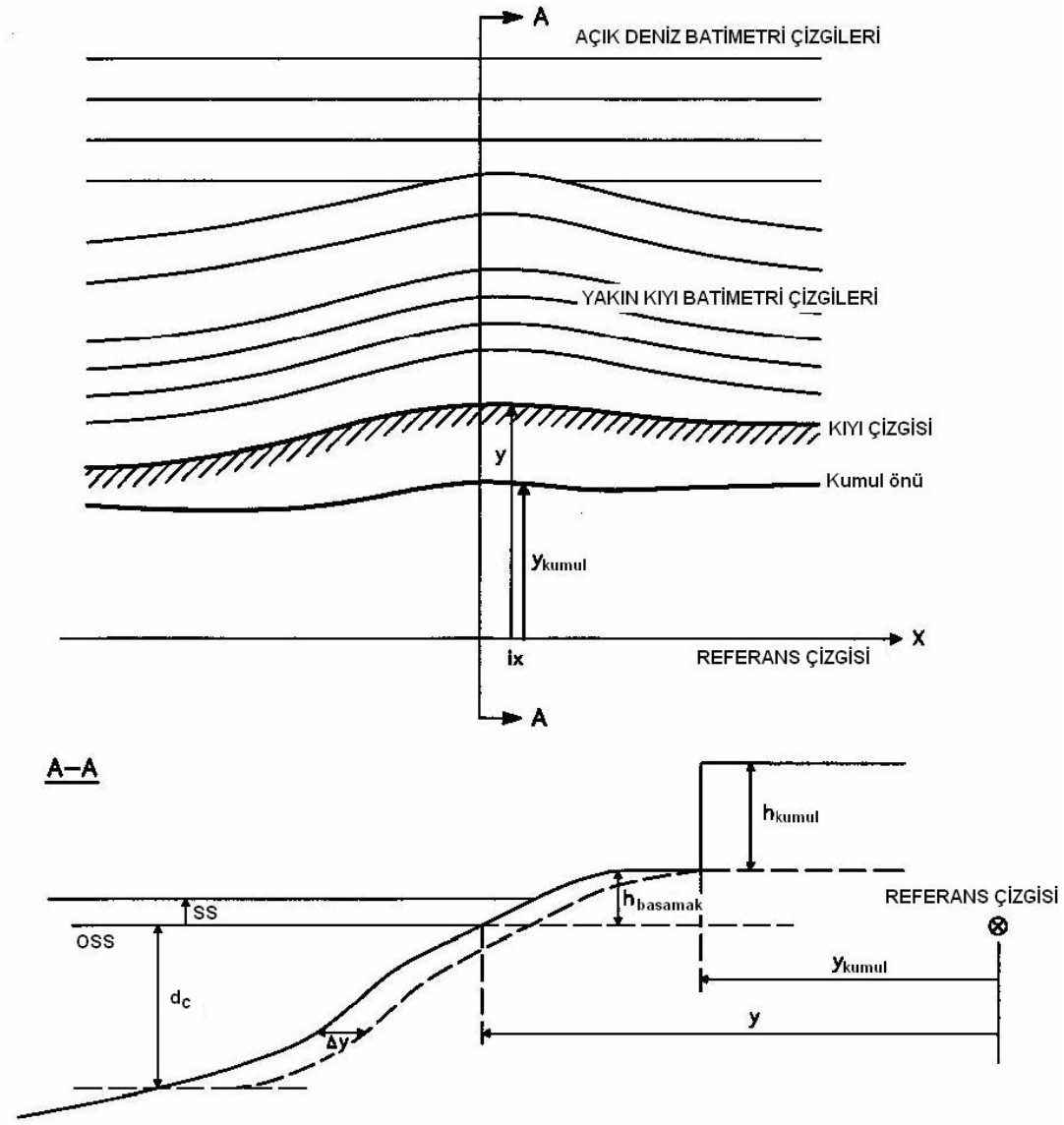
- Kıyı boyu akıntısı,
- Kıyı boyu katı madde taşınımı,
- Yıllık katı madde taşınımı belirlenebilmektedir.

Çalışmada Eylül, 2004 yılına ait GPS ölçümü ile elde edilen Karaburun kıyı çizgisi modelde girdi olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 LITDRIFT katı madde taşınım modülünde kullanılan kıyı çizgisi

Modelde kullanılan kıyı çizgisi parametreleri Şekil 6.8'de ve bu çalışmada kullanılan kıyı çizgisi özellikleri Çizelge 6.8'de verilmektedir.



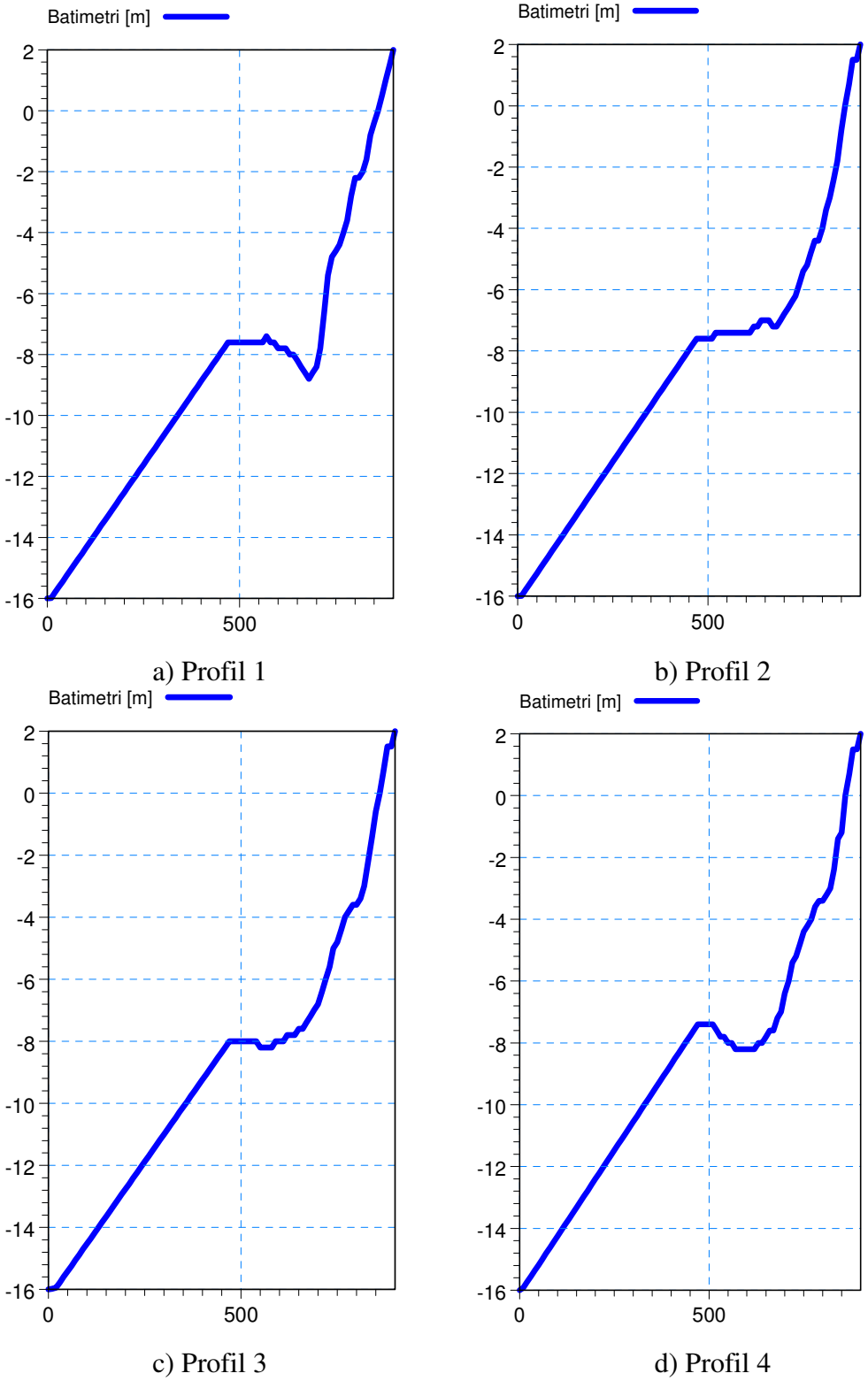
Şekil 6.8 LITPACK sayısal modelinde kullanılan kıyı çizgisi parametrelerinin şematik gösterimi (DHI, 2003c)

Çizelge 6.8 Karaburun kıyı çizgisi özellikleri (Eylül, 2004 yılı GPS ölçümünden elde edilen)

Ağ aralığı (m)	10
Kıyı çizgisi uzunluğu (m)	4630
Düğüm noktası sayısı	464
Referans çizgisinin Kuzey yönü ile yaptığı açı (°)	27
Profil sayısı	4
Açık deniz mesafesi (m)	5000
Kıyı yüksekliği ($h_{basamak}$) (m)	2
Kumul yüksekliği (m)*	0-5
Aktif derinlik (d_c) (m)	15

* Kumul yüksekliği 0-4440 m arasında 0 m, 4440-4630 m arasında 5 m olarak alınmıştır.

LITDRIFT yazılımında başlangıç kıyı çizgisinin yanında kıyı profilinin de girdi olarak tanımlanması gerekmektedir. İlk olarak Şekil 6.9'da görülen dört adet kıyı profili sayısal modelde tanımlanmıştır. Bu profillerin özellikleri ise Çizelge 6.9'da görülmektedir.



a) Profil 1 b) Profil 2

c) Profil 3 d) Profil 4

Şekil 6.9 Kıyı profilleri

Çizelge 6.9 Kıyı profili parametreleri

Pürüzlülük (m)	0.01
Ortalama tane çapı (d_{50}) (mm)	1.53
Çökelme hızı (m/s)	0.12
Geometrik standart sapma (σ_g) ($\sqrt{d_{84}/d_{16}}$)	1.36

Kıyı profili ve başlangıç kıyı çizgisine ilave olarak çalışma alanına ait dalga ikliminin yazılımda tanımlanması gerekmektedir. Karaburun bölgesi için elde edilen dalga iklimi, LITDRIFT modülünde zaman serisi şeklinde kullanılmaktadır. Bu zaman serisindeki dalga parametreleri:

- Dalga oluşma yüzdesi ($\frac{t}{24\times365}$, t: veri toplama aralığı, örn. 1 saat)
- Dalga yüksekliği (H_{rms})
- Ortalama sıfırı kesme dalga periyodu (T_z)
- Profil sayısı
- Dalga yüksekliği için referans derinliği
- Dalga açısı için referans derinliği
- Ortalama su seviyesi (OSS)
- Spektral tanım $\begin{cases} \text{Düzenli dalga} \\ \text{Düzensiz dalga (Rayleigh dağılımı)} \\ \text{Düzensiz dalga (Battjes ve Janssen yaklaşımı)} \\ \text{Dalga enerji spektrumu tanımı} \end{cases}$
- Saçılım faktörü
- Akıntı hızı
- Rüzgar hızı
- Rüzgar yönü
- Rüzgar sürtünme faktörüdür.

Model Kalibrasyonu

Taban pürüzlülüğü etkisi

LITDRIFT sayısal modelinde ana kalibrasyon parametresi taban pürüzlülüğüdür. Model kalibrasyonu, katı madde taşınım hesaplarında bu parametreye farklı değerler verilerek gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesinde herhangi bir kıyı boyu katı madde taşınım debisi ölçümü olmadığı için kalibrasyon sonucunda elde edilen katı madde taşınım debisi değerleri Kamphuis (1991) ve CERC (1984) yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ancak CERC (1984) yöntemi 1 mm'den küçük çapa sahip taban malzemesi için daha iyi sonuç verdiği ve Kamphuis (1991) yönteminde taşınımı tanımlayan diğer parametreler de yer aldığı için, değerlendirme Kamphuis (1991) yöntemine göre yapılmıştır. Bölüm 6.2.3'te detaylı olarak bu yöntemler ve sayısal model arasındaki farklar nedenleri ile birlikte anlatılmaktadır.

Taban pürüzlülüğü düz taban için (6.7) eşitliği ile kum dalgacıkları ile kaplı taban için (6.8) eşitliği ile hesaplanmaktadır (DHI, 2003b).

$$k=2.5d_{50} \quad (6.7)$$

$$k=2.5d_{50}+k_R \quad (6.8)$$

burada;

k= Taban pürüzlülüğü,

k_R= Kum dalgacıklarından dolayı oluşan pürüzlülüktür.

Karaburun kıyısı için hesaplanan taban malzemesi granülometrik dağılımına göre elde edilen ortalama tane çapı d_{50}=1.53 mm olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple yukarıdaki eşitliklerden elde edilen taban pürüzlüğü değeri k=0.004m ~ 0.01m arasında bulunmuş, modelde kalibrasyon parametresi olarak tanımlanmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar Kamphuis (1991) yönteminden elde edilen katı madde taşınım miktarı ile karşılaştırılmıştır. Kamphuis (1991) yönteminden elde edilen katı madde taşınım debisine en yakın çıkan sonuç k= 0.01 m taban pürüzlülüğü ile koşturulan model sonucudur.

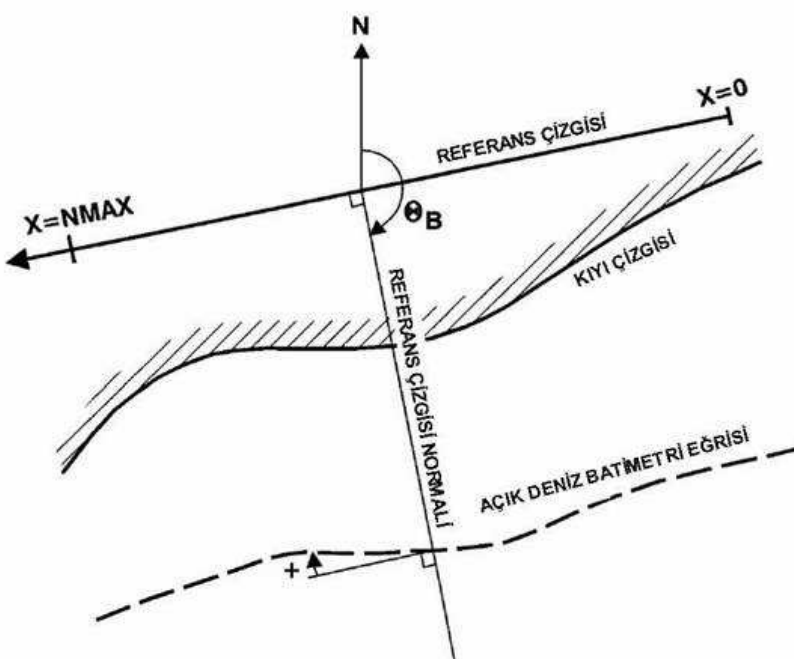
Rüzgar etkisi

Kalibrasyon aşamasında taban pürüzlülüğüne ek olarak yerel rüzgar parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Koşturulan ilk modelde ECMWF'ten elde edilen yerel rüzgar yönü ve hızı modele girdi olarak tanımlanmıştır. İkinci modelde ise rüzgar yönü ve hızının değerleri sıfır olarak tanımlanmıştır. İki model sonucu incelendiğinde rüzgar parametrelerinin etkisinin katı

madde taşınımı üzerinde oldukça küçük mertebede olduğu görülmüştür. Ancak bu etki Karaburun bölgesi için gözlemlenmektedir. Çizelge 6.10'da belirtildiği üzere yerel rüzgar etkisi içerilmeden koşturulan model (Zaman serisi (rüzgarsız)) sonucu, bu etkiyi içeren model (Zaman serisi) sonucuna göre net katı madde taşınım miktarında %2 oranında bir değişim gösterirken, toplam katı madde miktarında ise %5.7 oranında bir değişim vermektedir. İki simülasyon sonucu arasında büyük farklılık gözlemlenmese de, rüzgar parametlerinin dikkate alındığı model Kamphuis (1991) yöntemine daha yakın sonuç vermiştir.

Kıyı çizgisi doğrultusunun etkisi

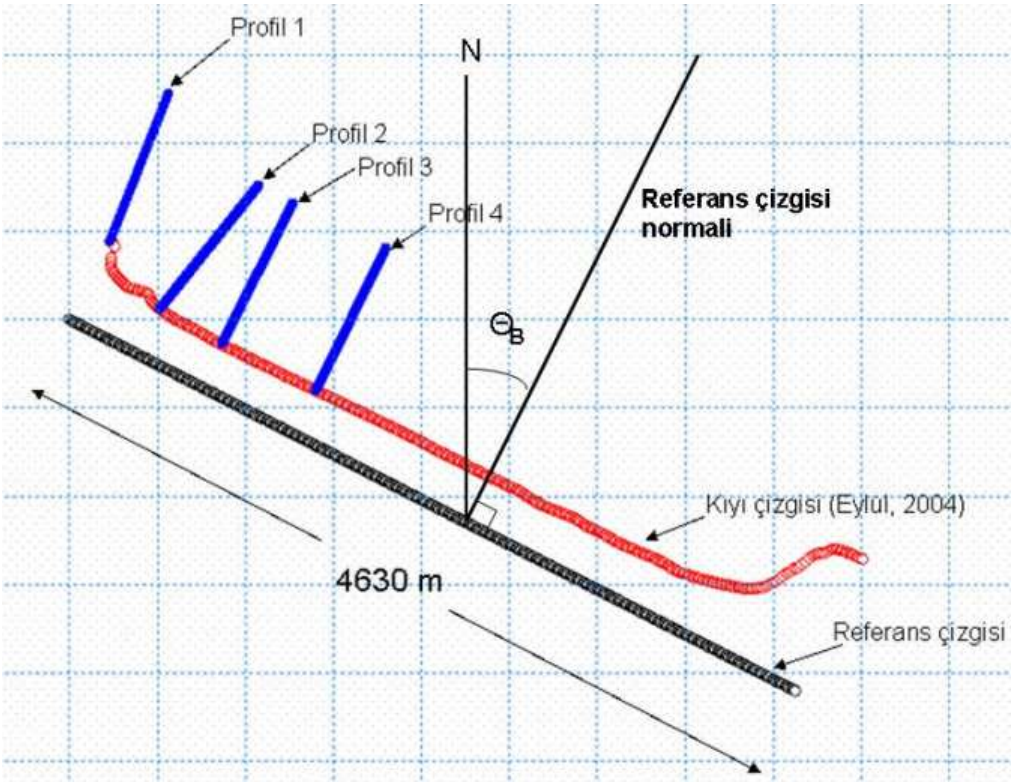
Sayısal modelde kıyı çizgisi belirli bir referans çizgisine göre tanımlanmaktadır. Bu referans çizgisine göre kıyı çizgisinin bulunduğu dikey mesafeler modelde girdi olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple kıyı çizgisinin ve dolayısıyla kıyı çizgisine bağlı referans çizgisinin konumu oldukça önemlidir. Şekil 6.10'da LITDRIFT yazılımında verilen referans ve kıyı çizgisinin konumu görülmektedir.



Şekil 6.10 Referans çizgisinin konumu (DHI, 2003c)

Karaburun kıyı çizgisinin belirlenmesi GPS ölçümleri ve uydu görüntülerinin sayısallaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Ancak referans çizgisi kıyı çizgisinin eğilimine göre belirlenmektedir. Karaburun kıyısı için Şekil 6.11'de verilen referans çizgisi ve normali belirlenmiştir. Şekilde referans çizgisinin normali kuzey ile Θ_B=27°'lik açı yapmaktadır. Ancak bu eğilim belirlenirken yapılan hatalardan kaçınmak için modelde 24°'lik ve 30°'lik

açılardaki referans çizgileri de koşturulmuştur. En uygun sonucun ise yine 27°'lik açı ile hesaplandığı belirlenmiştir.



Şekil 6.11 Karaburun kıyısında referans çizgisinin konumu

Kamphuis (1991) yöntemine göre modelin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra sayısal model dalga iklimi verileri kullanılarak koşturulmuştur. Yani zaman serisi şeklinde modelde tanımlanan dalga verileri 22.5°, 10° ve 5° aralıklarda yönsel olarak gruplandırılarak modelde kullanılmıştır. Her bölgede saatlik veya belirli aralıklarda ölçülmüş ve sayısal olarak modellenmiş dalga verisinin bulunması mümkün değildir. Bu sebeple değişik bölgeler için dalga atlasları veya parametrik modeller kullanılarak dalga iklimi tahmini yapılmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde amaçlanan konulardan biri de dalga verilerinin zaman serisi şeklinde veya gruplandırılarak modele girilmesi arasındaki farklılıkların belirlenmesidir.

İlk olarak saatlik zaman serisi şeklindeki dalga verileri 22.5° daha sonra 10° ve 5° aralıklarda yönlere göre gruplandırılmıştır. Kamphuis (1991) yönteminde hesaplandığı şekilde her dalga yönüne karşılık gelen ortalama dalga yükseklikleri belirlenerek programda tanımlanmıştır. Ayrıca her yönün bir yılda esme yüzdeleri de sayısal modele girdi olarak verilmiştir. Kalibrasyon aşamasında kullanılan parametreler aynı şekilde dalgaların gruplandırılmasında da tanımlanmıştır. Çizelge 6.10'da kalibrasyon ve dalga verilerinin gruplandırılması sonucunda elde edilen net ve toplam katı madde taşınım debileri görülmektedir. Çizelge

6.10'da 22.5°'lik aralıklarda gruplandırılan dalga parametreleriyle hesaplanan katı madde taşınım debisi Dalga İklimi 1 şeklinde, 10°'lik gruplandırma Dalga İklimi 2 ve 5°'lik gruplandırma ise Dalga İklimi 3 şeklinde tanımlanmıştır.

Çalışmanın temel amaçlarından biri de Bölüm 5.5'te detaylı olarak anlatılan istatistiksel dalga modelinden elde edilen sonuçların katı madde taşınım miktarı ve kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesinde kullanılmasıdır. Yapılan regresyon ve korelasyon çalışmalarından sonra elde edilen denklemlere (Dalga yüksekliği için 5.12 ve 5.13 eşitlikleri, dalga periyodu için 5.14 ve 5.15 eşitlikleri) göre Karaburun bölgesi için zaman serisi şeklinde dalga yükseklikleri ve dalga periyotları belirlenmiştir. Bu denklemler iki şekilde belirlenmiştir. İlki doğrudan Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen rüzgar verilerinin kullanılmasıyla belirlenen dalga parametreleri, ikincisi ise düzeltme fonksiyonları ile kalibre edilmiş rüzgar verilerinden elde edilen dalga parametreleridir. İlk parametrelere göre belirlenen katı madde debisi Çizelge 6.10'da Model 1 şeklinde, ikincisi ise Model 2 şeklinde verilmiştir. Sayısal modelde kullanılan dalga parametrelerinden biri olan dalga yönü rüzgar-dalga korelasyon modelinde ölçümlere yeterince yakın belirlenemediği için katı madde taşınımın sayısal modelinde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen yerel rüzgar yönü kullanılmıştır.

Çizelge 6.10 LITDRIFT yazılımından farklı dalga parametrelerine göre elde edilen katı madde taşınım debileri

	Q_{net} (m^3/yıl)	Q_{toplam}(m^3/yıl)
Zaman serisi	85210	152600
Zaman serisi (rüzgarsız)	87080	143900
Dalga İklimi 1	18090	59950
Dalga İklimi 2	18310	58890
Dalga İklimi 3	19140	58820
Model 1	115100	153400
Model 2	89570	168100

Çizelge 6.10'da belirtilen Zaman serisi MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin zaman serisi şeklinde modelde tanımlanmasıyla elde edilen katı madde taşınım miktarlarını vermektedir. Bu modelde kalibrasyon işlemleri sonucunda Kamphuis (1991) yöntemine en yakın sonuç veren parametreler kullanılmıştır. Elde edilen net katı madde debisi 85210 m^3/yıl, toplam katı madde debisi ise 152600m^3/yıl'dır.

Yerel rüzgar verilerinin ihmal edildiği model (Zaman serisi (rüzgarsız)) ise yine kalibrasyon bölümünde açıklandığı şekilde Zaman serisi modeline yakın değerler vermiştir. Ancak bu tüm bölgelerde oluşabilecek bir koşul değildir. Karaburun bölgesinde yerel rüzgar

parametrelerinin katı madde debisi hesabında çok etkili olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen net katı madde debisi 87080 m^3/yıl, toplam katı madde debisi ise 143900m^3/yıl'dır.

Dalga verilerinin gruplandırılarak modelde girdi olarak tanımlanmasıyla elde edilen Dalga İklimi net ve toplam katı madde taşınım debi değerleri Zaman serisi sonuçlarına göre daha küçük değerlerde hesaplanmıştır. Sırasıyla net katı madde taşınım debileri 18090 m^3/yıl, 18310 m^3/yıl ve 19140 m^3/yıl, toplam katı madde taşınım debileri ise 59950 m^3/yıl, 58890 m^3/yıl ve 58820 m^3/yıl olarak hesaplanmıştır.

İstatistiksel dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri ile yapılan katı madde taşınım hesap sonuçları ise Zaman serisi modeli değerlerine yakın bulunmuştur. Bu sonuç korelasyon modelinin katı madde taşınım hesaplarında Karaburun bölgesi için uygulanabileceğini göstermektedir. Model 1 rüzgar parametrelerinin düzeltilmeden kullanılmasıyla elde edilen dalga verisini içermektedir. Bu sebeple normal Zaman serisi'nden biraz daha farklı hesaplanmıştır. Net katı madde debisi 115100 m^3/yıl, toplam katı madde debisi ise 153400 m^3/yıl'dır. Ancak Model 2, Zaman serisi modeline oldukça yakın sonuç vermiştir. Net katı madde debisi 89570 m^3/yıl, toplam katı madde debisi ise 168100m^3/yıl'dır. Bu sebeple bu çalışmada geliştirilen istatistiksel dalga modeli dalga parametrelerinin bu bölgede katı madde taşınım ve kıyı çizgisi değişimi hesaplarında kullanılmasının daha uygun olacağı sonucunu vermektedir.

6.2.3 Katı Madde Taşınım Modelleri Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kıyı boyu katı madde taşınım hesaplarında en fazla kullanılan yöntem CERC (1984) yöntemidir. Bu model toplam kıyı boyu katı madde taşınımının kıyı boyu enerji akısı ile değiştiğini kabul etmektedir. Ancak bu yöntemin de içerdiği bir çok sınırlama mevcuttur. Yeterli bir kalibrasyon ile CERC (1984) yöntemi %50 oranında doğru tahmin yapmaktadır, ancak kalibrasyon yapılmadan bu oran çok daha büyük mertebelere çıkabilmektedir. Özellikle CERC (1984) formulünde mevcut olan ((6.9) eşitliği) K katsayısı farklı dalga ve katı madde özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Komar ve Inman'ın (1970) yaptıkları saha ölçümlerine göre H_{rms} için bu değer 0.77, $H_{1/3}$ için 0.39 değerini almaktadır. Ancak bu katsayının her bölgede aynı şekilde kullanılması hatalı sonuçlara sebep olabilmektedir.

$$Q_l = \frac{K}{\left[16\gamma^{1/2}\left(\rho_s - \rho\right)a'\right]}\rho g^{1/2} H_b^{5/2}\sin\left(2\alpha_b\right) \qquad (3.1)\ (6.9)$$

CERC (1984) kıyı boyu katı madde taşınım hesabı dalga yüksekliğine, dalga yaklaşım açısına ve bu dalgaların oluşma yüzdesine bağlıdır. Ancak kıyı bölgesinde özellikle surf bölgesinin

karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle bu yöntem oldukça basit yaklaşımlara sebep olabilmektedir. Bu yöntemde taban malzemesi özellikleri dikkate alınmamaktadır ve özellikle 0.175 mm ve 1 mm arasında ortalama çapa sahip üniform kumlu kıyılar için üretilmiştir (Yüksel, 2005). Karaburun bölgesinde yapılan taban malzemesi analizlerinde ise katı madde ortalama çapı 1.53 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer CERC (1984) yönteminde tavsiye edilen tane çapı aralığının dışında bulunmaktadır. Çizelge 6.11'de CERC (1984) yönteminden elde edilen katı madde debisinin diğer modellere göre oldukça yüksek hesaplandığı görülmektedir. Net katı madde debisi 346245 m^3/yıl, toplam katı madde debisi ise 675303m^3/yıl'dır. Bu sebeple kalibrasyon aşamalarında CERC (1984) yönteminden elde edilen sonuç dikkate alınmamıştır.

Kamphuis (1991) yöntemi temelinde kıyı parametrelerini içeren boyut analizine ve bu analizin fiziksel model deneyleriyle ilişkilendirilmesine dayanmaktadır. Kamphuis (1991) düzenli ve düzensiz dalgalarla üç boyutlu hidrolik model deneyleri gerçekleştirmiş ve katı madde taşınım debisini dalga dikliği (veya dalga periyodu), kıyı eğimi, tane çapı ve dalga kırılma yüksekliği ile ifade etmiştir. Geliştirdiği ifade yapılan saha ölçümleri ile de oldukça uyumlu bulunmuştur.

Wang vd., (2002) yaptıkları çalışmada saha ölçümlerine göre CERC (1984) yönteminin oldukça büyük sonuçlar verdiğini gözlemlerken (spilling tipi kırılmada +%578, plunging tipi kırılmada +%239), Kamphuis (1991) yönteminin ise saha ölçümlerine daha yakın sonuç verdiğini (spilling tipi kırılmada -%30, plunging tipi kırılmada -%24) belirtmişlerdir. Wang vd., (1998) fırtına koşullarında yani ortalama dalga yüksekliklerinin 4m'yi geçtiği koşullarda CERC (1984) yönteminin, düşük enerjili dalga koşullarında yani ortalama dalga yüksekliklerinin 1m civarında olduğu durumlarda Kamphuis (1991) yönteminin daha uygun sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Karaburun bölgesinde yapılan dalga analizine göre ortalama dalga yükseklikleri her yön için incelendiğinde (Çizelge 6.5) 1 m mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu bölgede Kamphuis (1991) yöntemi CERC (1984) yöntemine göre daha uygun sonuç vermektedir. Çizelge 6.11 incelendiğinde ise CERC (1984) yönteminin oldukça büyük sonuç verdiği görülmektedir. Bu sebeple LITDRIFT sayısal modeli kalibrasyonunda Kamphuis (1991) yöntemi dikkate alınmıştır.

LITDRIFT sayısal modeli ise Bölüm 6.2.2'de detaylı olarak anlatıldığı üzere diğer yöntemlere göre taşınım işlemini tanımlayan parametreleri daha fazla içermektedir. Bu parametreler kıyı boyu katı madde taşınımını etkileyen önemli kontrol parametreleridir. Bunlar; kıyının jeolojisi, rüzgar, akıntı, taban pürüzlülüğü, taban şekilleri, çeşitli dalga teorileri ile dalga

koşulları ve zamanla şekli ile konumu değişebilen açıkdeniz eşikleridir. Sayısal model çıktılarının, kıyı parametrelerinin doğru belirlenmesi ve modelin kalibrasyonunun uygun modele veya ölçüm sonuçlarına göre yapılması durumunda doğa ile en uyumlu sonucu vermesi beklenmektedir.

Çizelge 6.11 Tüm yöntemlerden elde edilen katı madde taşınım debilerinin karşılaştırılması

	Q_{net} (m^3/yıl)	Q_{toplam}(m^3/yıl)
Zaman serisi	85210	152600
Zaman serisi (rüzgarsız)	87080	143900
Dalga İstatistiği 1	18090	59950
Dalga İstatistiği 2	18310	58890
Dalga İstatistiği 3	19140	58820
Model 1	115100	153400
Model 2	89570	168100
Kamphuis (1991)	76448	186510
CERC (1984)	443292	772350

6.3 Kıyı Çizgisinin Modellenmesi

Çalışmada çalışma alanı kıyı çizgisinin belirlenmesi LITPACK yazılımının LITLINE modülü ile gerçekleştirilmiştir. LITLINE farklı kıyı yapıları ve kaynak/kayıp etkileri altında kıyı çizgisi gelişiminin belirlenmesinde kullanılmaktadır. LITLINE modülünün kullanıldığı bazı özel alanlar (DHI, 2003d);

- Kıyı çalışmalarından kaynaklanan kıyı çizgisi değişimi etkisinin belirlenmesi,
- Kıyı korumada fonksiyonel optimizasyon çalışmaları,
- Kıyı yenilemesi ile kıyının tekrar yapılandırma çalışmalarıdır.

LITLINE yazılımı kıyı çizgisi konumunu, zaman serisi şeklinde tanımlanan dalga iklimi girdisine göre hesaplamaktadır. Model, kıyıya dik profilin erozyon veya yığılma olması durumunda değişmediğini kabul eden tek çizgi teorisine dayanmaktadır. Bu sebeple kıyı morfolojisi sadece kıyı çizgisinin konumu ve kıyıya dik profillerle tanımlanmaktadır.

LITLINE yazılımında kıyı çizgisinin ve kıyıya dik profillerin tanımlanmasına ek olarak kıyıda veya açık denizde bulunan farklı yapı tipleri de programda kullanılabilmektedir. Bu yapılar;

- Dalgakıran,

- Mahmuz,
- Jetty,
- Kaplamadır.

Aynı zamanda programda kaynak veya kayıp girdileri de tanımlanabilmektedir.

LITPACK yazılımında bulunun LINTABL modülü, LITDRIFT modülüne yaptığı çağrılarla su seviyesi, yerel akıntılardan oluşan yüzey eğimi, dalga yüksekliği, periyodu ve yönünün fonksiyonu olarak katı madde taşınım debisini hesaplamaktadır. Katı madde taşınımı belirlendikten sonra ise tek-çizgi teorisine göre kıyı çizgisi değişimi belirlenmektedir.

LITLINE modülünde Bölüm 6.2.2'de anlatılan yani LITDRIFT modülünde kullanılan kıyı çizgisi (Şekil 6.7), kıyı profilleri (Şekil 6.9), Çizelge 6.8 ve Çizelge 6.9'da verilen kıyı özellikleri kullanılmıştır. Programda tanımlanan başlangıç girdileri bu çizelgelerde verilmiştir. Ancak LITDRIFT modülünde olduğu gibi LITLINE modülünün de sağlıklı çalışması için modelin kalibrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Model kalibrasyonu

LITLINE modülündeki temel kalibrasyon parametresi yıllık net katı madde taşınımıdır. Eğer bu taşınım miktarı LITDRIFT modülü ile doğru belirlenmemişse LITLINE modülünün de doğru olarak sonuç vereceği beklenmemelidir. Bu sebeple en uygun sonuç elde edilinceye kadar LITDRIFT modülündeki parametrelerin kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. LITDRIFT modülünden elde edilen sonuçlar Bölüm 6.2.2'de anlatıldığı gibi Kamphuis (1991) yöntemine oldukça yakın sonuç vermiştir. Bu sebeple kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesindeki ilk kalibrasyon aşaması da bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

İkinci kalibrasyon parametresi ise kıyının aktif yüksekliğidir. Şekil 6.12'de aktif kıyı yüksekliği (h_{aktif}) verilmiştir. Bu parametre kapama derinliği (d_k), basamak yüksekliği ($h_{basamak}$) ve kumul yüksekliğini (h_{kumul}) içermektedir. Karaburun bölgesinde yapılan dalga analizleri sonucuna göre kapama derinliği 10-15 m arasında değişmektedir. Bu sonuç Dean'in (2002) vermiş olduğu (6.10) eşitliği ve GENESIS programında yer alan Hanson (1987) tarafından verilen (6.11) eşitliğine göre belirlenmiştir.

$$d_k = 2.28H_{s,12} - 68.5\left(\frac{H_{s,12}^2}{gT^2}\right) \tag{6.10}$$

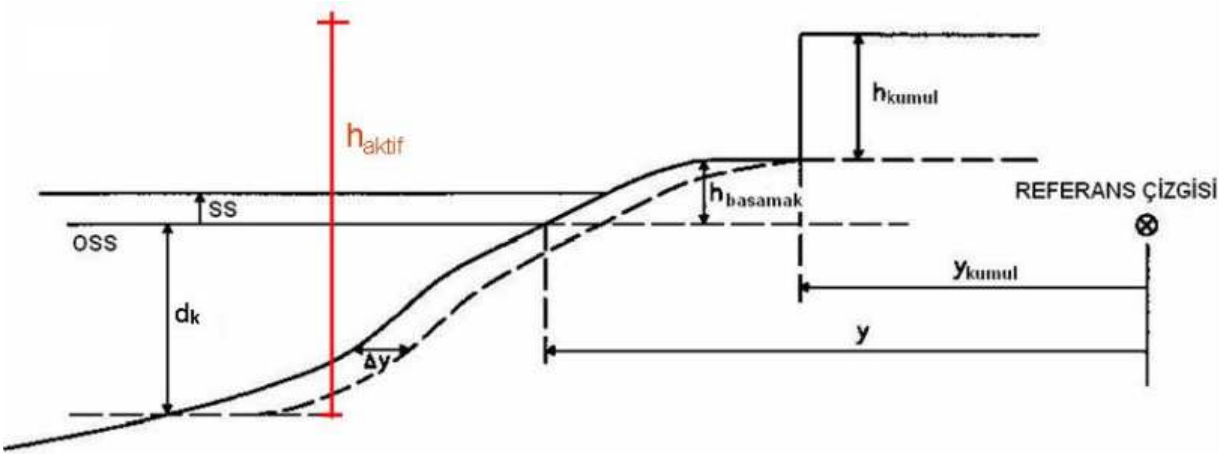
$$d_k = 2H_{maks} \tag{6.11}$$

burada;

d_k= Kapama derinliği,

$H_{s,12}$= 12 saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliği,

H_{maks}= 1 yılda oluşabilecek maksimum dalga yüksekliğidir.

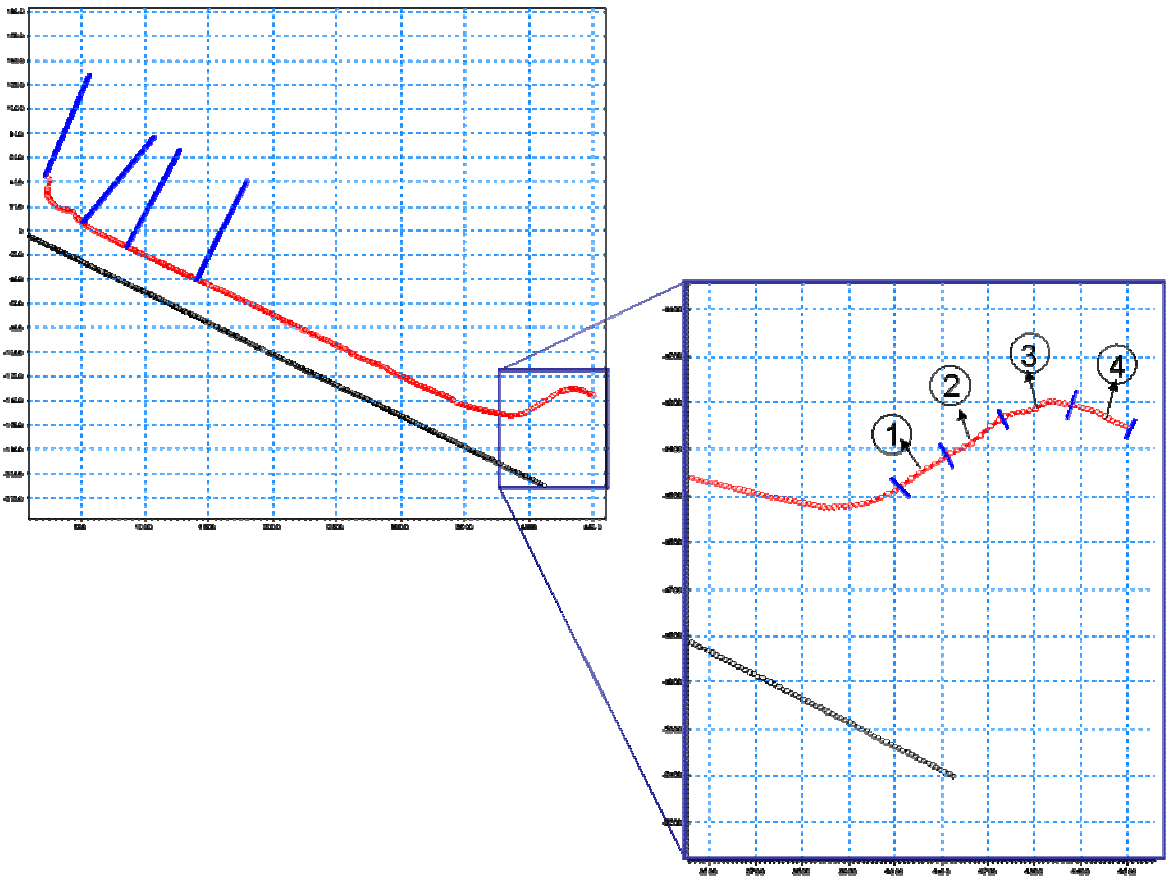


Şekil 6.12 Aktif kıyı yüksekliği şematik gösterimi (DHI, 2003d)

Karaburun kıyısında yaklaşık 4 km'lik kıyı şeridinde ölçüm sonuçlarından basamak yüksekliği ($h_{basamak}$) 2m, kumul yüksekliği (h_{kumul}) ise kıyı çizgisinin yukarı kıyısında burunun bulunduğu kısımlarda ortalama 5m olarak belirlenmiştir. Bu sebeple kalibrasyon aşamasında aktif kıyı yüksekliği 17-22 m arasında modele girdi olarak tanımlanmıştır. Model koşturulduktan sonra elde edilen kıyı çizgisinin ölçülen kıyı çizgisi ve uydu görüntüleri ile karşılaştırılması sonucunda en yakın değerin 22 m'de elde edildiği gözlemlenmiştir. Kalibrasyon ilk olarak GPS ölçümleri ile daha sonra modelin doğrulanması ise uydu görüntüleriyle gerçekleştirilmiştir.

LITLINE modülünde LITDRIFT modülüne ek olarak tanımlanan girdi parametrelerinden biri de kaynak veya kayıp terimleridir. Çalışma alanının yukarı kıyısında kıyıya doğru katı madde (kum) deşarjı yapılmaktadır. Bölgede kömür çıkartılması için kazı yapılmakta ve kazıdan çıkartılan kumlar denize deşarj edilmektedir. Ancak bir yılda deşarj edilen kum debisi bilinmemektedir. Kalibrasyon aşamasında yine bu bölgede farklı kaynak debisi tanımlanarak kıyı çizgisinin değişimi belirlenmiştir.

Programda tanımlanan kaynak debileri; Şekil 6.13'te görülen 1. bölge için 0.008 m^3/s, 2. bölge için 0.003 m^3/s, 3. bölge için 0.008 m^3/s ve 4. bölge için 0.003 m^3/s'dir.



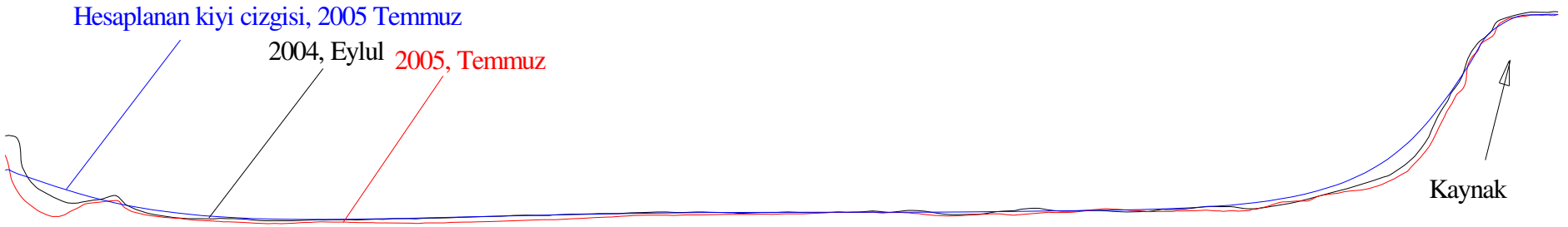
Şekil 6.13 Katı madde kaynak noktaları

Çalışmada LITLINE modülünde tanımlanan kıyı yapısı sadece aşağı kıyıda bulunan balıkçı barınağındaki ikincil dalgakırandır. Ancak kıyıya dik olarak inşaa edildiği için modelde mahmuz olarak tanımlanmıştır.

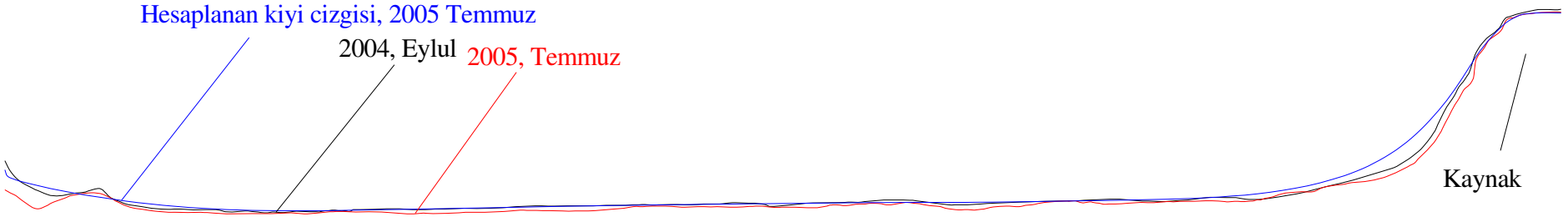
Modelin ilk olarak GPS ölçümleri ile karşılaştırılarak kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 6.14). Model, MIKE 21 SW yazılımından elde edilen ve dalga ölçümlerine göre kalibrasyonu yapılan dalga parametreleri ile koşturulmuştur. Yani zaman serisi şeklinde Bölüm 6.2.2'de anlatılan dalga verileri modelde girdi olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.14 incelendiğinde yukarı kıyıda oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir. Orta kıyıda başlangıç kıyı çizgisine göre fazla bir değişim gözlenmezken aşağı kıyıda uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi 2004, Eylül ayından sonra Karaburun Balıkçı Barınağı ikincil dalgakıranının yanında tarama yapılmasıdır. Bu sebeple bu bölgede yapay bir etki söz konusu olduğundan modelin bu kısımda iyi sonuç vermediği düşünülmemelidir.

Sayısal model sonuçlarının ikinci olarak uydu görüntüleri ile doğruluk (validation) testi yapılmıştır. Şekil 6.15'te uydu görüntülerinin sayısallaştırılması ile elde edilen kıyı çizgisi ile de aynı sonucu verdiği gözlenmiştir.

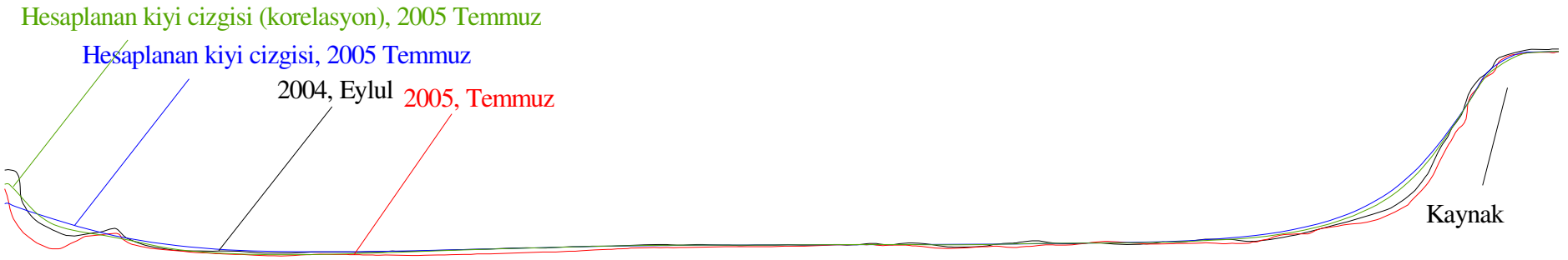
Son olarak ise istatistiksel dalga modelinden elde edilen dalga verileri ile model koşturulmuştur. LITDRIFT modülünde belirlendiği üzere düzeltilmiş rüzgar verileriyle elde edilen dalga parametreleri katı madde taşınımında daha uygun sonuç vermiştir. Yani düzeltilmiş rüzgar verilerinden elde edilen dalga parametreleriyle koşturulan katı madde modeli, düzeltilmemiş rüzgar verilerinden elde edilen dalga verileriyle koşturulan katı madde modeline göre %16 oranında daha yakın sonuç vermiştir. Bu sebeple LITLINE modülü çalıştırılırken sadece düzeltilmiş rüzgar verileriyle yapılan korelasyon modelinden elde edilen sonuçlarla kıyı çizgisi değişimi belirlenmiştir. Şekil 6.16 incelendiğinde bu çalışmada geliştirilen istatistiksel dalga modelinden elde edilen sonuçlar kıyı çizgisi ölçüm değerlerine daha yakın bulunmuştur. Özellikle orta kıyıdan aşağı kıyıya doğru olan bölümlerde ölçümlerde gözlenen erozyon miktarı bu simülasyon sonucunda daha iyi benzeştirilmiştir.



Şekil 6.14 GPS ölçümleri ile sayısal modelin karşılaştırılması



Şekil 6.15 Uydu görüntüleri ile sayısal modelin karşılaştırılması



Şekil 6.16 GPS ölçümleri ile sayısal modelin ve korelasyon modeli sonuçlarının karşılaştırılması

7. KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMI MODELİ

7.1 Giriş

Kıyı alanlarının tasarımında ve bütünleşik kıyı yönetiminde en önemli etken ve tasarım kriteri katı madde hareketidir. Kıyı boyunca taşınanan katı madde miktarı tüm kıyı çalışmalarında veya kıyı yapılarının tasarımında bilinmesi gereken ön koşuldur. Bu tür bir bilgi birçok ampirik yöntem veya sayısal model ile elde edilmesine rağmen günümüzde hala kıyı boyu katı madde taşınımının yeterince doğru belirlenmesi problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mühendislik problemlerindeki belirsizliklerin kaynağı, model ve modelin içerdiği parametrelerdir. Sözkonusu belirsizlikler genellikle olasılık teorisi ve istatiksel yöntemler yardımıyla gözönüne alınmaktadır. Belirsizlikler altında ortaya çıkacak başarısızlıklar (risk) ise güvenirlik analizi yardımıyla belirlenmektedir. Özellikle karmaşık ve modelleme olanaklarının zor olduğu birçok mühendislik probleminin çözümünde, geliştirilen modelin yetersiz olması önemli bir belirsizlik nedeni olmakla birlikte çözüm sırasında yapılacak kabuller veya basitleştirmeler de belirsizliği arttıran faktörlerdir. Dolayısıyla, yüksek derecede karmaşık olan mühendislik problemlerinin çözümünde belirsizliklerin azaltılmasına ve değerlendirilmesine yönelik klasik yaklaşımlar, çoğunlukla daha karmaşık ve zaman-maliyet açısından ekonomik olmayan çözümlere neden olabilmektedir (Koç vd., 2004).

Bu sebeple deterministik yöntemler yerine doğrusal olmayan yapay zeka tekniklerinin uygulanması ve bu sayede belirsizliklerin azaltılması ya da işlenebilmesi, kıyı boyu katı madde taşınımının karmaşık modellere gereksinim duyulmadan belirlenmesini sağlayacaktır.

Çalışmanın bu bölümünde kıyı boyu katı madde taşınımı Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

7.2 Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi

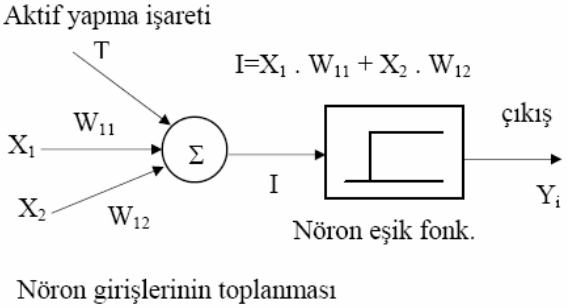
Bilindiği gibi birçok önemli buluşun temelinde doğanın taklit edilmesi gerçeği yatmaktadır ve bu yüzden insanlar sürekli doğayı taklit etmeye çalışmıştır (Özbay, 1999). Bu taklit etme çabalarının yeni ürünlerinden biri de Yapay Sinir Ağları (YSA)'dır. YSA teorik gelişimini tamamlamış ve artık pratik uygulamalarda kullanılmaya başlanmış olan bir hesap modelidir (Özbay ve Karlık, 2001).

Bir yapay zeka teknolojisi olan YSA'nın temel prensibi, mevcut örneklerden yararlanarak olayları öğrenme ve yeni durumlara karşı uygun yanıtlar üretmeye dayanmaktadır. İnsan

beyni örnek alınarak geliştirilen bu yöntemde, öğrenme yapay sinir hücreleri (nöronlar) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Çözümü istenen probleme bağlı olarak bir sinir ağı birden fazla ara katmandan ve her katmanda değişik sayıda sinir hücresinden oluşabilir. Ağın giriş katmanında girdiler ağırlıklandırılarak uygun bir aktivasyon fonksiyonundan geçirildikten sonra ara katmandaki sinir hücrelerine iletilirler. Ara katmanda oluşan girdiler de yeniden ağırlıklandırılıp uygun aktivasyon fonksiyonu ile varsa diğer ara katmana, yoksa çıkış katmanına iletilirler. Burada her bir katmanda farklı bir aktivasyon fonksiyonu kullanmak olasıdır.

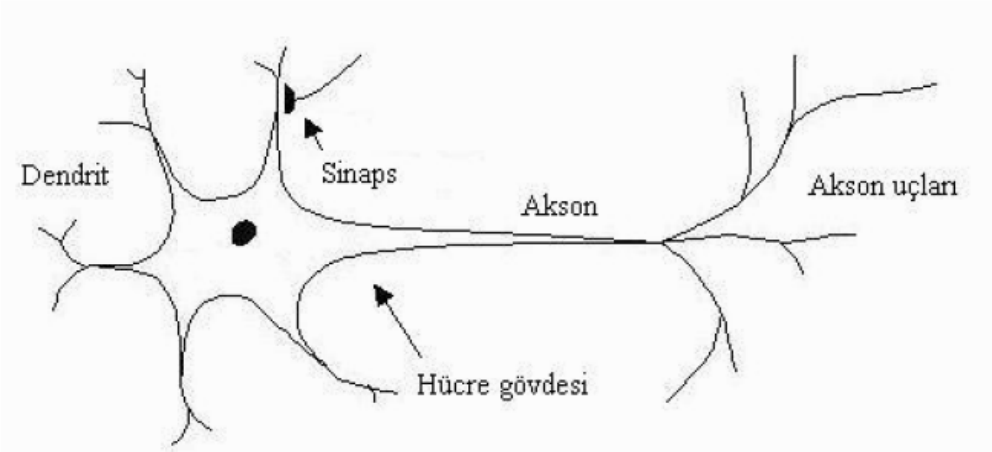
Ağdan elde edilen yanıtların mevcut örnekleme değerleriyle karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlara bağlı olarak, ağdaki ağırlıklar bir eğitim fonksiyonu yardımıyla değiştirilmekte ve ağ bu yeni ağırlıklar kullanılarak yeni yanıtlar üretmektedir. Bu işlem, önceden belirlenen epok sayısına, ağın maksimum başarısızlık sayısına ulaşılıncaya veya performans fonksiyonunun minimize edilmesine kadar sürdürülmektedir (Rumelhart ve McClelland, 1986).

Temel çalışma prensibi yukarıda açıklanan YSA teknolojisiyle; öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme, optimizasyon ve yaklaşım gibi konularda başarılı uygulamalar gerçekleştirmek olasıdır (Öztemel, 2003). İnsan beynindeki sinir hücrelerinin öğrenme kabiliyetinin modellenmesi çalışmaları ile ortaya çıkan YSA, sayısal optimizasyon tasarımları için de etkin yetenekleri olan bir yöntemdir. YSA, esas olarak biyolojik nöronların basitleştirilmiş bir şekilde matematiksel olarak modellenmesine dayanmaktadır. Nöron modelinde; bir nöron/işlem elemanı (Şekil 7.1), kendine gelen girişleri toplayan ve sadece girişlerin toplamı iç eşik değerini aştığında çıkış üreten bir işlem elemanıdır (Özbay, 1999). Nöron girişlerindeki işaretler alınmakta ve ağırlık vektörleri ile çarpılarak toplanmaktadır. Eğer toplanan işaret gücü, eşik fonksiyonunu geçiyorsa bir çıkış işareti üretilir. YSA, bu basit nöronların (düğümlerin ya da ünitelerin) birbirleri ile bağlanarak bir ağa dönüştürülmesiyle meydana getirilmektedir.

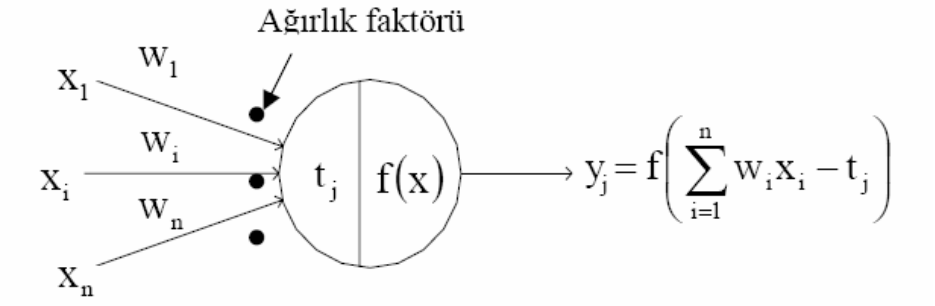


Şekil 7.1 Nöron modeli

Biyolojik ve yapay sinir hücreleri arasındaki benzeşim (Şekil 7.2) incelendiğinde, hücreler arasındaki bağlantılar (hücreye gelen ve hücreden çıkan uyarımlar) akson ve dendritlere karşılık gelmektedir. Ağırlık faktörleri (w_i) ise sinapslara benzetilmektedir. Ayrıca sınır değerler (t_j) de hücre içi kararlılık haline karşılık gelecek şekilde oluşturulmaktadır. Yapay sinir hücresinde, ağırlık faktörünün etkisine bağlı olarak (w_1, w_2,..w_n) hücreye gelen uyarımlar (x_1, x_i,..x_n) hücre içi denge durumu veya sınır değer (t_j) de dikkate alınarak doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu *f ()* yardımıyla çıktı şeklinde uyarımlara (y_j) dönüştürülmektedir (Şekil 7.2b) (Kirkegaard ve Rytter, 1993; Kröse ve Van der Smagt, 1996).



a) Biyolojik sinir hücresi



b) Yapay sinir hücresi

7.2 Biyolojik ve yapay sinir hücresi

Bu modele göre, bir nöron N tane ağırlıklandırılmış girişi toplamakta ve sonucu lineer olmayan bir fonksiyondan geçirmektedir. Matematiksel olarak (7.1) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$y_i = \sum_{i}^{N} x_i w_i + b_i \qquad (7.1)$$

burada;

b= Bias değeri,

w= Ağırlıklar matrisi,

x= Giriş matrisi,

N= Giriş sayısıdır.

Ağırlıklar matrisi (7.2) eşitliği, giriş matrisi ise (7.3) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$W= w_1, w_2, w_3, ..., w_n \quad (7.2)$$

$$X= x_1, x_2, x_3, ..., x_n \quad (7.3)$$

Birimin çıkışı bu toplamın (7.4) eşitliği ile verilen doğrusal olmayan bir fonksiyondan geçirilmesi ile hesaplanmaktadır.

$$y= f(y_i) \quad (7.4)$$

Fonksiyonun uygulanması ile birimin çıkışı (7.5) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$y = \frac{1}{1+e^{-\left(\sum_{i}^{N} x_i w_i + b_i\right)}} \quad (7.5)$$

Kullanım amaçlarına göre değişik tiplerde yapay sinir ağları bulunmaktadır. Sınıflandırma, kümeleme, modelleme ve tahmin gibi değişik işlemlerde kullanılan yapay sinir ağlarının en büyük avantajları doğrusal olmayan sistemleri modelleyebilmesi; bilgiyi paralel olarak işleyebilmesi ve yeni durumlara uyum sağlayabilme yeteneği olarak verilebilmektedir (Kalagirou, 1999). Yapay sinir ağları genel olarak ağ yapısına göre ileri beslemeli ve geri beslemeli yapay sinir ağları; eğitme algoritmalarına bağlı olarak ise denetimli ve denetimsiz yapay sinir ağları olarak sınıflandırılabilir (Svozil vd., 1997).

Yapay sinir ağları uygulamaları genellikle eğitme ve test olmak üzere iki aşamada oluşturulur. Eğitme aşaması, katmanlar arasındaki ağırlık faktörlerinin ve sınır değerlerin bir eğitme algoritması yardımıyla hata seviyesi kabul edilebilir bir düzeye gelinceye kadar iteratif olarak düzeltilmesinden meydana gelir; ağırlık faktörlerindeki değişim, öğrenme olarak da tanımlanabilir. Test aşamasında ise eğitme aşamasında kullanılmayan girdi ve çıktı verileri kullanılarak ağın performansı ölçülür. Değişik eğitme algoritmaları olmakla birlikte momentum katsayılı gradyen azalma ve konjuge gradyen eğitme algoritmaları yaygın kullanılan eğitme algoritmalarına örnek olarak verilmektedir (Golden, 1996).

7.3 Deterministik Model

Bölüm 3.3'te detaylı olarak anlatıldığı gibi kıyı boyu katı madde taşınımı birçok farklı yöntemle belirlenebilmektedir. Ancak bu ifadeler genelde saha ölçümleri veya laboratuar deneylerinden elde edilen ampirik ifadelerdir. Deterministik yöntemler olarak ifade edilen bu yöntemlerde oldukça fazla belirsizliğin yer almasından dolayı son yıllarda doğrusal olmayan yapay zeka teknikleri kullanılmaya başlanılmıştır.

Kamphuis (1991), kıyı boyu katı madde taşınımını belirlemek amacıyla düzenli ve düzensiz dalgalarla üç boyutlu hidrolik model deneyleri gerçekleştirmiştir. Araştırmacı derin deniz dalga koşullarını, surf bölgesindeki dalga yüksekliklerini, kıyı boyu akıntı hızı dağılımını, taban ve askı malzemesi miktarını eş zamanlı olarak ölçmüştür. Deneyler 23.4 m uzunluğunda, 10 m genişliğindeki bir dalga havuzunda gerçekleştirilmiştir. Dalga üreteci yönü farklı dalga geliş açıları yaratmak için değiştirilebilmektedir. Düzensiz dalgalar için JONSWAP spektrumu kullanılmıştır (γ=2.3). Dalga havuzunda 1/10 eğime sahip beton üzerine 100 mm kalınlığında kum taban serilmiştir. Dalga verisi, açık deniz ve surf bölgesi etrafında 15 ayrı konumda olmak üzere 10 Hz örnekleme aralıklarıyla elde edilmiştir. Dalga havuzunda yaratılan sahilin aşağı kıyısında bir katı madde kapanı yerleştirilmiştir. Bu kapan, askı ve taban malzemesini ayıracak ve tırmanma ile surf bölgesindeki dağılımlarını ölçecek şekilde tasarlanmıştır. Her 15 dakikada bir olmak üzere kıyı boyu askı ve taban malzemesi batık ağırlıkları kaydedilmiştir.

Araştırmacı çalışmasında boyut analizi yardımıyla probleme ait boyutsuzları belirlemiştir. Kıyı boyu katı madde taşınımının dalga, akışkan, katı madde ve kıyı profili parametrelerinin kombinasyonu olduğunu belirtmiş ve (7.6) eşitliği ile verilen genel ifadeyi sunmuştur.

$$Q = f(H, T, \alpha, h, \rho, \mu, g, x, y, z, t, \rho_s, d, m) \quad (7.6)$$

burada;

Q= Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı (birim zamandaki batık ağırlık, kg/s)

H= Dalga yüksekliği,

T= Dalga periyodu,

α = Dalga geliş açısı,

h= Su derinliği,

ρ = Akışkanın özgül ağırlığı,

μ = Akışkanın dinamik viskozitesi,

g= Yerçekimi ivmesi,

x,y ve z= Koordinatlar,

t= Zaman,

ρ_s = Katı madde özgül ağırlığı,

d= Nominal tane çapı

m= Kıyı eğimidir.

Boyut analizi sonucunda ise (7.7) ifadesi elde edilmiştir.

$$\pi_Q = \phi\left(\frac{H}{gT^2}, \alpha, \frac{H}{h}, \frac{H\left(\frac{H}{T}\right)}{\frac{\mu}{\rho}}, \frac{x}{gT^2}, \frac{y}{gT^2}, \frac{z}{h}, \frac{t}{T}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{H}{d}, m\right) \tag{7.7}$$

burada;

π_Q = Boyutsuz katı madde taşınım parametresi,

ϕ = Fonksiyondur.

Çalışmada yapılan analiz zaten kırılma bölgesindeki katı madde taşınımıyla ilgili olduğu ve (H/h) boyutsuz parametresi kırılma işleminin kendisi ile belirlendiği için doğru bir değişken olmadığı belirtilmiştir. Viskozite terimini içeren parametreler ise kırılma bölgesi oldukça türbülanslı olduğu için önemli olmamaktadır. Çalışmada sadece kırılma bölgesindeki değil tüm kıyı boyu katı madde taşınımı dikkate alındığı için geometrik parametreler de (x, y ve z) gerekmemektedir. Katı madde taşınım miktarının birçok dalga periyodu için ortalaması alındığından (t/T) terimi göz önüne alınmamıştır. Deneylerde sadece kum/su kombinasyonu kullanıldığı için (ρ_s / ρ) terimi incelenmemiştir. Çalışma sonucunda dalga enerji akısının kıyı boyu bileşeniyle ilgili kıyı boyu katı madde taşınım debisi elde edileceğinden dalga geliş açısı terimi ($\sin 2\alpha_b$)'nin fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Karakteristik tane çapı için (d_{50}) ortalama tane çapı kullanılmıştır. Kıyı profili parametresi olarak ise kırılma bölgesindeki kıyı eğimi ($m_b=d_b/\lambda_b$) kullanılmıştır. Burada; λ_b kıyı çizgisinden kırılma bölgesine olan uzaklıktır. Araştırmacı, dalga dikliğini (H/gT^2) terimi yerine (H/L_0) ile ifade etmiştir. Sonuç olarak boyut analizi çalışmasından sonra (7.8) eşitliği elde edilmiştir.

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H^3}{T}\right)} = \left(\frac{H}{L_0}\right)^p m_b^q \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^r \sin^s\left(2\alpha_b\right) \tag{7.8}$$

burada;

p, q, r ve s= Üstel değerlerdir.

Araştırmacı katı madde taşınımının dalga dikliği, kıyı eğimi, göreceli tane çapı ve dalga geliş açısının bir fonksiyonu olduğunu belirtmiştir. Yapılan deneyler ve boyut analizi çalışmaları sonucunda belirgin dalga yüksekliği için (7.9), rms dalga yüksekliği için ise (7.10) eşitlikleri verilmiştir.

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)} = 1.3\times10^{-3}\left(\frac{H_{sb}}{L_{0p}}\right)^{-1.25} m_b^{0.75}\left(\frac{H_{sb}}{d_{50}}\right)^{0.25} \sin^{0.6}\left(2\alpha_b\right) \tag{7.9}$$

burada;

H_{sb}= Kırılan belirgin dalga yüksekliği,

T_p= Pik dalga periyodu,

L_{0p}= Pik dalga periyoduna karşılık gelen dalga boyudur.

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{rmsb}^3}{T_p}\right)} = 2.6\times10^{-3}\left(\frac{H_{rmsb}}{L_{0p}}\right)^{-1.25} m_b^{0.75}\left(\frac{H_{rmsb}}{d_{50}}\right)^{0.25} \sin^{0.6}\left(2\alpha_b\right) \tag{7.10}$$

burada;

H_{rmsb}= Kırılan rms dalga yüksekliğidir.

Kamphuis (1991), laboratuar verilerinin haricinde çeşitli saha verilerinden de faydalanarak kıyı boyu katı madde taşınımı için bir ifade elde etmiştir. Araştırmacının kullandığı saha verileri: El Moreno ve Silver Strand (Komar, 1969), Leadbetter Beach (Gable, 1981), Torrey Pines (Inman vd., 1980), Duck (Kana ve Ward, 1980), Ajigaura (Kraus vd., 1982), Lake Worth (Watts, 1953), Channel Islands (Bruno vd., 1980), Price Inlet (Kana, 1977), ve Pointe Sapin (Kooistra ve Kamphuis, 1984)'dir. Araştırmacı bu verilerden de (7.11) ifadesini elde etmiştir.

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)} = 0.6\times10^{-3}\left(\frac{H_{sb}}{L_{0p}}\right)^{-0.5} m_b^{1.0}\left(\frac{H_{sb}}{d_{50}}\right)^{1.0} \sin\left(2\alpha_b\right) \tag{7.11}$$

Kamphuis (1991), boyut analizi çalışması, saha ile deney verilerinin incelenmesi ve ölçek etkilerini araştırdıktan sonra genel bir ifade olan (7.12) eşitliğini elde etmiştir.

$$Q = 2.27 H_{sb}^2 T_p m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}\left(2\alpha_b\right) \tag{3.14) (7.12}$$

7.4 Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modeli

Yapay sinir ağları yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için kıyı boyu katı madde taşınım debisi ölçüm verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kamphuis'den (2008) elde edilen ölçüm verileri yardımıyla model kurulumu gerçekleştirilmiştir (163 adet laboratuar ve 54 adet saha olmak üzere toplam 217 adet ölçüm verisi). Çizelge 7.1'de modelde kullanılan Kamphuis (2008) verileri ve veri aralıkları görülmektedir.

Çizelge 7.1 Kamphuis (2008) ölçüm verileri

Veri Tipi	Aralık
Kıyı boyu katı madde taşınım debisi, Q (kg/s)	0.002-261.64
Pik dalga periyodu, T_p (s)	0.92-13.4
Ortalama tane çapı, d_{50} (mm)	0.105-8.3
Kırılan belirgin dalga yüksekliği, H_{sb} (m)	0.049-1.99
Kırılma derinliği, h_b (m)	0.06-3.55
Kıyı eğimi, m_b (-)	0.012-0.2
Dalga kırılma açısı, α_b (°)	2-32.3

Kamphuis'den (2008) elde edilen verilerde saha ölçüm verilerinin yanında deney ölçüm verileri de bulunmaktadır. Araştırmacı Bölüm 7.3'te anlatıldığı gibi eş zamanlı olarak dalga kırılma yüksekliği, pik dalga periyodu, ortalama tane çapı, kırılma derinliği, kıyı eğimi ve dalga kırılma açısına karşılık kıyı boyu katı madde taşınım debisini ölçmüştür. Ancak hem saha hem de deney verileri içerildiğinden yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere bu

veriler boyutsuzlaştırılmıştır. Yapay sinir ağlarında kullanılacak boyutsuz değişkenler Bölüm 7.3'te anlatılan deterministik modelden faydalanılarak elde edilmiştir. Çizelge 7.2'de kıyı boyu katı madde taşınımının yapay sinir ağları ile modellenmesinde kullanılan boyutsuz parametreler tanımlanmıştır. Kamphuis (1991), yaptığı boyut analizi çalışmasında kıyı boyu taşınımını etkileyen 11 adet boyutsuz parametre tanımlamıştır. Ancak bunlardan bazıları Bölüm 7.3'te anlatıldığı gibi dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada ise YSA1 modelinde girdi olarak $\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{h_b}$, $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b boyutsuzları dikkate alınmıştır. Bu modelde Kamphuis (1991)'den farklı olarak $\frac{H}{h_b}$ kırılma parametresi ve $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ şeklinde belirtilen geometri parametresi de dikkate alınmıştır. Burada h_b / m_b surf bölgesi genişliğini tanımlamaktadır. Bu parametrenin dikkate alınma amacı; kıyı boyu katı madde taşınımının büyük oranda surf bölgesi içinde yer alması ve surf bölgesi genişliği etkisinin bu boyutsuz parametre ile incelenmesidir. YSA2 modelinde girdi olarak $\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b boyutsuzları dikkate alınmıştır. Kamphuis (1991)'den farklı olarak sadece dalga dikliği parametresi $\frac{H}{gT_p^2}$ formunda kullanılmıştır. YSA3 modelinde girdi olarak $\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ ve $\frac{H}{d_{50}}$ boyutsuzlarının etkisi incelenmiştir. Bu modelde taban eğimi yerine geometriyi ifade eden $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ boyutsuz parametresi dikkate alınmıştır. YSA4 modelinde ise tamamen Kamphuis (1991) ifadesinde yer alan boyutsuzlar ($\frac{H}{L_{0p}}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) dikkate alınmıştır. Tüm modellerde ise yine Kamphuis (1991)'in belirttiği gibi viskozite terimini içeren parametreler, diğer geometrik parametreler (y ve z), (t/T) terimi ve (ρ_s / ρ) boyutsuz parametrelerinin etkisi dikkate alınmamıştır.

Çizelge 7.2 Yapay sinir ağları ve Kamphuis (1991) yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan boyutsuz parametreler

Model	**Çıktı**	**Boyutsuz Girdi Parametreleri**										
		π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}
		$(\frac{H}{gT^2})$	(α)	$(\frac{H}{h})$	$(\frac{H\left(\frac{H}{T}\right)}{\frac{\mu}{\rho}})$	$(\frac{x}{gT^2})$	$(\frac{y}{gT^2})$	$(\frac{z}{h})$	$(\frac{t}{T})$	$(\frac{\rho_s}{\rho})$	$(\frac{H}{d})$	(m)
YSA1	$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)}$	X	X	X	-	X	-	-	-	-	X	X
YSA2	$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)}$	X	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X
YSA3	$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)}$	X	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-
YSA4	$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)}$	X	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X
Kamphuis (1991)	$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)}$	X	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X

Yapay sinir ağları ile modelleme için MATLAB R2008a yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada dört farklı model test edilmiştir. Bunlardan ilkinde 6 girdi parametresi ve bir çıktı, diğer modellerde ise dört girdi parametresi ve bir çıktı yer almaktadır. Tüm modellerde ileri beslemeli geri yayılım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde girdi, gizli ve çıktı tabakası olmak üzere üç farklı birim bulunmaktadır. Her tabaka bir ya da birden çok nörondan oluşmakta, tabakalar aralarında ağırlık kümeleri ile bağlanmaktadır. Bağlanma şekli ve her kısımdaki nöron sayısı değişebilmektedir. Aynı tabakadaki nöronlar arasında iletişim olmasına izin verilmemektedir.

İleri beslemeli geri yayılım algoritması iki adımdan oluşmaktadır: *(i)* çıktı tabakasındaki çıktı bilgi sinyalini hesaplamak için girdi nöronlarındaki dış girdi bilgisini ileriye doğru ileten bir ileri doğru besleme adımı, *(ii)* çıktı tabakasındaki hesaplanan ve gözlenen bilgi sinyalleri arasındaki farklara dayanarak bağlantı kuvvetleri üzerinde değişikliklerin yapıldığı bir geriye doğru ilerleme adımıdır.

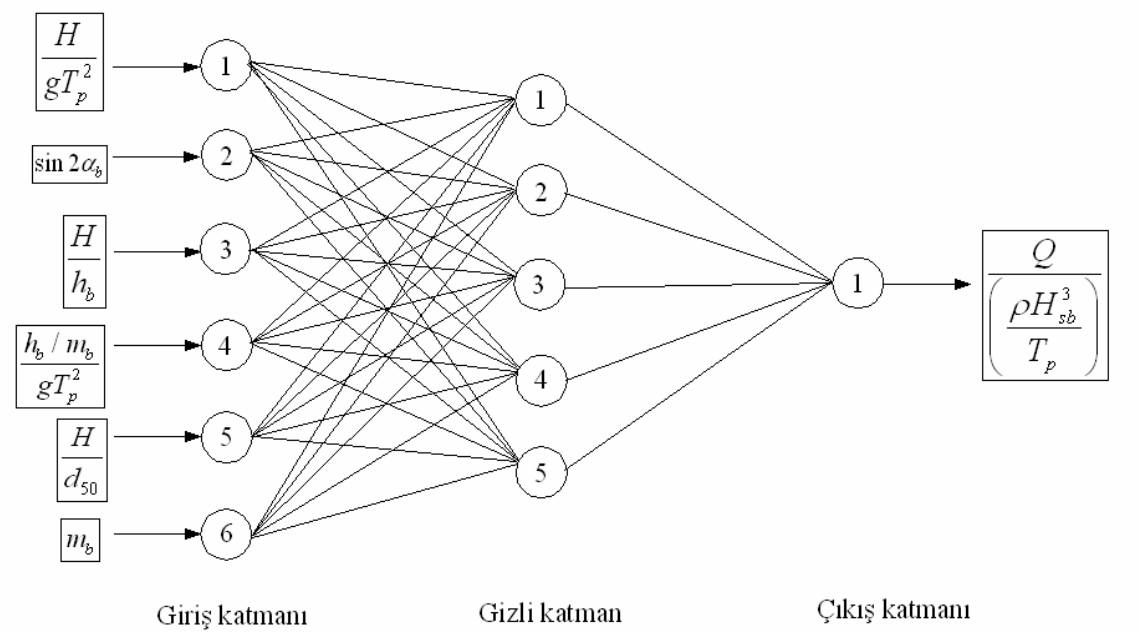
Tüm modellerde ağın eğitimi için Levenberg-Morquardt algoritması ve momentum katsayılı gradyen azalma algoritması kullanılmıştır. Performans fonksiyonu olarak ise hataların karelerinin toplamından yararlanılmıştır. Modellerin hepsinde biri gizli biri de çıkış katmanı olmak üzere olmak üzere iki katmanlı bir ağ tasarlanmıştır. Ara katman için sigmoid, çıkış katmanı için lineer aktivasyon fonksiyonları seçilmiştir.

Her model için bir çok farklı test uygulanmış ancak her model için elde edilen en iyi ağ şekilleri Çizelge 7.3 ve Şekil 7.3'te verilmiştir.

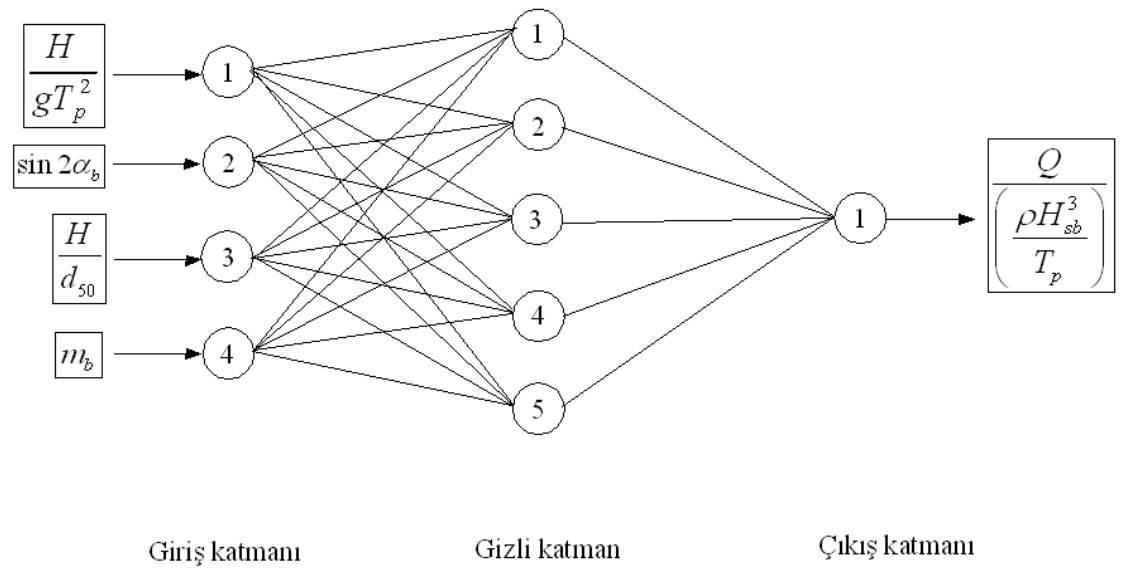
Çizelge 7.3 Kıyı boyu katı madde taşınımının YSA modelinde kullanılan ağ mimarileri ve aktivasyon fonksiyonları

Model	**Ağ Mimarisi**	**Aktivasyon Fonksiyonu**
YSA1	6:5:1	Gizli katman: Tanjant Sigmoid Çıkış katmanı: Lineer
YSA2	4:5:1	Gizli katman: Tanjant Sigmoid Çıkış katmanı: Lineer
YSA3	4:5:1	Gizli katman: Tanjant Sigmoid Çıkış katmanı: Lineer
YSA4	4:10:1	Gizli katman: Logaritmik Sigmoid Çıkış katmanı: Lineer

Yapay sinir ağlarının MATLAB yazılımı ile modellenmesinde girdi ve çıktı verileri rasgele şekilde eğitim, test ve doğrulama verileri olarak üç kısıma ayrılmaktadır. Belirli sayıda veri ilk önce eğitime tabi tutulup, diğer kalan veriler ise modelin test ve doğrulama aşamasında kullanılmaktadır. Şekil 7.4'te modellerdeki eğitim, test ve doğrulama verilerinin korelasyon katsayıları ve grafikleri görülmektedir.

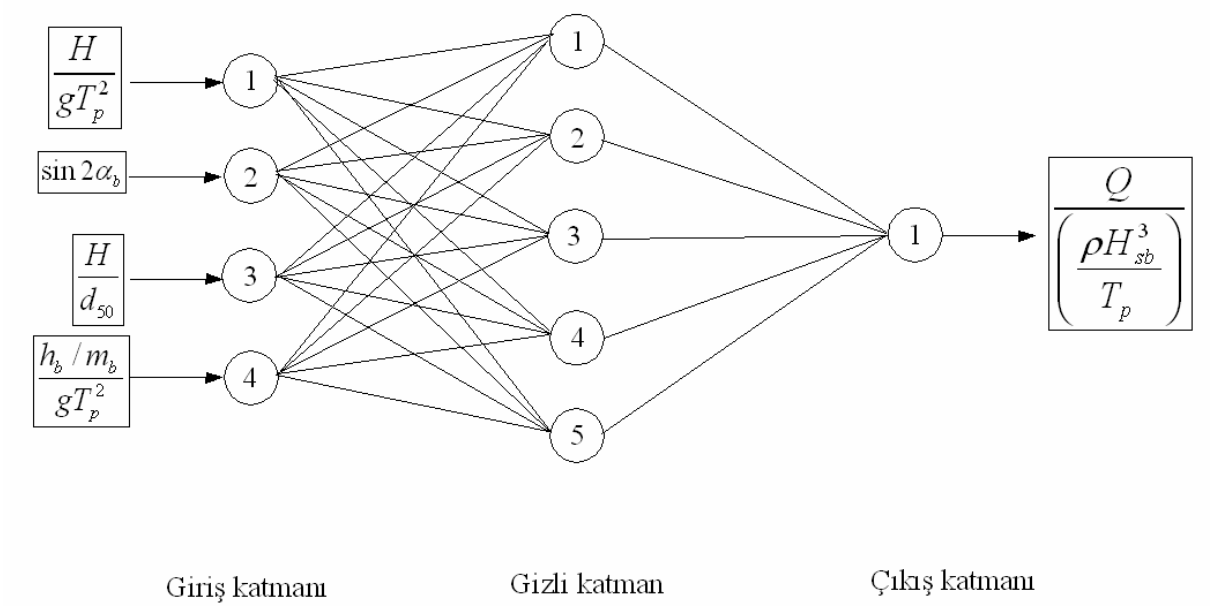


a) YSA1 modeli

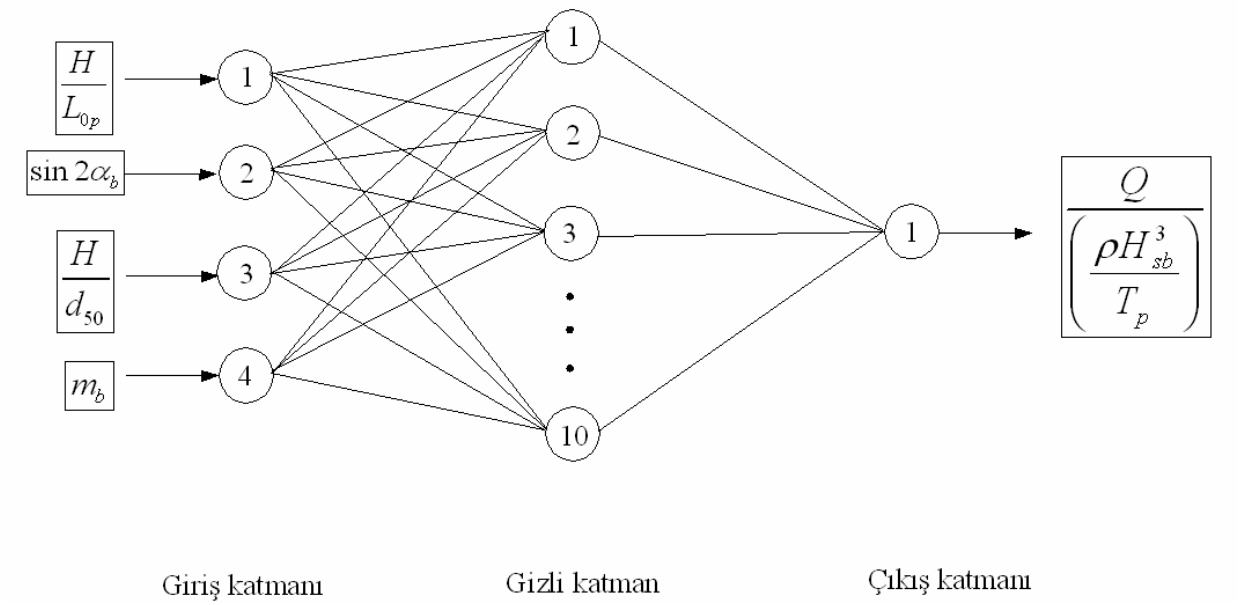


b) YSA2 modeli

Şekil 7.3 Kıyı boyu katı madde taşınım modeli için tasarlanan optimum ağlar

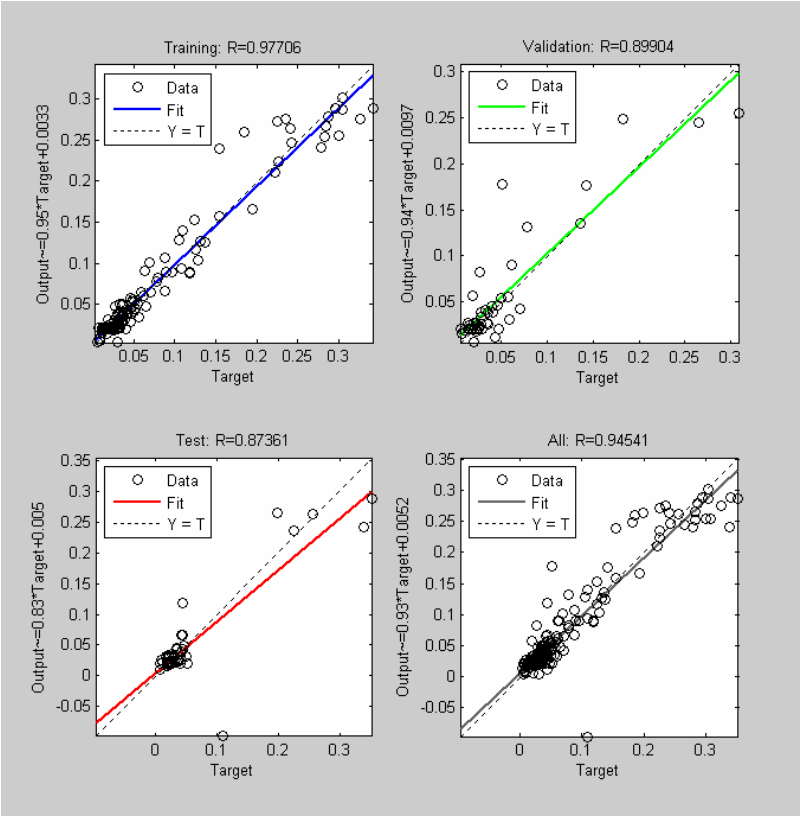


c) YSA3 modeli

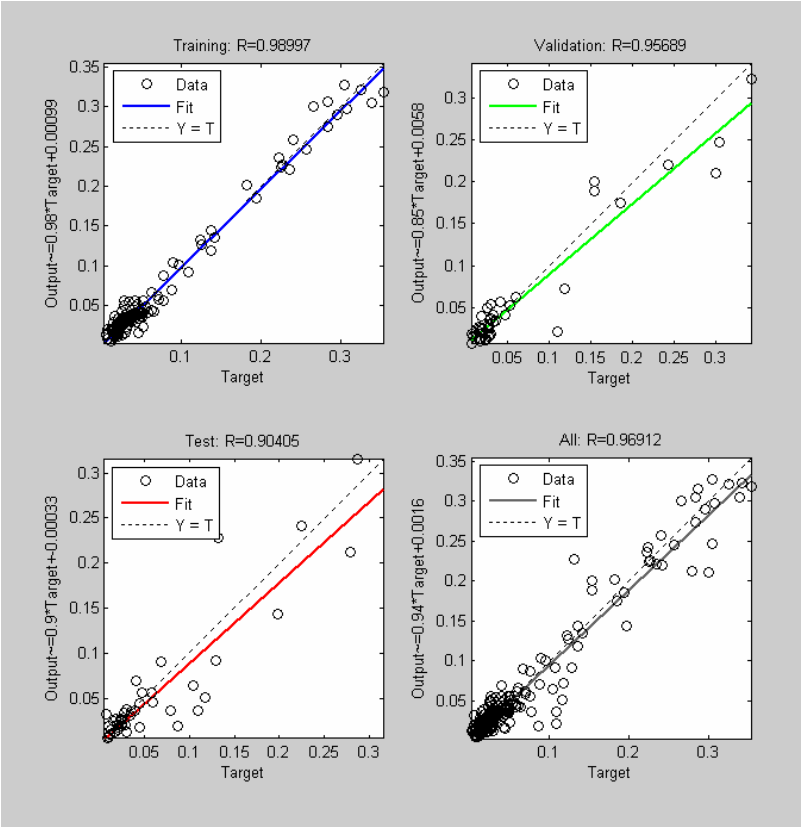


d) YSA4 modeli

Şekil 7.3 Devam

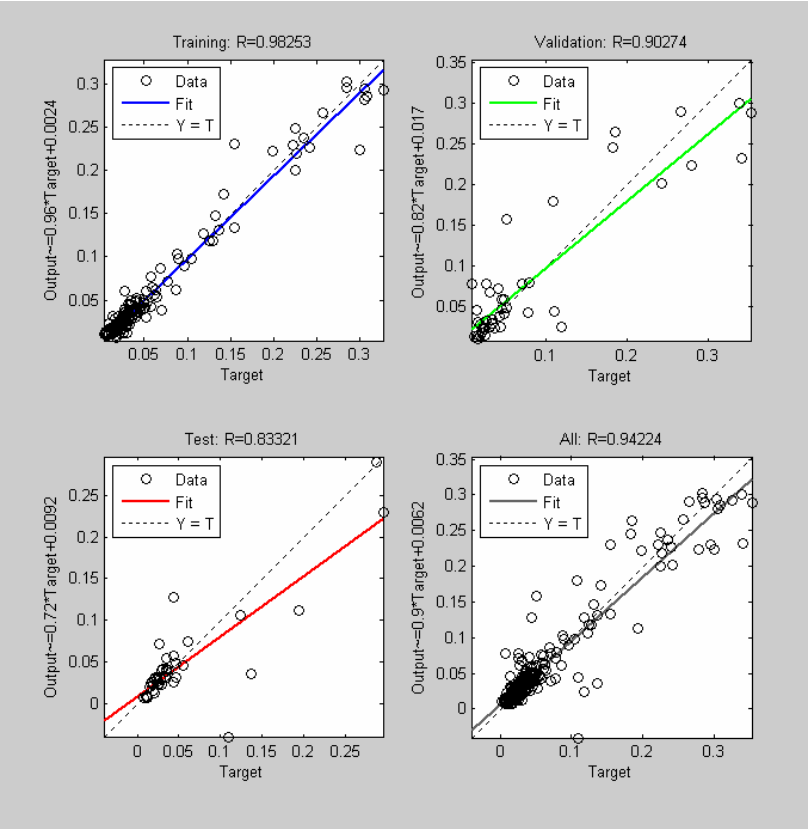


a) YSA1 modeli

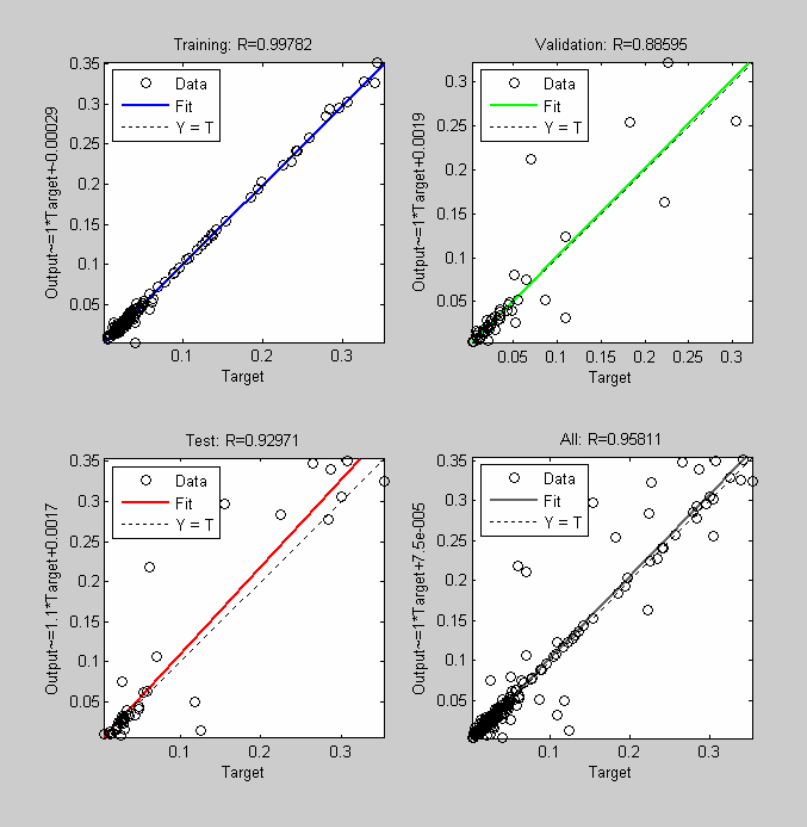


b) YSA2 modeli

Şekil 7.4 Verilerin MATLAB yazılımında eğitim, test ve doğrulama kısımlarının korelasyon sayıları ve ölçüm verileri ile uyumları



c) YSA3 modeli



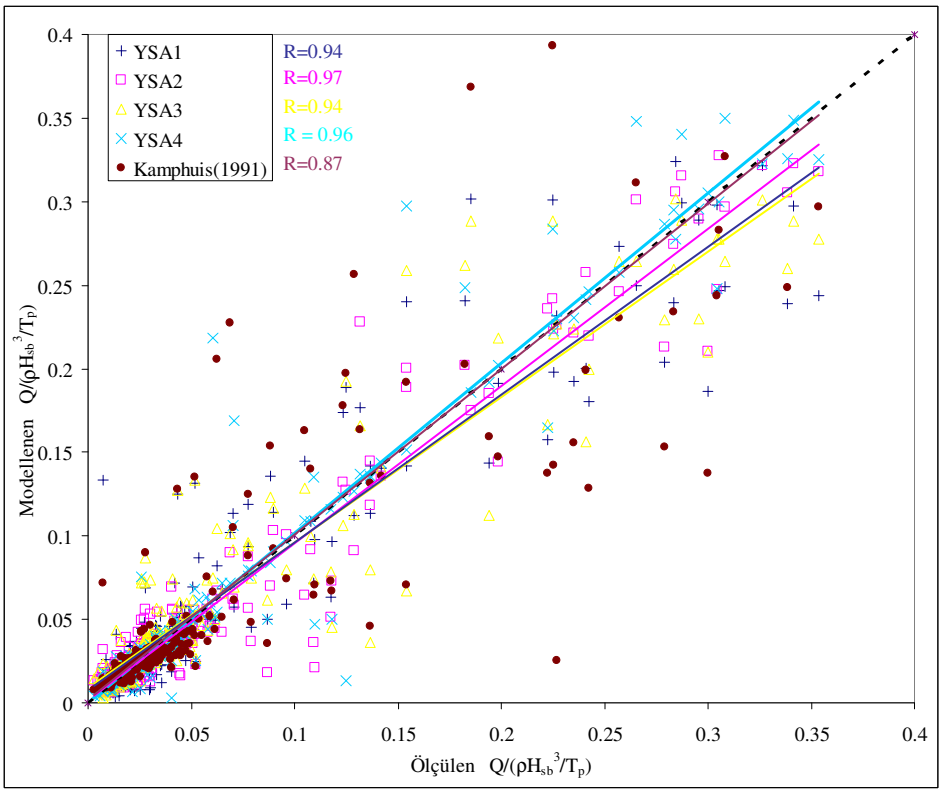
d) YSA4 modeli

Şekil 7.4 Devam

Yapay sinir ağları ile kıyı boyu katı madde taşınımın modellenmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 7.4 ve Şekil 7.5'te verilmektedir. Çizelge 7.4'te her modelin Kamphuis (2008)'den elde edilen ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması sonucunda bulunan korelasyon katsayıları ve tahminin standart hatası değerleri verilmiştir. Şekil 7.5'te ise modellenen $Q/\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)$ boyutsuz parametresine karşılık ölçülen $Q/\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)$ parametresi görülmektedir.

Çizelge 7.4 Kıyı boyu katı madde taşınım modellemesinden elde edilen korelasyon katsayıları ve tahminin standart hatası değerleri

Model	**Korelasyon Katsayısı (R)**	**Tahminin Standart Hatası (RMSE*)**
YSA1	0.94	0.028
YSA2	0.97	0.020
YSA3	0.94	0.029
YSA4	0.96	0.023
Kamphuis (1991)	0.87	0.046



Şekil 7.5 Model ve Kamphuis (1991) sonuçlarının karşılaştırılması

* RMSE: Ortalama hata kareleri toplamının kare kökü

Model sonuçları incelendiğinde ($\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) boyutsuzlarını girdi olarak kullanan YSA2 modelinin en yüksek korelasyon katsayısını ve en düşük tahminin standart hatası değerini verdiği görülmektedir. Bu modelden sonra en yüksek korelasyon katsayısına ve en düşük tahminin standart hatası değerine sahip olan ve ($\frac{H}{L_{0p}}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) boyutsuzlarını içeren YSA4 modeli gelmektedir. Ancak Şekil 7.5 incelendiğinde ölçüm sonuçları ile en iyi benzeşimi yakalayan modelin YSA4 olduğu görülmektedir. Bu modelin sonuçları incelendiğinde Kamphuis (1991) yönteminden sonra y=x doğrusuna en yakın eğilim çizgisine sahip model olduğu belirlenmiştir. Kamphuis (1991) modeli ise her ne kadar korelasyon katsayısı en düşük ve tahminin standart hatası değeri en yüksek model olarak belirlense de grafik incelendiğinde y=x doğrusuna en yakın eğilim doğrusunu vermektedir. Model sonuçlarını özetlemek gerekirse:

- YSA1 modeli, girdi olarak ($\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{h_b}$, $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) boyutsuzlarını içermektedir. Kullanılan boyutsuzlar, model sonuçları ile karşılaştırıldığında Kamphuis'ün (1991) belirttiği gibi $\frac{H}{h_b}$ boyutsuz parametresinin kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde çok etkili olmadığı görülmektedir. Aynı şekilde $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ parametresinin de YSA3 modelinden de yola çıkılarak katı madde taşınımında etkili bir parametre olmadığı gözlenmiştir. Çünkü her iki model girdilerinde de bu boyutsuz yer almakta ve iki modelin sonuçları da diğer modellere göre daha az uyumlu bulunmaktadır. Bunun bir diğer nedeni kıyı boyu taşınımının sadece surf bölgesi ile sınırlanmamasıdır.

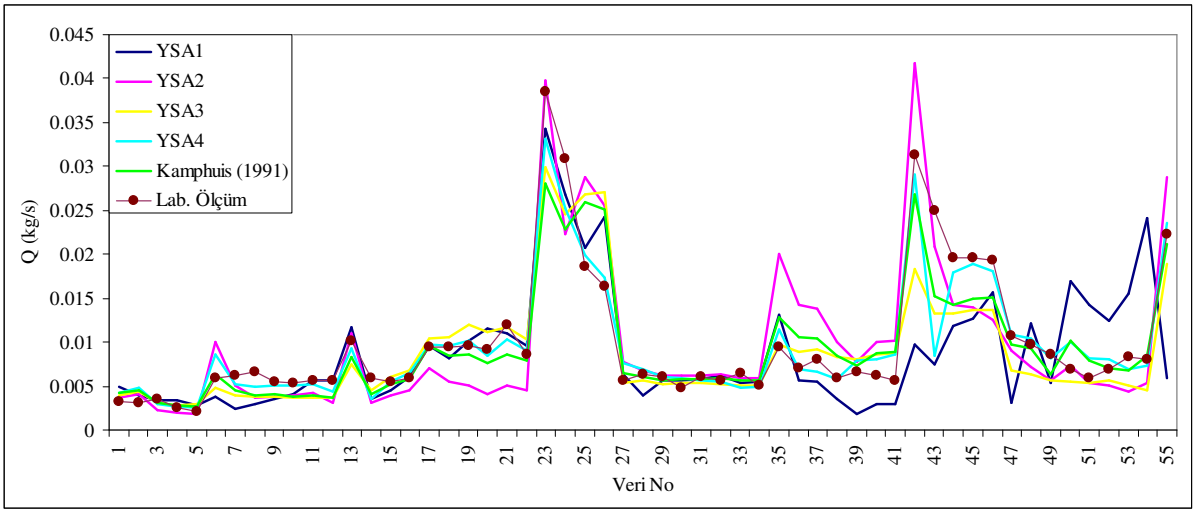
- YSA2 modelinde girdi parametreleri olarak ($\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) boyutsuzları yer almaktadır. Kamphuis (1991) ifadesindeki boyutsuzlardan tek farkı dalga dikliği parametresinin $\frac{H}{gT_p^2}$ şeklinde kullanılmasıdır. En yüksek korelasyon katsayısı ve en düşük tahminin standart hatası değeri elde edilmiştir ancak ölçüm sonuçları ile eğilim doğrusu açısından karşılaştırma yapıldığında diğer YSA4 ve Kamphuis (1991) modellerine göre daha az uyumlu olduğu belirlenmiştir.

- YSA3 modelinde girdi parametreleri olarak ($\frac{H}{gT_p^2}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ ve $\frac{H}{d_{50}}$) boyutsuzları yer almaktadır. Yapay sinir ağı modelleri arasında en düşük korelasyon katsayısı ve en yüksek tahminin standart hatası değeri bu modelde elde edilmiştir. Taban eğiminin etkisi doğrudan dikkate alınmamış, $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ boyutsuz parametresinin içinde yer almıştır. Taban eğimi etkisinin katı madde taşınım hesabında önemli olduğu bu model sonuçlarında da bir kez daha görülmüş ancak taşınımın surf bölgesi genişliği ile sınırlanamayacağı anlaşılmıştır.

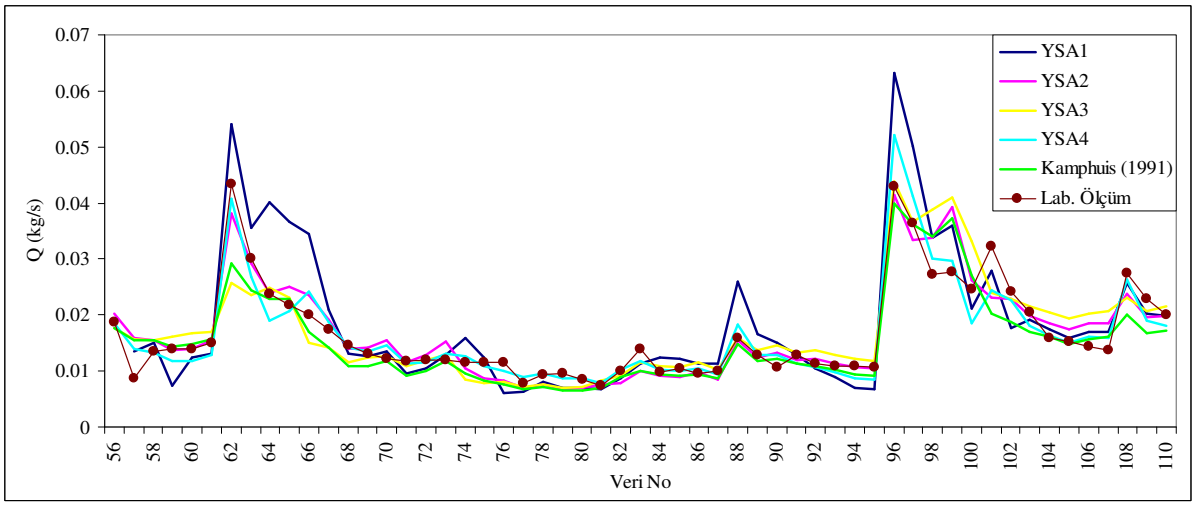
- YSA4 modeli, girdi olarak ($\frac{H}{L_{0p}}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) boyutsuzlarını içermektedir. Kamphuis (1991) ifadesindeki boyutsuz parametrelerle aynı olan bu model sonuçları en uygun yaklaşımı vermiştir.

- Kamphuis (1991) modelinin laboratuar verileriyle yapılan karşılaştırmada çok yakın sonuçlar verdiği ancak saha ölçüm verileriyle yapılan karşılaştırmalarda düşük değer verdiği gözlemlenmiştir. Aynı gözlem Smith vd. (2004) ve Wang vd.'nin (2002) yapmış olduğu çalışmalarda da yer almaktadır. Ancak tüm modeller arasında korelasyon katsayısı en düşük ve tahminin stadart hatası değeri en yüksek olmasına karşın saçılım grafiğinde y=x doğrusuna en yakın eğilim doğrusunu verdiği gözlenmiştir. Bu model sonucu ise Bölüm 3.6.1'de detaylı olarak anlatıldığı gibi Kamphuis (1991) yönteminin yüksek enerjili dalga koşullarında daha düşük değerler verdiği sonucunu doğrulamaktadır.

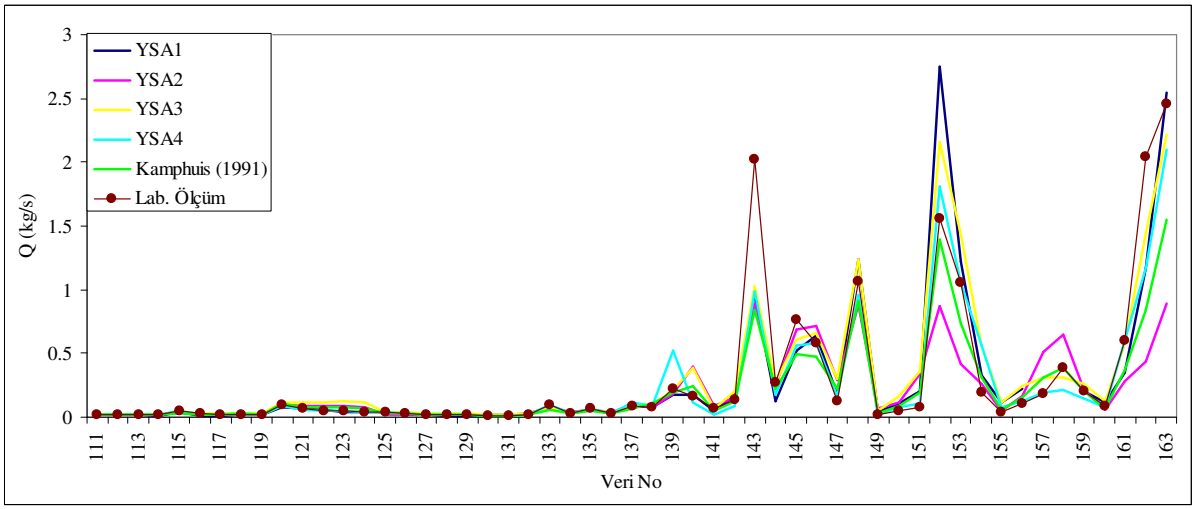
Boyutsuz çıktı parametresiyle $\left(Q/\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)\right)$ yapılan karşılaştırmalardan sonra saha ve laboratuar ölçüm verileri ayrı tutulmak üzere kıyı boyu katı madde debisi (Q (kg/s)) model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Boyutsuz $\left(Q/\left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p}\right)\right)$ parametresi eş zamanlı ölçülen kırılan belirgin dalga yüksekliği (H_{sb}) ve pik dalga periyotları (T_p) ile çarpılarak boyutlu hale getirilmiş ve tüm model sonuçları ile karşılaştırılması gerçekleştirilerek Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



a)

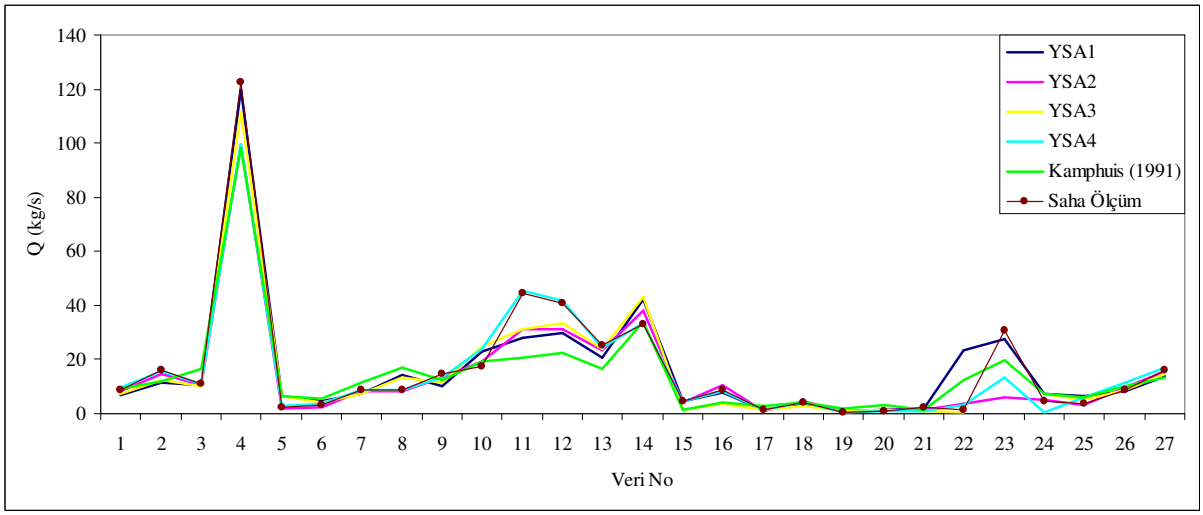


b)

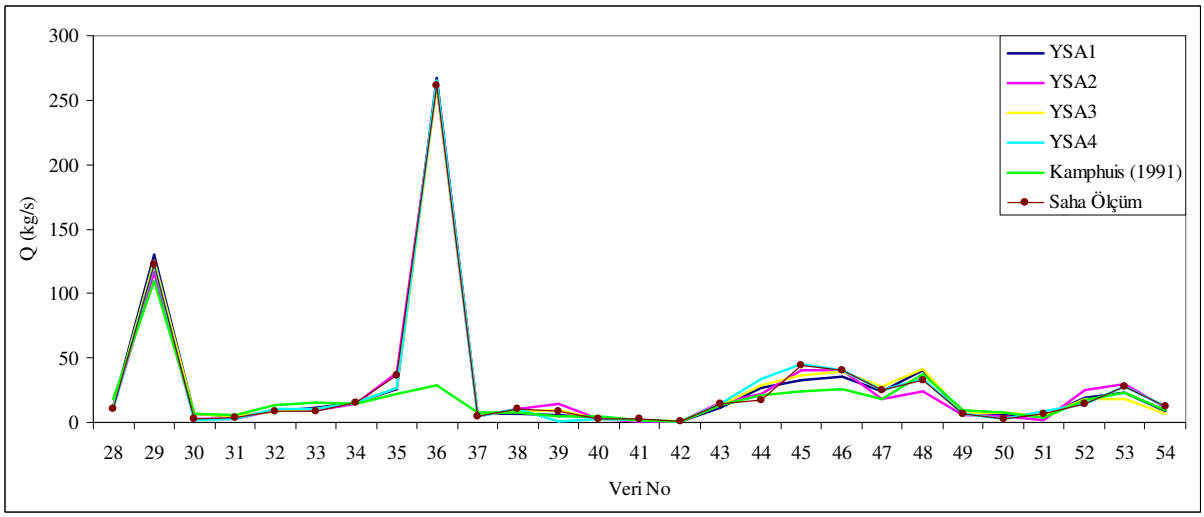


c)

Şekil 7.6 Saha ve laboratuar ölçüm verilerinin (kıyı boyu katı madde taşınım debileri) model sonuçları ile karşılaştırılması



d)



e)

Şekil 7.6 Devam

Şekil 7.6 incelendiğinde YSA4 model sonuçlarının ölçüm değerlerine en yakın eğilime sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç hem laboratuar ölçüm verilerinde hem de saha ölçüm verilerinde gözlenmektedir. YSA1 model sonuçlarının ise ölçüm değerlerinden oldukça fazla sapma gösterdiği belirlenmiştir. Kamphuis (1991) yönteminde elde edilen değer ise laboratuar ölçüm verilerine yeterince yakın olmasına karşın saha ölçüm verilerinde sapmalar gözlenmekte ve düşük tahminler vermektedir. Yine bu grafiklerden yüksek korelasyon katsayısı ve en düşük tahminin standart hatası değerine sahip olan YSA2 modelinin bazı noktalarda ölçüm sonuçlarından fazla miktarda sapan değerler verdiği görülmektedir. Şekil 7.5, 7.6 ve Çizelge 7.4 incelendiğinde en uygun yapay sinir ağı modelinin YSA4 modeli olduğu belirlenmiştir. Bu model gerek laboratuar gerekse saha verileriyle oldukça iyi uyum sağlamaktadır.

Yapay sinir ağları ile kıyı boyu katı madde taşınım modelinin diğer yöntemlerle karşılaştırmasını gerçekleştirmek için Bölüm 6.2.1'de verilen dalga ikliminden faydalanılmıştır. Saha verileri için dikkate alınan Karaburun kıyı alanında oluşacak yıllık katı madde taşınım miktarı yine Bölüm 6.2.1'de modellenen dalga parametreleri ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5 Yapay Sinir Ağları yöntemi için yıllık dalga iklimi

Yön	**H_{sb}**	**α_b**	**T_p**	**Frekans (%)**
N	1.24	15	4.86	5.54
NNE	1.31	3	4.89	19.33
NE	1.17	11	4.67	21.76
ENE	0.84	22	4.10	25.55
E	0.45	28	3.31	3.95
ESE	0.27	22	3.77	1.19
NW	0.53	27	3.89	0.51
NNW	0.76	25	4.01	1.79

Modelde ortalama tane çapı d_{50}=1.53 mm ve taban eğimi m_b=0.05 olarak tanımlanmıştır.

Modele kıyı çizgisini etkileyen her yön için dalga parametreleri girilmiş ($\frac{H}{L_{0p}}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b) ve model koşturulduktan sonra ise her yön için boyutsuz $\left(Q / \left(\frac{\rho H_{sb}^3}{T_p} \right) \right)$ parametresi elde edilmiştir. Bu değerler ilk olarak (kg/s) cinsinden katı madde taşınım debisine dönüştürülmüş daha sonra (m^3/yıl) olarak yıllık katı madde taşınım debisi hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre kıyı boyu taşınan toplam ve net katı madde miktarları:

Q_{net}= 73541 m^3/yıl

Q_{top}= 178121 m^3/yıl

olarak bulunmuştur.

7.5 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modellerinin Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada katı madde taşınım miktarının modellenmesi için dört farklı yöntemden faydalanılmıştır. Bunlar:

- CERC (1984) yöntemi,
- Kamphuis (1991) yöntemi,
- LITDRIFT sayısal modeli,
- Yapay sinir ağları (YSA) yöntemidir.

Yapay sinir ağları yöntemi dışındaki yöntemler Bölüm 6'da detaylı olarak anlatılmıştır. Ancak çalışmanın bu bölümünde YSA yönteminin diğer yöntemlerle karşılaştırılması için tekrar kısaca diğer yöntemlerden de bahsedilecektir. Çizelge 7.6'da çalışmada kullanılan katı madde taşınım modellerinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım debileri verilmiştir.

CERC (1984) Yöntemi:

En sık kullanılan kıyı boyu katı madde taşınım yöntemi olup yerini zamanla daha fazla kıyı parametresi içeren diğer yöntemlere bırakmaktadır. Genelde fırtına koşullarında yani ortalama dalga yüksekliklerinin 4m'yi geçtiği koşullarda CERC (1984) yönteminin kullanılmasının doğru sonuç vereceği belirtilmektedir (Wang vd., 1998). Çalışmada saha verilerinin alındığı Karaburun Bölgesi için dalga koşulları incelendiğinde yüksek enerjili dalgaların bir yıl içinde çok uzun süreli yer almamasından dolayı Çizelge 7.6'da görüldüğü gibi CERC (1984) yönteminin diğer yöntemlere göre oldukça yüksek sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

Kamphuis (1991) Yöntemi:

Çalışmada Kamphuis (1991) yönteminden elde edilen sonuçların sayısal model (LITDRIFT) ve yapay sinir ağları yöntemi ile elde edilen katı madde taşınım miktarlarına oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Kamphuis (1991) yöntemi daha fazla sayıda kıyı parametresi dikkate aldığı için son zamanlarda diğer katı madde taşınım yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır.

Sayısal Model (LITDRIFT):

Çalışmada LITDRIFT sayısal modeli ile farklı şekillerde kıyı boyu katı madde taşınım debisi belirlenmiştir. Bölüm 6.2'de bu yöntemler detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise yapay sinir ağları yöntemi ile karşılaştırılması yapılmıştır. LITDRIFT sayısal modelinde farklı dalga verileri tanımlanmış ve bunların sonucunda kıyı boyu katı madde taşınım debileri elde edilmiştir. Çizelge 7.6'da bu modellerden en uygun sonuç veren ikisi yer almaktadır. LITDRIFT1 (Zaman serisi) ile gösterilen modelde MIKE 21 SW yazılımından elde edilen dalga parametrelerinin zaman serisi şeklinde modelde tanımlanmasıyla elde edilen katı madde taşınım miktarını vermektedir. LITDRIFT2 (Model 2) ise Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen düzeltilmiş rüzgar verilerinden geliştirilen istatistiksel dalga

modelinden elde edilen dalga parametrelerinin yine zaman serisi şeklinde LITDRIFT yazılımında tanımlanmasıyla hesaplanan katı madde taşınım debisini vermektedir. Bu iki model sonucu Çizelge 6.10'da verilen LITDRIFT sayısal modelinden elde edilen en uygun kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarını vermiştir.

Ancak LITDRIFT sayısal modeli her ne kadar diğer yöntemlere göre taşınım işlemini tanımlayan parametreleri daha fazla içerse de, model bazı dezavantajlara sahiptir.

Pilkey (2002), çalışmasında LITPACK yazılımının kapalı bir kutu olduğunu vurgulamaktadır. Modelin çok fazla parametre içermesine rağmen tam olarak bu parametrelerin kendi içinde ve diğer parametrelerle ilişkisi anlaşılmadığı sürece modelin kurulumunun iyi yapılamayacağını belirtmiştir. Araştırmacı, LITDRIFT modelinde Deigaard vd.'nin (1986) kıyı boyu taşınımı ile ilgili bazı bilgileri vermesine rağmen yine de kullanıcıların model parametrelerini nasıl tanımlayacağını karar vermede zorluk yaşadıklarını belirtmiştir.

Bu çalışmada edinilen tecrübelerden LITDRIFT modeli için çeşitli yorum ve öneriler elde edilmiştir. LITDRIFT modelinde farklı ağ noktalarında katı madde hesabı yapılmasının sebebi tam olarak açıklanmamaktadır. Yani LITDRIFT üç boyutlu bir model olmadığı için kıyıya dik profil üzerinde farklı noktalarda tek başına katı madde taşınım hesabı yapılmasının gereksiz olduğu anlaşılmıştır.

Modelde en önemli kalibrasyon parametresi olarak taban pürüzlülüğü verilmektedir, ancak kıyı boyu akıntı analizlerinin çoğunda, taban sürtünme katsayısı (C_f veya f_w) kullanıcılar tarafından seçilen serbest parametredir. Ayrıca modelde kabarma ve kıyı boyu akıntılarında bore etkisi dikkate alınmamaktadır.

Model, türbülans eddy viskozitesi yerine artık son yıllarda araştırmacılar tarafından tercih edilmeyen, Johnsson vd. (1974) tarafından tanımlanmış olan momentum transfer katsayısını (E) kullanmaktadır.

Yapay Sinir Ağları Yöntemi:

Yapay zeka teknikleri karmaşık sistemlerin modellenmesi amacıyla birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmasına karşın kıyı mühendisliği alanında henüz yeterli yoğunlukta kullanılmamaktadır. Bu çalışmada yapay zeka tekniklerinden yapay sinir ağları yöntemi kıyı boyu katı madde taşınımı modellemesinde kullanılmıştır.

Bu yöntemin kullanılma amaçlarından biri, mevcut olan saha ve laboratuar ölçüm verileriyle (Kamphuis, 2008) yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli geliştirmektir. YSA tekniği ile deterministik kıyı boyu taşınım modellerindeki belirsizliklerin etkisi minimuma

düşürülmeye çalışılmıştır. Çünkü çalışmada kullanılan diğer modellerin hepsinde olayın fiziğinden ötürü birçok belirsizlik bulunmaktadır. Bu modeller genelde yerel olarak geliştirilen ve daha sonra bazı katsayılarla genelleştirilen ampirik ifadelere dayanmaktadır. Kamphuis'ten (2008) faydalanılan ölçüm verileri hem saha hem de laboratuar verilerini içerdiğinden YSA modelinin eğitilmesinde geniş bir veri ölçek aralığına sahip olunmuştur. Bu sebeple model sadece düşük enerjili dalga koşullarını değil aynı zamanda yüksek enerjili dalga koşullarını da yansıtacak şekilde tasarlanmıştır.

YSA yönteminde dört farklı model seçilmiştir. Bunlardan en uygun olanı Kamphuis (1991) ifadesi ile aynı boyutsuz parametreleri içeren YSA4 modelidir. Bu modelden elde edilen sonuçlar diğer kıyı boyu taşınım yöntem sonuçları ile karşılaştırıldığında net ve toplam kıyı boyu taşınım debisi açısından en çok Kamphuis (1991) yöntemi sonuçlarına yakın olduğu gözlenmiştir (Çizelger 7.6). Diğer LITDRIFT sayısal modelleri YSA4 modeline göre bir miktar fazla tahmine sahip olmuştur

Çizelge 7.6 Yapay sinir ağları ile modellenen Karaburun saha çalışmasına ait katı madde taşınım debisinin diğer modellerle karşılaştırılması

	Q_{net} (m^3/yıl)	Q_{toplam}(m^3/yıl)
LITDRIFT1 (Zaman serisi)	85210	152600
LITDRIFT2 (Model 2)	89570	168100
Kamphuis (1991)	76448	186510
CERC (1984)	443292	772350
Yapay Sinir Ağları YSA4 Modeli	73541	178121

Bu çalışmada yapay sinir ağları ile modellenen kıyı boyu taşınım hesabının kullanılmasıyla elde edilecek deneyimler, bütünleşik kıyı alanı yönetiminde daha hızlı ve belirsizlikleri daha az içeren sonuçların alınmasını sağlayacaktır.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Herhangi bir kıyı alanında kıyı morfolojisi gelişimini belirleyebilmek için rüzgar, dalga gibi birçok kıyı parametresinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu parametreler, çoğu zaman doğanın karmaşık davranışından dolayı tam ve doğru olarak tespit edilememektedir. Özellikle uzun dönemli doğru dalga verileri her zaman mevcut olmamakta, dolayısıyla kıyı gelişimini izlemede kullanılacak kıyı boyu katı madde taşınım miktarları doğru tespit edilememektedir.

Bu çalışma iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda katı madde taşınımını yeterince doğru tahmin edecek bir istatistiksel dalga modeli kurulmuştur. Deniz durumunu tanımlayan hiç bir spektrum modelinin dünyanın her yerinde ve tüm fırtına koşullarında kullanılamayacağı bilinen bir gerçektir. Bu nedenle tanımlanan bir bölge için fırtına koşullarına bağlı bir dalga modeli en gerçekçi dalga tahminini sağlamaktadır.

İkinci adımda ise farklı yöntemlerden elde edilen yeterince doğru kıyı boyu katı madde taşınımları yardımıyla gerek laboratuar gerekse arazi koşullarında daha küçük RMS (tahminin standart hatası) değerine sahip daha gerçekçi yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli önerilmiştir.

Araştırmada Güneybatı Karadeniz'de bulunan Karaburun kıyı alanı, saha çalışması için örnek bölge olarak seçilmiştir. Belirtildiği gibi iki ana bölümden oluşan bu çalışmanın ilk bölümünde çalışma alanındaki dalga verilerinin modellenmesi, ikinci bölümünde ise kıyı boyu katı madde taşınım modelinin geliştirilmesi ve kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Saha çalışmalarında ilk olarak dalga ikliminin belirlenmesi amacıyla yerinde dalga ölçümü yapılmıştır. Çalışma alanında -16 m derinliğe akustik ve basınç tipi DL2 model dalga ölçer yerleştirilmiştir. Dalga ölçümleri toplamda 18.5 ay sürmüştür ve bu süre zarfında 8.5 aylık dalga verisi elde edilmiştir.

Dalga ölçümünün yanında çalışma bölgesinde yerel olarak rüzgar ölçümü yapılmıştır. OTA11-T model bir rüzgar ölçer özellikle kuzeyli rüzgarları algılayacak biçimde bölgeye yerleştirilmiştir. Rüzgar ölçümleri yaklaşık 10 ay sürmüştür.

Yakın kıyı bölgesinin batimetrisi hakkında bilgi edinmek amacıyla derinlik ölçümleri yapılmıştır. Derinlikler HAWKEYE FF3300PX-1 model taşınabilir echosounder, koordinatlar ise GARMIN GPS 12 model el GPS'iyle belirlenmiştir.

GPS yöntemi kullanılarak kıyı çizgisindeki değişimler belirlenmiştir. Farklı tarihlerde 2 adet Ashtech Z-Surveyor ve 4 adet Trimble 4000 SSI ve SSE GPS aletleri kullanılarak N.14933 noktasında ve baz hattı boyunca tesis edilen 9 noktada GPS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. GPS ölçümleri 15 saniye kayıt aralığında 4 saatlik oturumlar şeklinde toplanmıştır. Bu periyotlarda toplanan GPS ölçüleri Bern Üniversitesi (İsviçre) tarafından geliştirilen Bernese 4.2 GPS yazılımı ile değerlendirilmiştir. Ayrıca kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesi için uydu görüntülerinden de faydalanılmıştır.

Çalışma bölgesindeki katı madde özelliklerinin belirlenmesi için bölgede mevcut balıkçı barınağının yığılma bölgesi (ikincil dalgakıran yanı) ve dalga ölçerin bulunduğu derinlikten katı madde numuneleri alınmıştır. Bu numunelerin granülometrik özelliklerinin belirlenmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuarında elek analizi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kumun diğer özelliklerinin belirlenebilmesi için birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Günlük su seviyesi değişimini incelemek amacıyla yine mevcut balıkçı barınağının içindeki rıhtım duvarına 100 cm yüksekliğinde bir ölçme şeridi yerleştirilmiştir. Gün içerisindeki ve tüm ölçüm günlerindeki toplam su seviyesi değişiminin hangi değerler arasında olduğunu belirlemek amacıyla sabah saat sekiz ile akşam saat on arasında saat başı, belirlenen referans seviyesine göre ölçüm alınmıştır.

Akıntı verilerini belirlemek amacıyla iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki şamandıralarla yapılan ölçüm, diğeri ise ADCP (Aquadopp Current Profiler) cihazı ile akıntı ölçümüdür.

Saha çalışmaları TÜBİTAK tarafından İÇTAG I845 (103I008) nolu proje ile desteklenmiştir.

Çalışma alanındaki dalga parametlerinin belirlenmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler: SMB, SPM gibi parametrik yöntemler, sayısal dalga modeli (MIKE 21 SW) ve bu çalışmanın birinci adımında geliştirilen istatistiksel dalga modelidir.

Kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için ise CERC (1984), Kamphuis (1991), LITDRIFT sayısal modeli ve "Yapay Sinir Ağları" yöntemlerinden faydalanılmıştır. Kıyı çizgisinin modellenmesinde ise LITLINE sayısal modeli kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Bu çalışmada geliştirilen istatistiksel dalga modelinde ilk olarak rüzgar yönü aralığının etkisi incelenmiştir. Rüzgar yönü aralığı için üç farklı alternatif seçilmiş (22.5° ve farklı yönleri içeren olası iki adet 45° aralığı) ve bunların dalga parametreleri üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda en uygun yaklaşımın 22.5°'lik rüzgar yönü aralığı olduğu belirlenmiştir. Fröhle ve Fittschen (1998) çalışmalarında bu aralığı 30° olarak önermişlerdir.

2. İstatistiksel dalga modelinde, dalga gelişiminde belirgin olan rüzgar esme sürelerinin etkisi incelenmiştir. Rüzgar esme sürelerinde dalga ölçümünden önce son dört saatte esen rüzgar hızlarının ortalaması alınarak gerçekleştirilen çoklu regresyon analizi sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla en iyi uyumu verdiği gözlenmiştir. Yani rüzgar hızının son dört saatteki ortalaması üç saat ortalama, iki saat ortalama ve eş zamanlı rüzgar hızına göre daha kuvvetli regresyon bağıntısı sağlamaktadır.

3. İstatistiksel dalga modelinde rüzgar esme hızının yanında rüzgar esme yönünün de etkisi araştırılmıştır. Tüm çoklu regresyon analizi sonuçları incelendiğinde yine son dört saat esen rüzgar yönlerinin ortalamasının alınması en iyi sonucu vermektedir.

4. Çalışmada geliştirilen dalga modelinde ayrıca feç etkisi de incelenmiştir. Çoklu regresyon analizi aşamalarında rüzgar hızı ve rüzgar yönünün yanısıra o yönden esen rüzgarın oluşturduğu etkili feç mesafesi de dikkate alınmıştır. Hangi rüzgar yönü dikkate alındıysa o yönde oluşacak etkili feç mesafesi tahmin parametresi olarak regresyon analizinde hesaba katılmıştır. Feç parametresinin dalga yüksekliği ve dalga periyodunu 0.5 üstel değeri ile etkilediği görülmüştür. Ancak dalga yönü hesaplamalarında feç parametresinin bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır.

5. İstatistiksel dalga modeli iki farklı rüzgar verisiyle gerçekleştirilmiştir. Bunlar; mevcut meteoroloji istasyonundan doğrudan alınan rüzgar verileri ve kalibre edilmiş rüzgar verileridir. Doğrudan alınan rüzgar verilerinden elde edilen rüzgar–dalga korelasyon denklemleri sırasıyla belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü için aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$H=0.011UF^{0.5}+0.029U\sin\Theta+0.028U\cos\Theta-0.016F^{0.5}+0.455 \qquad (5.12)\ (8.1)$$

$$T=0.006UF^{0.5}+0.077U\sin\Theta+0.115U\cos\Theta-0.03F^{0.5}+3.725 \qquad (5.14)\ (8.2)$$

$$\theta=-0.086U\Theta^{1}+3.15\times10^{-6}U\Theta^{3}-1.9\times10^{-11}\Theta^{5}+88.950 \qquad (8.3)$$

6. İstatistiksel dalga modelinde kalibre edilen (düzeltilmiş) rüzgar verilerinden elde edilen rüzgar–dalga korelasyon denklemlerinden elde edilen sonuçlar ölçüm değerlerine daha yakın bulunmuştur. Sırasıyla belirgin dalga yüksekliği, ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yönü için aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir:

$$H=0.009UF^{0.5}+0.012U\sin\Theta+0.068U\cos\Theta-0.039F^{0.5}+0.658 \quad (5.13)\ (8.4)$$

$$T=0.005UF^{0.5}+0.069U\sin\Theta+0.145U\cos\Theta-0.055F^{0.5}+3.899 \quad (5.15)\ (8.5)$$

$$\theta=0.013U\Theta^{1}+2.07\times10^{-8}U\Theta^{3}-6.8\times10^{-13}\Theta^{5}+81.329 \quad (8.6)$$

7. Rüzgar-dalga korelasyonu analizi sonucunda elde edilen denklemlerden hesaplanan dalga parametreleri ölçüm derinliğindeki (-16 m) dalga parametreleridir. Bu sebeple derin deniz belirgin dalga yüksekliklerini elde edebilmek için sayısal modelden hesaplanan derin deniz belirgin dalga yükseklikleri ile istatistiksel dalga modeli sonucunda elde edilen belirgin dalga yükseklikleri arasında korelasyon kurulmuştur. Sayısal model ile korelasyon kurulmasının sebebi bu modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği değerlerinin ölçüm sonuçları ile oldukça iyi bir uyum içinde olmasıdır. Bu korelasyon sonucunda derin deniz belirgin dalga yükseklikleri için aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir. (8.7) eşitliği bölgedeki meteoroloji istasyonundan doğrudan alınan rüzgar verileri ile elde edilen rüzgar-dalga korelasyon denklemini, (8.8) eşitliği ise düzeltilmiş rüzgar verileri ile elde edilen rüzgar-dalga korelasyon denklemini vermektedir.

$$H=0.01UF^{0.5}+0.028U\sin\Theta+0.026U\cos\Theta-0.015F^{0.5}+0.74 \quad (8.7)$$

$$H=0.009UF^{0.5}+0.011U\sin\Theta+0.065U\cos\Theta-0.038F^{0.5}+0.93 \quad (8.8)$$

8. Dalga periyotlarının belirlenmesinde ortak dalga periyodu-dalga yüksekliği dağılımı yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntemde sayısal model sonuçlarından elde edilen dalga periyotlarına karşılık dalga yüksekliklerinin ortak dağılımı belirlenmiştir. Ortak dağılım yöntemi sonucunda ölçüm bölgesi için aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$T = 4.29H^{0.32} \quad (5.17)\ (8.9)$$

9. Dalga yönlerinin belirlenmesinde yine ortak rüzgar yönü-dalga yönü dağılımı kullanılmıştır. Saatlik olarak elde edilen meteoroloji istasyonu rüzgar esme yönlerine karşılık dalga ölçüm yönlerinin ortak dağılımı belirlenmiştir. Bu dağılım sonucunda aşağıda verilen dalga yönü denklemi elde edilmiştir.

$$\theta = 0.0017\Theta^{2} - 0.533\Theta + 115.72 \quad (5.19)\ (8.10)$$

10. İstatistiksel dalga modelinin doğrulanması önceki sonuçlarda belirtildiği gibi ilk olarak dalga ölçüm verileriyle, ikinci olarak ise kıyı çizgisi değişimini belirleyen sayısal model ile gerçekleştirilmiştir. Her iki doğrulama aşamasında da modelden elde edilen sonuçların dalga ölçüm verisini ve kıyı çizgisi değişimini oldukça iyi benzeştirdiği görülmüştür.

11. Sayısal dalga modelinin kalibrasyonu aşamasında model sonuçlarını etkileyen en önemli parametrenin köpüklenme parametresi (C_{ds}) olduğu belirlenmiştir. Köpüklenme parametresi literatürde önerilen 4.5 değerinden kademeli olarak 0.5 değerine indirilmiş ve en uygun sonuç 0.5 değerinde elde edilmiştir. Kırılma parametrelerinde ise kırılmadan sonra enerji kaybı oranını kontrol ederken α parametresi 1, derinlikle ilgili kırılma miktarını kontrol eden γ parametresi değeri 0.8 olarak belirlenmiştir. Taban sürtünmesi değeri ise 0.04 olarak bulunmuştur.

12. Kıyı boyu katı madde taşınım hesabı için kullanılan yöntemlerden biri de LITDRFIT sayısal modelidir. Kalibrasyon parametreleri arasında taban pürüzlülüğü yer almaktadır. Modelin kalibrasyonu Kamphuis (1991) yönteminden elde edilen katı madde taşınım miktarı ile yapılmıştır. Kamphuis (1991) yönteminden elde edilen katı madde taşınım debisine en yakın çıkan sonuç k=0.01 m taban pürüzlülüğü ile koşturulan model sonucudur.

13. LITDRIFT modelinin kalibrasyon aşamasında yerel rüzgar parametrelerinin etkisi de incelenmiştir. Koşturulan ilk modelde ECMWF'ten elde edilen yerel rüzgar yönü ve hızı modele girdi olarak tanımlanmıştır. İkinci modelde ise rüzgar yönü ve hızının değerleri sıfır olarak tanımlanmıştır. İki model sonucu incelendiğinde rüzgar parametrelerinin etkisinin katı madde taşınımı üzerinde oldukça küçük mertebede olduğu görülmüştür. Yerel rüzgar etkisi içerilmeden koşturulan model sonucu, bu etkiyi içeren model sonucuna göre net katı madde taşınım miktarında %2 oranında bir değişim gösterirken, toplam katı madde miktarında ise %5.7 oranında bir değişim vermektedir

14. İstatistiksel dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri ile yapılan katı madde taşınım hesap sonuçları, sayısal dalga modelinden elde edilen dalga verilerinin kıyı boyu katı madde taşınım modelinde tanımlanmasıyla hesaplanan taşınım debisi değerlerine oldukça yakın bulunmuştur. Bu aşamada rüzgar parametrelerinin düzeltilmesiyle katı madde taşınım miktarının geliştirilen dalga modeli ile daha doğru hesaplandığı görülmüştür.

15. Çalışmada kıyı çizgisi değişiminin belirlenmesi için LITLINE sayısal modeli kullnılmıştır. LITLINE modelinde kullanılan en önemli kalibrasyon parametresi, kapama derinliği (d_k), basamak yüksekliği ($h_{basamak}$) ve kumul yüksekliğini (h_{kumul}) içeren aktif yükseklikliktir (h_{aktif}). Modelin, uydu görüntüleri ve GPS ölçümleri ile yapılan kalibrasyonu sonucunda bu değer h_{aktif}=22 m olarak bulunmuştur. Kıyının aktif yüksekliği içinde yer alan kapama derinliğinin doğru olarak belirlenmesi kıyı çizgisi modellemesindeki en

önemli etkenlerden biri olduğu görülmüştür. Bu sebeple bu değerin doğru olarak tanımlanması sayısal modelin benzeştirme oranını büyük ölçüde artırmaktadır.

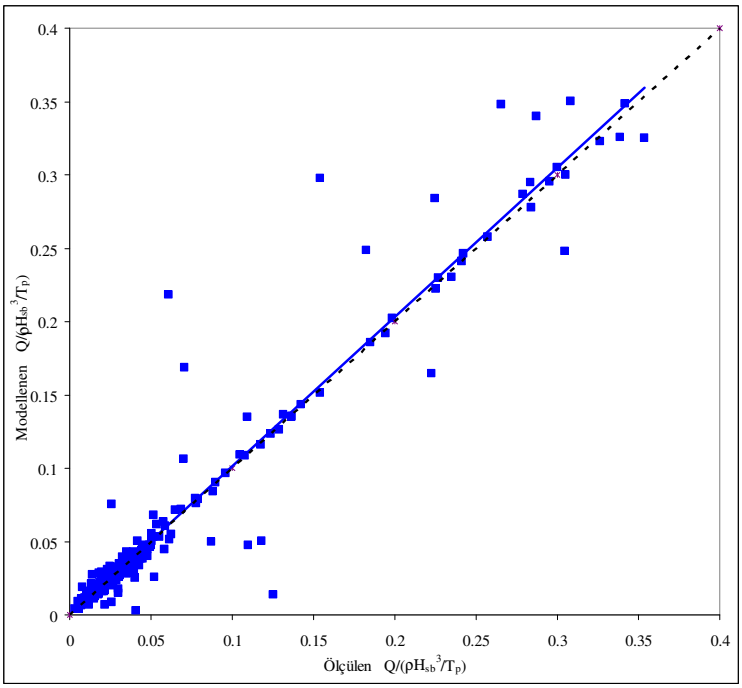
16. Sayısal modelin öncelikli olarak GPS ölçümleri ile karşılaştırılmasıyla kalibrasyonu yapılmıştır. Model, ilk aşamada sayısal dalga modelinden elde edilen dalga parametreleri ile koşturulmuştur. Model sonucuna göre yukarı kıyıda oldukça iyi bir uyum gözlenmiştir. Orta kıyıda başlangıç kıyı çizgisine göre fazla bir değişim gözlenmezken aşağı kıyıda uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi bu bölgede aynı dönemlerde tarama yapılmasıdır. Sayısal model sonuçlarının uydu görüntüleri ile doğruluğu da test edilmiştir. Uydu görüntülerinin sayısallaştırılması ile elde edilen kıyı çizgisi de aynı şekilde benzeştirilmiştir. Böylece uydu görüntüleri yardımıyla LITLINE modelinin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

17. Çalışmada geliştirilen istatistiksel dalga modelinin sonuçları bölgede kıyı boyu katı madde taşınım ölçümleri bulunmadığı için kalibrasyonu yapılan sayısal model ile doğrulanmıştır. Bu modelden elde edilen dalga verileri ile sayısal kıyı çizgisi modeli tekrar koşturulmuştur, bu sonuçlar kıyı çizgisi ölçüm değerlerine daha yakın bulunmuştur. Özellikle orta kıyıdan aşağı kıyıya doğru olan bölümlerde, ölçümlerde gözlenen erozyon miktarı bu simülasyon sonucunda daha iyi benzeştirilmiştir. Bunun sonucunda bu bölgedeki yerel dalga parametrelerinin istatistiksel dalga modeli ile daha iyi benzeştirildiği görülmüştür.

18. Çalışmanın ikinci aşamasında yapay sinir ağları yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınım modeli geliştirilmiştir. Öncelikle kıyı boyu taşınımın fonksiyonu olduğu düşünülen boyutsuz parametreler belirlenmiştir. $\frac{H}{h_b}$ boyutsuz parametresinin kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde çok etkili olmadığı görülmüştür. Diğer bir parametre olan $\frac{h_b / m_b}{gT_p^2}$ boyutsuzunun yine katı madde taşınımında etkili bir parametre olmadığı belirlenmiştir. Çünkü kıyı boyu katı madde taşınımı sadece surf bölgesi ile sınırlanmamaktadır.

19. Kıyı boyu katı madde taşınımında en etkili parametrelerin Kamphuis (1991) yönteminde olduğu gibi $\frac{H}{L_{0p}}$, $\sin 2\alpha_b$, $\frac{H}{d_{50}}$ ve m_b boyutsuzlarının olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre "Yapay Sinir Ağları Yöntemi" yardımıyla yeni bir model geliştirilmiş ve geliştirilen model çıktılarının ölçüm verileriyle karşılaştırılması sonucunda korelasyon katsayısı 0.96

ve RMS (tahminin standart hatası) değeri 0.023 olarak belirlenmiştir. Şekil 8.1'de geliştirilen modelin ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 8.1 YSA yöntemiyle geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modelinin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

20. Kamphuis (1991) modelinin laboratuar verileriyle yapılan karşılaştırmada çok yakın sonuçlar verdiği ancak saha ölçüm verileriyle yapılan karşılaştırmalarda düşük değer verdiği gözlemlenmiştir. YSA yöntemi ile geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modeli sadece düşük enerjili dalga koşullarında değil, yüksek enerjili dalga koşullarında da gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Yani geliştirilen model gerek saha gerekse laboratuar ölçüm verileri ile oldukça iyi uyum sağlamıştır. Yüksek derecede belirsizlik içeren kıyı boyu katı madde taşınımının, deterministik yöntemler yerine doğrusal olmayan yapay sinir ağları ile elde edilmesi, mevcut belirsizliklerin azaltılması yoluyla karmaşık modellere gereksinim duyulmadan modellenmesine olanak sağlamıştır.

Bu sonuçlar ışığında ileride yapılabilecek araştırmalar için öneriler aşağıda ifade edilmiştir:

- Yapılacak ilave çalışmalarla Karadeniz gibi kapalı basenlerde dalga spektrum modeli geliştirilebilir.
- Benzeri istatistiksel dalga modelleri farklı kıyı alanlarında geliştirilebilir.
- Dalga ve rüzgar yönü korelasyonunun artırılması ve bu ilişkiyi daha gerçekçi tanımlayan analizlere ihtiyaç vardır. Bu amaçla kıyı alanlarında uzun süreli dalga ölçümleri yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aydın, Ö., Ata, E. ve Pırtı, A. (2004), "RTK GPS Sisteminin Poligon Ölçmelerinde Kullanımı, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sayı:1/2004, sayfa 56, YTÜ, İstanbul.

Aydın, Ö., Aykut, N.O., Akpınar, B. ve Ata, E. (2005), "RTK GPS Yöntemiyle Kıyı Çizgisinin Ölçülmesi", 5.Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Bodrum.

Aykut, N.O., Doğan, U., Ata, E. ve Arı, A. (2005), "GPS ile Kıyı Çizgisinin Belirlenmesi, Karaburun Örneği", 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul.

Bagnold, R.A. (1954), "Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear", Proceedings of the Royal Society (London), Ser. A, 225, 9-63.

Bagnold, R.A. (1963), "Beach and Nearshore Processes Part 1: Mechanics of Marine Sedimentation in the Sea: Ideas and Observations", Vol 3, Interscience, NY/Hill M. N., 507-528.

Baidei, P., Kamphuis, J.W. ve Hamilton, D.G. (1994), "Physical Experiments on the Effects of Groin on Shore Morphology", Proc. 24th Coastal Eng. Conf., ASCE: 1782-1796.

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

Bailard, J.A. (1984), "A simplified model for longshore sediment transport", Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1454-1470.

Bakker.,W.T. (1968), "The Dynamics of a Coast with a Groin System", Proc. 11th Int. Conf. on CO. Eng., ASCE, London, 492-517.

Barnett, T.P. (1968), "On the Generation, Dissipation and Prediction of Ocean Wind Waves", Jour. Geoph. Res., 73: 513-530.

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

Bird, E.C.F. (1985), Coastline Changes,: A Gloabal Review, Wiley, Chichester, U.K.

Booij, N., Holthuysen, L.H ve Ris, R.C. (1996), "The Swan Wave Model for Shallow Water", Proc. 25th Int. Conf. On Co. Eng., ASCE, Orlando, 668-676.

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

Bruno, R.O., Dean, R.G. ve Gable, C.G. (1980), "Littoral Transport Evaluations at a Detached Breakwater." Proc. 17th Int. Conference on Coast. Engrg., 1453-1476.

Cavaleri, L. ve Rizzoli, P.M. (1981), "Wind Wave Prediction in Shallow Water: Theory and Aplications", Jour. Geoph. Res., 86: 10961-10973.

CERC (1977), Shore Protection Manual, Co. Eng. Res. Center, U.S. Corps of Eng., Vicksburg.

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

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

Clancy, R.M., Kaitala, J.E. ve Zambreski, L.F. (1986), "The Fleet Numerical Oceanography Center Global Spectral Ocean Wave Model", Bull. Am. Met. Soc., Vol 67, No 5, 498-512.

Çevik, E., Yüksel, Y., Yalçıner, A.C., Arı, H.A., Güler, I., Doğan, U., Aykut, N.O. ve Ata, E. (2006), "Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi ve Kumlanma Problemi için Karaburun Örneği", TÜBİTAK İÇTAG I845 (103I008).

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

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

Davies, M.H. ve Kamphius, J.W. (1985), "Littoral Transport Rate", Proc. Canadian Coastal Conference, St John's, 223-240.

Dean, R.G. (1984), Principles of Beach Nourishment In: P. D. Komar (Editor), CRC Handbook of Coastal Processes, CRC Press, Boca Raton, Fla, 217-232.

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

Deigaard, R., Fredsøe, J.ve Hedegaard, I.B. (1986), "Suspended Sediment in the Surf Zone", Journal of Waterway, Port, Coast. and Ocean Eng., ASCE, Vol. 112, No. 1, 115-128.

del Valle, R., Medina, R. ve Losada, M.A. (1993), "Dependence of Coefficient K on Grain Size,"No. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 119 (5), 568-574.

De Vriend, H. (1998), "State of the Art in Modelling Coastal Morphodynamics", Ports and Waterways, 135 (1), 51-54.

DHI (2003), MIKE 21-Wave Modelling, User Guide, DHI Water and Environment.

DHI (2003a), LITPACK-An Integrated Modelling System for LITtoral Processes And Coasline Kinetics, Short Introduction and Tutorial, DHI Water and Environment.

DHI (2003b), LITPACK-Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves, User Guide, DHI Water and Environment.

DHI (2003c), LITPACK-LITDRIFT Longshore Current and Littoral Drift, User Guide, DHI Water and Environment.

DHI (2003d), LITPACK-LITLINE Coastline Evolution, User Guide, DHI Water and Environment.

DHI (2004), MIKE 21 Waves Spectral Waves Module- Scientific Documentation, DHI Water and Environment.

Di, K., Ma, R., Wang, J. ve Li, R. (2003), "Coastal Mapping and Change Detection Using High-Resolution IKONOS Satellite Imagery", National Conference for Digital Government Research, "dg.o 2003", Boston, Ma, 343-346.

Directorate General Environment European Commission (2004), A Guide To Coastal Erosion Management Practices in Europe: Lessons Learned, National Institute of Coastal and Marine Management of the Netherlands.

Engelund, F. ve Fredsøe, J. (1976), "A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels", Nordic Hydrology, 7/296-306.

Ewing, J.A. (1971), "A Numerical Wave Prediction Method for the North Atlantic Ocean", Deutsches Hydr. Zeit, 24: 241-261.

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

Fleming, C.A. ve 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.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. ve Silberg, S. (1985) "Distribution of Suspended Sediment in Large Waves", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. III, No. 6, 1041-1059.

Fredsøe, J. ve Deigaard, R. (1992), Mechanics of Coastal Sediment Transport: Advanced Series on Ocean Engineering, World Science, Singapore.

Fröhle, P. ve Fittschen, T. (1998), "Analysis of Directional Wave Data for the Assessment of Sediment Transport Processes", 3rd International Conference on Hydro-Science and Engineering, August 31-September 3, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Cottbus/Berlin, Germany.

Gable, C.G. (1981), "Report on Data from NSTS Experiment at Leadbetter Beach, Santa Barbara, California." Report No. 80-5, Univ. of California, Inst, of Marine Resour.

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

Gelci, R. ve Devillaz, E. (1970), "La Calcul Numérique de l'état de la mer (Numerical Prediction of the Sea State)", La Huille Blanche, 25: 117-131.

Gelci, R. ve Chavy, P. (1978), Seven Years of Numerical Wave Prediction with the Model. In: Favre, A. and Hasselman, K. (Editors), Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction, Plenum Press, New York, 565-591.

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

Golden, R.M. (1996), Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design, Massachusetts Institute of Technology Press., USA.

Gourlay, M.R. ve Apelt, C.J. (1985), Coastal Hydraulics and Sediment Transport in a Coastal System, Dept. of Civil Eng., University of Queensland Press, Australia.

Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthington, B.A., Hasselman, K. ve Ewing, J.A. (1979a), "A Hybrid Parametrical Wave Prediction Model", Jour. Geoph. Res., 84: 5727-5738.

Günther, H., Rosenthal, W. ve Richter, K. (1979b), "Application of the Parametrical Surface Wave Prediction Model to Rapidly Varying Wind Fields During JONSWAP 1973", Jour. Geoph. Res., 84: 4855-4864.

Günther, H., Hasselman, S. ve Janssen, P.A.E.M. (1992), The WAM Model Cycle 4, DKRZ Technical Report No 4, Hamburg.

Hamilton, D.G. ve Ebersole, B.A. (2001), "Establishing Uniform Longshore Currents in a Large-Scale Laboratory Facility", Coastal Engineering 42, 199-218.

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

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

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselman, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K. ve Sell, W. (1973), Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutches Hydr. Zeit., A12: 1-95.

Hasselmann, K., Ross, D.B., Müller, P. ve Sell, W. (1976), "A Parametric Wave Prediction Model", Jour Phys. Oceanogr., 6: 200-228.

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

Hedegaard, I.B. ve Deigaard, R. (1988), "A Model for Cross-shore Sediment Transport and Coastal Profile Development", 2nd Symp.on Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

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

Holthuysen, L.H., Booij, N. ve Herbers, T.H.C. (1989), "A Prediction Model for Stationary, Short-Crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents", Co. Eng., Vol 13, 23-54.

Inman, D.L., Zampol, J.A., White, T.E., Hanes, D.M., Waldorf, B.W.ve Kastens, K.A. (1980), "Field Measurements of Sand Motion in the Surf Zone", Proc. 17th Int. Conference on Coast. Engrg., 1215-1233.

Jayakumar ve Mahadevan, R. (1993), "Numerical Simulation of Shoreline Evolution Using a One Line Model", Journal of Coastal Research, Vol. 9, No. 4, 915-923.

Jonsson, I.G., Skovgaard, O. ve Jacobsen, T.S.(1974) "Computation of Longshore Currents", Proc. Coastal Engineering Conference, 699-714.

Kalagirou, S. A. (1999), Applications of Neural Networks in Energy Systems, Energy Conversion and Management, 40, 1073-1087.

Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B. ve Sayao, O.J. (1986), "Calculation of Littoral Sand Transport Rate", Coastal Engineering, 10(1), 1-21.

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.

Kamphuis, J.W. (2008), Kamphuis ile yapılan özel görüşmeler.

Kana, T.W. (1977), "Suspended Sediment Transport at Price Inlet, S.C." Proc.Coastal Sediments '77, ASCE, 1069-1088.

Kana, T.W.ve Ward, L.G. (1980), "Nearshore Suspended Sediment Load During Storms and Post-Storm Conditions." Proc. 17th Int. Conference on Coastal Engrg., 1158-1171.

Kapdaşlı, S. (1992), Kıyı Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Kirkegaard, P.H. ve Rytter, A. (1993), "The Use of Neural Networks for a Damage Detection and Location in a Steel Member", Neural Networks and Combinatorial Optimization in Civil and Structural Engineering, Migle Press,1-9.

Koç, L.M., Balas, C.E. ve Arslan, A. (2004), "Taş Dolgu Dalgakıranların Yapay Sinir Ağları ile Ön Tasarımı", İMO Teknik Dergi, 3351-3375, Yazı 225.

Komar, P.D. (1969), The Longshore Transport of Sand on Beaches, Ph.D. Thesis, University of California at San Diego, California.

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

Komar, P.D., Lizarraga-Arciniega, J.R. ve Terich, T.A. (1976), "Oregon Coast Shoreline Changes due to Jetties", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 102(WW1), 13-30.

Komar, P.D. (1983), Handbook of Coastal Processes and Erosion, CRC Press, Boca Raton, Fla.

Komar, P.D. (1998), "The Modeling of Processes and Morphology in the Coastal Zone-Reflection on the Maturity of Our Science", Shore and Beach, 66 (1), 10-22.

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

Kooistra, J. ve Kamphuis, J.W. (1984), "Scale Effects in Alongshore Sediment Transport Rates." Canadian Coastal Sediment Study Report No. C2S2-13, Nat. Res.Council of Canada, Ottawa, Canada.

Köksal, B.A. (2003), İstatistik Analiz Metodları, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu, İstanbul.

Kraus, N.C., Isobe, M., Igarashi, H., Sasaki, T.O. ve 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. ve Harikai, S. (1983), "Numerical Model of the Shoreline Change at Oarai Beach", Coastal Eng., 7, 1-28.

Kraus, N.C., Gingerich, K.J. ve Rosati, J.D. (1988), "Towards an improved empirical formula for longshore sand transport", Proceedings of 21st International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1183-1196.

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

Kröse, B. and Van der Smagt, P. (1996), An Introduction to Neural Networks, The University of Amsterdam, Amsterdam.

Larangeiro, S.H.C.D. ve Oliveira, F.S.B.F. (2003), "Assessment of the Longshore Sediment Transport at Buarcos Beach (West Coast of Portugal) Through Different Formulations", Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, 16-18 October, Genova, Italy.

Larson, M., Hanson, H. ve Kraus, N.C. (1987), "Analytical Solutions of the One-Line Model of Shoreline Change", CERC Report 87-15, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Larson, M. ve 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., Hanson, H. ve Kraus, N.C. (1997), "Analytical Solutions of the One-Line Model of Shoreline Change Near Coastal Structures", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 123(4), 180-191.

Larson, M., Rosati, J.D. ve Kraus, N.C. (2002), "Overview of Regional Coastal Sediment Processes and Controls", ERDC/CHL CHETN-XIV-4, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Le Mehaute, B. ve Soldate, M. (1977), "Mathematical Modelling of Shoreline Evolution", Misc. Rep. 77-10, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Le Mehaute, B. ve Soldate, M. (1980), "A Numerical Model for Predicting Shoreline Changes", Journal of Hydrological Research, 5, 67-88.

Lin, T.H., Liu, G.R., Chen, A.J. ve Kuo, T.H. (2001), "Applying Satellite Data For Shoreline Determination In Tideland Areas", Proc. ACRS 2001, 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001, Singapore. Vol. 1, 98-103.

Loentyev, I.O. (1997), "Short-term Shoreline Changes due to Cross-shore Structures: A One-line Numerical Model", Coastal Eng., 31(1-4): 59-75.

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

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

Mironga, J.M. (2004), "Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing In the Management of Shallow Tropical Lakes", Applied Ecology and Environmental Research, ISSN 1589 1624, Vol. 2(1), 83-103.

Nielsen, P. (1979), "Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport", Instıtute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Technical University of Denmark, Denmark, Series Paper No: 20.

Nielsen, P. (1985), "Short Manual of Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport", Technical Memorandum T. M. 85/1, Public Works Deparyment, N.S.W., Denmark.

Nielsen, P. (1992), Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport: Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publication, Singapore.

Nortek AS. (2005), AQUADOPP Current Profiler, User Guide, Vangkroken, Norway.

Özbay, Y. (1999), "Fast Recognition of ECG Arrhythmias," Ph.D Thesis, Institute of Natural and Applied Science, Selcuk University, Konya, Turkey.

Özbay, Y. ve Karlık, B. (2001), "A Recognition of ECG Rrrhythmias Using Artificial Neural Network,"Proceedings-23rd Annual Conference- IEEE/EMBS, Istanbul, Turkey

Öztemel E. (2003), Yapay Sinir Ağları, Papatya yayıncılık.

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, A. ve Kit, E. (1999), "Longshore Sediment Transport on Mediterranean Coast of Israel", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.125, No.2, 80-87.

Perlin, M. ve Dean, R.G. (1978), "Prediction of Beach Platforms with Littoral Controls", Proc. 16th Int. Conf. on Co. Eng., ASCE, 1818-1838.

Perlin, M. ve Dean, R.G. (1987), "3-D Model of Bathymetric Response to Structures", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 111(2), 153-170.

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

Pierson, W.J., Tick, L.J. ve Baer, L. (1966), "Computer Based Procedure for Preparing Global Wave Forecasts and Wind Field Analysis Capable of Using Wave Data Obtained from a Spacecraft", Proc. 6th Symp. Naval Hydrodynamics, Washington., D.C.

Pilkey, O.H ve Cooper, J.A.G. (2002), "Longshore Transport Volumes: A Critical View", Journal of Coastal Research, SI 36, 572-580.

Price, W.A., Tomlinson, K.W. ve Willis, D.H. (1972), "Predicting Changes in the Plan Shape of Beaches", Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1321-1329.

Raudkivi, A.J. (1988), "The Roughness Height under Waves", Journal of Hydraulics Research, Vol. 26, No.5.6.

Rijn, L.C. (1988), Handbook on Sediment Transport by Currents and Waves, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

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

Rumelhart, D. ve McClelland, J. (1986), Paralel Data Processing, MIT Press, Vol.1, Chapter 8, 318-362.

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

Schwab, D.J., Bennett, J.R., Liu, P.C. ve Donelan, M.A. (1984), "Application of A Simple Numerical Wave Prediction Model to Lake Erie", Jour. Geoph. Res., 89: 3586-3592.

Silvester, R. ve Hsu, J.R.C. (1993), Coastal Stabilization: Innovative Concepts, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Sleath, J. F.A. (1984), Sea Bed Mechanics, Wiley, New York.

Smith, E.R., Ebersole, B.A. ve Wang, P. (2004), "Dependence of Total Longshore Sediment Transport Rates on Incident Wave Parameters and Breaker Type", ERDC/CHL CHETN-IV-62, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Svozil, D., Kvasnicka, V. ve Pospichal, J. (1997), "Introduction to Multilayer Feed Forward Neural Net", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems., 39, 43-62.

Swart, D.H. (1976), "Coastal Sediment Transport", Computation of Longshore Transport, Delft Hydraulics, The Netherlands, Report R968.

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

Szmytkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L.M., Okrój, T., Ostrowski, R., Pruszak, Z., Różyński, G. ve Skaja, M. (2000), "Coastline Changes Nearby Harbour Structures: Comparative Analysis Of One-Line Models Versus Field Data", Coastal Engineering, Vol. 40., 199-139.

Tolman, H.L. (1991), "A Third Gneration Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady and Inhomogeneous Depths and Currents", J. Phys. Oceanog., Vol 21,6, 782-797.

Valle, R., Medina, R. ve Losada, M.A. (1993), "Dependence of Coefficient K on Grain Size" Technical Note No:3062, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering (ASCE), 119(5), 568-574.

Van der Graaf ve Van Der Overeem (1979), "Evaluation of Sediment Transport Formulae in Coastal Engineering Practice", Coastal Engineering, Vol 3, 1-32

Van Vledder, G. P.ve Holthuijsen, L. H. (1993), "The Directional Response of Ocean Waves to Turning Winds," J. Phys. Oceanogr., Vol 23, 177-192.

Van Waveren, R.H., Groot., S., Scholten, H., Van Geer, F.C., Wösten, J.H.M., Koeze, R.D ve Noort, J.J. (1999), Good Modelling Practice Handbook, Dutch Dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, report 99.036.

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

Walton, T.E. ve Chiu, T. (1979), "A Review of Analytical Techniques to Solve the Sand Transport and Some Simplified Solutions", Coastal Structures'79, ASCE, 809-837.

Walton, T.E. (1980), "Littoral Sand Transport from Longshore Currents", Technical Note. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 106(WW4), 483-487.

Walton, T.E. (1994), “Shoreline Solution for Tapered Beach Fill”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 120(6), 651-655.

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

Wang, P., Kraus, N.C. ve Davis, R.A., Jr. (1998). “Total Rate of Longshore Sediment Transport in the Surf Zone: Field Measurements and Empirical Predictions,” Journal of Coastal Research, 14(1), 269-283.

Wang, P., Ebersole, B.A. ve Smith, E.R. (2002), “Longshore Sand Transport- Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility”, ERDC/CHL CHETN-II-46, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Watts, G.M. (1953), "A Study of Sand Movement at South Lake Worth Inlet, Florida." Tech. Memo. No. 42, U.S. Army Corps of Engrgs. Beach Erosion Board.

Witte, J. ve Kohlhase, S. (1998) “Parametric Study of Hydrographic Influences on Wave Climate Inshore a Barred Sandy Beach”, 3rd International Conference on Hydro-Science and Engineering, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Cottbus/Berlin, Germany.

Witte, J., Fröhle, P., Fittschen, T. ve Kohlhase, S., (1999) “Assessment of Long-Term Direcitonal Wave Conditions Based on Nearshore Wind-Wave Correlations”, Proc. of the Intl. MEDCOAST Conference on Wind and Wave Climate of Mediterranean and Black Sea, WIND &WAVE CLIMATE’99, Antalya, Turkey, 211-220.

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

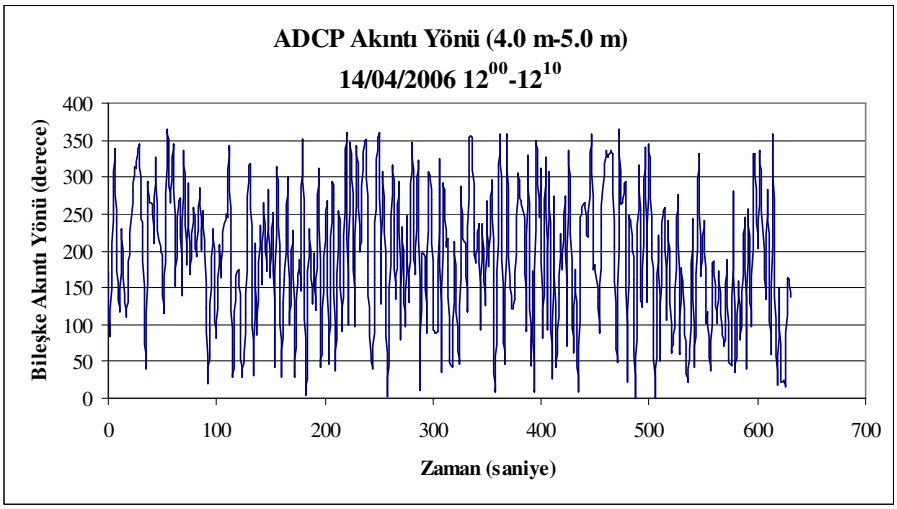
Yüksel, Y. (2005), Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Planlama ve Tasarım), Deniz Mühendisliği Serisi No:2, Arıkan Ltd., İstanbul.

EKLER

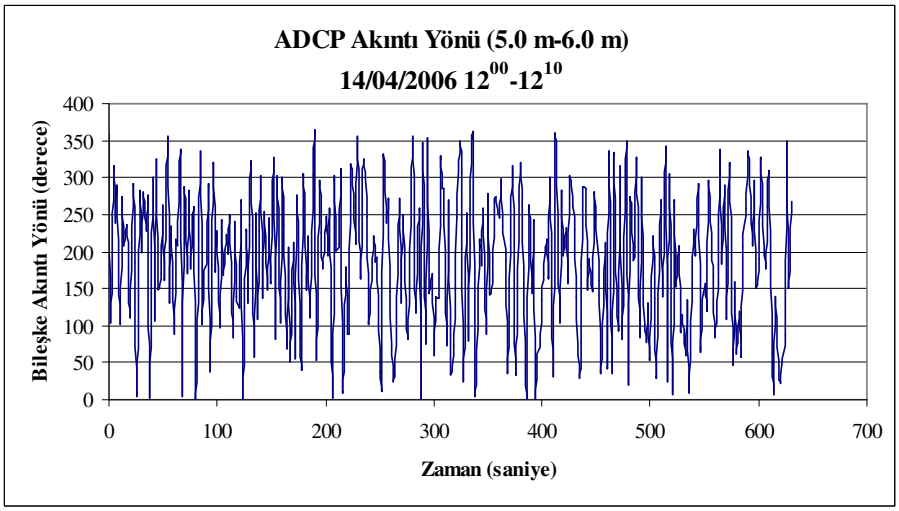
Ek 1 ADCP Akıntı Ölçüm Sonuçları

Ek 1 ADCP Akıntı Ölçüm Sonuçları

Şekil Ek1.1'den Şekil Ek1.4'e kadar bileşke akıntı yönü, Şekil Ek1.5'ten Şekil Ek1.8'e kadar akıntı bileşke hızı, Şekil Ek1.9'dan Şekil Ek1.12'ye kadar NS doğrultusundaki akıntı hızı bileşeni, Şekil Ek1.13'ten Şekil Ek1.16'ya kadar ise EW doğrultusundaki akıntı hızı bileşeni değerlerinin zaman serileri görülmektedir.

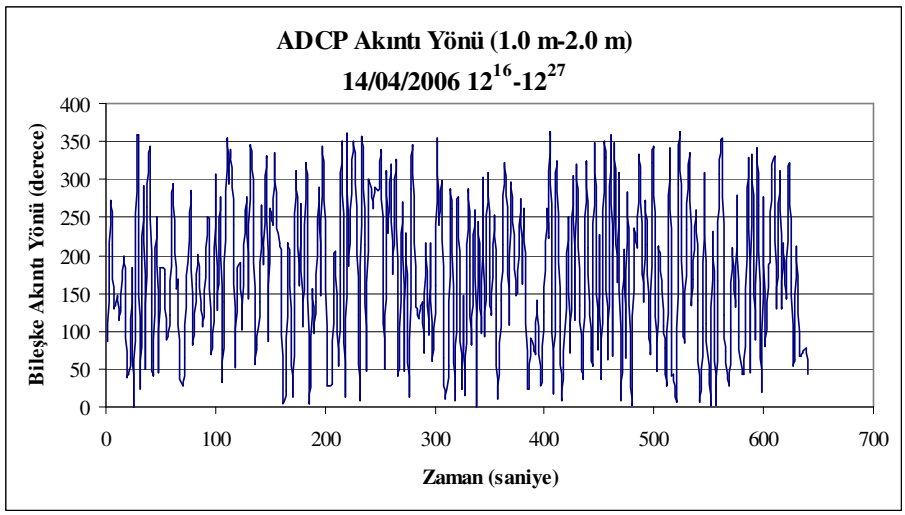


a) 4.0-5.0 m arası

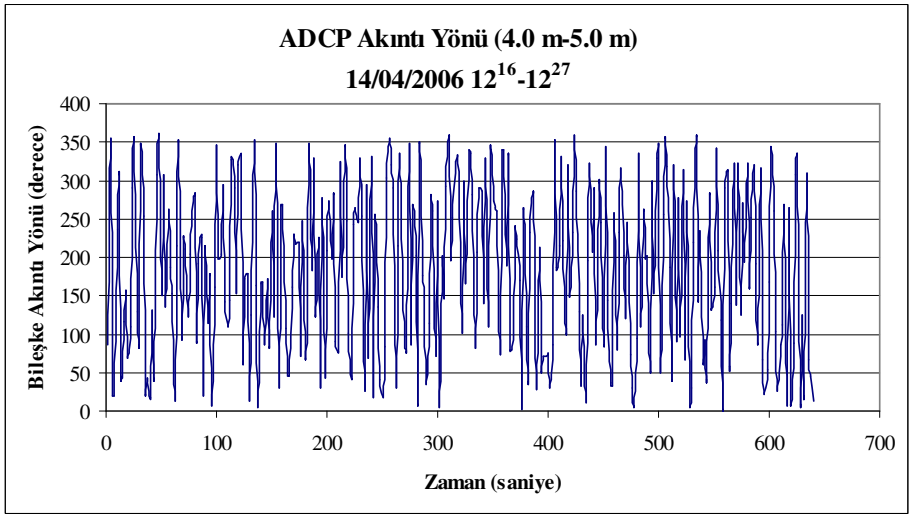


b) 5.0-6.0 m arası

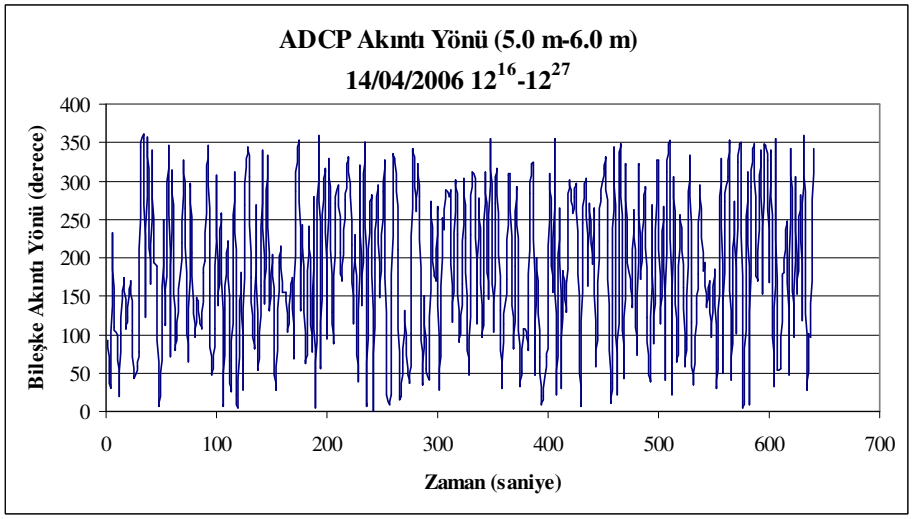
Şekil Ek1.1 ölçümden elde edilen akıntı yönü verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

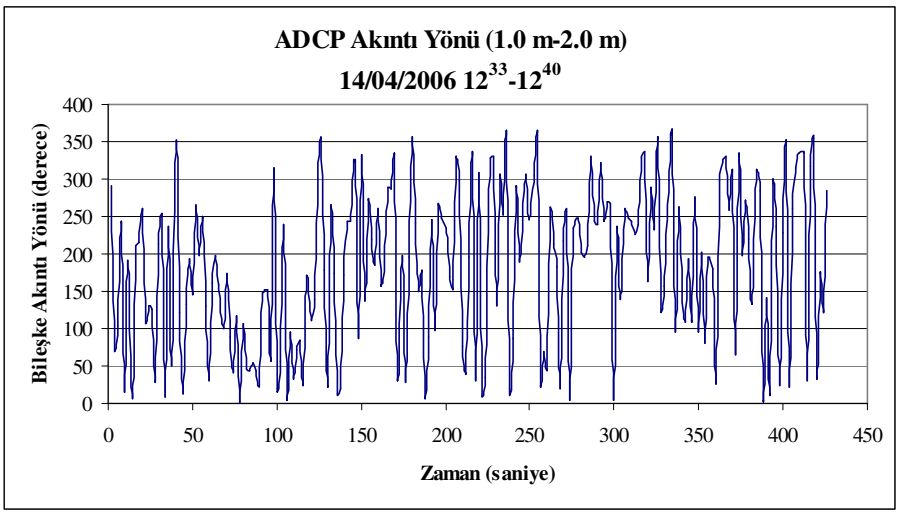


b) 4.0-5.0 m arası

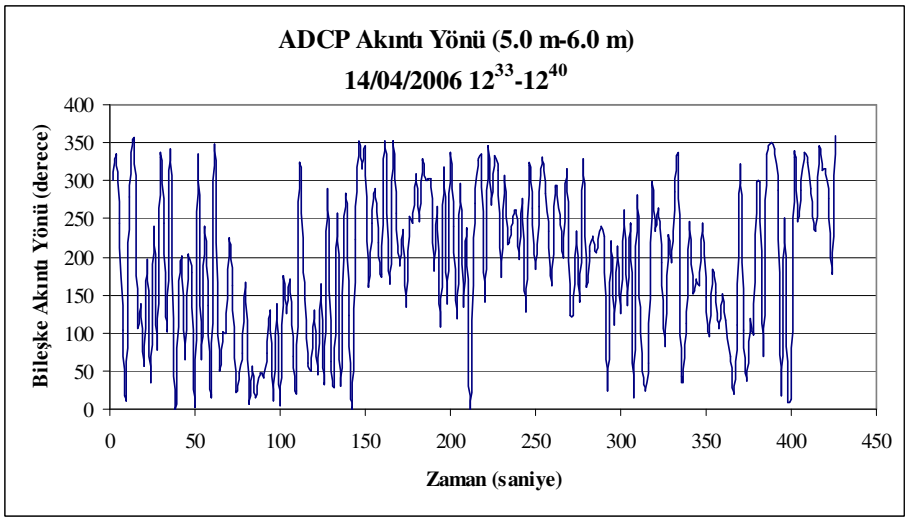


c) 5.0-6.0 m arası

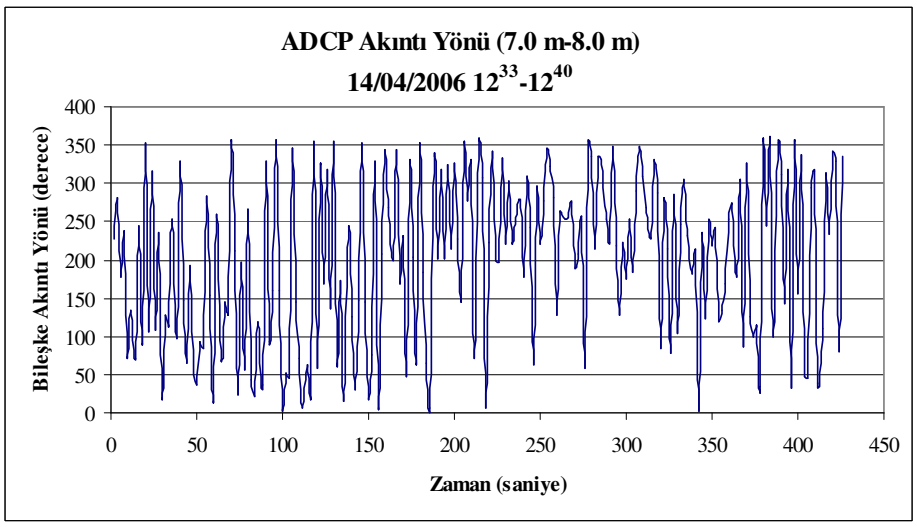
Şekil Ek1.2 2. ölçümden elde edilen akıntı yönü verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

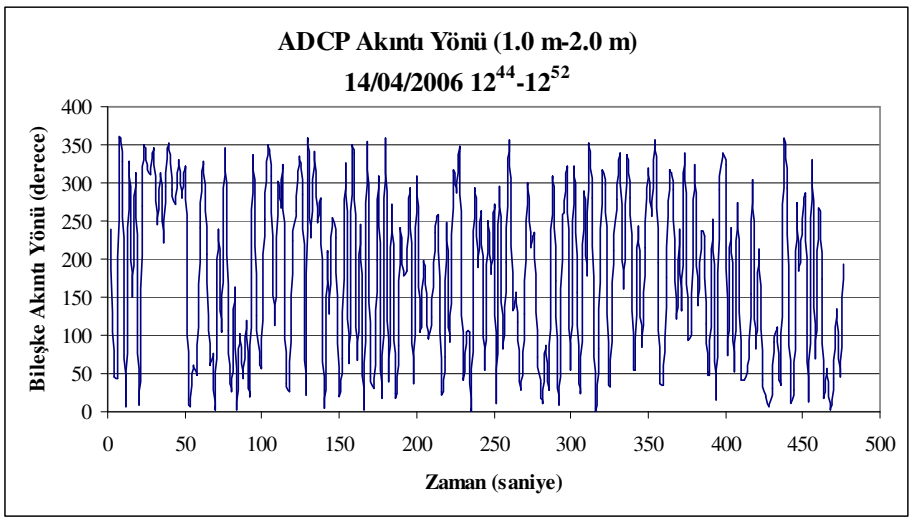


b) 5.0-6.0 m arası

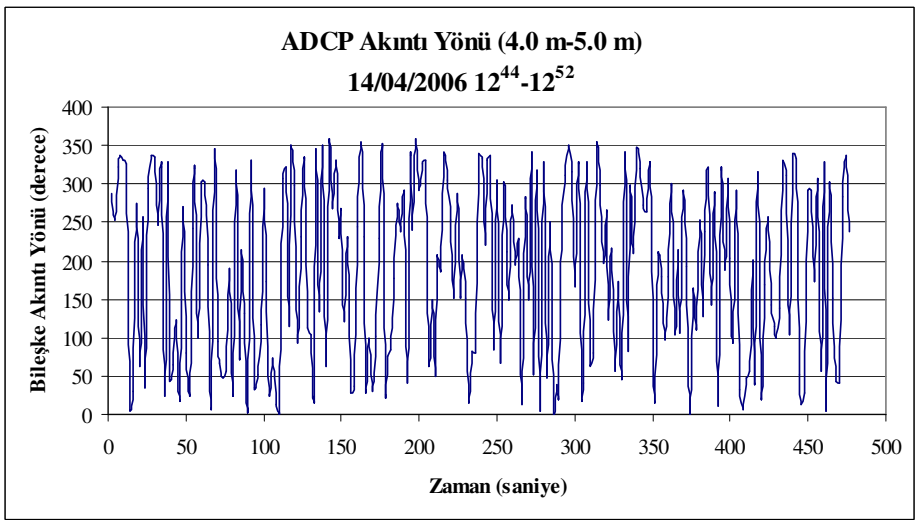


c) 7.0-8.0 m arası

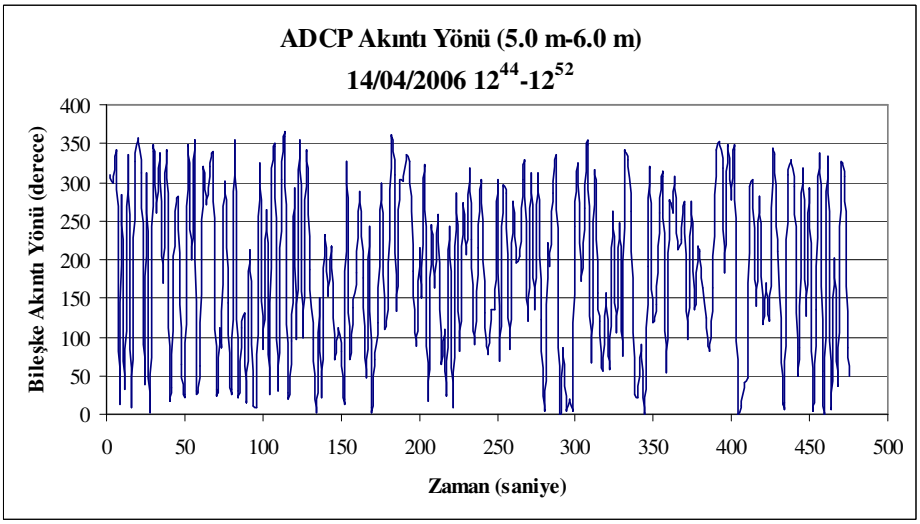
Şekil Ek1.3 3. ölçümden elde edilen akıntı yönü verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

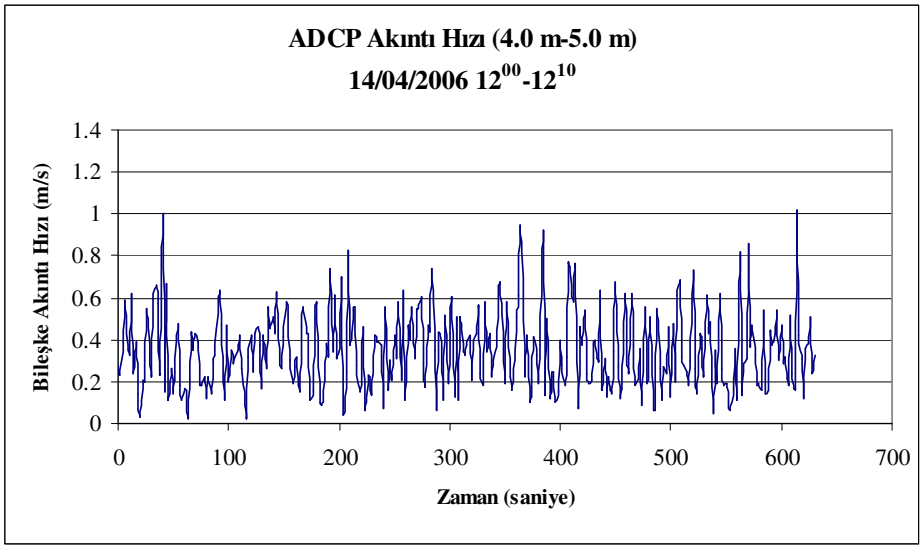


b) 4.0-5.0 m arası

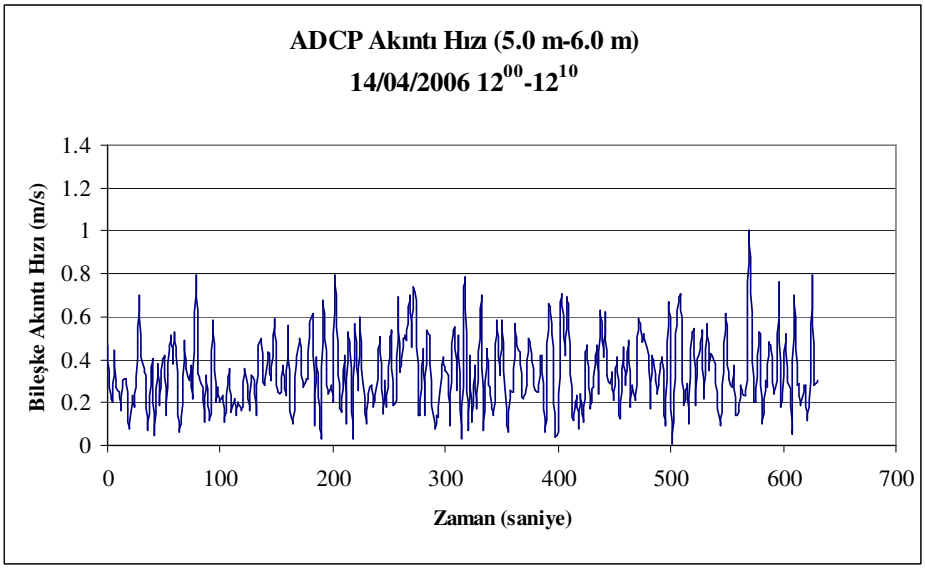


c) 5.0-6.0 m arası

Şekil Ek1.4 4. ölçümden elde edilen akıntı yönü verilerinin zaman serisi

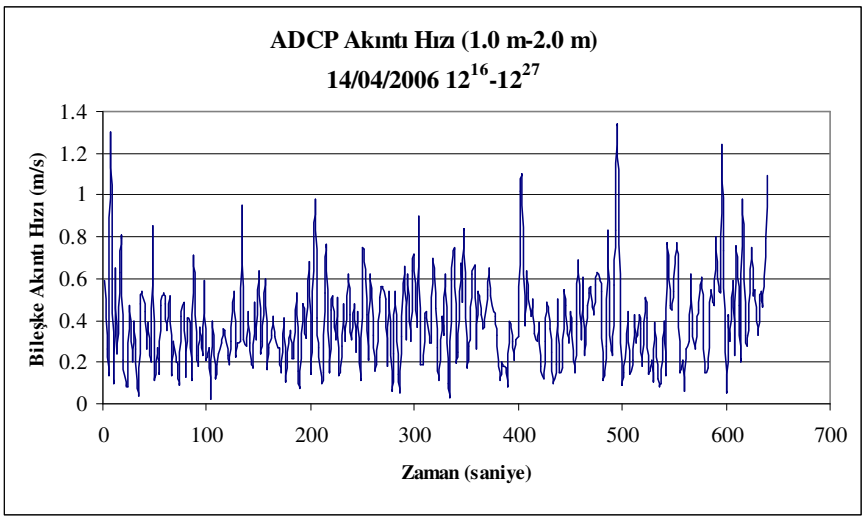


a) 4.0-5.0 m arası

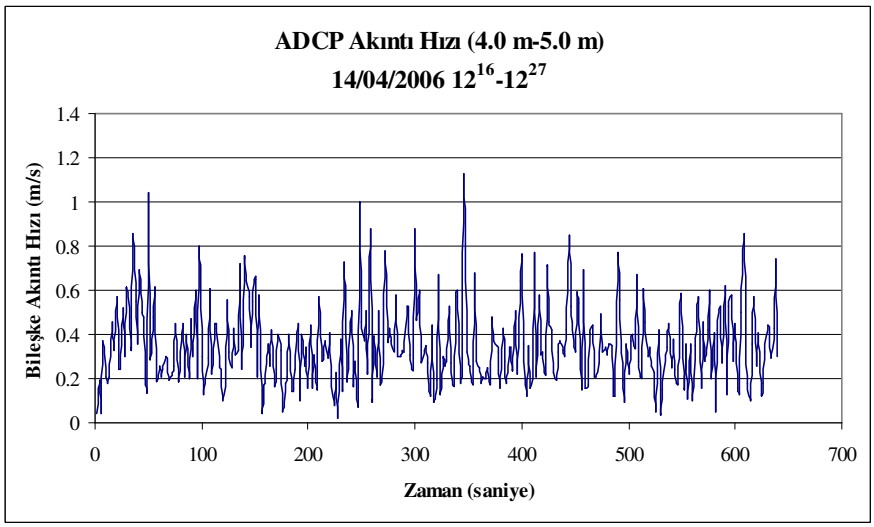


b) 5.0-6.0 m arası

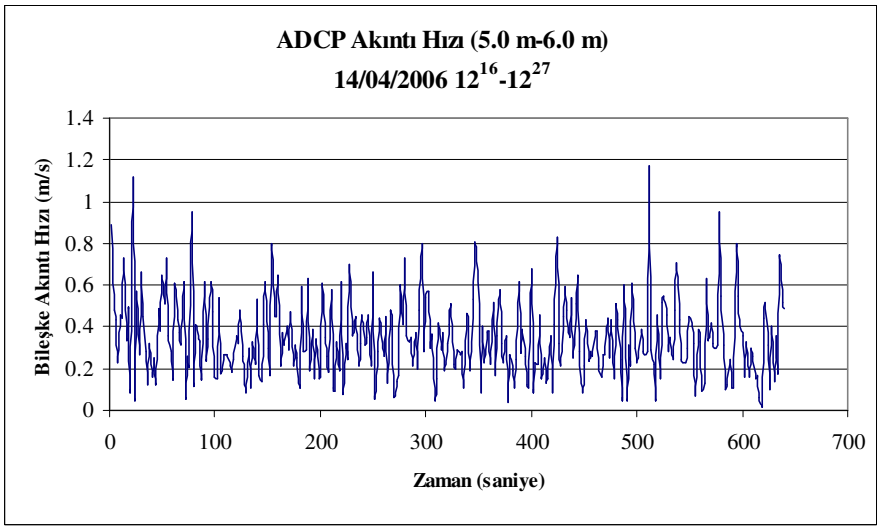
Şekil Ek1.5 1. ölçümden elde edilen akıntı bileşke hızı verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

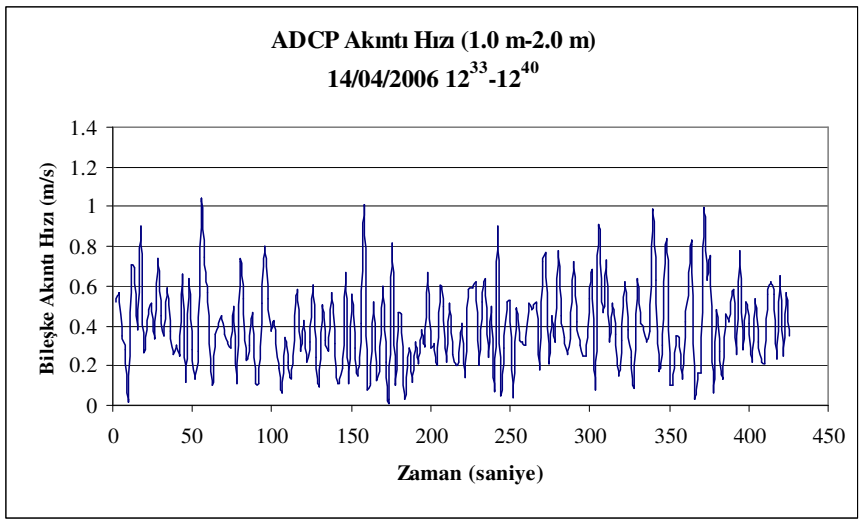


b) 4.0-5.0 m arası

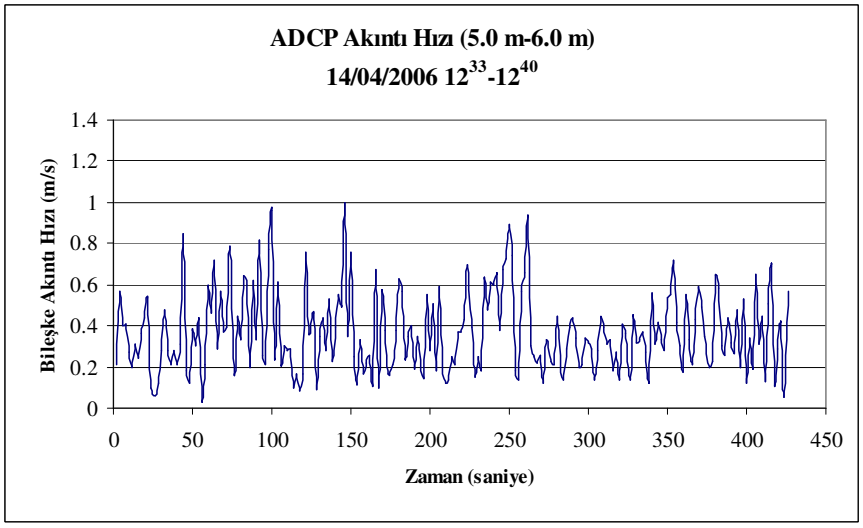


c) 5.0-6.0 m arası

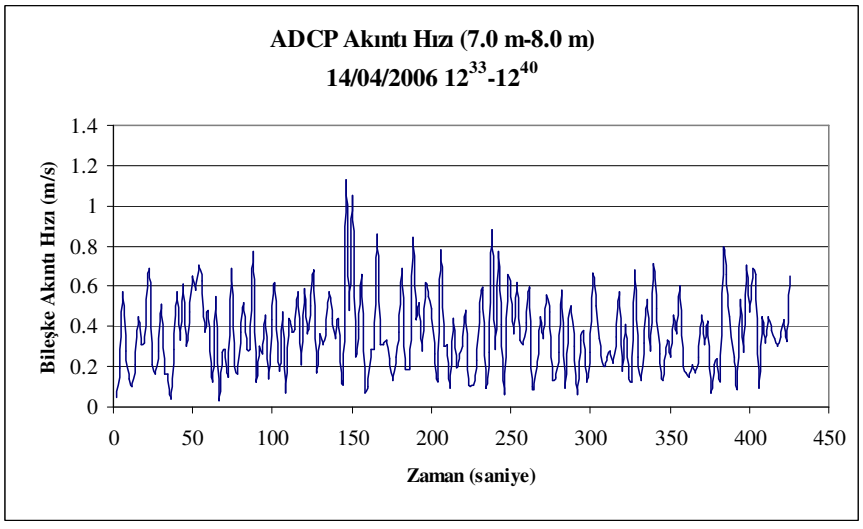
Şekil Ek1.6 2. ölçümden elde edilen akıntı bileşke hızı verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

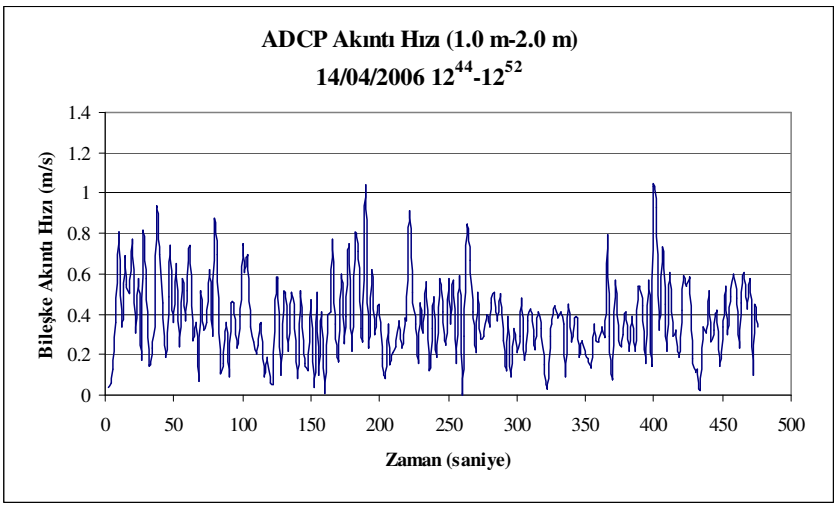


b) 5.0-6.0 m arası

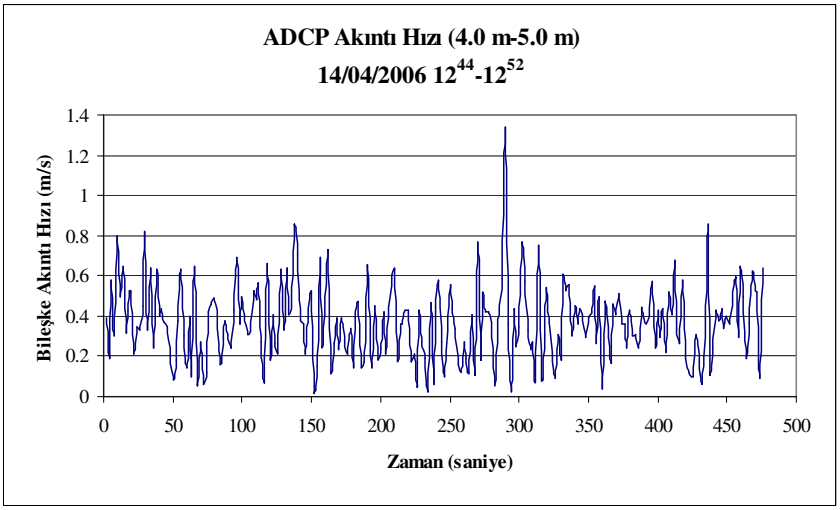


c) 7.0-8.0 m arası

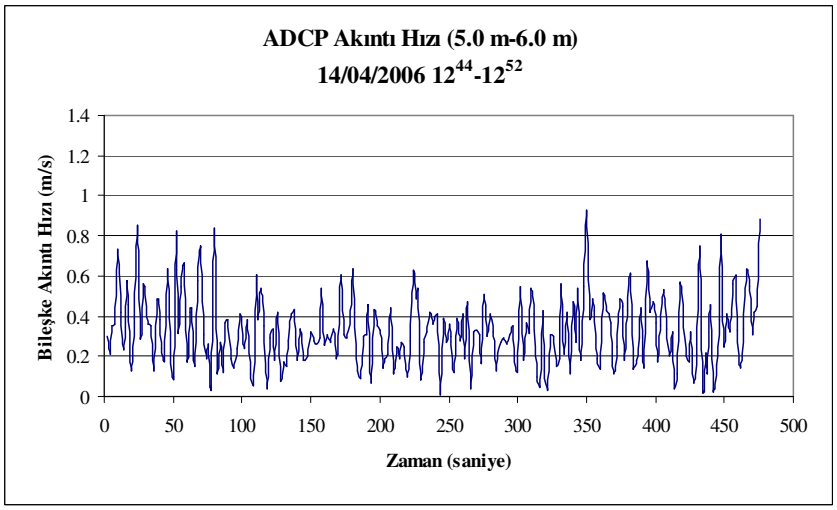
Şekil Ek1.7 3. ölçümden elde edilen akıntı bileşke hızı verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

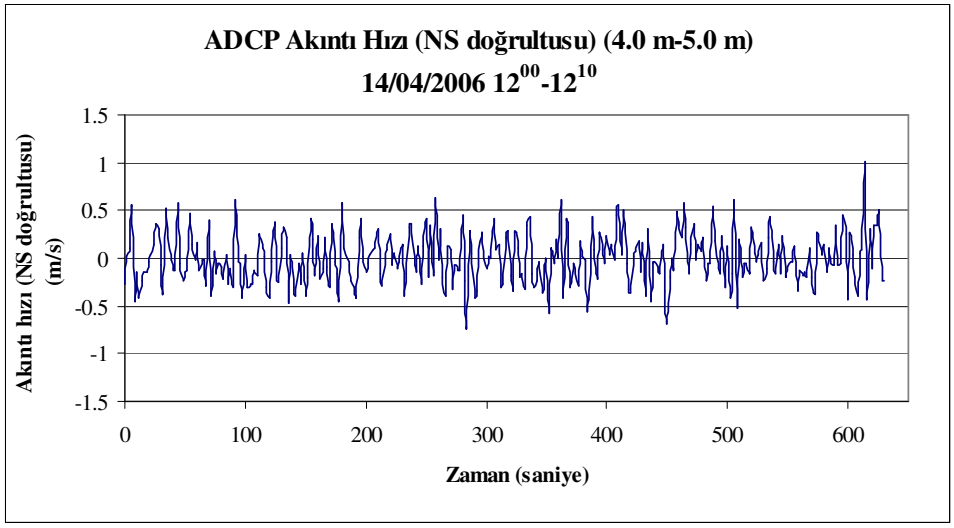


b) 4.0-5.0 m arası

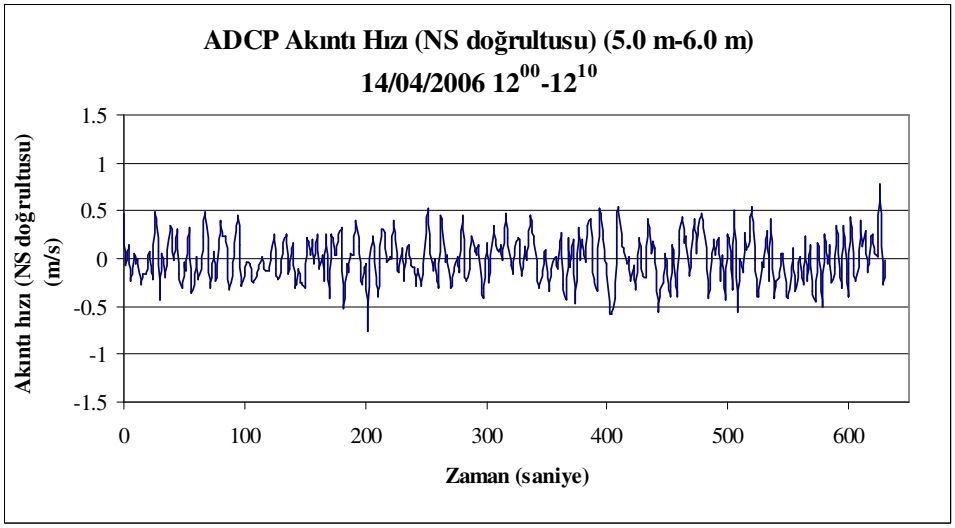


c) 5.0-6.0 m arası

Şekil Ek1.8 4. ölçümden elde edilen akıntı bileşke hızı verilerinin zaman serisi

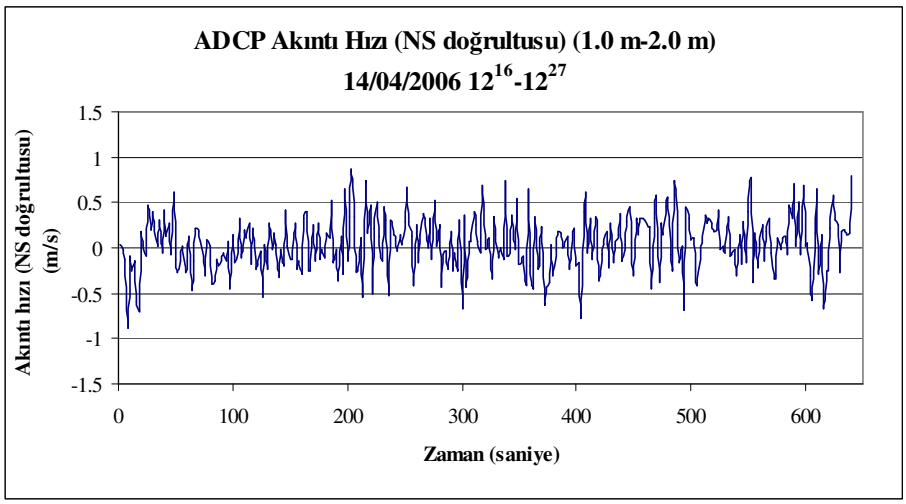


a) 4.0-5.0 m arası

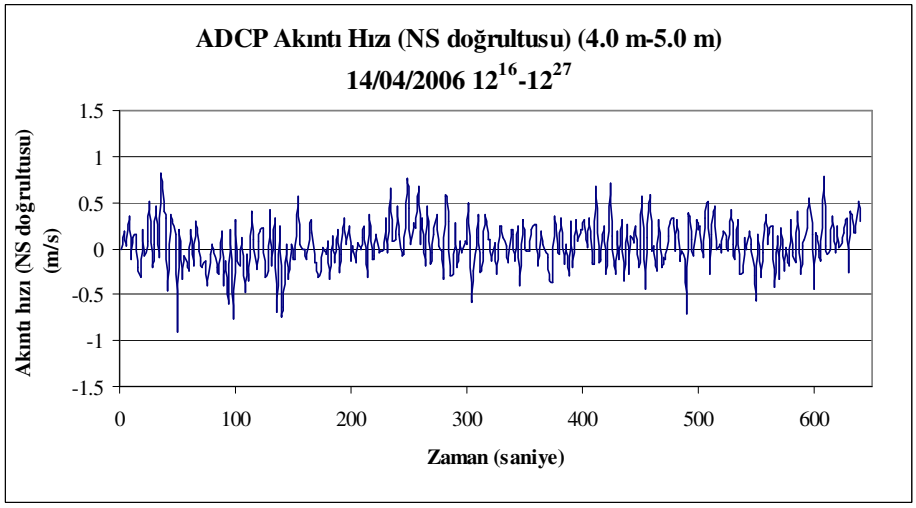


b) 5.0-6.0 m arası

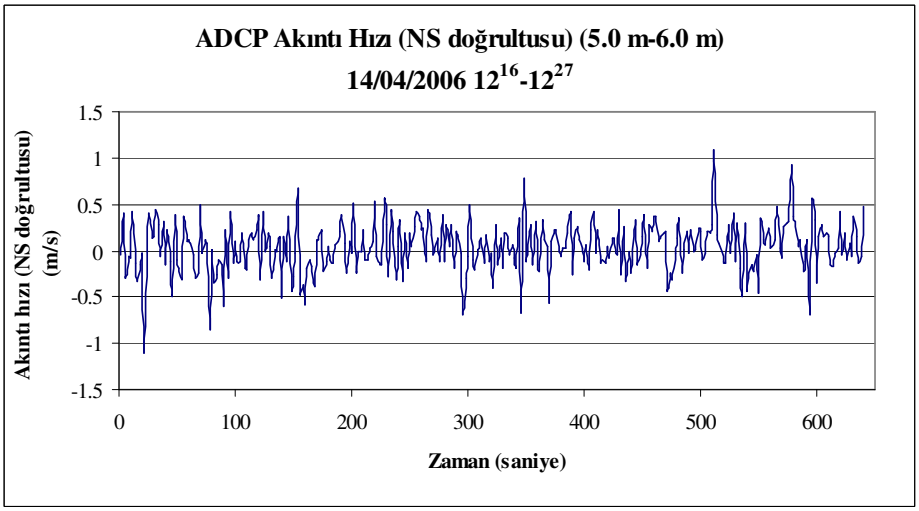
Şekil Ek1.9 1. ölçümden elde edilen akıntı hızı (NS doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

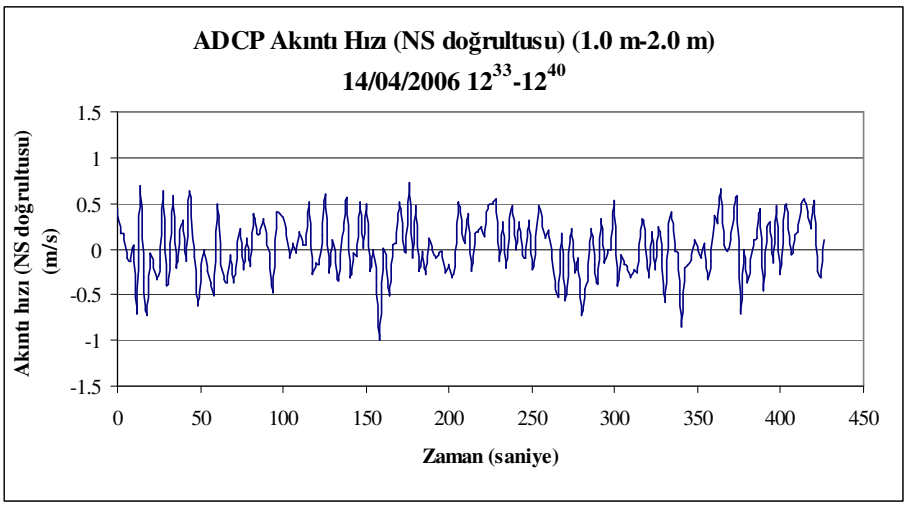


b) 4.0-5.0 m arası

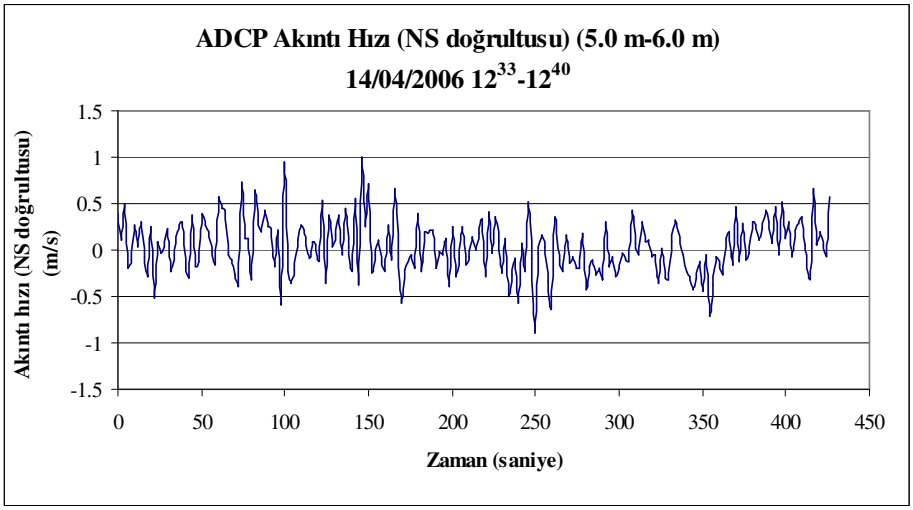


c) 5.0-6.0 m arası

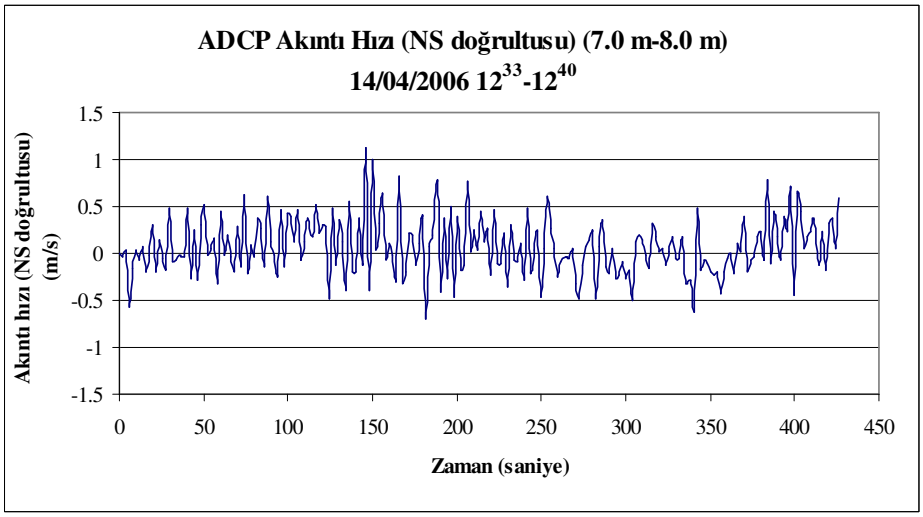
Şekil Ek1.10 2. ölçümden elde edilen akıntı hızı (NS doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

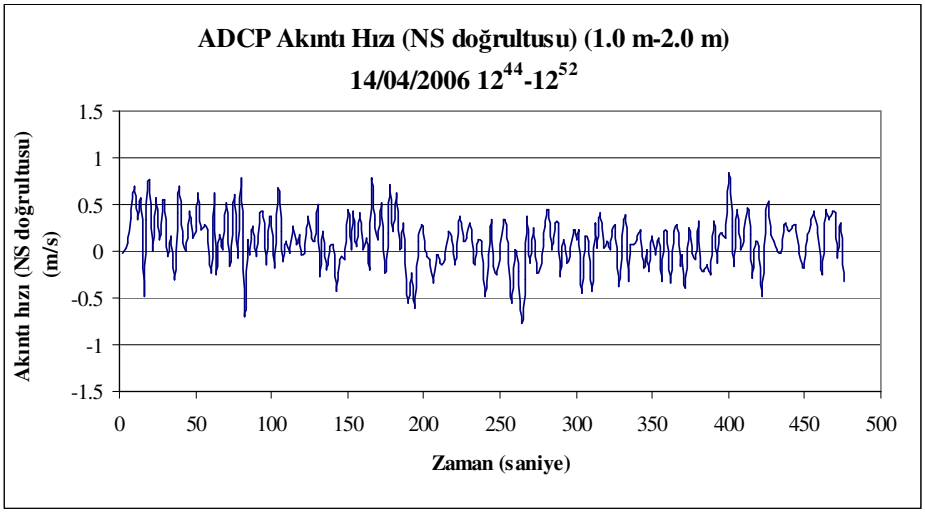


b) 5.0-6.0 m arası

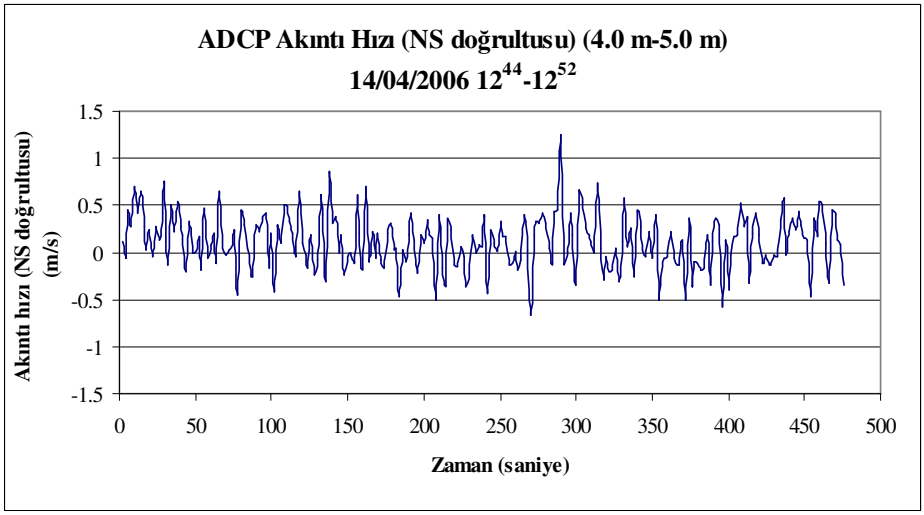


c) 7.0-8.0 m arası

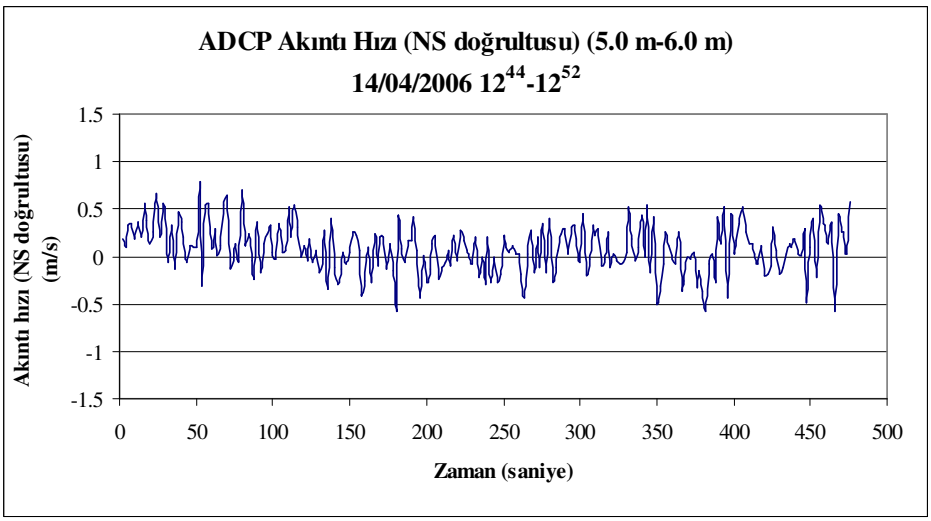
Şekil Ek1.11 3. ölçümden elde edilen akıntı hızı (NS doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

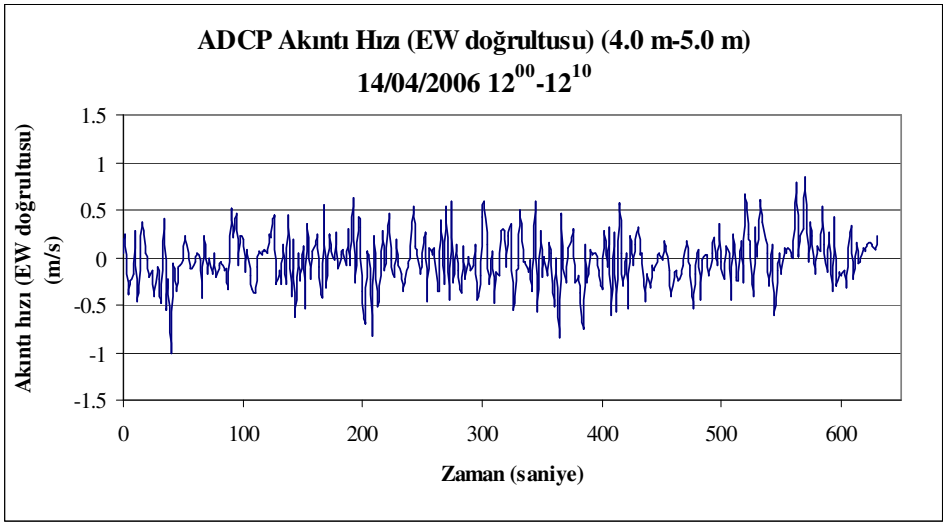


b) 4.0-5.0 m arası

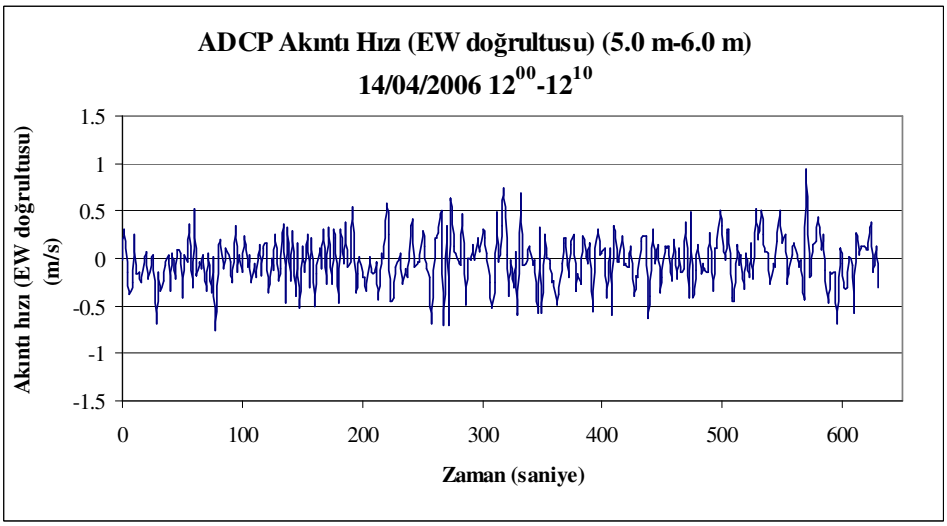


c) 5.0-6.0 m arası

Şekil Ek1.12 4. ölçümden elde edilen akıntı hızı (NS doğrultusu) verilerinin zaman serisi

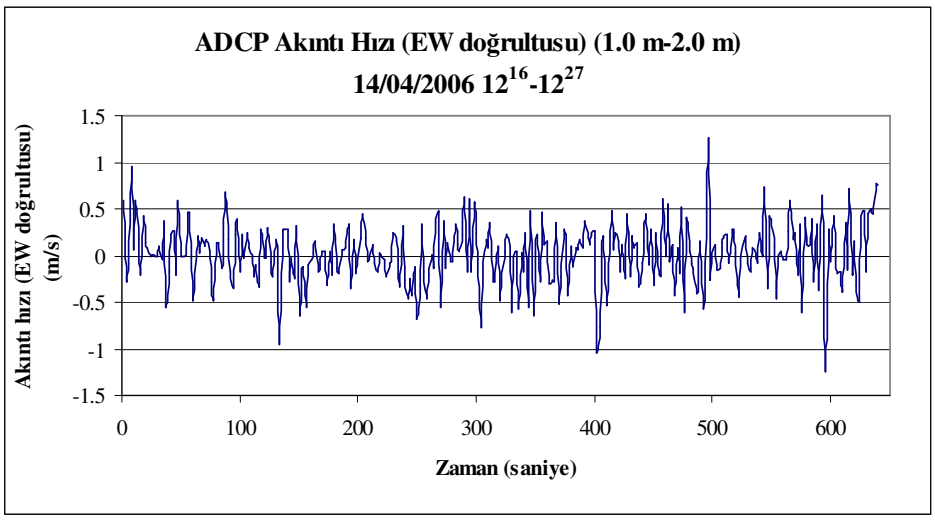


a) 4.0-5.0 m arası

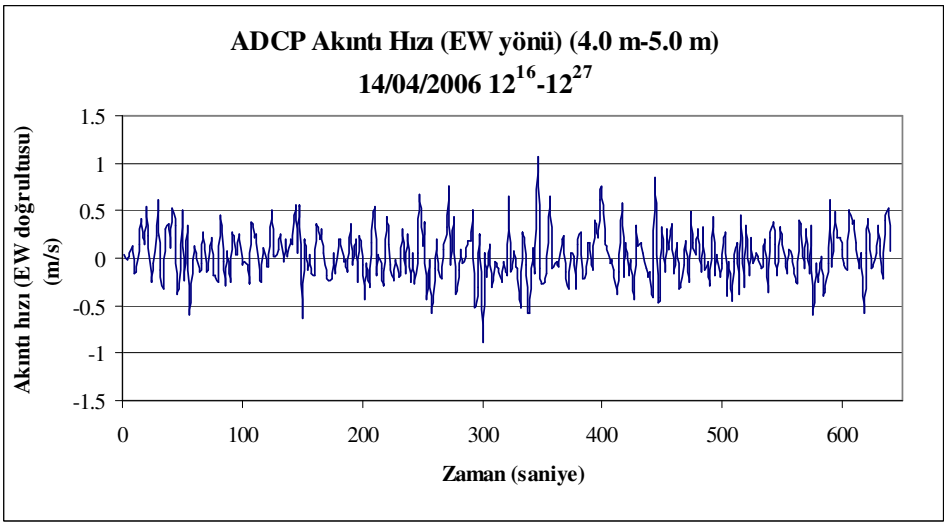


b) 5.0-6.0 m arası

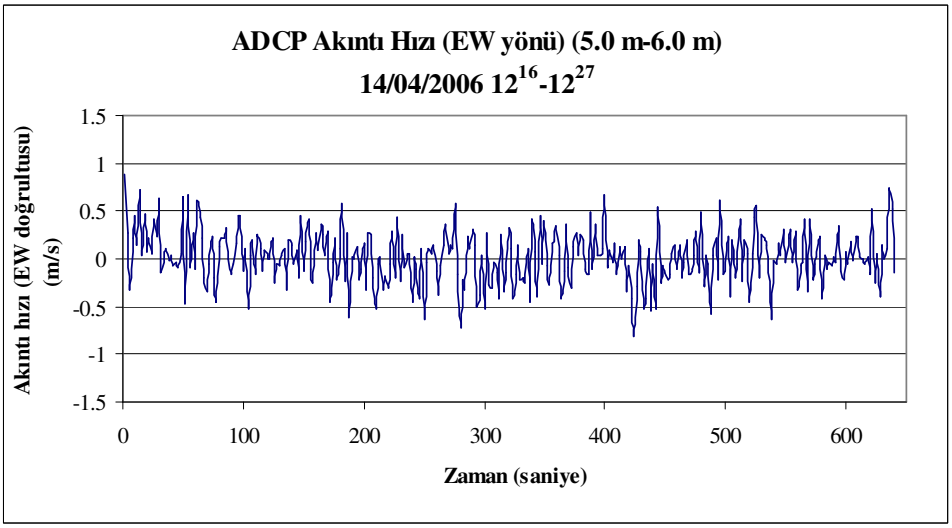
Şekil Ek1.13 1. ölçümden elde edilen akıntı hızı (EW doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

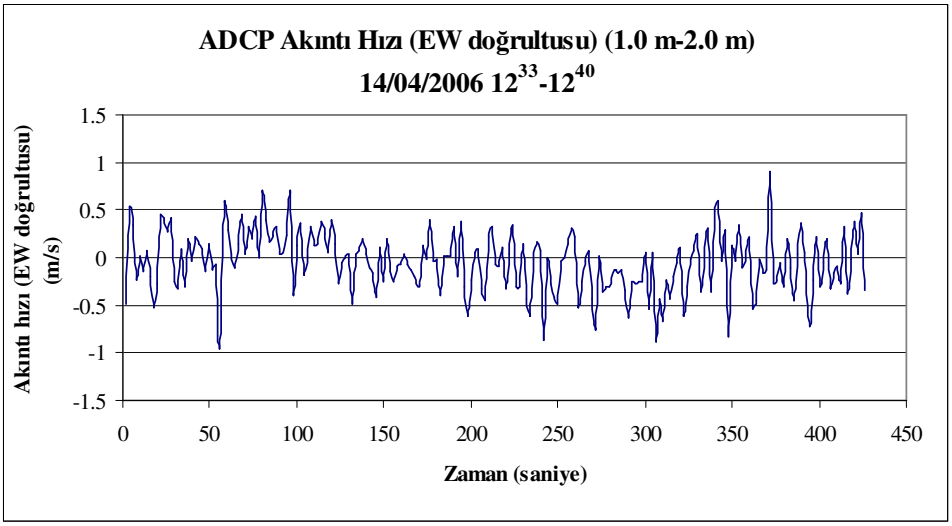


b) 4.0-5.0 m arası

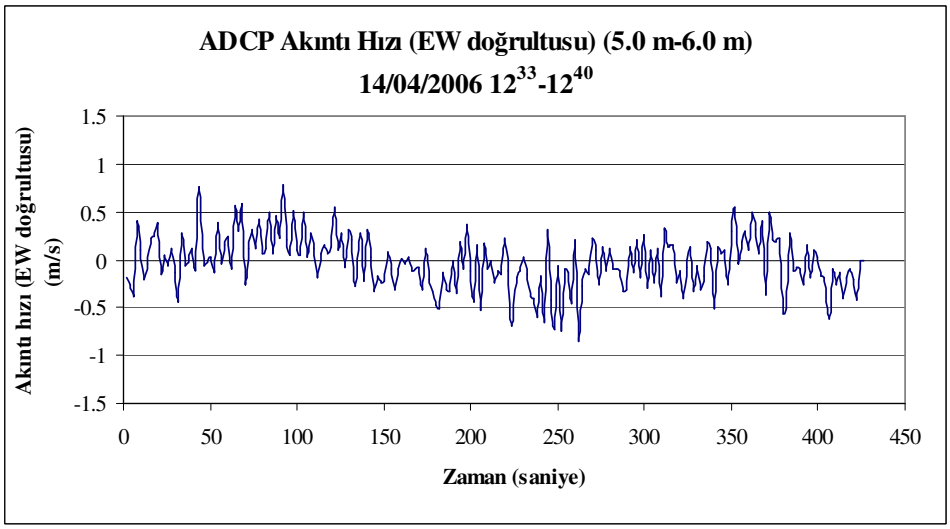


c) 5.0-6.0 m arası

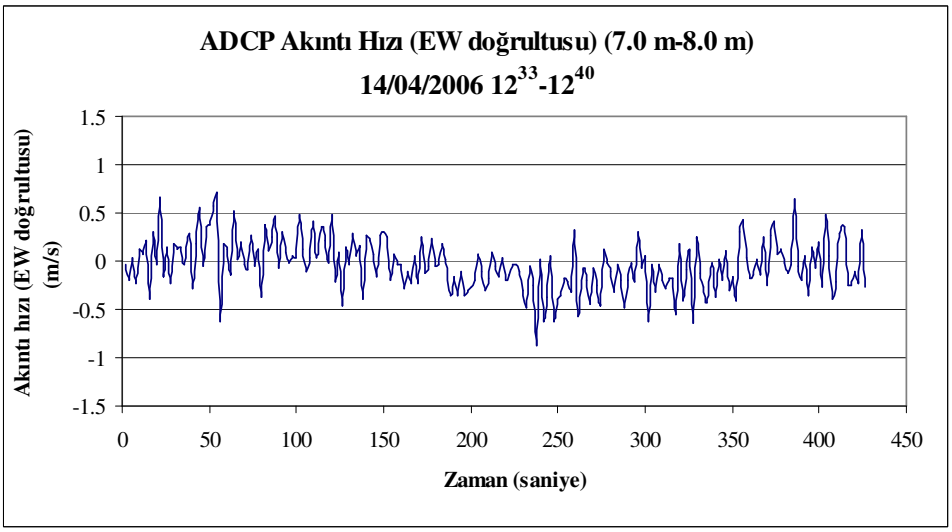
Şekil Ek1.14 2. ölçümden elde edilen akıntı hızı (EW doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası

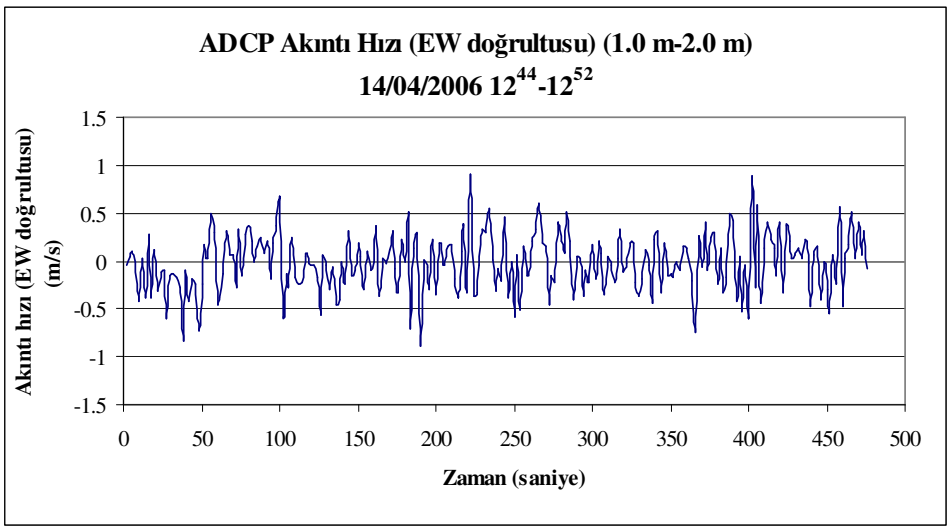


b) 5.0-6.0 m arası

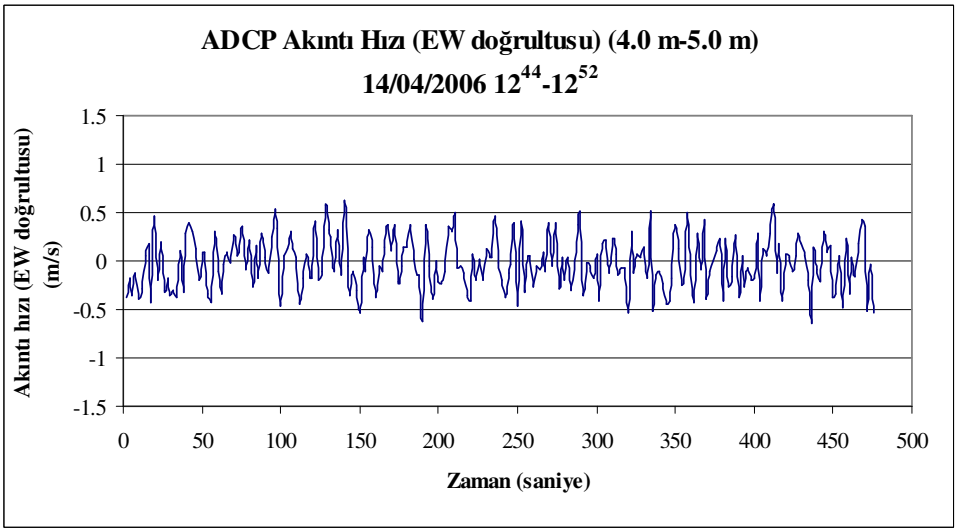


c) 7.0-8.0 m arası

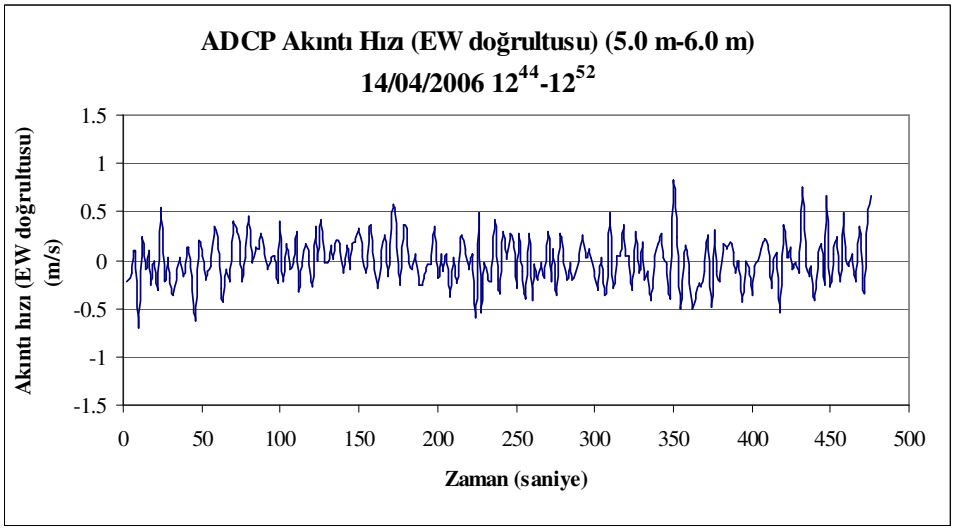
Şekil Ek1.15 3. ölçümden elde edilen akıntı hızı (EW doğrultusu) verilerinin zaman serisi



a) 1.0-2.0 m arası



b) 4.0-5.0 m arası



c) 5.0-6.0 m arası

Şekil Ek1.16 4. ölçümden elde edilen akıntı hızı (EW doğrultusu) verilerinin zaman serisi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	27.03.1978	
Doğum yeri	Mut	
Lise	1989-1996	İçel Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Hidrolik Programı
Doktora	2004-2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Müh. Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2001-Devam ediyor	YTÜ İnşaat Fakülesi Araştırma Görevlisi