YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Parametrik Rüzgar Dal. Mod. ve Batı Karadeniz Uyg.

Yüksek Lisans Tezi

CİHAN ŞAHİN

50
08

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

1045

PARAMETRİK RÜZGAR DALGASI MODELLEMESİ VE BATI KARADENİZ UYGULAMASI

İnş. Müh. Cihan ŞAHİN

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)

İSTANBUL, 2007

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Demirbaş No:.....
2550702039999303070000

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARAMETRİK RÜZGAR DALGASI MODELLEMESİ VE BATI KARADENİZ UYGULAMASI

608

İnş. Müh. Cihan ŞAHİN

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)

Prof. Dr. Esin ÇEVİK Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL Prof. Dr. M. Emin KARAHAN

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ iv

KISALTMA LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ vii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖNSÖZ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiii

1. GİRİŞ 1

2. DENİZ DALGALARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN TARİHSEL GELİŞİMİ 3

2.1 Giriş 3
2.2 Deniz Dalgaları ile İlgili Çalışmalarda Modern Gelişmeler 4
2.2.1 Rüzgar Dalgalarının Üreme Mekanizmaları 4
2.2.2 Rüzgar Dalgalarının İstatistiksel Özellikleri 8
2.2.3 Rüzgar Dalgalarının Lineer Olmayan Özellikleri 10
2.2.4 Laboratuvar ve Saha Gözlemleri 11
2.2.5 Hava-deniz Etkileşimi ve Dalga Projeleri 12
2.2.6 Dalga Tahmini 13
2.2.7 Uluslararası Sempozyumlar 14

3. DALGA GELİŞİM SÜREÇLERİNİN TEORİSİ 15

3.1 Giriş 15
3.2 Rüzgar Dalgası Gelişimi 15
3.3 Dalga Yayılması 18
3.3.1 Açısal Saçılım (Angular Spreading) 19
3.3.2 Dispersiyon 21
3.4 Enerji Kaybı (Dissipation) 22
3.5 Lineer Olmayan Etkileşimler 22

4. DALGA TAHMİN YÖNTEMLERİ 27

4.1 Basit Dalga Tahmin Yöntemleri 27
4.1.1 Soluğan Dalgalarının Hesabı 31
4.1.1.1 Uzak Mesafeli Fırtınalar 32
4.1.1.2 Uzun Feçli Uzak Mesafeli Fırtınalar 34

4.1.1.3 Yakın Mesafeli Bir Fırtınadan Gözlem Noktasına Gelen Soluğan 35
4.1.2 Sığ Su Etkilerinin Elle Hesabı 36
4.1.2.1 Kıyı Bölgesinde Soluğanın Sığlaşma ve Sapması 36
4.1.3 Ampirik Dalga Tahmin Modelleri 39
4.1.3.1 JONSWAP Yöntemi 40
4.1.3.2 SPM Yöntemi 42
4.1.3.3 SMB Yöntemi 47
4.1.3.4 Donelan Yöntemi 49
4.1.3.5 Krylov Yöntemi 51
4.1.3.6 Ampirik Dalga Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması 52
4.2 Sayısal Dalga Modellemesi 54
4.2.1 Temel Kavramlar 54
4.2.2 Dalga Enerji-Denge Denklemi 56
4.2.3 Dalga Modelinin Elemanları 56
4.2.3.1 Başlangıç Koşulları 56
4.2.3.2 Rüzgar 56
4.2.3.3 Enerji Girişi ve Enerji Kaybı 57
4.2.3.4 Lineer Olmayan Etkileşimler 58
4.2.3.5 Yayılma 59
4.2.3.6 Yönsel Sakinleşme (Directional Relaxation) ve Rüzgar Dalgası/Soluğan Etkileşimi 62
4.2.3.7 Derinlik 62
4.2.3.8 Sınırlar, Kıyı çizgileri ve Adaların Etkileri 62
4.2.4 Model Sınıfları 63

5. PARAMETRİK DALGA MODELLEMESİ 67

5.1 Giriş 67
5.2 Rüzgar Verilerinin Değerlendirilmesi 68
5.2.1 Rüzgar İklimi 77
5.3 Dalga Tahmini 79
5.3.1 Fırtına Süresi 79
5.3.2 Feç Etkisi 87
5.3.3 Rüzgar Hızı Etkisi 89
5.3.4 Dalga / Rüzgar Yönü İlişkisi 98
5.3.5 Parametrik Dalga Tahmin Modelinin Değerlendirilmesi 102
5.3.5.1 Dalga Yüksekliğinin Değerlendirilmesi 103
5.3.5.2 Dalga Periyodunun Değerlendirilmesi 107

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 110

KAYNAKLAR 112

ÖZGEÇMİŞ 116

SİMGE LİSTESİ

A	Sabit
$A(f,\theta)$	Rezonans etkileşimi
B	Sabit
$B(f,\theta)$	Miles terimi
c	Dalga faz hızı
C	Sabit
c_0	Derin suda faz hızı
C_D	Direnç katsayısı
c_g	Dalga grup hızı
c_{g0}	Derin suda dalga grup hızı
c_p	Dalga spektrumunun pik frekansının faz hızı
d	Su derinliği
D	Sabit
D_p	Fırtına bölgesinden gözlem noktasına olan süre
E	Enerji
$E(f,\theta)$	Frekans-yön bileşeni
E^*	Boyutsuz enerji
E_{PM}	Pierson-Moskowitz Spektrumunda verilen enerji
E_{TOPLAM}	Toplam enerji
F	Feç
f	Frekans
F^*	Boyutsuz feç
F_{FAS}	Tam gelişmiş durumdaki feç
f_p	Pik frekans
f_p^*	Boyutsuz pik frekans
g	Yerçekimi ivmesi
H	Dalga yüksekliği
H^*	Boyutsuz dalga yüksekliği
$H_{1/3}$	Belirgin dalga yüksekliği
H_c	Karakteristik dalga yüksekliği
H_{m0}	Spektrumun belirgin dalga yüksekliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
k	Dalga numarası
K	Kernel fonksiyonu
k_0	Derin suda dalga numarası
K_1	Sabit
K_2	Sabit
K_r	Sapma katsayısı
K_s	Sığlaşma katsayısı
L	Dalga boyu
L_0	Derin su dalga boyu
m_0	Dalga yoğunluk spektrumunun altında kalan alan
n_i	Dalga hareket yoğunluğu
$P(k,f)$	Dalga nedenli türbülans spektrumu
$P_{hesaplanan}$	Hesaplanan dalga parametresinin değeri
$P_{ölçülen}$	Ölçülen dalga parametresinin değeri
R_p	Fırtına bölgesinden gözlem noktasına olan mesafe
S	Frekansın pik frekansa oranına bağlı fonksiyon
S_t	Net kaynak fonksiyonu

S_{ds}	Enerji kaybı kaynak terimi
S_{in}	Enerji girdisi kaynak terimi
S_{nl}	Lineer olmayan enerji kaynak terimi
T	Dalga periyodu
t	Rüzgar esme süresi
t^*	Boyutsuz süre
$T_{1/3}$	Belirgin dalga periyodu
T_c	Karakteristik dalga periyodu
t_{FAS}	Tam gelişmiş durumdaki rüzgar esme süresi
t_{lim}	Limit süre
T_m	Spektrumun pik periyodu
u	Rüzgar hızı
u_*	Kayma hızı
u_{10}	Deniz seviyesinden 10 m yükseklikteki rüzgar hızı
u_5	Deniz seviyesinden 5 m yükseklikteki rüzgar hızı
U_A	Rüzgar gerilme faktörü
u_{z0}	Referans yüksekliğindeki rüzgar hızı
u_z	Deniz seviyesinden z yüksekliğindeki rüzgar hızı
z	Yükseklik
z_0	Referans yüksekliği
μ	Birleşim katsayısı
ρ_w	Suyun özgül kütlesi
θ	Faz açısı
ψ	Rüzgar yönü
ρ_a	Havanın özgül kütlesi
τ_0	Kayma gerilmesi
ω	Açısal frekans
$\psi(E)$	Entegre spektruma ait bir özellik
$\overline{f}$	Ortalama frekans
δ	Rezonans koşullarını gerçekleştiren fonksiyon
α	Boyutsuz sabit
β	Boyutsuz sabit
α_0	Derin suda dalga sırtının batimetri ile yaptığı açı
ϕ	Feç parametresi
Θ	Dalga yönü ve rüzgar yönü arasındaki fark
$\overline{H}$	Ortalama dalga yüksekliği
$\overline{T}$	Ortalama dalga periyodu
ε	Boyutsuz enerji
Δt	Zaman adımı
Δx	Ağ aralığı
θ_k	Kritik rüzgar yönü değişimi açısı
ξ	Dalga diklik parametresi
σ	Sabit
γ	Sabit
ψ_i	Ortama ait özellik
φ	Dalga yönü

KISALTMA LİSTESİ

OSJ	The Oceanographic Society of Japan
ARSLOE	Atlantic Remote Sensing Land Ocean Experiment
CD	Coupled Discrete model
CERC	Coastal Engineering Research Center
CH	Coupled Hybrid model
DP	Decoupled Propagation model
E	East
ENE	East North East
ESE	East South East
GD	Gröen and Dorrestein
HEXOS	Humidity EXchange Over the Sea
ICCE	International Conference on Coastal Engineering
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
JWA3G	Japan Weather Association's Third Generation Wave Model
N	North
NE	North East
NIO	National Institute of Oceanography
NNE	North North East
NNW	North North West
NW	North West
NYU	New York University
PNJ	Pierson, Neumann and James
RASEX	Riso Air-Sea Exchange
RIAM	Research Institute for Applied Mechanics
RMS	Root Mean Square
S	South
SE	South East
SMB	Sverdrup, Munk ve Bretschneider
SOWEX	Southern Ocean Waves Experiment
SPM	Shore Protection Manual
SSE	South South East
SSW	South South West
SW	South West
SWADE	The Surface Waves Dynamics Experiment
SWOP	Stereo Wave Observation Project
W	West
WAM	Wave Model
WNW	West North West
WSW	West South West

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Dalga tahmininde kullanılan basit bir diyagram. (Gröen ve Dorrestein, 1976). 18
Şekil 3.2 AB'deki fırtınadan kaynaklı soluğan dalgasının muhtemel yönleri ve P noktasına etkisi 20
Şekil 3.3 Soluğan enerjisi için açısal saçılım faktörleri 20
Şekil 3.4 Feç bölgesinden ayrılan dalgalar üzerinde dispersiyonun etkisi 21
Şekil 3.5 Ortalama Jonswap spektrumu (E) için bir frekans fonksiyonu olarak lineer olmayan dalga etkileşimi (S_{nl}) ile gelişim 24
Şekil 3.6 Artan feç boyunca sabit frekanslı dalga enerjisinin gelişimi (WMO, 1998) 24
Şekil 3.7 Spektruma ait enerji gelişim yapısı (WMO, 1998) 25
Şekil 3.8 Frekans spektrumunun feç boyunca gelişimi 26
Şekil 4.1 Derin suda limit dalga dikliği 27
Şekil 4.2 Dalga tahmin diyagramı (Gröen ve Dorrestein, 1976) 32
Şekil 4.3 Uzak mesafeli fırtınadan dolayı meydana gelen soluğan 33
Şekil 4.4 Dalgaların R_p mesafesi boyunca hareket ettiği ve uzun feçli üreme bölgesi bulunan uzak mesafeli fırtınadan dolayı oluşan soluğan dalgası 35
Şekil 4.5(a) d/L_0'ın farklı fonksiyonlarının gösterimi (CERC, 1984) 37
Şekil 4.5(b) Sığlaşma katsayısının (K_s) d/L_0 ile değişimi (CERC,1984) 38
Şekil 4.6 Dalga doğrultusu ve yüksekliğinin sapmadan dolayı değişimi (CERC,1984) 39
Şekil 4.7 Eş zamanlı feç-süre ilişkileri (Massel, 1996) 40
Şekil 4.8 Dalga yüksekliğinin tahmini için grafik (sabit derinlik) 43
Şekil 4.9 Dalga periyodunun tahmini için grafik (sabit derinlik) 44
Şekil 4.10 Belirgin dalga karakteristikleri nomogramı 46
Şekil 4.11 SMB yöntemi (Yüksel vd., 1998) 48
Şekil 4.12 ϕ feç parametresi (Yüksel vd., 1998) 49
Şekil 4.13 Ortalama dalga yüksekliği $\bar{H}$ ile boyutsuz feç arasındaki ilişki (Massel, 1996) 52
Şekil 4.14 Dalga yüksekliği tahmini için ampirik dalga tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması (Massel, 1996) 53
Şekil 4.15 Dalga periyodu tahmini için ampirik dalga tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması (Massel, 1996) 53
Şekil 4.16 Dalga modelinin elemanları (WMO, 1998) 55
Şekil 4.17 Sayısal dalga modeli için çözüm ağı 60
Şekil 4.18 Fırtına bölgesinden ayrık spektrum bileşenlerinin yayılımı 60
Şekil 4.19 Camille Kasırgası (1969) sırasında hesaplanan ve gözlenen dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması. Fırtınanın büyüklüğünden dolayı dalga sensörü kullanılamaz hale gelimiştir (WAMDI Group, 1988) 65
Şekil 5.1 Karaburun'un coğrafi konumu 67
Şekil 5.2 Karaburun sahil şeridi (Çevik vd., 2006) 68
Şekil 5.3 Karaburun ölçüm noktası ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun coğrafi konumları 69
Şekil 5.4 Dalgaların üzerindeki atmosfer sınır tabakası (CERC, 1984) 70
Şekil 5.5 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin karşılaştırılması 71
Şekil 5.6 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin karşılaştırılması 73
Şekil 5.7 E yönü için düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri 74
Şekil 5.8 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm

verileri zaman serisi (29.07.04 – 15.08.2004) (Çevik vd., 2006) 76
Şekil 5.9 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri zaman serisi (05.12.04 – 22.12.04) (Çevik vd., 2006) 76
Şekil 5.10 Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülü (Çevik vd., 2006) 77
Şekil 5.11 "Türkiye Kıyıları İçin Rüzgar ve Derin Deniz Atlası"na göre rüzgar gülü (Özhan ve Abdalla, 1999) 78
Şekil 5.12 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülü (Çevik vd., 2006) 78
Şekil 5.13 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 30° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 81
Şekil 5.14 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 45° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 81
Şekil 5.15 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 60° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 82
Şekil 5.16 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 75° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 82
Şekil 5.17 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 90° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 83
Şekil 5.18 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 105° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri 83
Şekil 5.19 Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için elde edilen sonuçlar ile hesaplanan dalga yükseklikleri 84
Şekil 5.19 Devam 85
Şekil 5.20 Farklı fırtına yönü değişimleri için RMS hataların karşılaştırılması 86
Şekil 5.21 Yönlere yöre etkili feç uzunlukları 88
Şekil 5.22 Eş zamanlı rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 90
Şekil 5.23 İki saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 90
Şekil 5.24 Dört saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 91
Şekil 5.25 Altı saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 91
Şekil 5.26 Sekiz saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 92
Şekil 5.27 On saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 92
Şekil 5.28 On iki saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 93
Şekil 5.29 On üç saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 93
Şekil 5.30 On dört saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 94
Şekil 5.31 On beş saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri 94
Şekil 5.32 Farklı ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki ilişkiler 95
Şekil 5.32 Devam 96
Şekil 5.32 Devam 97
Şekil 5.33 Ortalaması alınan esme sürelerine göre RMS hataların değişimi 98

Şekil 5.34 Ölçülen dalga yönü ve rüzgar yönü 100
Şekil 5.35 Ölçülen ve hesaplanan dalga yönleri 101
Şekil 5.36 Yönler ve açı değerleri 101
Şekil 5.37 Ölçülen dalga yönüne karşı rüzgar yönü 102
Şekil 5.38 Ölçülen dalga yönüne karşı hesaplanan dalga yönü 102
Şekil 5.39 Oluşturulan parametrik model bilgisayar programı için akım şeması 104
Şekil 5.40 Ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri 105
Şekil 5.41 Ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki ilişki 106
Şekil 5.42 Ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları arasındaki ilişki 107
Şekil 5.43 Ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları 109

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Yirminci yüzyılın ikinci yarısında deniz dalgaları ile ilgili çalışmaların gelişimi (Mitsuyasu, 2002) 6
Çizelge 4.1 Derin su dalga tahmin denklemleri (CERC, 1984) 45
Çizelge 5.1 Farklı fırtına yönü değişimleri kullanılarak yapılan hesaplamalardaki hatalar 86
Çizelge 5.2 Etkili feç uzunlukları (Arı, 2004) 88
Çizelge 5.3 Ortalaması alınan esme süreleri için hatalar 98

ÖNSÖZ

Lisans, yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca sahip olduğu bilgi, tecrübe ve desteği benden esirgemeyen, bu niteliklerine gelecekte de fazlasıyla ihtiyaç duyacağım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Esin Çevik'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Lisans, yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesinden faydalandığım, bu bilgi ve tecrübesine her zaman ihtiyaç duyacağım hocam Prof. Dr. Yalçın Yüksel'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında ihtiyacım olan her konuda fikrini ve önerilerini aldığım, hiç bir zaman benden yardımını esirgemeyen Anıl Arı'ya, tez çalışmam ile ilgili fikirlerini ve bilgisayar programlama konusunda yardımlarını aldığım Burak Aydoğan'a ve desteklerini benden esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana her konuda destek olan, sevgi ve desteklerini bana her zaman hissettiren ve sevgileriyle bana güç veren aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Cihan ŞAHİN

Ocak, 2007

ÖZET

Kıyı mühendisliği ile ilgili bir çok problemin çözümünde uzun dönemli ve kesintisiz dalga verilerine gereksinim duyulmaktadır. Dalga verilerinin uzun dönemli ölçülmesi oldukça pahalı ve zaman alıcı olduğundan dolayı genellikle dalga parametreleri ulaşılması daha kolay olan rüzgar ve basınç verileri kullanılarak birçok yöntem ile tahmin edilmeye çalışılmaktadırlar. Dalga parametrelerinin tahmininde basit ampirik yöntemler kullanılabileceği gibi gelişmiş sayısal modeller de kullanılabilmektedir. Ancak sayısal yöntemler hem zaman alıcı hem de çok daha gelişmiş bilgisayar özellikleri gerektirdiğinden çoğu zaman basit tahmin yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada rüzgar verileri kullanılarak dalga parametrelerinin hesaplanması için bir dalga tahmin modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle mevcut sayısal dalga modelleri ve ampirik dalga tahmin modelleri incelenmiş, yönsel dalga parametrelerinin zaman serisi olarak tahmini için parametrik bir dalga tahmin modeli geliştirilmiştir. Modelde, dalga yüksekliği ve dalga periyodunun hesabında CERC (1984) tarafından verilen ampirik ifadelerden faydalanılmış ve dalga parametrelerinin bir zaman serisi şeklinde elde edilebilmesi için bu ifadelerde bulunan rüzgar esme süresi (t), rüzgar hızı (U) ve etkili feç mesafesi (F) çeşitli yaklaşımlar yapılarak belirlenmiştir. Dalga yönünün tahmini için CERC (1984)'te herhangi bir ifade verilmemesinden dolayı dalga yönünün tahmini için daha farklı bir yöntem önerilmiştir. Bir zaman serisi şeklinde hesaplanan dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga yönleri Karaburun yöresinde yaklaşık 8.5 ay süre ile ölçülmüş dalga parametreleri ile karşılaştırılmış ve dalga yüksekliği için son derece uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Kurulan modelde dalga periyodu ve yönü için sonuçlar kabul edilebilir mertebelerdedir.

Anahtar kelimeler: Dalga gelişimi, dalga tahmini, ampirik dalga modelleri, sayısal dalga modelleri

ABSTRACT

Long term and continuous wave data are needed to solve coastal engineering problems. Since it is often extremely expensive and time consuming to measure wave parameters over long periods, it is necessary to predict wave parameters by using wind and pressure data. In addition to simplified empirical methods, numerical models can also be used in order to predict wave parameters. Since numerical methods are comprehensive and need advanced computer properties, simplifed methods are generally used for wave prediction.

The objective of this study is to develop a wave hindcast model to predict wave parameters by using wave data. For this purpose, primarily existent numerical and empirical wave hindcast models have been investigated. A parametric wave hindcast model have been developed to predict directional wave parameters as time series. In this model, equations given by CERC (1984) have been used for wave height and wave period calculations and wind duration (t), wind speed (U), effective fetch lenght (F) existing in these equations have been determined by making some approaches. To predict wave direction, another assumption have been suggested, because there is no equation for wave direction in CERC (1984). Wave height, wave period and wave direction calculated as time series from developed model have been compared with measurements existing over 8.5 months at Karaburun region and obtained very compatible results for wave height. In this model, results for wave period and direction are acceptible.

Keywords: Wave generation, wave hindcasting, empirical wave models, numerical wave models

1. GİRİŞ

Dalgalar, deniz yapılarını etkileyen çevresel faktörler arasında en önemli olanlarıdır. Dalgaların mevcudiyeti deniz yapılarının projelendirilmesini kara yapılarının projelendirilmesinden oldukça farklı kılmaktadır. Çünkü dalgalar doğadaki en karmaşık olaylardır ve dalgaların karakterleri ile davranışlarının tamamıyla anlaşılması kolay değildir (Çevik, 2003). Özellikle açık deniz petrol endüstrisi gibi bir çok amaçla dalga verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan bazıları, tasarım deniz koşulları, yorgunluk analizi, operasyonel planlama ve denizcilik operasyonlarıdır. Bunun dışında, denizcilik sektöründe faaliyet gösteren danışman şirketlerinin de uyguladıkları projeler için dalga verilerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Kıyı yapılarının projelendirilmesi için dalga kayıtlarının değerlendirilerek tasarım dalgalarının bulunması gerekmektedir. Ayrıca kıyı şeridinde meydana gelebilecek değişimlerin belirlenmesi ve kıyı erozyonuna karşı doğru önlemleri alabilmek için güvenilir yönsel dalga verilerine ve bunların dikkatli bir şekilde analiz edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Özellikle yavaş meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımı nedenli morfolojik değişimlerin değerlendirilmesi için bir kaç saat gibi kısa dönemlerde dalgayı temsil eden kayıtlar yeterli bilgileri verememektedirler. Yani dalgaların uzun dönemli davranışı hakkında bilgi gerekmektedir. Diğer taraftan dalga parametrelerinin daha uzun periyotlarda ölçülmesi oldukça pahalıdır ve çok fazla zaman gerektirmektedir. Bu nedenle ölçülmüş mevcut dalga verilerini kullanarak bunları daha uzun sürelere ilerletmek gerekmektedir. Genellikle çok uzun periyotlar için rüzgar verilerine ulaşmak dalga verilerine göre daha kolay olduğundan dolayı mevcut rüzgar verilerinden faydalanılarak dalga verilerinin hesaplanması en yaygın kullanılan yöntemdir.

Dalga verilerinin istatistiksel değerlendirmesinde, özellikle etkin dalga koşullarının hesaplanması ve dalga ikliminin belirlenmesi için tamamlanmış ve kapalı zaman serilerinden elde edilen veriler kullanılmaktadır. Dalga ölçümleri çoğu zaman çeşitli sebeplerden dolayı tamamlanamadığından, bu dalga verilerindeki eksikliklerin giderilmesi gerekmektedir (Witte vd., 1998).

Dalga parametrelerinin rüzgar verilerinden tahmini için bir çok teorik yaklaşımın kullanılması mümkündür. Genelde doğru yaklaşım uygun girdi bilgilerine ve araştırmanın amaçlarına bağlıdır. İki boyutlu sayısal spektruma ait dalga tahmin modeli ile dalga parametrelerinin tahmini için atmosfere ait basınç alanı hakkında detaylı bilgi gerekmektedir. Hesap gücüne

gereksinim de oldukça fazladır. Buna karşın, dalga enerji dağılımının spektrum ve yönsel yayılımının detaylı bilgisine de modelden ulaşmak mümkündür. Bu karmaşık modellere karşın bazı ampirik ifadelere dayanan basit dalga tahmin yöntemleri de kullanılmaktadır, ihtiyaç duyulan girdi verileri çok azdır. Buna karşın, çıktı verileri de oldukça yetersizdir ve bu modelle sadece belirgin dalga yükseklikleri ve hakim dalga yönleri kabaca tahmin edilebilmektedir. Bu yöntemlere ek olarak dalga parametreleri ve rüzgar koşulları arasındaki ilişkiyi hesaplamak için istatistiksel yaklaşımlar da bulunmaktadır. Bu istatistiksel yaklaşımlar ölçümlere dayanmaktadır. İlişkilerin hesaplanabilmesi için ölçülmüş dalga parametreleri ve aynı zamanda ölçülmüş yerel rüzgar parametreleri gerekmektedir. Bu istatistiksel modellerin avantajı, sonuçları hızlı hesaplamaları ve herhangi bir ilişkisel değer için hemen hemen kesin sonuçları vermeleridir. Bu yaklaşımların kısıtlamaları ise sadece yerel rüzgar bilgilerinden yerel dalga parametrelerinin hesaplanmasına izin vermeleridir. İstatistiksel yaklaşımlar genellikle araştırmaların sonuçlarını yaygınlaştırmak için kullanılamamaktadır.

Bu çalışmada, Karaburun yöresinde 8.5 ay kadar süre ile ölçülmüş dalga verileri kullanılarak ileri dönemdeki (ölçüm olmayan dönemlerdeki) rüzgar verilerinden dalga parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Çalışma giriş bölümü ile birlikte toplam altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde geçmişten günümüze kadar rüzgar dalgaları ile ilgili çalışmalardaki gelişmeler anlatılmıştır. Üçüncü bölümde dalgaların üreme ve gelişme mekanizmaları hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde mevcut dalga tahmin yöntemleri incelenmiştir. Beşinci bölümde, yerel rüzgar verileri kullanılarak dalga parametrelerinin hesaplanması için geliştirilen parametrik model hakkında bilgi verilmiştir. Bu model CERC (1984) yönteminde verilen ampirik ifadelerin kullanılması ve bir takım yaklaşımlar ile bölgeye ait dalga parametrelerini bir zaman serisi halinde elde edilmesinde kullanılmıştır. Hesaplamalarda yaklaşık 8.5 aylık rüzgar ve dalga ölçümü ile meteorolojiden alınmış yaklaşık 16 yıllık rüzgar verisi kullanılmıştır. Altıncı bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar toplu halde özetlenmiştir.

2. DENİZ DALGALARI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1 Giriş

Su yüzeyi üzerinde esen rüzgarlar sonucunda rüzgar dalgaları oluşmaktadır. Dalgalar, rüzgar hareketi etkisiyle zamanla ve mesafeyle gelişirler ve su yüzeyi dalgaları adı verilen büyük dalgalara dönüşürler. Günümüzdeki bilgilere göre, bu süreç şu şekilde gelişmektedir: Su yüzeyi üzerinde esen rüzgarlar iki boyutlu spektrum yapısına sahip küçük dalgacıkları oluşturular. Spektrum bileşenleri, rüzgardan elde ettikleri enerjiyi absorbe ederek zamanla ve mesafeyle gelişirler. Spektrum bileşenleri arasında lineer olmayan enerji transferi de spektrumun gelişimi açısından önemli olmaktadır. Daha sonra, düşük frekans bileşenleri halen gelişmekte iken yüksek frekans bileşenleri kademeli olarak kaybolmaktadır (elde edilen enerji dalga kırılmasıyla kaybedilir). Bu şekilde, spektrumun enerjisi artar ve spektrumun pik değeri düşük frekans alanına dönüşür. Bu sürecin iyi bir dinamik modele ulaşması oldukça fazla zaman gerektirmektedir.

Önceleri dalga çalışmalarındaki en önemli zorluk deniz dalgalarının düzensiz özellikleri ve karmaşık üreme mekanizmaları olmuştur. Deniz dalgalarının bu özellikleri tüm düzenli su dalgalarından farklıdır ve bu farklılıktan dolayı deniz dalgaları ile ilgili temel çalışmalar çok fazla gecikmiştir. Bunun tersine, bir akışkanlar dinamiği problemi olan düzenli ve kararlı formdaki su dalgaları ile ilgili çalışmalar uzun bir geçmişe sahiptir. Bunun ile ilgili temel çalışmalar, ileri düzeyde matematiksel formülasyonları da kapsayacak şekilde 19. yy'da başarı ile geliştirilmiştir. Deniz dalgaları ile ilgili önemli modern çalışmalar, Sverdrup ve Munk (1947) tarafından 1940'lı yıllarda başlayabilmiştir. Bu çalışmadaki en önemli noktalar şu şekilde özetlenebilir;

1) "Belirgin dalgalar" bir çeşit ortalama dalga periyodu ve ortalama dalga yüksekliği ile karakterize edilmiştir. Bu tanım, rasgele özellik gösteren deniz dalgalarını sayısal olarak tanımlayan ilk kavramdır.
2) Dalga hareketinde enerji dengesi kavramı, dalga yayılmasının anlaşılabilmesi için tanımlanmıştır.
3) Deniz dalgalarının yayılması ile ilgili ampirik bağıntılar, toplanan dalga verileri kullanılarak boyutsuz formda elde edilmiştir. Bu bağıntılar, olayı kontrol eden önemli parametreleri içermektedir.

Günümüzde bunlar yaygın bilgiler olmasına rağmen, benzer çalışmaların henüz var olmadığı zamanlarda da bu fikirlerin önerilmesi ilginçtir. Bu çalışmalarda deniz dalgaları ile ilgili

modern çalışmalar geliştirilmiş ve bir çok temel özellik ve deniz dalgalarının dinamik aşamaları açıklığa kavuşturulmuştur.

2.2 Deniz Dalgaları ile İlgili Çalışmalarda Modern Gelişmeler

Deniz dalgaları ile ilgili çalışmalar bir çok alana yayılmaktadır. Çizelge 2.1'de çalışmaların genel görünümü ve tarihi gelişimleri görülmektedir. Deniz yüzeyi dalgaları ile ilişkili problem konuları altı başlık altında toplanmıştır:

1) Başlangıç dalgacıklarını ve rüzgardan dalgaya enerji transferini içeren üreme mekanizmaları (rüzgar dalgalarının);
2) Dalga spektrumunu içeren istatistiksel özellikler (rüzgar dalgaları için);
3) Spektrum bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşimler, dalga stabilitesizliği ve dalga kırılmasını içeren lineer olmayan özellikler (rüzgar dalgaları için);
4) Laboratuvar ve doğa gözlemleri;
5) Hava-deniz ve dalga projeleri ve
6) Dalga tahmin yöntemleri.

Çizelge 2.1'de periyodik yapılan sempozyum ve konu ile ilgili her on yıldaki bilimsel ve teknolojik gelişimler ile her bir konunun on yıllık değişimleri özet olarak görülmektedir.

2.2.1 Rüzgar Dalgalarının Üreme Mekanizmaları

Deniz yüzeyi üzerinde esen rüzgarlar, rüzgar dalgalarını oluşturmaktadırlar (deniz yüzeyi dalgaları). Bundan dolayı, rüzgar dalgalarının üreme mekanizması ve rüzgardan dalgaya enerji transferi rüzgar dalgaları çalışmalarındaki en önemli problemlerdir.

1940'lardaki ilerlemiş çalışmaların başlamasından önce, Jeffreys (1924, 1925) dikkate değer bir teori (korunum teorisi) sunmuştur. Jeffreys (1924, 1925)'e göre; eğer rüzgar hızı dalga hızından daha büyük ise, dalga üzerindeki hava akımı dalga kretinde ayrılır ve akımın ayrılması ile birlikte şekil direnci ile momentum yüzey dalgasına transfer olmaktadır. Ayrıca, dalga üremesi sırasında basit enerji dengesi düşüncesine dayanarak, rüzgar nedeniyle gelişen dalgaların hesaplanması için kullanılan korunum katsayısını belirlemiştir.

Jeffreys'in korunum mekanizmasının doğrulanması için akışkanlar dinamiği ile ilgili çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Stanton vd. (1932) ve Motzfeld (1937), katı ve dalgalı yüzey üzerindeki hava akımı üzerine benzer çalışmalar yapmışlardır. Fakat sonuçlar korunum katsayısının, Jeffreys'in çalışmalarında tahmin ettiği korunum katsayısı değerlerinden çok

daha küçük olduğunu göstermiştir. Ancak Motzfeld (1937)'in dik kretli dalgalar için yaptığı deneysel çalışmalar, sonuçların hala Jeffreys'in çalışmalarında tahmin ettiği değerlerden küçük olmasına rağmen krette hava akımındaki ayrılmayı ve korunum katsayısının daha düşük değerlerini net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu deneysel çalışmalar sonucunda, korunum katsayısının rüzgar- dalga üremesine katkısı sorgulanmaya başlanmıştır. Dik su dalgaları üzerindeki hava akımı ile ilgili güncel gözlemler de hava akımındaki ayrılma ile ilişkili olmuştur (Banner ve Melville, 1976; Kawai, 1982).

1940'lı yıllarda, Wuest (1949)'ın hava-deniz ara yüzeyinin stabilite analizini yaptığı teorik çalışması ve Francis (1949)'in dalga tankında yaptığı rüzgar dalgası üremesi ile ilgili gözlemlerini sunduğu deneysel çalışmasının dışında çok fazla çalışma yapılmamıştır.

1950'lerde Ursell (1956), dalga üremesi ile ilgili çalışmalarını geniş bir şekilde özet olarak sunmuştur. Çalışmalarının sonucu olarak, bu mekanizmaların dalga üremesinde etkin rol oynamadığını belirlemiştir. Philips (1957) ve Miles (1957), Ursell (1956)'in araştırmalarından esinlenerek bu konuda çığır açan iki teori öne sürmüşlerdir. Philips (1957), rüzgardaki düzensiz basınç değişimlerinin sonucu olarak su yüzeyinde rüzgar dalgalarının ürediği fikrini öne sürmüştür. Ancak, daha sonra yapılan laboratuvar çalışmaları rüzgar dalgalarının ilk üremelerinde etkili olmasına rağmen rüzgardaki türbülansın basınç değişiminin Philips (1957)'nin tahmin ettiğinden çok daha az olduğunu ve bu teorinin rüzgar dalgalarının gelişimini tam olarak açıklayamadığını göstermiştir. Diğer taraftan, Miles teorisi bir çeşit stabilite teorisi olup Wuest (1949) ve Lock (1954)'ün fikirlerini kullanmıştır. Fakat çok daha gerçekçi (logaritmik) bir rüzgar profili kullanmıştır. Miles (1957), yüzey dalgaları ve rüzgar arasındaki bağlantının dalga yüzeyi boyunca özel bir basınç dağılımı oluşturduğunu göstermiştir.

1960'lı yıllarda Miles (1960), Philips (1957) ve Miles (1957)'deki iki teoriyi birleştirmiş ve dalganın gelişiminin başlangıçta lineer fakat daha sonra zamanla eksponansiyel olduğunu göstermiştir. Longuet-Higgins vd. (1963) tarafından yapılan saha ölçümleri ve Shemdin ve Hsu (1967) tarafından yapılan laboratuvar çalışmasının sonuçları Miles (1957)'in sonuçlarını kısmen desteklemiştir ve Lighthill (1962), Miles (1957)'in teorisine fiziksel bir yorum getirmiştir. Bu sonuçlar ile dalga üremesi ile ilgili problemlerin çözüldüğü düşünülmüştür. Ancak, Snyder ve Cox (1966) ile Barnett ve Wilkerson (1967) tarafından yapılan saha çalışmaları, dalgaların spektrum bileşenlerinin ölçülen üreme oranlarının Miles'ın belirlediği değerlerden bir mertebe daha büyük olduğunu göstermiştir. 1970'lerde dalga üreme mekanizmasını açıklayabilmek için bir çok teorik çalışmaya yeniden başlanmıştır.

Çizelge 2.1 Yirminci yüzyılın ikinci yarısında deniz dalgaları ile ilgili çalışmaların gelişimi (Mitsuyasu, 2002)

	1940'lar	1950'ler	1960'lar	1970'ler	1980'ler	1990'lar
Üreme mekanizması	temel çalışmalar Wuest, Roll	yeni teori Philips, Miles	türbülans ilavesi	Townsend Gent ve Taylor	Al'Zanaidi ve Hut sayısal çalışma	Belcher Miles
İstatistiksel teori	düzensiz ses teorisi (S.O. Rice) (random noise theoriy)	dalga spektrumu dalga istatistiği	spektrum formu lineer olmayan etkiler	yönsel spektrum benzerlik formu	yüksek frekanslı dalga spektrumu	dalga numarası- frekans spektrumu
Lineer olmayan teori	düzenli dalgaların lineer olmayan teorisi	düzensiz dalgaların lineer olmayan teorisi	dalga etkileşimi dalga stabilitesizliği	dispersiyon bağıntısının hesaplanması	dalga kırılmasının hesaplanması	dalga kırılması ve enerji kaybı
Deneyler (Laboratuvar & Saha)	temel görsel çalışmalar	dalga gözlemi (cihazlar ile)	ileri düzeyde deneyler	yerel denge saha deneyleri	dalga dinamiği uydu gözlemleri	mikro dalga uzaktan algılama
Hava - deniz etkileşimi ve dalga projeleri		SWOP Sun Glitter Projesi		JONSWAP RIAM projesi	ARSLOE HEXOS	SWADE SOWEX, RASEX
Dalga tahmini	Sverdrup ve Munk	SMB yöntemi PNJ yöntemi	sayısal model (birinci nesil)	sayısal model (ikinci nesil)	WAM (üçüncü nesil)	JWA3G veri asimilasyonu
Uluslararası sempozyum	Deniz Yüzeyi Dalgaları (Ocean Surface Waves)	ICCE	Deniz Dalgası Spektrumu (Ocean Wave Spectra)	Marsilya Sempozyumu (NATO)	Miami Sempozyumu Sendai Sempozyumu	Miami Sempozyumu Sidney Sempozyumu
Bilim ve teknolojide gelişmeler	atom bombası bilgisayar (ENIAC) transistör OSJ	Challenger VIII uydu (Sputnik) DNA	big bang (3k radi.) uydu (Apollo) quark model	Club of Rome Rep. Kirlenme problemi SEASAT super LSI	Küresel ısınma uzay mekiği GEOSAT ozon tabakasında delinme	top quark karmaşık sistem ERSI, 2 ADEOS

Çalışmaların bir kısmı, rüzgardaki türbülansın etkisinin belirlenmesi ile Miles (1957)'ın teorisini geliştirmeye yönelik olmuştur (Townsend, 1972; Davis, 1972; Gent ve Taylor, 1976). Bu konu ile ilgili çalışmalar 1980'lerde (Al'Zanaidi ve Hui, 1984) ve 1990'larda da (Belcher ve Hunt, 1993; Miles, 1993) devam etmiştir. Ancak bazı sayısal hesaplamalar (Al'Zanaidi ve Hui, 1984; Miles, 1993), teori ile deney sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum vermesine rağmen bu mekanizma günümüzde hala tam olarak anlaşılamamıştır.

Rüzgar dalgalarının üreme oranlarının mümkün olduğunca doğru bir şekilde ölçülmesi ise diğer çalışmalardı, buna paralel olarak Snyder ve Cox (1966) ile Barnett ve Wilkerson (1967) tarafından üreme oranları ölçülmüştür. Lineer olmayan enerji transferinden etkilenmeyen daha uygun değerler elde edebilmek için bir çok saha ve laboratuvar ölçümü gerçekleştirilmiştir (Synder vd., 1981; Mitsuyasu ve Honda, 1982; Hsiao ve Shemdin, 1983). Plant (1982), bir çok güvenilir kaynaktan alınan gözlem değerlerinin birleşimi ile rüzgar dalgalarının gelişim oranı için ampirik bir ifade önermiştir. Ölçülen değerler hala sayısal dalga modellerinde kullanılmaktadır ve dalga üreme oranındaki saçılım kabul edilebilir olmasına rağmen problem hala çözülememiştir.

En önemli problemlerden bir tanesi de su yüzeyi yakınındaki olayların detaylarının doğru ölçümlerinin oldukça zor olmasıdır. Bu durum daha gerçekçi teorik modellerin ortaya çıkmasını engellemiştir. Bundan dolayı, hava-deniz ara yüzeyi yakınındaki olaylara açıklık getirilmesi için gelişmiş ölçüm tekniklerinin kullanıldığı deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Yukarıdaki çalışmalar genellikle rüzgar hareketi etkisindeki rüzgar dalgalarının üreme mekanizması ile ilgilenmektedir. Sakin su yüzeyi üzerindeki başlangıç rüzgar dalgalarının gelişimi ile ilgili bir çok ilginç çalışma konusu mevcuttur. Su yüzeyi üzerinde rüzgar esmeye başladığı zaman sürüklenme akıntısı (drift current) oluşur, daha sonra kademeli olarak rüzgar dalgasına dönüşecek olan ufak kapiler dalgalar oluşmaya başlarlar. Kunishi (1963), bu konuyu aydınlatabilmek için problemle ilgili geniş kapsamlı bir laboratuvar çalışması yapmıştır. Yaklaşık yirmi yıl sonra Kawai (1979), başlangıç rüzgar dalgalarının gelişimini açıklamak amacıyla hava ve suda bir birleşik kesmeli akım modelini (coupled shear flow model) inceleyerek bu konu üzerine deneysel ve teorik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Ölçümler ve teori arasında oldukça iyi bir uyum elde etmiştir. Okuda vd. (1976) akım görüntüleme tekniklerini kullanarak suda rüzgar kaynaklı yüzey akımlarını, rüzgar dalgalarının üremesinden önce ve sonra detaylı bir şekilde gözlemlemiştir. Bu gözlemler sonucunda,

yüzey akımının laminerden türbülanslı akıma geçişi ile rüzgar dalgalarının üremesi arasında ilginç bir ilişki elde etmişlerdir. Başlangıç dalgalarının üremesi Philips (1957)'in rezonans teorisi ile de çözülebilmektedir. Donelan (1988)'de deneysel çalışmalar yapmış fakat Kawai (1979) ve Philips (1957)'in çalışmalarını ilerletebilecek sonuçlar elde edememiştir. Problemi açıklığa kavuşturmak için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

2.2.2 Rüzgar Dalgalarının İstatistiksel Özellikleri

Rüzgar dalgalarının rasgele özellikler göstermeleri ilk zamanlarda açık bir şekilde anlaşılmalarına engel olmuştur. Sverdrup ve Munk (1947), deniz dalgalarının rasgele özelliklerini tanımlayabilmek için belirgin dalga tanımını (istatistiksel olarak bir çeşit ortalama dalga) ortaya koymuşlardır. Rüzgar dalgalarının istatistiksel teorisi rasgele süreç (random process) teorisinden (özellikle Rice (1944) tarafından sunulan rasgele gürültü kuramı (theory of random noise)) sonra oldukça ilerlemiştir. Rasgele gürültü kuramının ardından, ilk yaklaşım olarak düzensiz dalgalar sonsuz sayıdaki sünüzoidal dalganın toplamı olarak düşünülmüştür.

1950'li yıllarda, yukarıda bahsedilen istatistiksel modele dayanarak, Longuet-Higgins (1952), dalga yüksekliklerinin istatistiksel dağılımı ile ilgili ilk teorik yaklaşımı vermiştir. Cartwright ve Longuet-Higgins (1956), İngiliz National Institute of Oceanography (NIO)' de rasgele fonksiyonun maksimum değerleri istatistiksel dağılımını çıkarmışlardır. Deniz dalgalarına ait istatistiksel teori NIO'daki grup tarafından genişletilmiş ve 1950'ler de toplanan dalga verilerinin analizinde etkin bir şekilde uygulanmıştır.

Diğer taraftan Amerika Birleşik Devletleri'nde, New York Üniversitesi'nden Pierson (1953), rasgele gürültü kuramından büyük ölçüde etkilenerek elde ettiği rüzgar dalgalarına ait bir spektrum modelini sunmuştur. Yine NYU'dan Neumann (1953), kendi gözlemlediği dalga verileri ile gelişmekte olan deniz dalgalarına ait bir spektrum formu elde etmiştir. Bu çalışmaların sonuçları birleştirilerek NYU grubu ünlü çalışmalarını sunmuşlardır: "Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics" (Pierson vd., 1955).

Dalga spektrumunun fiziği için ise Philips (1958) dalga kırılmasını basit bir şekilde dikkate alarak rüzgar dalgalarının spektrumunda denge aralığını tasarlamıştır. Rüzgar dalgaları ile ilgili çalışmaları ilerletmek için geliştirilmiş rasgele süreç teorisi ve çeşitli ölçümler ile desteklenen spektrum modeli verilmiştir.

Çok sayıda oşinograf, 1960'lı yıllarda spektruma ait verilerin artması ile deniz dalgası spektrumuna ait bir benzerlik formunu (similarity form) belirlemeye çalışmışlardır. En başarılı sonuçlar Pierson ve Moskowitz (1964) tarafından elde edilmiştir. Kuzey Atlantik Denizi'nde elde ettikleri dalga spektrum verilerini kullanarak tam gelişmiş deniz için ünlü bir spektrum formu (PM spektrumu) sunmuşlardır. Pierson ve Moskowitz (1964)'in çalışmaları Kitaigorodskii (1962) tarafından verilen rüzgar dalgası spektrumunun benzerlik teorisine dayanmaktadır.

Dalga spektrumu konusunu açıklığa kavuşturmak için 1960'ların sonundan 1970'lere kadar bir çok önemli deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucu olarak, spektrumun gelişimi (Mitsuyasu, 1968b, 1969; Hasselmann vd., 1973), sınırlı feçte spektrum formu (Hasselmann vd., 1973), yönsel spektrumun benzerlik formu (Mitsuyasu vd., 1975; Hasselmann vd., 1980; Donelan vd., 1985) gibi rüzgar dalgası spektrumuna ait bir çok önemli özellik açıklanabilmektedir. Diğer taraftan, Toba (1972, 1973a, 1973b), rüzgarlar ve rüzgar kaynaklı dalgalar arasında yerel denge fikrini ortaya atmıştır, bu rüzgar dalgalarının gelişimleri sırasında kendi doğal yapılarını korudukları anlamına gelmektedir. Bu çalışma, rüzgar dalgaları için "3/2 güç kanunu" nu içermektedir. Ayrıca Toba (1973b), Kawai vd. (1977) tarafından da desteklenen dalga spektrumunun yeni bir denge formunu elde etmiştir ve bu form Philips (1958)'den daha farklı bir forma sahiptir. Veri sayısının artması ile Toba'nın yeni spektrum formu daha fazla desteklenmiştir. Philips (1985), Toba (1973b)'nın yeni denge formunu destekleyen yeni bir teori sunmuştur.

Rüzgar dalgalarının istatistiksel yapısı 1970 ve 1980'lerde yeniden dikkat çekmiştir. Longuet-Higgins (1975, 1983), pratikte önemli olan düzensiz dalgaların periyot ve genliklerinin ortak dağılımları hakkında çalışmalar yapmıştır.

1978'de SEASET uydusunun fırlatılmasından sonra, deniz dalgası spektrumu çalışmaları mikro dalga sensörü verilerinin analizinde kullanılmak üzere dalga spektrumunun yüksek frekans bölümü üzerine odaklanmıştır. 1970'lerden 1990'lara kadar olan sürede yapılan çok sayıda deneysel çalışmanın sonuçları ile yüksek frekanslı dalga spektrumunun (Mitsuyasu ve Honda, 1974; Mitsuyasu, 1977) ve yüksek dalga numarası spektrumunun (Jahne ve Riemer, 1990; Zhang, 1995) rüzgara bağımlılığı açıklanabilmektedir. Yüksek frekanslı dalgalar deniz yüzeyindeki pürüzlülük olarak da dikkat çekmiştir.

2.2.3 Rüzgar Dalgalarının Lineer Olmayan Özellikleri

Rüzgar dalgaları lineer teori ile büyük ölçüde tanımlanabilmektedirler. Bundan dolayı spektrum modeli, düzensiz deniz dalgalarını tanımlamak için oldukça etkili şekilde kullanılabilmektedir. Ancak dalga dikliğinin (dalga yüksekliği/dalga boyu oranı) artması, dalga formunun distorsiyonu, spektrum bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşimler, dalga stabilitesinin bozulması ve dalga kırılması ile dalgalar lineer olmayan özellikler göstermeye başlamaktadırlar.

Düzenli dalgalar için lineer olmayan teori (solitary dalga teorisi), deniz dalgalarına da uygulanmıştır (Munk, 1949). Bunun nedeni, bir çok durumda belirgin dalgaların kullanılması ile deniz dalgalarının tanımlanabilmeleridir. Sadece 1950'lerin sonunda Tick (1959) ağırlık dalgaları için lineer olmayan düzensiz bir model sunmuştur.

Lineer olmayan dalga teorisi 1960'lı yıllarda büyük ölçüde ilerlemiştir. Philips (1960) ve Hasselman (1960, 1962, 1963) hemen hemen aynı zamanlarda dalga spektrumu boyunca lineer olmayan enerji transferini bulmuşlardır. Bu sonuçlar, dalga spektrumunun gelişiminin bu mekanizmadan büyük ölçüde etkilenmesinden dolayı son derece önemli ve dikkate değerdir. Longuet-Higgins ve Smith (1966) ve McGoldrick vd. (1966) deneysel olarak dalga rezonans etkileşimini (resonant four-wave interactions) doğrulamış ve Mitsuyasu (1968a) da sürekli dalga spektrumunun bu etkiden dolayı geliştiğini doğrulamıştır. Lineer olmayan enerji transferinin dalga spektrumunun gelişiminde önemli bir rol oynamasına rağmen hesaplanmasının zorluğu önemli bir problemdir. Problemi çözmek için bir çok çalışma yapılmıştır. Longuet-Higgins (1976) ve Fox (1976) daha kolay hesaplanabilen lineer olmayan bir etkileşim modeli elde etmişlerdir. Ancak, elde edilen sonuçlar gerçek koşulların tanımlanması için uygun olmamıştır. Çünkü, model sadece dar spektrum için geçerli olup gözlemlenen sonuçlar Fox'un hesaplamaları ile kabul edilebilir bir uyum göstermemiştir.

Masuda (1980), Hasselmann'ın modeline dayanan ve daha iyi sayısal stabilite ve hesap doğruluğu sağlayan yeni bir lineer olmayan enerji transferi tasarısı üzerine çalışma yapmıştır. Hashimoto vd. (1998), Masuda (1980)'nın derin deniz dalgaları için olan hesap tasarısını sığ su koşullarına uygulayarak genişletmiştir. Komatsu ve Masuda (1996) lineer olmayan enerji transferi için daha etkili bir tasarı geliştirmiştir fakat dalga modelinin pratik uygulanması için hesap süresi uygun olmamıştır.

Lineer olmayan enerji transferinin kesin hesabının çok fazla zaman alması ve dalga tahminine uygulamak için pratik olmamasından dolayı bir çok mevcut dalga modeli lineer olmayan

enerji transferi için büyük ölçüde basitleştirilmiş hesaplama yöntemi kullanmaktadır (Hasselmann ve Hasselmann, 1985; Hasselmann vd., 1985; Suzuki, 1995). Basitleştirilmiş hesap yöntemlerinin doğruluğunun dalga spektrumunun formuna bağlı olmasından dolayı problem hala devam etmektedir. Bu bağlamda, Hashimoto vd. (1999) lineer olmayan enerji transferinin ayrık etkileşim yaklaşımının (discrete interaction approximation) doğruluğunu ilerletmiştir.

1970'lerde, Ramamonjiarisoa (1974) ve Ramamonjiarisoa vd. (1978), rüzgar dalgası spektrumundaki bazı yüksek frekans bileşenlerinin dispersiyon bağıntısını izlemediği şeklinde oldukça ilginç bir sonuç bulmuşlardır. Bu buluş dalga spektrum modeli üzerine ciddi şüpheler doğurmuştur çünkü spektrum modeli ilk yaklaşım olarak spektrum bileşenlerinin serbest dalgalar oldukları ve tipik dispersiyon bağıntısını izlediği kabulüne dayanmakta idi. Bu problemi açıklığa kavuşturmak için bir çok çalışma yapılmıştır.

1980'lerden 1990'lara kadar, rüzgar dalgalarının lineer olmayan özellikleri üzerine temel çalışmalar, lineer olmayan olaylardan en karmaşığı olan dalga kırılmasında yoğunlaşmıştır. Banner ve Peregrine (1993) ve Melville (1996) dalga kırılması ile ilgili geniş kapsamlı çalışmaları başarılı bir şekilde sunmuşlardır. Dalga kırılması, dalgaların gelişimindeki enejji kaybı mekanizmasının yanında hava-deniz sınırındaki çeşitli değişim süreçleri için de oldukça önemlidir. Örneğin, dalga kırılmasının hava-deniz arayüzü boyunca CO_2 değişimi üzerindeki etkileri güncel bir tartışma konusudur. Ayrıca, havadan suya olan momentum transferinde dalga kırılmasının etkisi hala tam olarak anlaşılamamıştır. Problem oldukça eski olmasına rağmen çözümü için yeni bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.4 Laboratuvar ve Saha Gözlemleri

Rüzgar dalgaları gibi oşinografik olayların netleşmesinde ve süreçlerin daha iyi anlaşılmasında laboratuvar deneyleri fikir verebilmektedir. Bunun yanında saha gözlemleri de son derece önemlidir.

Laboratuvar çalışmalarının; yeni olayların keşfi, olay üzerinde etkili temel süreçlere netlik kazandırılması ve yeni teorilerin sonuçlarının doğrulanması gibi bir çok amacı vardır. Laboratuvar çalışmaları rüzgar dalgalarının dinamik süreçlerinin anlaşılmasında çok önemli katkıları vardır. Toba (1998), rüzgar dalgaları üzerine yaptığı deneysel çalışmalarını kapsamlı bir şekilde sunmuştur.

Mikro dalga sensörleri kullanılarak rüzgar ve dalgalara ait çok sayıda güncel uydu gözlemi

yapılmıştır (Bernstein, 1985; Stewart, 1985; Douglas ve Cheney, 1990). Çok sayıda doğru rüzgar ve dalga verisi elde etmişlerdir. Dünya çapında bir çok dalga ve rüzgar verisi sayısal dalga modelleri yardımı ile doğru dalga tahmini yapılmasına yardımcı olmuştur (Romeiser, 1993). Ancak, deniz yüzeyinde mikrodalga geri saçılım teorisi günümüzde bile hala tatmin edici değildir (Apel, 1994; Keller vd., 1995) ve ölçüm hala büyük ölçüde çeşitli ampirik ifadelere dayanmaktadır. Bu problemi çözebilmek için de daha fazla temel çalışmanın yapılması gerekmektedir.

2.2.5 Hava-deniz Etkileşimi ve Dalga Projeleri

Rüzgarlar ve dalgaların doğru ve sistematik gözlemleri (daha genel olarak hava-deniz etkileşimi) genellikle çok büyük projeler olmaktadır, çünkü bir çok bilim adamı ve mühendisin ortak çalışmasını gerektirmektedir. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi bu konu ile ilgili bir çok ulusal ve uluslararası proje yürütülmüştür.

1950'lerde, Birleşik Devletler'de iki dikkate değer dalga gözlem projesi (Sun Glitter Project ve Stereo Wave Observation Project) yürütülmüştür. SIO'da Cox ve Munk (1954), Hawaii bölgesinde çeşitli rüzgar koşulları altında deniz yüzeyindeki güneş ışığının hava fotoğraflarını çekmiştir. Bunun sonucunda, dalga şevlerinin istatistiksel dağılımını ve rüzgar hızı ile ilişkisini açıklamıştır. Diğer taraftan, NYU'da Cote vd. (1960) Kuzey Atlantik'te deniz yüzeyinin üç boyutlu hava fotoğraflarını çektikleri "Stereo Wave Observation Project (SWOP)" isimli büyük bir proje gerçekleştirmişlerdir. Çok dikkatli ve yorucu veri analizleri sonucunda deniz dalgalarına ait ilk yönsel spektrumu belirlemişlerdir.

1960'lı yıllarda, Longuet-Higgins (1963) İngiltere'de çok önemli bir çalışma sunmuştur. Bu çalışmada su yüzeyi yakınındaki atmosfer basınç salınımı ve yönsel dalga spektrumu gözlemleri yapmıştır. Bu veriler büyük ölçüde yönsel dalga spektrumuna ait özellikler ile Miles (1957) ve Philips (1957)'in dalga gelişim teorisine netlik kazandırmak için kullanılmıştır. 1960'larda uluslararası bir grup tarafından çok ünlü bir proje olan JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) yürütülmüştür. Bu proje sonucunda sınırlı feç koşulları altında dalga spektrumunun gelişimine ait şu sonuçlar elde edilmiştir; spektrum parametreleri için feç ilişkileri, sınırlı feç koşullarında dalga spektrumunun benzerlik formu, dalga spektrumunun gelişiminde lineer olmayan enerji transferinin etkisi.

1971'den 1974'e kadar olan sürede Kyushu Üniversitesi, RIAM (Research Institude for Applied Mechanics)'dan bir grup bilim adamı ve mühendis bir dalga gözlem projesi

yürütmüştür (Mitsuyasu vd., 1975). Kuzey Pasifik Okyanusu ve Doğu Çin Denizi'nde geniş kapsamlı bir yönsel dalga spektrumu gözlemi yapmışlardır. Üreme bölgesinde yönsel dalga spektrumunun benzerlik formunu ilk defa sunmuşlardır. 1980'lerde Hasselmann (1980) ve Donelan (1985) benzer gözlemler yaparak bu sonucu genişletmişlerdir. Günümüzde, dalga spektrumunun etkin kısmının yönsel özelliklerinin oldukça net bir şekilde anlaşılmasının yanında yüksek frekans kısmının yönsel özellikleri hala tartışma konusudur (Banner vd., 1989).

1990'lı yıllarda, bir çok hava-deniz ve dalga gözlem projesi yapılmıştır. Çizelge 2.1'de bu çalışmalar listelenmiştir. Bu çalışmaların ana hedefi momentum, sıcaklık ve nem gibi çeşitli özelliklerin hava-deniz değişimlerini açıklamaktır. Hava-deniz değişim sürecinde rüzgar dalgalarının etkisine özel bir ilgi gösterilmektedir.

2.2.6 Dalga Tahmini

Deniz dalgaları ile ilgili çalışmaların en önemli hedeflerinden birisi de dalga tahminlerinin doğru bir şekilde yapılmasıdır. Rüzgar dalgaları ile ilgili modern çalışmalar Sverdrup ve Munk (1947)'un İkinci Dünya Savaşı sırasında yapmış oldukları dalga tahmin çalışmalarından sonra başlamıştır. 1950'li yıllarda yeni toplanan dalga verilerinin kullanılması ile Bretschneider (1950, 1958) ve Wilson (1961, 1965) bu dalga tahmin yöntemini büyük ölçüde geliştirmiş ve genellikle SMB yöntemi olarak bilinen revize edilmiş dalga tahmin yöntemini sunmuşlardır. Ayrıca 1950'lerde düzensiz deniz dalgaları için bir istatistiksel teori sunulmuş ve deniz dalgalarının spektrum yapısı bir ölçüde açıklanmıştır. Pierson vd. (1955) tarafından spektral bir dalga tahmin yöntemi oluşturmak amacıyla bir çok temel çalışmadan toplanan bilgiler etkin biçimde kullanılmıştır.

Inoune (1967) ve Barnett (1968), dalga gelişim mekanizması, lineer olmayan enerji transferi ve enerji dengesi denklemi gibi temel çalışmaların ilerlemesiyle beraber 1960'lı yıllarda sayısal bir dalga modeli sunmuşlardır (Hasselmann, 1960). Ancak, daha önceleri (1950'lerde) Fransız bir çalışma grubun bağımsız olarak dalga modeli geliştirdiklerine dikkat edilmelidir.

Japonya'da, Isozaki ve Uji (1973) tarafından MRI dalga modeli geliştirilmiş ve günlük meteorolojik dalga tahmininde kullanılmıştır. Bir çok ülkede çeşitli dalga modelleri geliştirilmiştir.

Günümüzde enerji kaynak terimlerini (rüzgardan elde edilen enerji, spektrum bileşenleri boyunca lineer olmayan enerji transferi ve dalga kırılmasından dolayı enerji kaybı) kontrol

eden temel süreçler üzerine yapılan güncel çalışmaların desteği ile WAM modeli (The WAMDI group, 1988), JWA3G modeli (Suzuki ve Isozaki, 1994; Suzuki, 1995) ve MR-III modeli (Ueno ve Ishizaka, 1997) gibi üçüncü nesil dalga modelleri geliştirilmiştir. Lineer olmayan enerji transferinin hesabı, pratik olarak yeterli doğruluk ile dünya çapında deniz dalgalarının tahmininde kullanılan üçüncü nesil dalga modellerini karakterize etmektedir. Ancak, en gelişmiş üçüncü nesil dalga modellerinde bile bazı enerji kaynak terimleri büyük ölçüde ampirik bilgiye dayanmaktadır.

2.2.7 Uluslararası Sempozyumlar

1961 yılında, Sir George Deacon; Eaton, Maryland, USA'de "Deniz Dalga Spektrumu" isimli ilk uluslararası sempozyumu organize etmiştir. Dünya'nın önde gelen bilim adamları ve mühendisleri deniz dalgaları ile ilgili çeşitli çalışmalarını sunmuşlardır. Ayrıca, o günkü araştırma eğilimleri, gelecekteki ihtiyaçlar ve dalga ölçüm ve analizindeki güncel teknikler hakkında tartışmışlardır. Bu toplantı, başarı sürecinde rüzgar dalgalarındaki hızlı sürece büyük katkılarda bulunmuştur.

Daha sonra, benzer sempozyumlar günümüze kadar devam etmiştir (Çizelge 2.1). Konu ile ilgili gelişmeler doğrultusunda sempozyumların konuları da sürekli değişim göstermiştir.

3. DALGA GELİŞİM SÜREÇLERİNİN TEORİSİ

3.1 Giriş

Dalga tahmini, deniz yüzeyi üzerine etki eden rüzgar alanının değişimi ile dalgaların nasıl yayıldığını değerlendirmeye çalışan bir süreçtir. Bu sürecin anlaşılabilmesi için öncelikle dalga enerjisine etki eden etkenlerin tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu süreç basit olarak, bir bölgedeki dalga enerjisinin adveksiyon (bir bölgeden ya da bölgeye doğru yayılan enerji oranı) yoluyla değişmesi, dış çevreden alınan enerji ve dalga enerjisinin kaybıdır. Dalga modellemesinde genel yaklaşım bu etkileri dalga enerji korunumu denklemi olarak sunmaktır.

Dalga enerjisinin kaynağı (kazanç ve kayıplar) 3 süreç şeklinde tanımlanır, bunlar 1) dışarıdan enerji alımı (S_{in}), 2) enerji kaybı (S_{ds}) ve 3) lineer olmayan dalga-dalga etkileşiminden dolayı spektrumdaki enerjinin değişimi (S_{nl}) dir.

3.2 Rüzgar Dalgası Gelişimi

Dalga alanına enerji transferi rüzgar tarafından uygulanan yüzey gerilmesi ile gerçekleşir ve yaklaşık olarak rüzgar hızının karesi ile değişir. Bundan dolayı, rüzgar verilerindeki bir hata dalga enerjisinde ve parametrelerinde (belirgin dalga yüksekliği gibi) çok büyük hatalara neden olmaktadır.

Rüzgar dalgalarının gelişimi, rüzgarın sakin durumdaki deniz üzerinde esmesinden sonra iki aşama olarak düşünülebilir. Su üzerindeki hava akımındaki türbülans ile beraber ufak basınç değişimleri, deniz yüzeyinde ufak tedirginliklerin oluşmasında etkili olmaktadır ve sonraki lineer gelişimi sağlamaktadır. Bu mekanizma Philips'in rezonans mekanizması olarak bilinir.

Gelişmenin büyük kısmı, dalgacık boyutlarının üzerindeki hava akımından etkilenmeye başladığı düzeye ulaşması ile başlamaktadır. Rüzgar, dalganın büyüklüğüne bağlı olarak dalgayı itmeye ve direnç uygulamaya başlar.

Bu gelişme genelde kayma akım stabilitesizliği (shear flow instability) ile açıklanmaktadır. Buna göre hava akımı krette emilir ve çukurlarda itilir. Miles (1957) tarafından kullanışlı bir teori sunulmuştur. Bu teoriye göre gelişimin oranı, deniz koşullarına bağlı olarak eksponansiyeldir. Bu genellikle dalga enerji spektrumu bileşenlerinin terimlerinde tanımlanmaktadır.

Miles (1960)'da verilen ifade,

$$E(f,\theta)=\frac{k}{4\pi f\rho_w{}^2\mu g}P(k,f)\left(e^{2\pi ft\mu}-1\right) \tag{3.1}$$

veya

$$S_{in}(f,\theta)=\frac{\delta E(f,\theta)}{\delta t}=2\pi f\mu E(f,\theta)$$

şeklindedir. Burada; $E(f,\theta)$ frekans-yön bileşeni, k dalga numarası, $P(k,f)$ dalga nedenli türbülans spektrumu, μ birleşim katsayısı, g yerçekimi ivmesi, ρ_w ise suyun özgül kütlesini göstermektedir. Miles tarafından tahmin edilen gelişim oranları laboratuvar ve saha çalışmalarında gözlemlenen gelişim oranlarından küçüktür. Saha çalışmalarına dayanarak, Snyder ve Cox (1966) ifadeyi daha basit bir formda önermiştir:

$$\mu=\frac{\rho_a}{\rho_w}\left[\frac{u}{c}\cos(\theta-\psi)-1\right] \tag{3.2}$$

burada c üremekte olan bileşenin faz hızını, θ faz açısını, ψ ve u rüzgarın yönünü ve hızını, ρ_a ise havanın özgül kütlesini göstermektedir.

1974'te Bahama'larda yapılan ölçümler sonucunda Snyder vd. (1981) tarafından bir revizyon teklif edilmiştir. Bu ifade aşağıdaki gibidir.

$$S_{in}(f,\theta)=E(f,\theta)\max\left[0,K_1 2\pi f\frac{\rho_a}{\rho_w}\left(\frac{U_5}{c}\cos(\theta-\psi)-1\right)\right] \tag{3.3}$$

Çalışmada rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik 5 m dir. Rüzgar değerlerinin kayma hızı ile verilmesi daha uygun olabilmektedir.

$$u_*=\sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}}=u\sqrt{C_d} \tag{3.4}$$

burada τ rüzgar gerilmesini ve C_d direnç katsayısını göstermektedir.

Komen vd. (1984) ifadeyi benzer formda,

$$S_{in}(f,\theta) = E(f,\theta) \max\left[0, K_1 \frac{\rho_a}{\rho_w} 2\pi f \left(K_2 \frac{u_*}{c} \cos(\theta - \psi) - 1 \right)\right] \quad (3.5)$$

olarak vermiştir. K_1 (≈ 0.25) ve K_2 (≈ 0.28) sabitleri bu terimlerin belirlenmesinde bazı esnekliklere izin vermektedir.

Daha sonraki çalışmalar deniz yüzeyi üzerindeki aerodinamik direncin dalga koşullarına bağlı olduğunu göstermiştir. Janssen (1991) ve Jenkins (1992), kullandıkları yarı lineer teori ile direnç katsayısının c_p/u_* ile tanımlanan dalga gelişim parametresine (wave age parameter) bağlı olduğunu göstermiştir. Burada c_p gerçek dalga spektrumunun pik frekansının faz hızını göstermektedir. Bu teoriler aerodinamik direncin ve dalgaların gelişim oranının, yeni gelişmekte olan rüzgar dalgaları için (young wind sea) daha fazla gelişmiş rüzgar dalgalarından (old wind sea) daha fazla olduğunu göstermektedir.

Dalga gelişimi için çok sayıda veri seti kullanılarak elde edilen bir çok ampirik ifade mevcuttur. Bu çalışmalarda rüzgar alanının bilinen özelliklerinden (rüzgar hızı ve yönü, feç ve süre) net dalga gelişimi verilmiştir. Bu ifadelerin sunumunda, tüm değişkenler boyutsuzlaştırıldığında kıyaslamalar basitleşmektedir (WMO, 1998).

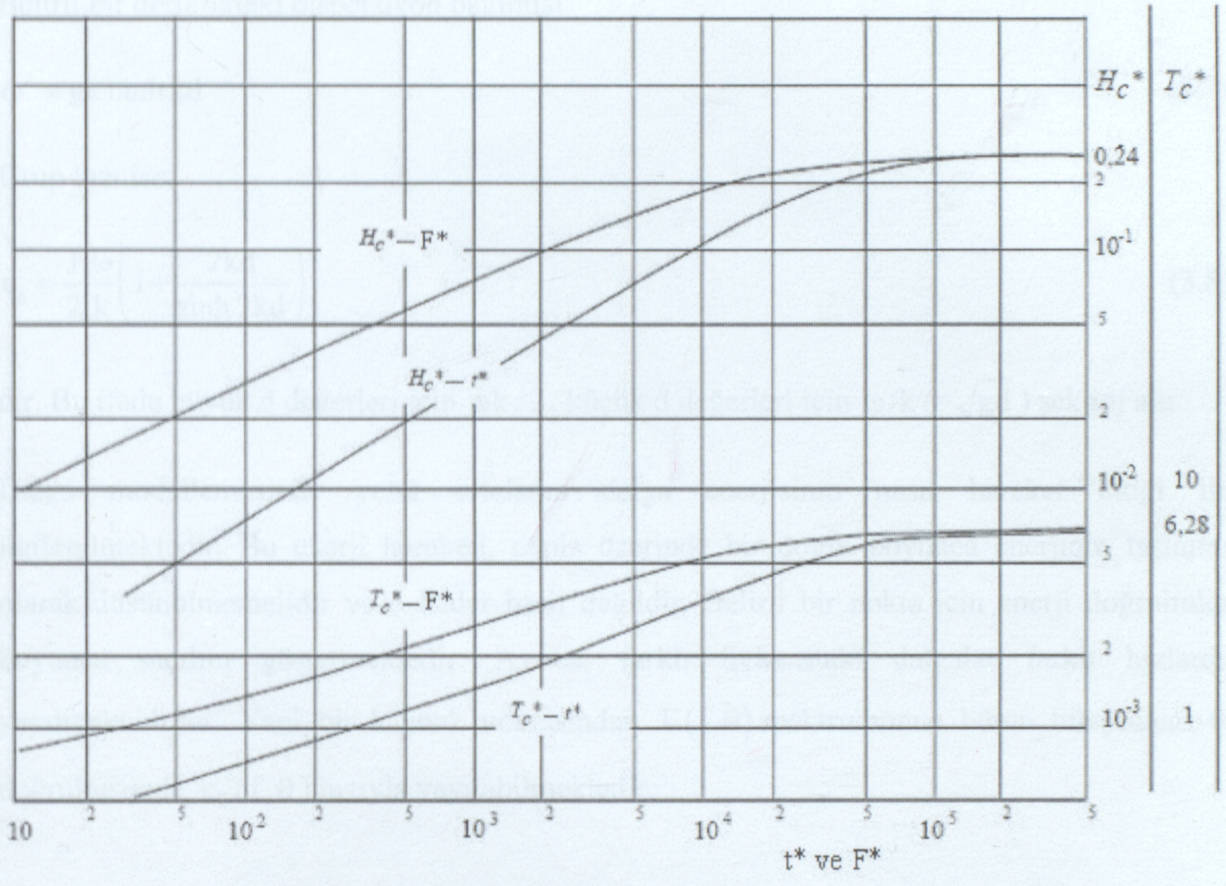
Pik frekans	$f_p^* = uf_p / g$
Feç	$F^* = gF / u^2$
Süre	$t^* = gt / u$
Yükseklik	$H^* = gH / u^2$
Enerji	$E^* = Eg^2 / u^4$ vb.

Örneğin, JONSWAP 1973 verilerinde, spektrumun pik frekansı f_p^* ve toplam enerjisi E^*, feçle (F) ve 10 m yükseklikteki rüzgar hızı ile ilişkilidir.

$$f_p^* = 3.5F^{*-0.33}, \quad E^* = 1.6\times10^{-7}F^* \quad (3.6)$$

Bu ampirik ilişkilerin kullanışlı grafik gösterimleri 1940'ların ortasından sonra elde edilmiştir. Sverdrup ve Munk (1947) ve Pierson-Numan-James (1955) eğrileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ilişkilerin derinliğide hesaba katması gerekmektedir. Dalga gelişimi derinlikten etkilendiği için derin deniz için olan grafikler sığ su dalgalarını olduğundan fazla hesaplamaktadırlar.

Dalga tahmin grafikleri; verilen rüzgar hızı, feç mesafesi ve rüzgar esme süresini kullanarak dalga yüksekliği ve periyodunun hesabında kullanılmaktadır. Sığ su için bu eğriler sığlaşma ve sapma etkilerini de içermektedirler. Şekil 3.1'de boyutsuz bir grafik görülmektedir.



Şekil 3.1 Dalga tahmininde kullanılan basit bir diyagram. (Gröen ve Dorrestein, 1976).

Gröen ve Dorrestein (1976) tarafından verilen bu grafikte feç ve süreden faydalanılarak karakteristik dalga yüksekliği ve periyodu bulunabilmektedir (H_c ve T_c).

Bu yöntemler genellikle gelişen rüzgar dalgalarının tahmininde kullanılmaktadır. Fakat rüzgar durduğunda ve dalgalar üreme bölgesinin dışına çıktığında oluşan dalgalar soluğan olarak isimlendirilir. Bu dalgalar düzgün tepeli ve uzun kretlidirler.

3.3 Dalga Yayılması

Su yüzeyi üzerinde oluşan tedirginlik ürediği noktadan itibaren hareket etmeye başlar. Periyodu T ve uzunluğu L olan bir dalga katarı için dalga hızı (faz hızı) c=L/T dir. Dalga hızı aynı zamanda ω/k şeklinde de yazılabilir. Burada ω açısal frekans ($2\pi f$) ve k dalga numarasıdır ($2\pi/L$). Dalga enerjisi dalga grup hızıyla yayılmaktadır ve bu hız dalga faz

hızından farklıdır. Derin suda dispersiv dalgalar için grup hızı (c_g) faz hızının yarısı kadardır. Çok sığ sularda, dalgalar dispersiv değildir, akışkanın davranışında deniz tabanı etkili olmaktadır ve dalga grup hızı dalga faz hızına eşit olmaktadır.

Belirli bir derinlikteki dispersiyon bağıntısı

$$\omega^2 = gk \tanh kd \tag{3.7}$$

Grup hızı ise,

$$c_g = \frac{1}{2}\frac{\omega}{k}\left(1+\frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \tag{3.8}$$

dir. Bu ifade büyük d değerleri için $\omega k/2$, küçük d değerleri için ω/k $(=\sqrt{gd})$ şeklini alır.

Dalga modellemesinde yerel ortalama dalga enerjisinin nasıl hareket ettiği ile ilgilenilmektedir. Bu enerji hareketi, deniz üzerinde bir doğru boyunca enerjinin taşınımı olarak düşünülmemelidir ve o kadar basit değildir. Belirli bir nokta için enerji doğrultular boyunca saçılım göstermektedir. Ayrıca, farklı frekanstaki dalgalar farklı hızlarda yayılmaktadırlar. Yani bir kaynak noktasından $E(f,\theta)$ spektrumunun bütün bileşenleri θ doğrultusunda, $c_g(f,\theta)$ hızıyla yayılabilmektedir.

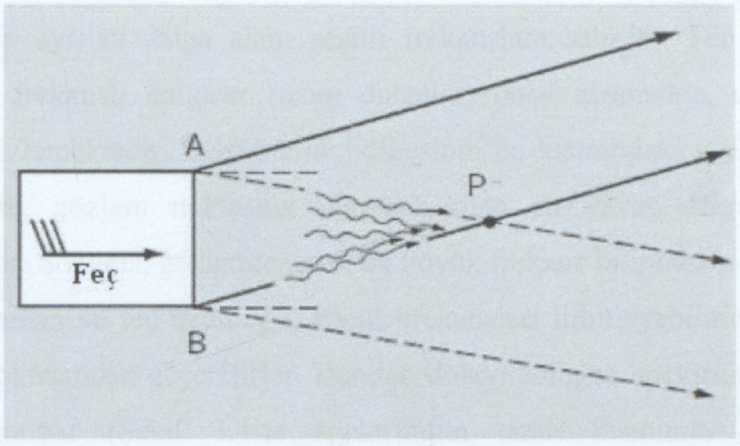
3.3.1 Açısal Saçılım (Angular Spreading)

Rüzgar-dalga dağılımının yönsel kısmının $\cos^2(\theta-\varphi)$ formuna sahip olması sıklıkla yapılan bir yaklaşımdır. Burada φ dalganın hakim yönünü ve θ ilgilenilen spektrum bileşeninin yönünü göstermektedir. Sapma olan açılarda, az miktarda enerji taşınır ve ortalama yöne dik yayılan enerji ihmal edilebilir. Yönsel dağılım için gözlemlere dayanan bir çok formülasyon mevcuttur. Mitsuyasu vd. (1975) ve Hasselmann vd. (1980), $\cos^{2s}(\theta-\varphi)/2$ formunu kullanmışlar ve s için frekansın pik frekansa oranına bağlı olarak fonksiyonel bir form vermişlerdir. Bu ifadeler en az saçılımın pik spektrumda olduğunu daha küçük ve büyük spektrumlarda saçılımın arttığını göstermektedir.

Üreme bölgesinden uzaklaşan dalgalar (örn. soluğan dalgaları) açısal saçılma ile küçülürler. Sayısal modeller spektrumu bileşenlere ayırarak ve her bir bileşeni bağımsız olarak hesaplayarak bu etkiyi otomatik olarak hesaba katmaktadırlar. Elle çözüm yöntemleri ise kullanıcının müdahalesine gerek duymaktadır. Açısal saçılım ve dispersiyon faktörleri

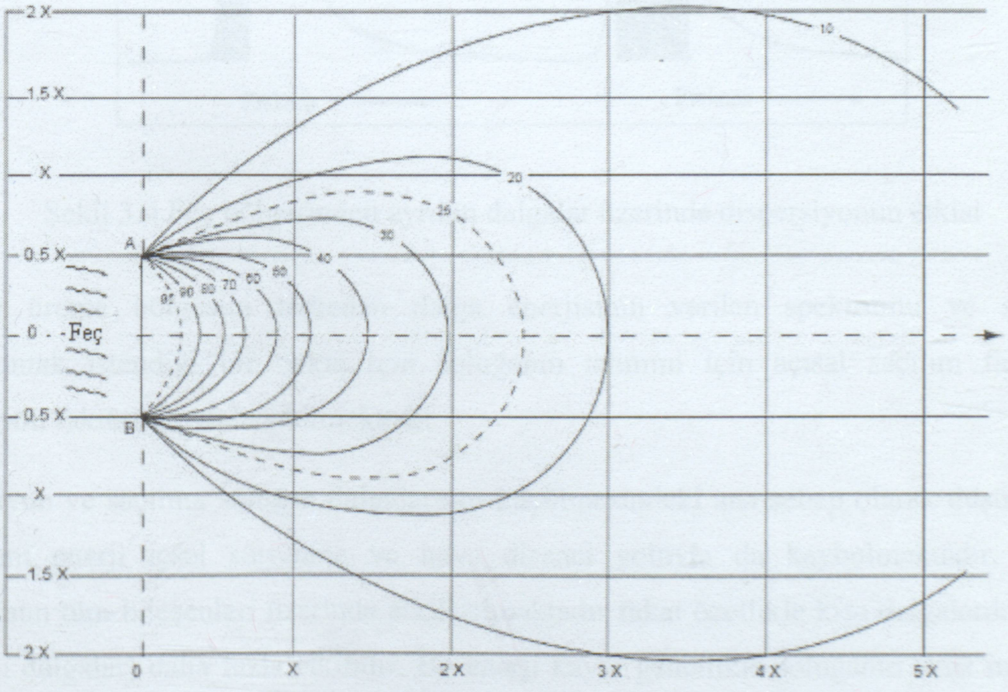
mutlaka dikkate alınmalıdır.

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi P noktası feç boyunca tüm noktalardan dalga enerjisini alacaktır. Tüm katkıların toplamının hesaplanması mümkündür.



Şekil 3.2 AB'deki fırtınadan kaynaklı soluğan dalgasının muhtemel yönleri ve P noktasına etkisi

Feç tarafındaki enerjinin kosinüs-kare dağılımı için sonuçlar Şekil 3.3'te görülmektedir. Herhangi sabit bir frekans için diyagramdaki eğriler ulaşılan noktalardaki dalga enerjilerinin yüzdelerini göstermektedir. Bu değerler açısal saçılım faktörleridir.

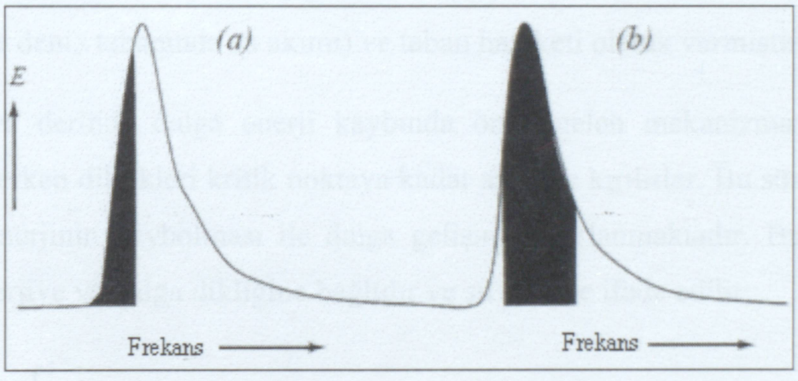


Şekil 3.3 Soluğan enerjisi için açısal saçılım faktörleri

Açısal saçılmadan dolayı dalga yüksekliğindeki azalma bu faktörün karekökü ile değişmektedir. Bu yükseklikler soluğan dalgasının ulaşabileceği en büyük yüksekliklerdir.

3.3.2 Dispersiyon

Üreme bölgesinden ayrılan dalga alanı çeşitli frekanslara sahiptir. Feç bölgesinden uzak mesafelere küçük frekanslı dalgalar (uzun dalgalar) önce ulaşmakta, onları daha büyük frekanslı dalgalar izlemektedir. Eğer üreme bölgesinin ön kısmındaki spektrum Şekil 3.4'de görüldüğü gibi ise, gözlem noktasına ulaşacak olan en yavaş dalganın hızı kolayca belirlenebilmektedir. Sonuçta, gözlemlenecek en büyük frekans bilinmektedir. Benzer şekilde, üremenin bittiği zaman ve feç uzunluğu, küçük frekansları limitleyebilmektedir: Bütün hızlı dalgalar gözlem noktasından geçebilirler. Bundan dolayı soluğan spektrumu frekansların dar bandında sınırlanmıştır (Şekil 3.4'te spektrumun taralı kısmında gösterilen bölge). Spektrumun taralı kısmı gözlem noktasında beklenen maksimum bölgedir. Bu alanın spektrumun altındaki tüm alana oranı dalga-enerji dispersiyon faktörü olarak isimlendirilir.



Şekil 3.4 Feç bölgesinden ayrılan dalgalar üzerinde dispersiyonun etkisi

Böylece üreme bölgesini terkeden dalga enerjisinin verilen spektrumu ve soluğanın hesaplanmak istendiği bir nokta için soluğanın tahmini için açısal saçılım faktörü ve dispersiyon faktörü hesaplanabilmektedir.

Dispersiyon ve saçılma soluğan dalgalarının küçülmesindeki ana sebep olarak düşünülebilir. Bir kısım enerji içsel sürtünme ve hava direnci yoluyla da kaybolmaktadır. Bu etki spektrumun tüm bileşenleri üzerinde etkili olmaktadır fakat özellikle kısa dalgalarda (yüksek frekanslı dalgalar) daha fazla etkilidir. Bu enerji kaybı genellikle soluğanın uzak mesafelere yayılabilmesini sağlayacak şekilde yeterince küçüktür.

Soluğan dalgalarının spektrumu dar olmaktadır. Büyük üreme bölgelerine yakın noktalar için

daha gerideki daha hızlı dalgalar ön taraftaki daha yavaş dalgalarla etkişebilirler. Bu durum oldukça geniş bir spektrum ortaya çıkarabilir.

Dalga yayılmasında diğer bir düşünce ise derinlik ve akıntıdır. Adveksiyon denkleminde sığlaşma ve sapmanın hesaba katılması çok zor bir iş değildir. Operasyonel modelleme için akıntı etkisi genelde hesaba katılmamaktadır. Komen vd. (1994)'de dalga tahminin kalitesi için akıntının etkisini dalga tahmin modelinde hesaba katılmasının hesap zamanını arttıran diğer faktörler ile karşılaştırıldığında çok daha önemsiz olduğu belirtilmiştir.

3.4 Enerji Kaybı (Dissipation)

Dalga enerjisi üç farklı süreç ile kayba uğrayabilmektedir. Bunlar; köpüklenme, dalga-taban etkileşimi ve dalga kırılmasıdır. Dalga kırılması dalga yüksekliği ve su derinliğinin hemen hemen aynı mertebelerde olduğu oldukça sığ su koşullarında görülmektedir (Battjes ve Janssen, 1978). Dalga-taban etkileşiminden dolayı dalga enerjisinin kaybı bir çok mekanizmayı içerebilmektedir. Shemdin vd. (1978) bu mekanizmaları taban sürtünmesi, sızma (kumda ve deniz tabanında su akımı) ve taban hareketi olarak vermiştir.

Açık denizde ve derinde dalga enerji kaybında önde gelen mekanizma köpüklenmedir. Dalgalar gelişirlerken diklikleri kritik noktaya kadar artar ve kırılırlar. Bu süreç büyük oranda non-lineerdir. Enerjinin kaybolması ile dalga gelişimi sınırlanmaktadır. Bu kayıp dalganın sahip olduğu enerjiye ve dalga dikliğine bağlıdır ve şu şekilde ifade edilir;

$$S_{ds}(f,\theta) = -\psi(E)\frac{f^2}{\bar{f}}E(f,\theta) \tag{3.9}$$

burada, $\psi(E)$ entegre spektruma (E) ait bir özelliktir. ψ, dalga diklik parametresinin bir fonksiyonu olarak da ifade edilebilmektedir ($\xi = E\bar{f}^4/g^2$, $\bar{f}$: ortalama frekans).

Elle çözüm yöntemlerindeki dalga hesaplarında enerji kaybı süreçleri için özel bir dikkat göstermeye ihtiyaç olmamaktadır. Genellikle kullanılan eğriler bu etkileri içermektedirler. Soluğan dalgaları az da olsa bu süreçten etkilenirler fakat oldukça ufak bir etkidir. Soluğan dalgaları büyük ölçüde dispersiyon ve açısal saçılım etkisi ile azalmaktadırlar.

3.5 Lineer Olmayan Etkileşimler

Basit sinüzoidal dalgalar veya dalga bileşenleri lineer dalgalar olarak bilinirler. Bu bir

yaklaşımdır. Olayı kontrol eden denklemler daha detaylı analizler gerektirmektedir. Teori dalgaların fazla dik olmama koşulunu gerektirse de basit lineer olmayan dalga etkileşimi dalga spektrumunun gelişiminde çok önemli olarak gösterilmektedir.

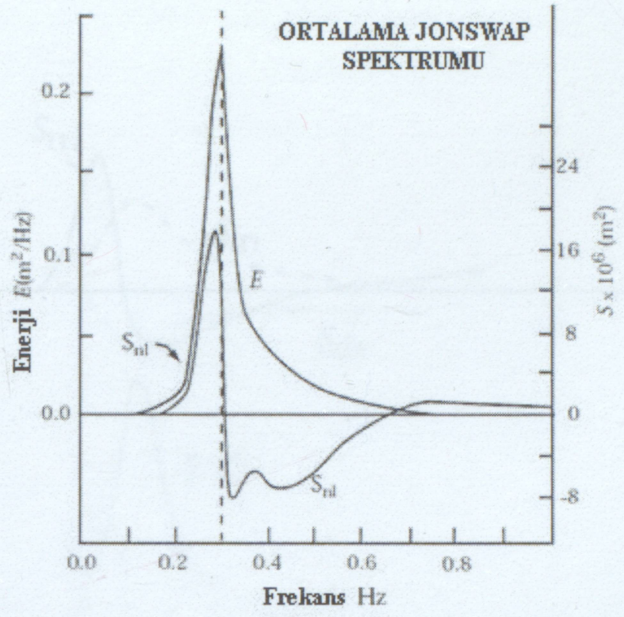
Bu basit lineer olmayan, resonant, dalga-dalga etkileşimi farklı frekanstaki dalgalar arasında enerji transferini ve spektrumun şeklinin karakteristiklerini muhafaza eden bir çok yol ile spektrum içinde enerjinin yeniden dağıtılmasını sağlamaktadır. Bu süreç içsel bir süreçtir ve dalga alanındaki genel enerjide herhangi bir değişiklik ile sonuçlanmamaktadır.

Dalgalar arasında transfere izin veren bu rezonans, koşulların birbirine eklenmesiyle tanımlanabilir, etkileşen dalgaların frekansları ve dalga numaraları sıfıra kadar toplanmalıdır. Bu durum ilk olarak dalga enerjisinde pertürbasyon analizinin üçüncü mertebesinde meydana gelmektedir (Hasselmann, 1962) ve enerji transferini tanımlayan integraller karmaşık üç katlı integrallerdir:

$$\begin{aligned} S_{nl}(f,\theta) = f \iiint & dk_1 dk_2 dk_3 \\ & \delta(k_1 + k_2 - k_3 - k) \\ & \left[n_1 n_2 (n_3 + n) - n_3 n (n_1 + n_2)\right] \\ & K(k_1, k_2, k_3, k_4). \end{aligned} \tag{3.10}$$

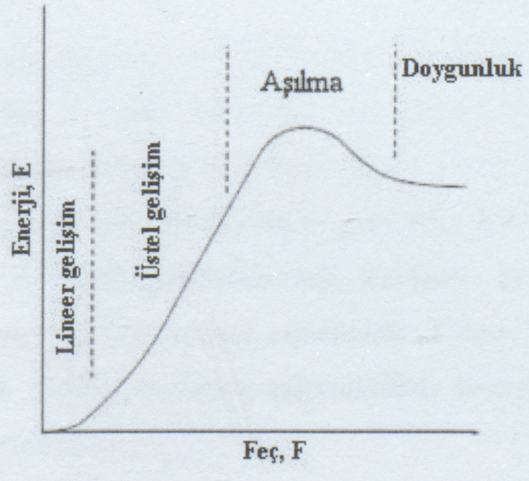
Bu integralde, δ fonksiyonu rezonans koşullarını gerçekleştirir, i=1, 2, 3 için (f_i, k_i) etkileşen dalga bileşenleri için frekans ve dalga numarası çiftleridir, $n_i = E(f_i\theta_i)/f_i$ dalga hareket yoğunlukları ve Kernel fonksiyonu (K) ise etkileşen dalga bileşenlerinin tüm kombinasyonlarından k (veya (f,θ))'ya kadar enerji transferinin büyüklüğünü vermektedir.

Bu etkileşim sürecinin rüzgar dalgasının gelişimi sırasında pik frekanstaki küçülmenin nedeni olduğuna inanılmaktadır. Şekil 3.5, ortalama JONSWAP spektrumu tarafından verilen ve bir enerji dağılımı $(E(f_i,\theta_i))$ ile bir rüzgar dalgası için hesaplanan lineer olmayan enerji fonksiyonunu $(S_{nl}(f))$ göstermektedir.

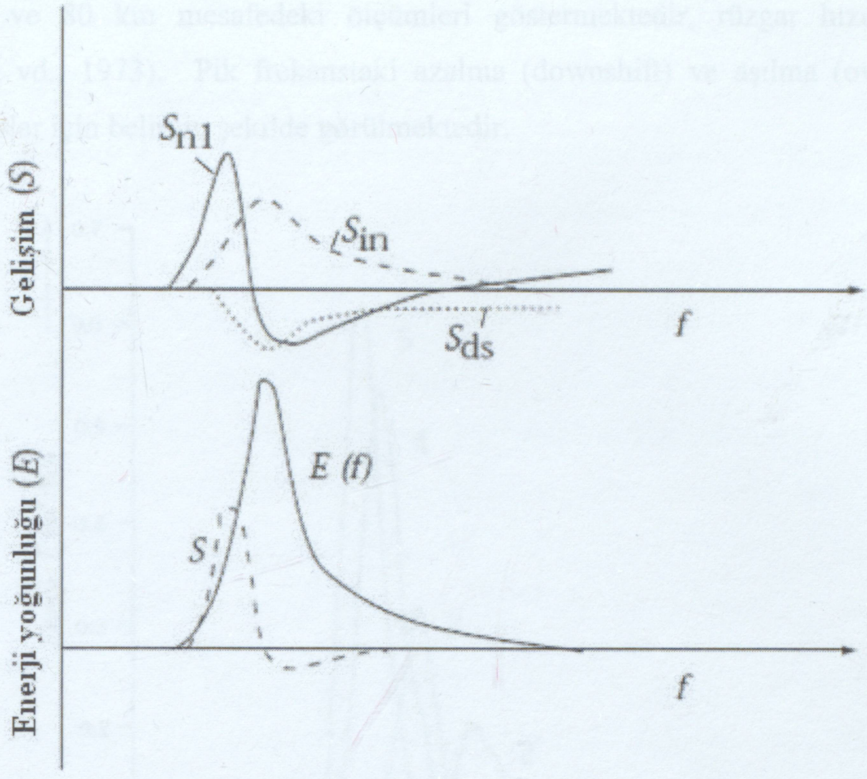


Şekil 3.5 Ortalama Jonswap spektrumu (E) için bir frekans fonksiyonu olarak lineer olmayan dalga etkileşimi (S_{nl}) ile gelişim

Lineer olmayan dalga- dalga etkileşiminin bir diğer özelliği ise "aşılma (overshoot)" olayıdır. Pik yakınlarında, verilen bir frekans için gelişime lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi ile etkin olunur. Rüzgar dalgası geliştikçe pik frekans azalmaktadır. Frekans (f_e), rüzgar kuvvetinden dolayı gelişme, biraz lineer olmayan etkileşim ve bir miktar enerji kaybından dolayı ilk defa pik frekansın oldukça altında olacaktır. Pik değer daha düşük olduğunda ve f_e'ye yaklaştığında f_e'deki enerji lineer olmayan dalga etkileşiminden çok sayıda parametrenin etkisinin altında kalmaktadır. Bu olay Şekil 3.5 ve 3.7 de görülmektedir, S yada S_{nl} pikin altında bir değerdedir.



Şekil 3.6 Artan feç boyunca sabit frekanslı dalga enerjisinin gelişimi (WMO, 1998)



Şekil 3.7 Spektruma ait enerji gelişim yapısı (WMO, 1998)

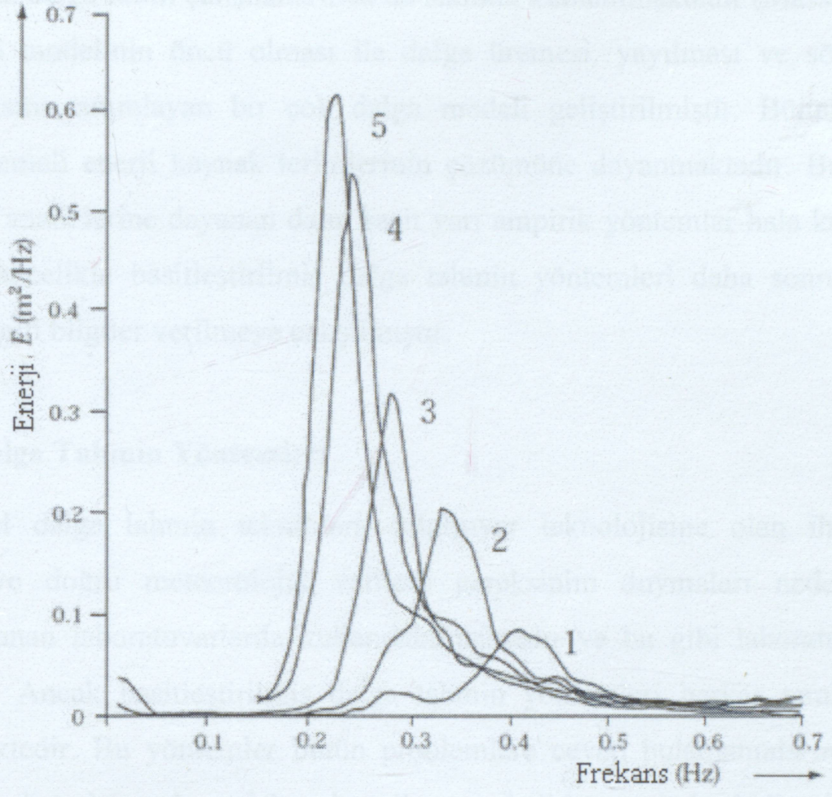
Şekil 3.6'da ise verilen bir frekansta enerji yoğunluğunun feç boyunca gelişimi görülmektedir.

Denklem 3.10'da görülen integralin çözümü çok uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir ve dalga modellerinde bu şekli ile kullanılması pratik değildir. Son zamanlarda bazı integre tekniklerinin kullanılması ve basitleştirmeler kabul edilebilir yaklaşımlar ile integralin çözümünü mümkün kılmaktadır. Bu hesaplama yöntemi lineer olmayan kaynak terimlerini hesaplayan üçüncü nesil dalga modellerinin gelişimini mümkün kılmıştır.

Şonuç olarak, genel kaynak terimleri $S_t=S_{in}+S_{ds}+S_{nl}$ 'dir. Yönsel karakteristiklerin ihmal edilmesi ile S_t için Şekil 3.7'deki diyagram oluşturulabilmektedir. Şekil dikkatlice incelendiğinde çeşitli süreçlerin farklı frekanslarda rölatif önemi hakkında fikir vermektedir. Spektrumun pik frekansı civarındaki frekanslarda gelişimde lineer olmayan transferin etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca, pik frakanstan pik frekansın iki katı kadar olan kısımda gelişimde doğrudan atmosfer etkileri önemli olmaktadır. Lineer olmayan terim bu enerjiyi büyük ölçüde daha küçük frekans aralığına taşımaktadır. Enerji kayıp terimi ise orta ve yüksek frekans aralığında etkilidir.

JONSWAP çalışması sırasında ölçülen spektrum setleri ile feç boyunca bir frekans spektrumunun gelişimi Şekil 3.8'de görülmektedir. 1-5 spektrumları sıra ile açık denizde 9.5,

20, 37, 52 ve 80 km mesafedeki ölçümleri göstermektedir, rüzgar hızı ise 7m/s'dir (Hasselmann vd., 1973). Pik frekanstaki azalma (downshift) ve aşılma (oveshoot) etkisi bütün frekanslar için belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 3.8 Frekans spektrumunun feç boyunca gelişimi

Bir çok dalga modelinde teorik-ampirik karışım, modelde bazı ayarlamalar yapmaya izin vermektedir. Bu aynı zamanda gride, sınır konfigürasyonuna, rüzgar verilerinin tipine, zaman adımına, derinliğin etkisine, mümkün olan bilgisayar gücüne vb. bağlıdır. Diğer taraftan elle çözüm yöntemleri herhangi bir değişiklik yapılmadan her yerde uygulanabilmektedir.

Elle çözüm yöntemlerinde, rüzgar dalgası ve soluğan arasındaki ayrım önemlidir ve hesap aşamasının en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bütün hesaplar için spektrum bileşenlerini kullanan sayısal modeller için ise soluğanın tanımlanması isteğe bağlıdır.

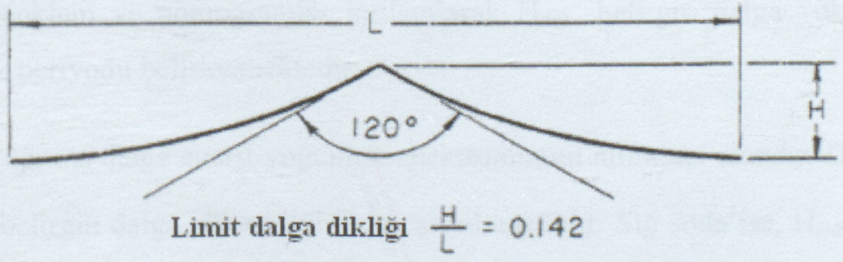
4. DALGA TAHMİN YÖNTEMLERİ

Yaklaşık kırk yıldır, rüzgar nedenli sayısal dalga modellerinin gemi rotalarının belirlenmesi ve açık deniz teknolojisi gibi konularda oldukça faydalı oldukları gözlemlenmekte bunun yanı sıra son yıllarda dalga iklim çalışmalarında da sıklıkla kullanılmaktadır (Massel, 1996). Gelci vd. (1957)'nin modelinin öncü olması ile dalga üremesi, yayılması ve sönümlenmesinin karmaşık yapısını tanımlayan bir çok dalga modeli geliştirilmiştir. Bütün sayısal dalga modellerinin temeli enerji kaynak terimlerinin çözümüne dayanmaktadır. Bu yaklaşımların dışında, boyut analizlerine dayanan daha basit yarı ampirik yöntemler hala kullanılmaktadır. Bu bölümde öncelikle basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri daha sonra sayısal dalga modelleri ile ilgili bilgiler verilmeye çalışılmıştır.

4.1 Basit Dalga Tahmin Yöntemleri

En mükemmel dalga tahmin teknikleri, bilgisayar teknolojisine olan ihtiyaç, modelin karmaşıklığı ve doğru meteorolojik verilere gereksinim duymaları nedeniyle gelişmiş olanakları bulunan laboratuvarlarda kullanılabilmektedir ve bu gibi laboratuvarların sayısı oldukça azdır. Ancak basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemleri herkes tarafından kolayca kullanılabilmektedir. Bu yöntemler bütün problemlere cevap bulamamalarına rağmen bazı tasarım çalışmaları için olası dalga koşullarının belirlenmesinde kullanılabilmektedirler (SPM, 1984).

Dalga kayıtlarından, özellikle daha dik dalgalar için, dalgaların teoride kabul edildiği gibi sabit periyot ve yüksekliğe sahip olmadıkları görülmektedir. Dalga boyları ve dalga yaklaşım doğrultuları da aynı şekilde değişkendir. Ayrıca, sığ suda kırılma bölgesinde veya herhangi bir derinlikteki dik dalgaların profilleri değişmekte, daha dar kretli ve geniş düzgün çukurlu bir görünüme sahip olmaktadırlar (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Derin suda limit dalga dikliği

Doğadaki dalgalar gerçekte çok daha karmaşık olduklarından dolayı daha ideal hale getirmek

için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bunun için belirgin dalga yüksekliği ve periyodu kavramları tanımlamıştır.

Belirgin dalga yüksekliği ve periyodu, gerçek deniz karakteristiklerinin daha düzenli formda gösterilmeleri için tanımlanmış parametrelerdir. Bu değerler bir çok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Bu yaklaşım bazı problemler için uygun ve kullanışlı olmaktadır fakat tamamiyle tatmin edici değildir. Belirgin dalga kavramının kullanılabilmesi için dalga gözlemlerinden yükseklik ve periyot parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Munk (1944), belirgin dalga yüksekliğini en yüksek 1/3 dalganın yüksekliklerinin ortalaması şeklinde tanımlamıştır ve $H_{1/3}$ ya da H_s ile göstermiştir. Belirgin dalga periyodu ise $T_{1/3}$ ya da T_s ile gösterilir ve dalga kaydındaki en yüksek 1/3 dalganın periyotlarının ortalaması olarak tanımlanmaktadır.

Dalga gelişimi ile ilgili, görsel olarak elde edilen bir çok veri setinin kullanılması ile geliştirilmiş çok sayıda ampirik formül mevcuttur. Ayrıca daha güncel olan ve dalga ölçümlerine dayanan ifadeler de bulunmaktadır. Bu ifadeler ile rüzgar alanının bilinen özelliklerinden (rüzgar hızı ve yönü, feç ve süre) net dalga gelişimi elde edilebilmektedir.

Görsel olarak elde edilen ve cihazlar yardımı ile gözlenen dalga yükseklikleri ve periyotları arasında doğal olarak farklılıklar olmaktadır ve bu fark dalga tahminine de etki etmektedir. Görsel değerler ölçüm değerlerinden daha düşük olmaktadırlar. Bir çok ampirik ilişkinin kullanışlı grafik sunumları 1940'lı yılların ortalarından beri var olmaktadır.

Dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga ilerleme doğrultusunun tahmin edilmesi için kullanılan en kesin yöntem bir sayısal model kullanılarak bu parametrelerin belirlenmesidir. Ancak, genellikle hem kısıtlı zaman hem de yüksek maliyetinden dolayı model kullanılması her zaman mümkün olamamaktadır. Bu gibi durumlarda, basitleştirilmiş bir yöntemle hesap yapılması çok daha uygun olabilmektedir. Bu yöntemler ile verilen rüzgar hızı, feç ve süre için bir seri denklem ve nomogramlar kullanılarak H_{m0} belirgin dalga yüksekliği ve T_m spektrumun pik periyodu belirlenmektedir.

$H_{m0}=4\sqrt{m_0}$ olup, m_0 dalga enerji yoğunluk spektrumunun altındaki alandır. Derin suda H_{m0} hemen hemen belirgin dalga yüksekliği H_s'e eşit olmaktadır. Sığ suda ise, H_{m0}, H_s'den daha küçük olur. Hem sığ hem derin suda, H_{m0} dalga enerjisi ile ilişkilidir fakat aynı şey H_s için söylenemez.

Basitleştirilmiş yöntemler, feç mesafelerinin kısa olduğu (80–120 km) koşullarda

kullanılabilir ve rüzgarın feç boyunca sabit ve üniform olduğu kabul edilir. Rüzgar koşullarının mesafe ya da zaman içinde aniden değiştiği durumlarda veya uzak mesafelerden bölgeye soluğan gelmesi durumunda en iyi çözüm yolu sayısal çözümdür.

Gelişmiş dalga tahmin yöntemleri oldukça fazla bilgisayar desteği ve doğru meteoroloji verileri gerektirmektedir. Modeller için gereken yüksek hesaplama ihtiyacı, basitleştirilmiş yöntemlerin kullanılması ile ihmal edilebilecek bir hata ile büyük ölçüde en aza indirilmektedir, fakat bazen dalga enerji ve frekans dağılımında belirgin bir kayıp görülebilmektedir. En yaygın olarak kullanılan yaklaşım, etkin rüzgar, türbülans ve dalga arasında denge durumuna olanak sağlayacak şekilde sürenin ve feçin yeterince uzun olduğunun kabul edilmesidir. Eğer bu koşul sağlanıyor ise, bütün diğer değişkenler rüzgar hızı ile belirlenebilmektedir.

Pierson ve Moskowitz (1964), denge spektrumu için tüm teorik kısıtlamaları sağlayan üç analitik ifade dikkate almıştır. Moskowitz (1964) bunlardan en uygun olanını şu şekilde vermiştir.

$$E(\omega)d\omega = \left(\alpha g^2 / \omega^5\right) e^{-\beta\left(\omega_0^4 / \omega^4\right)} d\omega \qquad (4.1)$$

burada,

$\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$ (boyutsuz sabit)

$\beta = 0.74$ (boyutsuz sabit)

$\omega_0 = g / U$

g = yerçekimi ivmesi

U = rüzgar hızı

ω =dikkate alınan dalga frekansı

Denklem (4.1), farklı formlarda da ifade edilebilmektedir. Bretschneider (1959, 1963) farklı α ve β değerleri ile bu ifadeyi eşitlik şeklinde vermiştir, benzer bir ifade Roll ve Fischer (1956)'da da verilmiştir. Dalganın rüzgar ile dengede olduğu koşul tam gelişmiş deniz (fully arisen sea) olarak isimlendirilir. Tam gelişmiş deniz için genel formun kabulü, toplam dalga enerjisi, belirgin dalga yüksekliği ve maksimum enerji periyodunun hesaplanmasına olanak sağlar. Rüzgar ve dalga arasında denge durumu nadiren görülmektedir ve daha büyük rüzgar hızlarında hiç görülmeyebilmektedir.

Daha genel bir model, rüzgar esmeye başladığında denizin sakin olduğu kabulü yapılarak

oluşturulabilir. Dalga gelişimini gösteren denklemlerin integrasyonu, artan feç ve süre ile spektrumun formunda meydana gelen değişikliklerin dikkate alınmasına olanak sağlamaktadır. Eğer yeterli sayıda rüzgar ve dalga verisi mevcut ise, ampirik veriler benzer bilgilerin sağlanması için analiz edilebilir.

Bu basitleştirilmiş dalga tahmin tasarıları, dikkate alınan dalgaların verilen süre için sabit hız ve doğrultuda esen rüzgarlardan dolayı oluştuğu kesin kabulüne dayanmaktadır.

Prensipte, tüm dalga katarlarının izlenmesi ile değişen rüzgar hızının bazı etkilerinin dikkate alınması mümkün olabilmektedir. Dalga bir kez üreme bölgesinden çıktığında ve soluğan meydana geldiğinde, dalga enerjisi dalga grup hızına bağlı olarak yayılacaktır. Bir noktadaki toplam enerji (belirgin dalga yüksekliğinin karesi ile orantılı olarak), tekil dalga katarlarındaki katkıların bu enerjiye eklenmesiyle elde edilebilmektedir. Bilgisayar desteği olmadan, bu işlem son derece zahmetli olup teorik olarak doğru değildir.

Daha pratik bir yöntem ise, bu tasarılardaki sınırlamaları daha azaltmaktadır. Böylece, rüzgar yönü bazı sınır değerlerden (örn., 30°) daha az değişiyor ise sabit kabul edilebilir. Rüzgar hızı ise ± 5 knot (2.5 m/s)'dan daha az değişiyor ise sabit kabul edilmektedir. Bu yöntemde, ortalama değerler kullanılır ve belirli bir süre feç alanı boyunca sabit kabul edilir.

Hasselman vd. (1973) aktif olarak gelişen denize ait spektrumun bir spektrum modeli ile oldukça iyi temsil edildiğini göstermiştir. Rüzgar dalgasının spektrum formu;

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi) f^5} e^a \gamma^b \tag{4.2}$$

ve

$$a = -\left[\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right]$$

$$b = \exp -\left[\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^{\,2}}\right]$$

olarak verilmiştir.

Burada, f_p spektrumun pik frekansı, ve α, σ ve γ hem gözlemlenen spektruma olan uyumu sağlamak için hem de boyutsuz feçin fonksiyonları olarak hesaplanan sabitlerdir (Hasselmann vd., 1973,1976). Bu formül JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) spektrum modeli olarak isimlendirilir. Çoğunlukla; parametrik analitik spektrum matematiksel analizler

gerektirdiğinde, bir tek pik spektrum bu forma uydurulur.

Benzer formüller rüzgar ve dalga gözlemlerinden ampirik olarak geliştirilebilmektedir. Bir ampirik-analitik yöntem Sverdrup ve Munk (1947) tarafından ilk geniş kapsamlı dalga tahmin sisteminde kullanılmıştır. Sverdrup-Munk eğrileri ampirik veriler kullanan Bretschneider (1952, 1958) tarafından revize edilmiştir. Bundan dolayı bu tahmin yöntemi SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) yöntemi olarak bilinmektedir. Sverdrup ve Munk (1947) ile Pierson, Neumann ve James (1955) (PNJ) tarafından geliştirilen eğriler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu iki yöntem de bir çok görsel verinin analizi ile çıkarılması açısından birbirleri ile benzerdirler. Ancak tanımladıkları dalga alanları açısından temel farklılıklar göstermektedirler. Daha eski olan SMB yöntemi, dalga alanını tanımlarken sadece dalga yüksekliği ve periyodunu ($H_{1/3}$, $T_{1/3}$) kullanmıştır, PNJ ise dalga alanını dalga spektrumu ile tanımlamaktadır. Deniz yüzeyinin tanımında çok daha karmaşık tanımlamalara izin vermesi PNJ yönteminin en büyük avantajıdır. En önemli dezavantajı ise hesaplamalarda zamana olan ihtiyacıdır (WMO, 1998).

Daha güncel bir grafik seti ise Gröen ve Dorrestein (1976) (GD) tarafından geliştirilmiştir. Bu eğriler bilinen rüzgar hızı, feç mesafesi ve süresi ile dalga yüksekliği ve periyodunu sapma ve sığlaşma etkilerinin de dikkate alınarak hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem belirgin dalga yüksekliği ve periyodundan ($H_{1/3}$ ve $T_{1/3}$) biraz daha büyük olan karakteristik dalga yüksekliği ve periyodunu (H_c ve T_c) içermektedir. Şekil 4.2'de derin deniz için GD eğrisi görülmektedir. Diyagramın sağ tarafında eğrilerin neredeyse yatay olduklarına dikkat edilmelidir. Bu durum sürenin ve feçin yeterince uzun olması halinde dalga gelişiminin durduğunu göstermektedir.

4.1.1 Soluğan Dalgalarının Hesabı

Daha pratik uygulama için olay iki farklı tipe ayrılmalıdır.

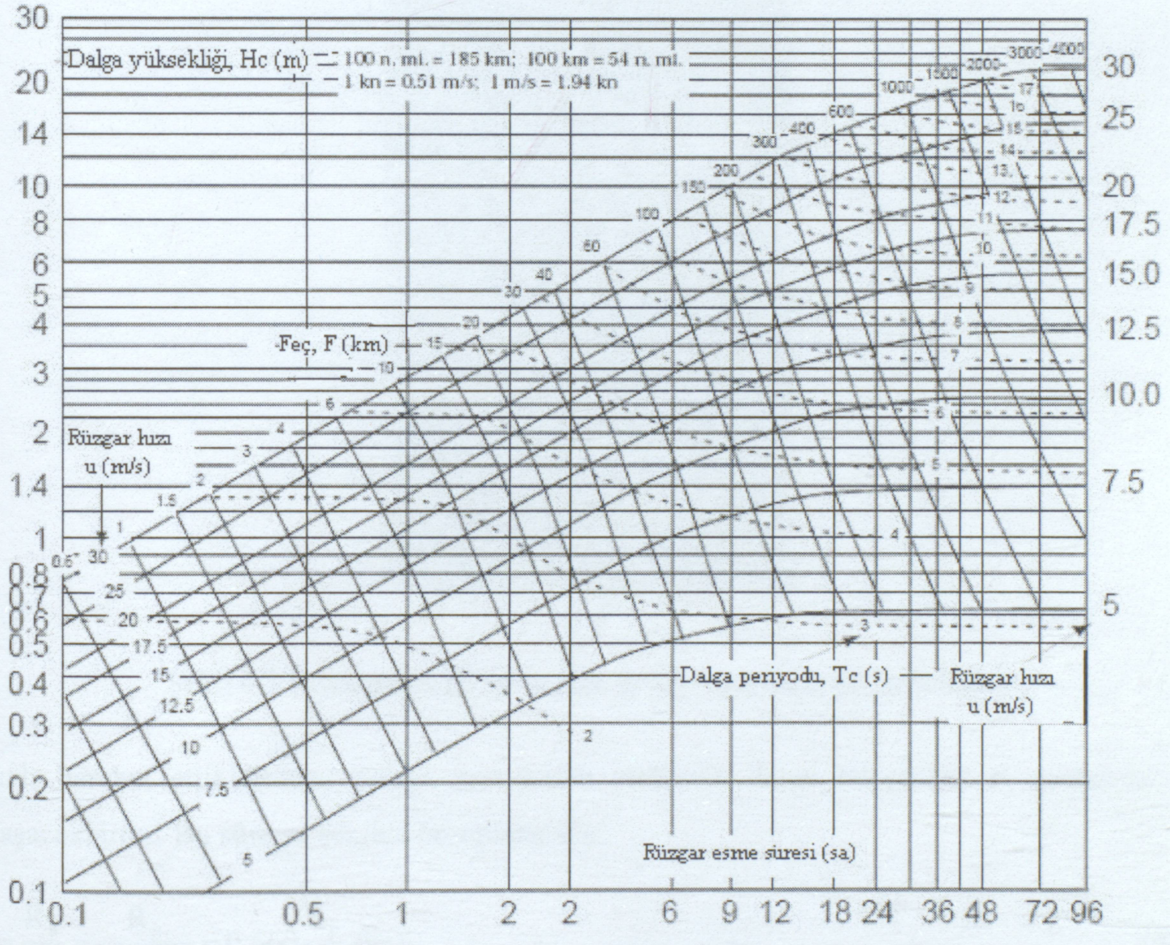
(a) *Uzak mesafedeki bir fırtınadan gözlem noktasına gelen soluğan* (1000 km ya da daha fazla). Bu durumda, bir çok soluğan tahmin çalışması için fırtınanın dalga üreme bölgesinin boyutları ihmal edilebilmektedir (fırtna bir nokta kaynak olarak düşünülür). Dikkate alınan en önemli etki dalga dispersiyonudur.

(b) *Yakındaki bir fırtınadan gözlem noktasına gelen soluğan.* Soluğan bir fırtına kenarı boyunca noktalardan yayılır. Bundan dolayı, dalga dispersiyonundan ayrı olarak saçılım da dikkate alınmalıdır.

Soluğan dalgasının hesaplanmasında, dalga enerjisinin yayılması ile ilgilenilmektedir. Bundan dolayı, her bir bileşenin grup hızı dikkate alınmalıdır. Dalga grup hızı;

$$c_g = \frac{c}{2} = \frac{1}{2}\frac{gT}{2\pi} \tag{4.3}$$

olarak verilmektedir.



Şekil 4.2 Dalga tahmin diyagramı (Gröen ve Dorrestein, 1976)

4.1.1.1 Uzak Mesafeli Fırtınalar

Uzak mesafeli fırtına durumunda, soluğan tahmini için yanıtlanması gereken sorular şunlardır.

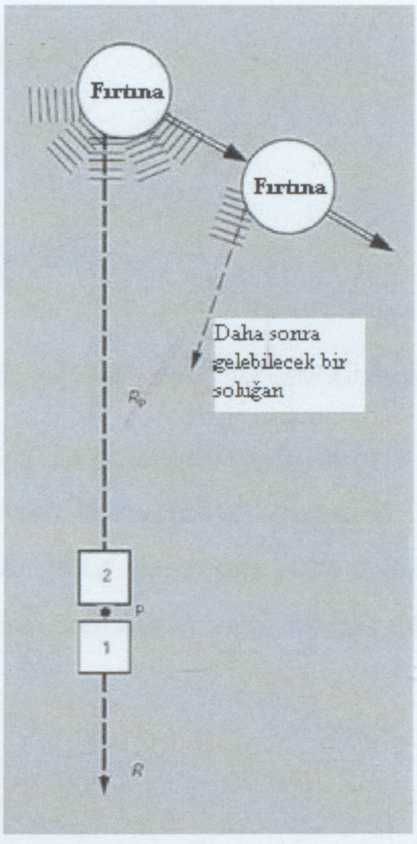
(a) Bir yönden gözlem noktasına ilk soluğan dalgası ne zaman gelecek?

(b) Herhangi bir zaman aralığında dalga periyodu aralığı nedir?

(c) Hangi boyda dalgalar bulunmaktadır?

(d) Soluğan dalgasının yüksekliği ne olabilir?

Başlangıçta bilinen veriler; fırtına bölgesinden P gözlem noktasına kadar mesafe, R_p (mil) , süre (D_p) ve fırtına bölgesindeki maksimum dalga periyodudur.



Şekil 4.3 Uzak mesafeli fırtınadan dolayı meydana gelen soluğan

Hızlı hareket ettiklerinden dolayı maksimum periyotlu dalga bileşenleri P noktasına ilk ulaşacaklardır. Bu süre şu şekilde hesaplanabilir,

$$t = \frac{R_p}{c_g} = \frac{R_p}{1.515T} = 0.660\frac{R_p}{T} \text{ (sa).} \qquad (4.4)$$

Bu bileşenler D_p saat süre boyunca gelmeye devam ederler ve daha sonra kaybolmaktadırlar. D_p hava haritalarından, verilen bölgedeki feçin ne kadar süreceğinin belirlenmesi ile elde edilmektedir. Bu arada, daha yavaş bileşenler gelmeye devam etmektedirler ve D_p saatin sonuna kadar bütün bileşenler dikkate alınmalıdır. En hızlı dalga bileşenleri kaybolmak üzere iken P noktasına gelmeye başlayan çok yavaş bir dalga bileşeni bulunmaktadır (Şekil 4.3'de 1 ve 2 kutuları). T_2 periyotlu yavaş bileşenin ilk dalgası (2 no'lu kutu) t saat boyunca hareket

etmektedir; T_1 periyotlu hızlı bileşenin son dalgası (1 no'lu kutu) D_p saat sonra başlamaktadır ve sonuçta $(t-D_p)$ saat süre boyunca hareket etmektedir. Böylece yavaş bileşen için,

$$T_2 = \frac{R_p}{1.515t} = 0.660\frac{R_p}{t} \text{ (s)} \tag{4.5}$$

hızlı bileşen için ise,

$$R_p = c_g(t - D_p) = 1.515T_1(t - D_p)$$

veya

$$T_1 = \frac{R_p}{1.515(t - D_p)} = 0.660\frac{R_p}{t - D_p} \text{ (s)} \tag{4.6}$$

elde edilmiş olur (R_p mil, t ve D_p ise saat olarak dikkate alınmıştır).

T_1 ve T_2, gözlem süresi boyunca P noktasında bulunabilecek olan dalgaların periyotları için limit değerlerdir. Bu aralıktaki bazı periyot değerleri gerçekte gözlemlenen dalga spektrumunda bulunmayabilirler, bileşenler fırtına alanı dışındaki uzun hareketleri sırasında kaybolabilmektedirler. Yukarıdaki denklemler ile olabilecek dalga frekans aralığı,

$$f_1 - f_2 = 1.515\frac{D_p}{R_p} \tag{4.7}$$

ile verilebilir.

Bu ifade ile gözlem noktasındaki dalga bileşenlerinin frekanslarının bant genişliği bu nokta için sabittir ve dalga üreme süresine (D_p) bağlıdır. Frekans bandı fırtına noktasından artan mesafe ile daralmaktadır. Sonuçta dalga dispersiyonunun bir sonucu olarak, soluğan dalgaları artan mesafe ile daha düzenli bir görünüme sahip olmaktadır.

4.1.1.2 Uzun Feçli Uzak Mesafeli Fırtınalar

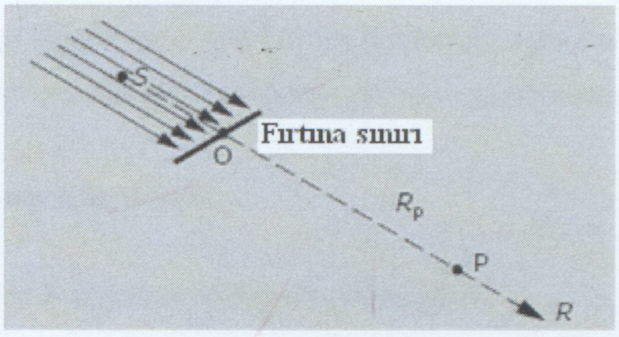
Uzun feçli ve uzak mesafeli bir fırtınada dalgaların tahmin edilmesi daha karmaşık bir durumdur. Çünkü, dalga üreme bölgesindeki tekil dalga bileşenleri tarafından katedilen mesafe farklı bileşenler için aynı olmayacaktır. Daha uzun ve büyük dalgalar genellikle fırtına bölgesinde rüzgar doğrultusu ile aynı yönde bulunacaklardır.

Pratik olarak, S mesafesi için yaklaşık bir ortalama değer seçilebilir (Şekil 4.4) ve D_p süresine

dalga bileşenlerinin S mesafesini geçmesi için gereken sürenin de eklenmesi ile elde edilen düzeltilmiş süre, D'_p, kullanılmalıdır.

$$D'_p = D_p + \frac{S}{c_{gi}} = D_p + \frac{S}{1.515T_1} \tag{4.8}$$

burada c_g, dikkate alınan bileşenin grup hızıdır.



Şekil 4.4 Dalgaların R_p mesafesi boyunca hareket ettiği ve uzun feçli üreme bölgesi bulunan uzak mesafeli fırtınadan dolayı oluşan soluğan dalgası

O halde, bilinen bir P noktası için soluğan dalgasının frekans aralığının sabit kalmayacağı görülebilmektedir, bu aralık daha büyük bileşenlerin görülmesi ile yavaş yavaş artar ve spektrum gittikçe daha küçük bileşenleri içermektedir.

4.1.1.3 Yakın Mesafeli Bir Fırtınadan Gözlem Noktasına Gelen Soluğan

Yakın mesafeli fırtınanın oluşturduğu soluğanın tahmininde dalga dispersiyonunun yanında açısal saçılımın etkisini de dikkate almak gerekmektedir.

Soluğan tahmini için,

- Tahmin noktası üzerinde etkili olan feç alanındaki deniz koşulları hesaplanmalı;
- Feç bölgesinin başlangıcından gözlem noktasına olan mesafe ölçülmeli;
- Spektrumun pik periyodu ve pik yakınındaki dalga periyodu aralığı bulunmalı;
- Soluğanın tahmin noktasına gelme süresi belirlenmeli;
- Farklı zamanlarda görülen periyot aralıkları hesaplanmalı; ve
- Tüm tahmin zamanları için açısal saçılım faktörü ve dalga dispersiyon faktörü belirlenmelidir.

Açısal saçılım, feç alanının genişliği ve feç alanından tahmin noktasına olan mesafe kullanılarak hesaplanabilmektedir (Şekil 3.3). Bu faktör bir enerji yüzdesidir, bundan dolayı dalga yüksekliği için kullanıldığında karekökü alınarak kullanılmalıdır.

JONSWAP sonuçlarına göre, Hasselman vd. (1976), su yüzeyi değişimi (dalga enerjisi) ve pik frekans arasında bir ilişki önermiştir. Bu ifadeyi H_{m0} ve f_p'ye bağlı olarak

$$H_{m0} = 0.414 f_p^{-2} \left(f_p u\right)^{1/3} \tag{4.9}$$

şeklinde vermiştir.

Bu ifade hem JONSWAP spektrumu hem de PNJ yönteminde, gözlem noktasında tüm gözlem süresince dalga dispersiyon faktörünün bulunması için kullanılabilmektedir. Şekil 3.4(a) ve (b) dalga spektrumunun zamanla dispersiyonunu göstermektedir.

4.1.2 Sığ Su Etkilerinin Elle Hesabı

4.1.2.1 Kıyı Bölgesinde Soluğanın Sığlaşma ve Sapması

Bu bölümde, taban sürtünmesi ve dalga kırılması ile enerji kaybından dolayı dalga sönümlenmesi ihmal edilecektir. Sığlaşma ve sapma genellikle beraber meydana gelir fakat ayrı ayrı düşünülmesi gerekmektedir.

Sığlaşmadan Dolayı Dalga Yüksekliğinin Değişimi

Azalan su derinliğinden dolayı dalga yüksekliğinin (H) değişimini ifade eden sığlaşma faktörünü (K_s) elde etmek için enerji akısının korunumu prensibi uygulanmaktadır. Dalga enerjisi dalga yüksekliğinin karesi ile orantılı olduğundan ve dalga grup hızı ile yayıldığından dolayı, dalga enerji akısı $c_g H^2$ ile verilir. Bu bir sabittir. Bundan dolayı, sığlaşma faktörü derin su grup hızı (c_{g0}) ve d derinliğindeki grup hızı (c_g) arasındaki orana bağlıdır ve şu şekilde ifade edilir;

$$K_s = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} = \sqrt{\frac{1}{2}\frac{c_0}{c}} \tag{4.10}$$

Burada c_0 derin suda faz hızı ($\sqrt{g/k_0}$), k_0 derin suda dalga numarası ve H_0 derin suda dalga yüksekliğidir. Dalga grup hızı,

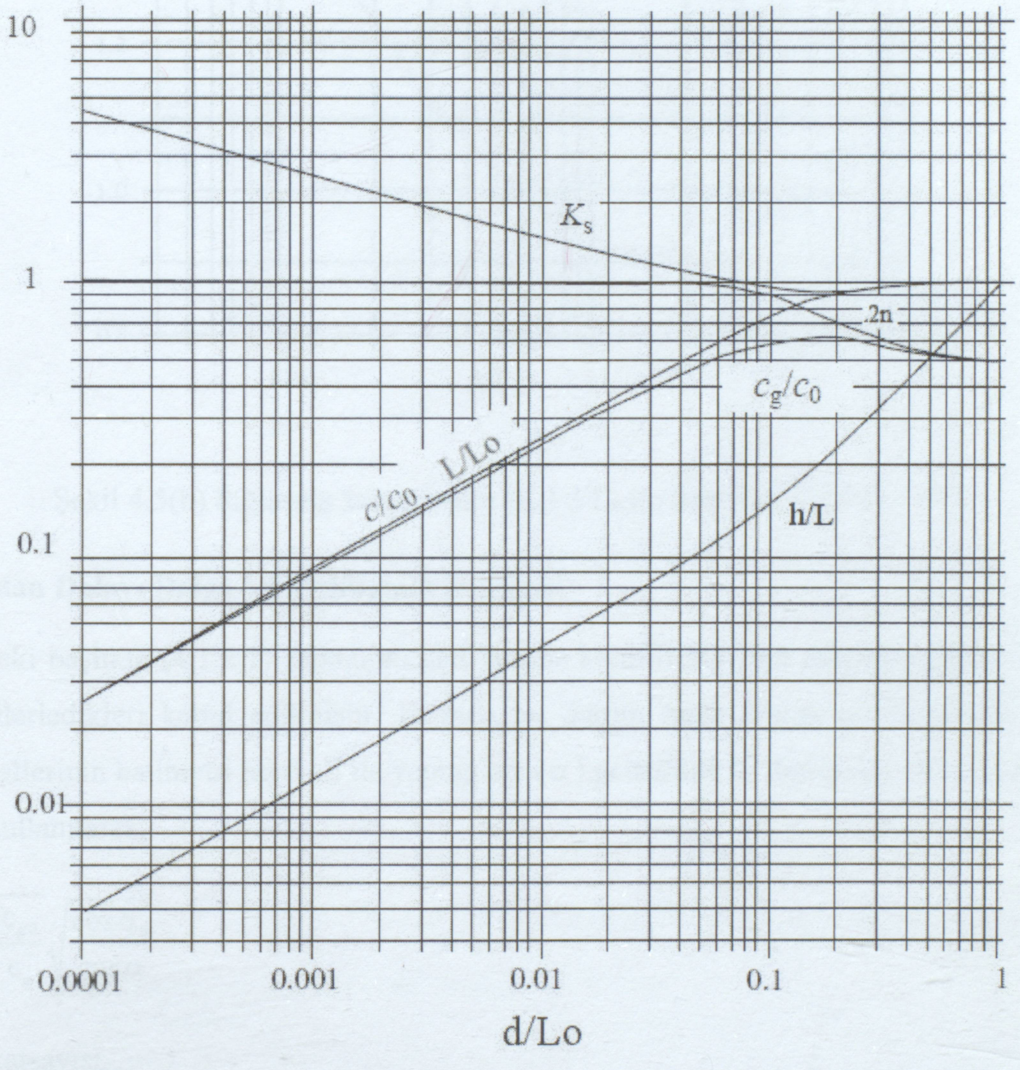
$$c_g = n\sqrt{\frac{g}{k}\tanh kd}, \quad n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right)$$

ile ifade edildiğinden dolayı sığlaşma katsayısı,

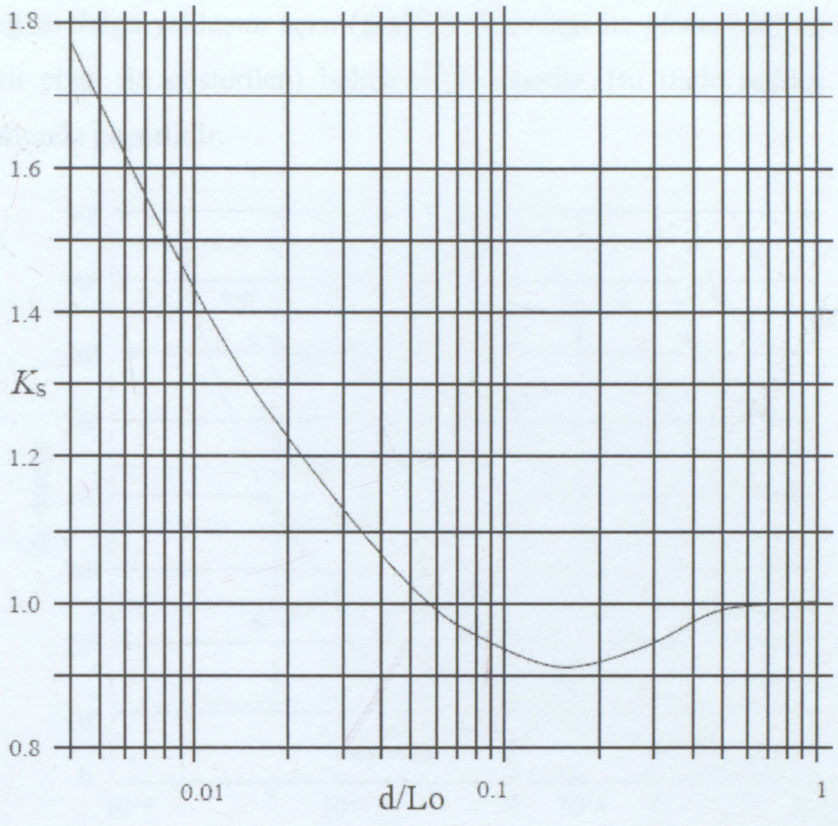
$$K_s = 2n\sqrt{\tanh kd}^{-1/2} \tag{4.11}$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Şekil 4.5(a)'da, derin sudan sığ suya kadar dalga transformasyonlarını içeren eğriler görülmektedir. Şekil 4.5(b)'de ise verilen bir dalga numarası için yalnızca K_s'in d/L_0 ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4.5(a) d/L_0'ın farklı fonksiyonlarının gösterimi (CERC, 1984)



Şekil 4.5(b) Sığlaşma katsayısının (K_s) d/L_0 ile değişimi (CERC,1984)

Sapmadan Dolayı Dalga Yüksekliğinin Değişimi

Bir önceki başlıkta (4.1.2.1) sapma etkileri hesaba katılmamış yani dalgaların kıyıya paralel olarak ilerledikleri kabul edilmiştir. Doğada bu durum nadir olarak görülmektedir. Dalga ortogonallerinin batimetri normali ile yaptığı açı (α) genellikle 0°'den farklı olmaktadır. Snell yasası kullanılarak,

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{c_{g0}}{c_g}} \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}}$$

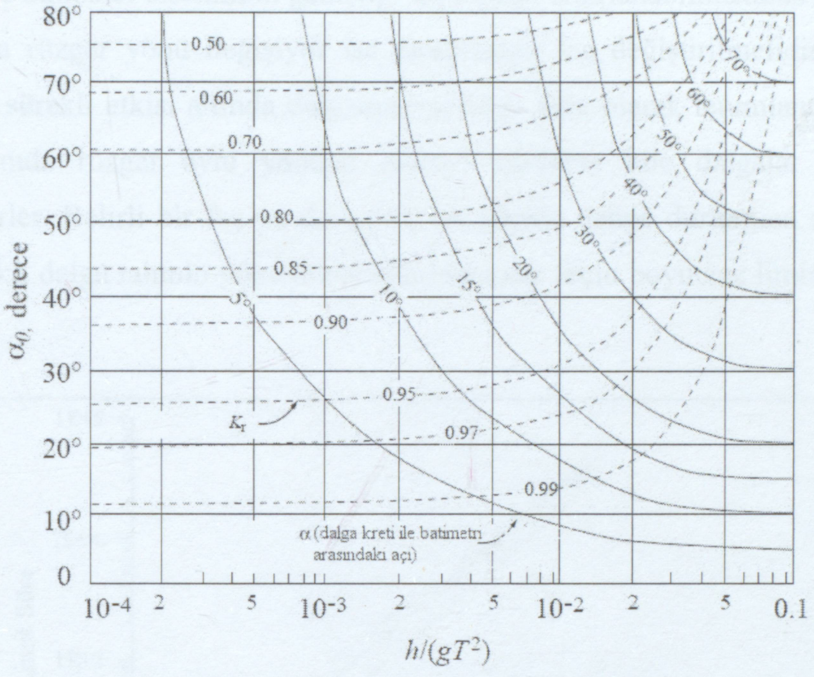
sapma katsayısı,

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}} \qquad (4.12)$$

olarak elde edilir. Burada α_0 derin suda dalga sırtının batimetri ile yaptığı açıdır.

CERC (1984) tarafından verilen ve Şekil 4.6'da görülen grafik Denklem (4.12)'ye dayanmaktadır. Bilinen su derinliği, dalga periyodu ve derin su yaklaşım açısı (α_0)

kullanılarak, sığ su dalga yaklaşım açısı (grafikte düz çizgi ile gösterilen) ve sapma katsayısı (grafikte kesikli çizgi ile gösterilen) belirlenebilmektedir. Bu ifade sadece düzgün paralel batimetri durumunda geçerlidir.



Şekil 4.6 Dalga doğrultusu ve yüksekliğinin sapmadan dolayı değişimi (CERC,1984)

Gerçekte batimetri çizgilerinin düzgün olduğu nadir olarak görülmektedir, genelde çok sayıda yakınlaşma ve uzaklaşma görülmektedir. Dorrestein (1960) batimetri çizgilerinin düzgün olmadığı durumda dalga sapmasının elle hesaplanabilmesi için bir yöntem önermiştir.

Bu yöntemde, derin denizde dalga enerjisinin açısal dağılımının α_1' ve α_2' aralığında yaklaşık olarak ünifom bir dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir. Bu açılar sığ suda α_1 ve α_2 açılarına dönüşmektedirler. Dorrestin sapma katsayısını

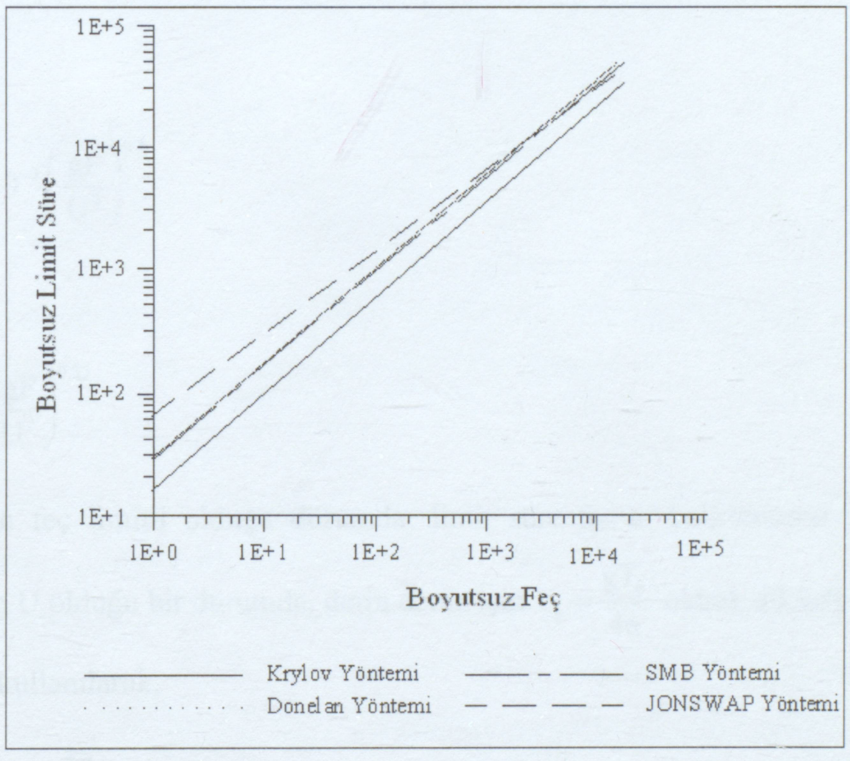
$$K_r = \sqrt{\frac{c_0}{c}\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1' - \alpha_2'}} \qquad (4.13)$$

şeklinde vermiştir. Burada c_0 ve c, sırasıyla derin deniz ve hesap noktasındaki faz hızlarıdır.

4.1.3 Ampirik Dalga Tahmin Modelleri

Gelişmiş sayısal modellerin mevcut olmadığı durumlarda, rüzgardan dalga tahmini üzerinde boyut analizi prensiplerinin de kabul edilebilir bir etkisi olduğu görülmektedir. İlişkiler derin

sudaki karakteristik dalga parametrelerinin rüzgar hızı (U), feç (F) ve rüzgar esme süresi (t)'ne bağlı olduğunu göstermektedir. Feç mesafesi, rüzgarın sürekli etkisi altında dalganın yayıldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. Feç; kara sınırları, verilen noktanın tersi yönünde esen rüzgarlar ve atmosfer sisteminin genişliği tarafından sınırlanabilmektedir. Dalga yayılma bölgesi boyunca rüzgar yönü değişiyor ise tanımlanan feç değiştirilmelidir. Rüzgar esme süresi, rüzgarın sürekli etkisi altında dalganın yayıldığı süre olarak tanımlanmaktadır. Dalga yayılması sırasında rüzgar aynı yönden esmeyi sürdürse bile dalgalar sonsuza kadar gelişmemektedirler. Belirli bir feç ya da belirli bir sürede denge durumuna ulaşmaktadırlar. Şekil 4.7'de farklı dalga tahmin yöntemleri için boyutsuz feçin boyutsuz limit süre ile ilişkisi görülmektedir.



Şekil 4.7 Eş zamanlı feç-süre ilişkileri (Massel, 1996)

4.1.3.1 JONSWAP Yöntemi

JONSWAP deneysel çalışmasının sonucunda feç limitli koşul için dalga tahmin formülleri (Hasselmann vd., 1973);

$$\frac{\sigma^2 g^2}{U^4} = 1.6\times10^{-7}\left(\frac{gF}{U^2}\right) \tag{4.14}$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = 7\pi \left(\frac{g}{U}\right)\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{-0.33} \tag{4.15}$$

olarak verilmiştir.

Daha eski yöntemlerde, dalga tahmin grafikleri belirgin dalga yüksekliği H_s ve belirgin dalga periyodu T_s'e bağlı olarak verilmektedir. Belirgin dalga periyodu T_s, genellikle T_p'nin bir sabite (1.06 veya 1.05) bölünmesi ile belirlenir.

Denklem (4.14) ve (4.15) kullanılarak, H_{m0} ve T_p şu şekilde ifade edilebilmektedir;

$$\frac{gH_{m0}^2}{16U^4} = 1.6\times10^{-7}\left(\frac{gF}{U^2}\right) \tag{4.16}$$

veya

$$\frac{gH_{m0}}{U^2} = 1.6\times10^{-3}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.5} \tag{4.17}$$

ve

$$\frac{gT_p}{U} = 0.286\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.33} \tag{4.18}$$

Dalga alanının feç limitli olduğu durumda, limit süre t_{lim}'in belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgar hızının U olduğu bir durumda, derin deniz için $c_g = \frac{gT_p}{4\pi}$ olarak dikkate alındığında ve (4.18) ifadesi kullanılarak,

$$t_{lim} = 65.9\frac{U}{g}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{2/3} \tag{4.19}$$

elde edilir.

(4.17), (4.18) ve (4.19) ifadeleri feç limitli durumda belirgin dalga yüksekliği ve belirgin dalga periyodunun hesaplanmasını sağlamaktadır.

Feç limitli dalga gelişiminin ölçülmesi diğerlerine göre daha basittir. Dalgaların zamanla gelişiminin ölçülmesi daha zordur ve dalgaların zamanla gelişmeleri ile ilgili büyük ölçüde farklı fikirler mevcuttur. Yukarıda anlatılan ve Hasselmann vd. (1976) tarafından geliştirilen parametrik dalga modelinde belirgin dalga yüksekliği ve periyodunun zaman boyunca tahmini

de verilmektedir. Rüzgarın zaman ve konumda sabit olduğu kabulü yapılarak, model H_{m0} ve T_p için aşağıdaki ifadeyi vermektedir;

$$\frac{gH_{m0}}{U^2} = 8.033\times10^{-5}\left(\frac{gt}{U}\right)^{5/7} \tag{4.20}$$

$$\frac{gT_p}{U} = 5.95\times10^{-2}\left(\frac{gt}{U}\right)^{3/7} \tag{4.21}$$

Limit süre t_{lim} (4.17) ve (4.20) ifadeleri arasında karşılaştırma yapılarak da belirlenebilmektedir.

$$t_{lim} = 65.9\frac{U}{g}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{7/10} \tag{4.22}$$

Görüldüğü gibi bu ifade Denklem (4.19) ile uyumludur.

4.1.3.2 SPM Yöntemi

JONSWAP dalga tahmin formülleri SPM (Shore Protection Manual, 1984) de verilen dalga tahmin grafiklerinin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntem kıyı mühendisliğinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Dalga tahmini yapılırken genellikle basit yöntemlerin kullanılması tercih edilir. Eğer su yüzü geometrisi oldukça basit ve dalga koşulları feç ya da süre limitli ise, bu mümkün olmaktadır. Feç limitli durumda; rüzgar, feçin sonunda dengeye ulaşılması için yeterince uzun süre sabit olarak esmektedir. Süre limitli durumda ise; dalga yüksekliği rüzgar esme süresi ile sınırlandırılmıştır. Bu iki durum dalga gelişiminin genel problemine asimtotik yaklaşımlar getirmektedir. Bir çok durumda, dalga gelişiminde iki durumun kombinasyonu etkilidir. Denklem (4.23), (4.24),...(4.35) ve Çizelge 4.1 parametrik modellerin gelişiminde kullanılan denklemlerin basitleştirilmesiyle elde edilmiştir (Hasselman vd., 1976). Şekil 4.8 ve 4.9'da ise dalga tahmini için kullanılan boyutsuz iki grafik görülmektedir.

Feç limitli durumda gerekli olan parametreler feç (F) ve rüzgar gerilme faktörü (U_A)'dır. Rüzgar gerilme faktörü

$$U_A = 0.71U^{1.23} \tag{4.23}$$

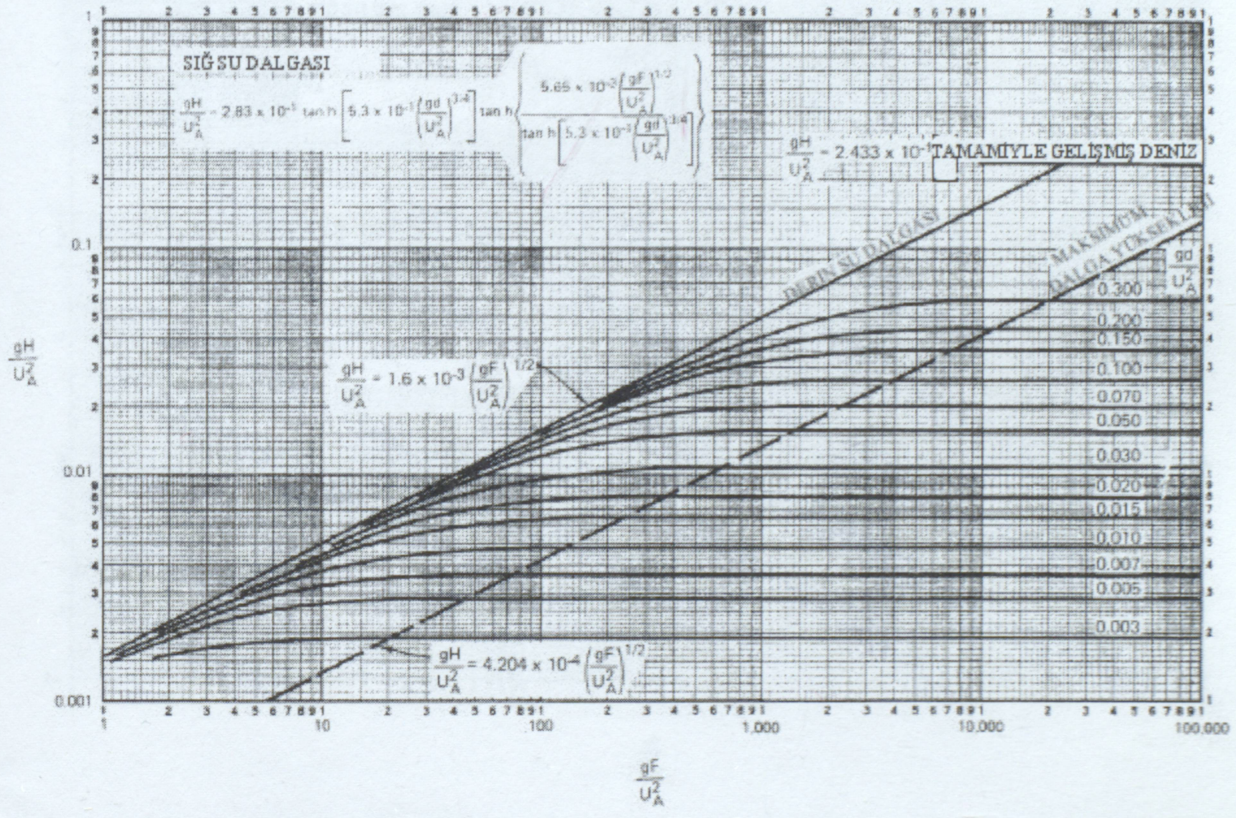
şeklinde ifade edilmektedir. Spektrumun belirgin dalga yüksekliği (H_{m0}) ve spektrumun pik

periyodu (T_m) hesaplanan parametrelerdir.

$$\frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 1.6x10^{-3}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/2} \tag{4.24}$$

$$\frac{gT_m}{U_A} = 2.857x10^{-1}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/3} \tag{4.25}$$

$$\frac{gt}{U_A} = 6.88\times10^{-1}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{2/3} \tag{4.26}$$



Şekil 4.8 Dalga yüksekliğinin tahmini için grafik (sabit derinlik)

$T_{1/3}$=0.95 T_m olarak verilmiştir. Bu denklemler tam gelişmiş dalga durumu için aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\frac{gH_{m0}}{U_A^2} = 2.433\times10^{-1} \tag{4.27}$$

$$\frac{gT_m}{U_A} = 8.134 \tag{4.28}$$

$$\frac{gt}{U_A} = 7.15 \times 10^4 \qquad (4.29)$$

Burada,

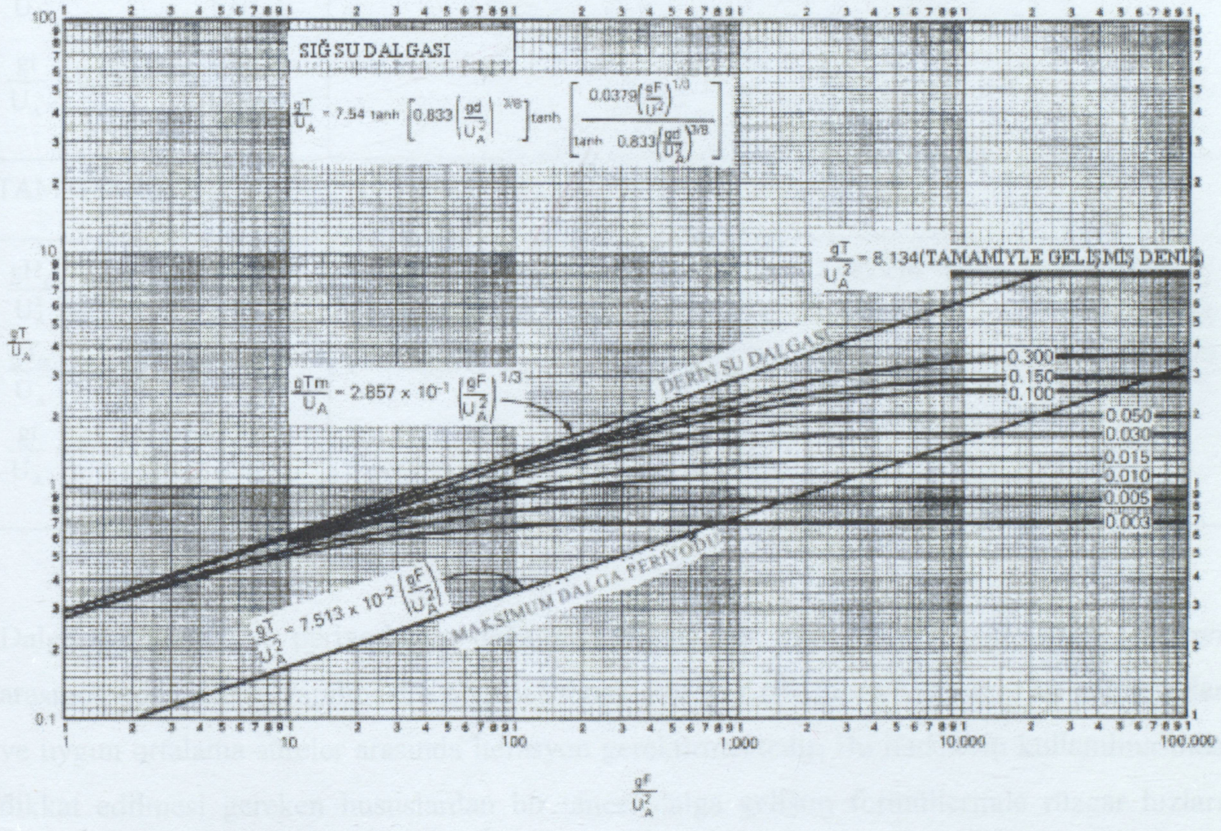
H_{m0} : spektrumun belirgin dalga yüksekliği

T_m : dalga spektrumunun pik periyodu

F : feç

t : süre

U_A : rüzgar gerilme faktörüdür.



Şekil 4.9 Dalga periyodunun tahmini için grafik (sabit derinlik)

Çoğu zaman dalga gelişim formüllerinin uygulanması için tasarım koşullarının feç limitli ya da süre limitli olup olmadığı belirlenmelidir. Yapılan hesaplama, verilen rüzgar gerilme faktörü ve feç için mümkün olan maksimum dalga yüksekliğinin ve periyodunun geçilmemesinin sağlanması için kontrol edilmelidir. Şekil 4.10'daki nomogram matematik çözümlerin doğruluğunun kontrolünde kullanılabilecek ampirik değerlerin dalga tahmin eğrilerini göstermektedir. Eğer formüller nomogramlardan daha fazla kullanılıyor ise dalga koşulları tam gelişmiş koşulların aşılıp aşılmadığının görülmesi için kontrol edilmelidir.

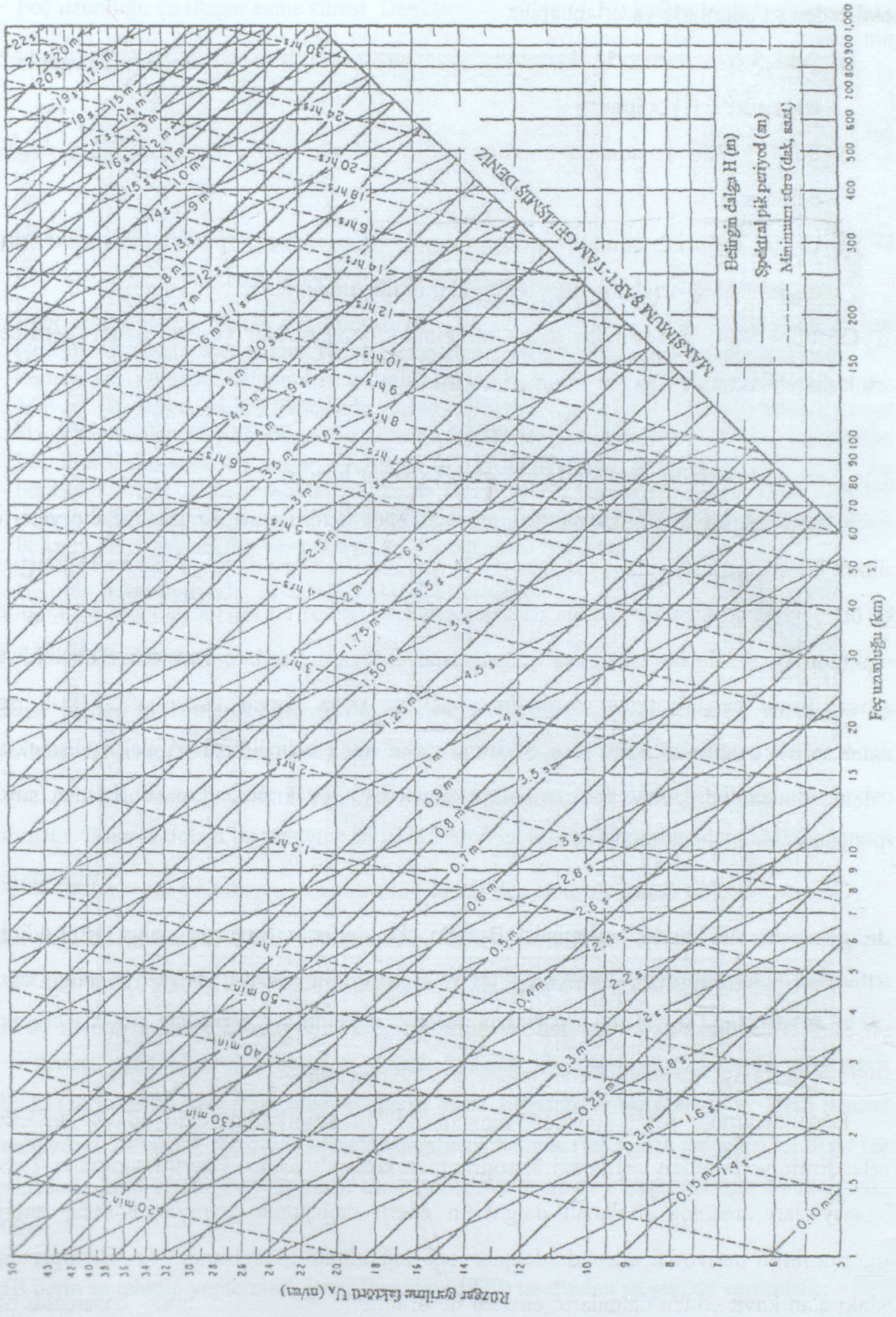
Çizelge 4.1'de dalga tahmininde kullanılan formüller bir tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Derin su dalga tahmin denklemleri (CERC, 1984)

Boyutsuzlar	H (m), T (s), U_A (m/s), F (m), t (s)	H (m), T (s), U_A (m/s), F (km),t (saat)
GELİŞMEKTE OLAN		
$\frac{gH_s}{U_A^2} = 1.6\times10^{-3}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/2}$ $\frac{gT_m}{U_A} = 2.857\times10^{-1}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/3}$ $\frac{gt}{U_A} = 6.88\times10^{-1}\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{2/3}$	$H_s = 5.112\times10^{-4}U_A F^{1/2}$ $T_m = 6.238\times10^{-2}(U_A F)^{1/3}$ $t = 3.215\times10^{1}\left(\frac{F^2}{U_A}\right)^{1/3}$	$H_s = 1.616\times10^{-2}U_A F^{1/2}$ (4.30) $T_m = 6.238\times10^{-1}(U_A F)^{1/3}$ (4.31) $t = 8.93\times10^{-1}\left(\frac{F^2}{U_A}\right)^{1/3}$ (4.32)
TAM GELİŞMİŞ		
$\frac{gH_s}{U_A^2} = 2.433\times10^{-1}$ $\frac{gT_m}{U_A} = 8.134$ $\frac{gt}{U_A} = 7.15\times10^{4}$	$H_s = 2.482\times10^{-2}U_A^2$ $T_m = 8.30\times10^{-1}U_A$ $t = 7.296\times10^{3}U_A$	$H_s = 2.482\times10^{-2}U_A^2$ (4.33) $T_m = 8.30\times10^{1}U_A$ (4.34) $t = 2.027U_A$ (4.35)

Dalga yüksekliği ve periyodunun değerlendirilmesi feç, süre ve tam gelişmişlik limitleri arasında kontrollerin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bir çok tasarım durumu bu yaklaşımlar ve uygun ortalama süreler arasında iterasyon gerektirmektedir. Bu ifadelerin kullanılmasında dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi dalga gelişim formüllerinde rüzgar hızları yerine rüzgar gerilme faktörlerinin kullanılmasıdır. Rüzgarlar için uygun ortalama zamanlar (süre ve feç ile ilişkili olarak) kullanılmalıdır. Bu yaklaşım ile elde edilen sonuç yaklaşıktır ve iterasyon sayısı ile yapılan düzenlemeler bu limitli doğruluğu yansıtacaktır.

SPM yöntemi ile, Şekil 4.10'da gösterilen nomogram kullanılarak rüzgar gerilme faktörü (U_A), feç uzunluğu (F) ve minimum süre kullanılarak belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve spektrumun pik periyodu (T_m) hesaplanabilir. Bu değerler, Çizelge 4.1'deki ifadeler yardımı ile hesaplanmak istenir ise aşağıdaki adımlar izlenerek belirgin dalga parametreleri hesaplanabilir.



Şekil 4.10 Belirgin dalga karakteristikleri nomogramı

1) Feç uzunluğu ve rüzgar esme süresi, Denklem (4.36) ve (4.37) kullanılarak belirlenen t_{FAS} ve F_{FAS} ile karşılaştırılarak tam gelişmiş mi yoksa gelişmekte olan deniz durumu mu olduğu belirlenir.

$$F_{FAS} = \left(U_A / 0.62 \right)^{1.96} \tag{4.36}$$

$$t_{FAS} = 8.93 \times 10^{-1} \left(\frac{F_{FAs}^2}{U_A} \right)^{1/3} \tag{4.37}$$

2) Eğer tam gelişmiş durum söz konusu ise, (4.33) ve (4.34) ifadeleri kullanılarak rüzgar gerilme faktörüne bağlı olarak H_s ve T_m belirlenir. Eğer gelişmekte olan deniz durumu söz konusu ise, oluşacak dalganın süre limitli mi yoksa feç limitli mi olduğu belirlenmelidir. Mevcut feç değeri, (4.32) ifadesinde yerine koyularak t hesaplanır, bu hesaplanan t rüzgar esme süresinden (t_w) büyük ise feç limitli, küçük ise süre limitli durum söz konusudur. Feç limitli durumda feç değeri (4.30) ve (4.31) ifadelerinde yerine koyularak H_s ve T_m belirlenir. Süre limitli durumda ise, esme süresi (4.32) ifadesinde kullanılarak yeni feç değeri belirlenir, (4.30) ve (4.31) ifadelerinde belirlenen bu feç değeri kullanılarak belirgin dalga yüksekliği ve spektrumun pik periyodu belirlenir.

3) Belirgin dalga periyodu, $T_s=0.95T_m$ olarak elde edilir.

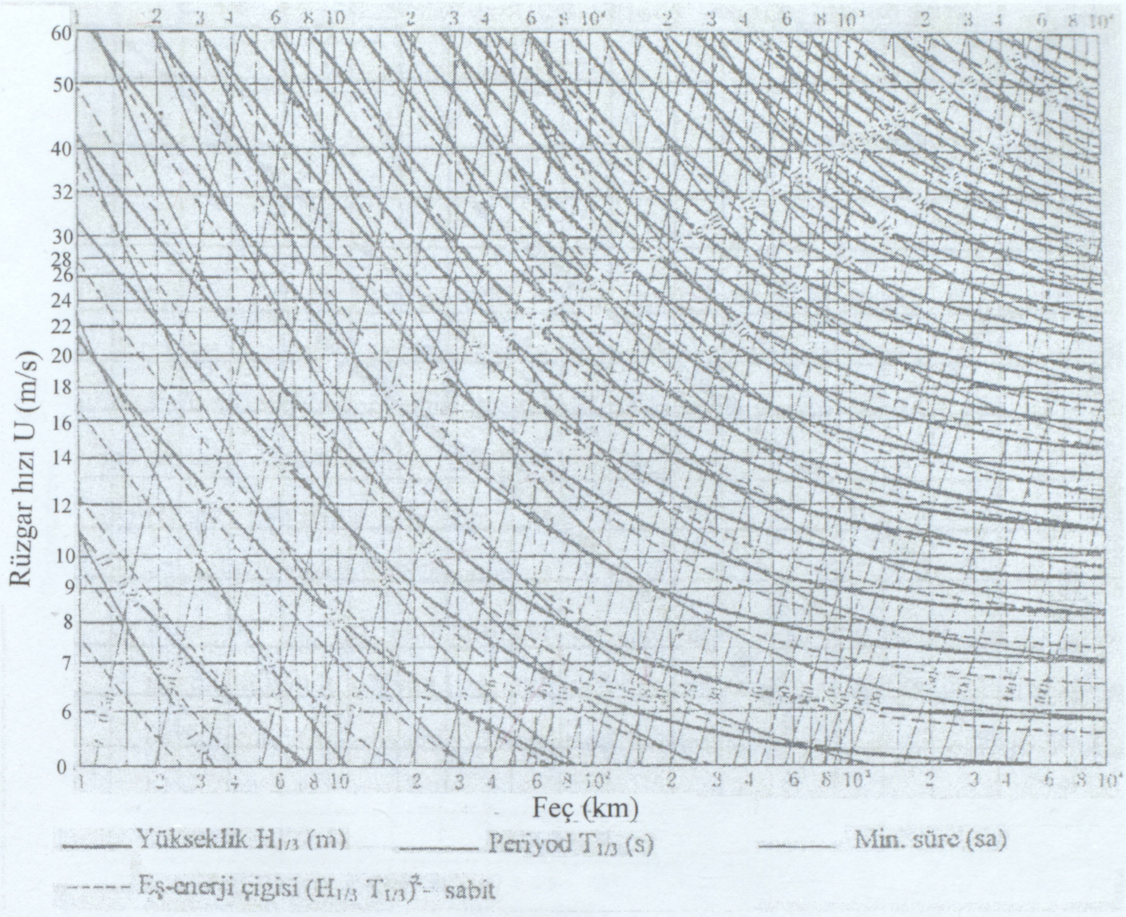
4.1.3.3 SMB Yöntemi

Rüzgar verileri kullanılarak tasarım değerlerinin belirlenmesi için verilen ilk yöntemdir ve Sverdrup ve Munk (1947) tarafından sunulmuştur. Sverdrup ve Munk tarafından verilen dalga tahmin eğrileri Bretschneider (1958, 1970) tarafından ampirik veriler kullanılarak revize edilmiştir. Bundan dolayı bu yönteme sıklıkla Sverdrup-Munk- Bretschneider (SMB) yöntemi denmektedir.

Şekil 4.11'da gösterilen SMB yöntemi için verilen nomogram kullanılarak feç mesafesi, rüzgarın şiddeti ve esme süresi yardımı ile T_s ve H_s bulunabilir. Bu nomogramın kullanılışı sırasında rüzgarın şiddetiyle, verilmiş feç mesafesi ve rüzgarın etki süresi kesiştirilerek ve H_s, T_s değerleri enterpolasyonla bulunur. Ancak kesişim ilk olarak süre hatlarına rastlaması halinde (süre limitli dalgalar), olayı rüzgarın esme süresinin kontrol ettiği ve feçin sonsuz alınabileceği; ilk olarak feç düşeylerine rastlanılması halinde (feç limitli dalgalar) ise olayı feç mesafesinin kontrol ettiği ve rüzgarın esme süresinin önemsiz olduğu anlaşılır (Yüksel vd., 1998).

SMB derin su tahmin yöntemleri, Bretschneider (1970) tarafından şu şekilde verilmiştir;

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right] \tag{4.38}$$



Şekil 4.11 SMB yöntemi (Yüksel vd., 1998)

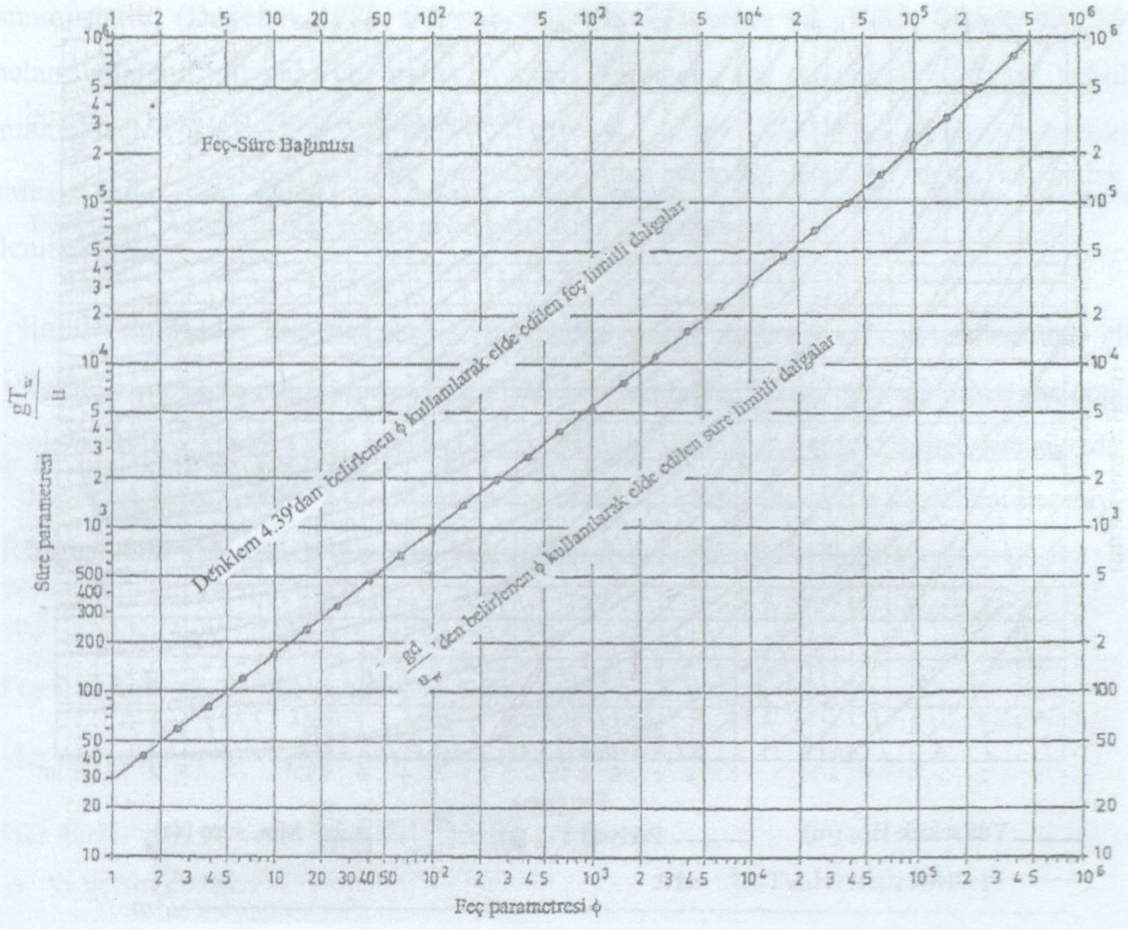
$$\frac{gT_s}{U} = 7.54 \tanh\left[0.077\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.25}\right] \tag{4.39}$$

$$\frac{gt}{U} = K \exp\left\{\left[A\left(\ln\left(\frac{gF}{U^2}\right)\right)^2 - B\ln\left(\frac{gF}{U^2}\right) + C\right]^{1/2} + D\ln\left(\frac{gF}{U^2}\right)\right\} \tag{4.40}$$

burada K= 6.5882, A= 0.0161, B= 0.3692, C= 2.2024, D=0.8798 olarak verilmiştir. Bu ifadelerde $\frac{gF}{U^2}$ feç parametresi olarak bilinir ve ϕ ile gösterilir.

$$\phi = \frac{gF}{U^2} \tag{4.41}$$

Feç parametresi Şekil 4.12' de grafik formda verilmiştir. Bu denklemler sadece derin su hali için geçerlidir. Bu yöntemin uygulanması Şekil 4.11'de verilen nomogram kullanılarak da yapılabilir.



Şekil 4.12 ϕ feç parametresi (Yüksel vd., 1998)

Denklemlerin kullanılması halinde,

(a) Mevcut rüzgar verilerinden t, U ve F belirlenir,

(b) Denklem (4.41)'den ϕ belirlenir,

(c) gt/U parametresi hesaplanır,

(d) Eğer (b) ve (c) adımlarından faydalanılarak bulunan değer Şekil 4.12'de işaretlendiğinde eğrinin üzerinde kalıyorsa dalga yüksekliği feç ile belirlenir ve (b) adımında bulunan feç parametresi kullanılır. Eğer bu değer eğrinin altında kalıyorsa dalga yüksekliği rüzgar esme süresinden hesaplanır ve bunun için süre parametresi (gt/U) kullanılarak eğri kesiştirilerek belirlenen ϕ'nin daha küçük olan değeri kullanılır.

(e) ϕ'nin belirlenen bu değerinden H_s ve T_s (4.38) ve (4.39) denklemleri kullanılarak hesaplanır.

4.1.3.4 Donelan Yöntemi

Donelan vd. özellikle feç limitli koşullar için uygun olan bir dalga tahmin yöntemi geliştirmiş

ve sunmuşlardır (Donelan, 1980; Schwab vd., 1984; Donelan vd., 1985; Bishop vd., 1992). Donelan yöntemi rüzgar ve dalga yönleri arasında bir tutarlılık olduğu kabulünü yapmamaktadır ($\Theta = \varphi - \psi \neq 0$,: φ dalga yönü ve ψ : rüzgar yönü). Eğer rüzgar yönündeki feç mesafesi fazla ise, dalga yönününde daha uzun feçlere doğru eğilim göstereceği beklenmektedir.

Feç limitli durumda, feç dağılımı bilinen bir nokta için φ ile ψ arasındaki ilişki "$F_{\varphi}^{0.426}\cos\Theta$" ifadesinin değerlendirilmesi ile elde edilebilmektedir. Her hangi bir nokta için φ ile ψ arasındaki ilişki şu sekilde belirlenir (Bishop ve Donelan, 1989).

1) Rüzgar yönünden başlanarak ve daha büyük feçlere doğru hareket ederek, rüzgara karşı yönde ilgilenilen noktadan feç sınırına kadar radyallar uzatılır. Radyallar feç mesafesinin çeşitliliğine bağlı olarak bazı uygun aralıklarda olmalıdır.
2) Feç uzunlukları ölçülür ve 30° boyunca ortalamaları alınır (Her radyaldan $\pm 15°$)
3) Her radyalın merkezindeki ortalama feç için "$F_{\varphi}^{0.426}\cos\Theta$" hesaplanır.
4) Her farklı rüzgar yönü için "$F_{\varphi}^{0.426}\cos\Theta$" ifadesinin maksimum değeri etkin dalga yönü φ' yi vermektedir.

Bilinen bir açı farkı Θ için, dalga tahmin denklemleri,

$$\frac{gH_{m0}}{(U\cos\Theta)^2} = 0.00366\left[\frac{gF_{\varphi}}{(U\cos\Theta)^2}\right]^{0.38} \tag{4.42}$$

$$\frac{gT_p}{U\cos\Theta} = 0.542\left[\frac{gF_{\varphi}}{(U\cos\Theta)^2}\right]^{0.23} \tag{4.43}$$

$$\frac{gt}{U\cos\Theta} = 30.1\left[\frac{gF_{\varphi}}{(U\cos\Theta)^2}\right]^{0.77} \tag{4.44}$$

burada F_{φ} hakim dalga yönündeki feç mesafesidir.

Dalgaların aşırı gelişmesinden kaçınmak için, F_{φ}'nin değeri için şu kriter verilmiştir;

$$\frac{gF_{\varphi}}{(U\cos\Theta)^2} \leq 9.47\times10^{4} \tag{4.45}$$

Rüzgar yönünden bulunan geometrik feç, (4.45) ifadesi ile verilen değeri aşıyor ise dalgalar

tam gelişmiştir ve dalga yüksekliği ve periyodu için şu ifadeler kullanılır;

$$\frac{gH_{m0}}{U^2} = 0.285, \frac{gT_p}{U^2} = 7.54 \tag{4.46}$$

Donelan yönteminin temel hatları şu şekilde özetlenebilir:

1) Model pik dalga enerjisinin yönünün, rüzgar ve dalga yönünün aynı olduğu kabulüne göre daha iyi tahmin edilmesini sağlamaktadır.
2) Dalga yönü "$F_{\varphi}^{0.426} \cos\Theta$" ifadesi kullanılarak belirlenir.
3) Modelin doğruluğu JONSWAP ve SPM (1977) yöntemleri ile kıyaslanabilir ve SPM (1984)'te önerilenden daha iyidir.
4) Model derin suda ve kararlı, feç limitli durumda geçerlidir.
5) Dalga parametrelerinin rüzgara ve yönsel dalga enerjisi saçılım fonksiyonuna bağımlılığı Ontario Göl'ündeki deneylere dayanmaktadır.

4.1.3.5 Krylov Yöntemi

Yukarıda belirtilen yöntemler batı literatüründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, Krylov (1966) tarafından verilen yöntem diğerlerinden farklı olarak Sovyetler Birliği'nde geliştirilmiş bir yöntemdir.

Krylov vd. (1976) ortalama dalga parametreleri için sonuç ifadelerini şu şekilde vermiştir.

$$\frac{g\bar{H}}{U^2} = 0.16\left\{1-\left[1+6\times10^{-3}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.5}\right]^{-2}\right\} \tag{4.47}$$

$$\frac{g\bar{T}}{U} = 19.478\left(\frac{g\bar{H}}{U^2}\right)^{0.625} \tag{4.48}$$

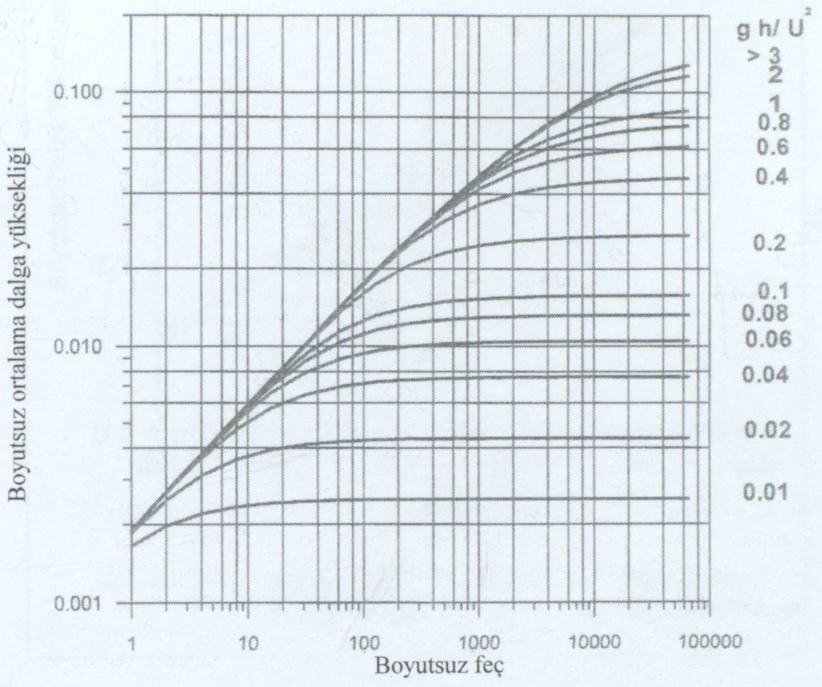
$H_{m0} = 4.004\sigma = \frac{4.004}{\sqrt{2\pi}}\bar{H} = 1.6\bar{H}$ olduğundan, (4.47) ifadesi,

$$\frac{gH_{m0}}{U^2} = 0.256\left\{1-\left[1+6\times10^{-3}\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0.5}\right]^{-2}\right\} \tag{4.49}$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 4.13'de (4.49) ifadesinin grafik gösterimi görülmektedir. Ortalama dalga periyodu ile belirgin dalga periyodu arasındaki ilişki şu şekilde verilmiştir (Krylov, 1966),

$$T_p = 1.25\overline{T} \qquad (4.50)$$



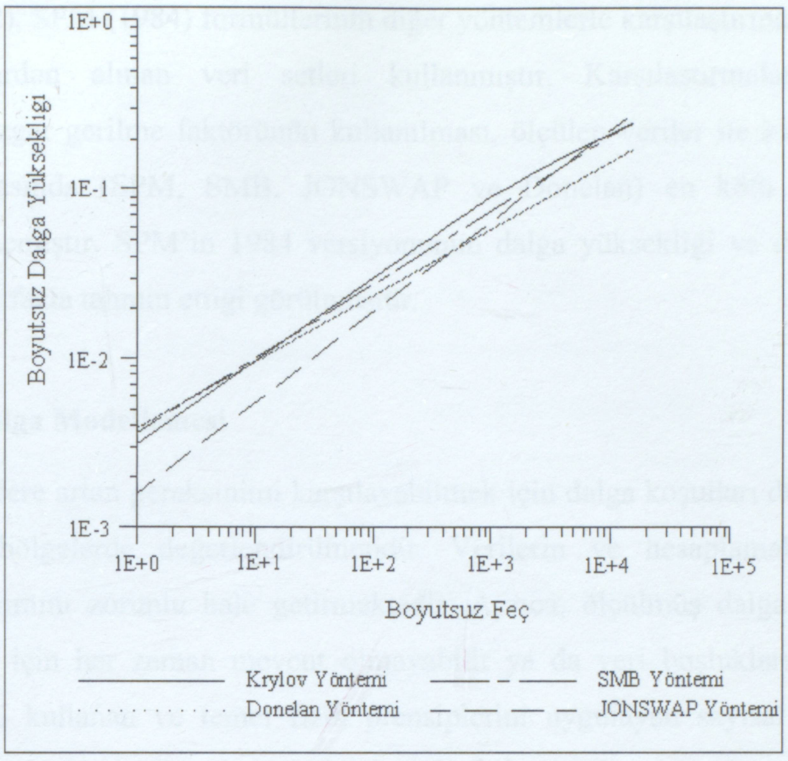
Şekil 4.13 Ortalama dalga yüksekliği $\overline{H}$ ile boyutsuz feç arasındaki ilişki (Massel, 1996)

4.1.3.6 Ampirik Dalga Tahmin Modellerinin Karşılaştırılması

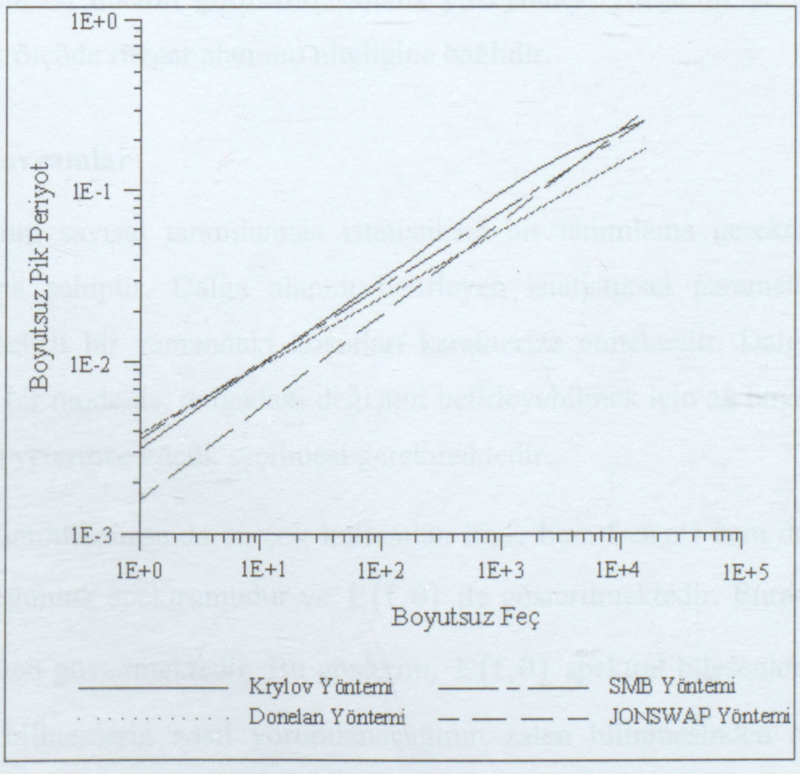
Temeli rüzgar ve dalga parametreleri arasındaki ilişkileri belirlemek olan tüm ampirik yöntemler büyük ölçüde deneysel verilere dayanmaktadır. Bundan dolayı uygulama alanları belirli bir bölge ile sınırlıdır. Yöntemlerin geçerlilikleri hakkında fikir vermesi açısından karşılaştırılmaları gerekmektedir.

Şekil 4.14'te (4.17), (4.38), (4.41) ve (4.49) ifadeleri kullanılarak belirlenen boyutsuz belirgin dalga yükseklerı, boyutsuz feçin bir fonksiyonu şeklinde görülmektedir.

Daha kolay karşılaştırma yapılabilmesi için Donelan ifadesinde (4.39) Θ açısı sıfır kabul edilmiştir. İlk üç yöntem küçük ve büyük boyutsuz feç (gF/U^2) değerleri için benzer sonuç vermişlerdir. JONSWAP tahminleri ise özellikle küçük boyutsuz feç değerlerinde az olmaktadır. Şekil 4.14'te dalga periyodu için de benzer sonuçlar görülmektedir (Massel, 1996).



Şekil 4.14 Dalga yüksekliği tahmini için ampirik dalga tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması (Massel, 1996)



Şekil 4.15 Dalga periyodu tahmini için ampirik dalga tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması (Massel, 1996)

Bishop vd. (1992), SPM (1984) formüllerinin diğer yöntemlerle karşılaştırmasını yapmak için çeşitli kaynaklardan alınan veri setleri kullanmıştır. Karşılaştırmalar SPM (1984) yöntemindeki rüzgar gerilme faktörünün kullanılması, ölçülen veriler ile karşılaştırıldığında dört yöntem arasında (SPM, SMB, JONSWAP ve Donelan) en kötü sonuçların elde edilmesine yol açmıştır. SPM'in 1984 versiyonunun dalga yüksekliği ve dalga periyodunu olduğundan daha fazla tahmin ettiği görülmüştür.

4.2 Sayısal Dalga Modellemesi

Dalgaya ait bilgilere artan gereksinimi karşılayabilmek için dalga koşulları düzenli aralıklarla oldukça geniş bölgelerde değerlendirilmelidir. Verilerin ve hesaplamaların büyüklüğü bilgisayar kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Ayrıca, ölçülmüş dalga verileri istenen bölge ve zaman için her zaman mevcut olmayabilir ya da veri boşlukları olabilmektedir. Rüzgar verilerini kullanan ve temel fizik prensiplerini uygulayan sayısal modeller dalga koşulları ile ilgili gerekli analizleri yapmak için geliştirilmektedir.

Dalga modellemesinde, dalgalar hakkında teorik ve gözlemsel bilgiler mühendislerin, denizcilerin ve genel halkın pratik olarak kullanabileceği bir yapı halinde düzenlenmektedir. Dalga modeli için en önemli girdi verisi deniz yüzeyindeki rüzgardır ve dalga modelinin doğruluğu büyük ölçüde rüzgar alanının niteliğine bağlıdır.

4.2.1 Temel Kavramlar

Yüzey dalgalarının sayısal tanımlaması istatistiksel bir tanımlama gerektiren çok sayıda düzensiz elemana sahiptir. Dalga alanını belirleyen istatistiksel parametreler belirli bir konumdaki ve belirli bir zamandaki koşulları karakterize etmektedir. Dalgaların etkili bir şekilde değiştiği bir modelde, dalgadaki değişimi belirleyebilmek için ağ boyutlarının (zaman adımı ve konum) yeterince küçük seçilmesi gerekmektedir.

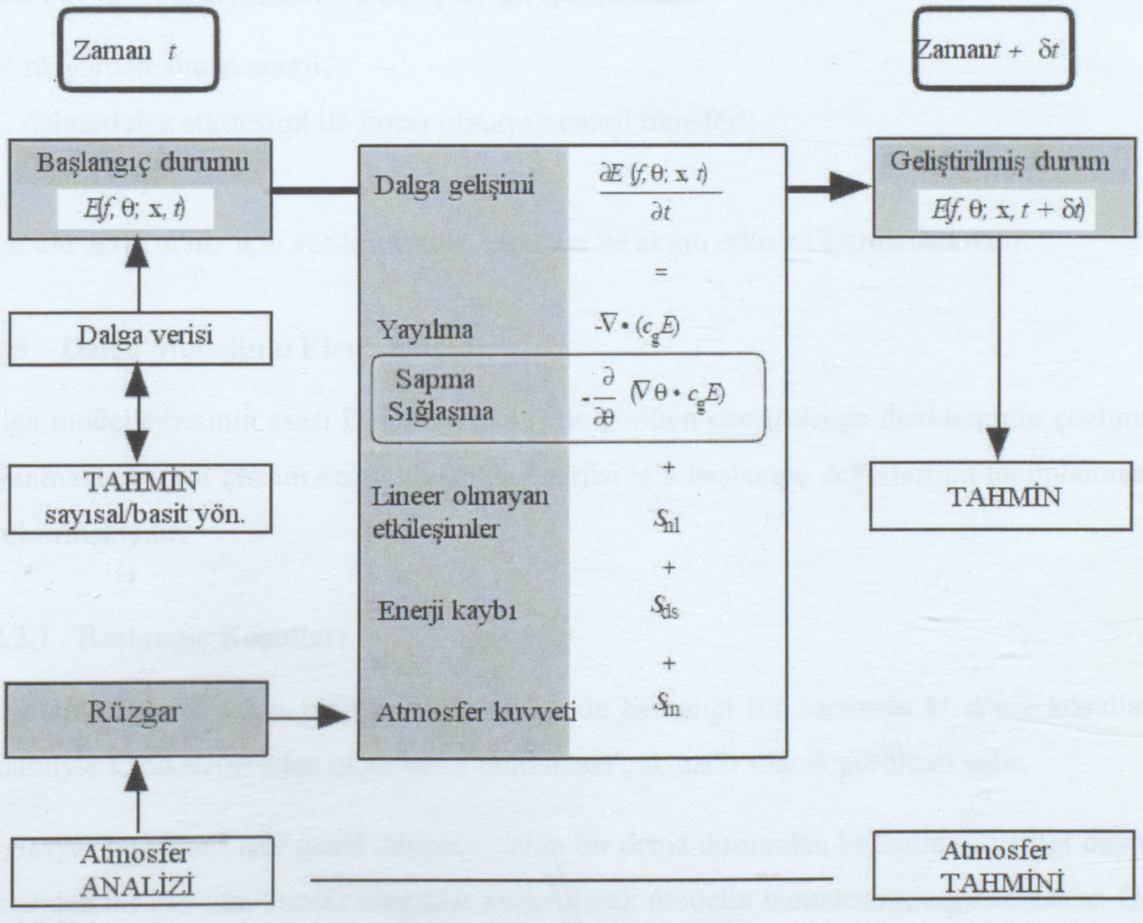
Dalga alanının tanımlanmasında en çok kullanılan ifade hem frekans hem de yönün dikkate alındığı dalga-yoğunluk spektrumudur ve $E(f,\theta)$ ile gösterilmektedir. Burada f frekansı, θ ise yayılma yönünü göstermektedir. Bu gösterim, $E(f,\theta)$ spektral bileşenleri ile ilgili dalga fiziği hakkında bilinenlerin nasıl yorumlanacağının zaten bilinmesinden dolayı kullanışlı olmaktadır. Bütün bileşenler çok iyi anlaşılmış bir teoriye sahip sinüzoidal dalga olarak düşünülebilmektedir. Spektrum kullanılarak operasyonel bir dalga modelinden beklenen bir çok parametre (belirgin dalga yüksekliği, frekans spektrumu, pik frekans, yönsel spektrum,

hakim dalga yönü vb.) hakkında fikir sahibi olunabilmektedir.

Bütün modeller bu tanımlamayı kullanmayabilirler. Daha basit modeller, genellikle doğrudan rüzgardan tanımlanan yönsel karakteristikler ile belirgin dalga yüksekliği ya da frekans spektrumunun tahminine dayanmaktadırlar.

Dalga alanını kontrol ettiği düşünülen fiziksel süreçler için uygun bir kavram kullanılmaktadır. Dalga modellemesinde genel olarak bu süreçler dalga topluluklarının davranışları ile tanımlanmaktadır. Örneğin, dalga spektrumu gibi kullanışlı istatistiksel gösterimlere dönüştürülmektedirler. Tüm süreçler henüz tam olarak anlaşılamamıştır ve modellerde bazı ampirik sonuçlar kullanılmaktadır.

Farklı amaçlara yönelik çeşitli modeller bazı ufak farklılıklar gösterse de genel formatları aynıdır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Dalga modelinin elemanları (WMO, 1998)

4.2.2 Dalga Enerji-Denge Denklemi

Bilgisayar modelleri için en genel formülasyon, zaman ve konumda yüzey ağırlık dalgalarının gelişimini tanımlayan spektrumun enerji-denge denklemini içeren Şekil 4.16'daki elemanları içermektedir.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \bullet \left(c_g E \right) = S_t = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \tag{4.51}$$

burada;

$E = E(f, \theta, x, t)$ yayılma yönüne (θ) ve frekansa (f) bağlı olarak iki boyutlu yönsel dalga spektrumu (yüzey değişim spektrumu);

$c_g = c_g(f, \theta)$ derin deniz dalga grup hızıdır.

S_t net kaynak fonksiyonudur ve şu üç terimi içermektedir:

S_{in} : rüzgardan alınan enerji;

S_{nl} : dalga-dalga etkileşimi ile lineer olmayan enerji transferi;

S_{ds} : enerji kaybı.

Bu ifade derin deniz için verilmektedir, sapmayı ve akıntı etkisini içermemektedir.

4.2.3 Dalga Modelinin Elemanları

Dalga modellemesinin esası Denklem (4.51)'de görülen enerji-denge denkleminin çözümüne dayanmaktadır. Bu çözüm öncelikle dalga enerjisi için başlangıç değerlerinin tanımlanmasını gerektirmektedir.

4.2.3.1 Başlangıç Koşulları

Çalışılan bölgenin sakin bir deniz olması ya da herhangi bir zamanda ki deniz koşullarını tamamiyle karakterize eden ölçümlerin bulunması çok nadir olarak görülmektedir.

Bilgisayar modelleri için genel düşünce, sakin bir deniz durumdan başlanması ve ilgi duyulan zamandan bir kaç gün önceki rüzgarlar kullanılarak modelin ısınmasının sağlanmasıdır. Daha sonra başlangıç zamanı için tahminler elde edilmektedir.

4.2.3.2 Rüzgar

Deniz yüzeyi üzerindeki atmosfer hareketi dalga modellemesinin büyük ölçüde en önemli

elemanıdır. Su yüzeyine enerji girişinin sadece rüzgar yolu ile olduğu düşünülmektedir. Dalga alanına enerji transferi rüzgar tarafından uygulanan yüzey gerilmesi ile meydana gelir. Bundan dolayı rüzgar verisindeki bir hata dalga enerjisinde ve dolayısıyla belirgin dalga yüksekliği gibi parametrelerde önemli ölçüde hataya neden olmaktadır.

Atmosfer ile dalga alanının etkileşimi karmaşık bir yapıya sahiptir. Ortalama koşullar ve fırtına anında, rüzgar profili, atmosfer stabilitesi, atmosfere ait sınır tabakada dalgaların kendilerine olan etkileri gibi etkilerin hepsi dikkat gerektirmektedir.

Rüzgar alanı belirlenirken rüzgar esme süresi ve feç dikkatli bir şekilde analiz edilmelidir. Basit yöntemler kullanıldığında kullanıcının feç ve süre için kendi değerlendirmelerini yapmaları gerekmektedir.

4.2.3.3 Enerji Girişi ve Enerji Kaybı

Atmosfer sınır tabakası dalga alanından tamamiyle bağımsız değildir. Gerçekte, dalga alanının girdileri dalga alanındaki enerjiye bağlı olan geri besleme mekanizması tarafından kontrol edilmektedir. Dalga alanına giren enerjinin miktarı S_{in} ile tanımlanır.

Rüzgar girdisi terimi S_{in} genellikle şu formda kabul edilir,

$$S_{in} = A(f,\theta) + B(f,\theta)E(f,\theta). \tag{4.52}$$

$A(f,\theta)$ dalgalar ile havadaki türbülans basınç örnekleri arasındaki rezonans etkileşimidir ve Philips (1957) tarafından önerilmiştir. İfadenin sağ tarafındaki ikinci terim ise Miles (1957) tarafından önerilen gelişen dalgalar ile indirgenmiş türbülans basınç modelleri arasındaki geri beslemeyi göstermektedir. Bir çok uygulamada, Miles-tipi terim hızla Philips-tipi terimi aşmaktadır.

Snyder vd. (1981)'e göre Miles terimi,

$$B(f,\theta) = \max\left[0, K_1 \frac{\rho_a}{\rho_w}\left(K_2 \frac{U_5}{g} f\cos(\theta-\psi) - 1\right)2\pi f\right] \tag{4.53}$$

formuna sahiptir.

Burada, ρ_a ve ρ_w sırasıyla hava ve suyun özgül kütleleri, K_1 ve K_2 sabitler, ψ rüzgar yönü ve U_5 5 m'deki rüzgar hızıdır.

(4.50) denklemi, kayma hızı $u_* = \sqrt{\tau / \rho_a}$ ile yeniden tanımlanabilmektedir. Burada τ rüzgar kayma gerilmesini göstermektedir.

Tam gelişmiş deniz durumu olması halinde, Pierson-Moskowitz spektrumununda (E_{PM}) verildiği gibi boyutsuz enerjinin (ε) kullanıldığına dikkat edilmelidir.

$$\varepsilon = \frac{g^2 \int E_{PM}(f)\,df}{u_*^4} = \frac{g^2 E_{toplam}}{u_*^4} \tag{4.54}$$

evrensel bir sabittir. Ancak, ε U_{10} ile ölçeklendiriliyor ise bu doygunluk limiti rüzgar hızı ile belirgin olarak değişmektedir çünkü C_D U_{10}'un bir fonksiyonudur. Gerek Denklem (4.51) gerekse de C_D'nin U_z'e olan bağımlılığı güçlü rüzgarlar için tam olarak bilinmemektedir.

S_{ds} terimi dalga alanında ne kadar enerjinin kaybolduğunu tanımlamaktadır. Derin suda, enerji kaybı genellikle dalga kırılması ile olmaktadır (köpüklenme). Sığ suda ise, deniz tabanı ile etkileşimden dolayı enerji kayıpları da görülmektedir.

4.2.3.4 Lineer Olmayan Etkileşimler

Genellikle dalga alanındaki herhangi bir büyük non-lineerlik ve onun gelişimi enerji kayıp terimleri olarak hesaplanır. Enerji girdi ve kayıp terimleri, dinamik olarak tanımlanabilen dalga alanının tüm lineer ya da zayıf lineer olmayan özellikleri için tamamlayıcı olarak düşünülebilmektedir. Bu kategoriye yüzey dalgalarının yayılımı ve dalga bileşenleri arasında zayıf lineer olmayan etkileşimden dolayı dalga spektrumu içinde enerjinin yeniden dağılımı girmektedir.

S_{nl} teriminin etkisi şu şekilde özetlenebilir; pik yakınında spektrumun etkin bölgesinde, rüzgar girdisi enerji kaybından daha fazladır. Fazla enerji daha büyük ve daha küçük frekanslara doğru lineer olmayan etkileşimler ile transfer edilir. Bu transfer daha düşük frekanslarda spektrumun sol tarafındaki yeni dalga bileşenlerinin gelişmesini sağlarken daha büyük frekanslarda enerji kaybolur. Bunun sonucunda spektrumun piki daha küçük frekanslara doğru kaymaktadır. Lineer olmayan dalga-dalga etkileşimi spektrumun şeklini korumaktadır ve tam olarak hesaplanabilmektedir.

S_{nl} kaynak terimi tam olarak hesaplanabilir fakat bilgisayar gücüne gereksinim oldukça fazladır. Üçüncü nesil dalga modellerinde, dalga bileşenleri arasındaki lineer olmayan etkileşimler özel integrasyon tekniklerinin kullanımı ve Hasselmann ve Hasselmann (1985) ve Hasselmann vd. (1985) tarafından verilen basitleştirmeler ile açık olarak hesaplanmaktadır.

Bu basitleştirmeler ile bile gerçek zamanlı dalga tahmini için güçlü bilgisayarlar gerekmektedir. Bundan dolayı bir çok ikinci nesil model hala operasyonel kullanımdadır. İkinci nesil sayısal dalga modellerinde, lineer olmayan etkileşim parametrelendirilmiş ya da basit yollarla çözülmüştür. Bu, modeller arasında belirgin farklara neden olabilmektedir.

4.2.3.5 Yayılma

Dalga enerjisi dalgaların ya da dalga kretlerinin hızı (faz hızı,; fazın sabit olduğu durumdaki hız) ile değil dalga grup hızı ile yayılmaktadırlar. Dalga modellemesinde enerji yoğunluğu gibi tanımlayıcılar ile ilgilenilmektedir ve bunun için dalga grup hızı daha önemli olmaktadır.

Su dalgalarının yayılma etkileri, enerji değişiminin yerel miktarının bu bölgeye ya da bölgeden olan enerjinin net enerji akımı miktarına eşit olmasına dikkat edilmesi ile belirlenir (enerji yoğunluk akısının diverjansı). Bilgisayar modellemesinde karşılaşılan problem bu hesaplama için bir sayısal planın belirlenmesidir. Basit (elle çözüm yöntemleri) modellerde, yayılma yalnızca üreme alanının dışında dikkate alınır ve dalga yayılırken dalga dispersiyonu ve saçılımı üzerinde yoğunlaşılır.

Yayılma, dalgaların gelişimini bölgeden ayrılan ve bölgeye giren enerji arasındaki denge yoluyla etkilemektedir. Sayısal bir dalga modelinde, bu olay feç limitli durumların modellenmesini sağlayan dalga enerjisinin yayılımıdır (WMO, 1998).

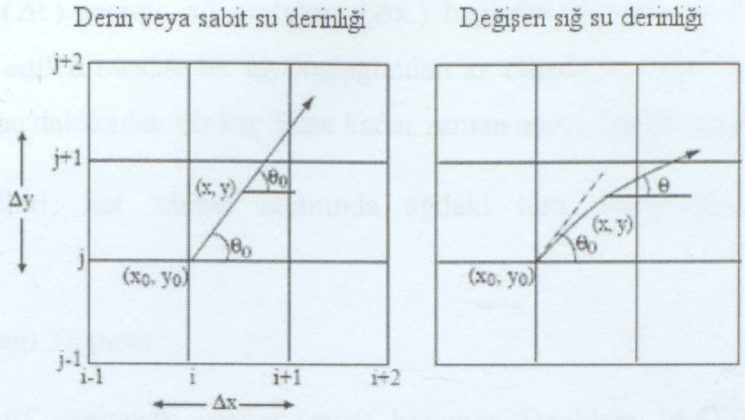
Kesikli ağ yöntemleri (Discrete-grid methods)

Enerji dengesi (Denklem 4.51), genellikle Şekil 4.17'de görüldüğü gibi bir ayrık ağ sistemi üzerinde sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmektedir. Δ_{xi} (i=1,2) yatayda iki nokta arasında ağ aralığıdır. Denklem (4.51) aşağıdaki formda yazılabilir.

$$E(x,t+\Delta t) = E(x,t) - \Delta t \sum_{i=1}^{2} \left[\frac{(c_g E)_{x_i} - (c_g E)_{x_i - \Delta x_i}}{\Delta x_i} \right] + \Delta t S(x,t) \qquad (4.55)$$

burada Δt zaman adımı; E ve S dalga numarasının veya frekans ve yönün (f,θ) fonksiyonlarıdır.

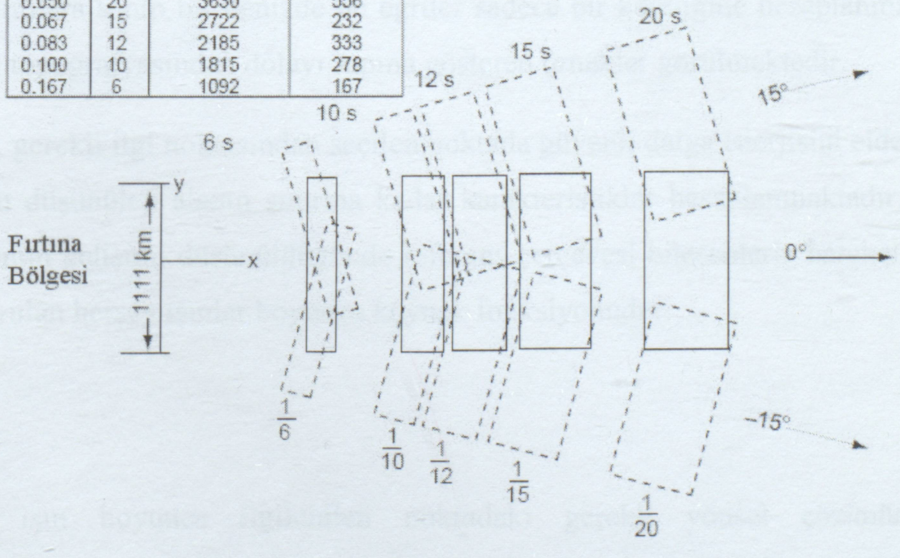
$E(f,\theta)$ spektrum gösteriminin kullanılması ile frekans yön kutularının bir dizilişi olarak enerji yoğunluğuna sahip olunmaktadır. Yukarıdaki yaklaşım, bir tekil frekans kutusuna çok az farklı grup hızlarındaki hareket eden dalga bileşenlerinin sürekliliğini sağlamaktadır.



Şekil 4.17 Sayısal dalga modeli için çözüm ağı

Deniz dalgalarının dispersiv karakterinden dolayı, içinde $(\Delta f, \Delta\theta)$ bileşenlerini içeren kutunun alanı dalgalar orijinden yayıldığında zamanla büyümeye başlamaktadır. Bu kutudaki dalga enerjisi $\Delta\theta$ genişliğindeki bir yay boyunca yayılacak ve grup hızına bağlı olarak genişleyecektir, böylece bileşenler model alanında yayıldıklarında bileşenler ayrılmaktadır. Bu durum bir bahçe fıskiyesindeki damlacığın hareketine benzediğinden dolayı "sprinkler (fıskiye)" etkisi olarak bilinmektedir. Bunun sadece modelleme yönteminin bir becerisi olduğu vurgulanmalıdır. Genellikle sürekli üremenin düzeltici etkisinin potansiyel zararlı etkileri azaltmasına ya da bir sayısal hata (nümerik difüzyon) sonucu olarak düzeltilmesine rağmen tüm ayrık-ağ modelleri sprinkler etkisine izin vermektedir (Şekil 4.18).

Frekans	Periyot	Alınan mesafe (km)	Bozulma mesafesi (km)
0.050	20	3630	556
0.067	15	2722	232
0.083	12	2185	333
0.100	10	1815	278
0.167	6	1092	167



Şekil 4.18 Fırtına bölgesinden ayrık spektrum bileşenlerinin yayılımı

Zaman adımının (Δt) seçimi, ağ aralığına (Δx) bağlıdır. Sayısal stabilite için bir zaman adımında hareket edilen mesafe bir ağ boşluğundan az olmalıdır. Tipik modeller 20-200 km ağ aralığı ve bir kaç dakikadan bir kaç saate kadar zaman adımı kullanmaktadır.

Ayrık ağ modelleri, her zaman adımında ağdaki tüm noktalarda bütün spektrumu hesaplamaktadır.

Işın İzi (Ray tracing) Yöntemi

Diğer bir alternatif yöntemde ışınlar (rays) boyunca Denklem (4.51)'deki enerji denge denklemini çözmektir. Zamanın integrasyonu hala sonlu farklar ile yapılmaktadır fakat uzamsal integrasyon gerekmemektedir ve sprinkler etkisi önlenmektedir. Ancak, çıktı noktalarının sayısı genellikle hesaplama zorluklarından dolayı azalmaktadır.

Deniz dalgaları için dalga frekansı ve dalga numarası ile ilişkili olarak dispersiyon bağıntısı şu şekilde verilmektedir.

$$f(x,t)=\sigma\left[k(x,t),\psi_i(x,t)\right] \tag{4.56}$$

burada σ, dalga numarası (k) katılımı ile belirli frekansı göstermek için kullanılır ve ψ_i ortam özelliğidir (su derinliği ve akıntılar). Karakteristik eğrileri aşağıdaki ifadenin integrasyonu ile elde edilmektedir

$$\frac{dx}{dt}=c_g=\frac{d\sigma}{dk} \tag{4.57}$$

ve kararlı akıntılara sahip bir denizde bu eğriler sadece bir kereliğine hesaplanmalıdır. Şekil 4.17'de taban topoğrafyasından dolayı sapma gösteren örnekler görülmektedir.

Sonuç olarak, gerekli ilgi noktasından seçilen noktada güvenli dalga enerjisini elde etmek için yeterli olduğu düşünülen alanın sınırına kadar karakteristikler hesaplanmaktadır. Belirli bir dalga frekansının gelişimi düşünüldüğünde referans çerçevesi bileşenlerle hareket etmektedir ve ihtiyaç duyulan herşey ışınlar boyunca kaynak fonksiyonudur.

$$\frac{\partial E}{\partial t}=S_t \tag{4.58}$$

Işınlar, her ışın boyunca ilgilenilen noktadaki gerekli yönsel çözünürlüğe göre hesaplanmaktadır; Denklem (4.58) her frekans için ayrı yarı çözülebileceği gibi tüm enerji için de çözülmektedir.

Işın yaklaşımı rüzgar dalgası ve soluğanın ayrı ayrı çözüldüğü modellerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2.3.6 Yönsel Sakinleşme (Directional Relaxation) ve Rüzgar Dalgası/Soluğan Etkileşimi

Sayısal dalga modellerinin sonuçları arasındaki farklılıkların çoğu lineer olmayan dalga-dalga etkileşimini (S_{nl}) elde etme yollarından kaynaklanmaktadır. Farklılıklar özellikle homojen ve durağan olmayan rüzgar alanlarında daha gözle görülür olmaktadır. Rüzgar yönü değiştiğinde mevcut rüzgar dalgası kısmen soluğana dönüşmekte ve yeni rüzgar dalgaları oluşmaktadır. Bu bileşenlerin zamanla gelişimi, sonunda yeni rüzgar yönünde tam gelişmiş deniz durumuna ulaşacak olan yeni bir kararlı duruma doğru dalga alanının sakinleşmesi ile sonuçlanmaktadır.

Üç mekanizma yönsel sakinleşmede etkili olmaktadır:

(a) Yeni oluşan rüzgar dalgasına rüzgardan enerji girişi;

(b) Soluğan dalgasının sönümlenmesi; ve

(c) Soluğandan rüzgar dalgasına enerji transferi ile sonuçlanan zayıf lineer olmayan etkileşimler.

Bu mekanizmaların modellenme yolları modeller arasında belirgin farklara neden olabilmektedir. Olayda üçüncü mekanizma daha etkin olarak görülmektedir.

4.2.3.7 Derinlik

Su derinliği dalga özelliklerini ve dalgaların nasıl modelleneceğini önemli ölçüde etkilemektedir. Su derinliği dalga boyunun yaklaşık dörtte birinden daha az olduğunda dalgalar deniz tabanından belirgin olarak etkilenmekte ve değişmektedir. Geniş bir dalga spektrumuna sahip bir denizde, daha uzun dalgalar kısa dalgalar kadar olmasa da derinlikten etkilenebilmektedirler.

Derinliğin diğer bir önemli etkisi de yayılma karakteristikleri üzerinde olanlarıdır. Bu etki ile dalgalar yavaşlar ve deniz tabanı düz değil ise sapmaya uğrayabilmektedirler. Ayrıca lineer olmayan etkileşimler artma eğilimindedir ve deniz tabanı ile etkileşimden dolayı enerji kaybı da artmaktadır.

4.2.3.8 Sınırlar, Kıyı çizgileri ve Adaların Etkileri

Global modellerin dışında, mevcut dalga modellerinin çoğu açık bir deniz sınırına sahiptir.

Dalga enerjisi daha sonra modellenen bölgeye girebilir. En iyi çözüm, daha büyük alanlarda kullanılan (örn. bir global model) bir modelden sınır verilerinin elde edilmesidir. Eğer model alanına giren dalga enerjisi ile ilgili hiç bir bilgi yok ise, olası bir sınır koşulu her zaman sınırlardaki enerjinin sıfır olmasına izin vermektir. Her iki durumda da uzak mesafelerde üreyen soluğan dalgalarını doğru biçimde belirlemek oldukça zordur. Bundan dolayı, ilgi alanına etki eden bütün belirgin soluğan dalgalarının yakalanması için alanın yeterince geniş olması gerekmektedir.

Ağ aralıklarının 25-400 km aralığında olduğu operasyonel modellerde adaların ve kıyı çizgilerinin doğru bir şekilde sunulması oldukça zor olmaktadır. Kaba (coarse) bir çözünürlük kullanıldığında dalga ya da burundan dolayı meydana gelecek etkiler görülmeyecektir. Bu gibi bölgeler yakınındaki deniz koşullarının daha güven veren gösterimlerinin elde edilmesi için daha özel önlemlerin alınması gerekmektedir. Belirli alanlar için daha hassas bir ağ kullanılması bir çözüm olabilmektedir. Kaba ağ boyutlarından elde edilen sonuçların hassas (fine) ağ için sınır değerleri olarak kullanıldığı bu model "nested" model olarak isimlendirilir. Yönsel çözünürlüğü arttırmak için de bu çözüm gerekli olabilmektedir. Diğer bir yol ise, belirli sayıda ağ noktasında etkilenen dalga yönleri ve modelde bunların "fudge factors (düzeltme faktörleri)" olarak listelenmesi için topoğrafik özelliklerin etkilerini değerlendirmek olabilmektedir.

4.2.4 Model Sınıfları

Dalga modelleri coğrafi bir bölge üzerinde Denklem (4.51)'in sayısal integrasyon ile çözülmesi ile dalga spektrumunu hesaplamaktadır. Modeller bir çok yönden farklılık gösterebilmektedirler, örneğin spektrumu temsil etme şekilleri (S_{in} ve S_{ds}'nin kabul edilen formları) farklı olabilmektedir ya da formüllerdeki integrasyonların çözümünde kullanılan basitleştirme tekniklerinde farklılıklar bulunabilmektedir.

Model için en zor terim S_{nl} lineer olmayan kaynak terimidir. Bu zorluğun kategoriler arasındaki farklılıkların tanımlanmasında olduğu bulunmuştur.

Enerji denge denklemindeki (Denklem 4.51) S_{nl} interaktif terimi bileşenleri birleştirmektedir. Çok sayıda bileşen (ya da tüm bileşenlerin) ile formülleştirilen bir lineer olmayan terim ile ayrık spektrum bileşenlerine bağlı olan modeller coupled discrete (birleştirilmiş kesikli) (CD) modeller olarak isimlendirilir. Bir çok modelde her bir bileşenin gelişimini hesaplayabilmek için tüm bileşenlerin değerlendirmelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu modellerin hesaplamaları genellikle zaman alıcı olmaktadır. Bundan dolayı bazı modelleyiciler birleştirme teriminden vazgeçmeyi tercih etmektedirler ve formüllerine S_{in} + S_{ds} için zayıf lineer olmayan etkileşimleri dolaylı olarak dahil etmektedirler. Bu modellere "decoupled propagation" modeller (DP) denmektedir. Tüm bileşenler bağımsız olarak hesaplanabilmektedirler. Bu sınıftaki gelişmiş modeller S_{nl} için basit bir parametrik form içermektedirler.

Üçüncü bir tip model ise gelişmekte olan denizlere ait spektrumun lineer olmayan etkileşimler ile şekillendiği ispatına dayanır (örn. JONSWAP). Spektrumun şekli az sayıdaki parametre ile karakterize edilir ve bu terimlerin içinde enerji denge denklemi yazılabilmektedir. Bu yaklaşım gelişim denklemini çok sayıdaki bileşen için bir tane yerine az sayıdaki parametrelerin hepsi için vermektedir. Ancak bu parametrik temsil deniz dalgası spektrumunun kendine benzerlik formu (self-similar form) için geçerlidir ve üreme bölgesinin dışındaki dalgalar (soluğan) özel bir çözüm gerektirmektedir. Bu çözüm genellikle parametrik modele müdahale edilerek sağlanır. Rüzgar dalgası decoupled propagation model ile soluğan için ise rüzgar dalgası ve soluğan enerjilerinin değiştirilmesi ile bir dizi algoritma kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu tip modeller "coupled hybrid" (CH) modeller olarak isimlendirilir.

Modeller S_{nl} lineer olmayan kaynak terimini kullanım şekillerine göre birinci, ikinci ve üçüncü nesil modeller şeklinde de sınıflandırılmaktadırlar.

- Birinci nesil modellerde belirgin bir S_{nl} terimi bulunmamaktadır. Lineer olmayan enerji transferi dolaylı olarak S_{in} ve S_{ds} terimleri ile ifade edilmektedirler.
- İkinci nesil modeller parametrik yöntemler kullanarak S_{nl} terimini ele almaktadırlar. Örneğin frekanslar boyunca enerjiyi yeniden düzenlemek için (dalga gelişimi ve enerji kaybından sonra) bir referans spektrumunun (JONSWAP veya Pierson-Moskowitz spektrumu gibi) uygulanması ile.
- Üçüncü nesil modeller lineer olmayan enerji transferini dolaylı olarak hesaplamaktadırlar ve hesaplamaları kolaylaştırmak için hem analitik hem de sayısal yaklaşımlar yapmak gerekmektedir.

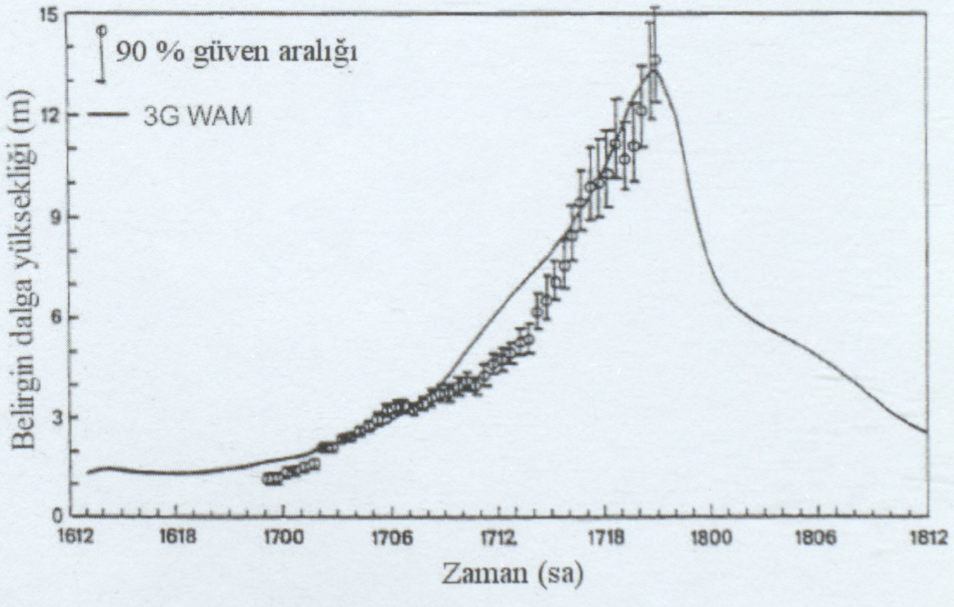
Çok sayıda operasyonel birinci ve ikinci nesil dalga modelinin sonuçlarının karşılaştırılması SWAMP (1985) çalışmasında yapılmıştır. Birinci ve ikinci nesil dalga modelleri birçok rüzgar koşulunda uygun sonuçlar vermesi için kalibre edilebilmektedir fakat bu karşılaştırma çalışmasında özellikle doğru tahmin edilmesi son derece önemli olan ekstrem rüzgar ve dalga koşullarında bir çok eksiklik belirlenmiştir. Modeller arasındaki en büyük fark bir fırtınadaki aynı rüzgar alanlarındaki model sonuçlarında gözlenmiştir. Modeller maksimum dalga yüksekliğini 8 – 25 m aralığında vermişlerdir.

SWAMP çalışmasında gözlenen farklılıkların bir sonucu olarak ve de bilgisayarların gücünün

daha da artması ile bilim adamları dalga gelişiminde tanımlanan mekanizmaların tümünü hesaplayan yeni bir üçüncü nesil dalga modeli geliştirmeye başlamışlardır. Bunlardan bir tanesi de WAM (Wave Modelling) grubu olarak bilinen uluslararası bir gruptur.

Yapı olarak üçüncü nesil dalga modelleri benzerlik göstermektedirler, dalga gelişiminin fiziğinin en ileri düzeydeki bilgilerini sunmaktadırlar. WAM modelinde başlangıç formülleri için rüzgar girdi terimi S_{in} U_5 yerine u_* kullanılarak Snyder vd. (1981)'den alınmıştır. Daha sonra Janssen (1991) tarafından verilen ve ortalama akım üzerinde gelişen dalgaların etkilerini içeren yarı lineer bir formül bu formülün yerini almıştır. Enerji kaybı kaynak fonksiyonu, S_{ds}, Komen vd. (1984) tarafından önerilen formda uygulanmıştır. Lineer olmayan dalga etkileşimleri S_{nl} hesabında Hasselmann vd. (1985)'nin ayrık etkileşim (discrete-grid methods) yaklaşımı kullanılmıştır. Model hem derin deniz hem de sığ su modeli olarak kullanılabilmektedir.

Diğer modeller; dalga yayılımında kullandıkları yöntemler, lineer olmayan kaynak terimi S_{nl}'nin hesabında kullandıkları yöntemler ve bunun sonucunda bu etkileşimlerin sığ su etkileri ile ilişkisi ve dalga gelişimi üzerinde akıntıların etkileri gibi olaylarda farklılık gösterebilmektedirler.



Şekil 4.19 Camille Kasırgası (1969) sırasında hesaplanan ve gözlenen dalga yüksekliklerinin karşılaştırılması. Fırtınanın büyüklüğünden dolayı dalga sensörü kullanılamaz hale gelimiştir (WAMDI Group, 1988)

WAM modeli ekstrem dalga ve rüzgar koşullarında iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 4.19'da

1969 da Meksika Körfezi'nde görülen Camille Kasırgası sırasında gözlenen dalga yükseklikleri ile model sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir.

Modelde ağ boyutları enlem ve boylamda 1/4°'dir. Karşılaştırma karmaşık ve değişen bir rüzgar koşulunda model performansının iyi olduğunu göstermektedir.

5. PARAMETRİK DALGA MODELLEMESİ

5.1 Giriş

Çeşitli kıyı ve açık deniz problemlerinin çözümlenmesi için uzun dönemli yönsel dalga verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dalga parametrelerinin uzun dönemli ölçülmesi pahalı ve zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle dalgalar genellikle geçmişteki rüzgar ve basınç verileri kullanılarak çeşitli yöntemler ile tahmin edilmektedirler.

Dalga ölçümünün mevcut olduğu Karaburun, İstanbul Boğazı'nın Karadeniz'e açıldığı bölgenin yaklaşık 40 km batısında yer almaktadır (Şekil 5.1), batısında Terkos Gölü olup İstanbul nüfusunun büyük bölümünün su ihtiyacını karşılayan bu göl deniz ile birleşme tehlikesi bakımından son derece kritik durumdadır, doğusunda ise plaj ve maden ocakları olup bu ocaklardan dolayı deniz sürekli kum ile beslenmektedir. Karaburun morfolojik açıdan oldukça hareketli olan 4 km'lik uzun bir kıyı şeridine sahiptir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1 Karaburun'un coğrafi konumu

Türkiye'nin batı karadeniz kıyısında yer alan Karaburun'da dalga iklim çalışmaları için yaklaşık 8.5 aylık dalga verisi mevcuttur. Kısa dönemli ölçümlerin mevcut olması durumunda bu ölçümlerin uzun dönemlere uzatılması da rüzgar verileri kullanılarak yapılabilmektedir. Bu nedenle bu 8.5 aylık dalga ölçümlerinden faydalanılarak ölçüm olmayan dönemlerde dalga

tahmini yapılmaya çalışılacaktır. Dolayısıyla rüzgar verilerinden faydalanılarak doğru dalga verilerinin elde edilebilmesi için kullanılacak rüzgar verilerinin güvenilirliği önemlidir. Bundan dolayı, bölgeye ait rüzgar verileri dalga tahmininde kullanılmadan önce bu verilerin doğruluğundan emin olunmalı ve dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.



Şekil 5.2 Karaburun sahil şeridi (Çevik vd., 2006)

5.2 Rüzgar Verilerinin Değerlendirilmesi

Karaburun bölgesine ait uzun dönemli dalga parametrelerinin hesaplanması için yapılan dalga tahmin çalışmasında Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan Ocak 1990 - Eylül 2005 tarihleri arasındaki rüzgar verileri kullanılmıştır. Fakat Şekil 5.3'te de görüldüğü gibi Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun çalışma bölgesi arasında mesafeden dolayı Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerinin Karaburun bölgesindeki dalga tahmin çalışmasında kullanılabilmesi için bu verilerin Karaburun'daki rüzgar iklimini tam olarak yansıtıp yansıtmadığının araştırılması ve doğrudan dalga tahmininde kullanılmasından önce verilerin doğruluğundan emin olunması yapılan çalışmanın sonuçlarının doğruluğu açısından son derece önemlidir.

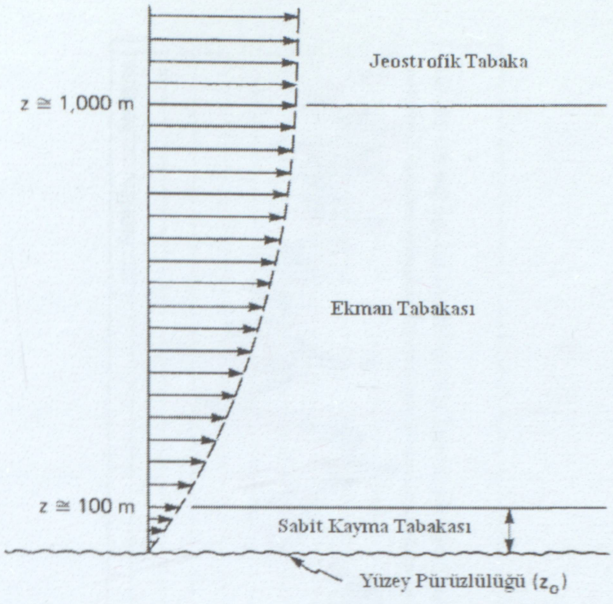
Bu dalga verilerinin doğruluğunun belirlenmesi için Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri daha önce bölgede yapılmış olan ve Haziran 2004 – Nisan 2005 dönemini içeren yaklaşık 11 aylık rüzgar ölçümü ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.3 Karaburun ölçüm noktası ve Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun coğrafi konumları

Rüzgar verilerinden dalga parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan tahmin yöntemlerinde genellikle deniz seviyesinden 10 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızlarının kullanılması gerekmektedir. Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait rüzgar verilerinin deniz seviyesinin 40 m, Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin ise deniz seviyesinin 62 m üzerinde olmasından dolayı bu verilerin karşılaştırılabilmesi ve bu çalışmada kullanılan yöntem ile dalga verilerinin elde edilmesinde kullanılabilmeleri için deniz yüzeyinden 10 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızlarının bulunması gerekmektedir.

Rüzgarlar yeryüzündeki sürtünme nedeniyle yavaşlarlar, bundan dolayı yükseklik arttıkça rüzgar hızında da artma gözlemlenmektedir. Dalga alanının üzerindeki rüzgar profili Şekil 5.4'deki gibi verilmiştir.



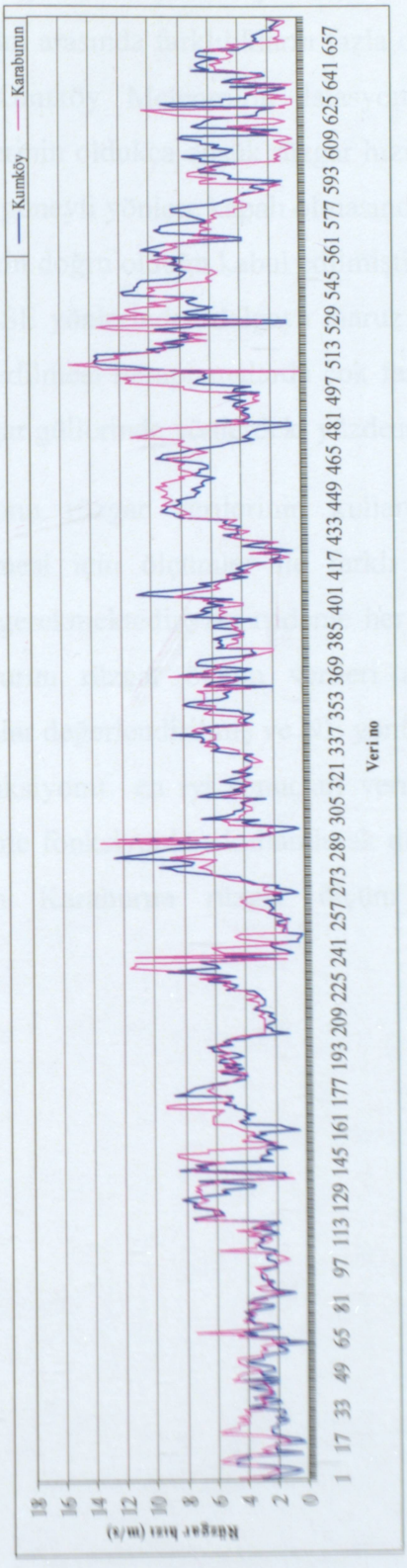
Şekil 5.4 Dalgaların üzerindeki atmosfer sınır tabakası (CERC, 1984)

Bitki örtüsü yüksekliği az ve düzgün araziler için aşağıdaki ifade kullanılarak farklı yükseklikteki rüzgar hızları belirlenebilmektedir (Rosen, 1998).

$$\frac{u_z}{u_{z0}} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^{1/7} \tag{5.1}$$

Burada, z rüzgar hızı belirlenmek istenen yüksekliği, u_z bu yükseklikteki rüzgar hızını, z_0 ve u_{z0} ise sırasıyla referans yüksekliğini ve o yükseklikteki rüzgar hızını göstermektedir.

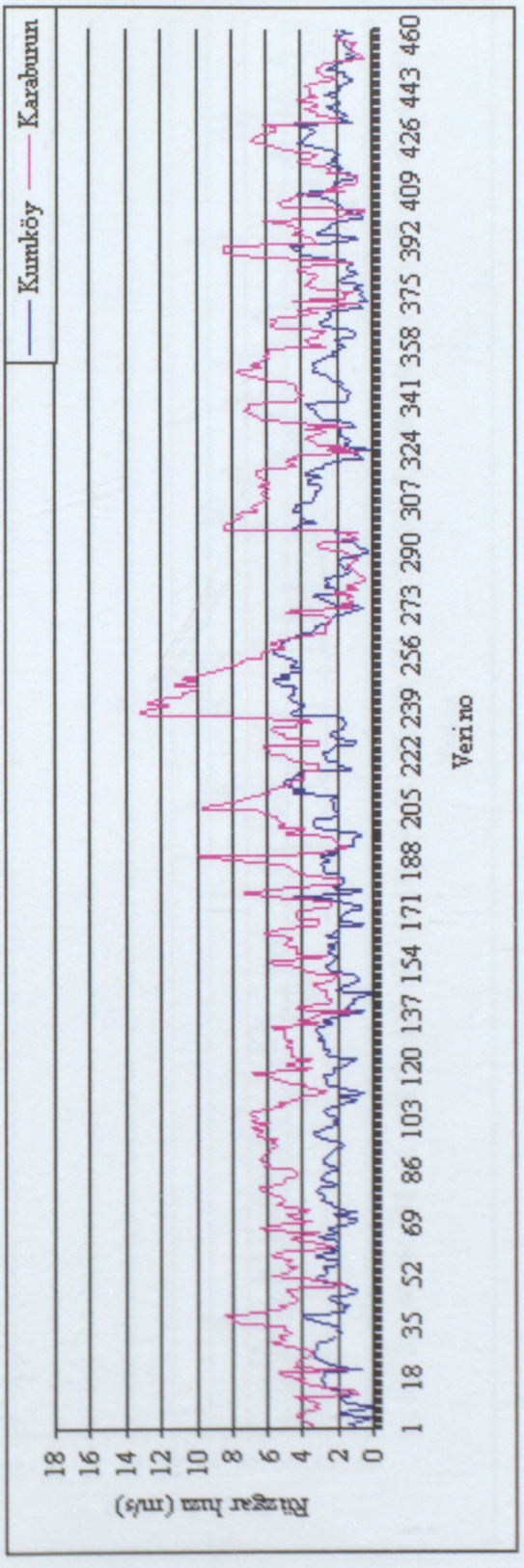
İki ölçüme ait veriler (deniz seviyesinden 10 m düşey mesafede) karşılaştırılarak değerlendirildiğinde bazı dönemlerde iki ölçüm arasında büyük farkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların nedenlerinin araştırılmasında öncelikle yönsel dağılım dikkate alınmıştır. Farklılıklarda herhangi bir sistematikliğin olup olmadığının araştırılması için veriler önce rüzgar yönlerine göre sınıflandırılmış ve o yönlere ait Kumköy Meteoroloji İstasyonu ve Karaburun ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Detaylı incelemeler, NW, NNW ve N yönleri için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin birbirlerine oldukça yakın değerler verdiklerini göstermektedir (Şekil 5.5). Şekil 5.5'te N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu ile Karaburun ölçüm verilerine ait rüzgar hızlarının karşılaştırılmasını görülmektedir (Çevik vd., 2006).



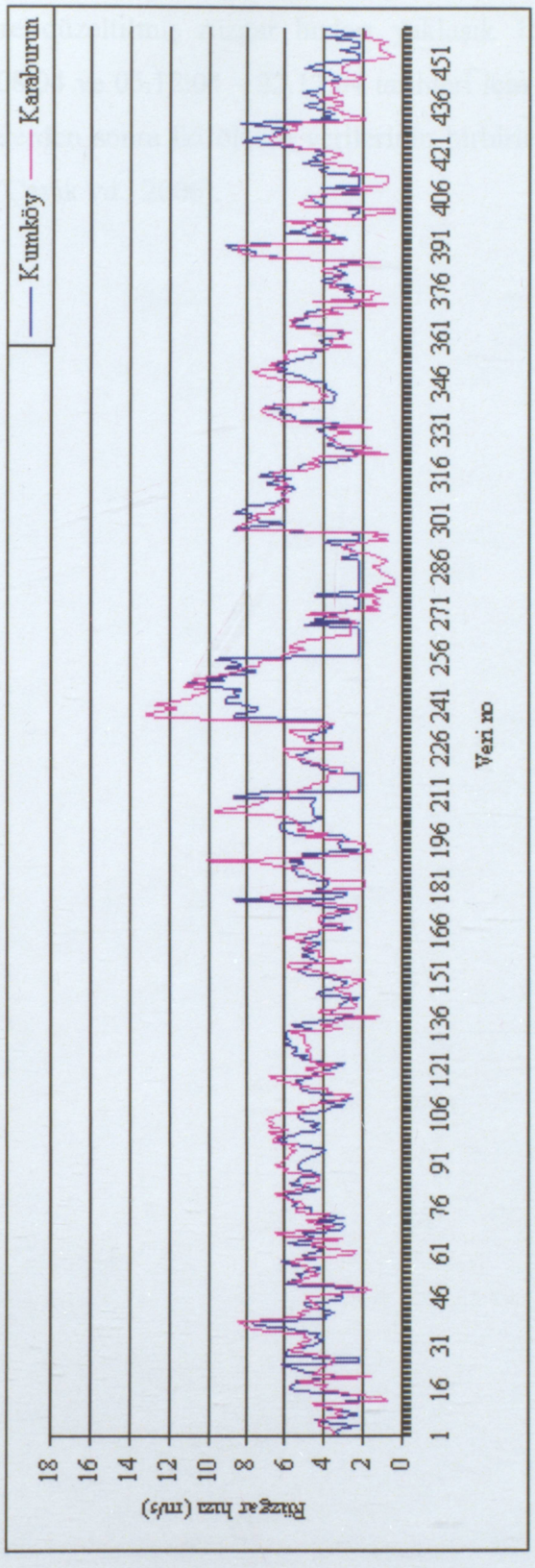
Şekil 5.5 N yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin karşılaştırılması

Diğer yönler (NW, NNW ve N yönleri dışındaki yönler) incelendiğinde WNW, NNE, NE , ENE ve E yönleri için iki ölçüm arasında farklılıkların fazla olduğu görülmüştür (Şekil 5.6), özellikle doğulu yönlerde Kumköy Meteoroloji İstasyonu'nun, güneyli yönlerde ise Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin oldukça düşük rüzgar hızı değerleri verdiği görülmüştür. Karaburun'daki rüzgar ölçerin güneyli yönlere kapalı olmasından dolayı bu yönlerde Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerinin doğru olduğu kabul edilmiştir (Çevik vd., 2006). Karaburun kıyı şeridi sadece WNW ve ESE yönlerinden dalgaya maruz kaldığından güneyli yönlerden esen rüzgarların doğru kabul edilmesi hesaplamalarda çok fazla hataya neden olmayacaktır. Burada yapılabilecek hata rüzgar güllerinde yönlerdeki yüzdesel hatadır.

Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin kullanılarak dalga parametrelerinin hesaplanmasında kullanılabilmesi için ölçümler ile farklı rüzgar hızı değerleri verdiği yönlerde düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu nedenle her yön için Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri arasında ayrı ayrı korelasyon kurulmuştur. Çeşitli fonksiyonlar değerlendirilmiş ve NE yönü için üstel, diğer yönler için ise ikinci dereceden polinom fonksiyonu en iyi sonuçları vermiştir (Çevik vd., 2006). Şekil 5.7'de E yönü için bu düzeltme fonksiyonları kullanılarak düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verilerinin Karaburun rüzgar ölçüm verileri ile karşılaştırılması görülmektedir.

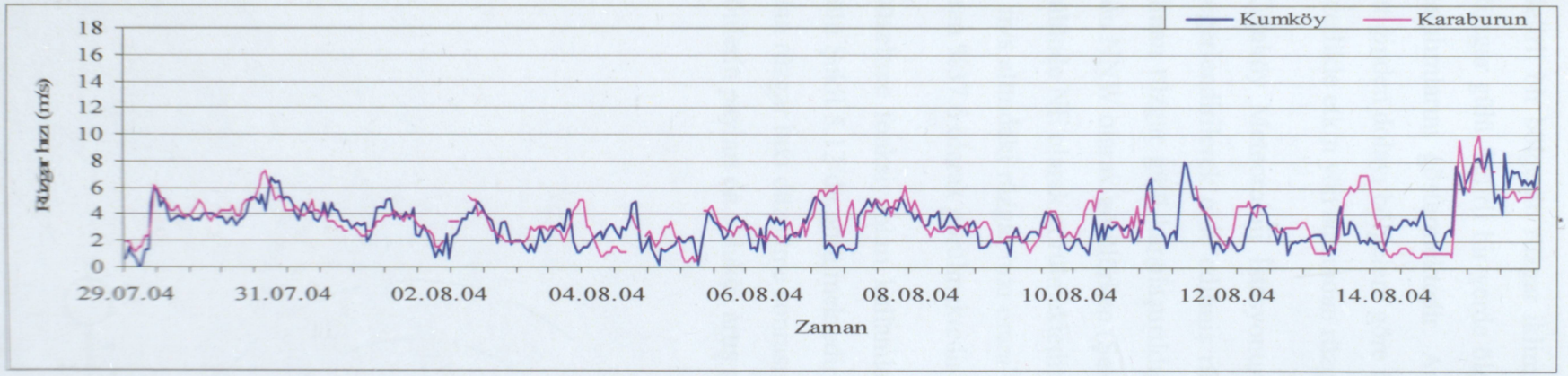


Şekil 5.6 E yönü için Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verilerinin karşılaştırılması

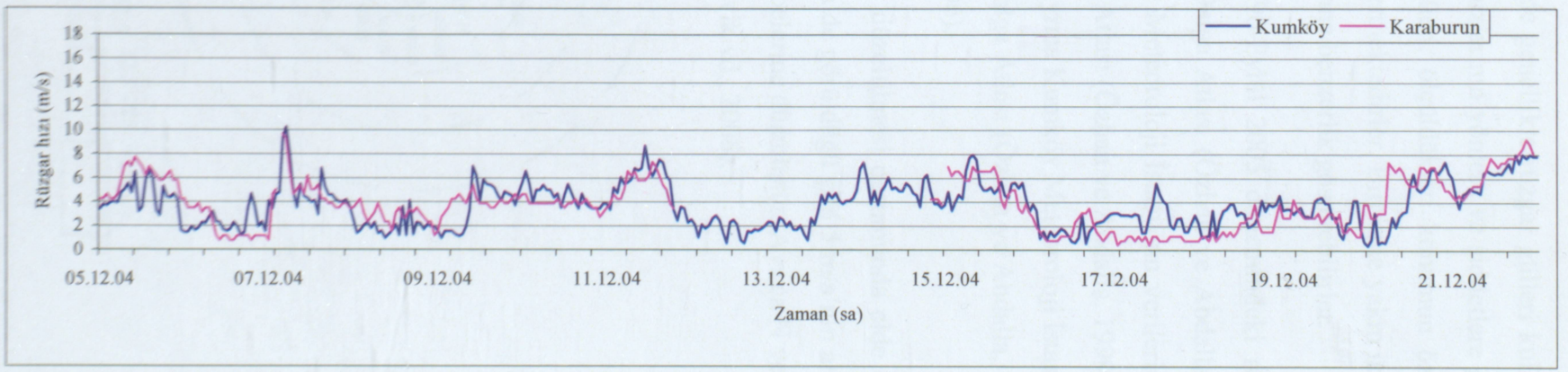


Şekil 5.7 E yönü için düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri

Şekil 5.8 ve 5.9'da tüm yönler için ayrı ayrı elde edilmiş olan korelasyon fonksiyonları kullanılarak yönlere göre düzeltilmiş rüzgar hızları yaklaşık 15'er günlük zaman serisi şeklinde 29.07.04 – 15.08.04 ve 05.12.04 – 22.12.04 tarihleri için verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi düzeltmelerden sonra iki ölçüm verilerinin birbirlerine çok daha fazla uyum sağladığı görülmektedir (Çevik vd., 2006).



Şekil 5.8 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri zaman serisi (29.07.04 – 15.08.2004) (Çevik vd., 2006)



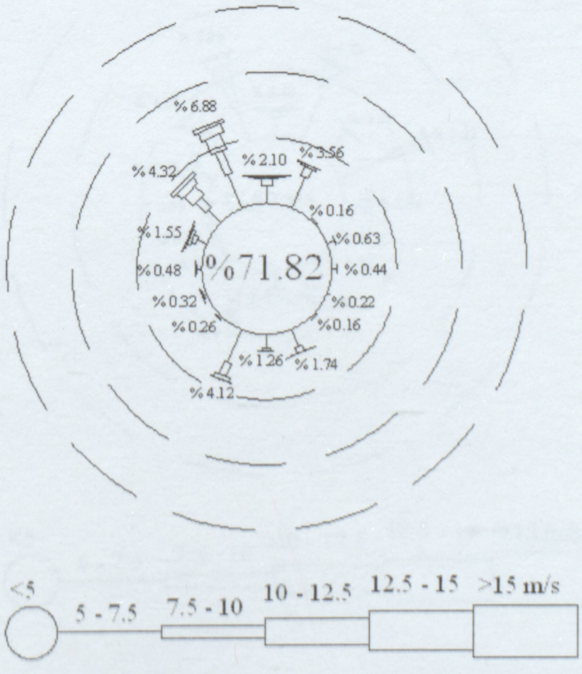
Şekil 5.9 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri ile Karaburun rüzgar ölçüm verileri zaman serisi (05.12.04 – 22.12.04) (Çevik vd., 2006)

5.2.1 Rüzgar İklimi

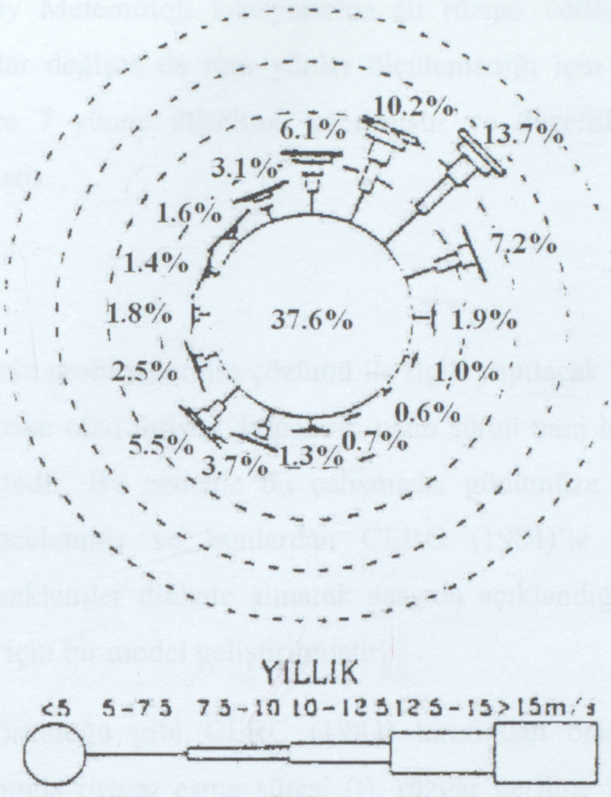
Belirli bir bölgenin rüzgar ikliminin gösteriminde genellikle rüzgar gülleri kullanılmaktadır. Rüzgar gülü, belirli bir yerde ölçülmüş rüzgar hızlarının yönlere ve şiddetlere göre yüzdesel dağılımlarını göstermektedir. Ancak rüzgar gülleri, ölçüldükleri konumun özelliğini ifade ettiğinden dolayı bölgelere göre farklılıklar göstermektedirler. Birbirine yakın iki bölgede ise, özellikle etkin yön açısından rüzgar gülleri birbirine benzerlik gösterebilirler.

Kumköy Meteoroloji İstasyonuna ait Ocak 1990-Eylül 2005 dönemindeki rüzgar verileri değerlendirilerek elde edilmiş rüzgar gülü ile Dalga Atlası (Özhan ve Abdalla, 1999)'ndan alınan rüzgar gülü karşılaştırıldığında, Kumköy Meteoroloji İstasyonu verilerine göre etkin yön NNW olarak görülürken (Şekil 5.10), Dalga Atlası (Özhan ve Abdalla, 1999)'ndaki dalga gülünde NE olarak görülmektedir (Şekil 5.11). Ayrıca Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na göre 5 m/s altındaki rüzgar hızı oranı %71.82 iken Dalga Atlası (Özhan ve Abdalla, 1999)'nda bu oran %37.6 olarak görülmektedir (Çevik vd., 2006).

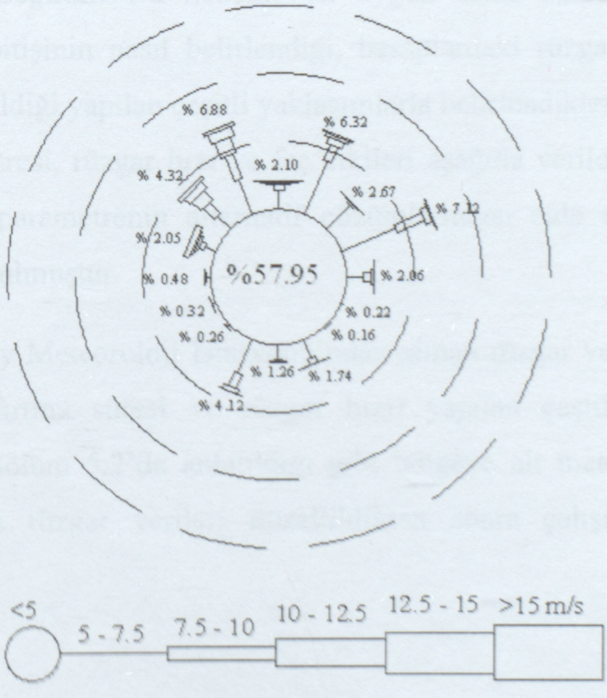
Düzeltme fonksiyonları kullanılarak rüzgarların düzeltilmesi durumunda elde edilen rüzgar gülü Şekil 5.12'de görülmektedir. Şekil 5.12'den de görüldüğü gibi 5 m/s'nin altında %71.82 olan rüzgar hızı düzeltme sonrasında %58 mertebelerine düşmüştür. Ayrıca N ve E arasındaki yönlerin payları da oldukça artış göstermiştir (Çevik vd., 2006).



Şekil 5.10 Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülü (Çevik vd., 2006)



Şekil 5.11 "Türkiye Kıyıları İçin Rüzgar ve Derin Deniz Atlası"na göre rüzgar gülü (Özhan ve Abdalla, 1999)



Şekil 5.12 Düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu rüzgar verileri kullanılarak elde edilen rüzgar gülü (Çevik vd., 2006)

Her ne kadar Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait rüzgar verileri mevcut ölçümler ile düzeltilmiş olup oranlar değişse de tüm yönler ölçülemediği için tüm yönlerde düzeltme yapılamamıştır. Sadece 7 yönde düzeltme yapılmıştır ve düzeltilmiş veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

5.3 Dalga Tahmini

Çeşitli kıyı ve açık deniz problemlerinin çözümü ile ilgili yapılacak çalışmalarda uzun süreli ve sürekli dalga verilerine olan ihtiyaç dalgaların uzun süreli yani bir zaman serisi şeklinde tahminini gerektirmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, günümüze kadar geliştirilen dalga tahmin yöntemleri incelenmiş ve bunlardan CERC (1984)'te önerilen dalga tahmin yönteminde verilen denklemler dikkate alınarak aşağıda açıklandığı gibi dalgaların zaman serisi şeklinde tahmini için bir model geliştirilmiştir.

Çizelge 4.1'de de görüldüğü gibi CERC (1984) tarafından önerilen denklemler dalga parametrelerinin hesabında rüzgar esme süresi (t), rüzgar gerilme faktörü (U_A) ve yönlere göre feç uzunluklarını (F) kullanmaktadır. Dalga zaman serisi için geliştirilen bu yöntemin doğruluğu bu girdi parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesine bağlıdır. Ancak CERC (1984)'te verilen denklemlerin kullanılmasıyla dalga verilerinin doğrudan zaman serisi olarak belirlenmesi mümkün değildir. Bu nedenle en uygun esme süresinin belirlenmesi için fırtınanın başlama ve bitişinin nasıl belirlendiği, hesaplardaki rüzgar hızının ve etkili feç uzunluklarının nasıl seçildiği yapılan çeşitli yaklaşımlarla belirlendikten sonra hesaplamalarda kullanılmıştır. Fırtına süresi, rüzgar hızı ve feç etkileri aşağıda verildiği gibi önce ayrı ayrı irdelenmiş ve her bir parametrenin alternatif çözümlerinden elde edilen en iyi sonuçlar birleştirilerek model kurulmuştur.

Hesaplamalarda Kumköy Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan rüzgar verileri incelenip gerekli rüzgar parametreleri (fırtına süresi ve rüzgar hızı) yapılan çeşitli kabuller sonucunda belirlenmiştir. Ayrıca Bölüm 5.2'de anlatıldığı gibi bölgeye ait meteoroloji istasyonundan alınan saatlik ortalama rüzgar verileri düzeltildikten sonra çalışmanın bu bölümünde kullanılmıştır.

5.3.1 Fırtına Süresi

CERC (1984)'te fırtına süresi dalganın şiddetini ve doğrultusunu değiştirmeden kararlı olarak estiği süre olarak tanımlanmıştır. Ancak doğada rüzgarın bu şekilde kararlı olarak esmesi

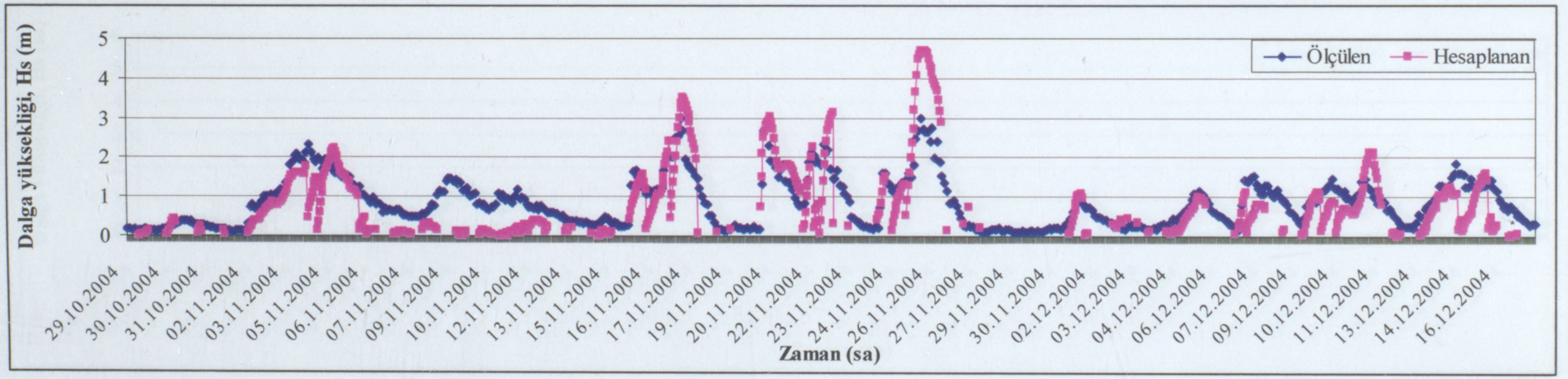
mümkün olmamaktadır. Rüzgarın şiddeti ya artıp azalmakta ya da doğrultusu değişmektedir ve bu değişimlerin anlık oldukları yapılan rüzgar ölçümlerinden de görülmüştür.

Fırtına süresinin belirlenmesi için literatürde genellikle iki kriter kullanılmaktadır. Bunlardan biri rüzgarın doğrultusunun değişmesidir. Rüzgar doğrultusunun belirli bir değerden (30°, 45°, 90° gibi) daha az yön değiştirmesi durumunda fırtınanın devam ettiği yani verilen kriterden daha fazla yön değiştirmesi durumunda ise o fırtınanın sona erdiği ve yeni bir fırtınanın başladığı kabulüne dayanmaktadır. Fırtınanın başlama ve bitişi arasındaki süre fırtına süresini vermektedir. Fırtına süresinin bu kriter ile belirlenmesi durumu için çeşitli sapma açıları bu sınır değer olarak denenmiş, bölgedeki dalga iklimini en iyi yansıtan sonuçları veren değer fırtınanın sona ermesi için limit sapma açısı değeri olarak belirlenmiştir.

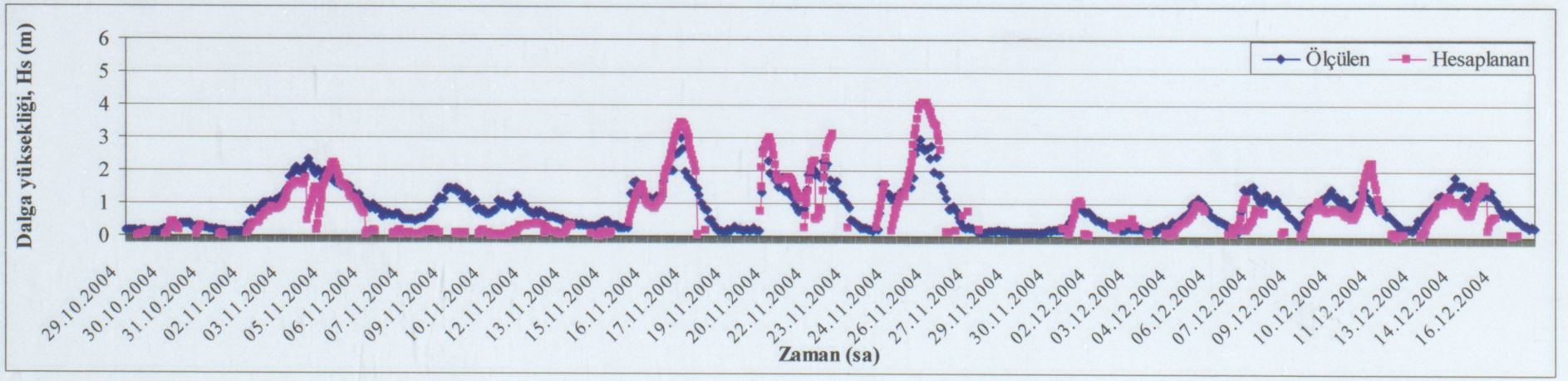
Diğer bir yaklaşım ise, rüzgar hızındaki değişimdir. Rüzgar hızındaki değişimin belirli bir değerden (2.5 m/s gibi) daha az olması durumunda fırtınanın devam ettiği kabul edilmektedir. Ancak birbirini takip eden saatlerdeki rüzgar hızındaki değişimin belli bir değerden fazla olması durumunda fırtınanın bittiği ve yeni deniz şartlarının geliştiği kabul edilmektedir. Yine bu şart fırtına süresini belirlemektedir.

Kumköy Meteoroloji İstasyonu'na ait saatlik ortalama rüzgar hızları incelendiğinde rüzgar hızlarındaki değişimlerin ani ve büyük olduğu görülmüş. Bundan dolayı fırtına süresinin belirlenmesinde rüzgar hızı kriterinin (ikinci yaklaşım) kullanılmasının uygun olmayacağı ve bu yaklaşım ile fırtına süresinin belirlenmesi durumunda elde edilen dalga parametrelerinin gerçeği tam olarak yansıtmadığı yapılan deneme çalışmalarında görülmüştür. Tüm bu etkiler bir arada değerlendirildiğinde rüzgar esme süresinin belirlenmesinde rüzgar yönü değişimini dikkate almanın daha uygun olacağı düşünülmüştür. Çalışmada çeşitli sapma açıları fırtınanın devamı ya da bitmesi için *kritik rüzgar yönü değişimi açısı*(θ_k) olarak kabul edilmiş, bu kabul ile hesaplanan dalga parametreleri ölçülen dalga parametreleri ile karşılaştırılarak en uygun olan değer fırtına süresinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

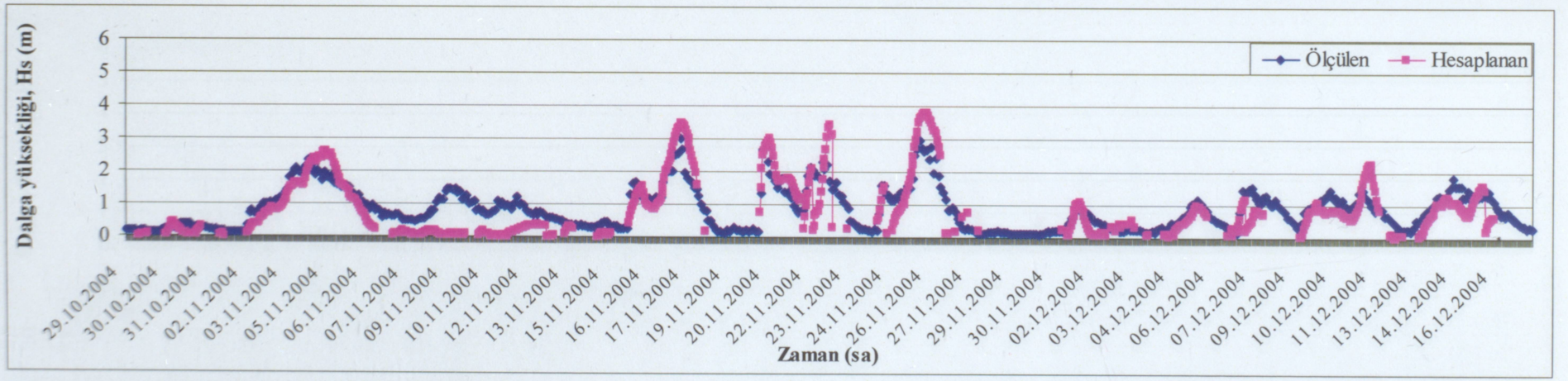
Çalışmada fırtına süresinin belirlenmesi için kritik rüzgar yönü değişim açısı değeri olarak 30°, 45°, 60°, 75°, 90° ve 105° olmak üzere altı farklı değer kullanılmış ve her biri için elde edilen fırtına süreleri kullanılarak dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Şekil 5.13-5.18'de kritik rüzgar yönü değişim açısı 30°, 45°, 60°, 75°, 90° ve 105° kabul edilerek yapılan hesaplamaların sonucunda elde edilen dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerinin zaman serisi şeklinde karşılaştırılmaları görülmektedir.



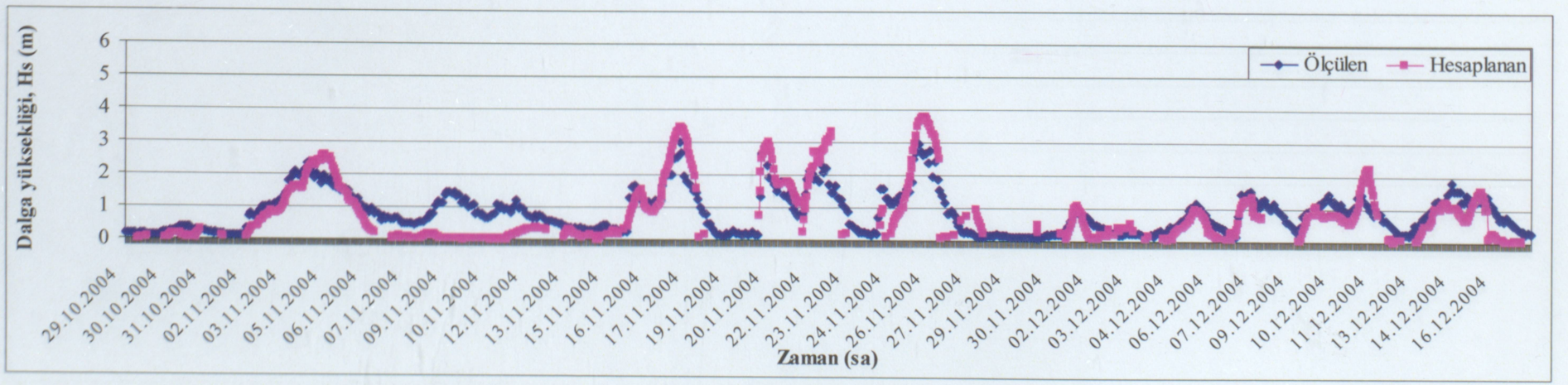
Şekil 5.13 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 30° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri



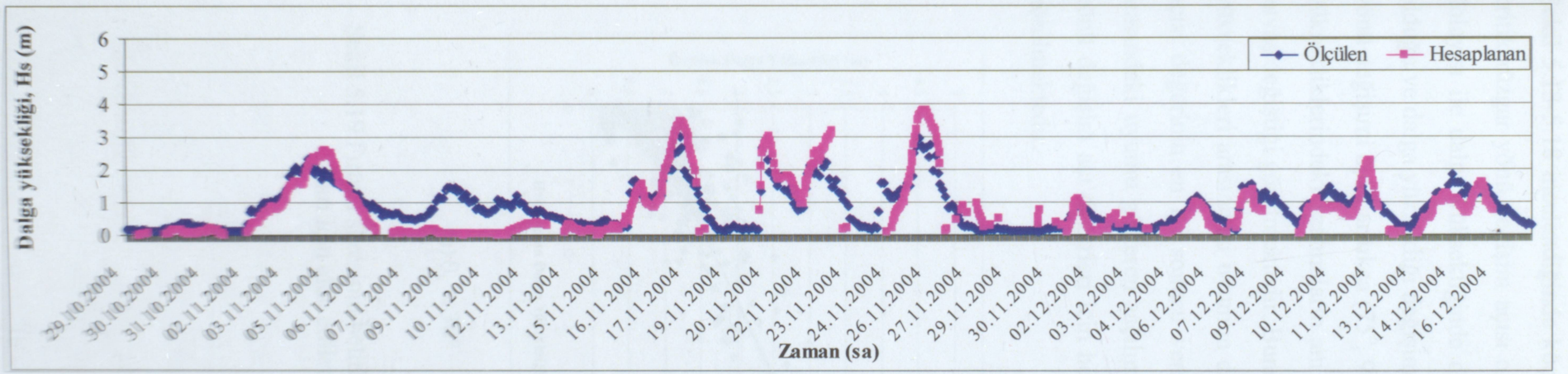
Şekil 5.14 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 45° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri



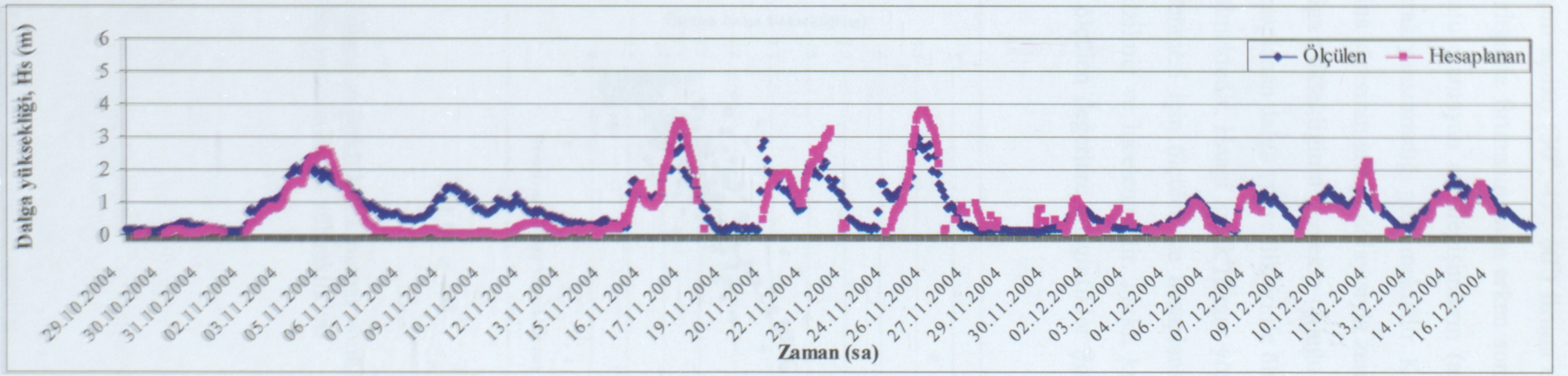
Şekil 5.15 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 60° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri



Şekil 5.16 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 75° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri

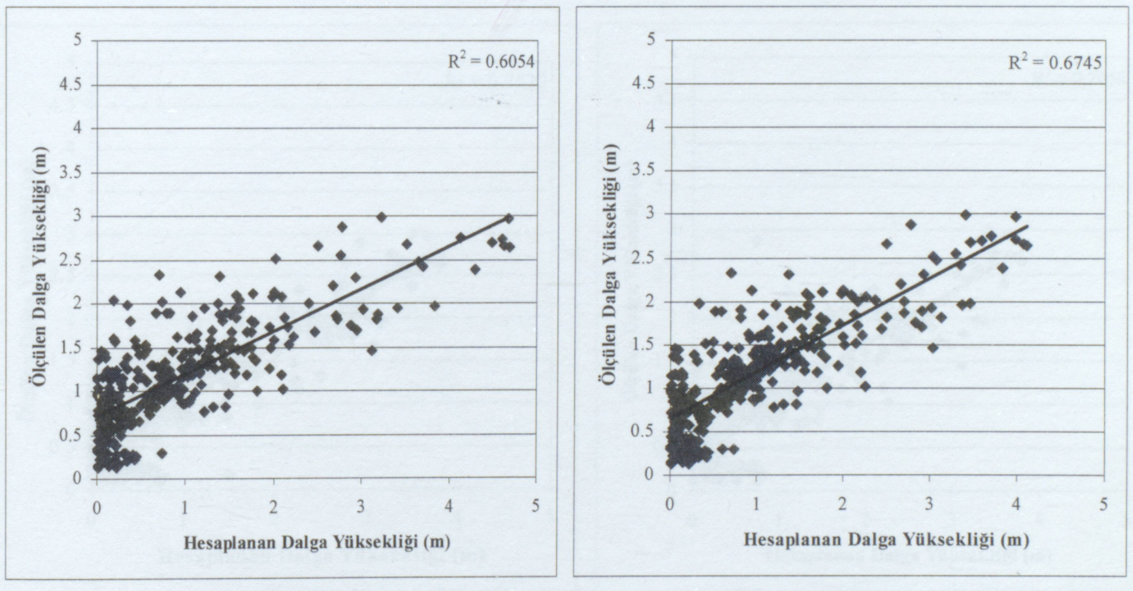


Şekil 5.17 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 90° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri



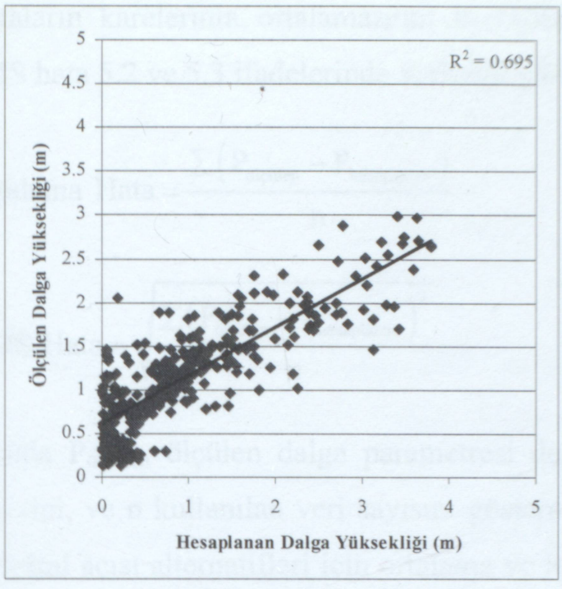
Şekil 5.18 Fırtınanın devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı 105° kabul edilerek hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri

Şekil 5.13-5.18 incelendiğinde küçük yön değişim açıları (30°, 45°, 60°) fırtına devamı için kritik rüzgar yönü değişim açısı olarak kullanıldığında fırtınanın daha erken sona erdiği ve dolayısı ile dalga yüksekliğinde doğa ile uyumlu olamayan ani değişimlerin (azalmaların) olduğu ve dalga yüksekliği değişimini doğru olarak yansıtmadığı görülmektedir. Kritik rüzgar yönü değişimi açısı arttıkça (75°, 90°, 105°) fırtına süresinin arttığı dolayısıyla zamanla dalga yüksekliklerindeki azalmaların ani olmadığı dalga yüksekliğinin gerçekte olduğu gibi yavaş yavaş değiştiği görülmektedir. Bundan dolayı hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki uyumun da arttığı görülmektedir. Hangi kritik rüzgar yönü değişim açısı değerinin en iyi sonucu verdiğinin belirlenmesi için ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki uyumu gösteren saçılım grafikleri çizilmiş ve incelenmiştir. Farklı kritik rüzgar yönü değişim açı değerleri için hesaplanan ve ölçülen değerlere ait grafikler Şekil 5.19'da görülmektedir.

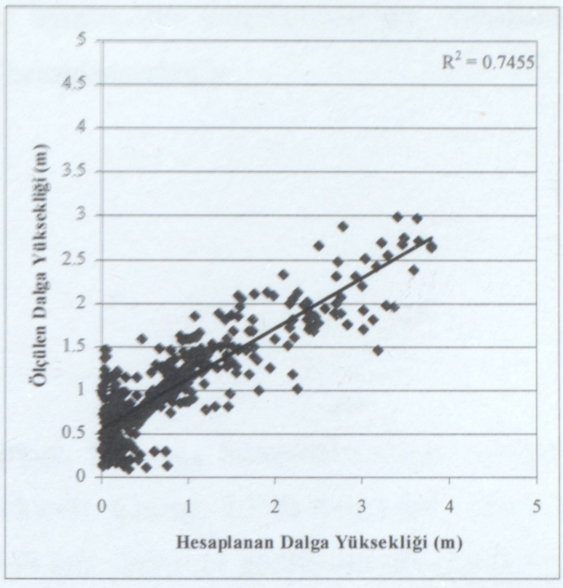


(a) $\theta_k = 30°$ (b) $\theta_k = 45°$

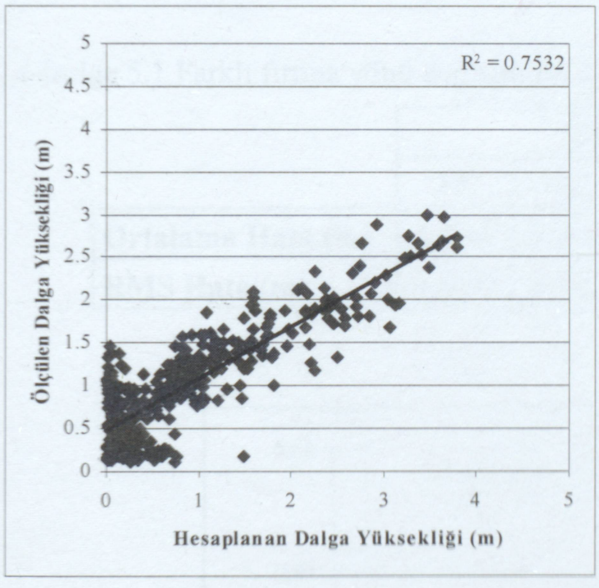
Şekil 5.19 Fırtına süresinin belirlenmesi için kullanılan farklı kritik rüzgar yönü değişim açıları için elde edilen sonuçlar ile hesaplanan dalga yükseklikleri



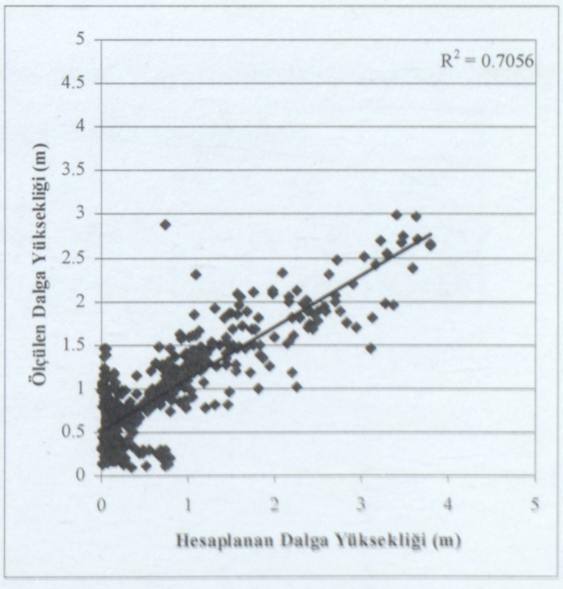
(c) $\theta_k = 60°$



(d) $\theta_k = 75°$



(e) $\theta_k = 90°$



(f) $\theta_k = 105°$

Şekil 5.19 Devam

Şekil 5.19'da en uygun kritik rüzgar yönü değişimi açısı değerinin bulunması için hesaplanan ve ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki uyumu gösteren saçılım grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde küçük kritik rüzgar yönü değişimi açısı değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda uyumun daha az olduğu, kritik rüzgar yönü değişim açısı değerleri arttığında uyumun da arttığı görülmektedir.

En iyi kritik rüzgar yönü değişim açısı değerinin belirlenmesi için ortalama ve RMS hata

(hataların karelerinin ortalamasının karekökü) belirlenerek karşılaştırılmıştır. Ortalama ve RMS hata 5.2 ve 5.3 ifadelerinde verildiği gibi hesaplanmaktadır,

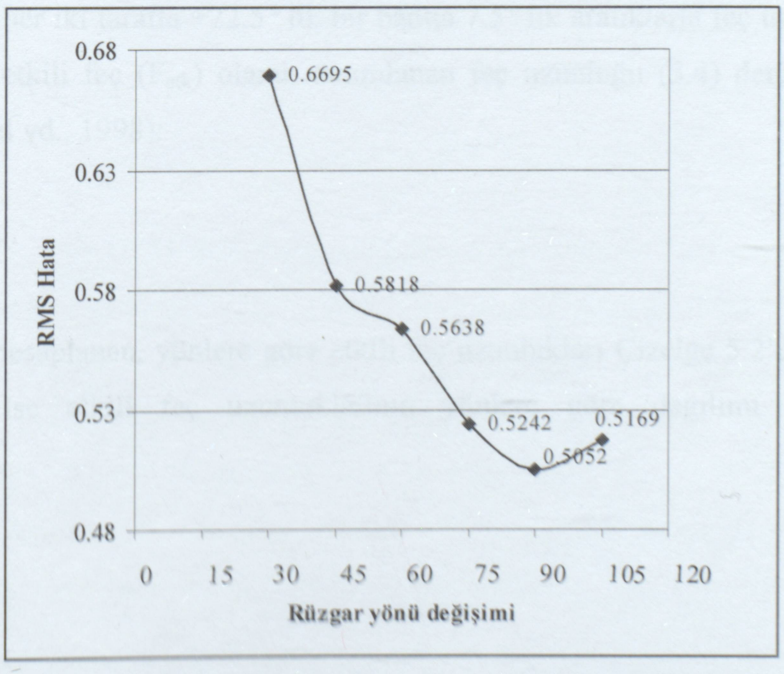
$$\text{Ortalama Hata} = \frac{\sum\left(P_{\text{ölçülen}} - P_{\text{hesaplanan}}\right)}{n} \tag{5.2}$$

$$\text{RMS Hata} = \sqrt{\frac{\sum\left(P_{\text{ölçülen}} - P_{\text{hesaplanan}}\right)^2}{n}} \tag{5.3}$$

Burada $P_{\text{ölçülen}}$ ölçülen dalga parametresi değerini, $P_{\text{hesaplanan}}$ hesaplanan dalga parametresi değerini, ve n kullanılan veri sayısını göstermektedir. Çizelge 5.1'de tüm kritik rüzgar yönü değişimi açısı alternatifleri için ortalama ve RMS hata değerleri görülmektedir Şekil 5.20'de ise farklı tüm kritik rüzgar yönü değişimi açısı alternatifleri için RMS hataların karşılaştırılmaları grafiksel olarak görülmektedir.

Çizelge 5.1 Farklı fırtına yönü değişimleri kullanılarak yapılan hesaplamalardaki hatalar

	Fırtına Yönü Değişimleri					
	30°	45°	60°	75°	90°	105°
Ortalama Hata (m)	0.234	0.2109	0.1948	0.1721	0.1423	0.1684
RMS Hata (m)	0.6695	0.5818	0.5638	0.5242	0.5052	0.5169



Şekil 5.20 Farklı fırtına yönü değişimleri için RMS hataların karşılaştırılması

Şekil 5.20'de de görüldüğü gibi en az hata, fırtınanın 90° yön değiştirdiğinde fırtınanın sona erdiği ve yeni deniz şartlarının oluştuğu kabulü yapıldığında olmaktadır. Dolayısıyla dalga parametrelerinin hesabında fırtına süresi için bu kabul yapılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

5.3.2 Feç Etkisi

Feç, rüzgarın dalgaları meydana getirdiği ve rüzgar hızı ile doğrultusunun yeterince sabit olduğu denizin üzerindeki yüzey alanına denir. Feç uzunluğu, üretilen dalgaların karakteristiklerini kontrol eden önemli bir faktördür. Dalgaların yükseklikleri ve periyotları feçin başlamasıyla minimumdan feçin artmasıyla mesafe büyüdükçe artmaktadır.

Dalga tahmin abaklarının hazne ve göllerdeki ilk kullanımlarında, hesaplanan dalga yüksekliklerinin gözlenenlere göre çok daha büyük oldukları görülmüştür. Bu sonuç, feçin kısıtlılığının dalga gelişimi üzerinde etkisinin olduğunu göstermiştir. Feçin kısıtlanması için hesaba alınan indirgenmiş feç uzunluğu etkili feç tanımını ortaya koymuştur. Yapılan bu düzenleme dalga tahmininin doğruluğunu arttırmıştır. Etkili feç kavramının kullanılmasının nedeni SMB abaklarının feçin küçük değerleri için dalga yüksekliğini olduğundan daha fazla tahmin etmesindendir (CERC, 1984).

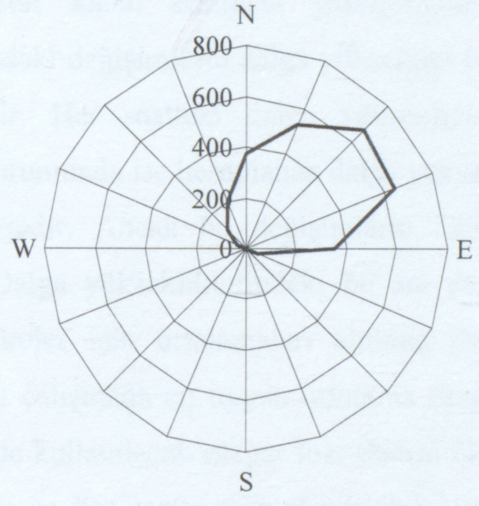
Feç uzunluklarının belirlenmesi için literatürde değişik yöntemler tanımlanmıştır, bunlardan en çok kullanılanı etkili feç uzunluğudur. Kıyılarda göz önüne alınan mevki dikkate alınan dalga yönünden her iki tarafta +22.5° lik bir bantta 7.5° lik aralıklarla feç uzunlukları ölçülür ve bu yön için etkili feç (F_{etk}) olarak tanımlanan feç uzunluğu (5.4) denklemi yardımıyla belirlenir (Yüksel vd., 1998):

$$F_{etk} = \frac{\Sigma F_i \cos^2 \alpha_i}{\Sigma \cos \alpha_i} \tag{5.4}$$

Karaburun için hesaplanan, yönlere göre etkili feç uzunlukları Çizelge 5.2'de görülmektedir. Şekil 5.21'de ise etkili feç uzunluklarının yönlere göre dağılımı grafiksel olarak gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Etkili feç uzunlukları (Arı, 2004)

Yön	F_{etk} (km)
N	373.14
NNE	526.95
NE	666.82
ENE	636.01
E	350.4
ESE	54.82
WNW	30.58
NW	100.87
NNW	198.26



Şekil 5.21 Yönlere yöre etkili feç uzunlukları

Çizelge 5.2'deki ve Şekil 5.21'deki feç uzunluklarına bakıldığında bazı yönlerindeki etkili feç uzunluklarının arasındaki farkın oldukça fazla olduğu görülmektedir. CERC (1984)'te verilen ifadelerde feç mesafesinin dalga yüksekliği üzerinde doğrudan etkisinin olduğu düşünüldüğünde, rüzgar yön değiştirdiğinde feç mesafesi de değişecek ani olarak artacak ya da azalacaktır (örn. E ve ESE yönleri), böylece hesaplanan dalga yüksekliklerinde de ani olarak artış ya da azalma olacaktır. Dalga ölçümleri incelendiğinde ise saatlik dalga yüksekliklerindeki değişimlerin ani olmadığı görülmektedir.

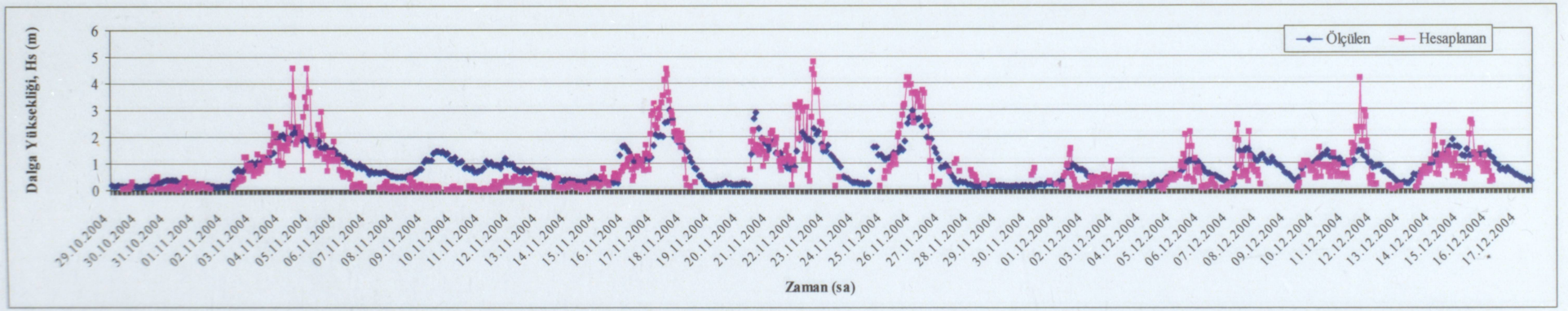
Hesaplanan dalga yüksekliklerindeki bu değişimleri en aza indirmek ve daha düzgün bir zaman serisi elde edebilmek amacıyla hesaplarda ortalaması alınmış etkili feç uzunluklarının

kullanılması gerekliliği görülmüştür. Bunun için, belirli bir saatteki dalga yüksekliğinin hesaplanmasında o saatteki feç mesafesinin kullanılması yerine devam eden fırtınanın ortalama yönüne ait etkili feç uzunluklarının kullanılması yaklaşımına gidilmiştir. Bölüm (5.3.2)'de de anlatıldığı gibi fırtına boyunca rüzgarın yaklaşık olarak sabit doğrultuda esmesinden dolayı feç uzunluklarında da ani değişimler görülmemiş, ölçümler ile daha uyumlu bir zaman serisi elde edilmiştir.

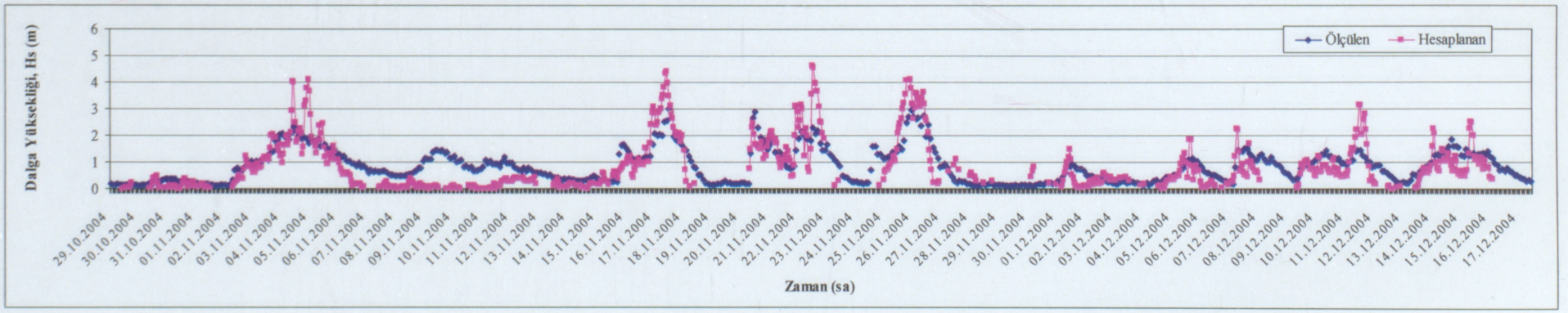
5.3.3 Rüzgar Hızı Etkisi

Ampirik dalga tahmin yöntemlerinde genellikle hesaplamalarda rüzgarın estiği süre boyunca sabit hızda estiği düşünülerek hesap yapılması ya da belirli ortalama rüzgar hızlarının kullanılması önerilmiştir. Karaburun çalışma bölgesine ait rüzgar verilerine bakıldığında rüzgar esme süresi boyunca rüzgar hızında ani değişimler olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı, rüzgar hızının sabit kabul edilmesi yaklaşımının kullanılması ile yapılan hesaplamaların, rüzgar hızındaki değişimlerin dalga yüksekliği üzerindeki etkisini tam olarak yansıtamadığı görülmektedir. Her saatteki dalga yüksekliğinin o saatteki rüzgar hızı kullanılarak hesaplanması durumunda ise hesaplanan dalga yükseklikleri de rüzgar hızları gibi anlık değişimler göstermektedir. Ancak bu değişimlerin ölçümler ile uyumlu olmadığı görülmüştür (Şekil 5.22). Dalga yüksekliklerindeki bu ani değişimleri daha uyumlu hale getirebilmek için belirli süreler için ortalamaları alınmış rüzgar hızlarının kullanılması gerektiği düşünülmüştür. Bu çalışmada en uygun ortalama rüzgar hızının belirlenmesi için, CERC (1984) denklemlerinde kullanılacak rüzgar hızı ifadesi olarak son iki, dört, altı, sekiz, on, on iki, on üç, on dört ve on beş saatte esen rüzgar hızlarının ortalamaları alınarak elde edilen değerler kullanılmış ve her bir alternatif ile elde edilen dalga yükseklikleri ölçülmüş dalga yükseklikleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Her birinin ölçümler ile uyumluluğuna ve her biri için elde edilen sonuçlardaki hatalara bakılarak en uygun ortalaması alınacak rüzgar hızı süresi belirlenmiştir.

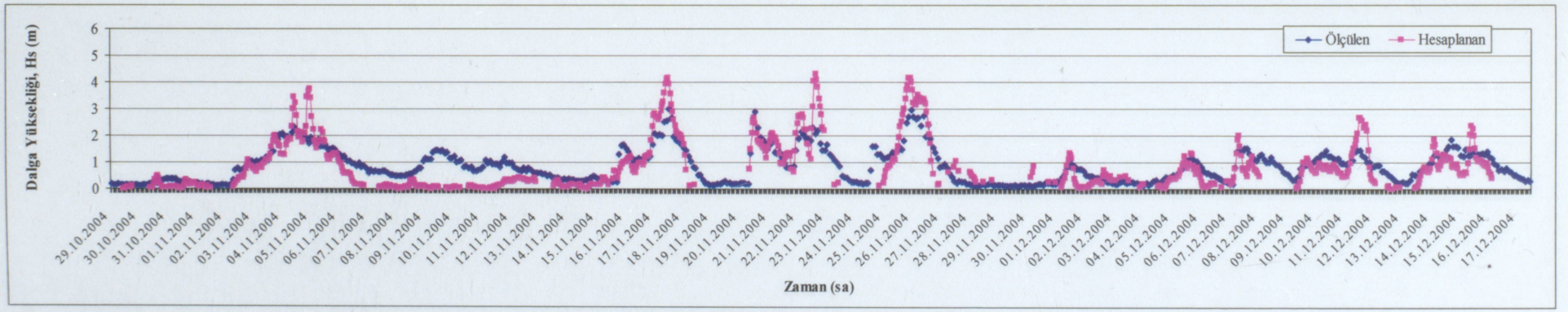
Şekil 5.22'den 5.31'e kadar sırasıyla son iki, dört, altı, sekiz, on, on iki, on üç, on dört ve on beş saatle farklı süreler için ortalamaları alınan rüzgar hızları kullanılarak yapılan dalga yüksekliği hesaplamalarının ölçülen dalga yükseklikleri ile karşılaştırmaları görülmektedir. Görüldüğü gibi dalga yüksekliklerinin ortalaması alınmış rüzgar hızları kullanılarak hesaplanması ile elde edilen sonuçlarda ani değişimler olmamakta, gerçeği daha iyi yansıtan yavaş değişimler elde edilmektedir. Artan fırtına ile dalga yüksekliğinin yavaş yavaş arttığı azalan fırtına ile yavaş yavaş azaldığı görülmektedir.



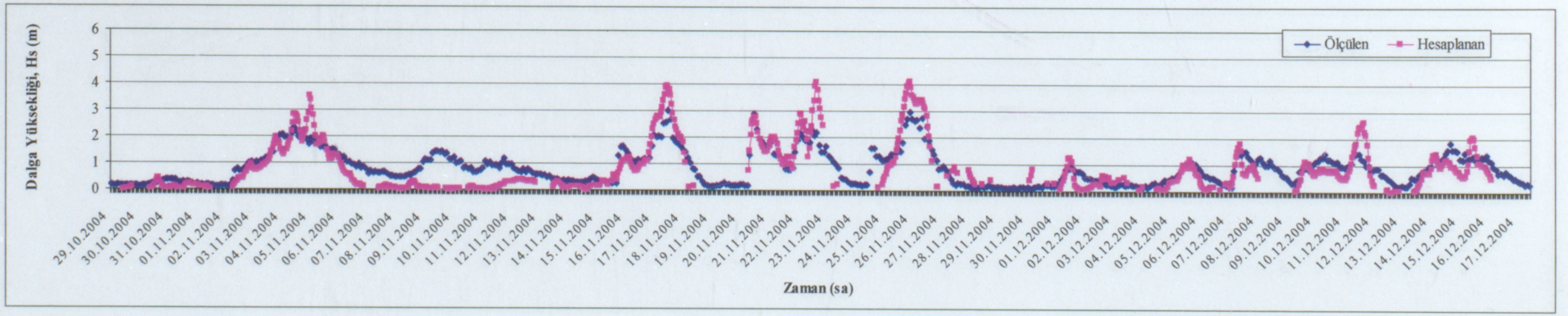
Şekil 5.22 Eş zamanlı rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



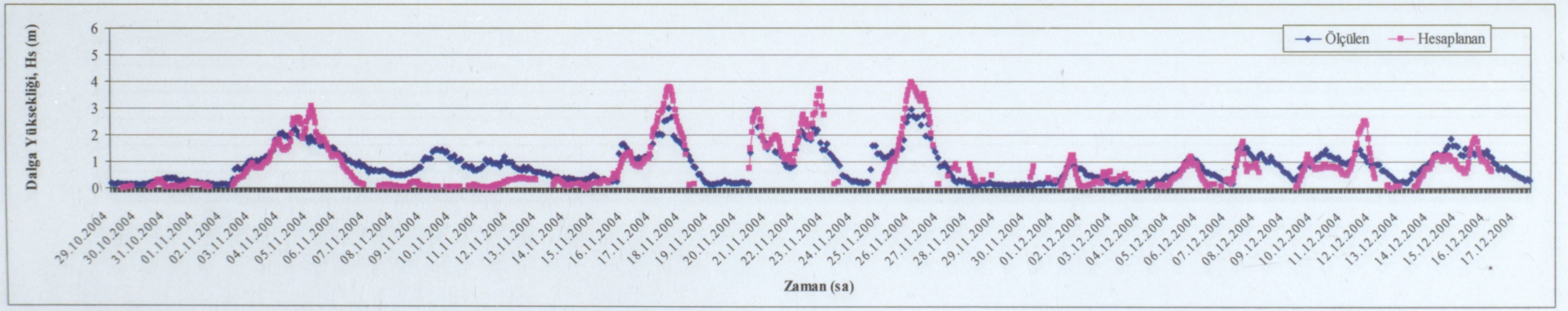
Şekil 5.23 İki saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



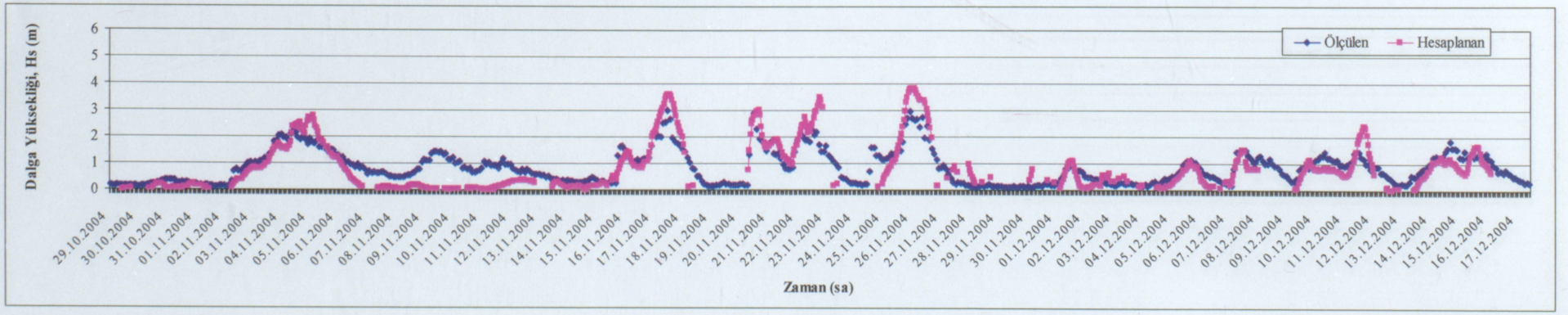
Şekil 5.24 Dört saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



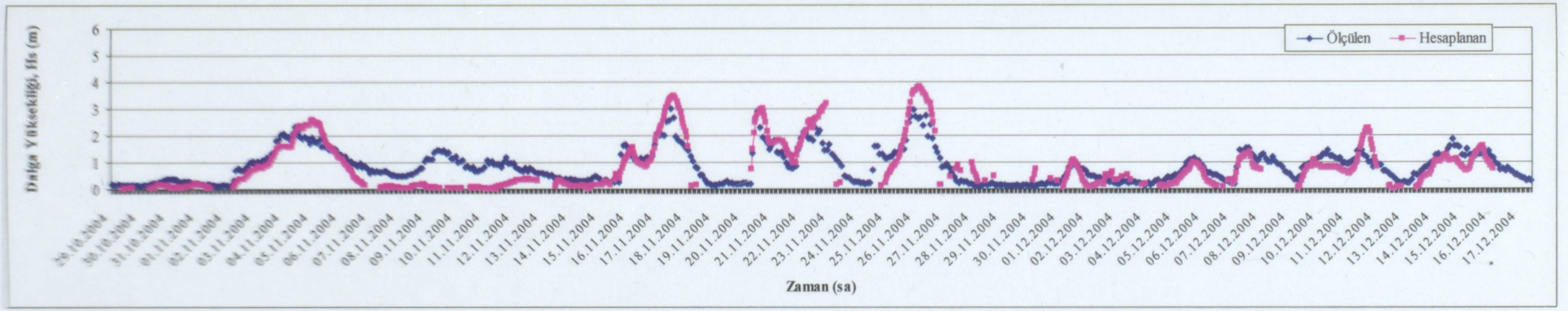
Şekil 5.25 Altı saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



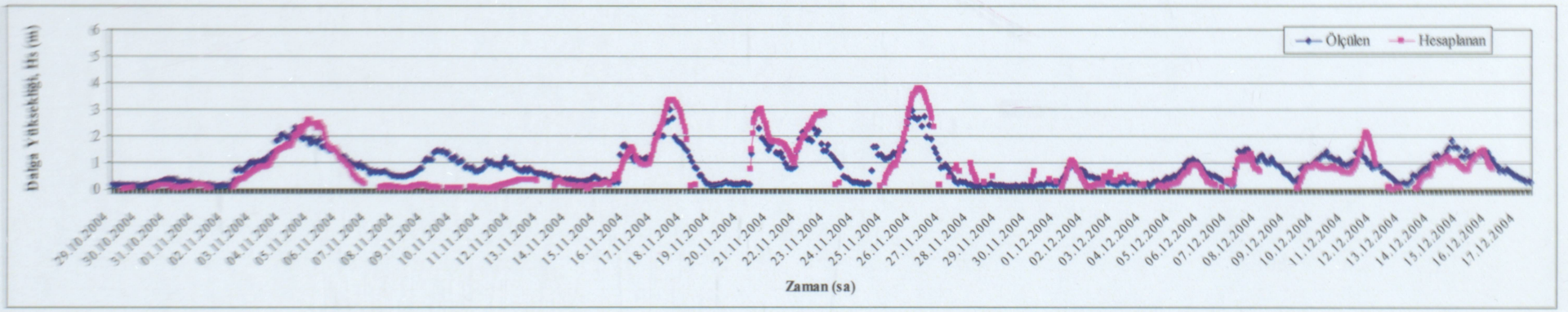
Şekil 5.26 Sekiz saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



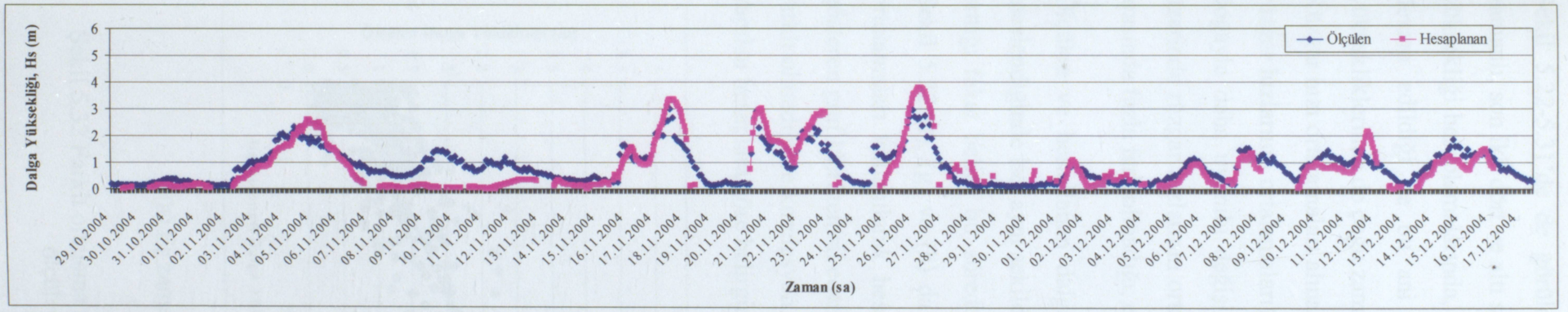
Şekil 5.27 On saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



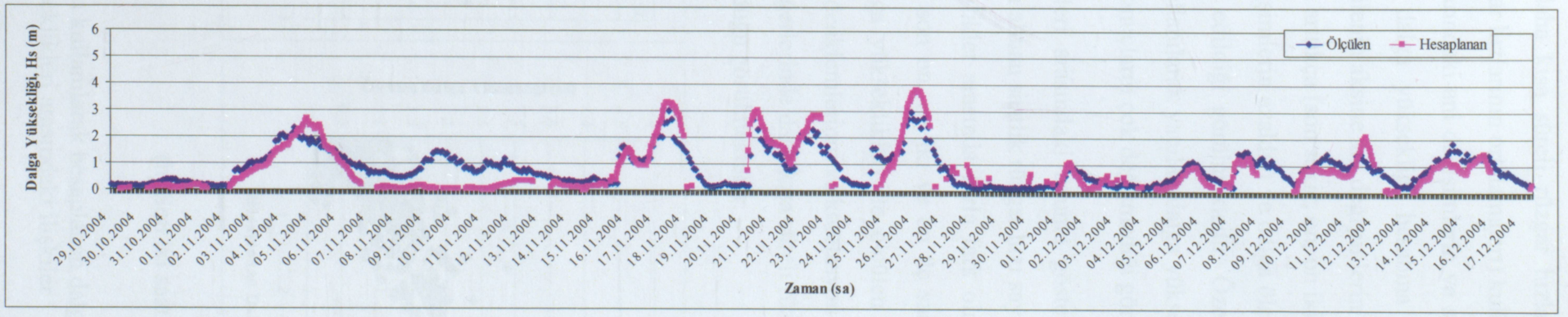
Şekil 5.28 On iki saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



Şekil 5.29 On üç saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



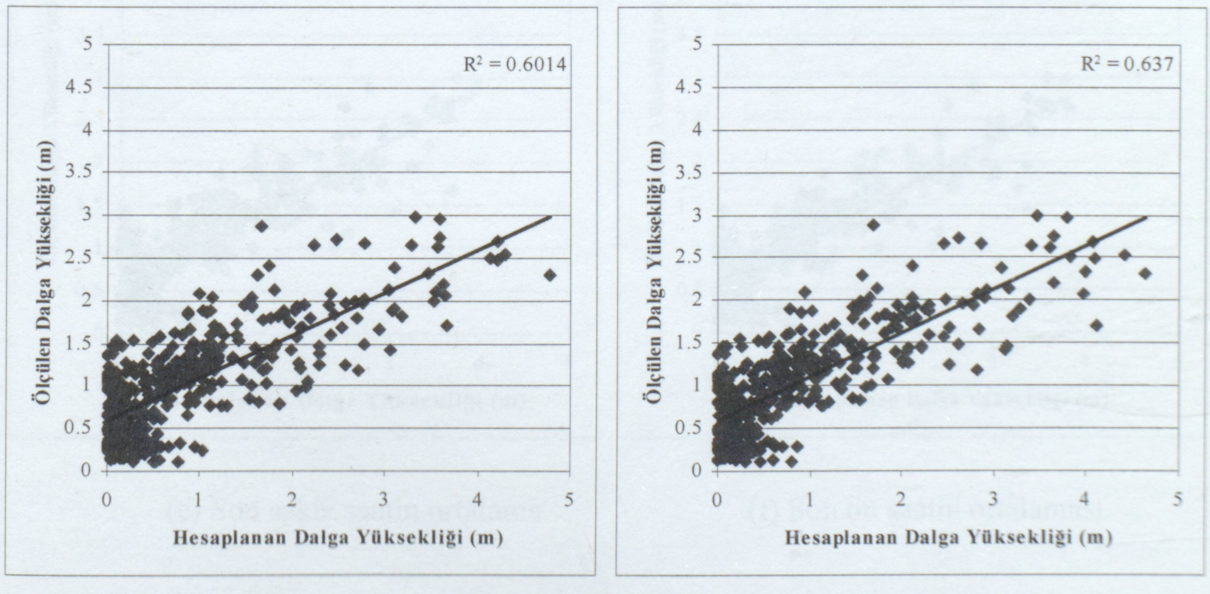
Şekil 5.30 On dört saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri



Şekil 5.31 On beş saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ve ölçülen dalga yükseklikleri

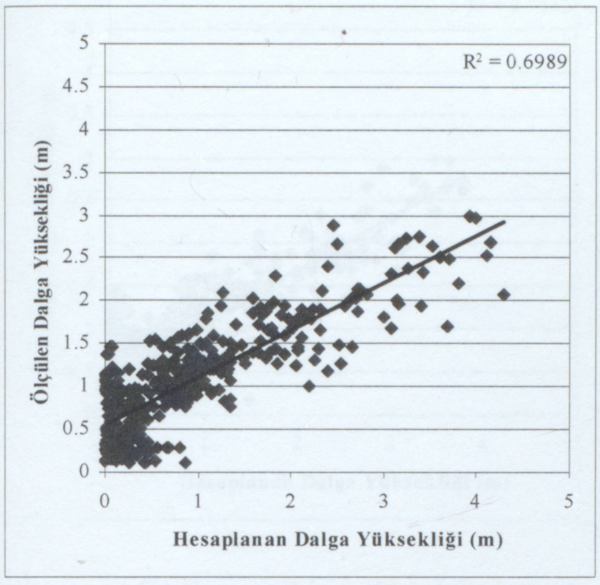
Şekil 5.22-5.31'de de görüldüğü gibi daha kısa süreli rüzgar hızlarının ortalamaları (eş zamanlı, son iki, dört ve altı saatteki rüzgar hızlarının ortalamaları) kullanılarak yapılan dalga yüksekliği hesaplamalarında, rüzgar hızlarındaki ani değişimlerin ve salınımların görülmeye devam edildiği ve bu ani değişimler dalga yüksekliği hesabına da yansıyarak dalga yüksekliklerinde de çoğu zamanlarda ölçülenin aksine ani değişimlerin olduğu görülmektedir. Rüzgar hızı ortalamaları alınan saat sayısı arttıkça (son sekiz, on, on iki ve daha fazla saatteki rüzgar hızlarının ortalamaları) bu ani değişimlerin azaldığı ve dalga ölçümlerinde olduğu gibi doğayla daha uyumlu değişimlerin elde edildiği görülmektedir. Özellikle son on saat ve üzerinde rüzgar hızlarının ortalamaları kullanılarak yapılan dalga yüksekliği hesabı sonuçları arasında fazla fark olmadığı, elde edilen sonuçların çok değişmediği görülmektedir.

Ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki uyumu gösteren saçılım grafikleri incelendiğinde ise, aynı şekilde ortalaması alınan saatlik rüzgar hızı sayısı arttıkça uyumun da arttığı fakat belirli bir süreden sonra grafikler arasında fazla fark olmadığı görülmektedir. Şekil 5.32 (f), (g) ve (h) da görülen ve son on, on iki ve on üç saatlik rüzgar hızlarının ortalamaları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yüksekliklerini gösteren grafikleri temsil eden doğruların denklemlerinin ve korelasyon katsayılarının (R) çok farklı olmadığı ve korelasyon katsayısı değerlerinde daha kısa süreli rüzgar hızı ortalaması ile yapılan hesaplara göre belirgin bir artış olduğu görülmektedir.

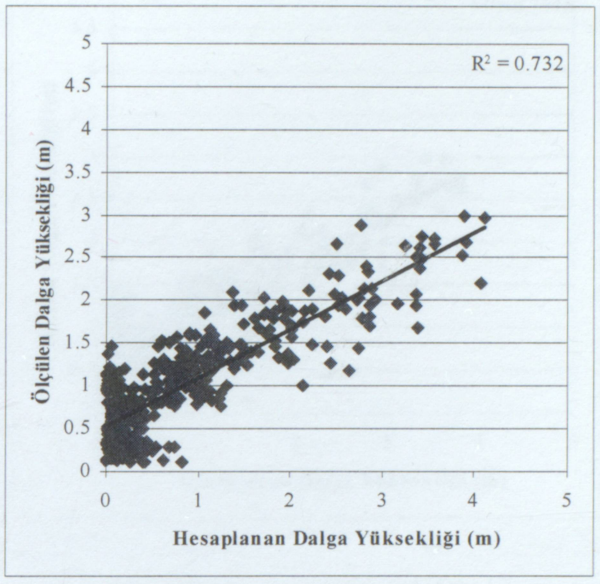


(a) Eş zamanlı (b) Son iki saatin ortalaması

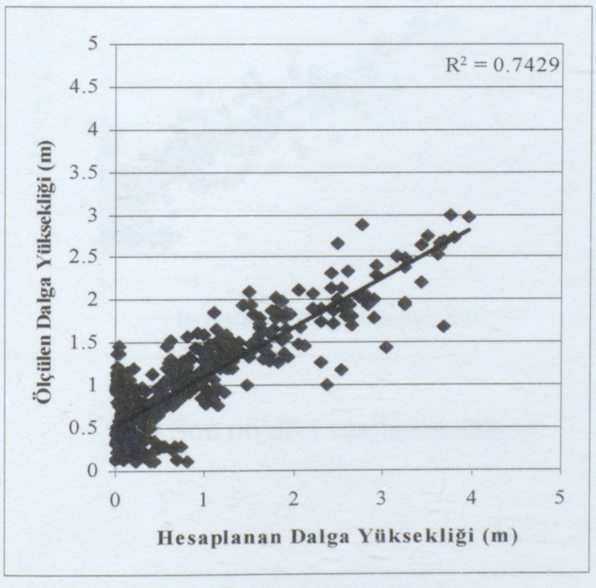
Şekil 5.32 Farklı ortalama rüzgar hızları kullanılarak hesaplanan dalga yükseklikleri ile ölçülen dalga yükseklikleri arasındaki ilişkiler



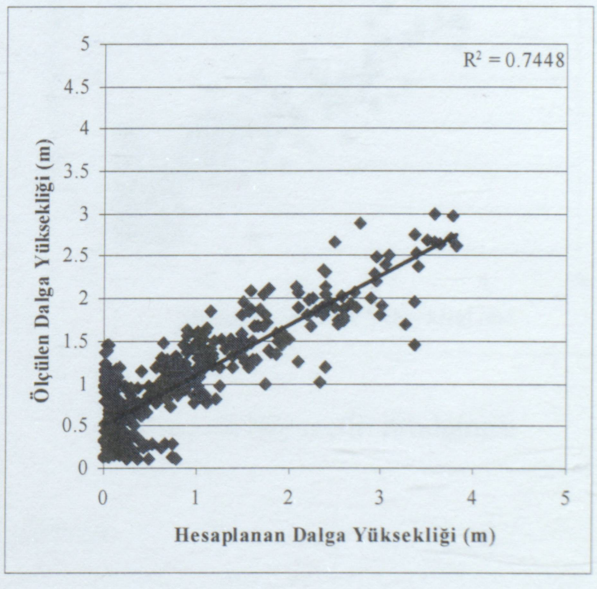
(c) Son dört saatin ortalaması



(d) Son altı saatin ortalaması

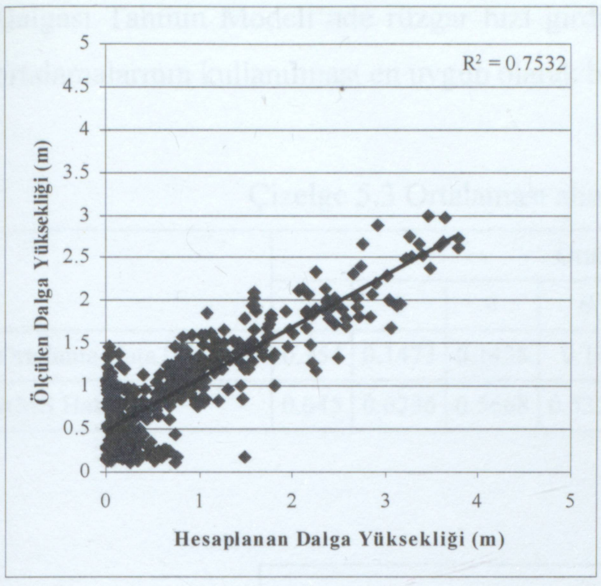


(e) Son sekiz saatin ortalama

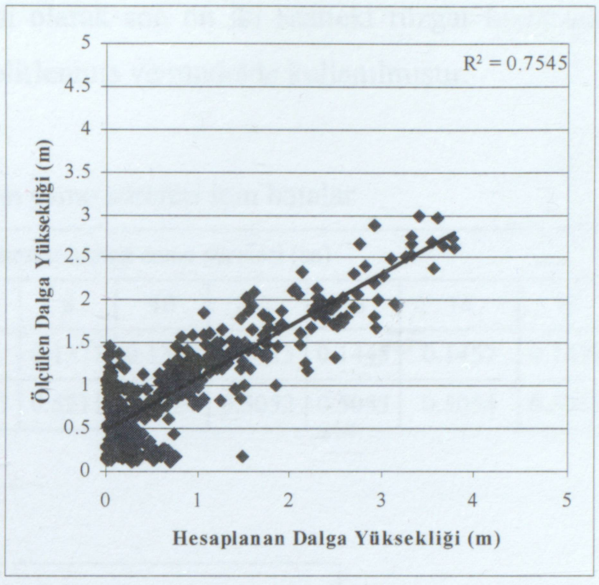


(f) Son on saatin ortalaması

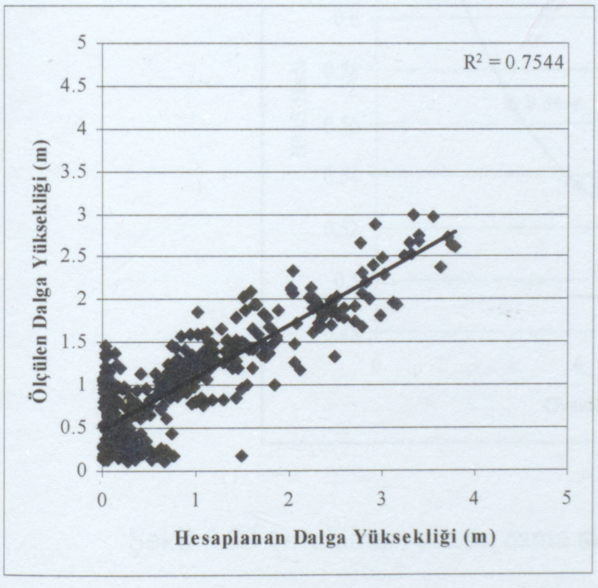
Şekil 5.32 Devam



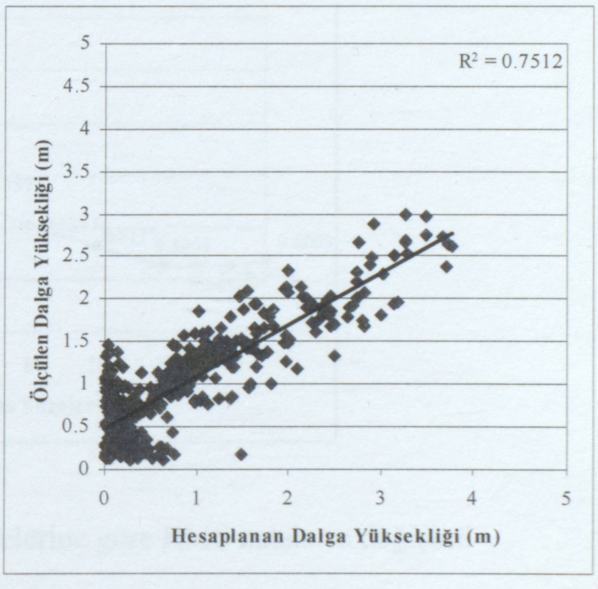
(g) Son on iki saatin ortalaması



(h) Son on üç saatin ortalaması



(i) Son on dört saatin ortalaması



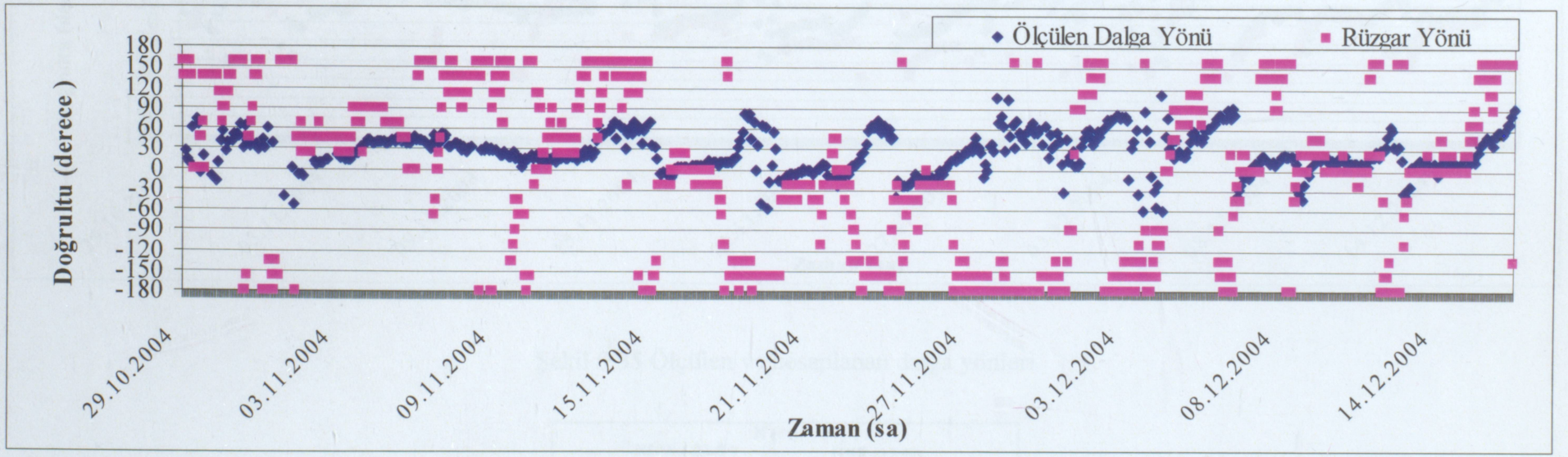
(j) Son on beş saatin ortalaması

Şekil 5.32 Devam

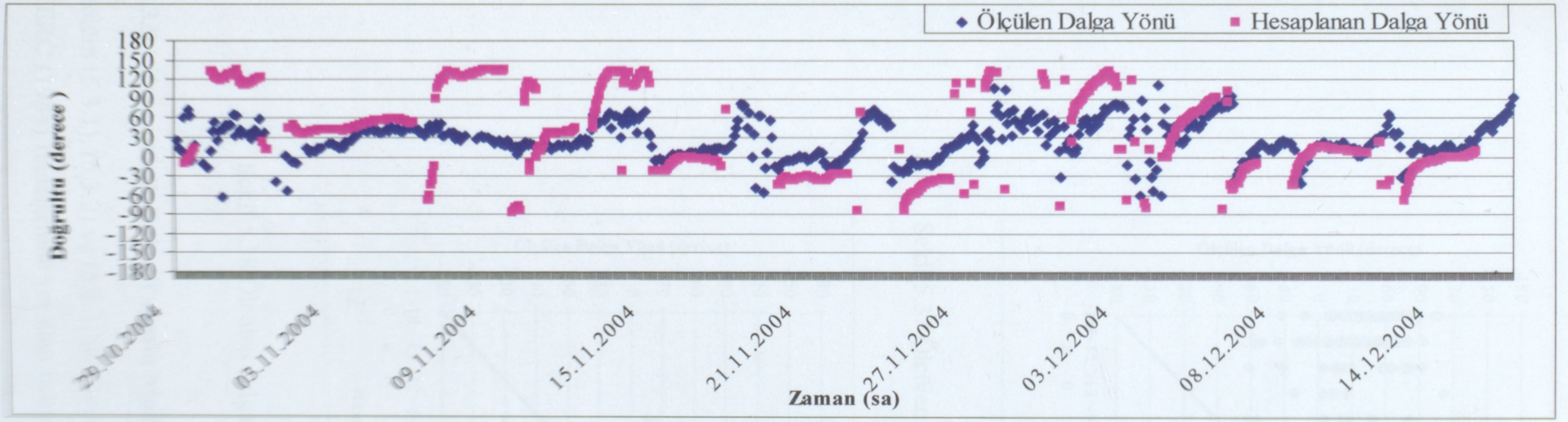
Çizelge 5.3 ve Şekil 5.33'de ise farklı sürelerle ortalaması alınmış rüzgar hızı alternatifleri kullanılarak yapılan hesaplamalara ait ortalama ve RMS hatalar (hataların ortalamalarının karekökü) görülmektedir. Çizelge 5.3 ve Şekil 5.33 incelendiğinde ise en az hatanın 50.5 cm ile son on iki saatteki rüzgar hızlarının ortalaması kullanılarak hesaplanan dalga yüksekliklerinde ortaya çıktığı görülmektedir ve bu sonuç Şekil 5.32'deki saçılma grafiklerinden elde edilen sonucu doğrulamaktadır. Böylece oluşturulan Parametrik Rüzgar

Bu yöntemler kullanılırken dalga yönü tahmini için yapılan en genel yaklaşım dalga yönünü rüzgar yönüne eşit kabul etmektir. Şekil 5.34'de dalga yönü ile rüzgar yönünün karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 5.34 incelendiğinde ölçülen dalga yönleri ile rüzgar yönü arasında bir uyum görülmemektedir. Bundan dolayı bu çalışmada oluşturulan Parametrik Dalga Tahmin Modeli'nde dalga yönünün rüzgar yönüne eşit kabul edilmesinin doğru olmayacağı ve dalga yönünün tahmini için daha farklı bir yaklaşımın yapılması gerekliliği görülmektedir.

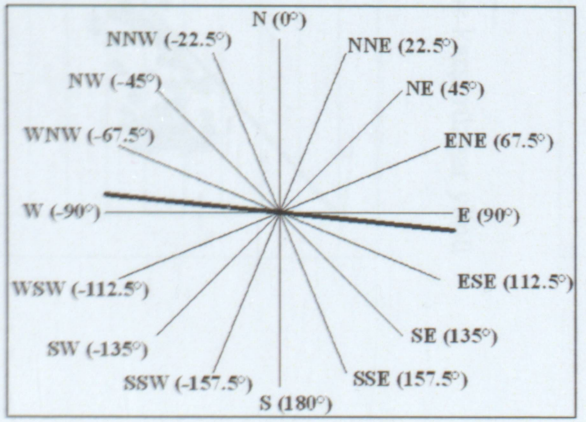
Diğer bir yaklaşım olarak, dalga yönünü rüzgar yönüne eşit almak yerine dalga yönünü o andaki fırtınaya ait ortalama rüzgar doğrultusuna eşit almak düşünülmüştür. Fırtınalar Bölüm (5.2.2)'de anlatıldığı şekilde rüzgarın doğrultusunu 90°'den az ya da çok değiştirmesine göre belirlenmiş ve burada belirlenen bu fırtınalara ait ortalama yön dalga yönüne eşit olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.34'de dalga yönü ile rügar yönünün eşit kabul edildiği durumda, Şekil 5.35'te ise dalga yönünün fırtınanın ortalama yönüne eşit kabul edilmesi kabulü ile elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 5.34 ve 5.35'in karşılaştırıldığında ikinci yaklaşımın ilk yaklaşıma (dalga yönünü rüzgar yönüne eşit almak) göre ölçümler ile çok daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. İki kabul ile hesaplanan dalga yönleri ile rüzgar yönlerine ait saçılma grafikleri incelendiğinde de dalga yönünün fırtınanın ortalama yönüne eşit kabul edilmesinin diğerine göre çok daha uygun olacağı görülmektedir (Şekil 5.37, Şekil 5.38). Bundan dolayı oluşturulan Parametrik Rüzgar Dalgası Tahmin Modeli'nde dalga yönü olarak o anda devam eden fırtınanın ortalama yönü kullanılmıştır.



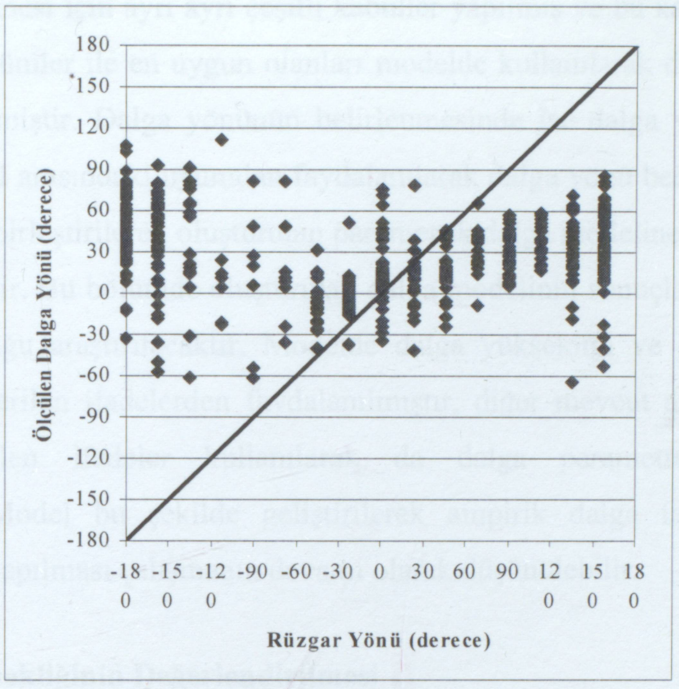
Şekil 5.34 Ölçülen dalga yönü ve rüzgar yönü



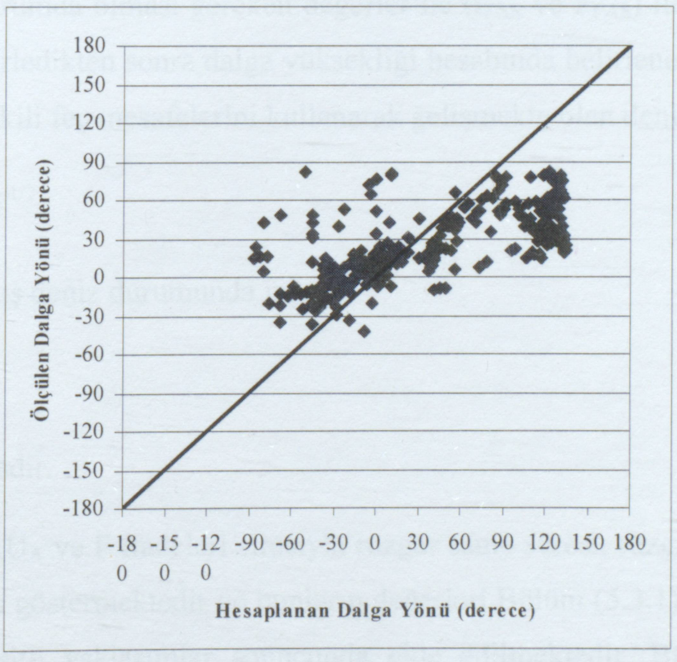
Şekil 5.35 Ölçülen ve hesaplanan dalga yönleri



Şekil 5.36 Yönler ve açı değerleri



Şekil 5.37 Ölçülen dalga yönüne karşı rüzgar yönü



Şekil 5.38 Ölçülen dalga yönüne karşı hesaplanan dalga yönü

5.3.5 Parametrik Dalga Tahmin Modelinin Değerlendirilmesi

Bölüm (5.3.1), (5.3.2) ve (5.3.3)'te, oluşturulmak istenen dalga tahmin modelinin temel aldığı CERC (1984) ifadelerinde yer alan fırtına süresi (t), rüzgar hızı (U) ve etkili feç mesafesi (F)

değerlerinin belirlenmesi için ayrı ayrı çeşitli kabuller yapılmış ve bu kabuller ile hesaplanan veriler arasından ölçümler ile en uygun olanları modelde kullanılarak dalga yükseklikleri ve periyotları elde edilmiştir. Dalga yönünün belirlenmesinde ise dalga yönü ile fırtınaya ait ortalama rüzgar yönü arasındaki uyumdan faydalanılarak dalga yönü belirlenmiştir. Bütün bu yapılan yaklaşımlar birleştirilerek oluşturulan parametrik dalga modeline ait akış şeması Şekil 5.39'da görülmektedir. Bu bölümde oluşturulan dalga modelinin sonuçlarının ölçümler ile ne derece uyumlu olduğu araştırılacaktır. Modelde dalga yüksekliği ve periyodu tahmininde CERC (1984)'te önerilen ifadelerden faydalanılmıştır, diğer mevcut ampirik dalga tahmin yöntemlerinde verilen ifadeler kullanılarak da dalga parametreleri hesaplanaması yapılabilmektedir. Model bu şekilde geliştirilerek ampirik dalga tahmin yöntemlerinin karşılaştırılmasının yapılması çalışmanın devamı olarak düşünülebilir.

5.3.5.1 Dalga Yüksekliğinin Değerlendirilmesi

Oluşturulan Parametrik Rüzgar Dalgası Tahmin modeli CERC (1984)'te verilen denklemleri kullanarak dalga yüksekliğini bir zaman serisi olarak hesaplamaktadır. Esme süresini ve etkili feçi tam gelişmiş durumda olması gereken değerler ile (t_{FAS} ve F_{FAS}) ile karşılaştırıp mevcut deniz durumunu belirledikten sonra dalga yüksekliği hesabında belirlenen rüzgar esme süresi, rüzgar hızlarını ve etkili feç mesafelerini kullanarak gelişmekte olan deniz durumu için,

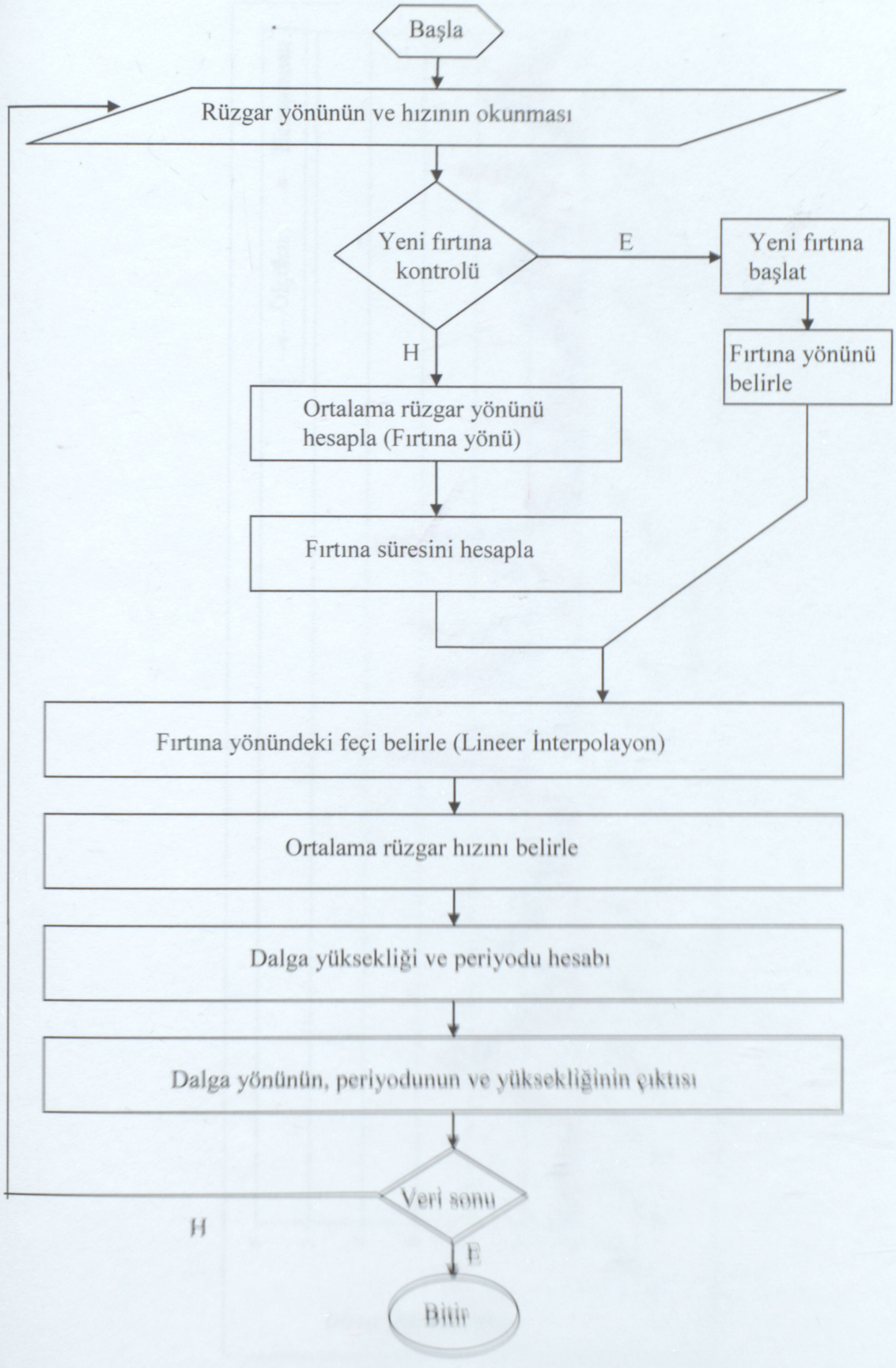
$$H_s = 1.616 \times 10^{-2} U_A F^{1/2} \tag{5.5}$$

ifadesini, tam gelişmiş deniz durumunda ise,

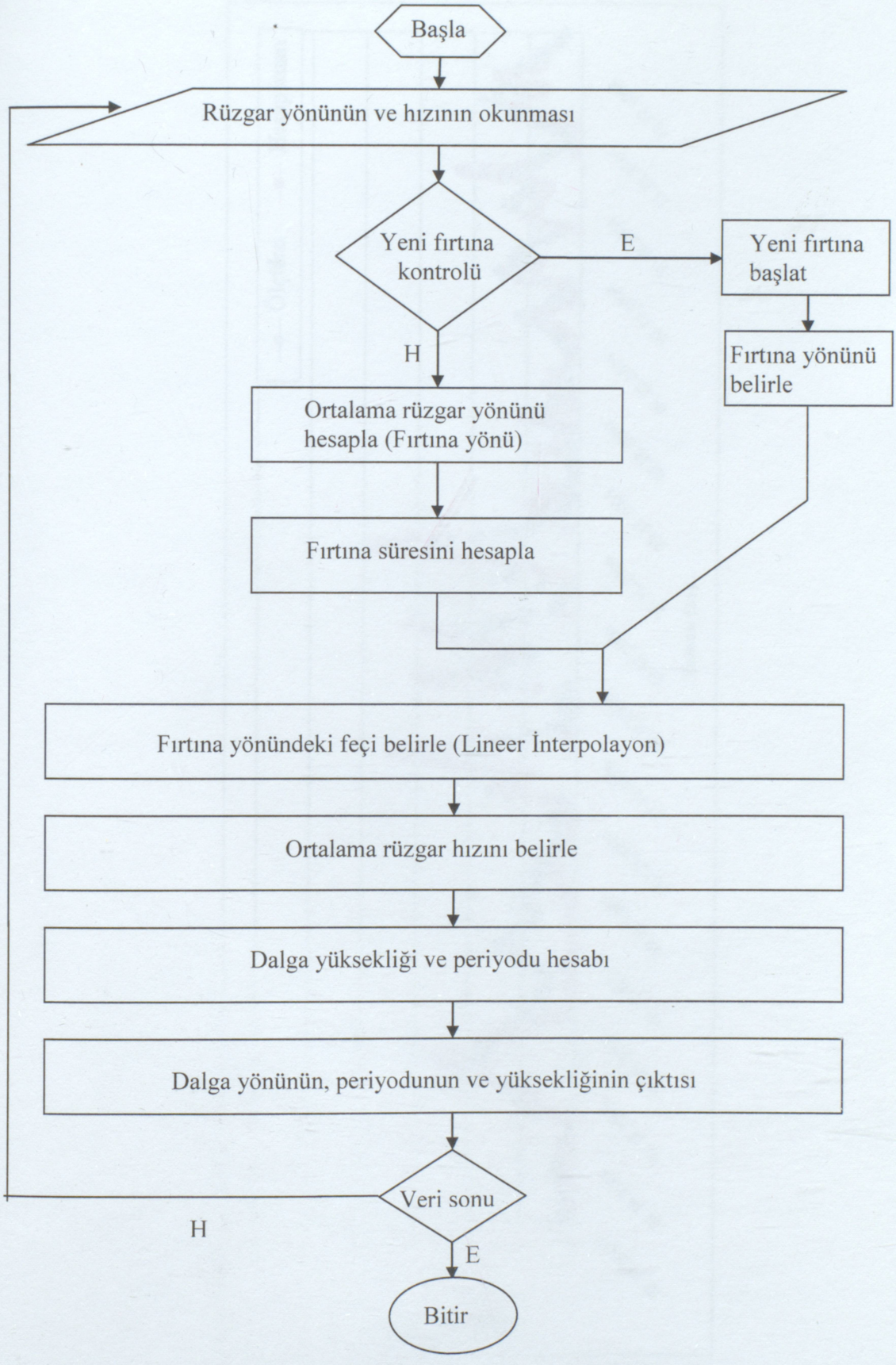
$$H_s = 2.482 \times 10^{-2} U_A^2 \tag{5.6}$$

ifadesini kullanmaktadır.

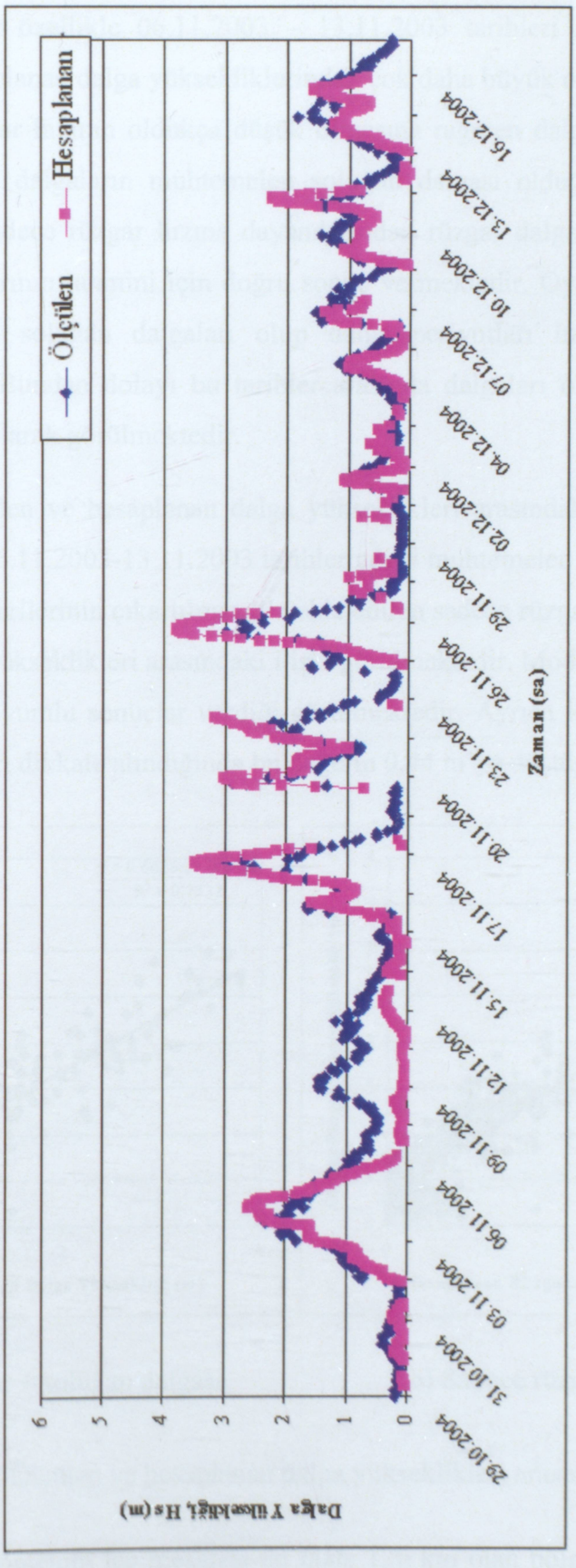
Bu denklemlerdeki t,U_A ve F ifadeleri sırasıyla rüzgar esme süresi, rüzgar gerilme faktörü ve etkili feç uzunluğunu göstermektedir ve bunların değerleri Bölüm (5.3.1), (5.3.2) ve (5.3.3)'te anlatılan şekilde çeşitli yaklaşımlar sonucunda elde edilmektedir. Bütün bu kabuller ve ifadeler kullanılarak oluşturulan model ile zaman serisi şeklinde hesaplanan saatlik dalga yüksekliklerinin, ölçülen dalga yükseklikleri ile karşılaştırılması Şekil 5.40'da görülmektedir.



Şekil 5.39 Oluşturulan parametrik model bilgisayar programı için akım şeması



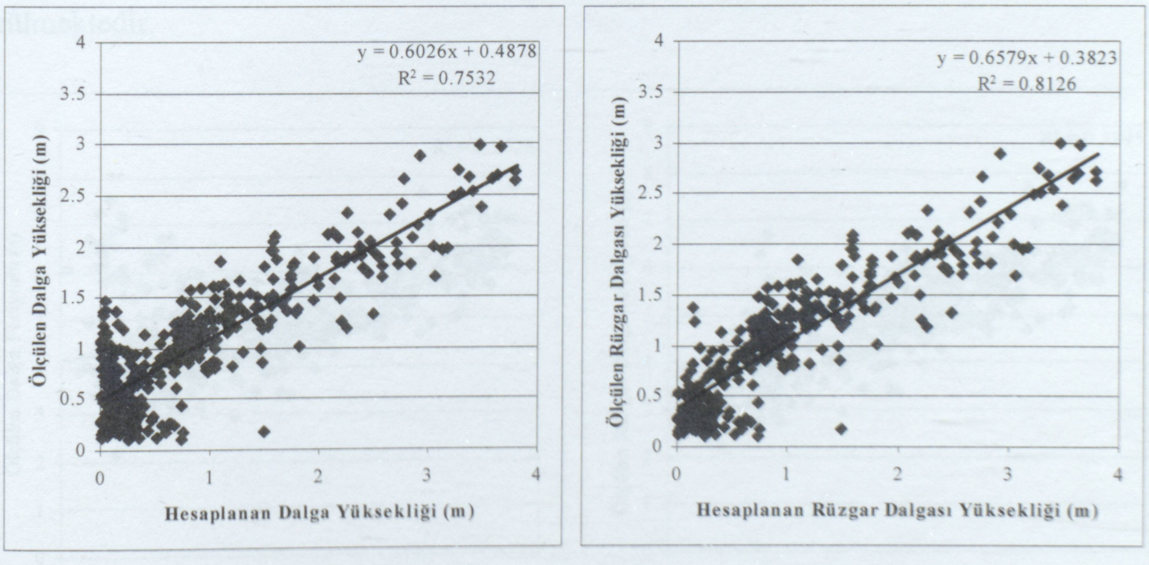
Şekil 5.39 Oluşturulan parametrik model bilgisayar programı için akım şeması



Şekil 5.40 Ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri

Şekil 5.40 incelendiğinde dalga yüksekliği için yapılan hesaplamaların genelde ölçümler ile uyumlu olduğu fakat özellikle 06.11.2003 – 13.11.2003 tarihleri arasında ölçülen dalga yüksekliklerinin hesaplanan dalga yüksekliklerinden çok daha büyük olduğu görülmektedir. O tarihler arasında rüzgar hızının oldukça düşük olmasına rağmen dalga yüksekliğinin büyük olması o tarihlerdeki dalgaların muhtemelen soluğan dalgası olduğuna işaret etmektedir. Oluşturulan model sadece rüzgar hızına dayandığından rüzgar dalgalarını hesaplamakta ve sadece rüzgar dalgalarının tahmini için doğru sonuç vermektedir. Oysa bu tarihte oluşan bu dalgalar muhtemelen soluğan dalgaları olup dalga periyotları incelendiğinde daha iyi yorumlanabilecektir. Bundan dolayı bu tarihler arasında dalgaları olduğundan daha düşük tahmin etmesi doğal olarak görülmektedir.

Şekil 5.41(a)'da ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 5.41(b)'de ise 06.11.2003-13.11.2003 tarihlerindeki muhtemelen soluğan dalgası olduğu tahmin edilen dalga verilerinin çıkartılması ile elde edilen sadece rüzgar dalgaları için ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki ilişki görülmektedir. Modelin rüzgar dalgalarının tahmininde oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca RMS hata 0.50 m iken, sadece rüzgar dalgaları dikkate alındığında bu değerin 0.44 m'ye düştüğü görülmüştür.



(a) Rüzgar + soluğan dalgası (b) Sadece rüzgar dalgası

Şekil 5.41 Ölçülen ve hesaplanan dalga yükseklikleri arasındaki ilişki

CERC (1984)'te bu yöntemin feç mesafesi en fazla 120 km olan bölgelerde uygun sonuçlar vereceği belirtilmektedir, bu çalışmada 600 km'den daha fazla feç mesafeleri kullanılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Modelin soluğan dalgasının tahmininde başarısız olması

kullanılan feç mesafelerinin fazlalılığından kaynaklanmaktadır. Daha küçük su alanına sahip bölgelerde model sonuçlarının daha iyi olacağı beklenmektedir.

5.3.5.2 Dalga Periyodunun Değerlendirilmesi

Oluşturulan Parametrik Rüzgar Dalgası modeli ile dalga periyodunun hesaplanmasında dalga yüksekliği hesabında olduğu gibi yapılan aynı yaklaşımların kullanılması sonucunda belirlenen t, F ve U değerlerini kullanarak gelişmekte olan deniz durumu için,

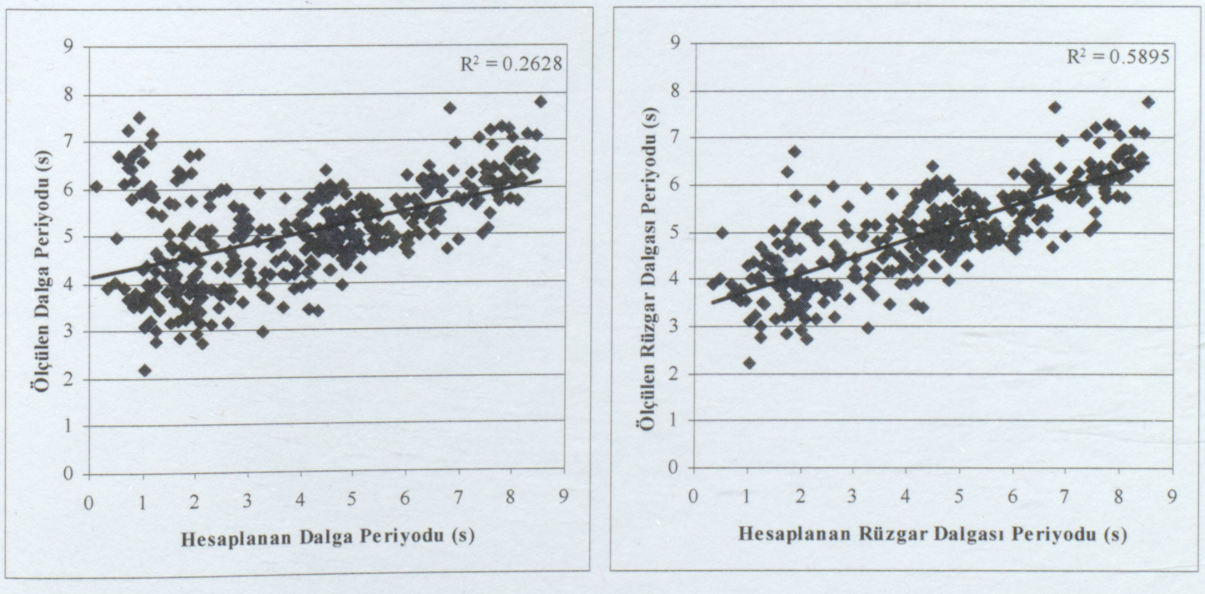
$$T_m = 6.238\times10^{-2}\left(U_A F\right)^{1/3} \tag{5.7}$$

tam gelişmiş deniz durumu için,

$$T_m = 8.30\times10^{-1}U_A \tag{5.8}$$

ve $T_s = 0.95\ T_m$ ifadelerinin yardımı ile dalga periyotları hesaplanmıştır.

Ancak dalga periyodunda uyum dalga yüksekliği hesabında olduğu kadar kuvvetli değildir ve özellikle soluğan dalgası olduğu tahmin edilen dönemde (06.11.2003 – 13.11.2003) hata oldukça fazladır. Şekil 5.42'de ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları arasındaki ilişki görülmektedir.



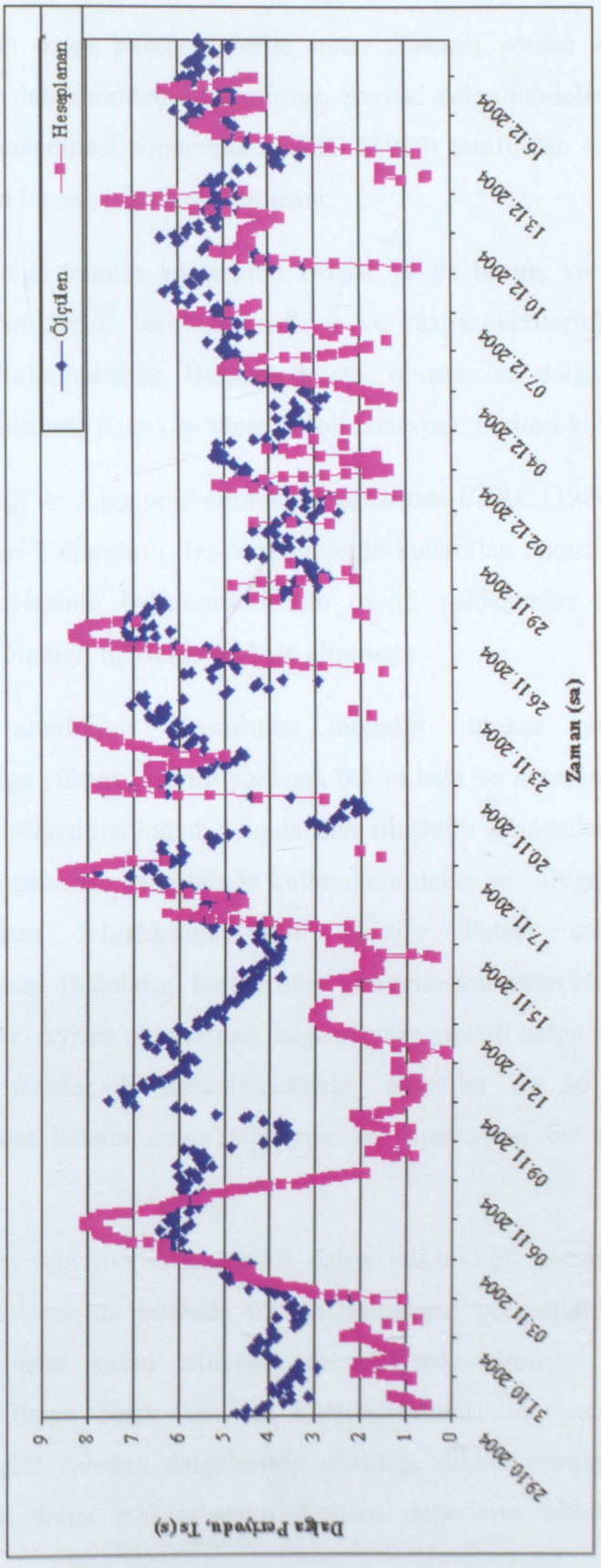
a) Rüzgar + soluğan dalgası (b) Soluğan dalgaları hariç

Şekil 5.42 Ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları arasındaki ilişki

Grafikler incelendiğinde soluğan dalgası olarak tahmin edilen veriler çıkarıldığında uyumun

bir miktar daha arttığı fakat sonuçların yine de yeterince tatmin edici olmadığı görülmektedir.

Şekil 5.43'te ise zaman serisi olarak ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları görülmektedir. 06.11.2003 – 13.11.2003 tarihleri arasındaki fark net bir şekilde görülmektedir ve bu fark o tarihler arasında soluğan dalgalarının etkin olduğu bir fırtına ihtimalini güçlendirmektedir.



Şekil 5.43 Ölçülen ve hesaplanan dalga periyotları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karaburun bölgesine ait dalga parametrelerini uzun dönemli yönsel zaman serisi olarak belirlemek amacıyla bir dalga modeli kurulmuştur. Sayısal dalga modelleri ve ampirik dalga tahmin modellerinin incelenmesi sonucunda CERC (1984) tarafından verilen dalga tahmin denklemlerini temel alan bir model oluşturulmuştur.

Bilindiği gibi, bütün dalga tahmin yöntemleri rüzgar ya da basınç verilerini kullanarak o bölgedeki dalga parametrelerini belirlemektedirler ve rüzgar verilerinin doğruluğu dalga tahmininin başarısını etkilemektedir. Bundan dolayı, oluşturulan dalga tahmin modelinde rüzgar verisi olarak düzeltilmiş Kumköy Meteoroloji İstasyonu verileri kullanılmıştır.

Modelde dalga yüksekliği ve dalga periyodunun hesaplarında CERC (1984) tarafından verilen dalga tahmin denklemleri kullanılmış, bu denklemlerde kullanılan rüzgar esme süresi, rüzgar hızı ve etkili feç mesafesinin belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar yapılmış, bunlardan ölçümler ile en uyumlu olanları modelde dikkate alınmıştır.

Dalga yüksekliğinin tahmininde oluşturulan modelin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Model dalga yüksekliklerini yaklaşık 0.5 m hata ile hesaplamıştır. Ölçümlerden dalga tahmini yapılan bölgede soluğan dalgalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan model sadece rüzgar dalgalarının tahmininde kullanılabilmekte ve soluğan dalgalarını tahmin edememektedir. Soluğan dalgalarının etkili olduğu dönem çıkarıldığında model sonuçlarındaki RMS hata (hataların karelerinin ortalamasının karekökü) değeri 0.40 m metrebelerine inmektedir. Ayrıca oluşturulan dalga tahmin modeli dalga parametrelerini derin denizde geçerli olan ifadeler ile hesaplamaktadır, ölçümler ise 16 m su derinliğinde yapılmıştır. Ortaya çıkan hatada dalga sığlaşma ve sapmasının bir miktar payı olduğu düşünülmektedir.

Dalga periyodu tahmini için model sonuçları dalga yüksekliği tahmininde olduğu kadar ölçümler ile uyumlu olmasa da bölgede oluşan dalgaların periyotları hakkında bir fikir vermesi açısından sonuçlar kabul edilebilir mertebelerde olmuştur. Hesaplanan dalga periyotlarının ölçülen dalga periyotları ile karşılaştırılması incelendiğinde yine dalga yüksekliğinde olduğu gibi soluğan dalgalarının oluştuğu dikkat çekmektedir, özellikle bu dönemlerde hesaplanan dalga periyotlarının ölçülen değerlerin oldukça altında olduğu görülmektedir.

Dalga yönü hesabı için ampirik dalga tahmin yöntemlerinin çoğunda herhangi bir ifade

önerilmediğinden dalga yönü rüzgar yönü olarak alınmaktadır.Ancak rüzgar yönü ile ölçülmüş dalga yönü arasında bir ilişki olmadığı görülmüştür. Bunun yerine fırtınanın ortalama yönü dalga yönü olarak alındığında ölçülen dalga yönü ile modelden elde edilen yön arasında daha iyi bir uyum sağlanmıştır.

Çalışmanın devamı olarak mevcut diğer ampirik dalga tahmin yöntemlerinde önerilen ifadeler kullanılarak da model oluşturulabilir ve model sonuçlarından elde edilen sonuçların karşılaştırmalarını yapmak mümkündür.

CERC (1984)'te bu yöntemin feç mesafesi 80 - 120 km olan bölgelerde uygun sonuçlar vereceği belirtilmektedir, bu çalışmada 600 km'den daha fazla feç mesafeleri kullanılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Modelin soluğan dalgasının tahmininde başarısız olması kullanılan büyük feç mesafelerinden kaynaklanmaktadır. Daha küçük su alanına sahip yani feç mesafesinin daha küçük olduğu bölgelerde model sonuçlarının çok daha iyi olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

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

Battjes, J. A. ve Janssen J.P.F.M., (1978), "Energy Loss and Set-Up Due to Breaking in Random Waves", Proc. 16th Coastal Engineering Conference, Hamburg, Germany, 569-587.

Bishop C.T. ve Donelan M.A., (1989), "Wave Prediction Models", Applications in Coastal Modelling, Elsevier Science Publ., 75-106.

Bishop C.T., Donelan M.A., ve Kahma K.K., (1992), "Shore Protection Manual's Wave Prediction Reviewed", Coastal Eng., 17, 25-48.

Bretschneider, C.L., (1952) "Revised Wave Forecasting Relationships" Proceedings of the Second Conference on Coastal Engineering, ASCE, Council on Wave Research.

Bretschneider, C.L., (1958) "Revisions in Wave Forecasting; Deep and Shallow Water" Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering, ASCE, Council on Wave Research.

Bretschneider, C.L., (1959), "Wave Variability and Wave Spectra for Wind-Generated GravityWaves." TM-118, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington,D.C.

Bretschneider, C.L., (1963), "A One Dimensional Gravity Wave Spectrum" Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall, New York.

Bretschneider, C.L., (1970) "Wave Forecasting Relations for Wave Generation", Look Lab., Hawaii, 1, No. 3.

CERC (1984), Shore Protection Manuel, 4th Ed., Coastal Eng. Res. Center, US Army Corps of Eng., Vicksburg.

Çevik E., (2003), "Kıyı Mühendisliğinde İstatistiksel Yöntemler", Ders Notları, YTÜ.

Çevik E., Yüksel Y., Yalçıner A.C., Arı, H.A., Güler I., Doğan U., Aykut N.O., Ata E., (2006), "Kıyı Çizgisi Değişiminin Belirlenmesi ve Kumlanma Problemi için Karaburun Örneği", TÜBİTAK, Proje No: 103I008, İstanbul

Donelan, M.A., (1980), "Similarity Theory Applied to the Sea Forecasting of Wave Heights, Periods and Directions", Proc. Canadian Coastal Conf., 47-61

Donelan, M.A., Hamilton, J. ve Hui, W.H., (1985), "Directional Spectra of Wind Generated Waves", Phil. Trans. Roy. Soc., A315, 509-562

Dorrestein, R., (1960), "Simplified Method of Determining Refraction Coefficients for Sea Waves", J. Geophys. Res., 65, 637-642

Gelci, R., Cazalé, H., ve Vassal, J., (1957), Prévison 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.

Gröen P., Dorrestein R., (1976), "Zeegolven. KNMI Opstellen op Oceanografisch en Maritiem Meteorologisch Gebied", 11, 124 pp.

Hasselmann K., (1962), "On The Non-Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum", J. Fluid Mech., 12, 481-500.

Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bonws, E., Carlson, H., Cartwright, D.C.,Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., ve Walden, H., (1973), "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the JointNorth Sea Wave Project (JONSWAP)", Deiitsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 95 pp.

Hasselmann, K., Ross, D. B., Muller, P., ve Sell, W., (1976) "A Parametric Wave Prediction Model" Journal of Physical Oceanography, Vol. 6, pp. 200-228.

Hasselmann D. E., Dunckel M. ve Ewing J. A., (1980), "Directional Wave Spectra Observed During JONSWAP (1973)", J. Phys. Oceanogr., 10, 1264-1280.

Hasselmann S. ve Hasselmann K., (1985), "Computations and Parameterizations of the Non-Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Calculations of the Exact Non-Linear Transfer Integral", J. Phys. Oceanogr., 15, 1369-1377.

Hasselmann S. ve Hasselmann K., Allender J.H. ve Barnett T.P., (1985), "Computations and Parameterizations of the Non-Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum. Part II: Parameterizations of the Non-Linear Energy Transfer for Application in Wave Models", J. Phys. Oceanogr., 15 (11), 1378-1391.

Janssen, P. A. E. M., (1991), Quasi-Linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting", J. Phys. Oceanogr., 21, 1631-1642.

Jenkins, A. D., (1992), A Quasi-Linear Eddy Viscosity Model for the Flux of Energy and Momentum to Wind Waves Using Conservation-Law Equations in a Curvilinear Coordinate System", J. Phys. Oceanogr., 22, 844-858.

Komen G. J., Hasselmann S. ve Hasselmann K., (1984), "On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum", J. Phys. Oceanogr., 14, 1271-1285.

Komen G. J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., ve Janssen P.A.E.M., (1994), "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", Cambridge University Press, 532 pp.

Krylov, Y.M., (1966), "Spektralnyye Metody Issledovaniya i Razcheta Vetrovykh Voln (Spectral Methods of Studying and Predicting of Wind Waves)", Gidrometeoizdat, Leningrad, 256 pp.

Krylov, Y.M., Strekalov, S.S. ve Tsyplukhin, W.F., (1976), "Vetrovyye Volny i ikh Vozdeystviye na Sooruzheniya (Wind Waves and Their Interaction with Structures", Gidrometeoizdat, Leningrad, 255 pp.

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

Miles, J. W., (1957), "On the Generation of Surface Waves by Shear Flows", J. Fluid Mech., 3, 185-204.

Miles, J. W., (1960), "On the Generation of Surface Waves by Turbulent Shear Flows", J. Fluid Mech., 7, 469-478.

Mitsuyasu, H., (2002), "A Historical Note on the Study of Ocean Surface Waves", Journal of Oceanography, Vol. 58, pp. 109 to 120.

Mitsuyasu, H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Okhuso M., Honda T. ve Rikiishi K., (1975), "Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy", J. Phys. Oceanogr., 5, 750-760.

Munk, W.H., (1944), "Proposed Uniform Procedure for Observing Waves and Interpreting Instrument Records," Wave Project, Scripps Institute of Oceanography, LaJolla, Calif., USA.

Özhan E., Abdalla S., (1999), "Türkiye Kıyıları İçin Rüzgar ve Derin Deniz Dalga Atlası", ODTÜ, Ankara.

Philips, O.M., (1957), "On the Generation of Waves by a Turbulent Wind", J. Fluid Mech., 2, 417-445.

Pierson, W.J. ve Moskowitz, L., (1964) "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii" Journal of Geophysical Research, Vol. 69, No. 24, pp. 5181-5190.

Pierson, W. J., Neumann G., James R. W., (1955), "Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics", US Navy Hydrographic Office Pub., 603.

Roll, H.U., ve Fıscher, F., (1965), "Eine Kritische Bemerkung zum Neumann-Spektrum des Seeganges" Deut. Hydrograph. Z., Vol. 9, No. 9.

Rosen, K., (1998), "An Assesment of the Potential for Utility-Scale Wind Power Generation in Eritrea", Master Thesis, Department of Environmental Studies, San Jose State University, San Jose, USA.

Schwab, D.J., Benett 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

Shemdin, O.H., Hasselmann K., Hsiao S.V. ve Herterich K., (1978), "Non-Linear and Linear Bottom Interaction Effects In Shallow Water", In: Turbulent Fluxes Through The Sea Surface; Wave Dynamics and Prediction, Plenum Press, 347-372

Snyder, R. L., Cox C. S., (1966), "A Field Study of The Wind Generation of Ocean Waves", J. Marine Res., 24(2), 141-178.

Snyder, R. L., Dobson F. W., Elliott J. A., Long R.B., (1981), "Array Measurements of Atmospheric Pressure Fluctuations Above Surface Gravity Waves", J. Fluid Mech., 102, 1-59.

Sverdrup, H. U., Munk W. H., (1947), "Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting", H.O. Pub. 601, US Navy Hydrographic Office, Washington, D.C., 44 pp.

SWAMP Group, (1985), "Ocean Wave Modelling", Plenum Press, 256 pp.

WAMDI Group (Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer E., Janssen P.A.E.M., Komen G., Bertotti L., Lionello P., Guillaume A., Cardone V.C., Greenwood J.A., Reistad M., Zambresky L., Ewing J.A.), (1988), "The WAM Model- A Third Generation Wave Prediction Model", J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810.

Witte, J., Kohlhase, S., (1998), "Parametric Study of :Hydrographic Influences on Wave Climate Inshore a Barred Sandy Beach", Wave Analysis and Modelling, 44, 233-246.

Witte, J., Fröhle P., Fittschen T., Kohlhase S., (1999), "Assesment of Long-Term Directional Wave Conditions Based on Nearshore Wind-Wave Correlations", Proc. of the Int. MEDCOAST Conf. on Wind and Wave Clim. Of. Med. and Black Sea, Wınd &Wave Climate'99, 211-220.

WMO, (1998), "Guide To Wave Analysis and Forecasting", Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

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

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	30.08.1981	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1995-1998	Cumhuriyet Lisesi
Lisans	1999-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Kıyı ve Liman Müh. Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2005-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi

