

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGA ENERJİSİ TAHMİNİ VE STOKASTİK
MODELLEME**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mehmet ÖZGER**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Programı : HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI
MÜHENDİSLİĞİ**

MART 2007

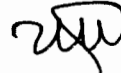
**DALGA ENERJİSİ TAHMİNİ VE STOKASTİK
MODELLEME**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mehmet ÖZGER
(501012100)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Mart 2007**

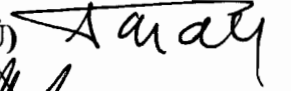
Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Zekai ŞEN



Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Necati AĞIRALIOĞLU (İTÜ)



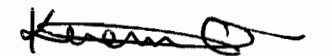
Prof.Dr. Ahmet DEMİR (YTÜ)



Prof.Dr. Halil İbrahim SUR (İÜ)



Doç.Dr. H. Kerem CİĞİZOĞLU (İTÜ)



MART 2007

ÖNSÖZ

Günümüzde, fosil yakıtların meydana getirdiği hava kirliliği sonucunda insanoğlu küresel ısınma meselesi ile karşı karşıya gelmiştir. Küresel ısınma da ciddi boyutlarda iklim değişikliklerine sebep olmaktadır ve olacaktır. Bunun için son zamanlarda sera gazları emisyonlarını azaltacak ve çevreye olumsuz etkileri en az seviyede olan temiz enerji kaynaklarına bir yönelme vardır. Her alanda temiz enerji kaynakları enerji üretimine katkıda bulunacak şekilde entegre edilmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada, temiz enerji kaynaklarının bir türü olan dalga enerjisi üzerinde durulmuş ve önceden tahmini için yeni yöntemler sunulmuştur.

Çalışmalarım boyunca bana desteğini hiç eksik etmeyen, değerli vaktini bana veren, ve zorlandığım noktalarda yol göstericiliği ile sonuca ulaşmamı sağlayan saygıdeğer Zekai ŞEN hocama en içten hürmet ve şükranlarımı sunarım.

Bu eserin ortaya çıkmasında katkılarını benden esirgemeyen sayın Prof. Dr. Necati Ağırlioğlu, değerli yorum ve katkılarıyla çalışmamı kolay hale getiren sayın Prof. Dr. Ahmet Demir, hocalarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2006

İnş. Yük. Müh. Mehmet ÖZGER

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. TEMİZ ENERJİ KAYNAKLARI	1
1.1. Giriş	1
1.2. Güneş Enerjisi	1
1.3. Rüzgar Enerjisi	4
1.4. Hidroelektrik Enerji	6
1.5. Dalga Enerjisi	7
1.6. Tezin Amacı	11
2. DALGA PARAMETRELERİ ve DALGA SPEKTRUMU	13
2.1. Giriş	13
2.2. Dalga Spektrumu	15
2.3. Spektrumdan Elde Edilen Dalga Parametreleri	18
2.4. Model Dalga Spektrumları	20
2.4.1. Pierson-Moskowitz (PM) Spektrumu	21
2.4.2. JONSWAP Spektrumu	22
3. DALGA GÜCÜ POTANSİYELİNİN İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ	24
3.1. Giriş	24
3.2. Ortalama Dalga Enerjisi	24
3.3. Literatür Çalışmaları	29
3.4. Dalga Verileri ve Uygulama	30
4. ÜÇLÜ DİYAGRAM YÖNTEMİ İLE DALGA MODELİ	35
4.1. Giriş	35
4.2. Dalga Tahminleri	35
4.3. JONSWAP Yöntemi	37
4.4. Kriging ve Üçlü Diyagram Yöntemi (ÜDY)	38
4.5. Veri ve Uygulama	44
4.6. Bulgular ve Tartışma	48
4.7. Yinelenebilir (Adaptif) Üçlü Diyagram Yöntemi (YÜDY)	54
4.8. Dalga Gücü Haritaları	57
4.8.1. Feç-Sınırlı Durum Dalga Gücü Haritası	58
4.8.2. Süre-Sınırlı Durum Dalga Gücü Haritası	62
4.8.3. Dalga Gücü Kesitlerinin Spektral Analizi	66

5. DALGA ENERJİSİ ÜRETİMİNİN PLANLANMASINDA RİSK ANALİZLERİ	71
5.1. Giriş	71
5.2. İki Durumlu Markov Modeli	72
5.3. Otoran Katsayısı Hesabı	73
5.3.1. Verilerden Otoran Katsayısının Tahmini	75
5.4. İç Bağımlı Serilerde Tekerrür Aralığı Hesabı	76
5.5. İç Bağımlı Serilerde Risk Hesabı	78
5.6. Dalga Verilerine Uygulaması	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	94

KISALTMALAR

ARMA	: Auto Regressive Moving Average
ARIMA	: Auto Regressive Integrated Moving Average
ASCE	: American Society of Civil Engineers
FFT	: Fast Fourier Transform
JONSWAP	: Joint North Sea Wave Observation Project
NATO TU-WAVES	: NATO Turkish Waves
OMUH	: Ortalama Mutlak Hata
PM	: Pierson-Moskowitz
SMB	: Sverdrup-Munk-Bretschneider
SSS	: Salınlımlı Su Sütunu
ÜDY	: Üçlü Diagram Yöntemi
WMO	: World Meteorological Organization
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YÜDY	: Yinelenen (Adaptif) Üçlü Diagram Yöntemi
YV	: Yarı Varyogram

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 1975-2001 yılları aralığında belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu sıklık yüzdesi (İstasyon no: 46002).....	28
Tablo 3.2 46002 istasyonun dalga verileri özellikleri (1975-2001).....	32
Tablo 3.3 İstasyonlara göre ortalama dalga enerjisi değişimi.....	33
Tablo 4.1 Yarıvaryogram parametreleri.....	48
Tablo 4.2 Hata ölçütlerine göre ÜDY ve JONSWAP sonuçlarının karşılaştırılması.....	52
Tablo 5.1 Pasifik’te bulunan üç farklı dalga ölçüm istasyonuna ait istatistiksel özellikler.....	84
Tablo 5.2 Kullanılan istasyonların kritik enerji üretimsizlik süreleri ve tahmin edilen tekerrür aralıkları.....	85
Tablo 5.3 Tekerrür aralığı ve risk değerlerinin bağımlı ve bağımsız durum için karşılaştırılması.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Dalga kayıtları enerji spektrumu (Dalga yüksekliği = 6.13 m, ortalama dalga periyodu = 8.41s, rüzgar hızı = 14.2 m/s)	16
Şekil 2.2 : Tipik bir dalga varyans spektrumu, düşey eksen $\rho_w g S(f)$ işlemi ile dalga enerji spektrumu $E(f)$ elde edilir.....	17
Şekil 2.3 : JONSWAP spektrumunun f/f_p 'nin fonksiyonu olarak genel görünüşü.....	22
Şekil 2.4 : Farklı örneklerden alınan enerji yoğunluk spektrumları.....	23
Şekil 3.1 : Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodun zamanla değişimi.....	25
Şekil 3.2 : Dalga gücünün aylara göre değişimi (46002).....	29
Şekil 3.3 : Ortalama dalga gücünün istasyonlara göre değişimi.....	34
Şekil 4.1 : Girdi değişkenleri saçılma diyagramları (a) Feç uzunluğu ve rüzgar hızı, (b) Rüzgar esme süresi ve rüzgar hızı.....	39
Şekil 4.2 : Yarıvaryogram parametreleri.....	41
Şekil 4.3 : Ontario gölü ve 45012 nolu istasyon.....	44
Şekil 4.4 : Feç sınırlı durum için (a) belirgin dalga yüksekliği (b) ortalama dalga periyodu üçlü haritalarının hazırlanmasında kullanılan küresel YV'lar.....	46
Şekil 4.5 : Süre sınırlı durum için (a) belirgin dalga yüksekliği (b) ortalama dalga periyodu üçlü haritalarının hazırlanmasında kullanılan Gaussian YV'lar.....	47
Şekil 4.6 : Feç sınırlı durum için (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) dalga periyodu için üçlü diyagram yöntemi tahminleri.....	49
Şekil 4.7 : Süre sınırlı durum için (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) dalga periyodu için üçlü diyagram yöntemi tahminleri.....	51
Şekil 4.8 : Model sonuçlarının gözlemler ile karşılaştırılması.....	52
Şekil 4.9 : Feç sınırlı durum için (a) ÜDY, (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY, (d) JONSWAP ile dalga periyodu tahminleri.....	53
Şekil 4.10 : Süre sınırlı durum için (a) ÜDY (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY, (d) JONSWAP ile dalga periyodu tahminleri.....	54
Şekil 4.11 : YÜDY ile süre sınırlı durum için belirgin dalga yüksekliği tahmini a) Üçlü diyagram yöntemi ile tahmin ve b) hataların tahmini.....	55
Şekil 4.12 : Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga yüksekliği tahmin sonuçları.....	55
Şekil 4.13 : YÜDY ile süre sınırlı durum için dalga periyodu tahmini a) Üçlü diyagram yöntemi ile tahmin ve b) hataların tahmini.....	56
Şekil 4.14 : Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga periyodu tahmin sonuçları.....	56

Şekil 4.15	: Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga yüksekliği tahmin hataları histogramları.....	57
Şekil 4.16	: Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga periyodu tahmin hataları histogramları.....	57
Şekil 4.17	: Feç uzunluğu ve rüzgar hızına bağlı olarak dalga gücünün değişimi.....	58
Şekil 4.18	: Dalga gücü (a) Feç uzunluğu ve (b) Rüzgar hızı arasındaki ilişki.....	59
Şekil 4.19	: Sabit feç uzunluklarında dalga gücü - rüzgar hızı değişimi (a) $X = 35$ km, (b) $X = 50$ km, (c) $X = 65$ km, (d) $X = 80$ km ve (e) $X = 95$ km.....	60
Şekil 4.20	: Sabit rüzgar hızlarında dalga gücü - feç uzunluğu değişimi (a) $U = 7$ m/s, (b) $U = 10$ m/s, (c) $U = 13$ m/s, ve (d) $U = 16$ m/s.....	61
Şekil 4.21	: Esme süresi ve rüzgar hızına bağlı olarak dalga gücünün değişimi.....	62
Şekil 4.22	: Dalga gücü (a) Esme süresi ve (b) Rüzgar hızı arasındaki ilişki.	63
Şekil 4.23	: Sabit esme sürelerinde dalga gücü - rüzgar hızı değişimleri (a) $D = 2$ sa, (b) $D = 3$ sa, (c) $D = 4$ sa, (d) $D = 5$ sa, (e) $D = 8$ sa ve (f) $D = 11$ sa alınmış kesitler.....	64
Şekil 4.24	: Değişik rüzgar hızlarında dalga gücü - rüzgar esme süresi değişimi (a) $U = 9$ m/s, (b) $U = 11$ m/s, (c) $U = 14$ m/s, (d) $U = 15$ m/s, ve (e) $U = 17$ m/s.....	66
Şekil 4.25	: Feç sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $X=35$ km, (b) $X=50$ km, (c) $X=65$ km, (d) $X=80$ km ve (e) $X=95$ km için güç spektrumları.....	67
Şekil 4.26	: Feç sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $U=7$ m/s, (b) $U=10$ m/s, (c) $U=13$ m/s, ve (d) $U=16$ m/s için güç spektrumları.....	68
Şekil 4.27	: Süre sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $D=2$ sa, (b) $D=3$ sa, (c) $D=4$ sa, (d) $D=5$ sa, (e) $D=8$ sa ve (f) $D=11$ sa için güç spektrumları.....	69
Şekil 4.28	: Süre sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $U=9$ m/s, (b) $U=11$ m/s, (c) $U=14$ m/s, (d) $U=15$ m/s, ve (e) $U=17$ m/s için güç spektrumları.....	70
Şekil 5.1	: İki durumlu Markov modelinin şekil olarak gösterimi.....	72
Şekil 5.2	: Önceden belirlenen bir X_0 eşik değeri için şartlı ihtimal bölgeleri cinsinden 4 adet Markov geçiş bölgesi (Şen, 1976).....	73
Şekil 5.3	: Otoran katsayısının, farklı p ihtimalleri için otokorelasyon katsayısına göre değişimi.....	75
Şekil 5.4	: Sentetik verilerden elde edilmiş bir serinin farklı aşılma ihtimallerine karşı gelen otoran fonksiyonları ($\rho=0.9$).....	76
Şekil 5.5	: Çeşitli otokorelasyon katsayıları için tekerrür aralığının aşılma olasılığına göre değişimi.....	77
Şekil 5.6	: Denklem (5.18) ve (5.19)' un karşılaştırılması.....	78
Şekil 5.7	: Otoran katsayısının çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.....	80
Şekil 5.8	: Riskin çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.....	81
Şekil 5.9	: Otokorelasyon katsayısının çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.....	82

Şekil 5.10 : Yıllık minimum 12-saatlik ortalamalara göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için zaman serileri.....	83
Şekil 5.11 : 46002 ve 42001 no' lu istasyonlarda gözlemlenen kritik enerji üretimeme süreleri.....	85

SEMBOL LİSTESİ

a_j	: j -inci dalga bileşeni genliği
$C(x, x+h)$	: X ve $x+h$ noktalarına göre kovaryans
D	: Rüzgar esme süresi (s)
E	: Dalga enerjisi (kW/s)
$E(f)$	: Varyans yoğunluğu
$E(T)$	: Tekerrür aralığı
f	: Frekans (1/s)
f_p	: Tepe frekansı (1/s)
f_m	: Tepe frekansı (1/s)
$H_{1/3}$	: Karakteristik dalga yüksekliği (m)
H_{m0}	: Spektral momentden elde edilen dalga yüksekliği (m)
H_s	: Belirgin dalga yüksekliği (m)
j	: Dalga bileşenlerinin sayısını
L	: Yapının ekonomik ömrü
m_n	: n -inci dereceden moment
p	: Aşma olasılığı
p_{fs}	: Başarılı bir yılı başarısız bir yılın izleme olasılığı
p_{sf}	: Başarısız bir yılı başarılı bir yılın izleme olasılığıdır
P	: Dalga gücü (kW)
P_H	: Hidroelektrik güç (kW)
q	: Aşılmama olasılığı
Q	: Debi (m ³ /s)
r	: Otoran katsayısı
R	: Risk
$s(f, \theta)$	: Yöne bağlı enerji spektrumu
$S(f)$	: Dalga varyans spektrumu
T	: T tekerrür aralığı ve L yapının ömrünü gösterir
T_e	: Enerji periyodu (s)
T_p	: Tepe periyodu (s)
T_{m01}	: Spektrumun ortalama dalga periyodu (s)
T_{m02}	: Ortalama düşerken sıfır olma periyodu (s)
T_{m-10}	: Enerji periyodu (s)
$U_{19.5}$	: Deniz yüzeyinden 19.5 m yükseklikteki rüzgar hızı (m/s)
U	: Rüzgar hızı (m/s)
w_0	: En uzun dalganın açısız dalga frekansını
X	: Feç uzunluğu (km)
X_0	: Belirli bir kesim seviyesi
$Z(x)$	: Rasgele değişkenin x noktasındaki değeri
$Z^*(x_0)$	: X_0 'da Z 'nin tahmin edilen değeri
ΔH	: Kot farkı (m)
ϕ_j	: j -inci dalga bileşenin faz açısı
$\gamma(h)$	: H noktasındaki varyogram değeri

λ_i	: Varyogram modeli ağırlıkları
ρ_h	: Havanın özgül kütlesi
ρ_w	: Suyun özgül kütlesi
$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}+\mathbf{h})$	: Korelogram
μ	: Lagrange parametresidir
$\eta(\tau)$	: t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesi
η_0	: Ortalama su yüzeyi kotunu

DALGA ENERJİSİ TAHMİNİ VE STOKASTİK MODELLEME

ÖZET

Dünyada hızla artan enerji kullanımı insanları yeni enerji kaynakları arayışlarına itmiştir. Bir yandan da fosil yakıtlardan dolayı meydana gelen hava kirliliği ve bunun sonucu iklim değişimi senaryolarından günümüzde sıkça bahsedilmektedir. Yeni enerji kaynaklarından sürdürülebilir ve çevresel etkilerinin en az olması nedeni ile temiz enerji kaynakları dünyada büyük bir ilgi görmektedir. Dalga enerjisi temiz enerji kaynaklarının bir türü olarak daha yeni yeni gelişmektedir. Bu tezde yenilenebilir enerji kaynağı olan dalga enerjisi dalga karakteristikleri ve güvenilirliği bakımından incelenmiştir. Tez bölümleri aşağıdaki şekilde organize edilmiştir.

Birinci bölümde temiz enerji kaynakları incelenmiştir. Bunlar güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji ve dalga enerjisidir.

İkinci bölümde dalga karakteristikleri incelenmiştir. Dalga enerji spektrumunun özellikleri ve buradan çeşitli dalga parametrelerinin nasıl elde edilebileceği konuları işlenmiştir. Ham dalga kayıtlarından enerji spektrumuna geçiş irdelenmiştir. Ayrıca literatürde var olan çeşitli dalga enerji spektrumları sunulmuştur.

Bir dalga enerjisi dönüştürücüsünün verimliliğinin belirlenmesi çalışmalarında atılacak ilk adım, o bölgedeki mevcut dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmektir. Dalga enerjisine rüzgarın dolaylı yoldan olmak üzere dalga yüksekliği ve periyoduna doğrudan etkisi vardır. Deniz şartlarında bu iki değişken belirli bir ortalama etrafında salınım yapmaktadır. Literatürde bulunan mevcut dalga enerjisi hesaplama yöntemleri Üçüncü bölümde karşılaştırılmıştır. Çalışma bölgesine ait eş dalga enerjisi haritası hazırlanmıştır.

Dalga enerjisinin tahmini için belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu iki önemli değişkendir. Bu iki değişken aslında feç uzunluğu, rüzgar esme süresi ve rüzgar hızına bağlı olarak değerler almaktadır. Belirli bir feç mesafesi boyunca ve belirli bir süre zarfında sabit bir hızda esen rüzgarın ortaya çıkardığı dalga yüksekliği ve periyodunu tahmin etmek için bir çok yaklaşım geliştirilmiştir. Dördüncü bölümde ilk defa üçlü diyagram modeli yardımıyla rüzgar hızı, feç mesafesi ve esme süresi gibi büyüklüklerden dalga yüksekliği ve periyodu tahmin edilmeye çalışılacaktır. Daha sonra bu tahminler kullanılarak dalga enerji miktarları elde edilecektir. Dalga yüksekliği ve periyodu tahminleri literatürde mevcut bulunan JONSWAP formülleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin dalga karakteristiklerini tahmin etmekte klasik formüle göre daha iyi olduğu çeşitli grafik ve nümerik gösterim şekilleri ile ortaya konulmuştur.

Dalga enerjisi üretimi o bölgedeki dalga iklimiyle yakından ilgilidir. Enerji üretimi açısından riskli durum, denizde meydana gelen dalgaların enerji üretimi için yetersiz

kalmasıdır. Tüm bunların uzun dönemde incelenmesi için risk analizlerinin yapılması gerekmektedir. Beşinci bölümde, üretilecek enerjinin belli bir eşik değerine göre tekerrür aralığı ve risk durumu belirlenecektir. Bu analizler serilerin iç bağımlı olduğu veya olmadığı durumlar için farklı değerler almaktadır. İç bağımlılık varken, olmadığı kabulü yapılırsa, gerçek değerlerden oldukça büyük sapmaların olacağı açıktır. İç bağımlılık özellikle mühendislik yapılarının planlanmasında en önemli parametreler arasındadır. Bu bölümde hesaplamalar için otoran analizi kullanılmıştır. Dalga parametrelerinin tekerrür aralığı ve risk analizleri bağımlı ve bağımsız durum için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

WAVE ENERGY PREDICTION AND STOCHASTIC MODELING

SUMMARY

The rapid growth of energy consumption in the world has forced the people to search alternative energy resources. On the other hand, nowadays it is often mentioned that air pollution originated from fossil oils and its results climate change scenarios. As a new energy resources clean energy have drawn the attention of researchers, since it is sustainable and has less negative impact to the environment. Wave energy is a kind of clean energy which is newly developed. In this thesis wave energy has been investigated in terms of wave characteristics and their reliability. The sections of the thesis were organized as follows.

In the first section clean energy resources were reviewed. These are solar energy, wind energy, hydroelectric power and wave energy.

In the second section, characteristics were reviewed. The properties of wave energy spectrum and how wave parameters can be obtained from this spectrum were studied. On the other hand, various wave energy spectrum types in the literature were presented in this section.

The first step when determining the efficiency of wave energy converter is to determine the wave energy potential in the study area. Wind speed affects the wave energy indirectly where wave height and period contribute directly. In real ocean conditions these two variables fluctuate around mean values. Wave energy calculation techniques found in the literature was compared in the third section. Wave energy map belonging to study area was prepared.

Significant wave height and mean wave period are the important variables to predict the wave energy. In fact these two variables take values depending on the fetch distance, wind blowing duration and wind speed. There are methodologies developed to predict wave height and period which are constituted by a certain fetch length and blowing duration. In the fourth section first time it is attempted to predict wave height and period from wind speed, fetch length and blowing duration by using triple diagram methodology. Then these predicted values were used to obtain wave energy values. The wave height and wave period predictions were compared with JONSWAP formulations found in the literature. The demonstration of proposed model outperforms classical formulations to predict wave characteristics were presented numerically and graphically.

Wave energy production is closely related with the wave climatology of study area. The risky situation for the energy production is for the insufficient ocean waves to produce energy. It is required to make risk analysis to consider all situations in a long period. In the fifth section occurrence period and risks were determined for different truncation levels. These analyses differ from each other whether the time series are dependent or

not. There is big deviation from real values when it is assumed that there is no serial correlation in the case of dependent series. Serial correlation is an important factor in the planning of engineering structures. Autorun analysis was employed for calculations in this section. Occurrence periods and risks were compared by made calculations for both dependent and independent situations.

1. TEMİZ ENERJİ KAYNAKLARI

1.1 Giriş

Enerji tüketimi insanlar için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Enerjinin üretilmesi için elde bulunan imkanlara ve mevcut doğal zenginliklere göre bir çok yol vardır. Mesela oldukça fazla doğal gaz rezervi bulunan bir ülke enerji ihtiyacına karşılamak için bu maddeyi kullanacak ve kömür, petrol ve diğerlerini ikinci planda tutacaktır. Ayrıca enerji üretmek için hammaddesini dışarıdan ithal etmek durumunda kalan ülkeler yeni stratejiler geliştirmeye kendini zorlayacaktır. Şu anda ülkelerin çoğu enerji ihtiyaçları için fosil yakıtları kullanmaktadır. Fosil yakıtlardan kaynaklanan gaz emisyonlarının sera etkisi yaptığı ve bu olayın da dünya çapında iklim değişikliklerine sebep olduğu bilinmektedir (Gleick, 1986). Fosil yakıtların kullanımını azaltacak yenilenebilir enerji türleri arasında, güneş, rüzgar, hidroelektrik ve dalga enerjisinin yer aldığı görülmektedir. Kyoto antlaşmasında gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin 2010 yılına kadar enerji tüketimlerinin %10'unu temiz enerji kaynaklarından karşılaması kararı alınmıştır (Şen, 2003). Son zamanlarda teknolojik açıdan yenilenebilir enerji türlerinin kullanılabilirliğinde büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Bu konu birçok araştırmacının dikkatini çekmeye başlamıştır.

Ekonomik gelişmenin ve sosyal refahın en önemli göstergelerinden biri de elektrik enerjisi tüketimidir. Bir ülkede kişi başına düşen elektrik enerjisi üretimi ve/veya tüketimi o ülkedeki refah düzeyini yansıtmaları bakımından bir ölçüt olarak kullanılmaktadır (Şen, 2003). 2004 yılı başı itibarıyla Türkiye'de kişi başına elektrik enerjisi tüketimi brüt 2090 kWh'ye ulaşmış olmasına rağmen, bu rakamın Avrupa'da yaklaşık 6500 kWh/kişi ve dünya ortalamasının ise 2350 kWh/kişi olduğu dikkate alınırsa; ülkemiz için kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminin oldukça düşük olduğu sonucuna varılır.

1.2 Güneş enerjisi

Güneş enerjisi hayatın kaynağını ve tüm yenilenebilir enerji türlerinin de başlangıcını oluşturmaktadır. Güneş ışınımının enerji olarak kullanımı son zamanda oldukça

büyük ilgi görmektedir. Bu enerji türünün zaman ve konuma göre değişiklik göstermesi doğaldır. Güneş ışınlamalarının kuzey yarımkürede en fazla olduğu yaz aylarında üretilen enerji miktarı, kış aylarına göre daha fazladır. Ayrıca güneş ışınlamaları süresi ekvator bölgesinde en fazla iken kutuplara doğru bir azalma gösterir. Dünyanın çeşitli yörelerinde güneş ışınlamalarından en optimum şekilde yararlanabilecek uygun bölgeler seçilerek, güneş enerjisi toplama çiftlikleri kurulmaktadır. Buradaki en büyük sorun diğer enerji kaynaklarında olduğu gibi enerjinin depolanamaması ve istendiği zaman kullanılamamasıdır (Şen, 2003, Faiman, ve diğ. 2007). Bu konu ile ilgili çalışmalar da sürmektedir. Fosil yakıtların tükenmeye yüz tutması ve çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı bu enerji türü oldukça önem kazanmıştır (Sorensen, 2000).

Güneş enerjisinin faydalı ve kullanılabilir bir enerji haline dönüştürülmesi için günümüzde değişik teknolojiler kullanılmaktadır. Örnek olarak ülkemizde de sıkça kullanılan güneş toplayıcıları ile sıcak su elde edilmesi oldukça büyük tasarruf fırsatları oluşturmaktadır. Yeni teknolojilerin geliştirilmesi ile bundan sadece yaz aylarında değil, yılın tümünde faydalanma imkanı elde edilebilir. Binalarda güneş gören pencerelerin yüzey alanlarının artırılması gibi bazı basit önlemler ile pasif olarak ta güneş enerjisinden faydalanılabilir. Parabolik toplayıcılar güneş ışınlamalarını bir noktada odaklamak suretiyle yüksek enerji miktarları elde ederken, güneş pilleri ise doğrudan doğruya güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilirler. 1950' li yıllarda icat edilen güneş pilleri sayesinde elde edilen elektrik enerjisi günümüzde ışıklandırma, ölçüm istasyonlarında, bazı elektronik aletlerde v.b. pratik olarak kullanılmaktadır (Şen, 2003).

Güneş ışınları doğrudan olmasa bile diğer doğal olaylarının başlangıcına sebep olur. Hidrolojik çevriminin enerji kaynağı olan güneş ile su yüzeylerinden buharlaşan sular, havada yoğunlaştıktan sonra tekrar yağış olarak yeryüzüne iner. Dolayısıyla yüksek yerlerde oluşan akışlar ve depolanan sular potansiyel enerji olarak kullanılabilir. Sıcaklık farklarından dolayı yüksek basınç merkezlerinden alçak basınç merkezlerine doğru akan hava hareketleri rüzgar ve dalga enerjilerinin kaynağını teşkil etmektedir (McCormick, 1998). Ayrıca okyanuslarda deniz suyundaki sıcaklık farklarından dolayı oluşan akıntılar da enerji kaynağı olarak kullanılır (McCormick, 1998).

Güneşte meydana gelen patlamalar ile yeryüzüne ulaşan enerjinin ancak üçte biri atmosferi geçebilir ve geri kalanı atmosferden yansıtılır. Yeryüzü, hayatın devamı için gerekli enerjiyi dengeli ve sürekli bir biçimde alır. Güneş enerjisi hesaplamaları için solarimetre denilen bir alet ile güneş ışıınımları ölçülür. Yeryüzüne her sene düşen güneş ışıınımları enerjisi, yeryüzünde şimdiye kadar belirlenmiş olan fosil yakıt haznelerinin yaklaşık 160 katı kadardır (Şen, 2003). Bir yerde güneş enerjisinden en fazla şekilde yararlanabilmek için o bölgenin ikliminin bilinmesi gereklidir. Güneş ısıtıcılarının ana malzemesi olarak kısa dalga boylarını geçirip uzun dalga boylarını geçirmeyen camlar kullanılır. Güneş ışıınımlarının cihaz iç ve dış yüzeyleri ile ısı alışverişi üç şekilde olur.

- 1) Temas (kondüksiyon),
- 2) Taşınım (konveksiyon)
- 3) Işıınım (radyasyon)

Dünya güneşten yıllık olarak tüketilen enerjinin yaklaşık 10000 katı kadar büyüklükte sürekli olarak güç alır (Şen, 2003). Bu enerjinin sürekli ve tükenmeyen ve aynı zamanda yenilenebilir ve çevre dostu olduğu da göz önünde tutulmalıdır.

Güneş ışıınımları hesaplamalarında güneş ışıınımları ve güneşlenme süresi gibi iki önemli faktör vardır. Güneş ışıınımları miktarlarının tahmini için

- 1) enlem ve boylam dereceleri ile o yerin yüksekliği,
- 2) bulutların geometrik ve mikrohidrolojik özellikleri ile yeryüzünden olan yükseklik bakımından konumları,
- 3) Günün değişik saatlerinde havanın açık, kapalı ve parçalı bulutlu olması durumları, gereklidir.

Bu değişkenler doğru tahmin edildiği takdirde enerji miktarları hassas bir şekilde hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için ilk olarak Angström (1924) doğrusal bir ilişki sunmuştur. Daha sonra bir çok araştırmacı çeşitli yaklaşımlarda bulunmuştur (Şahin ve Şen, 1998; Şen 2001, 2004).

Güneş enerjisi bakımından ülkemiz oldukça büyük bir potansiyele sahiptir. Gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye'nin birim metre karesinden yılda ortalama olarak 1500kW saatlik güneş enerjisi üretebilir (Şen, 2003). Türkiye'nin güneş enerjisi bakımından en elverişli bölgeleri Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgeleridir.

1.3 Rüzgar enerjisi

İnsanoğlu geçmişten bu yana çeşitli yöntemlerle rüzgar gücünü kendi işlerinde kullanmıştır. Rüzgarın yılın hangi mevsimlerinde, günün hangi zamanlarında ve nerelerde etkili biçimde estiğini tespit ederek ondan yararlanma yoluna gitmiştir. Güneş ışınımının etkisi ve yer yüzeyinin albedosunun farklılığı sonucunda meydana gelen hava hareketleri, atmosferin sınır tabakasında bulunan moleküllerin sürekli olarak hareket etmesini sağlar. Hava kütlelerinin kinetik enerjisi yatay veya düşey bir mil yardımıyla alınabilir (Herbert ve diğ., 2007).

Günümüzde rüzgar enerjisi, yenilenebilir ve çevre dostu olması aynı zamanda kaynağı için herhangi bir bedel ödenmemesi dolayısıyla tercih edilmektedir. Bugün yaklaşık olarak yer yüzünde 25,000'e yakın rüzgar türbini ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Birkaç megawatt'a varan kapasitede rüzgar türbinleri imal edilmesine rağmen bugün yaygın olarak kullanılan türbin kapasitesi 600 kW ve 1.2 MW arasındadır. Danimarka toplam elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık olarak %20'sini rüzgar gücünden karşılamaktadır. Dünyada 2001 yılının sonunda toplam rüzgar kurulu gücü 25,000 MW'a ulaşmıştır. Clarke (1991) rüzgar santrallerinin artmasıyla, elektrik enerjisi üretimi için kullanılan fosil yakıt miktarlarının dolayısıyla çevrede kirlenmenin azalacağına değinmiştir. Avrupa'daki rüzgar çiftlikleri özellikle 1993 enerji dar boğazından sonra artmıştır.

Zaman ve mekanla rüzgar enerjisi potansiyelinin dağılımını anlayabilmek için dönemsel olarak ortaya çıkan değişik ölçekteki hava hareketlerinin incelenmesinde yarar vardır. Rüzgar atmosferde değişik enerji türlerinin dönüşümü sayesinde oluştuğu için, olayın arkasındaki fiziğin anlaşılmasında fayda vardır. Dinamik, termodinamik ve ışıyım gibi fiziksel olayların ortaklaşa ve eş zamanda meydana gelmeleri ile rüzgar ortaya çıkar.

Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için elimizde uzun süreli rüzgar ölçümleri olması gereklidir. Bir meteoroloji istasyonunda yapılan rüzgar hızı ölçümleri zamansal salınımlar içerir. Aritmetik ortalamayı temsil eden belirgin (durağan) kısım ve ortalama etrafında belirsiz salınımlar yapan kısım olmak üzere ikiye ayrılır. Rüzgar türbinine gelen rüzgar yükleri de paralel olarak iki gruba ayrılır. Bunlardan ilki ortalama rüzgar şiddetidir ki bu zaman-ortalaması yüklemesi veya

sanki-durağan yükleme gibi adlandırılır. Rasgele salınımlar ise türbülansa karşı gelir ve buna da rüzgarın dinamik yükü adı verilir. Bunların ortalaması sıfıra eşittir. Durağan ve türbülanslı rüzgar karakteristikleri göz önünde tutulan ölçeğe bağlıdır. Büyük ölçekli rejimlerde durağan kısım önemli iken, anemometre ile yapılan noktasal küçük ölçekli ölçümlerde türbülanslar önemli hale gelir. Belirgin kısmın zamanla değişimi ihmal edilecek kadar azdır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde bu kısım önemlidir. Salınım rüzgar hızları, türbin kontrolü ve stabilitesi için önemlidir. Rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanması için rüzgar hızlarında elde edilen iki parametre önemlidir. Bunlar: 1) Rüzgar hızının zaman olarak kaç defa aşıldığını gösteren histogramlar ve 2) Rüzgar hızının zaman olarak ne kadar bir sürede sürekli olarak aşıldığı ve tekrarlanma aralığı. Bunlar rüzgardan üretilen enerjiye güvenilirlik ve gerekli depolama seviyelerinin belirlenmesinde kullanılırlar.

Genel olarak, rüzgar enerjisi meteorolojik ve jeomorfolojik faktörlerin etkisi altında meydana gelir. Bunlar sırasıyla dinamik ve durağan karakterlidir. Bu iki etken birbirinden bağımsızdır. Birinin etkisinin az olacağı yerde diğeri etkili olabilir. Mesela, tamamen düz olan bir arazide bile atmosferdeki sıcaklık farkından dolayı rüzgar oluşabilir. Atmosfer olayları dinamik bir yapıya sahip olduğu için rüzgar hızı da kaotik davranış içindedir. Jeomorfolojik özellikler dolayısıyla rüzgar enerjisi değişimleri zamansal değil de mekansal değişim özellikleri de gösterir (Şen, 1999a).

Rüzgar hızının ihtimal ve istatistik yöntemleri ile incelenmesinin yanı sıra fizik, mühendislik ve mimarlık gibi çeşitli disiplinlerden gelen bilgilerin kullanılmasında fayda vardır. Atmosfer sınır tabakasındaki gazların dağılımı, rüzgar enerjisinin en optimum şekilde üretilmesi için konum tespiti ve türbin tasarımı gibi bilgilerin elde edilmesi gerekir. Mevcut meteorolojik istasyonlar arasında tektürlülüğün sağlanması gerekir. Ayrıca bir yerde kurulacak türbin dengesi için ekstrem rüzgar hızı değerlerinin ihtimal ve risk hesaplamaları yapılmalıdır.

Rüzgar gücü rüzgarın estiği istikamete dik olarak yerleştirilen birim alana gelen güç ile ifade edilir. Rüzgarın esmesi ile ortaya çıkan şiddetin belirli bir hava kütesini hareket ettirmesi ile meydana gelen kinetik enerji rüzgardaki enerji olarak karşımıza çıkar.

$$E=1/2\rho_hU^3 \quad (1.1)$$

Rüzgar enerjisi miktarı yukarıdaki formül ile ifade edilir. Burada U rüzgar hızını, ρ_h ise havanın özgül kütlesini ifade eder.

1.4 Hidroelektrik enerji

Yüzeysel su akışı bol olan ülkeler hidroelektrik enerjiyi sıkça kullanmaktadırlar. Dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %20'ye varan kısmı hidroelektrik enerjiden karşılanmaktadır (Tanwar, 2007). Gelişmiş ülkelerde bu oran %40'lara kadar varmaktadır. Verimleri klasik güç santrallerine göre birkaç kat daha fazla olan bu tesisler ile güvenilir, etkili ve sürdürülebilir bir şekilde enerji sağlamak mümkün olmaktadır. Barajlarda depolanan su hacimleri her an enerjiye dönüştürülmeye hazırken, düzensiz olan elektrik enerjisi taleplerinin karşılanması açısından oldukça büyük avantajlar sağlar. Ancak barajlar genelde çok amaçlı oldukları için işletimlerinin optimum şekilde yapılması şartı vardır. Büyük biriktirme hazneleri birtakım çevresel sorunları da beraberinde getirebilir. Son zamanda mikro ölçekli türbinler vasıtasıyla nehirlerden biriktirme haznesi yapmadan doğrudan elektrik enerjisi elde etmekte mümkün olmaktadır.

Hidroelektrik tesisler teknoloji açısından oldukça gelişerek neredeyse en son noktalarına ulaşmış durumdadırlar. Bugün yaklaşık 35 kadar dünya ülkesinin başlıca enerji kaynakları arasında bulunmaktadır. Yıllar boyunca meydana gelen gelişmeler sonucunda enerji üretim verimi %90'lar mertebesine çıkmıştır.

Tarihe baktığımız zamanda insanoğlu su gücünden faydalanma yoluna gitmiş ve birçok cihaz geliştirmiştir. Bunlardan ilki suyu düşük seviyeden yükseğe terfi ettiren su tekerlekleridir. Diğer yandan da su değirmenleri çeşitli amaçlar için kullanılmışlardır.

Hidroelektrik enerji aslında barajların haznelerinde biriken suyun potansiyel enerji olarak depo edilmiş halidir. Elektrik enerjisine dönüştürülmesi için önce hareket sağlanarak yani yüksekten düşürülerek kinetik enerji kazandırılır sonra da türbinlerden geçirilir. Hidroelektrik enerji miktarına etki eden parametreler net düşüm yüksekliği, geçirilen debi ve türbin verimidir. Elde edilecek güç düşüm yüksekliği ve debi ile doğru orantılıdır. Teorik olarak elde edilebilecek enerji miktarı

$$P_H = \gamma Q \Delta H \quad (1.2)$$

ile hesaplanır. Burada Q debiyi, H ise düşüm yüksekliğini gösterir. Barajlardaki potansiyel enerji suyun düşürülmesi ile dönme hareketine yani kinetik enerjiye ve sonunda üreticiler vasıtası ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Tabii ki bu dönüşümler esnasında bir miktar enerji kaybolmaktadır. Düşüm yüksekliği ve üretilmesi planlanan enerji türbin seçiminde kullanılan iki önemli karar değişkenidir.

Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesi çalışmalarında, brüt potansiyel, teknik potansiyel ve ekonomik potansiyel kavramları kullanılmaktadır. Brüt su kuvveti potansiyeli bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teorik üst sınırını gösterir ve mevcut düşü ve ortalama debiden hesaplanır. Topoğrafya ve hidrolojinin bir fonksiyonu olan brüt hidroelektrik enerji potansiyeli, ülkemiz için 433 milyar kWh mertebesinde (EİE).

Bir akarsu havzasında teknolojik olarak üretililecek hidroelektrik enerjinin en büyük değeri, teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyelini verir. Düşü, akım ve dönüşümde uygulanan teknolojiye bağlı olarak oluşabilecek kaçınılmaz kayıplar göz ardı edilmektedir. Bölgede planlanan hidroelektrik projelerin teknik açıdan uygulanabilmesi mümkün olan tümünün gerçekleştirilmesi ile elde edilecek hidroelektrik enerji üretiminin sınırlarını belirler.

Ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel ise gerek teknik açıdan geliştirilebilmesi mümkün, gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm hidroelektrik projelerin toplam üretimi olarak tanımlanabilir. Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin ekonomik açıdan en iyilenmesi sonucu elde edilen değeri verir. Bir başka deyişle ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, beklenen faydaların, proje ve uygulama maliyetlerinden fazla olan hidroelektrik enerji üretimini göstermektedir.

1.5 Dalga enerjisi

Dünyada tüketilen enerji miktarının, önümüzdeki on yılda önemli bir şekilde artacağı tahmin edilmektedir (Beccali ve diğ., 2004). Geleneksel enerji üretim metotları çevre kirliliğine yol açtığı için artık bir çok hükümet temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorunda kalmıştır. Enerji sektörü penceresi yenilenebilir enerji kaynaklarına açılan, devrim niteliğindeki bir sürece doğru sürüklenmektedir. Yenilenebilir enerji endüstrisine göz atıldığında dalga enerjisi endüstrisi ön plana çıkmaktadır.

Teknolojisinin yeni olması ve rüzgar enerjisi gibi belli bir seviyeye gelmiş teknolojilerle rekabet edememesi gibi olumsuzluklara rağmen, bu enerji türüne bir çok ülke tarafından artan bir ilgi vardır. Deniz dalgalarının en önemli özelliği yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Deniz dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi bir çok araştırmacı tarafından irdelenmiştir. Kullanılabilir enerji haline dönüştürülmesi fikri yeni değildir. Bir çok dalga enerjisi dönüştürücüsü tasarlanmış ve model ölçeğinde test edilmiştir (McCormick,1981). Avrupa’ da dalga enerjisine yönelik 1973 yılında petrol fiyatlarının aşırı derecede yükselmesinden sonra başlamıştır. Hatırı sayılır bir dalga enerjisi potansiyeline sahip Avrupa ülkeleri, bu enerjiyi muhtemel güç kaynakları arasında görmüş ve bu konu ile ilgili yeni araştırma projeleri başlatmıştır. Orta ve uzun vadede İngiltere, Portekiz, Norveç ve Danimarka gibi ülkeler, dalga gücü dönüştürme teknolojileri üzerinde o zamandan beri çalışmaktadırlar. Yapılan çalışmalar oldukça geniş çaplıdır ve ayrıntıları Salter (1988), Ross (1995), ve diğerleri tarafından verilmiştir. Dalga enerjisi dönüşümünün araştırılması ve geliştirilmesi için harcanan çaba, 1986’ dan beri dalga enerjisi konusunda gelişmeleri takip eden Avrupa Birliği Komisyonu tarafından destek görmektedir. Komisyonun araştırma programları 1994’te dördüncü çerçeve programı ile başlamıştır ve 1993’ ten bu yana, üniversite, ulusal araştırma merkezleri ile endüstrinin içinde bulunduğu bütün Avrupa’da yürütülen faaliyetlere katkıda bulunan, bir seri uluslararası konferans (Edinburgh, UK, 1993, Lisbon, Portugal, 1995, Patras, Greece, 1998 and Aalborg, Denmark, 2000), yine bu komisyon tarafından desteklenmektedir. Son 25 yılda, dalga enerjisi çeşitli süreçlerden geçmiştir. Bazen şevkli çalışmalar bazen de hayal kırıklıkları yaşanmıştır. Bununla birlikte, Ar-Ge çalışmaları ve bugüne kadar birikmiş olan deneyim, dalga gücü tekniklerini geliştirmiş ve önceye göre ticari kullanıma daha yakın hale getirmiştir. Zor işletim şartlarında geniş bir ölçekte uygulanabilen ticari amaçlı birkaç tesis Avrupa ve Avustralya’ da faaliyetini sürdürmektedir. Diğer dönüştürücülerin başarılı bir uygulama için Ar-Ge projelerinin son aşamasında oldukları bilinmektedir. Bunun yanında, global enerji pazarında rekabeti sağlamak ve mevcut teknolojilerin gelişimini sağlamak için hem kuruluş hem de uygulama safhasında Ar-Ge çalışması devamlı bir surette gerekmektedir.

Dalga enerjisi aslında, rüzgarın deniz yüzeyinde esmesiyle meydana gelir. Su yüzeyi yakınında rüzgar enerjisinin doğal yoğunlaşmış şekli olarak karşımıza çıkar. Bir kere

oluşturulduklarında, çok az bir enerji kaybı ile binlerce kilometre gidebilirler. Mesela, Atlantik Okyanusu'nun Amerika tarafında dalgalar, batı rüzgarlarının da etkisiyle, batı Avrupa kıyılarına kadar gelir. Derin denizlerde oluşan enerji akışı oldukça büyüktür. Bir dalganın gücü, genliğinin karesi ve periyodu ile doğru orantılıdır. Bu yüzden, uzun periyotlu (7-10 s), büyük genlikli (2 m), dalga birim tepe genişliği için 40-70 kW/m gibi bir enerji akışına sahiptir (McCormick,1981). Sahile doğru yaklaştıkça, deniz tabanı ile sürtünmeden dolayı mevcut enerji azalacaktır. Sahile yakın kısımdaki enerji harcanımı, enerjinin yoğunlaşmasına (hot spots) neden olan kırılma ve yansıma gibi doğal olaylar vasıtasıyla telafi edilir. Atlantik 'in uzun ve fırtınalı feçin sonunda bulunan Batı Avrupa kıyılarında, hatırı sayılır bir enerji mevcuttur. Kutupların etrafında cereyan eden fırtınalardan dolayı, Güney Amerika'nın güney kıyıları ve Avustralya oldukça enerjik dalga iklimine sahiptir. Şimdiki çalışmalar yaklaşık olarak 290 GW dalga gücü kaynağına sahip kuzey-doğu Atlantik'te (Kuzey Denizi'ni de kapsamakta) yapılmaktadır (Pontes, ve diğ. 1998).

Uzun dönem yıllık dalga enerjisi seviyesi Avrupa'nın Atlantik kıyılarının güneyinin büyük bir kısmında 25 kW/h iken, İrlanda ve İskoçya açıklarında 75 kW/h'e kadar çıkmaktadır. Kuzeye doğru, Norveç kıyılarının kuzey kısmında 30 kW/h'e düşmektedir. Kuzey Denizi'nde ise değişim oldukça büyüktür. Kuzey kısımda 21 kW/h saatten, güney kısımlarında yarısına kadar düşmektedir. Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerde yıllık güç seviyesi 4 ila 11 kW/h arasında değişmektedir. En büyük değerlere, Güney-Batı Ege denizinde ulaşılmıştır. Burada rüzgar enerjisi potansiyeli fazla olmakla beraber feç uzunluğu da oldukça fazladır. Akdeniz' de Avrupa kıyılarında yıllık toplam dalga enerjisi 30 GW mertebesinde. Böylelikle Avrupa genelinde 320 GW lık bir dalga enerjisi kaynağı olduğu görülmektedir. Dalga enerjisi uygulamalarında karşılaşılan bir takım zorluklar vardır. Bunlar;

- 1) Dalga genliğinin, fazının ve yönünün düzensizliği, bu yüzden tüm frekansı kapsayacak şekilde en büyük üretim verimini veren dönüştürücü tasarımı zorlaşır,
- 2) Kasırgalar, fırtınalar gibi ekstrem durumlarda dönüştürücüye normalden 100 kat daha fazla yükler gelebilir, ve
- 3) Dalganın düzensiz ve yavaş hareketi (frekansı 0.1 Hz) elektrik enerjisine dönüştürülmesi için yeterli olmayabilir.

Dalga enerjisi dönüştürücüsünün bir yandan verimli ve güvenli bir işleme sahip olması gerekirken, diğer yandan da ekonomik olabilirliğini sağlamış olması gerekir. Diğer bütün yenilenebilir enerji türlerinde olduğu gibi, dönüştürücünün inşaa edileceği bölgede mevcut enerjinin ve değişkenliği ilk olarak belirlenmelidir. Şu andaki teknoloji orta ölçekte yaklaşık olarak 1.5-2 MW veya daha küçük 5-20 kW gücündeki cihazları desteklemektedir. Daha fazla enerji üretimi için bunlar bir dizi halinde kurulabilirler.

Bir enerji türünün temiz enerji kaynaklarının içine sokulabilmesi için çevreye olan olumsuz yönde etkisinin sınırlı olması gerekir. Genelde, dalga enerjisi CO₂ emisyonlarının az olduğu, oldukça büyük bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Tabii ki şimdiye kadar sınırlı sayıdaki uygulamalar ancak dalga enerjisi dönüştürücülerinin belirli bir çerçevede çevresel etkilerinin değerlendirilmesine sebep olmuştur. Bu teknolojinin çevreye olan etkileri Thorpe (1992) tarafından sıralanmıştır.

Dalga enerjisi dönüştürücülerinin boyutlandırılmasındaki en büyük sorun maruz kalınacak ve sıkça rastlanan dalga karakteristiklerinin tahminidir. Ayrıca pik değerlerin de belirlenmesi gereklidir. Tüm bunlar için elimizde uzun dönem dalga kayıtlarının olması lazımdır. 50 senelik tekerrür aralığı olan bir dalgayı belirlemek için düzenli olarak yapılmış birkaç senelik ölçümler yeterli olmayacaktır. Sonuç olarak, tasarlanan cihazın maruz kaldığı yüklemeler ya beklenenin altında ya da üstünde kalacaktır. İlk durumda kısmen veya tamamen yapı hasarları oluşurken ikinci durumda yüksek yapısal maliyetler ve dolayısıyla enerji üretim maliyetlerinin artmasıyla diğerleri ile olan rekabet gücünü yitirecektir. Bu kısıtlamalarla birlikte dalga enerjisi teknolojisini endüstri, ülke idaresi ve halk tarafından anlaşılmasındaki eksiklikler ve yanlış bilgilendirmeler, dalga enerjisinin gelişmesini yavaşlatmıştır. Diğer taraftan, dalga enerjisinin ekonomik, çevresel, etik ve sosyal etkenleri bir arada tutmasıyla sürdürülebilir bir gelişme anlamında çok bariz faydaları bulunmaktadır. Denizlerde bulunan büyük miktarlardaki enerji uygun dönüştürücü tasarımları ile oldukça rekabetçi ve ekonomik olabilir. Sınırlı çevresel etkiler ve dalga enerjisinin mevsimsel değişimlerinin özellikle ılıman iklimlerde ihtiyaca göre olması en büyük üstünlüklerindendir. Arazi kullanımının ihmal edilebilir düzeyde olması ve açık denizde rüzgar enerjisi ile birlikte kullanılabilmesi de önemli hususlar arasındadır. Diğer enerji türleri gibi, dalga enerjisinin yerinde elde edilerek kullanımı özellikle

uzakta bulunan yerleşim birimlerine enerji sağlanması için faydalı olacaktır. Ayrıca büyük ölçekte inşa edilecek dalga enerjisi sistemlerinin çeşitli ilgili alanlarda iş istihdamını da artırması beklenebilir.

1.6 Tezin amacı

Fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan kirletici gazların sebep olduğu küresel ısınma günümüzün en büyük problemi haline gelmiştir. İklim değişikliği ve her alanda meydana getireceği olumsuzluklar çeşitli senaryolar ile önceden kestirilmeye çalışılmaktadır. Bunun yanında sera gazları emisyonlarını azaltacak tedbirlere de başvurulmaktadır. Temiz enerji kaynakları hem çevreye olan olumsuz etkilerinin çok daha az olması hem de bir alternatif teşkil etmesi bakımından çözümün bir parçasını teşkil edebilir. Burada temiz enerji kaynaklarının bir türü olan dalga enerjisi, dalga karakteristikleri ve güvenilirliği açısından irdelenecektir.

Bir dalga enerjisi dönüştürücüsünün verimliliğinin belirlenmesi çalışmalarında atılacak ilk adım o bölgedeki mevcut dalga enerjisi verimini değerlendirmektir. Dalga enerjisine rüzgarın dolaylı yoldan olmak üzere dalga yüksekliği ve periyoduna doğrudan etkisi vardır. Deniz şartlarında bu iki değişken belirli bir ortalama etrafında salınım yapmaktadır. Literatürde bulunan mevcut dalga enerjisi hesaplama yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Dalga enerjisinin tahmini için belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu iki önemli değişkendir. Bu iki değişken aslında feç uzunluğu, rüzgar esme süresi ve rüzgar hızına bağlı olarak değerler almaktadır. Belirli bir feç mesafesi boyunca ve belirli bir süre zarfında sabit bir hızda esen rüzgarın ortaya çıkardığı dalga yüksekliği ve periyodunu tahmin etmek için bir çok yaklaşım geliştirilmiştir. Burada ilk defa üçlü diyagram modeli yardımıyla rüzgar hızı, feç mesafesi ve esme süresi gibi büyüklüklerden dalga yüksekliği ve periyodu tahmin edilmeye çalışılacaktır. Daha sonra bu tahminler kullanılarak dalga enerji miktarları elde edilecektir. Dalga yüksekliği ve periyodu tahminleri literatürde mevcut bulunan JONSWAP formülleri ile karşılaştırılmıştır.

Dalga ikliminin dalga enerjisi üretimi üzerinde oldukça büyük bir etkisi vardır. Denizde meydana gelen dalgaların yeterince büyük olmaması enerji üretimi açısından riskli durumu teşkil eder. Tüm bunların uzun dönemde incelenmesi için

risk analizlerinin yapılmasını gerektirmektedir. Son olarak, üretilecek enerjinin belli bir eşik değerine göre tekerrür aralığı ve risk durumu belirlenecektir. Bu analizler serilerin iç bağımlı olduğu veya olmadığı durumlar için farklı değerler almaktadır. Bu tür hesaplamaları yapmak için çeşitli matematiksel kabullerden uzak otoran analizi kullanılmıştır. Dalga parametrelerinin tekerrür aralığı ve risk analizleri bağımlı ve bağımsız durum için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2. DALGA PARAMETRELERİ VE DALGA SPEKTRUMU

2.1 Giriş

Dalga enerjisi potansiyelinin belirlenebilmesi için deniz dalga şartlarının bilinmesi gereklidir. Bu ancak dalga rasatları ve modellerinin kullanılması ile mümkündür. Son zamanlarda atmosfer-deniz dalga modelleri kullanılmaktadır (Gill, 1982). Ülkemizde dalga rasatları ilgili kurumlar (Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı) ve bazı araştırma projeleri (NATO TU-WAVES) kapsamında yapılmaktadır. Elimizde uzun dönemli dalga kayıtları bulunmamaktadır. Ayrıca ölçüm yapılan istasyonlarının sayısı da yeterli değildir. Meteorolojik veriler kullanılarak uzun süreli veriler üretilebilir ve deniz üzerinde dalga ölçüm istasyonu kurmadan sadece meteorolojik değişkenlerin ölçülmesi veya daha önceden kaydedilmiş veriler ile dalga karakteristikleri belirlenebilir.

Dalga enerjisinin kullanılabilir enerji haline dönüştürülmesi fikri yeni değildir. Bu konu üzerine ilk patentin alınma tarihi 1799 yılına kadar uzanmaktadır (Clement ve diğ., 2002). Dalgalarla son 100 yılda yapılan çeşitli konulardaki bilimsel çalışmaların yanı sıra, son bir kaç on yılda dalga enerjisinin kullanımı ile ilgili düşünceler 1970 sonrası enerji krizinin ortaya çıkması ile daha da belirgin hale gelmiştir. Dalgadan elde edilecek enerji temiz, yenilenebilir ve çevre dostu olması ile de dikkat çekmektedir. Özellikle üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizde bu konularda çalışma yapılarak, elektrik enerjisi elde edebilmenin yollarının araştırılması başlıca konular arasında yer almaktadır.

Rüzgar, başlangıç olarak güneş ışıınımı enerjisinden meydana geldiği için denizlerdeki dalgalar güneşten ortaya çıkan enerjinin depolanmış hali olarak düşünülebilir. Güneş gücü, ortalama olarak 100 W/ m^2 olduğundan, bunun sebep olacağı dalga gücü miktarı birim tepe uzunluğu boyunca 100 kW olacağı anlaşılmıştır (McCormick, 1981). Genel olarak dalgalar, yükseklik H ve periyot T gibi iki değişkenle tanımlanır. Diğer taraftan, rüzgarın ortaya çıkardığı dalgalarda etkin olarak üç faktör vardır. Bunlar, rüzgar hızı V , rüzgar esme süresi D ve X ile

gösterilen feç uzunluğudur. Tam gelişmiş deniz durumunda ise dalgaya sadece rüzgar hızı katkıda bulunmaktadır.

Dünya genelinde, model aşamasından prototip aşamasına geçen irili ufaklı bir çok dalga enerjisi dönüştürücüsü mevcuttur (Clement ve diğ., 2002). Bunların içinden salınımlı su sütunu (SSS) ilkesine göre çalışanlar en çok rağbet görenlerdir. Bu sistemlerin deniz koşullarında denemesi yapılmıştır. Avrupa Birliği Komisyonu'nun desteği altında Portekiz'in Azore adalarında 400 kW'lık bir dönüştürücü hala faaliyet göstermektedir (Falcao ve Falcao, 2000). İskoçya'nın Islay adasında da iki adet SSS prototipi kurulmuştur. Bunlardan birincisi 75 kW gücünde olup 1991'den 1990 sonlarına kadar enerji üretmiştir (Whittaker ve diğ. 1993). Hemen ardından değişik bir inşaat tekniği kullanılan LIMPET (500 kW) kurulmuştur ve 2000 yılının sonlarından itibaren de üretime geçmiştir (Heath ve diğ., 2000).

Ülkemiz denizleri için elimizde bulunan dalga rasatları ile bir kaynak değerlendirmesi yapılması ve hali hazırda var olan dönüştürücülerin uygunluğunun ve yapılabirliğinin araştırılması veya yerli dönüştürücü tasarımlarının faaliyete geçirilmesi gerekmektedir.

Dalga enerjisinin belirlenmesinde iki önemli parametre vardır. Bunlar, belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve enerji periyodu (T_e) dur. Dalga enerjisi dönüştürücülerinin hidrodinamik tepkileri dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile doğru orantılı olan dalga gücünün düzeyi ile yakından alakalıdır. Çeşitli dalga yüksekliklerinde ve periyotlarında yıllık elektrik üretiminin nasıl değiştiğinin incelenmesi gerekir. Bunun için de ortalama dalga gücünün belirlenmesi gerekmektedir. SSS dönüştürücülerinin en iyi şekilde boyutlandırılmaları için mevcut deniz şartları yani dalga karakteristikleri ile hidrodinamik etkileşim önemli rol oynar. Warner (1997) farklı geometrik şekillere sahip SSS dönüştürücüler için sayısal modeller geliştirmiştir. Dalga enerjisinin alternatif kaynak olarak kullanılmasına karar vermeden önce, elde edilecek enerjinin ihtiyacı karşılayıp karşılamadığına bakmak gerekir. Kuvvetli rüzgarlar genelde feç sınırlı olmayan açık denizlerde dalga enerjisi üretimi için idealdir. Bu bölgeler kıyıdan çok uzak oldukları için ekonomik açıdan uygunluklarını kaybederler.

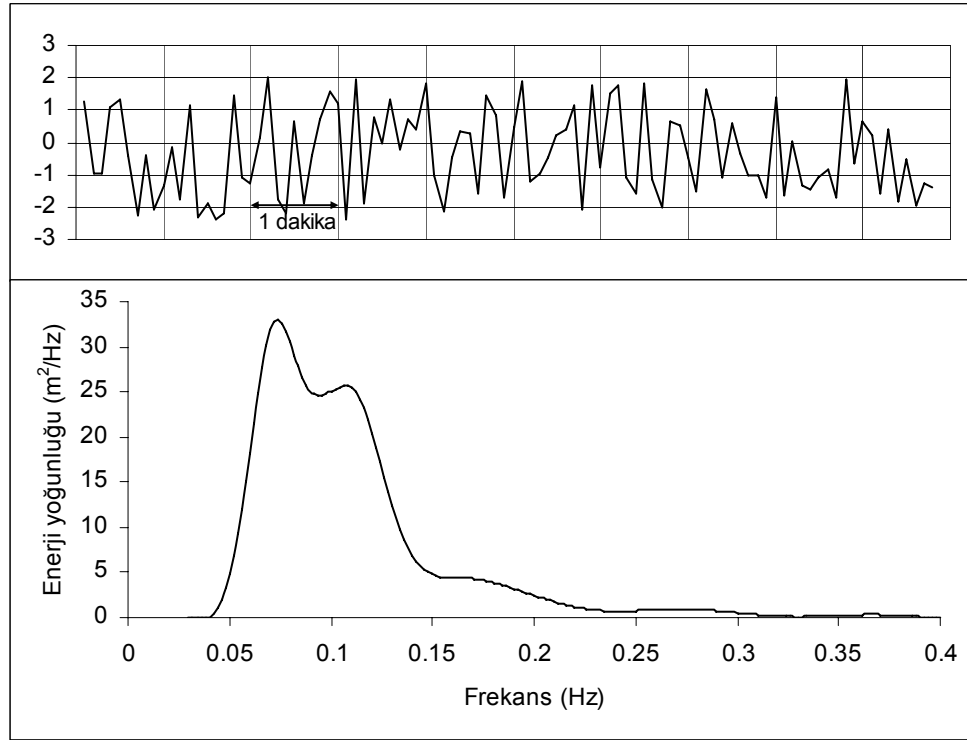
2.2 Dalga spektrumu

Deniz yüzeyi düzensiz görünüşünü aslında birçok basit dalganın birleşiminden alır. Farklı dalgaların üst üste bindiği deniz yüzeyi durumunu en iyi ifade edebilmenin yolu dalga spektrumu yöntemini kullanmaktır. Denizde ölçülen bir dalga kaydı harmonik (veya Fourier) analizi yardımıyla farklı frekansta, yönde, genlikte ve fazda düzgün sinüs ve kosinüs dalgaları şeklinde bileşenlerine ayrılabilir. Dalga ölçümleri zaman ortamından frekans ortamına aktarılmış olur. Her bir frekans ve yön bir dalga bileşenine karşılık gelirken, her bir dalga bileşeni de genlik ve faz gibi büyüklüklerden meydana gelmektedir. Bu yüzden harmonik (Fourier) analiz düzensiz fakat belli bir periyodikliği olan bir dalga kaydına sinüs eğrilerinin toplamı açısından bir yaklaşım sağlamaktadır. Bir yönde zamanla değişen su yüzeyi yüksekliği denklemi şu şekilde verilmiştir (Goda , 2000)

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{j=1}^n a_j \sin(j\omega_0 t + \phi_j) \quad (2.1)$$

Burada $\eta(t)$, t anında ölçülen su yüzeyi düşey yer değiştirmesi, η_0 ortalama su yüzeyi kotunu, ω_0 en uzun dalganın açısal dalga frekansını, j dalga bileşenlerinin sayısını, a_j katsayısı j -inci dalga bileşeni genliğini, ϕ_j açısı j -inci dalga bileşenin faz açısını ve n ise toplam bileşen sayısını vermektedir. Faz açısı değişimin tüm bileşenlerinin aynı fazda olmayacağı bilgisini verir. Maksimum dalga yüksekliğinin farklı zamanlarda ortaya çıkması bunu gösterir. Yüksek frekanslı bileşenler aslında bazen anlamsız olur. Bu sebeple n sayısını sınırlı tutmakta fayda vardır. Her bir dalga bileşeni kendi hızı (dalga periyodu veya frekansı) ile hareket eder. Bu yüzden dalga bileşenlerinden ibaret olan spektrum su yüzeyi boyunca sürekli değişim gösterir. Düşük frekanslı bileşenler yüksek frekanstakilere göre daha hızlı hareket etmektedir. Her bir dalga bileşeni için a_j genliklerinin karelerinin beklenen değeri (aritmetik ortalama), yüzey yer değiştirmesinin (η) beklenen varyansına ($E[\sum_j a_j^2]$) katkıda bulunur. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan fonksiyon dalga varyans spektrumu $S(f)$ olarak bilinir. Her bir dalga bileşeni için çeşitli frekanslar [örneğin 0.1 Hertz (Hz) 10 saniyelik bir periyoda denk gelir] yatay ekseninde, bunlara karşı gelen dalga genliklerinin kareleri ise düşey ekseninde çizildiğinde ortaya incelenen dalga sisteminin spektrumu çıkar (Şekil 2.1). Bu şekilde ölçülmüş bir dalga kaydının

spektrumu hesaplandığı verilerden alınan bir örnek ile beraber gösterilmiştir (WMO, 1998).



Şekil 2.1. Dalga kayıtları enerji spektrumu (Dalga yüksekliği = 6.13 m, ortalama dalga periyodu = 8.41s, rüzgar hızı = 14.2 m/s)

Pratikte dalga spektrumu farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır. Şu anda en çok kullanılan algoritma olan hızlı Fourier dönüşümü (FFT), Cooley ve Tukey (1965) tarafından geliştirilmiştir. Bundan daha yavaş bir yöntem ise Blackman ve Tukey (1959) tarafından öne sürülen Wiener-Kinchine teoremini esas alan oto-korelasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın yerini şimdi tamamıyla FFT tekniği almıştır. Ayrıca yukarıdaki iki yöntemle göre hesaplanan dalga spektrumları arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı çıkmamaktadır. Dalga enerjisi,

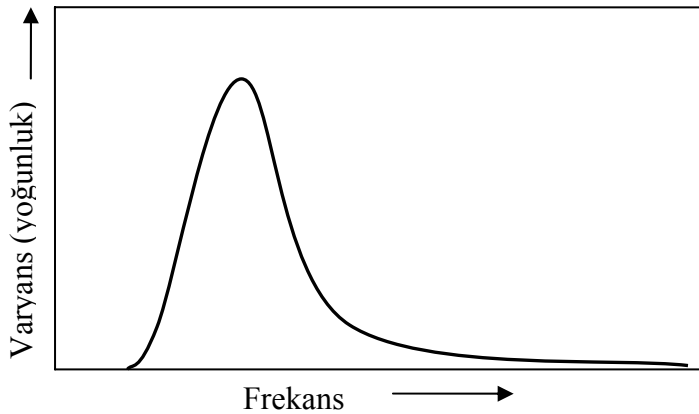
$$E = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \quad (2.2)$$

veya

$$E = \frac{1}{2} \rho_w g a^2 \quad (2.3)$$

eşitlikleri ile ifade edilir ve dalga yüksekliği $H = 2a$ 'dır. Dalga spektrumu E ile gösterilip dalga-enerjisi spektrumu olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak, eşitlikten $\rho_w g$ terimi düşürülüp düşey eksene sadece $a^2/2$ veya daha basit olarak a^2 değerleri çizilir. Bu yüzden dalga-enerji spektrumu çoğu zaman varyans spektrumu bazen de enerji-yoğunluk spektrumu olarak adlandırılmaktadır (WMO, 1998).

Dalga spektrumu Fourier analizi sonucunda bulunan ayrık noktaların sürekli bir eğri ile birleştirilmiş olarak verilir (Şekil 2.2). Bu eğri her zaman çok düzenli olmayabilir. Düzensiz deniz şartları birkaç tepeden meydana gelen geniş bantlara sahip spektrumların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tepeler ya dikkatli olarak birbirinden ayrılırlar ya da içinde birden çok tepe var olan geniş bir eğri meydana getirecek şekilde birleştirilirler. Büyük okyanus dalgaları (swell) enerjilerinin tepe değerinin etrafında oldukça dar frekans aralığında bir spektrum meydana getirir. Böyle dar bir spektrum bu dalgaların çıplak gözle de oldukça rahat bir şekilde tespit edilebileceğini gösterir.



Şekil 2.2 Tipik bir dalga varyans spektrumu, düşey eksende $\rho_w g S(f)$ işlemi ile dalga enerji spektrumu $E(f)$ elde edilir.

Ölçümler dalga yönleri hakkında bilgi sağladıkları için bunlardan sadece çeşitli frekanslara karşı gelen enerji dağılımı, $E(f)$ hesaplanabilir. Düşey eksen dalga enerjisi m^2/Hz birimi ile gösterilir. Daha önceden de söylendiği gibi spektrum, teoride sürekli olmasına rağmen, pratikte varyanslar (veya enerjiler) ayrık frekanslar için hesaplanmaktadır.

Son yıllarda yöntem bilimlerinde meydana gelen gelişmeler ile birlikte dalga spektrumlarına da yeni bir bakış açısı gelmiştir. Klasik dalga spektrumları ile deniz ve göl yüzeylerindeki enerji dağılımları uygun bir şekilde temsil edilirken, istatistik

momentler yardımıyla sık kullanılan dalga parametreleri tespit edilebilmektedir. Naithani ve Deo (2005) kıyı yapılarının planlanması ve tasarımı aşamasında gerekli olan dalga spektrumunun belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu gibi parametrelerden, yapay sinir ağları kullanılarak elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca dalga tahminlerinde kullanılan sayısal modellerin geliştirilmesine büyük katkıları olmuştur. Mevcut dalga spektrumları ile sadece frekans boyutunda analizler yapılabilmesi bazı önemli bilgilerin yorumlanabilmesi yolunu kapatmıştır. Son dönemlerde artan uygulamaları ile birlikte dalgacık (wavelet) dönüşümleri enerji dağılımını hem frekans hem de zaman ekseninde ifade edebilmektedir (Küçük, 2004). Böylelikle enerjinin zamanla değişimi de göz önünde bulundurulmuş olacaktır. Liu, (2000) Michigan gölü ve Pasifik Okyanusunda yapılan eş zamanlı rüzgar ve dalga ölçümlerini kullanarak dalgacık analizi ile verilerin durağan olup olmadığını incelemiştir.

2.3 Spektrumdan Elde Edilen Dalga Parametreleri

Dalga spektrumu çeşitli frekanslarda (veya dalga boyu, veya frekans ve yön) dalga enerjisinin (veya deniz yüzeyi varyansı) dağılımıdır. İstatistiksel bir dağılım olarak düşünülürse bu spektrumdan birçok parametre tahmin edilebilir. Bu yüzden dalga spektrumu şekli dağılımın momentleri şeklinde ifade edilebilir. Spektrumun *n*-inci dereceden momenti m_n , şu şekilde tanımlanır (Goda, 2000; WMO, 1998)

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df \quad (2.4)$$

burada $E(f)$, f (bazen f yerine $w = 2\pi f$ tercih edilebilir) frekansına karşı gelen varyans yoğunluğunu gösterir (Şekil 2.2). Dolayısıyla $E(f) df$, *i*-nci aralık olan $f+df$ deki $a_i^2/2$ varyansını temsil eder. Pratikte Denklem (2.4)'deki entegral, $f_i=idf$ ile sonlu toplamlar şeklinde şu şekilde ifade edilir.

$$m_n = \sum_{i=0}^N f_i^n \frac{a_i^2}{2} \quad (2.5)$$

m_n 'nin tanımından, sıfıncı moment m_0 , spektral eğrinin altında kalan alanı verir. Sonlu şekilde yazılırsa,

$$m_0 = \sum_{i=0}^N \frac{a_i^2}{2} = \frac{a^2}{2} \quad (2.6)$$

olur. Her bir spektral bileşenin varyanslarının toplamından elde edilen dalga kaydının toplam varyansını verir. Bu yüzden spektral eğrinin altında kalan alanın spektrumdan türetilecek olan dalga-yükseklik parametreleri için fiziksel bir anlamı vardır. Basit bir dalga için E dalga enerjisi (birim alan için) dalga yüksekliğine bağlı olarak Denklem (2.2) de sunulmuştur.

Eğer deniz durumu aynı enerjiye sahip bir sinüs dalgası ile yer değiştirilecek olursa, buna karşı gelen yükseklik şu şekilde ifade edilir.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8E}{\rho_w g}} \quad (2.7)$$

Bu dalga yüksekliği karesi ortalamasının karekökü (root-mean-square wave height) olarak bilinir. Burada E deniz durumu için birim alandaki toplam enerjiyi göstermektedir. Çoğu zaman dalga kayıtlarından doğrudan okunan belirgin dalga yüksekliği, $\overline{H}_{1/3}$ 'e veya gözle gözlemlenen karakteristik dalga yüksekliği, H_c 'ye karşı gelen bir yükseklik parametresinin dalga spektrumundan türetilmesi istenir. İstenen sonuca ulaşmak için H_{rms} $\sqrt{2}$ ile çarpılır. Böylece, genelde kullanılan spektral dalga yüksekliği parametresi spektral eğrinin altında kalan alan m_0 'dan hesaplanır (Goda, 2000; WMO, 1998).

$$H_{m0} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{8E}{\rho_w g}} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.8)$$

Deniz durumu için toplam varyans, m_0 iken toplam enerji E 'nin $\rho_w g m_0$ olacağı gözden kaçırılmamalıdır. Teoride H_{m0} ve $\overline{H}_{1/3}$ 'ün birbirine denk düşmesi durumu ancak tabiatla pek sık rastlanmayan çok dar bir spektrum için geçerlidir. Bununla birlikte bir çok durum için aralarındaki fark ortalamada $H_{m0} = 1.05 \overline{H}_{1/3}$ olacak şekilde oldukça azdır. Belirgin dalga yüksekliği genelde H_s ile gösterilir. Kullanımı esnasında hangi büyüklüğün ($4\sqrt{m_0}$ veya $\overline{H}_{1/3}$) alındığı belirtilmelidir. Dalga periyodu için parametrelerin türetilmesi deniz ve büyük okyanus dalgalarının

bileşkesi olan çok farklı spektral şekillerin ortaya çıkmasından dolayı oldukça karmaşıklık arz eder. Sık kullanılan dalga frekansları ve dalga periyotları şunlardır.

- f_p = spektrumun tepe değerine karşı gelen dalga frekansı (modal frekans veya tepe frekansı),
- $T_p = f_p$ ye karşı gelen dalga periyodu: $T_p = f_p^{-1}$,
- T_{m01} = spektrumun ortalama frekansına karşı gelen dalga periyodu $T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}$,
- T_{m02} = ortalama düşerken sıfır olma periyodu (zero down-crossing) $\bar{T}_z$ 'ye teorik olarak denk olan dalga periyodu $T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$,
- T_{m-10} = Enerji dalga periyodu, dalga enerjisi çalışmalarında, J dalga gücünün hesaplanmasında kullanıldığı için bu ismi alır $T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0}$,

Burada J dalga gücü kW/m cinsinden $J=0.49H_{mo}^2 T_{m-10}$ şeklinde hesaplanır.

2.4 Model Dalga Spektrumları

Deniz dalgalarını modellemek için genel itibariyle dalga spektrumları kullanılmaktadır. Spektrum modelleri spektrumların genelde fonksiyonel formda frekansa bağlı $E(f)$, frekans ve yöne bağlı $E(f, \theta)$ veya dalga sayısı $E(k)$, cinsinden ifade edilmesine imkan sağlamıştır. Spektral analizinde dalga kayıtlarının durağan olması temel kabullerden birisidir. Bu yüzden dalganın kaydedildiği sırada dalga parametreleri ortalamalarının zamanla değişmemesi şartı vardır. Rüzgar hızı, büyük okyanus dalgaları ve derinlik gibi dalga meydana gelmesine birebir katkısı olan değişkenlerin, ölçümler sırasında büyük ölçüde zamanla değişmemesi lazımdır. Kayıt süresi uzadıkça bu şartların sağlanması zorlaşır. Genelde dalga kayıtları 20 ila 40 dakikalık süreler boyunca toplanır. Pierson Moskowitz ve JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project) en çok kullanılan dalga spektrum modelleridir (Komen ve diğ., 1994).

Deniz dalgalarının ortaya çıkmasının sebebi rüzgardır. Rüzgar hızı, esme süresi ve feç uzunluğu göz önünde tutulması gereken faktörlerdir. Pratikte deniz üzerinde ve kıyı kesiminde inşa edilecek yapıların mühendislik hesaplamalarında dalga etkisi önemli bir yer tutmaktadır. Dalga tahminleri için geliştirilmiş bir çok model

bulunmaktadır. Çoğunlukla ve basit olarak dalga karakteristiklerini belirlemek için esası rüzgar hızına dayanan Pierson-Moskowitz (PM) ve JONSWAP dalga spektrumları kullanılmaktadır (Bishop ve diğ., 1992). PM spektrumunun açık denizlerde tam gelişmiş deniz durumu için ancak uygulanması mümkündür. Tam gelişmiş deniz durumu, rüzgarın yüzlerce kilometre deniz üzerinde birkaç gün boyunca esmesi sonucu meydana gelir. PM ile dalga özellikleri hesaplanırken sadece rüzgar hızı baz alınırken, sığ sular içinde geçerli olan JONSWAP spektrumunda feç uzunluğu ve rüzgar esme süresi girdi değişkenleri olarak kullanılmaktadır. JONSWAP spektrumunun geçerliliği son yıllarda yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Carter, 1982).

2.4.1 Pierson-Moskowitz (PM) Spektrumu

Oşinografi ve kıyı mühendisliğindeki problemlere belki de en basit fakat en güvenilir yaklaşım Pierson and Moskowitz (1964) tarafından sunulmuştur. Yukarıda da bahsedildiği gibi buradaki kabul, rüzgarın uzunca bir süre geniş bir alan üzerinde esmesi yani tam gelişmiş durum şartıdır. Uzunca bir süre, on bin dalga periyodu ve geniş bir alan ise beş bin dalga boyu olarak düşünülebilir (Whitford, 2002). Bu spektrum, Kuzey Atlantik Okyanusu'nda hız ölçerler ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiştir. İlk olarak rüzgarın uzunca bir süre estiği zamana rasgelen dalga verileri seçilmiştir. Daha sonra farklı rüzgar hızlarına karşı gelen dalga spektrumları hesaplanmış ve sonuç olarak spektrum aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Pierson and Moskowitz, 1964).

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f} \right)^4 \right] \quad (2.9)$$

Burada, $E(f)$ (m^2/s) cinsinden varyans yoğunluğu, f Hz cinsinden dalga frekansı, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, ve $U_{19.5}$ ise deniz yüzeyinden 19.5 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızıdır. Bu yükseklik Pierson and Moskowitz (1964) tarafından kullanılan anemometrelerin ölçüm aldığı yüksekliktir. Atmosferik sınır tabakası üzerindeki hava akışı durağan kabul edilerek ve sürüklenme katsayısı da 1.3×10^{-3} alınarak aşağıdaki şekilde ifade elde edilir (Bishop ve diğ., 1992).

$$U_{19.5} = 1.026 U_{10} \quad (2.10)$$

U_{10} 10 m yükseklikteki rüzgar hızıdır. PM spektrumundan elde edilen tepe frekansı,

$$f_p = 0.877 \frac{g}{2\pi U_{19.5}} \quad (2.10)$$

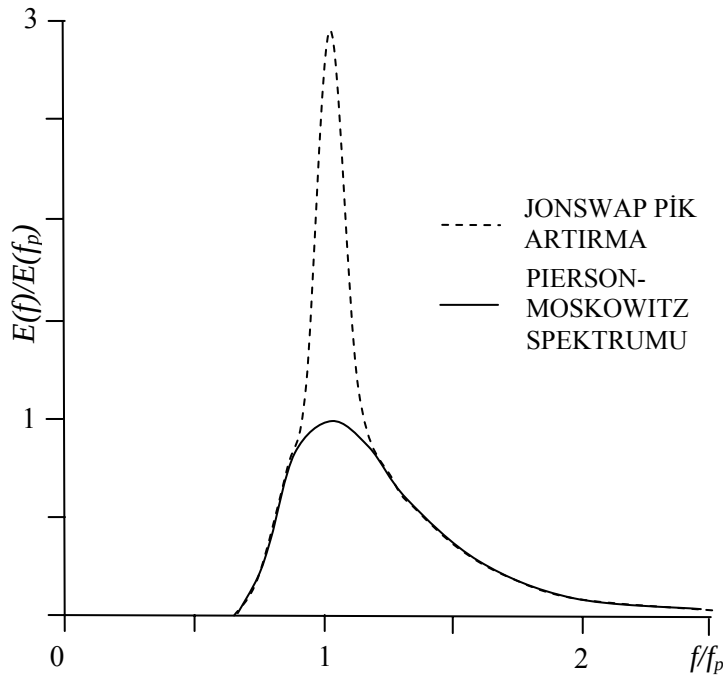
ve belirgin dalga yüksekliği

$$H_{m0} = 0.0246 (U_{19.5})^2 \quad (2.11)$$

şeklinde verilmiştir (Pierson and Moskowitz, 1964).

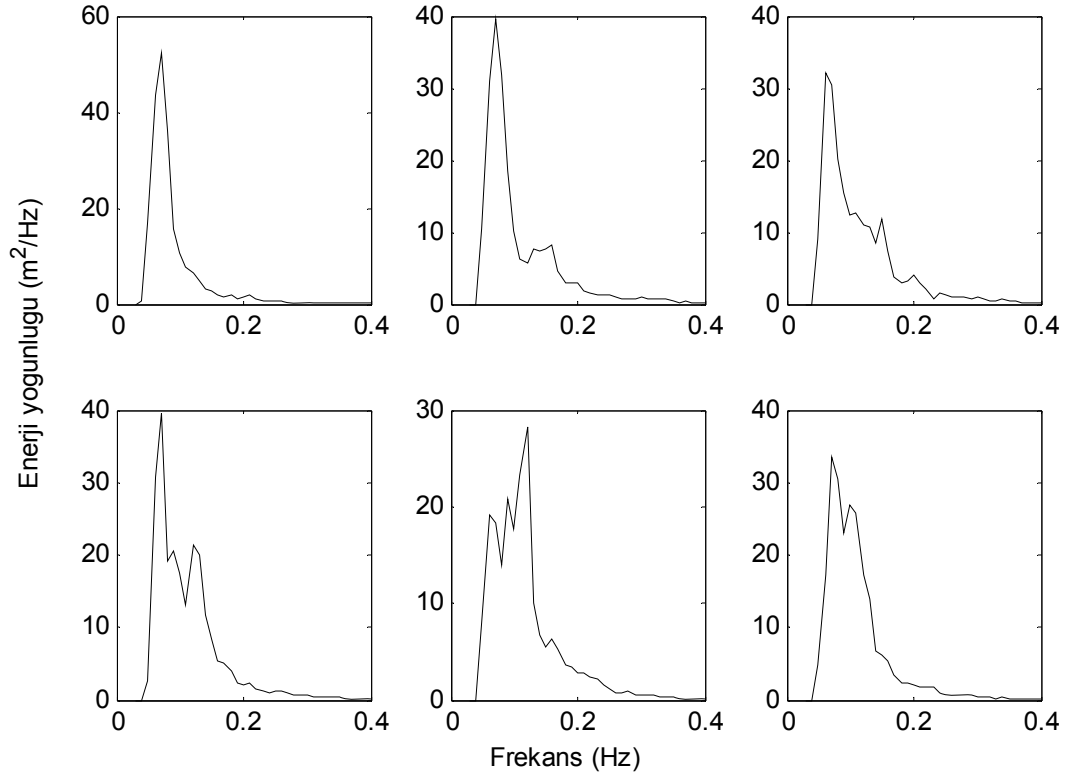
2.4.2 JONSWAP Spektrumu

Hasselmann ve diğ. (1973) yılında Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP) topladıkları verileri analiz ettikten sonra dalga spektrumunun hiçbir zaman tam gelişmiş duruma ulaşamayacağını öne sürmüşlerdir. Doğrusal olmayan dalgalar arası etkileşimden dolayı çok uzun zaman ve mesafe geçse bile gelişimini sürdüreceği fikrini öne sürmüştür. Önerdiği dalga spektrumunda feç mesafesini de göz önünde tutmuştur. Bu spektrum rüzgar hızı yerine tepe frekans ifadesinden yararlanmıştır. PM ve JONSWAP spektrumları arasındaki fark Şekil 2.3'ten görülmektedir. JONSWAP modelinin tepe değerleri yakalama şansı daha fazladır.



Şekil 2.3 JONSWAP spektrumunun f/f_p 'nin fonksiyonu olarak genel görünüşü

Doğa şartlarında çok farklı şekillerde spektrumlar meydana gelmektedir. Bunların bazılarında farklı dalga sistemleri gösteren birden çok tepe meydana gelmektedir. Şekil 2.4'te farklı deniz durumları için gerçekte yapılmış ölçümlerin enerji spektrumları yer almaktadır.



Şekil 2.4 Farklı örneklerden alınan enerji yoğunluk spektrumları

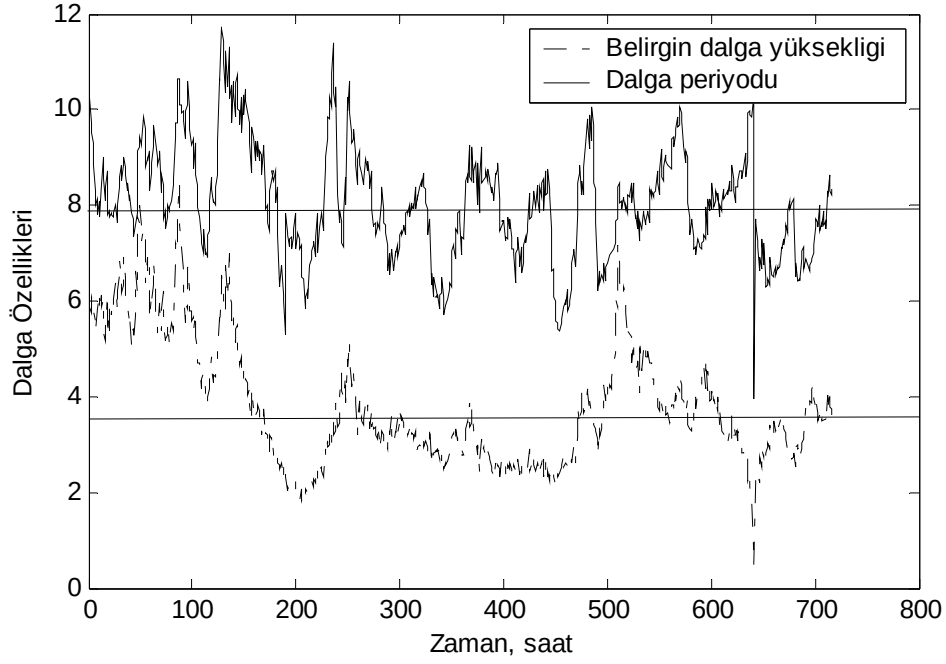
3. DALGA GÜCÜ POTANSİYELİNİN İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

3.1 Giriş

Bir dalga enerjisi dönüştürücüsünün verimliliğinin belirlenmesi çalışmalarında atılacak ilk adım o bölgedeki mevcut dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmektir. Dalga enerjisine rüzgarın dolaylı yoldan olmak üzere dalga yüksekliği ve periyoduna doğrudan etkisi vardır. Deniz şartlarında bu iki değişken belirli bir ortalama etrafında salınım yapmaktadır. Literatürde bulunan mevcut dalga enerjisi hesaplama yöntemleri bu bölümde karşılaştırılmıştır. Çalışmada Pasifik Okyanusu'nda bulunan 17 adet dalga kayıt istasyonu kullanılmıştır. Bu bölgeye ait eş dalga enerjisi haritası hazırlanarak yorumlanmıştır.

3.2 Ortalama Dalga Enerjisi

Herhangi bir bölgede tesis edilecek dalga enerjisi dönüştürücüsünün, mevcut deniz şartlarında verimliliğinin incelenmesi, risk analizlerinin yapılması ve önceden irdelenmesi gerekli konular arasındadır. Toplam dalga enerjisinin belirlenmesinde en önemli faktörler olan belirgin dalga yüksekliği ile dalga periyodu değişkenleri doğada rasgele bir karaktere sahiptirler. Bu değişkenler aslında belli bir ortalamanın etrafında salınım yapmaktadır (Şekil 3.1). Dolayısıyla üretilecek enerji miktarı mevcut deniz şartları ile sıkı sıkıya bağlıdır.



Şekil 3.1 Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyodun zamanla değişimi

Mevcut enerji miktarının doğru tespiti, o bölgeye kurulacak tesislerin ekonomik anlamda yapılabilir olup olmadıkları hususunda bilgi verir. En üst düzeyde enerji sağlanabilmesi için bölgede bulunan dalga enerjisi potansiyeli önemli rol oynar. Herhangi bir dalga ikliminin hüküm sürdüğü bir bölgedeki dalga enerjisi potansiyeli, noktadan noktaya ve mevsimden mevsime değişiklik göstermektedir. Bu yüzden dalga ikliminin doğru bir şekilde incelenmesi, dalga enerjisinin kullanılabilir yapılması açısından önemlidir.

Dalga gücü potansiyelinin saatler veya günler öncesinden tahmini, ayrıca dalga parametrelerinin meteorolojik değişkenlerden tahmini bu açıdan önemlidir. Ortalama eş dalga yüksekliklerine sahip iki nokta farklı miktarlarda enerjiye sahip olabilirler. Bunun sebebi bir noktanın yüksek frekansta fakat az sayıda dalga alırken, diğer noktanın frekansı az fakat çok sayıda dalga almasıdır. Dalga enerjisi dönüştürücülerinin karşı karşıya kaldıkları önemli sorunlardan birisi de batimetre ve dalga parametrelerinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanan kısmi yüklemelerdir (Beyene and Wilson, 2006). Bu tür bir olay dönüştürücünün veriminin oldukça düşmesine neden olacaktır. Dalga enerjisi miktarı dalga yüksekliği ile üssel olarak değiştiğinden dolayı, dalga yüksekliğindeki ufak değişimler, dönüştürücünün verimi ve güvenliği açısından ciddi sorunlar meydana getirecektir. Eğer dönüştürücü

gelmesi en muhtemel dalgalara göre imal edilirse, büyük enerjiye sahip yüksek frekanslı dalgaları tamamıyla almazlar. Diğer yandan sistem nadir fakat yüksek enerjili dalgalara göre tasarlanırsa, bu sefer kısmi yükleme problemleri yaşanır. Dönüştürücüler ortalama dalga yükseklikleri hedeflenerek yüksek kısmi yükleme verimliliklerine göre tasarlanabilir. Bu durumda belli bir miktar enerjinin üretimi ihmal edilmiş olacaktır. Bu yüzden dönüştürücüler yüksek kısmi yükleme verimliliğinde, mevcut dalga enerjisinin çoğunu alabilecek esnekliğe sahip olabilecek şekilde yapılmalıdırlar. Bu iki amacı dengelemek dönüştürücü tasarımlarında aşılması gereken sorunlardandır (Washio ve diğ., 2000).

Enerji üretiminin ihtiyacı karşılayıp karşılayamayacağının riski dönüştürücü inşaa edilmeden önce belirlenmelidir. Düzenli deniz şartlarında, ortalama dalga enerjisi doğrusal dalga teorisi ile bulunabilir. Düzensiz deniz şartları farklı dalga yükseklikleri ve periyotlarına sahip birçok sayıdaki dalganın üst üste toplanması ile elde edilir. Ortalama dalga enerjisi iki yolla bulunabilir. Bunlardan birincisi spektral dalga verilerini kullanmaktır. Yöne bağlı enerji spektrumu deniz şartlarında oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Derin denizlerde dalga enerjisi (Tucker and Pitt, 2001),

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{s(f, \theta)}{f} \cdot d\theta \cdot df \quad (3.1)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $s(f, \theta)$ yöne bağlı enerji spektrumu, f ise frekanstır. Pontes (1998) Avrupa kıyılarında mevcut dalga enerjisi atlasını hazırlarken Denklem (3.1)'i kullanmıştır. Her zaman için spektral dalga verilerine ulaşmak mümkün olmayabilir. Ortalama dalga enerjisini belirlemek için diğer bir yol dalga verileri istatistiklerini kullanmaktır. Bunlar en büyük üçte bir dalga yüksekliklerinin ortalaması olan belirgin dalga yüksekliği H_s , spektral yoğunluk fonksiyonunun altında kalan alanın karekökünün dört katına eşit olan karakteristik dalga yüksekliği H_c , maksimum spektral yoğunluğa karşı gelen pik periyot T_p , ve yukarı geçişli periyotların ortalaması olan T_z şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca son zamanlarda, ağırlıklı ortalama periyoda karşı gelen enerji periyodu T_e 'de kullanılmaktadır. Dolayısıyla tüm bunları göz önüne alarak ortalama dalga gücü,

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty \frac{s(f)}{f} \cdot df = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_o T_e = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. Dalga gücünün kısa ve uzun zamanlı değişimlerini değerlendirmek için ölçülmüş verileri kullanmak esastır. Ortalama dalga gücü, fırtınalı bir günde 1 MW'ı geçerken, sakin bir günde 10 kW'ın altına kadar düşmektedir. Mevsimsel dalga enerjisi tahminleri aydan aya enerji seviyesinin nasıl bir değişim gösterdiği hususunda bize bilgi verir. Genellikle yaz aylarında dalga enerjisi düşük olurken, kış aylarında en yüksek seviyeye ulaşmaktadır (bknz. Şekil 3.2). Dalga verileri 1 veya 3 saatte bir 20 dakika süreyle ölçülen serilerdir. Böylece ortalama dalga gücünü hesaplamak için Denklem (3.1) kullanıldığında,

$$P_{n-yıl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} \frac{s(f)}{f} \cdot df \quad (3.3)$$

elde edilir. Burada N , n yılda analiz edilen toplam spektral yoğunluk fonksiyonun sayısını vermektedir. Denklem (3.3)'ü kullanmanın oldukça büyük hesap yükü getireceği açıktır. Bir yıllık ortalama dalga gücünü hesaplamak için, 3-saatlik verilerde yaklaşık 3000 ve 1-saatlik verilerde yaklaşık 9000 adet farklı spektral yoğunluk fonksiyonu kullanmak gerekecektir. Hesap hacmini azaltacak diğer bir yaklaşım, dalga spektrumlarını temsil edecek dalga yükseklikleri ve periyotların belli aralıklar için birbirlerine karşı gelecek şekilde işlenmelidir. Yaklaşık olarak 86000 gözlem verisi için H_s ve T_e değişkenlerinin aralıkları sırasıyla 1 m ve 1 saniye olacak şekilde bir matris yazılmalıdır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 1975-2001 yılları aralığında belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu sıklık yüzdesi (İstasyon no: 46002)

Dalga Periyodu	Dalga yüksekliği (m)												TOP.	TOP.
	0-0.4	0.5-1.4	1.5-2.4	2.5-3.4	3.5-4.4	4.5-5.4	5.5-6.4	6.5-7.4	7.5-8.4	8.5-9.4	9.5-10.4	>10.5	. %	N
<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	10
0.5-1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0
1.5-2.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0
2.5-3.4	*	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	9
3.5-4.4	-	0.4	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	618
4.5-5.4	*	5.3	8.4	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	13.9	22626
5.5-6.4	*	5.1	14.9	6.8	0.5	*	-	-	-	-	-	-	27.3	44408
6.5-7.5	*	2.6	9	8.5	4.5	0.7	*	-	-	-	-	-	25.2	41023
7.5-8.4	-	0.7	4	5.1	4.4	2.5	0.7	0.1	*	-	-	-	17.5	28469
8.5-9.4	-	0.1	1.4	2.4	2.2	1.8	1.1	0.5	0.1	*	*	-	9.6	15579
9.5-10.4	-	*	0.4	0.9	0.9	0.8	0.6	0.3	0.2	0.1	*	*	4.2	6809
10.5-11.4	*	*	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	*	*	1.4	2294
11.5-12.4	-	-	*	0.1	0.1	0.1	*	*	*	*	*	*	0.4	628
12.5-13.4	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.1	166
13.5-14.4	-	-	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-	0.0	36
14.5-15.4	-	-	-	*	*	*	-	-	-	-	-	-	0.0	3
Toplam %	0	14	38	24.4	13	6.1	2.6	1.1	0.4	0.2	0.1	0.0	100	
Toplam N	30	22846	61891	39768	21173	9898	4182	1713	682	321	103	71	162678	

Not: *<0.05%

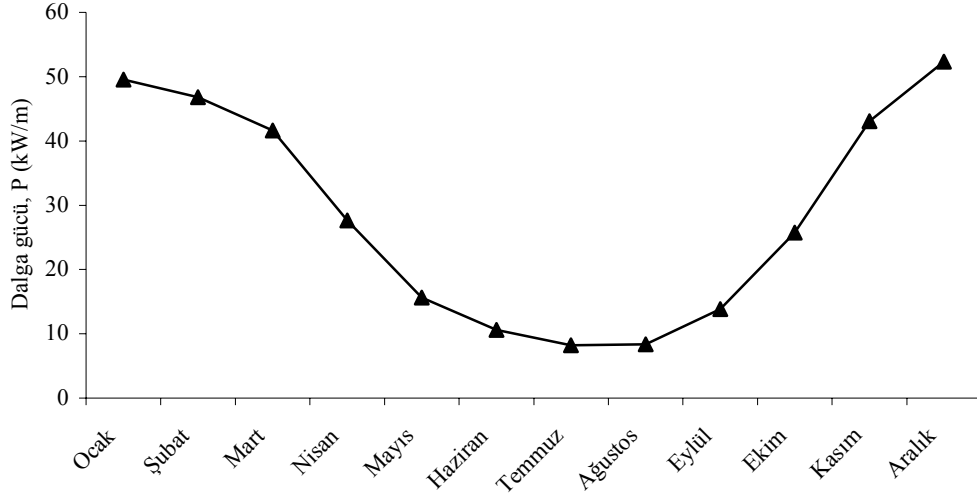
Verilen aralıklardaki H_{si} ve T_{ei} ortalamaları göz önünde bulundurularak ve i, j matrisin satır ve sütun sayılarını göstermek üzere ortalama dalga gücü $P_{ij} a_{ij} / N_{top}$ olur. Buradan n-yıllık ortalama dalga gücü ise

$$P_{n-yıllık} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k \frac{P_{ij} a_{ij}}{N_{top}} \quad (3.4)$$

şeklinde hesaplanır. Burada m ve k matrisin toplam satır ve sütununu belirtmektedir. Belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyotlar cinsinden ortalama dalga gücü,

$$\overline{P} = \frac{\rho g^2}{64\pi} \overline{H_s^2} \overline{T_e^2} \quad (3.5)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $\overline{H_s}$ ve $\overline{T_e}$ aritmetik ortalamaları ifade etmektedir.



Şekil 3.2 Dalga gücünün aylara göre değişimi (46002)

3.3 Literatür Çalışmaları

Dalga enerjisi potansiyelini değerlendirmek için gerek dalga gerekse rüzgar verileri kullanılarak bir çok yöntem geliştirilmiştir. Arthur (1947) tarafından ortalama dalga enerjisi şu şekilde sunulmuştur.

$$P_{av} = \alpha I_0 H_s^2 T_e; \quad \alpha = \rho g^2 / 32 \pi; \quad I_0 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i (H_i T_i / H_s T_e)^2}{\sum_{i=1}^N n_i (T_i / T_e)} \quad (3.6)$$

Burada belli bir t periyodunda dalgalar yüksekliklerine, H_i ve periyotlarına, T_i , göre gruplandırılmıştır. Mesela, n_i bir gruptaki toplam dalga sayısını ve N ise grup sayısını göstermektedir. Arthur (1947) ölçülmüş (H_i/H_s) ve (T_i/T_e) frekans dağılımlarını esas alarak $0.54 \leq I_0 \leq 0.60$ olduğunu belirlemiştir. Bretschneider ve Ertekin (1990) Denklem (3.6)'daki toplam işaretlerinin yerine entegral işaretini koyarak ve $N \rightarrow \infty$ olduğunu varsayarak $I_0 = 0.543$ olduğunu bulmuştur. Burada bir kabul yapılarak dalga yüksekliklerinin Rayleigh dağılımına uyması şartı koşulmuştur. Ayrıca, I_0 katsayısının farklı deniz şartları için sabit bir sayıya eşit olmakla birlikte farklı değerler almaması bir mahzur olarak görülebilir.

Diğer bir yöntem dalga gücünün rüzgardan elde edilmesidir. Dalga gücünün rüzgar istatistiklerinden elde edilmesi için dalga yüksekliği, dalga periyodu ve rüzgar hızı arasındaki ilişkiye bakmak gerekir. Belirgin dalga yüksekliği H_s , feç uzunluğu F_e ,

rüzgar hızı U_{10} , yerçekimi ivmesi g , rüzgar esme süresi T_d ve su derinliği h ' nin fonksiyonu

$$H_s = f(F_e, U_{10}, g, T_d, h)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki değişkenlerden g ve U_{10} gibi iki tane esas değişken seçilir ve Buckingham Pi Teoremi uygulanırsa aşağıdaki ifade elde edilebilir (Ertekin and Xu, 1994).

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = F\left(\frac{gF_e}{U_{10}^2}, \frac{gT_d}{U_{10}^2}, \frac{gh}{U_{10}^2}\right) \quad (3.7)$$

Tam gelişmiş deniz durumu göz önüne alındığında F fonksiyonu sabit hale gelir, $F(1) = \beta_v$. Aynı şekilde dalga periyodu için $gT_e/U_{10} = G(1) = \gamma_v$ elde edilir. Sonuç olarak,

$$H_s = \beta_v U_{10}^2 / g, \quad T_e = \gamma_v U_{10} / g \quad (3.8)$$

ifadeleri bulunur. Burada boyutsuz sayılar $\beta_v=0.283$ ve $\gamma_v=7.54$ olarak elde edilir. $\mu_v = \beta_v^2 \gamma_v$ olarak tanımlanırsa ortalama dalga gücü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P_{av} = \alpha \mu_v I_0 U_{10}^5 / g^3 \quad (3.9)$$

Bretschneider ve Ertekin (1990) tarafından ayrıca Rayleigh dağılımına uyan rüzgar hızlarının sadece ortalama değerinden faydalanarak dalga enerjisini hesaplama yöntemi ortaya atılmıştır. Bu yöntemi Ertekin and Xu, (1994) Weibull dağılımına genişletmişlerdir.

3.4 Dalga Verileri ve Uygulama

Dalga karakteristikleri ile yapılacak her türlü analiz için öncelikle ölçülmüş verileri gereklidir. Yüzyıllardır gözle de olsa dalga yükseklikleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Düzenli olarak dalga ölçümleri altmışlı yıllarda başlamıştır. 1940'lı yıllarda bazı girişimler olduysa da bunlar teknolojik ve maddi imkansızlıklar sebebiyle sınırlı olarak kalmıştır. 2. Dünya Savaşı'nda uzun ve güvenilir dalga kayıtlarına ihtiyaç duyulması, meteorolojik verilerlerden dalga yükseklikleri tahmin eden teknikler geliştirilmesine sebep olmuştur. Bunlardan elde edilen sonuçlar

oldukça fazla kullanılmış, ancak yine de doğru ve güvenilir olan dalga kayıtları hala tercih edilmektedir. NOAA (United States-National Oceanic and Atmospheric Administration) 1977'den beri dalga ve meteorolojik değişkenlerin kayıtlarını yaptığı geniş bir istasyon ağına sahiptir. Saat başı alınan 20 dakikalık deniz seviyesi ölçümleri Fourier analizi kullanılarak zaman ölçeğinden frekans ölçeğine aktarılmaktadır. Elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarından belirgin dalga yüksekliği, ortalama periyot gibi dalga karakteristikleri hesaplanmaktadır (Tucker ve Pitt, 2001; Steele ve diğ., 1992). Dalga ve deniz durumunu tarif için bir çok yol vardır. Bunlardan en çok kullanılan ikisi, dalga genliği ve yüksekliğidir. Dalga genliği ortalama seviyede dalga tepesine olan mesafesi; dalga yüksekliği ise dalga tepe ve çukuru arasındaki mesafe olarak tanımlanmıştır. Eğer dalga yüksekliği kullanılacaksa, bunun için verilen periyottaki dalgaların ortalaması, maksimumu, yükseklik karelerinin ortalamasının karekökü veya dalga yüksekliği kayıtlarının belli bir kısmının ortalaması alınabilir. Ölçülen dalgaların en yüksek 1/3'nün ortalaması olarak tarif edilen belirgin dalga yüksekliği bu çalışmada dalga yüksekliğinin yerini tutmaktadır.

Yukarıda önerilen yöntemlerin birbiri ile karşılaştırılması için uygulama alanı olarak Pasifik okyanusunda NODBC tarafından işletilen 17 adet yüzer istasyon kullanılmıştır. İstasyonların yerleri ve Denklem (3.5)'e göre hesaplanan bölgesel ortalama dalga gücü değişimleri Şekil 3.3'de verilmiştir. 46002 nolu istasyona ait dalga karakteristikleri aylık olarak Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 46002 istasyonun dalga verileri özellikleri (1975-2001)

	Belirgin dalga yüksekliği (m)					Ortalama dalga periyodu (s)				
	Orta lama	Std. Sap.	Maks.	Min.	N	Orta lama	Std. Sap.	Maks.	Min.	N
Ocak	3.6	1.4	15.1	0.7	12852	7.8	1.4	14.4	3.9	12852
Şubat	3.5	1.4	13.5	0.7	12221	7.8	1.4	14.3	4.4	11907
Mart	3.3	1.2	9.9	0.4	13383	7.8	1.4	14.1	4.5	13037
Nisan	2.8	1.1	9.4	0.5	12581	7.2	1.3	13.2	3.9	12308
Mayıs	2.2	0.8	7.8	0	14043	6.6	1.2	13.7	0	14038
Haziran	1.9	0.7	6.1	0.5	13285	6	1	12.2	4.1	13034
Temmuz	1.7	0.6	4.1	0.5	13697	5.8	0.8	10.2	4	13697
Ağustos	1.7	0.6	5.8	0.5	14833	5.9	0.9	11.2	3.9	14833
Eylül	2.1	0.9	8.5	0.6	15162	6.4	1.2	14.6	3.9	14512
Ekim	2.7	1.2	10.7	0.6	15573	7.2	1.4	15.1	4.1	14856
Kasım	3.4	1.5	12.4	0.4	13823	7.6	1.3	14.7	4.1	13823
Aralık	3.7	1.6	12.6	0.8	14287	7.8	1.3	14	4.5	13781
Yıllık	2.7	1.3	15.1	0	165740	7	1.4	15.1	0	162678

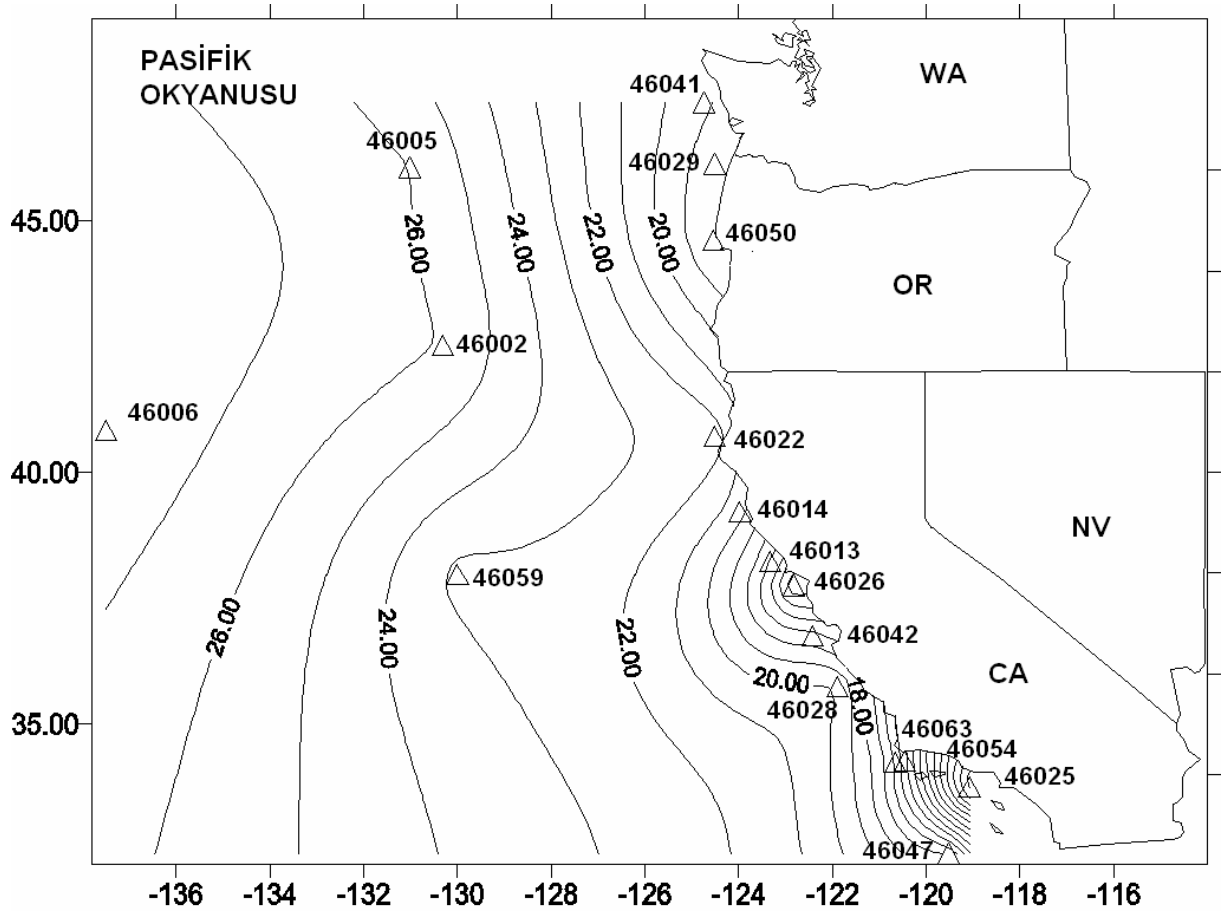
Dalga enerjisi ile ilgili farklı denklemler ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması Tablo 3.3’de yapılmıştır. Örneğin, Denklem (3.4)’e göre hesaplanan ortalama dalga gücü 46002 no lu istasyon için 35.11 kWm^{-1} çıkmaktadır. Aynı istasyonun verilerinden elde edilen $\overline{H_s}=2.8 \text{ m}$ ve $\overline{T_e}=6.9 \text{ s}$ ’lik ortalamaları kullanıldığında, ortalama dalga gücü 25.95 kWm^{-1} olarak bulunmaktadır. Denklem (3.4)’ün sonuçları her zaman diğerlerinin üstünde kalmaktadır. Bunun nedeni uç değerlerinde ortalama dalga gücü hesaplanırken dahil edilmesidir. Gerçekte uç durumlar ile karşılaşıldığında dönüştürücünün verimi oldukça düşmektedir. Bu yüzden Denklem (3.4)’ü kullanmak yanıltıcı sonuçlar verebilir. Dalga karakteristiklerinin ortalamasından yola çıkılarak yapılan hesapların daha küçük tahminler verdiği açıktır.

Tablo 3.3 İstasyonlara göre ortalama dalga enerjisi değişimi

No	Enlem	Boylam	$\overline{H_s}$ (m)	$\overline{T_e}$ (s)	$\overline{P}$ (kWm ⁻¹)	Dalga Gücü (kWm ⁻¹)
						D. (3.6)
46002	42.52	130.32	2.8	6.9	25.95	14.09
46005	46.05	131.02	2.8	6.8	26.00	14.12
46006	40.84	137.49	2.8	7.2	27.80	15.10
46013	38.23	123.33	2.2	7.1	17.16	9.32
46014	39.22	123.97	2.4	7.3	20.39	11.07
46022	40.72	124.52	2.5	7.5	22.50	12.22
46025	33.75	119.08	1.1	6.5	4.10	2.23
46026	37.75	122.82	1.9	7.1	13.22	7.18
46028	35.74	121.89	2.3	7.5	20.10	10.91
46029	46.12	124.51	2.3	6.9	18.30	9.94
46041	47.34	124.75	2.3	7.3	19.21	10.43
46042	36.75	122.42	2.2	7.4	17.39	9.44
46047	32.43	119.53	2.2	7.5	17.11	9.29
46050	44.62	124.53	2.3	7.0	17.96	9.75
46054	34.27	120.45	2.0	7.5	14.00	7.60
46059	37.98	130	2.6	7.0	22.77	12.37
46063	34.25	120.66	2.2	7.1	16.23	8.81
			Ortalama		18.84	10.23

Bu tablodan görüldüğü gibi dalga karakteristiklerinin aritmetik ortalaması ile hesaplanan güç miktarı tüm istasyonlar göz önüne alındığında ortalama olarak 18.84 kWm⁻¹ çıkmaktadır. Denklem (3.6) ile beraber sabit katsayı kullanıldığı zaman ortalama dalga güçlerinde %50' ye varan azalmalar meydana gelmektedir.

Ortalama eş dalga güçlerini gösteren harita Şekil 3.3'te verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi dalga gücü açıklara doğru artmaktadır. En düşük değerlerin ise orta ve güney Kaliforniya açıklarında olduğu göze çarpmaktadır. Bunun sebebi batimetre ve adalardan dolayı meydana gelen gölgelenme etkisidir. Diğer taraftan, kuzey Kaliforniya kıyıları açık deniz etkisine dolaysız olarak maruz kaldığı için dalga enerjisi dönüştürücüsü kurulacak alanların başında gelir.



Şekil 3.3 Ortalama dalga gücünün istasyonlara göre değişimi

4. ÜÇLÜ DİYAGRAM YÖNTEMİ İLE DALGA MODELİ

4.1 Giriş

Dalga enerjisinin tahmini için belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyotlarının bilinmesi gereklidir. Bu iki değişken aslında feç uzunluğu, rüzgar esme süresi ve rüzgar hızına bağlı olarak değerler almaktadır. Belirli bir feç mesafesi boyunca ve belirli bir süre zarfında sabit bir hızda esen rüzgarın ortaya çıkardığı dalga yüksekliği ve periyodunu tahmin etmek için bir çok yaklaşım geliştirilmiştir.

Burada ilk defa üçlü diyagram modeli yardımıyla rüzgar hızı, feç mesafesi ve esme süresi gibi büyüklüklerden dalga yüksekliği ve periyodu tahmin edilmeye çalışılacaktır. Bu yöntem girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal olmayan ilişkiler kurabilirken tahmin sonuçlarını oldukça geliştirebilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan JONSWAP formülleri ile karşılaştırılmıştır. Yöntemin uygulanması için Ontario gölünde ölçülmüş saatlik rüzgar ve dalga verileri düzenlenerek kullanılmıştır. Önerilen yöntemin dalga karakteristiklerini tahmin etmekte klasik formüle göre çok daha iyi olduğu çeşitli grafik ve nümerik gösterim şekilleri ile ortaya konulmuştur.

4.2 Dalga Tahminleri

Dalga yüksekliği, H_s ve sıfırdan yukarı geçişli ortalama periyot, T_z dalgakıran tasarımlarında, dalga enerjisi üretiminde, kıyı emniyeti çalışmalarında, marinalarda ve diğer kıyı mühendisliği uygulamalarında sıkça kullanılan dalga parametreleridir. Literatürde bu parametrelerin tahmini için birçok yöntem geliştirilmiştir ama bunlar çoğu zaman doğru sonuca ulaşmaktan geri kalmışlardır (Mandal ve diğ., 2005).

Pratikte sayısal dalga modellerinin yerine basit dalga tahmin yöntemlerinin kullanılması tercih edilir. Bu konu üzerinde birçok araştırmacı farklı yöntemler önermiştir. Darbyshire (1963) ve Bretschneider (1973) belli bir feç uzunluğu ve süre de sabit hızda esen rüzgarın meydana getirdiği dalga yükseklikleri için bir dalga tahmin modeli sunmuştur. Pierson ve Moskowitz (1964) (PM) tam gelişmiş deniz

durumu için Bölüm 1’de sunulan dalga enerjisi spektrumu ile adını duyurmuştur. Hasselmann ve diğ. (1973) PM spektrumunu Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) sonuçlarını kullanarak daha da geliştirmiştir. Carter (1982) modeller arasında en uygununu belirlemek için Bretschneider (1973) ve Darbyshire (1963) formülleri ile JONSWAP sonuçlarını karşılaştırmıştır. JONSWAP sonuçlarının daha iyi tahminler verdiğini öne sürmüştür. Ayrıca Bishop (1983) Donelan yönteminin (Donelan, 1980; Donelan, ve diğ., 1985) JONSWAP ve Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB) yöntemlerine (Bretschneider, 1970) göre çok az bir farkla daha iyi bir davranış sergilediği sonucuna varmıştır.

Son yıllarda modern modelleme tekniklerinin hızla yayılması ile beraber, dalga tahmin modelleride sıkça kullanılır hale gelmektedir. Yapay sinir ağları (YSA) ile dalga parametreleri tahmin edilebilmektedir (Deo ve Kiran Kumar, 2000; Deo ve diğ., 2001; Tsai ve diğ., 2002; Deo ve Jagdale, 2003; Makarynsky 2004 ve Makarynsky ve diğ., 2005). Ayrıca dalga parametrelerinin tahmini için bulanık mantık ile modeller de kullanılmaktadır (Kazeminezhad ve diğ., 2005; Özger ve Şen, 2007). Diğer taraftan, dalga tahminleri için alışlagelmiş zaman serisi modelleri de kullanılmıştır. Bunun için stokastik modeller olarak oto regresif kayan ortalama (ARMA ve ARIMA) süreçleri uygulanmıştır (Agrawal and Deo, 2002).

Bu çalışmada dalga tahminleri için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Yöntemin esası varyogram analizine ve Kriging tahminlerine dayanmaktadır. ASCE (1990a) jeostatistik süreçlerin temel özellikleri ve Kriging tekniği ile tahminlerin nasıl yapılacağı üzerinde durmuştur. Ayrıca jeostatistiksel yöntemlerin su biliminde kullanımı hakkında bazı uygulamalar gösterilmiştir (ASCE, 1990b). İki değişkenin birbirine göre değişimi kartezyen koordinat sisteminde rahatlıkla görülebilirken, değişken sayısı üçe çıktığı zaman bunların ortak davranışını ancak kontur haritaları vasıtasıyla görebiliriz (Sırdaş ve Şen, 2003). Ayrıca kontur haritaları tahmin amaçlı en iyi (optimum) enterpolasyon yapmak için de kullanılır (Şen ve diğ., 2004, Araghinejad ve diğ., 2006). Klasik jeostatistik uygulamalarında x-y eksenleri koordinat takımını gösterirken, önerilen yöntemde bu eksenler yerine problemde kullanılan değişkenler yerleştirilmiştir. Bu yöntem esas alınarak belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu gibi dalga parametrelerini feç sınırlı ve süre sınırlı durumlar için tahmin etmek mümkündür. Feç sınırlı durum için girdi değişkenleri feç uzunluğu ve rüzgar hızı alınırken, süre sınırlı durum için değişkenler

esme süresi ve rüzgar hızı olarak alınmaktadır. Sunulan yöntemin klasik JONSWAP sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.3 JONSWAP Yöntemi

JONSWAP spektrumu gelişen deniz durumu için dalga karakteristiklerini tahmin etmekte sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde beklenen spektrum, $E(f)$, frekans, f , şu şekilde ifade edilir, (Hasselmann ve diğ., 1973).

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] 3.3^{\exp[-(f-f_m)^2 / 2\sigma^2 f_m^2]} \quad (4.1)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_m \\ 0.09 & f \geq f_m \end{cases}$$

burada f_m frekansın spektral tepe değerini göstermektedir. Feç sınırlı durum için tanımlanan belirgin dalga yüksekliği H_s şu şekilde tahmin edilir.

$$H_s = 0.0163 X^{1/2} U \quad (4.2)$$

ve süre sınırlı durum için,

$$H_s = 0.0146 D^{5/7} U^{9/7} \quad (4.3)$$

denklemleri kullanılır. Burada H_s = belirgin dalga yüksekliği (m), X = feç uzunluğu (km), U = rüzgar hızı (m/s), ve D = süre (saat) olarak belirtilmiştir. Feç sınırlı durum için ortalama dalga periyodu,

$$T_z = 0.439 X^{3/10} U^{2/5} \quad (4.4)$$

ve süre sınırlı ise,

$$T_z = 0.419 D^{3/7} U^{4/7} \quad (4.5)$$

formülleri ile hesaplanır. Eğer aşağıdaki şart sağlanıyorsa, feç sınırlı durum için yazılan formüller geçerlidir.

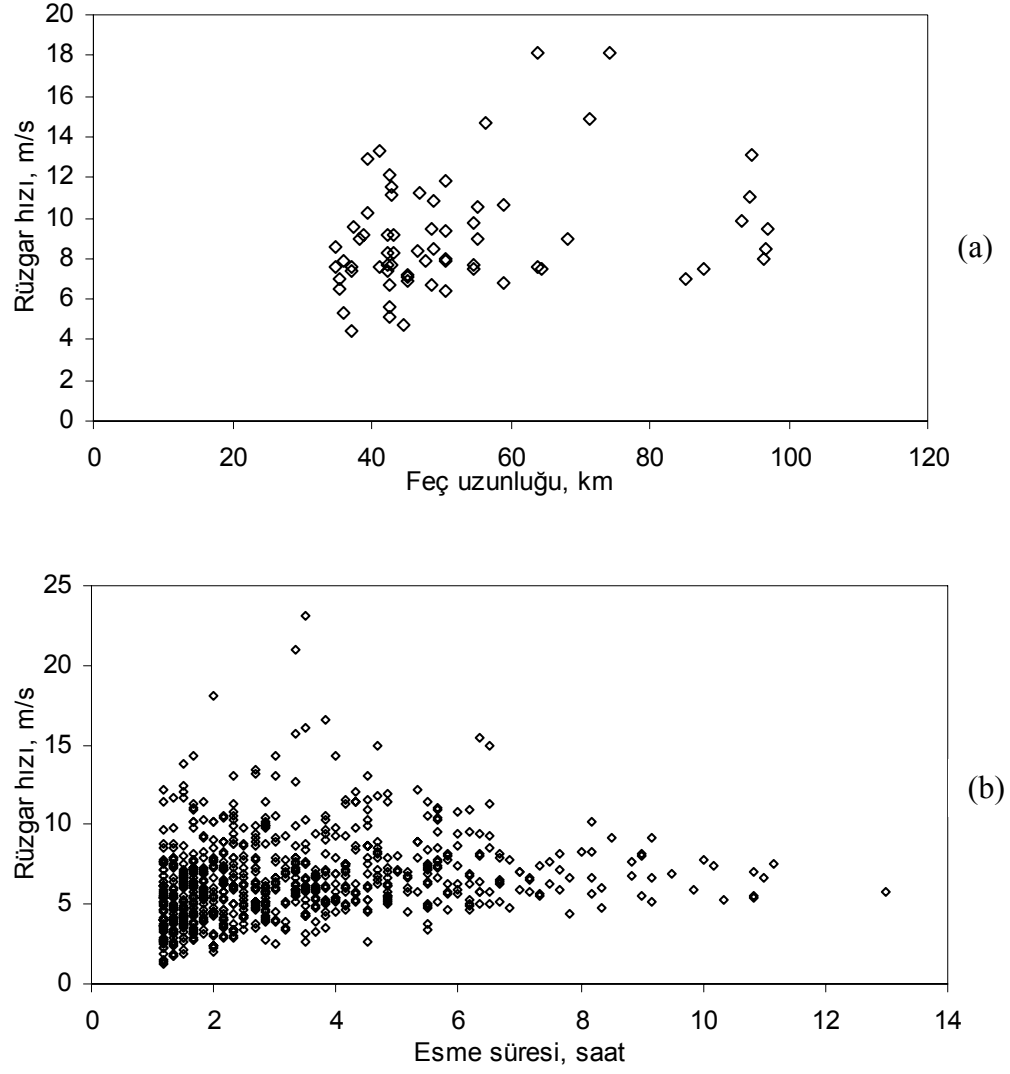
$$D > 1.167 X^{0.7} / U^{0.4} \quad (4.6)$$

Aksi takdirde süre sınırlı duruma ait olan eşitlikler kullanılır.

4.4 Kriging ve Üçlü Diyagram Yöntemi (ÜDY)

Herhangi bir jeostatistiksel uygulamada amaç x-y koordinatlarında yer alan değişkenleri esas alarak, z eksenini ile temsil edilen doğa olayının davranışını inceleyebilmektir. Çevreye ait bir çok özellik ancak belirli konumlarda yer alan sınırlı sayıdaki istasyonlardan ölçülebilenken, aynı bölgeye ait farklı konumlardaki büyüklükler eldeki mevcut verilerden tahmin edilebilmektedir. Bir olay uzayda yayılmak suretiyle çeşitli değerler alıyor ise bunun bölgeselleşmiş değişken (BD) olarak modellenmesinden söz edilebilir. BD'nin üzerinde değerler aldığı uzay her gün içinde dolaştığımız metrik uzaya (x-y-z koordinatları) ek olarak zaman, parametre ve özellik uzaylarını da içermektedir. Uzayda ölçülen değerler matematik fonksiyonlar ile ifade edilemeyen düzensiz bir yapı ortaya koymaktadır. BD teorisinin uygulanmasında, yapısal formları ortaya çıkaran teorik bir zemin hazırlanması (varyogram ve kovaryans) ve tahmin problemini çözecek modelin (mesela Kriging gibi) kurulması gibi iki ana aşama vardır. Jeostatistik ölçüm yapılmayan bir yerel noktada incelenen büyüklüğün değerini tahmin etmeye imkan tanıyan yöntemlerin birleşimidir. Jeostatistikte kullanılan en önemli araçlardan birisi stokastik bölgesel değişime dayanan tahmin problemine çözüm getiren Kriging'tir (Kriege, 1951, Matheron, 1963). Bu yöntem var olan bilgiyi en iyi şekilde kullanılabilmek için bölgesel değişimini ifade eden varyogramlardan (veya yarı varyogram) faydalanır. Buna göre ölçüm yapılamayan bir konumun değerini tahmin etmek için komşu konumlarda bulunan verilerin mesafe ile değişen ağırlıklı ortalaması alınır.

Burada rasgele değişim bölgesi sanal eksenler olarak adlandırılan iki girdi değişkeninin saçılma diyagramı bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Girdi değişkenleri saçılma diyagramları (a) Feç uzunluğu ve rüzgar hızı, (b) Rüzgar esme süresi ve rüzgar hızı.

Rasgele değişken, girdi değişkenlerine bağlı olarak davranışı incelenmek istenen çıktı değişkenidir. Dolayısıyla sanal eksenlerden biri rüzgar hızı diğeri de feç uzunluğu veya rüzgar esme süresi olmak üzere sanal bölgedeki rasgele değişken ise belirgin dalga yüksekliği veya ortalama dalga periyodu olarak tanımlanmıştır. Böylece tahmin edilmek istenen noktanın değeri ona en yakın noktaların ağırlıklı ortalaması şeklinde belirlenecektir. Tahmin modeli, Z belirgin dalga yüksekliği veya ortalama dalga periyodu, U rüzgar hızı, Y feç uzunluğu veya rüzgar esme süresi olmak üzere aşağıdaki kapalı ilişkiyi açmak içindir. Modelin genel gösterimi

$$Z_i = f(U_i, Y_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

şeklinde. Burada n ölçüm noktaları sayısı ve ε ise yapılan haritalamanın hatasıdır. Bir bölgede birbirine yakın x ve $x+h$, konumlarında bulunan rasgele değişkenin h mesafeyi göstermek üzere aldığı değerler $Z(x)$ ve $Z(x+h)$ ise h mesafe vektörü altında iki girdi değişkeni arasındaki geometrik uzaklığı belirtmektedir. İki girdi değişkeni ile birlikte Kriging kullanılarak eş dalga karakteristikleri haritaları çizilebilir. $Z(x)$ 'in varyansı, ortalama değer olan $m(x)$ ' ten olan sapmaların karelerinin ortalaması olarak tanımlanabilir.

$$Var[Z(x)] = E[Z(x) - m(x)]^2 \quad (4.7)$$

Burada, E beklenen değer (ortalama) operatörüdür. $Z(x+h)$ 'in varyansı da benzer yoldan ifade edilebilir. Kovaryans ise $Z(x)$ ve $Z(x+h)$ arasındaki değişimi gösterir ve şu şekilde ifade edilir.

$$C(x, x+h) = E\{[Z(x) - m(x)][Z(x+h) - m(x+h)]\} \quad (4.8)$$

Daha iyi yorumlar yapabilmek için kovaryans ifadesi korelogram $\rho(x, x+h)$ cinsinden ifade edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\rho(x, x+h) = \frac{C(x, x+h)}{\{Var[Z(x)]Var[Z(x+h)]\}^{1/2}} \quad (4.9)$$

İstatistik modeli genelleştirebilmek ve değişkenin bölgesel olarak nasıl dağıldığını araştırılabilmek için bazı kabullerin yapılması gereklidir. Bu kabuller 1. ve 2. sıra durağanlık ve sabitlik hipotezleridir. Durağanlık hipotezine göre, örneklendirilen bir kümede ortalama değer zamanla ve konumla değişmediği kabulü yapılır. 2. sıra durağanlık hipotezine göre aynı küme için ortalamanın yanında, standart sapmanın da değişmediği yani $Z(x) - Z(x+h)$ farkı *varyansının* sadece h 'ye bağımlı tek bir fonksiyon olduğu kabul edilir. Bu durumda $C(x, x+h)$ basit olarak $C(h)$ ve korelogram $\rho(h)$ şeklinde gösterilebilir. Korelasyon yapısı yarıvaryogram ile aşağıdaki gibi ifade edilir (Matheron, 1963).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x) - Z(x+h)] \quad (4.10)$$

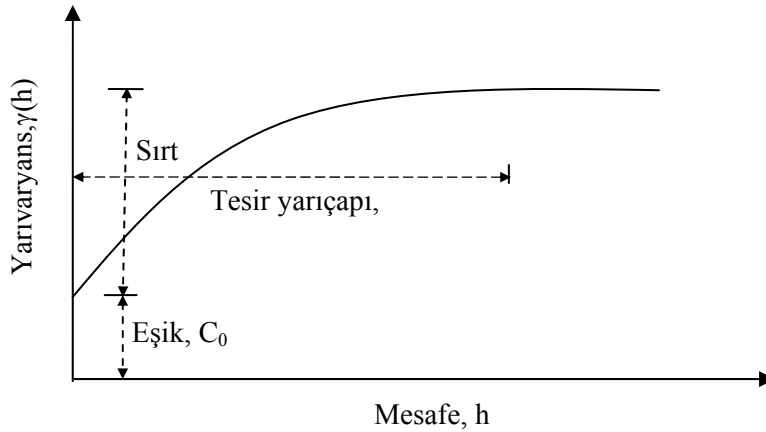
$\gamma(h)$ ve $C(h)$ arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanır.

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (4.11)$$

Burada σ^2 sabit kabul edilen varyanstır. Jeostatistik tahmin yapmadan önce eldeki verilerden yarı varyogram (YV) elde edilir. Bunun için konumlarına göre eşleştirilen veri değerleri aralarında bulunan mesafeye göre gruplara ayrılır. Deneysel yarı varyogram herbir sınıf aralığı için aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h') - z(x_i)]^2 \quad (4.12)$$

Burada $z(x_i)$, x_i noktasındaki ölçüm değeri; $z(x_i + h')$, $x_i + h'$ noktasındaki ölçüm değeri; h , mesafeye göre gruplanmış aralıklarda kalan veri noktası ikilileri arasındaki ortalama uzaklığı ve $N(h)$ ise bu aralıklarda kalan toplam veri eşleştirilmesinin sayısıdır. Yarı varyogram (YV) değerleri belirlendikten sonra artık bu dağılıma en iyi uyan teorik YV seçilebilir (Myers ve diğ., 1982). YV öğeleri eşik, sırt ve tesir yarıçapı olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Yarıvaryogram parametreleri

YV'lar hem bölgesel değişkenin dağılımını yorumlamada, hem de tahmin probleminin çözümünde kullanılmaktadır. YV modelleri sırtlı (sill) ve sırtsız olmak üzere ikiye ayrılırlar. Sırt YV değerinin sabitlendiği en büyük değerdir ve yaklaşık olarak bölgesel değişkenin varyansına eşittir. YV'nin sırt değeri alırken yatay ekseninde okunan kritik mesafe de etki yarıçapı ismini alır. Bu ise ilgilenilen olayın durağan olmadığı ve varyansın sonsuza gittiğini ama diğer yandan koveriansın olmadığı anlamına gelir. Böyle durumlarda sırt ve etki alanı bir anlam ifade etmez. Sırtsız YV modelleri aşağıdaki ifade ile temsil edilirler (Cressie, 1985, 1993).

$$\gamma(h) = C_0 + bh, \quad h > 0$$

$$\gamma(0) = 0, \quad h = 0 \quad (4.13)$$

Burada C_0 eşik değerini, b ise modelin eğimini göstermektedir. Sırtlı modeller dönüşüm modelleri olarak da isimlendirilirler. Bunlar, küresel, eksponansiyel, Gauss v.b. modellerdir (Isaaks ve Srivastava, 1989, Journel ve Huijbregts, 1978, Subyani 1997, Subyani ve Şen 1989). Küresel model sırt değerine çok hızlı bir şekilde ulaşırken, etki alanından sonra fonksiyon yatay olur. Eksponansiyel ve Gaussien model, küresel modele benzer ama daha yavaş yükselir. Küresel model,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a,$$

$$\gamma(h) = C_0 + C = sill \quad h > a, \quad (4.14)$$

eksponansiyel model,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad h > 0$$

$$\gamma(0) = 0, \quad (4.15)$$

ve Gauss modeli,

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$$

$$\gamma(0) = 0, \quad (4.16)$$

matematik ifadeleri ile verilmiştir (Clark, 1979). YV aslında doğa olayının mekansal ilişkilerini karakterize eden ve yorumlayan bir istatistik araçtır. Kısaca YV'ın elemanları olan sırt değişkenliğinin miktarını gösterir, etki alanı ilgilenilen noktanın etkili olduğu uzaklığı verir ve eşik etkisi ise küçük mesafelerde hızlı değişimlerin olduğunu gösterir. Artık bilinmeyen nokta değerlerinin hesaplanabilmesi için jeostatistiksel enterpolasyon uygulanabilir. x_0 konumundaki Z değişkenin beklenen

değeri ölçülen verilerin $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$, ağırlıklı ortalaması olarak aşağıdaki şekilde tahmin edilir.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (4.17)$$

Burada $Z^*(x_0)$, x_0 'da Z 'nin tahmin edilen değeri; λ_i 's, ağırlıklar ve n , tesir alanının içinde kalan ve tahmin için kullanılan nokta sayısıdır. Bu denklemi incelenen probleme uyarladığımız zaman saçılma diyagramında bulunan herhangi bir nokta için dalga parametreleri tahmini şu şekilde elde edilir.

$$R(x_s) = \sum_{i=1}^n w_i R(x_i) \quad (4.18)$$

Burada $R(x_s)$ değeri araştırılan x_s noktasındaki dalga parametresi, $R(x_i)$, i noktasında bulunan dalga parametresi ölçümleri, ve w_i lerde YV fonksiyonu kullanılarak elde edilen ağırlıklardır. Ağırlık katsayıları belirlendikten sonra $R(x_s)$ değerleri tahmin edilebilir. Bu katsayıları elde etmek için aşağıdaki matris çözümüne ihtiyaç vardır (Isaaks and Srivastava 1989, Subyani 1997).

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (4.19)$$

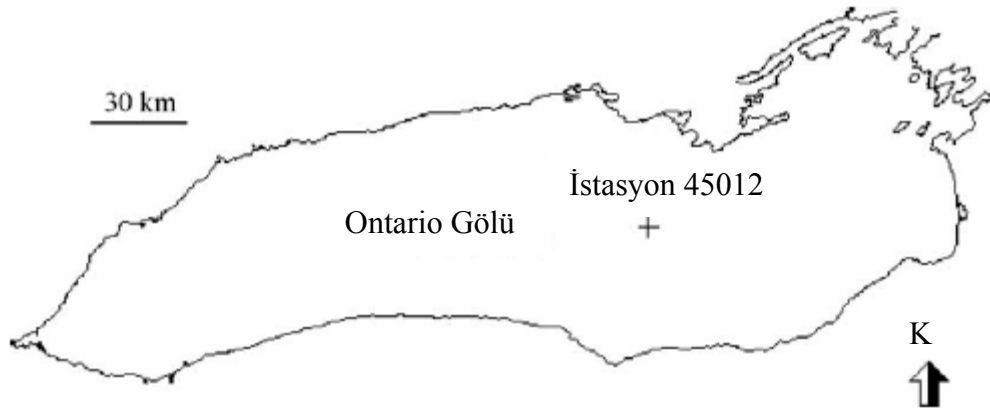
Burada γ_{ij} 'ler i ve j noktaları arasındaki YV değerleri, γ_{vi} tahmin değeri araştırılan ve diğer noktalar arasındaki YV değerleri ve son olarak μ , Lagrange parametresidir. Ağırlık katsayıları matrisi, matris tersi işlemi uygulandıktan sonra aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{vmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (4.20)$$

Böylece teorik YV değeri belirlendikten sonra Kriging yönteminin uygulanması ile dalga parametreleri, rüzgar hızı ve feç uzunluğu veya rüzgar esme süresinden tahmin edilebilir.

4.5 Veri ve Uygulama

Yöntemin uygulanması için Ontario gölünde kaydedilen meteorolojik ve dalga verileri kullanılmıştır (Şekil 4.3). Uygulamadan önce 45012 (National Data Buoy Center, <http://www.ndbc.noaa.gov/hmd.shtml>) no lu istasyonun verileri eğitim ve sınama aşaması olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim verisi Nisan-Kasım 2002 arası ve Haziran-Kasım 2003 arası olmak üzere alınırken, Nisan-Kasım 2004'te ölçülen veriler sınama verisi olarak kullanılmıştır.



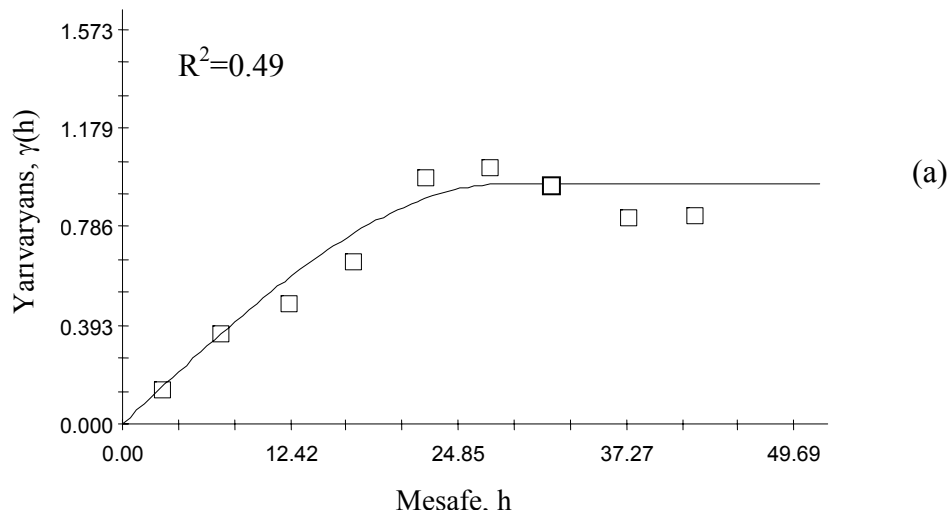
Şekil 4.3 Ontario gölü ve 45012 nolu istasyon

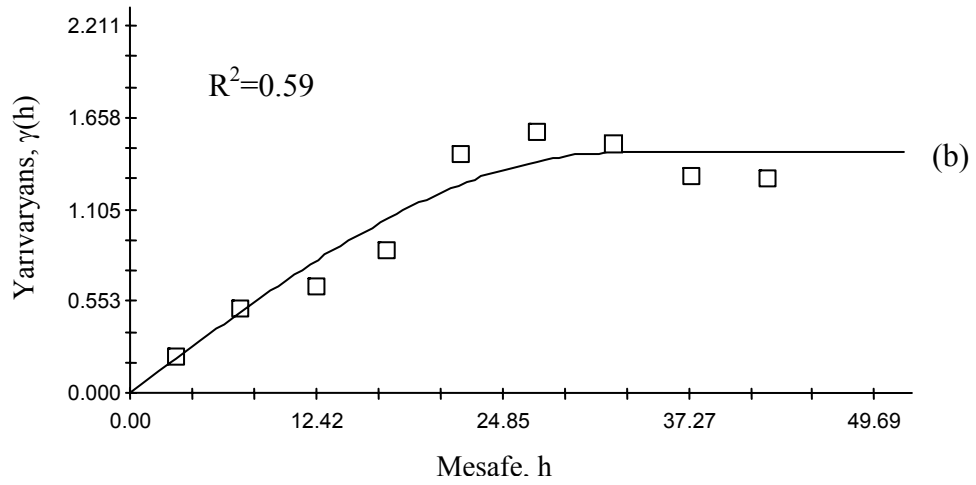
Dalga tahminleri için rüzgar hızı, feç uzunluğu ve rüzgar esme süresi gibi çeşitli büyüklüklerin verilerden elde edilmesi gereklidir. Feç uzunluğu açık denizde rüzgarın belirli bir yönde ve sabit bir hızda herhangi bir engelle karşılaşmadan estiği yatay uzunluğa denir. Bu uzunluk boyunca sabit hızlı rüzgarın deniz yüzeyine uyguladığı kayma gerilmesi ile dalga oluşur. Rüzgar hızının bütün feç boyunca sabit bir değerde kalması mümkün olmadığı için, çoğu zaman ortalama rüzgar hızından olan sapmalar 2.5 m/s 'yi geçmiyorsa bu rüzgar hızı sabit kabul edilir. Aynı şekilde rüzgar yönündeki sapmalar da 15° 'yi aşmıyorsa rüzgar yönünün değişmediği kabul edilir. Sabit rüzgar hızının süresi yukarıdaki şartı sağlayan arda arda gelen zamanların toplamına eşittir. Bu zaman zarfında meydana gelen rüzgar hızları ve

yönlerinin ortalaması aradığımız değerlerdir. Diğer taraftan, 0.3 m'den daha düşük belirgin dalga yükseklikleri, önemli dalgalar olarak değerlendirilmedikleri için ihmal edilmişlerdir (Bishop, 1983).

Uygulama kısmında kullanacağımız Kriging yöntemi için ilk önce alansal yapıyı ve korelasyonu temsil eden varyogram fonksiyonunun çıkartılması gereklidir. Verilerden bulunan YV elde edildikten sonra yukarıda bahsedilen teorik fonksiyonlardan bir tanesinin buna uydurulması gereklidir. Buradaki alansal yapı x ve y eksenlerinde bulunan girdi değişkenlerine ait verilerin saçılma diyagramlarının meydana getirdiği sanal bir ortamdır.

Feç sınırlı durum için Şekil 4.4' de de görüldüğü gibi mesafe ve YV değerlerine göre saçılma diyagramı çizildiğinde buna uydurulacak en uygun modelin küresel YV modeli olduğu söylenebilir.





Şekil 4.4 Feç sınırlı durum için (a) belirgin dalga yüksekliği (b) ortalama dalga periyodu üçlü haritalarının hazırlanmasında kullanılan küresel YV'lar

Dolayısıyla küresel modelde bir sırt değerinin varlığı görülür. Çünkü varyogram belirli bir değerden sonra artık mesafe ile değişmemektedir. Bunun anlamı varyans değerinin sabitlenmesidir. YV'nin sabit kaldığı yerin y-eksenine karşı gelen değer sırt değeri olarak okunurken x-eksenine karşı gelen değer ise tesir yarıçapı (range) olarak belirlenir. YV tesir yarıçapından daha büyük mesafelerde olayların birbirinden bağımsız olduğunu kabul edilir. Arasında bulunan uzaklık tesir yarıçapından büyükse bu iki noktanın birbirileri ile ilişkisi olmadığı anlamına gelir. Bu şekilde eşik (nugget) değerinin de sıfır olması, çok küçük mesafelerde ani değişimlerin olmadığını gösterir. Mesafe arttıkça, YV değerlerinin de hızlı bir şekilde artması birbirine çok yakın veri noktalarının ürettiği değerlerin çok farklılıklar içerdiği anlamına gelir. Belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu için küresel YV'lar sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\gamma(h) = 0.971 \left[\frac{3}{2} \frac{h}{28.71} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{28.71} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq 28.71,$$

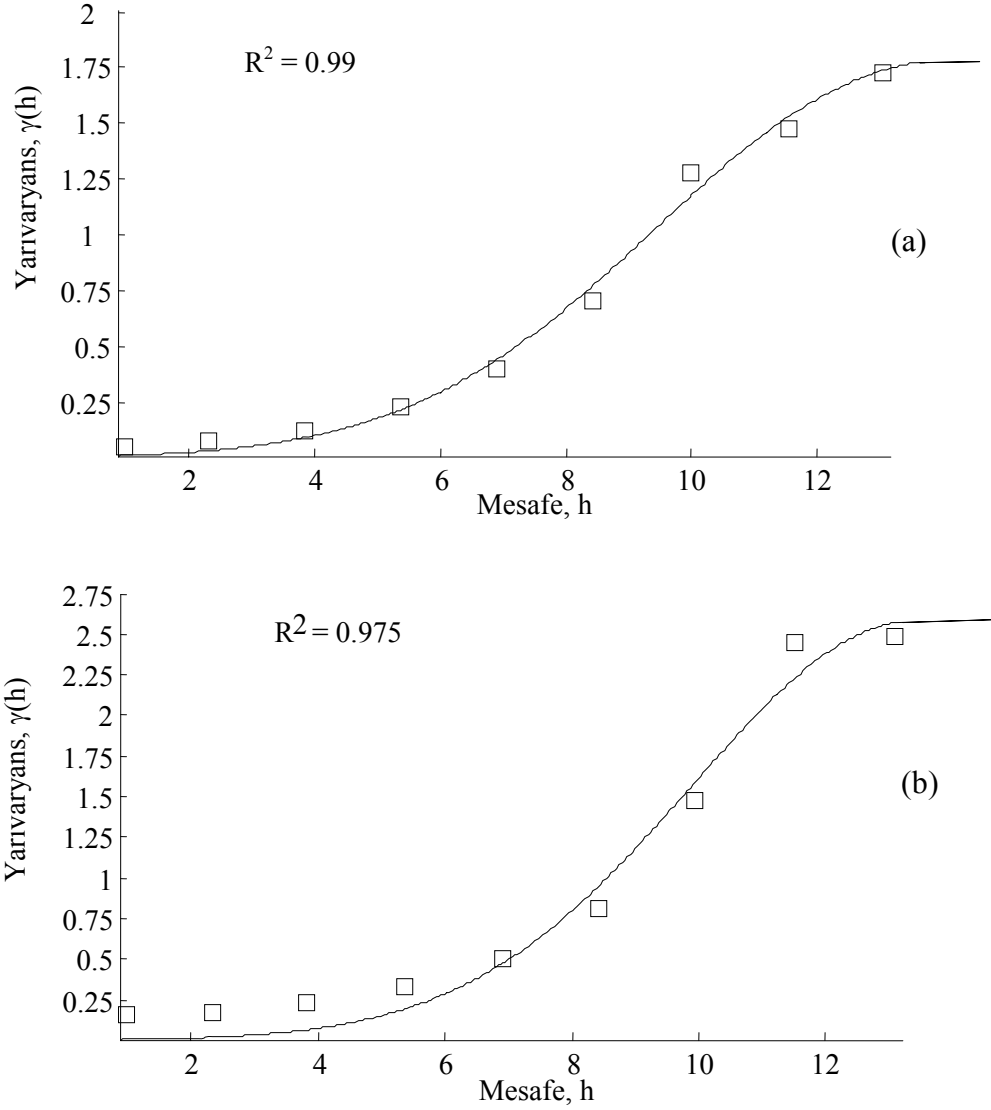
$$\gamma(h) = 0.971 \quad h > 28.71$$

ve

$$\gamma(h) = 1.446 \left[\frac{3}{2} \frac{h}{32.25} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{32.25} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq 32.25,$$

$$\gamma(h) = 0.971 \quad h > 32.25$$

Süre sınırlı durum için Şekil 4.5’ den görüldüğü gibi mesafe ile YV değerleri Gaussian modele uygunluk göstermektedir. Buna en iyi uyan model şekil üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.5 Süre sınırlı durum için (a) belirgin dalga yüksekliği (b) ortalama dalga periyodu üçlü haritalarının hazırlanmasında kullanılan Gaussian YV’lar

YV değerinin belli bir değerden sonra sabitlendiği görülmektedir. Yani belirli bir sırt değeri ve buna karşı gelen etki alanı vardır. Bu incelenen olayın durağan olduğunu

ve varyansının sabitlendiğini diğer yandan ise korelasyonunun anlamlı olduğunu gösterir. Burada eşik etkisinin sıfıra çok yakın çıkması veriler arasında düzenliliğin ve sürekliliğin olduğunu gösterir. Mesafe arttıkça YV değerlerinde yavaş bir artışın olması birbirine yakın noktaların bezerliğini ifade eder.

Süre sınırlı durumda belirgin dalga yüksekliği ve dalga periyodu için elde edilen Gaussian YV'nın fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\gamma(h) = 1.728 * \exp\left(-\left(\frac{h-13.49}{5.648}\right)^2\right)$$

ve

$$\gamma(h) = 2.583 * \exp\left(-\left(\frac{h-13.44}{5.015}\right)^2\right)$$

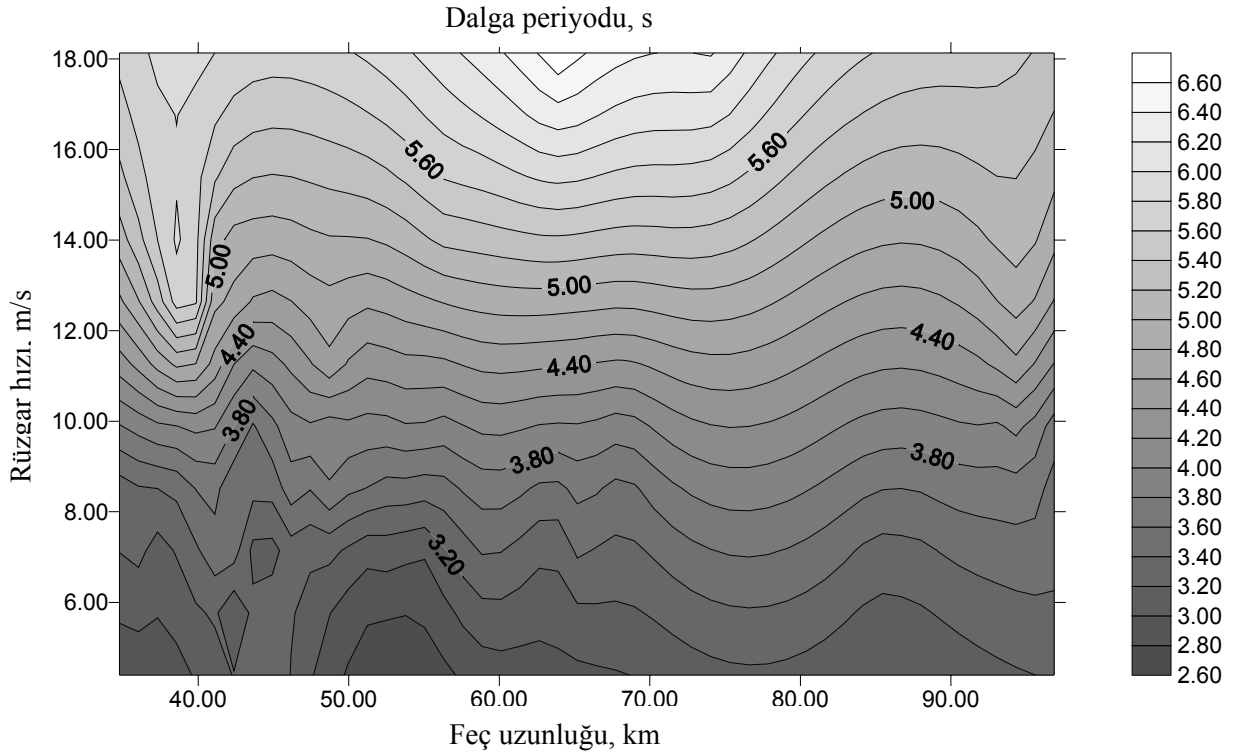
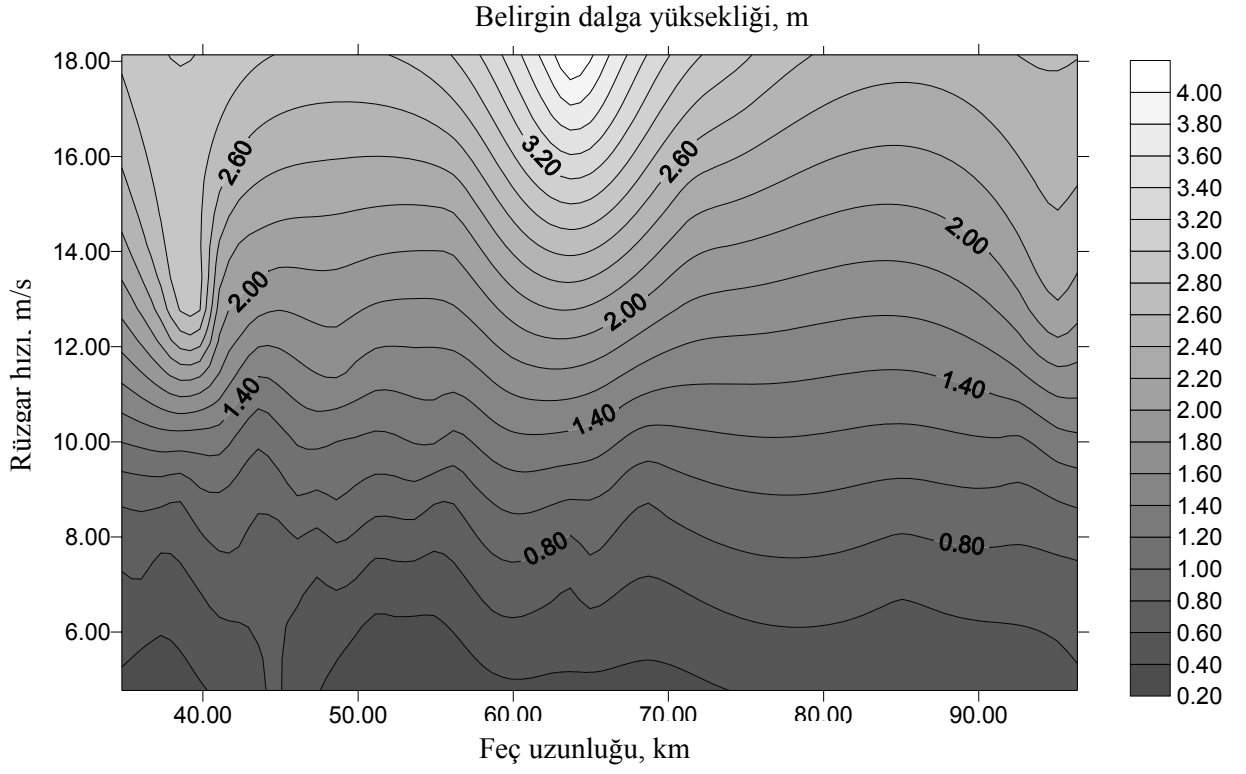
Feç sınırlı ve süre sınırlı durum için elde edilen YV parametreleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Yarıvaryogram parametreleri

	Eşik	Sırt	Aralık
Feç sınırlı durum			
Belirgin dalga yüksekliği	0	0.971	28.71
Ortalama dalga periyodu	0	1.446	32.25
Süre sınırlı durum			
Belirgin dalga yüksekliği	0	1.728	13.49
Ortalama dalga periyodu	0.085	2.583	13.44

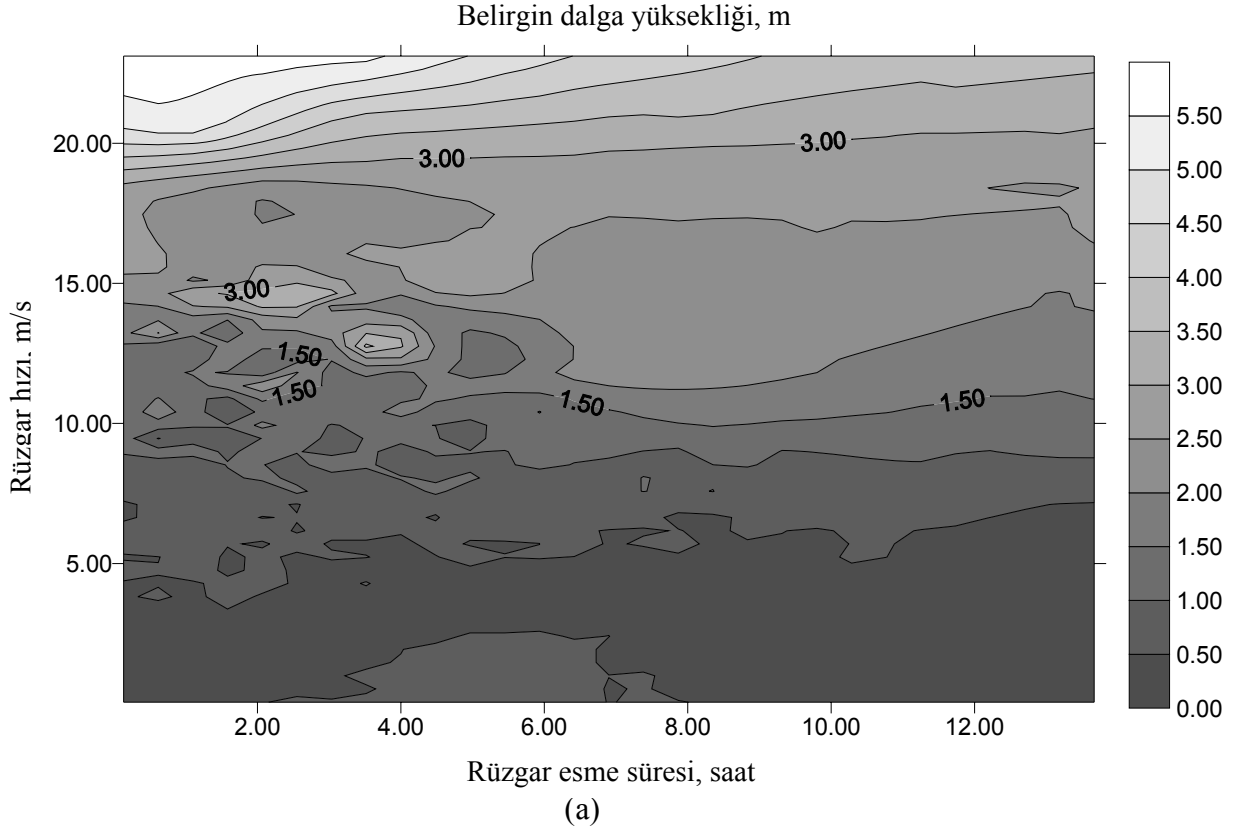
4.6 Bulgular ve Tartışma

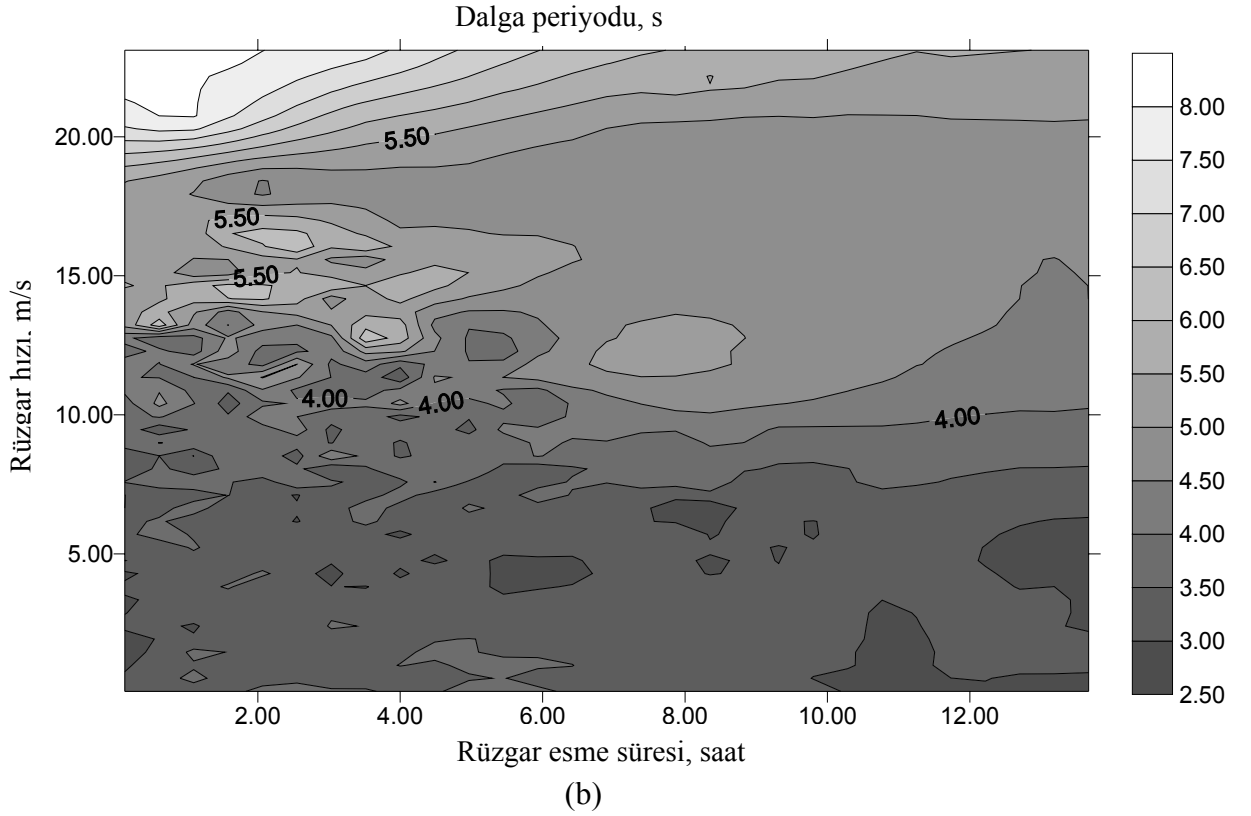
YV'lar elde edildikten sonra Kriging yöntemi ile tahmin aşamasına gelinmiştir. Bunun için Kriging yöntemi temel alınarak eş belirgin dalga yüksekliği ve ortalama periyot haritaları çizilir. Üçlü diyagramlar olarak adlandırılan bu haritalarda girdi değişkenleri temel alınmak suretiyle çıktı değişkeni için optimum interpolasyon yapılması işlemi kolaylaşır. Feç sınırlı ve süre sınırlı durum için hazırlanan kontur haritaları Şekil 4.6a,b' de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Feç sınırlı durum için (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Dalga periyodu için üçlü diyagram yöntemi tahminleri

Örneğin, feç sınırlı durum için tahmin yapılmak istendiği takdirde x-eksenine feç uzunluğu, y-eksenine ise rüzgar hızı girilerek eş belirgin dalga yüksekliği eğrilerinden optimum belirgin dalga yüksekliği değeri okunur. İstenen tahmin noktası ya bu şekilden okunur veya Kriging denklemleri ile tahmin edilir. Süre sınırlı durum içinde eş dalga yüksekliği ve dalga periyodu haritaları yukarıdaki adımlar izlenerek elde edilir (Şekil 4.7a ve 4.7b). Şekil 4.7' de Şekil 4.6'ya göre rasgeleliğin fazla olması değişkenler arasında bağımlılığın azaldığı anlamına gelir.





Şekil 4.7 Süre sınırlı durum için (a) Belirgin dalga yüksekliği (b) Dalga periyodu için üçlü diyagram yöntemi tahminleri

Üçlü diyagram yöntemi (ÜDY) kullanılarak elde edilen sonuçlar hem feç sınırlı hem de süre sınırlı durumlar için JONSWAP yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin ve JONSWAP modelinin davranışları grafik ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Sayısal değerlendirme yollarından birisi hata karelerinin ortalamasının gözlem varyansına oranının birden çıkarılması ile elde edilen verimlilik katsayısıdır (Nash ve Sutcliffe, 1970). Bu katsayı $-\infty$ ve 1 arasında değerler alırken bire yakın çıkması modelin iyi tahminlerde bulunduğu işaret eder. Buna ek olarak modellerin sınanmasında aşağıda verilen hataların mutlak değerinin ortalaması ölçütü de kullanılmıştır.

$$OMUH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_{ti} - D_{gi}| \quad (4.21)$$

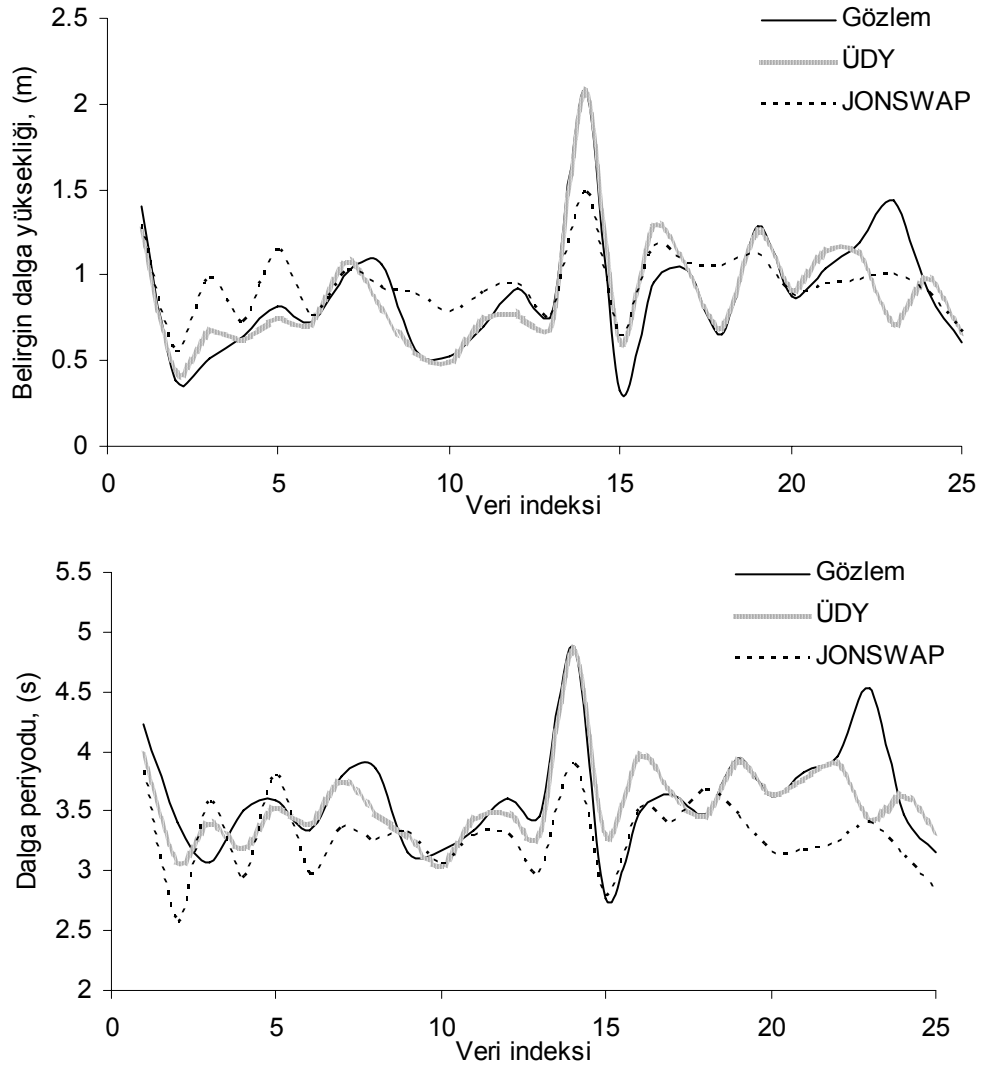
Burada D_{ti} ve D_{gi} i -inci tahmin edilen ve gözlem yapılan değerler ve N ise toplam gözlem sayısıdır. Tablo 4.2’de her iki durum için sonuçlar görülebilir. Bu tablodan da görüleceği üzere ÜDY daha düşük tahmin hataları vererek JONSWAP yöntemine göre daha iyi bir davranış sergilemiştir.

Tablo 4.2 Hata ölçütlerine göre ÜDY ve JONSWAP sonuçlarının karşılaştırılması

	ÜDY		JONSWAP	
	R^2	OMUH (m)	R^2	OMUH (m)
Feç sınırlı durum				
Belirgin dalga yüksekliği	0.76	0.11	0.58	0.19
Ortalama dalga periyodu	0.55	0.20	-0.21	0.42
Süre sınırlı durum				
Belirgin dalga yüksekliği	0.43	0.16	-1.37	0.39
Ortalama dalga periyodu	0.07	0.31	-27.11	2.11

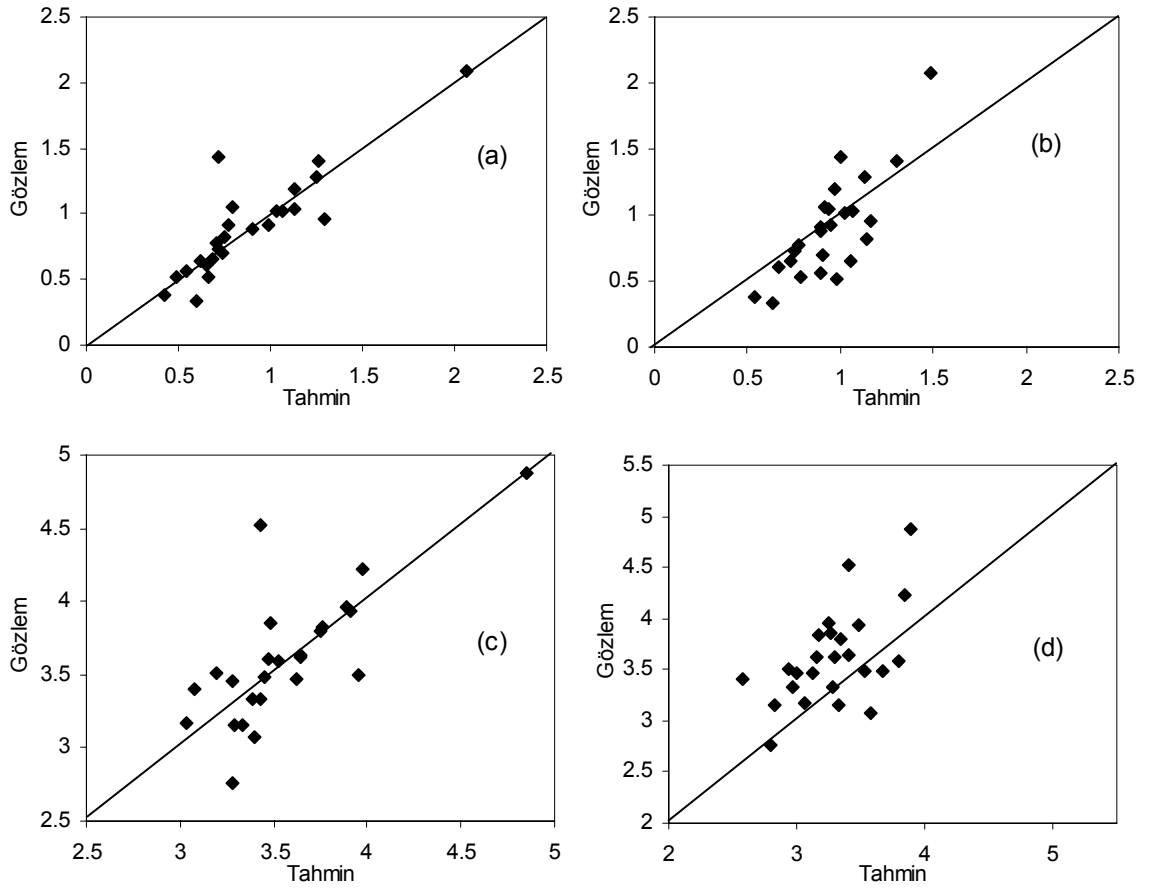
OMUH: Ortalama Mutlak Hata

Feç sınırlı durum için ÜDY' nin tahmin değerlerinin gözlem değerlerini oldukça yakından takip ettiği Şekil 4.8'den görülmektedir.

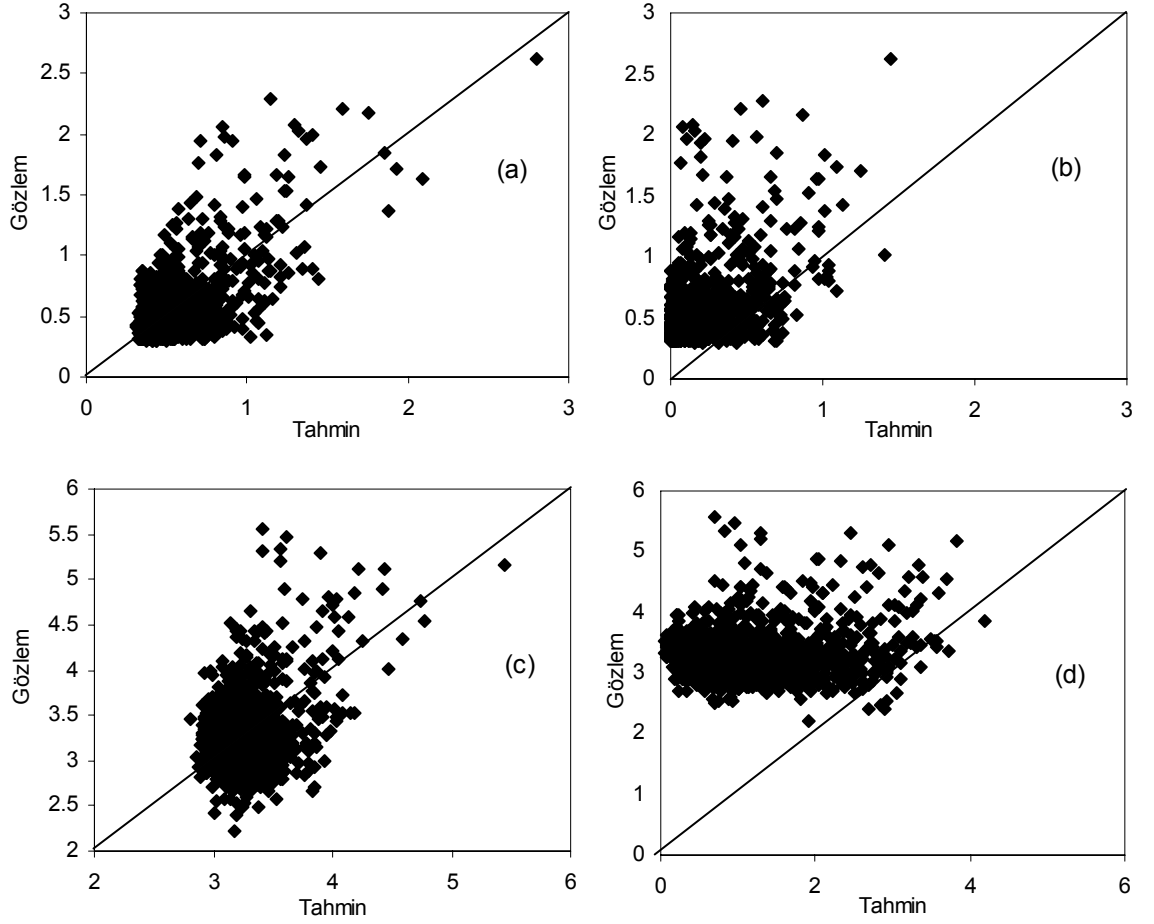


Şekil 4.8 Model sonuçlarının gözlemler ile karşılaştırılması

Aynı zamanda, ÜDY ve JONSWAP tahminleri ve gözlemler 45^0 tam model doğrusu ile birlikte gösterilmek istenildiğinde, feç ve süre sınırlı durumlar için sırasıyla Şekil 4.9 ve 4.10 çizilebilir. Bu şekillerden ÜDY tahminlerinin, doğrunun altında ve üstünde kalan noktalar neredeyse eşit olduğundan, herhangi bir yanlılık sergilemediği görülürken aynı durumun JONSWAP tahminleri için geçerli olmadığı sonucuna varılır. ÜDY yöntemi tahmin sonuçları ve gözlem değerlerinin saçılma diyagramları 45^0 lik doğru etrafında fazla saçılmazken, JONSWAP tahminleri sapmalar göstermektedir. Bu ÜDY yönteminin gözlem değerlerini daha iyi yakaladığı anlamına gelmektedir



Şekil 4.9 Feç sınırlı durum için (a) ÜDY, (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY, (d) JONSWAP ile dalga periyodu tahminleri

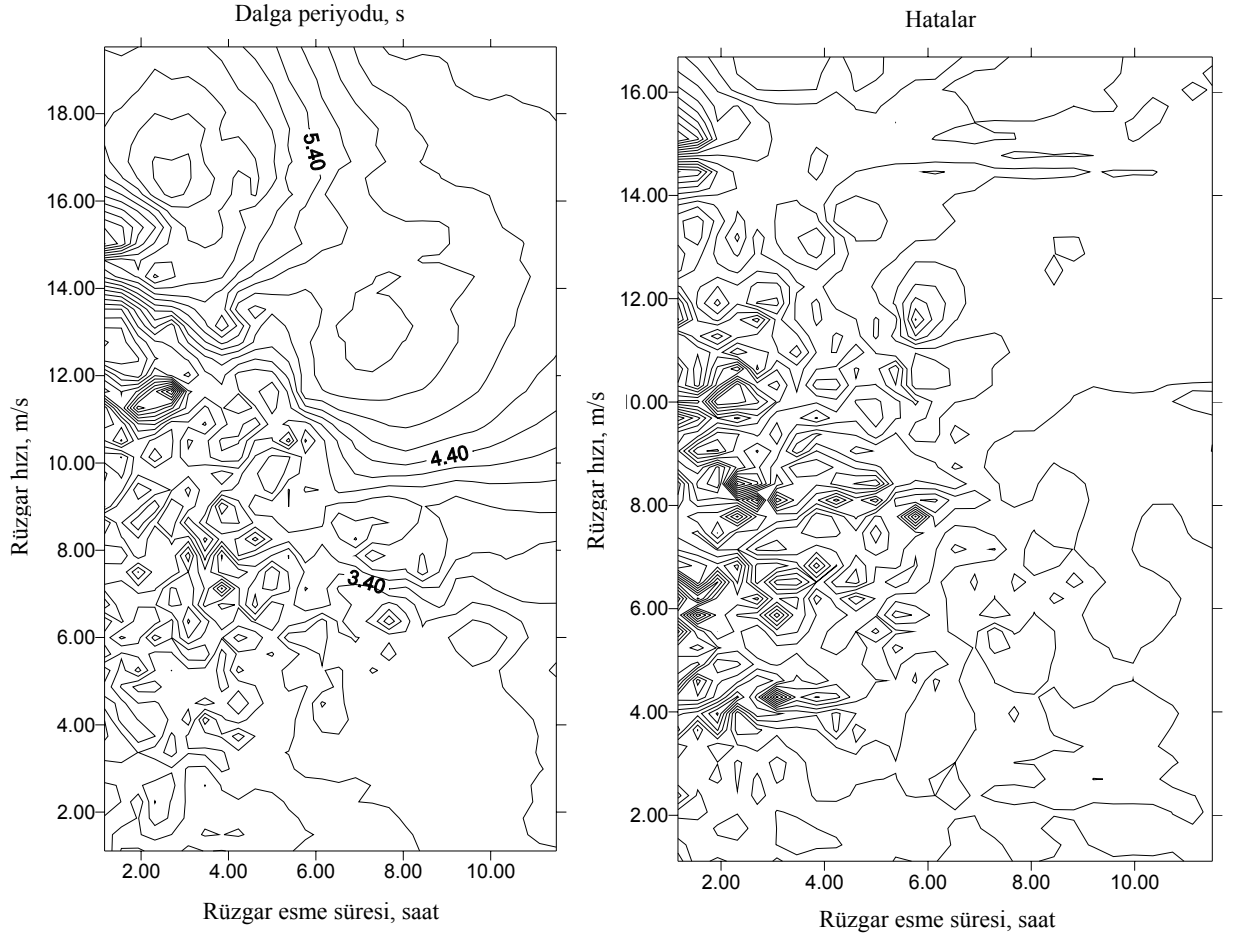


Şekil 4.10 Süre sınırlı durum için (a) ÜDY (b) JONSWAP ile belirgin dalga yüksekliği tahminleri, süre sınırlı durum için (c) ÜDY (d) JONSWAP ile dalga periyodu tahminleri

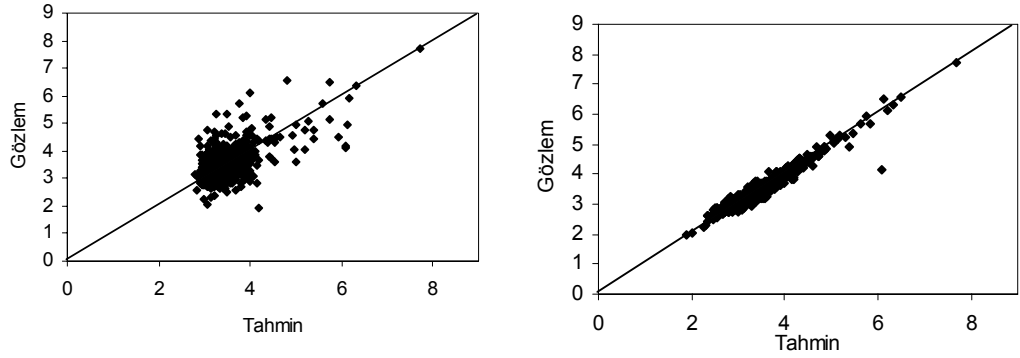
4.7 Yinelenebilir (Adaptif) Üçlü Diyagram Yöntemi (YÜDY)

Şekil 4.10 dan görüldüğü gibi ÜDY yöntemi ile yapılan dalga periyodu tahminlerinin JONSWAP modeline göre daha iyi olmasına rağmen bunun daha da iyileştirilmesi mümkündür. Tahminleri iyileştirmek için Yinelenebilir (Adaptif) Üçlü Diyagram Yöntemi (YÜDY) geliştirilmiştir. Yinelenebilirlik özelliği ilk olarak yapılan tahminlerin hatalarının aynı girdi değişkenleri tarafından bir kez daha tahmin edilmesi ve bunların tahmin sonuçlarına ilave edilmesi ile kazandırılmıştır. Değişkenlere göre hata haritası Şekil 4.11b’de gösterilmiştir. Her iki şekle bakıldığında hata haritasının belirgin dalga yüksekliği haritasına göre daha karmaşık çıkmaktadır. Özellikle esme süresinin düşük olduğu bölümlerde hataların çoğaldığı görülmektedir. Sonuç olarak YÜDY’i uygulandığında model tahminlerindeki doğruluğun arttığı Şekil 4.12’den görülmektedir. Aynı şekilde süre sınırlı durum için

55



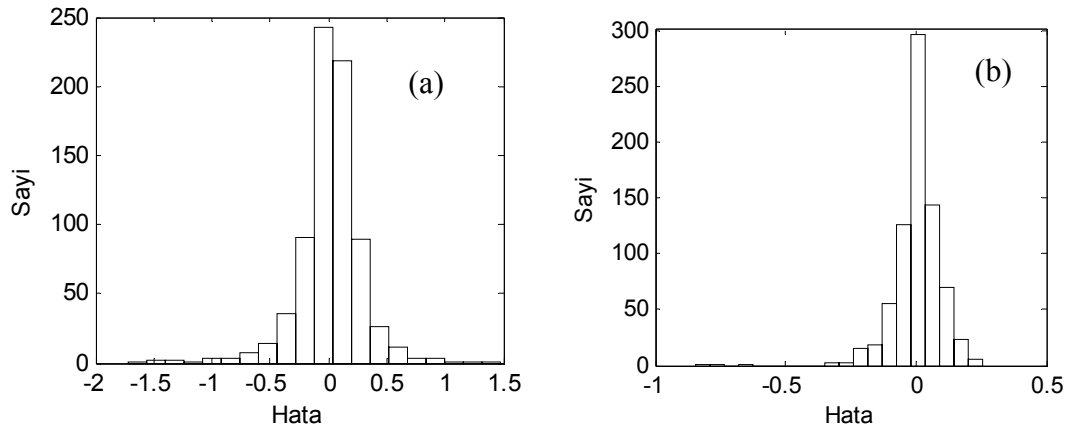
Şekil 4.13 YÜDY ile süre sınırlı durum için dalga periyodu tahmini a) Üçlü diyagram yöntemi ile tahmin ve b) hataların tahmini



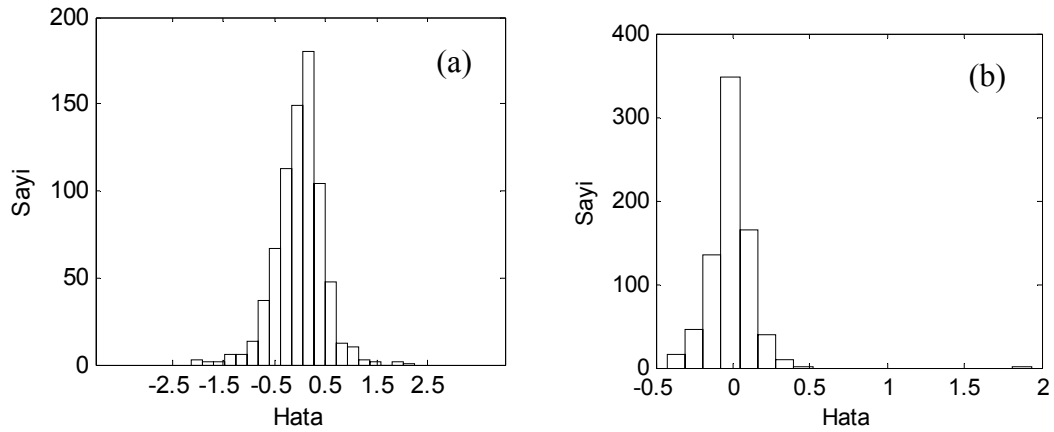
Şekil 4.14 Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga periyodu tahmin sonuçları

Şekil 4.12 ve 4.14' ten görüldüğü gibi sonuçlarda gözle görülür şekilde iyileşmeler vardır. Şekil 4.15 ve 4.16'da süre sınırlı durum için ÜDY ve YÜDY ile tahmin sonuçlarında yapılan hatalar sunulmuştur. Histogramlarını çizdiğimiz zaman yineleme sonunda hataların dağılımının daha da simetrik yani Gaussien olduğu

görülür. Ayrıca YÜDY ile bulunan sonuçlarda hataların sıfıra daha yakın bir bölgede dağıldığı görülmektedir.



Şekil 4.15 Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga yüksekliği tahmin hataları histogramları.



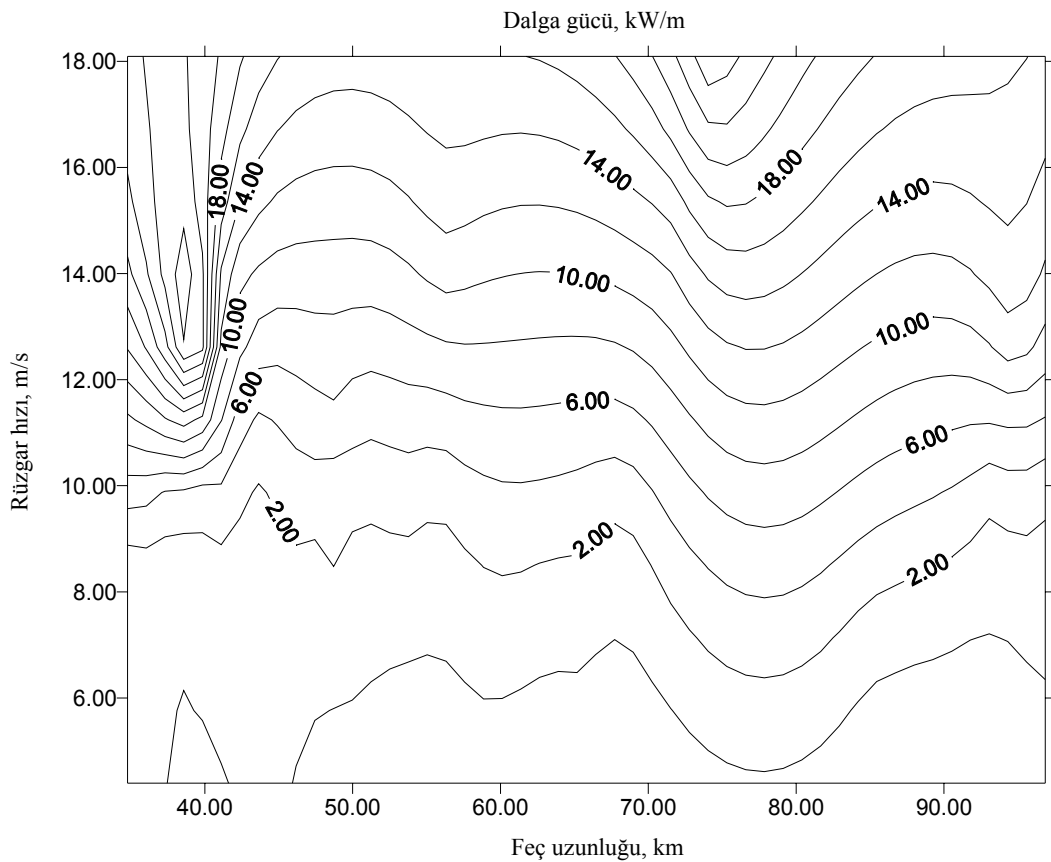
Şekil 4.16 Süre sınırlı durum için a) ÜDY ve b) YÜDY ile dalga periyodu tahmin hataları histogramları.

4.8 Dalga Gücü Haritaları

Dalga gücüne etki eden parametreler belirgin dalga yüksekliği ve periyoduna bağlı olarak üçlü diyagram yöntemi ile belirlenmiştir. Dalga gücü değişimi, feç ve süre sınırlı durumlar için kullanılan değişkenlere göre ayrı ayrı ele alınıp dalga gücü haritaları elde edilmiştir. Bu haritalar ile bir takım faydalı yorumlar elde edilebilir. Bunun için haritalarda çeşitli yerlerden kesitler alınarak yorumlar yapılacaktır. Bir değişken sabit kalırken diğer değişkene göre dalga gücünde nasıl bir değişim meydana geldiği iki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde gösterilecektir.

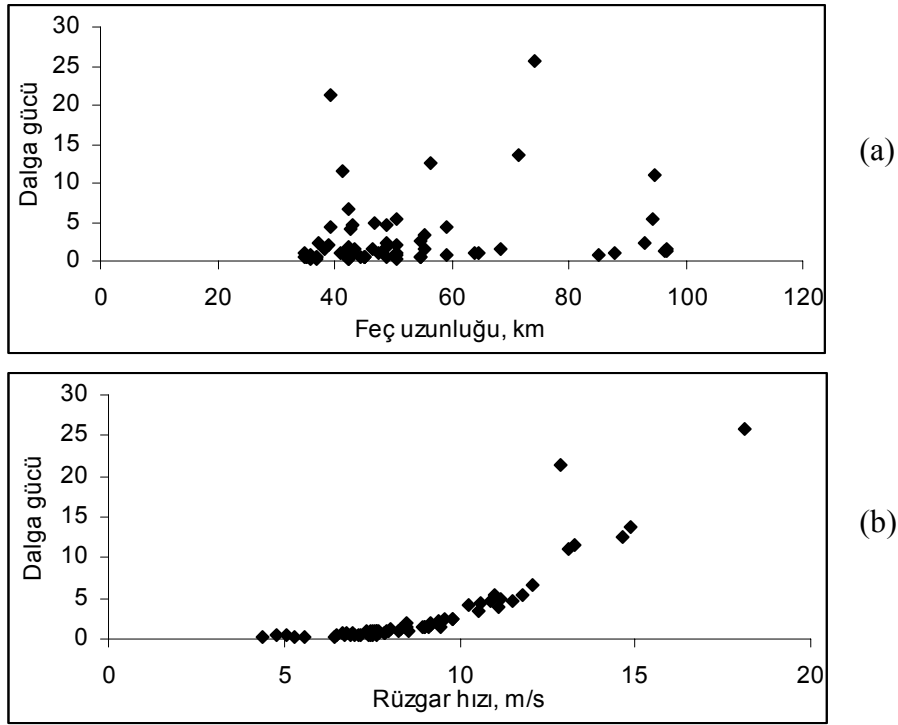
4.8.1 Feç-sınırlı durum dalga gücü haritası

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi feç sınırlı durumda etkin olan feç uzunluğu ve rüzgar hızı gibi iki değişken vardır. Burada dalga gücünün değişimi feç uzunluğu ve rüzgar hızı cinsinden elde edilmiştir. Bununla ilgili dalga gücü haritası Şekil 4.17 den görülmektedir. Değişkenlerden feç uzunluğu yatay eksen, rüzgar hızı da dikey eksende bulunurken dalga gücü bunlara dik eksende gösterilmiştir. Genel anlamda dalga gücünün diğer iki değişkene bağlı olarak değişimi Şekil 4.17’de görülmektedir. Rüzgar hızının etkili bir parametre olduğu, feç uzunluğunun ise çok büyük bir etkisinin olduğu görülmemektedir.



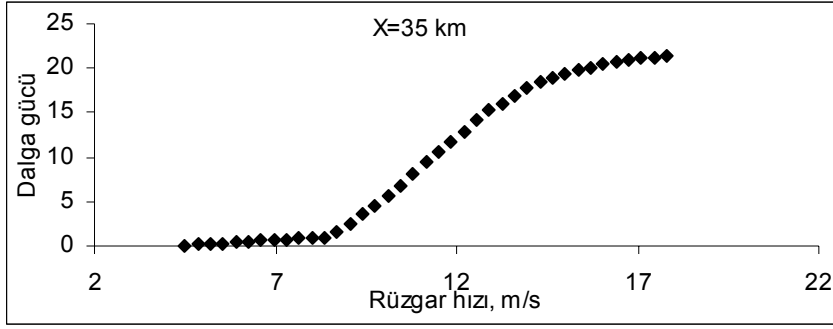
Şekil 4.17 Feç uzunluğu ve rüzgar hızına bağlı olarak dalga gücünün değişimi

Feç uzunluğu ve rüzgar hızının dalga gücüne tekil olarak nasıl etkidikleri Şekil 4.18 a ve b’ den görülmektedir. İlk bakışta feç uzunluğu ve dalga gücü arasında belirgin bir ilişki görülmezken, rüzgar hızı ile doğrusal olmayan bir ilişkinin bulunduğu göze çarpmaktadır.

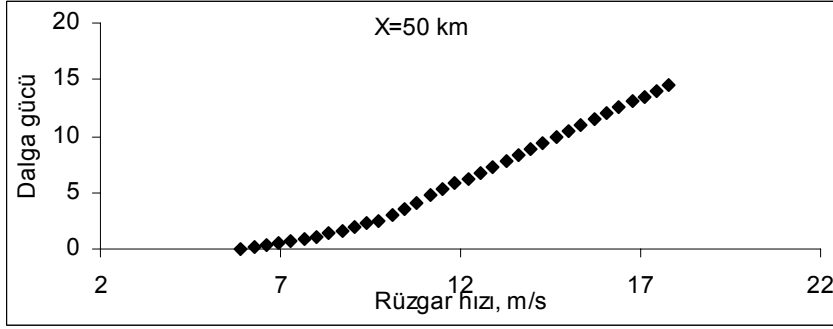


Şekil 4.18 Dalga gücü (a) Feç uzunluğu ve (b) Rüzgar hızı arasındaki ilişki

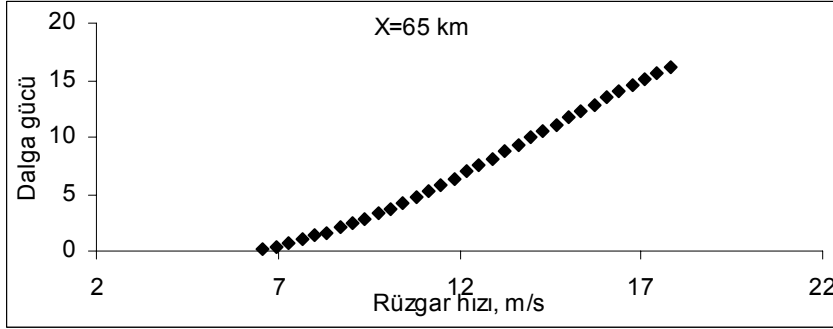
Dalga gücü değişimine daha ayrıntılı bakabilmek için haritada çeşitli yerlerden kesitler alınmıştır. İlk olarak feç uzunlukları sabit tutulmuş ve rüzgar hızına göre değişime bakılmıştır. Bu kesitler Şekil 4.19 a-e’de gösterilmiştir. Feç uzunluğu 35 km’de sabitken (Şekil 4.19a) rüzgar hızına göre dalga gücünün değişimi belirli bir eşik değerinden sonra başlamaktadır. Bir başka deyişle yaklaşık olarak rüzgar hızının değeri 8.5 m/s’ den küçük iken dalga gücündeki değişimlerin az fakat bu değerden sonra hızla bir artışın olduğu gözlenmektedir. Yüksek rüzgar hızlarına doğru dalga gücündeki değişimin azaldığı görülür. Şekil 4.19 b-d’ de rüzgar hızı ile dalga gücü artışının orantılı bir şekilde meydana geldiği ve orta feç uzunluklarında değişimin doğrusal olduğu sonucuna varılır. Büyük feç uzunluklarında ise değişim S-eğrisi şeklinde meydana gelir (bkzn. Şekil 4.19 e).



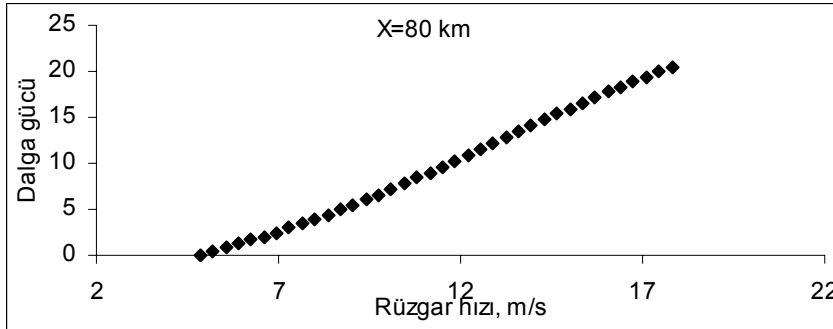
(a)



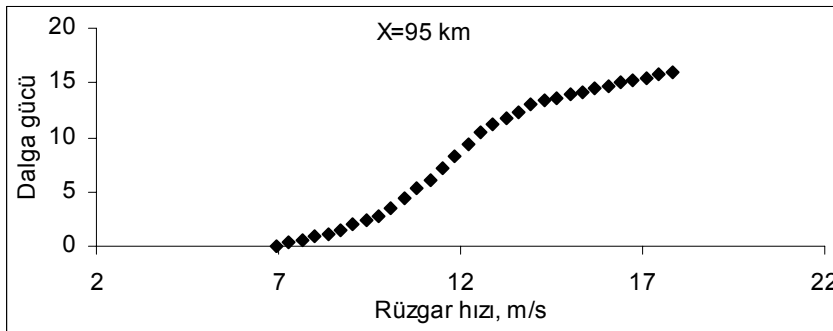
(b)



(c)



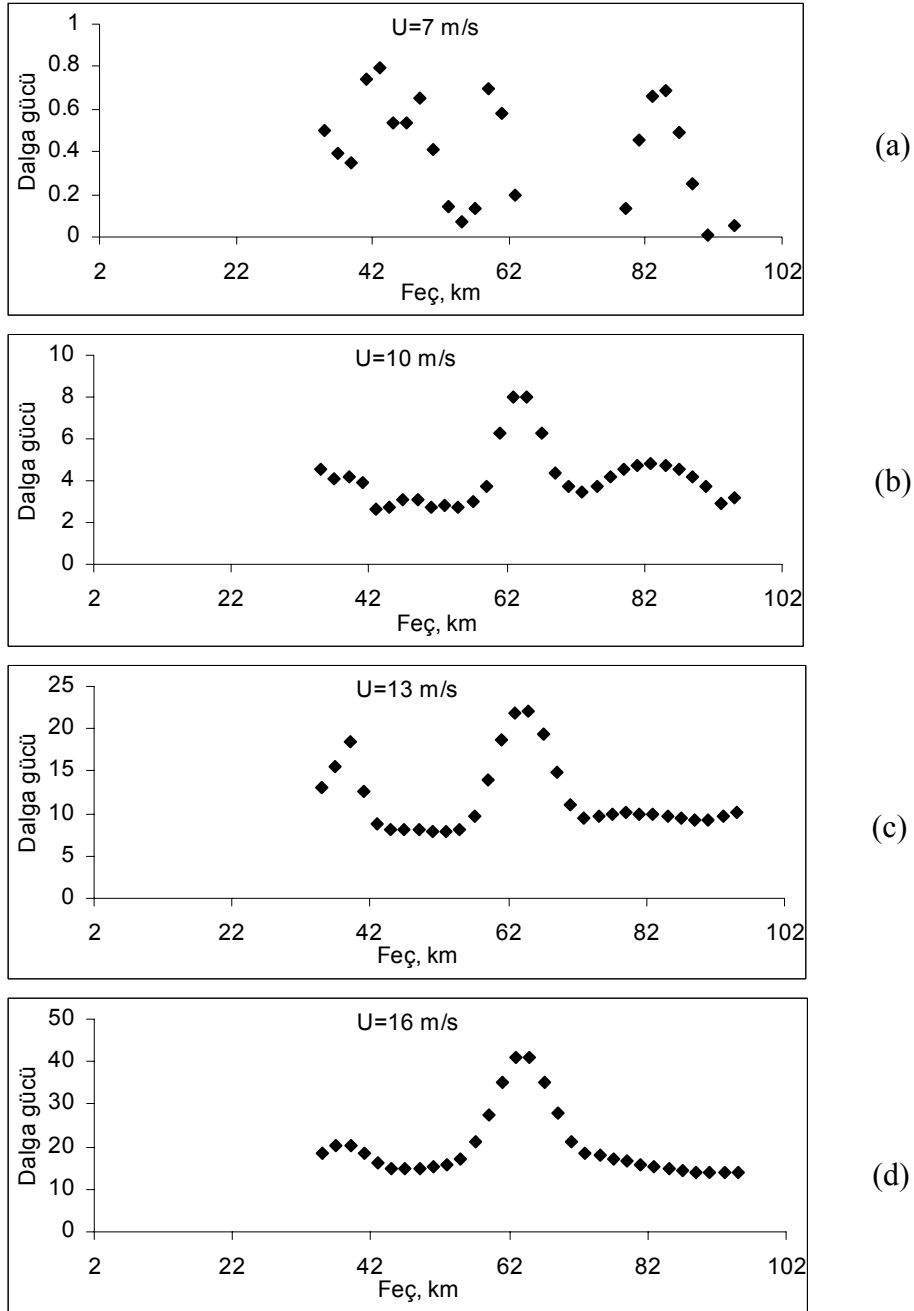
(d)



(e)

Şekil 4.19 Sabit feç uzunluklarında dalga gücü - rüzgar hızı değişimi (a) $X = 35$ km, (b) $X = 50$ km, (c) $X = 65$ km, (d) $X = 80$ km ve (e) $X = 95$ km.

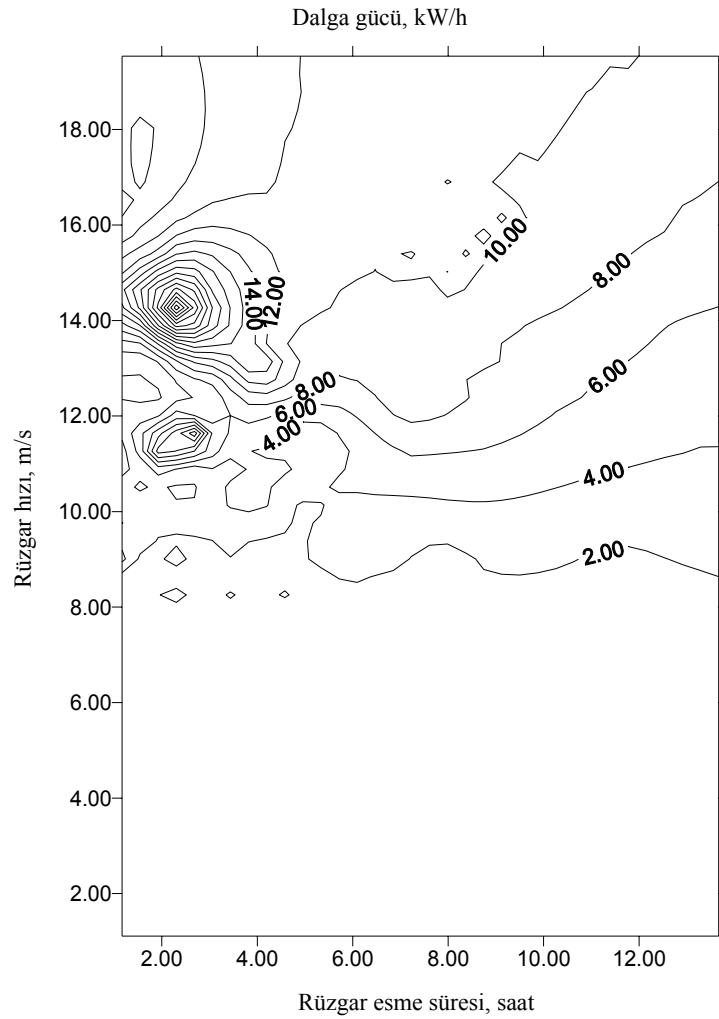
Rüzgar hızları sabitken feç mesafesine göre dalga gücünün değişimi Şekil 4.20 a-d’de sunulmuştur. Rüzgar hızı $U=7$ m/s’ de sabit iken feç uzunluğu ve dalga gücü arasında oldukça kararsız bir durum gözlenirken, düşük rüzgar hızlarında olayın karakterini tam anlamıyla kazanmadığı sonucuna varılabilir. Düşük hızlarda herhangi bir bağıntının olduğundan bahsedilemez. Yüksek hızlarda yaklaşık 65 km feç mesafesinde dalga gücünün pik değere ulaştığı onun haricinde belli bir ortalama etrafında salınım yaptığı görülmektedir (Şekil 4.20 b-d). Genelde feç uzunluğu ile bir değişim göze çarpmamaktadır.



Şekil 4.20 Sabit rüzgar hızlarında dalga gücü - feç uzunluğu değişimi (a) $U = 7$ m/s, (b) $U = 10$ m/s, (c) $U = 13$ m/s, ve (d) $U = 16$ m/s.

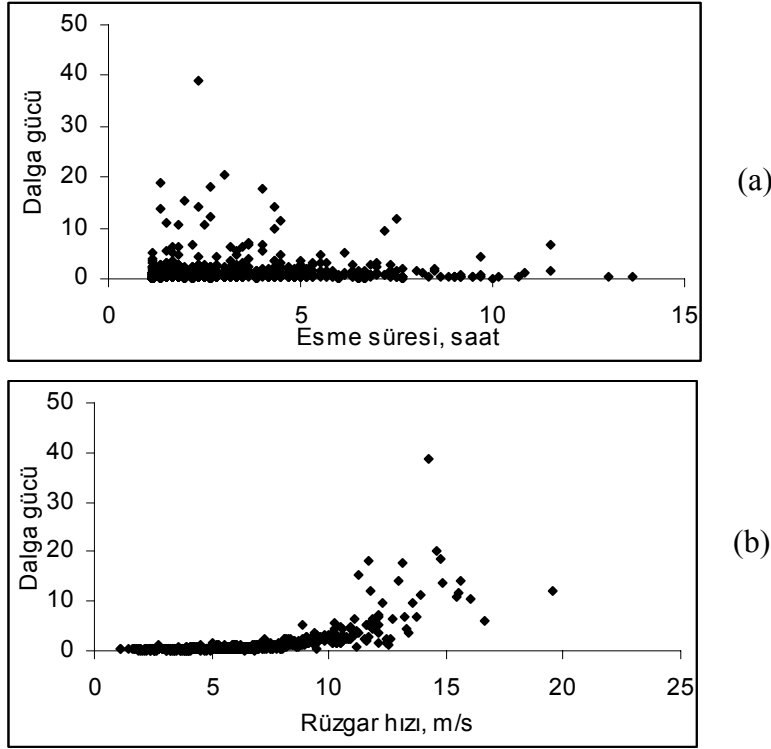
4.8.2 Süre-sınırlı durum dalga gücü haritası

Süre sınırlı durum için olaya etki eden parametreler esme süresi ve rüzgar hızıdır. Dalga gücü haritası esme süresi ve rüzgar hızı değişkenleri esas alınarak çizilmiştir. Bununla ilgili dalga gücü haritası Şekil 4.21’den görülmektedir. Değişkenlerden esme süresi yatay eksen, rüzgar hızı dikey eksen, bulunurken üçüncü boyut olarak dalga gücü bunlara dik eksenle gösterilmiştir. Genel anlamda dalga gücünün diğer iki değişkene bağlı olarak değişiminin oldukça düzensiz dağılımı aşağıdaki şekilden görülmektedir. Özellikle esme süresinin küçük olduğu bölgelerde düzensizliğin arttığı ve tepe ve çukurların etkisinin çoğaldığı görülmektedir. Rüzgar hızının etkili bir parametre olduğu durumlarda, esme süresinin de büyük değerlerinin göz önüne alınması gerektiği göze çarpmaktadır. Ayrıca burada da yine feç sınırlı durumda olduğu gibi yaklaşık 8 ila 8.5 m/s’ lik rüzgar hızlarında sonuçlar anlamlı çıkmamaktadır.



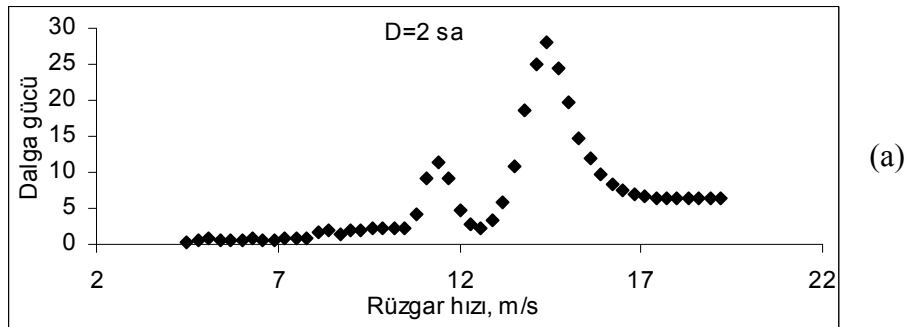
Şekil 4.21 Esme süresi ve rüzgar hızına bağlı olarak dalga gücünün değişimi

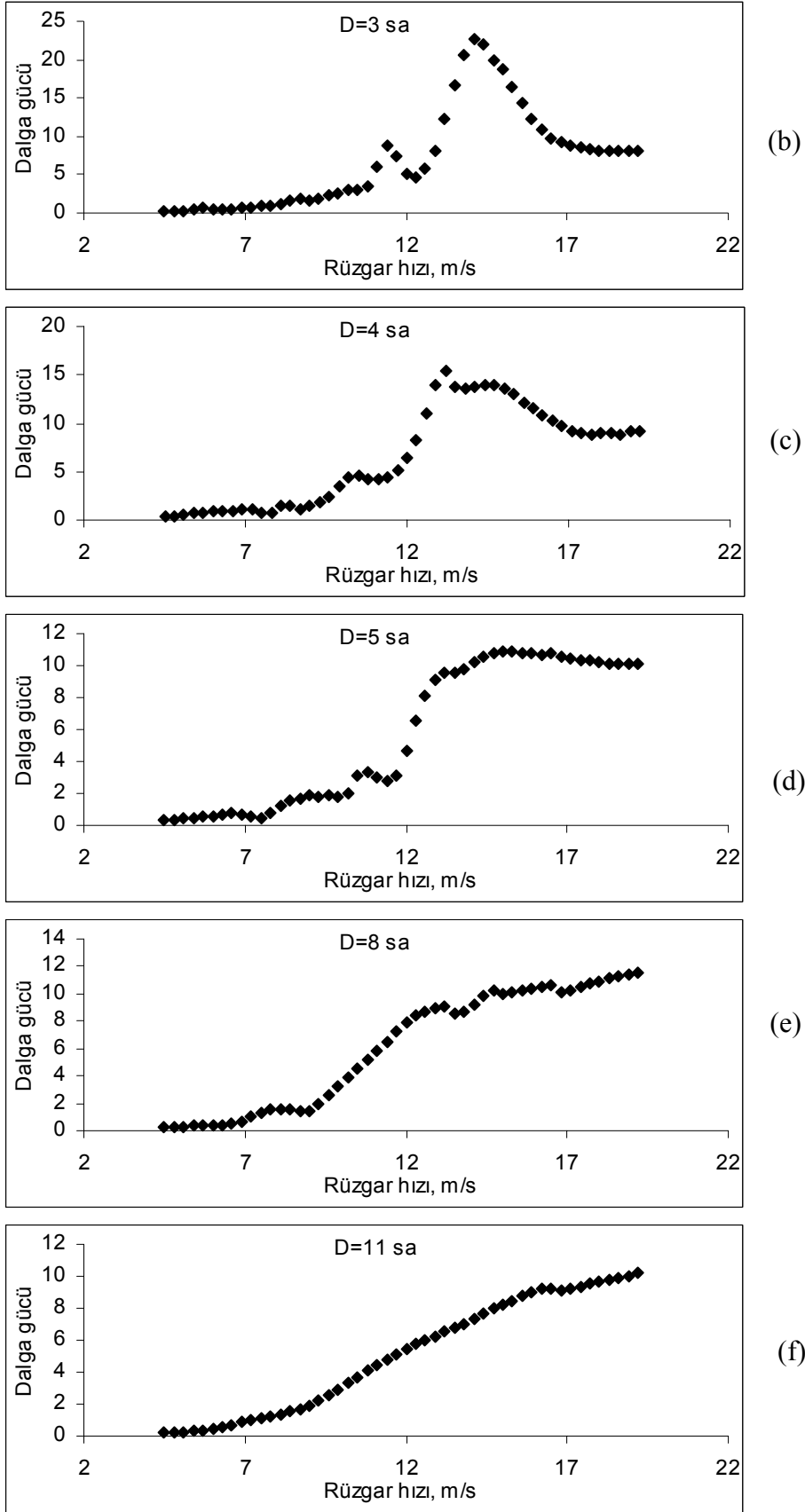
Esme süresi ve rüzgar hızına göre dalga gücünün iki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde değişim Şekil 4.22 a, b’den görülmektedir. İlk bakışta esme süresi ile dalga gücü arasında belirgin bir ilişki görülmezken, rüzgar hızı ile doğrusal olmayan bir ilişkinin bulunduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 4.22 Dalga gücü (a) Esme süresi ve (b) Rüzgar hızı arasındaki ilişki

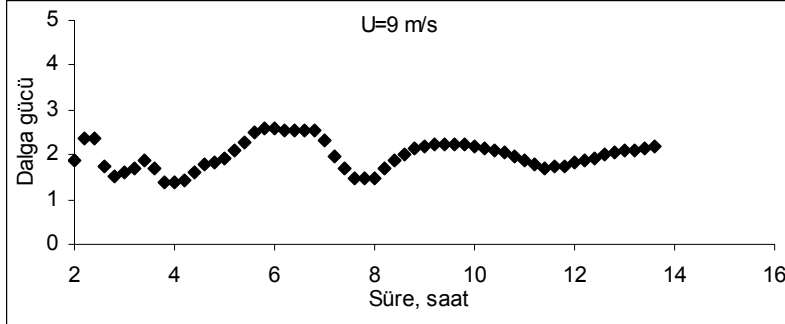
Esme süreleri sabit tutulduğu zaman rüzgar hızına göre değişim grafikleri Şekil 4.23 a-f arasında gösterilmiştir. Esme süresinin 2 ve 3 saat olduğu durumlarda rüzgar hızına bağlı olarak önce ufak bir artışın olduğu sonrada rüzgar hızının yaklaşık olarak 11.5 m/s ve 14 m/s’ ye ulaştığı anda iki adet tepe noktası meydana gelmektedir. Bu düşük esme sürelerinde olayın davranışının tam anlamıyla kestirilemeyeceği anlamını verir. Bununla birlikte büyük esme sürelerinde rüzgar hızına göre değişim S-grafigi şeklini alır (Şekil 4.23 c- f).



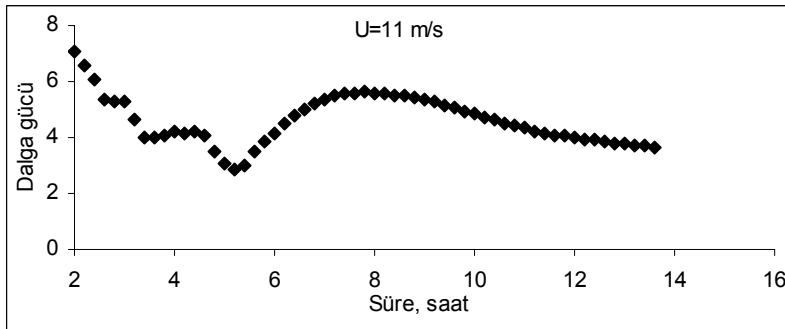


Şekil 4.23 Sabit esme sürelerinde dalga gücü - rüzgar hızı değişimleri (a) $D = 2$ sa, (b) $D = 3$ sa, (c) $D = 4$ sa, (d) $D = 5$ sa, (e) $D = 8$ sa ve (f) $D = 11$ sa alınmış kesitler

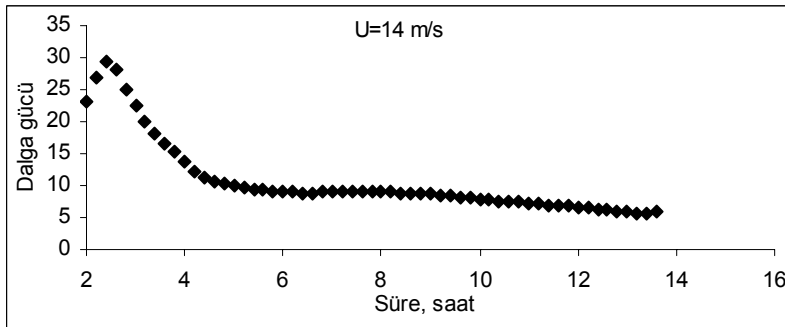
Rüzgar hızı sabit tutulduğunda esme süresine göre değişim Şekil 4.24 a ile e arasında sunulmuştur. Şekil 4.24 a’da bir salınının olduğu görülürken Şekil 4.24 b’de bir çukur ve tepenin meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.24 c ve e küçük sürelerden büyük sürelerle doğru dalga gücünde bir azalmanın olduğunu gösterir. Bunun sebebinin küçük sürelerdeki düzensizlikler olduğu anlaşılmaktadır. Rüzgar esme süresinin ne kadar büyükse dalga gücüne katkısının o anlamda belirgin olması beklenmektedir.



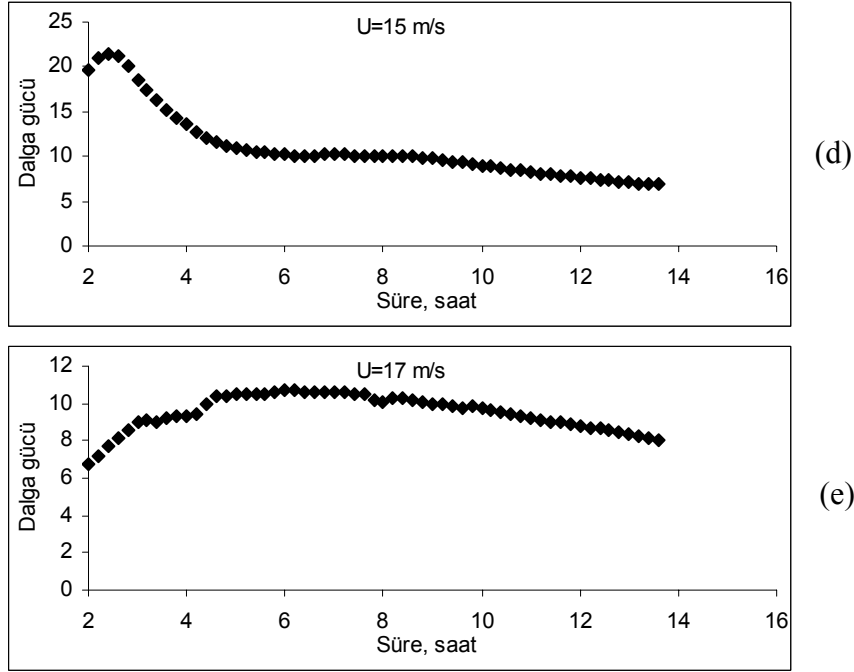
(a)



(b)



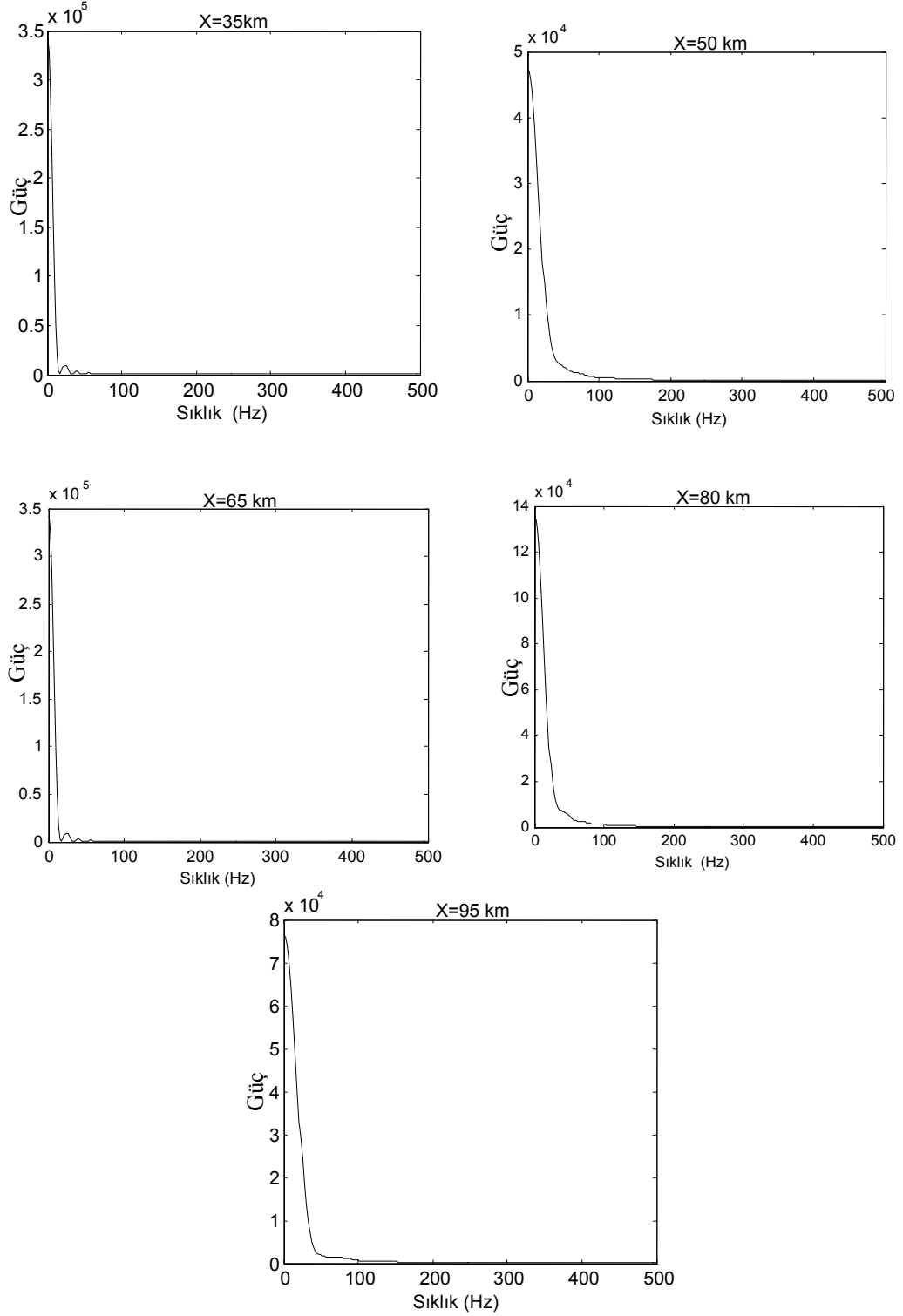
(c)



Şekil 4.24 Değişik rüzgar hızlarında dalga gücü - rüzgar esme süresi değişimi (a) $U = 9$ m/s, (b) $U = 11$ m/s, (c) $U = 14$ m/s, (d) $U = 15$ m/s, ve (e) $U = 17$ m/s.

4.8.3 Dalga Gücü Kesitlerinin Spektral Analizi

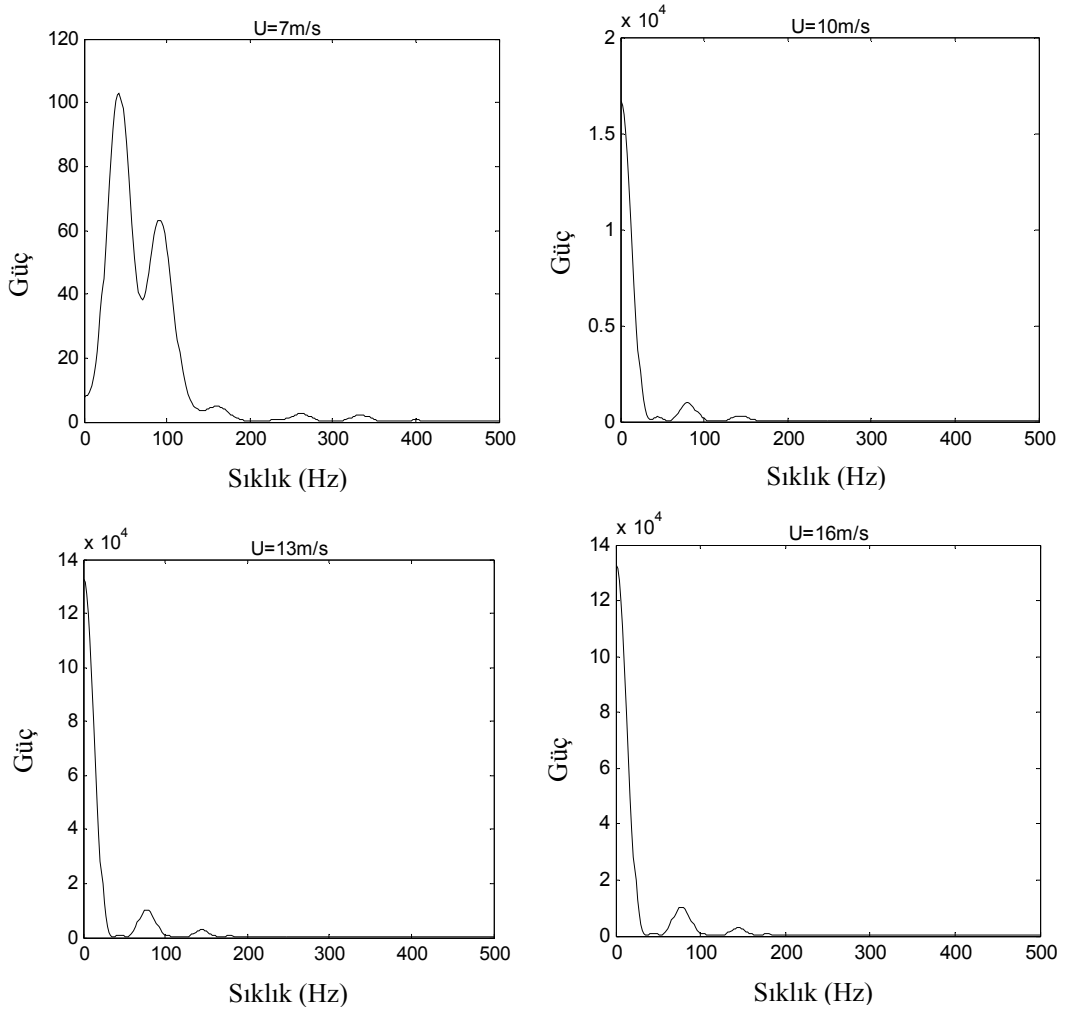
Spektral analizdeki amaç verileri esas alarak bir sinyalde içerilen güçlerin dağılımını açıklamaktır. Bunun için yatay eksen sıklığı (frekansı) temsil etmek üzere, düşey eksen de güç tanımlanır. Genelde sıklık eksenine geçmek için Fourier dönüşümleri kullanılır. Geniş bantlarda gömülü bulunan baskın sinyallerin tespit edilmesinde sıkça kullanılır. Feç sınırlı durum için Şekil 4.19'daki verilerin güç spektrumları Şekil 4.25 deki gibi elde edilmiştir. Bu şekillerden genelde küçük frekanslarda baskın bir frekansın olduğu görülmektedir. Sinyal olarak rüzgar hızına göre dalga gücü değişimi alındığı için burada zaman eksenini yerine eşit aralıklarla alınmış rüzgar hızı baz alınmıştır. Dolayısıyla küçük frekanslardan kasıt rüzgar hızının büyük değerler aldığı aralık olarak görülebilir.



Şekil 4.25 Feç sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $X=35$ km, (b) $X=50$ km, (c) $X=65$ km, (d) $X=80$ km ve (e) $X=95$ km için güç spektrumları

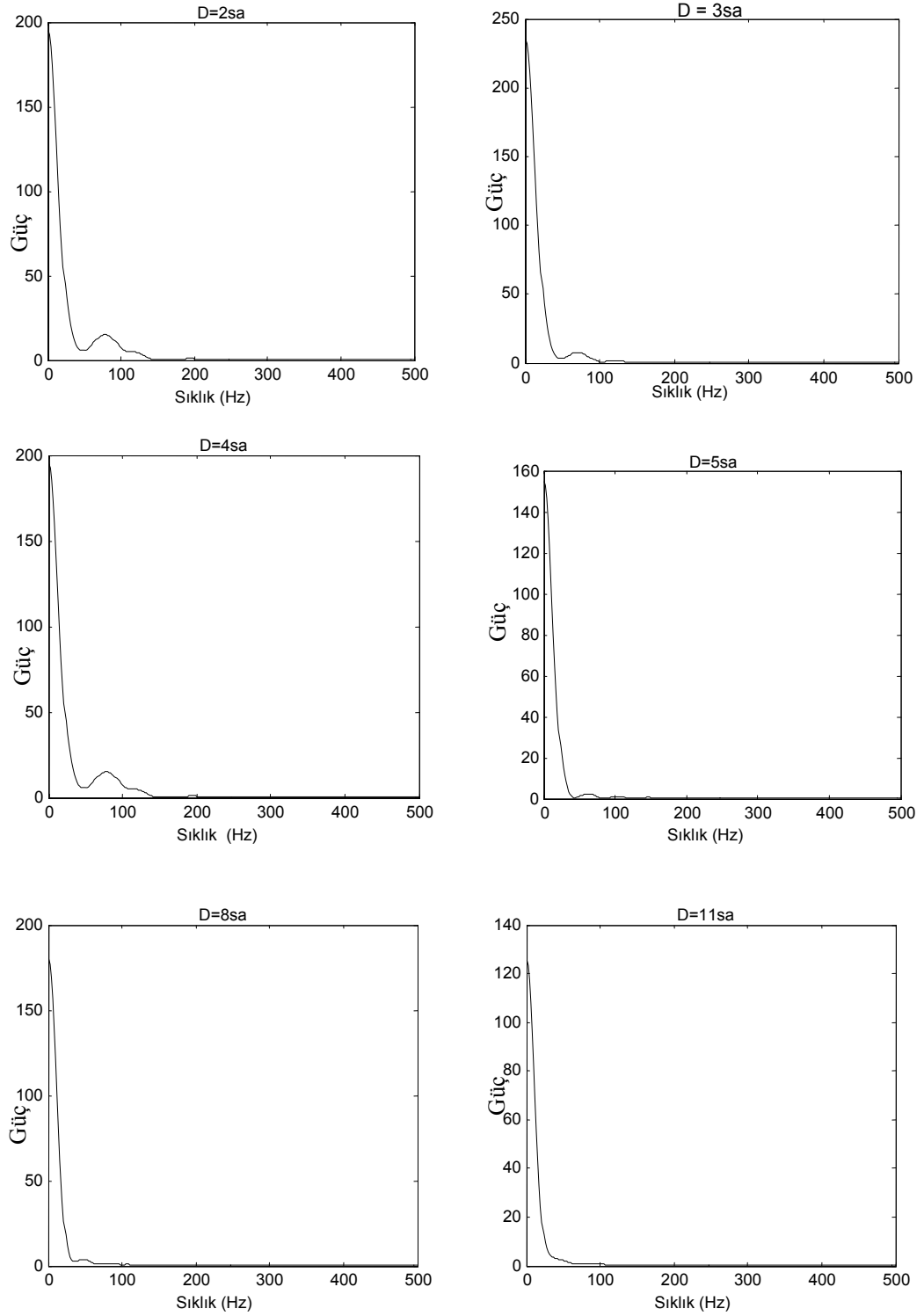
Aynı şekilde sabit rüzgar hızlarında feç ile değişime (Şekil 4.20) bakıldığında güç spektrumu Şekil 4.26’teki hali alır. Şekil 4.26 a’da belirgin olarak iki tepe görülürken, diğer şekillerde küçük olmasına rağmen tepeler görülür. Burada feç

uzunluğundan frekansa dönüşüm yapıldığı için, bunlar Şekil 4.26' te bulunan ani değişimleri gösterir.



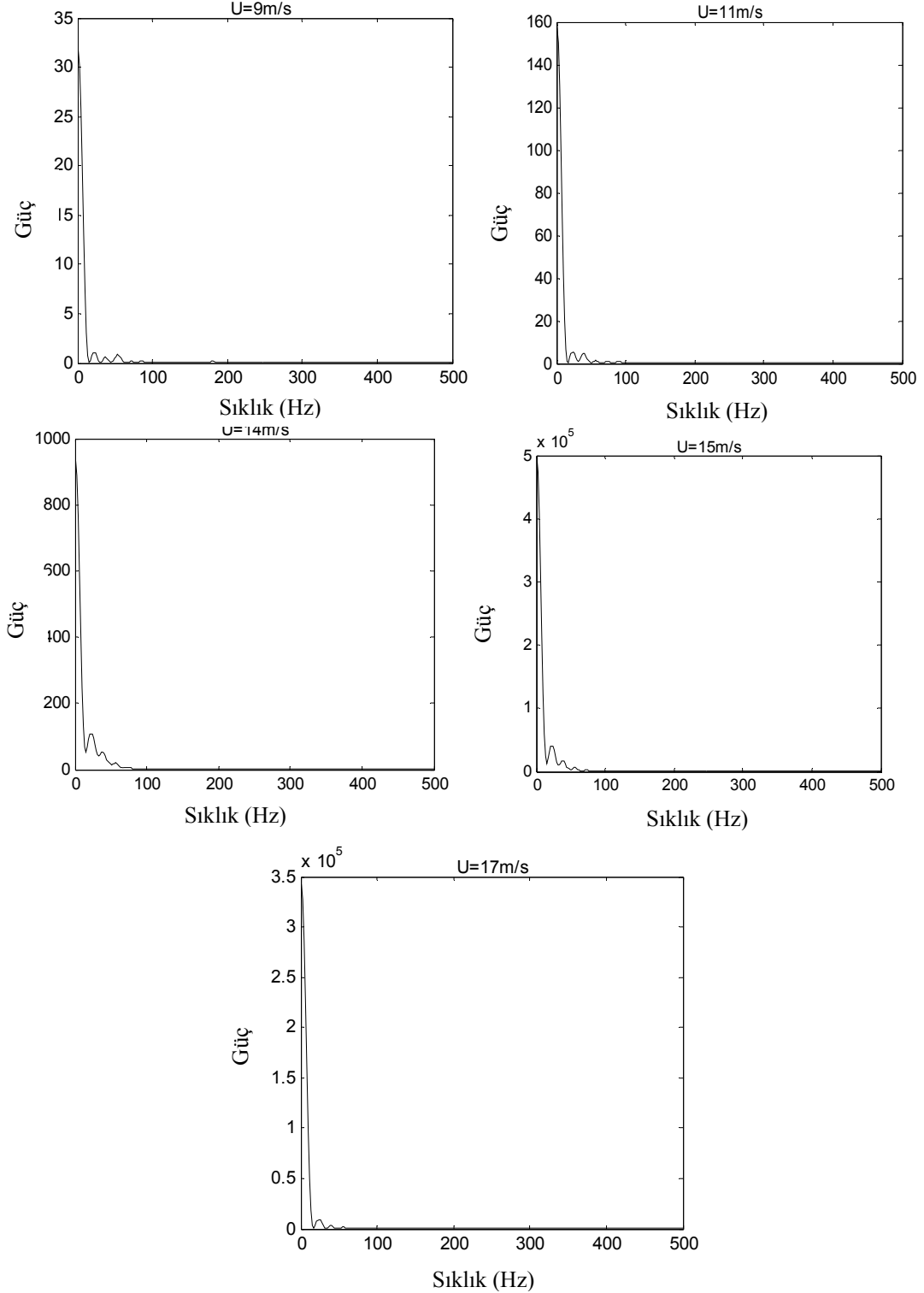
Şekil 4.26 Feç sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $U=7\text{m/s}$, (b) $U=10\text{ m/s}$, (c) $U=13\text{ m/s}$, ve (d) $U=16\text{ m/s}$ için güç spektrumları

Süre sınırlı durumda alınan kesitler esme süresi sabitken elde edilen güç spektrumları ise Şekil 4.27'da sunulmuştur. 4.27a ve d arasında düzensizlikler göze çarparken diğer şekillerde bu ortadan kalkmaktadır. Sadece düşük frekanstaki sinyallerin etkinliği görülmektedir. Burada süre sınırlı durum için yine rüzgar hızı ekseninden frekans eksenine dönüşüm yapılmıştır.



Şekil 4.27 Süre sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $D=2$ sa, (b) $D=3$ sa, (c) $D=4$ sa, (d) $D=5$ sa, (e) $D=8$ sa ve (f) $D=11$ sa için güç spektrumları

Şekil 4.28 ise Şekil 4.24’de çizilen kesitlerin güç spektrumlarını gösterir. Burada ise esme süresi ekseninden frekans eksenine dönüşüm yapılmıştır. Bu şekillerde de birden fazla küçük tepeler gözlemlenmektedir.



Şekil 4.28 Süre sınırlı durumda çeşitli kesitler (a) $U=9\text{m/s}$, (b) $U=11\text{ m/s}$, (c) $U=14\text{ m/s}$, (d) $U=15\text{ m/s}$, ve (e) $U=17\text{ m/s}$ için güç spektrumları

5. DALGA ENERJİSİ ÜRETİMİNİN PLANLANMASINDA RİSK ANALİZLERİ

5.1 Giriş

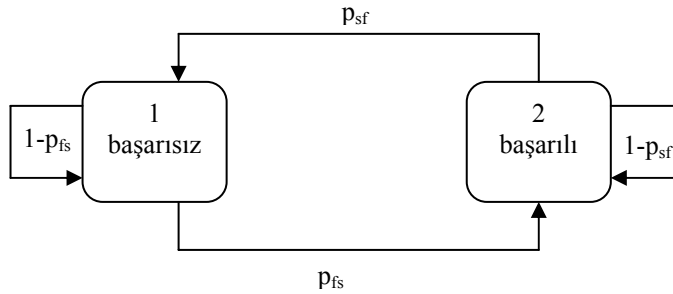
Dalga enerjisi üretimi o bölgedeki dalga iklimiyle yakından ilgilidir. Enerji üretimi açısından riskli durum, denizde meydana gelen dalgaların enerji üretimi için yetersiz kalmasıdır. Tüm bunların uzun dönemde incelenmesi için risk analizlerinin yapılması gerekmektedir. Burada üretilecek enerjinin belli bir eşik değerine göre tekerrür aralığı ve risk durumu belirlenecektir. Bu analizler serilerin iç bağımlı olduğu veya olmadığı durumlar için farklı değerler almaktadır. İç bağımlılık varken, olmadığı kabulü yapılırsa, gerçek değerlerden oldukça büyük sapmaların olacağı açıktır. İç bağımlılık özellikle mühendislik yapılarının planlanmasında en önemli parametreler arasındadır. Herhangi bir olayın tasarlanmasında analitik ifadelerin türetilmesine sebep olacağı için kullanılması oldukça zorluklar içermektedir. Bu yüzden analitik ifadeler çoğu zaman serisel bağımlılık göz önüne alınmaksızın çıkartılır. Buna rağmen klasik otokorelasyon katsayısı ve fonksiyonunun tasarım uygulamalarında kullanıldığı da bilinmektedir. Otokorelasyon katsayısının tanımı, sürecin normal dağılılı olması gibi bir kabul içermektedir. Bunun için dağılım fonksiyonlarının normale dönüştürülmesi istenir. Bu dönüşüm esnasında hidrolojik değişkenin iç bağımlılık özelliği korunamazken, ortalama, standart sapma, çarpıklık katsayısı gibi istatistiksel parametreler varlığını sürdürür. Otokorelasyon fonksiyonunun hesaplanmasında ortaya çıkan bu yetersizlik, tanımı geliştirilen belirli bir ihtimal dağılım fonksiyonu gerektirmeyen otoran katsayısı ile aşılabılır. Bunun içinde ilk defa Şen (1976) tarafından önerilen otoran analizi kullanılacaktır. Dalga parametrelerinin tekerrür aralığı ve risk analizleri bağımlı ve bağımsız durum için ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

İstatistikte bir gidiş (run) benzer olaylar dizisinin en az bir tane farklı olay ile baştan ve sondan sınırlandırılması olarak adlandırılır. Gidiş özelliklerinin ekonomi, sosyal bilimler ve mühendislikte uygulamaları vardır (Mandelbrot ve Wallis, 1969;

Saldarriaga ve Yevjevich, 1970; Şen, 1974; 1978; Salas ve diğ. 1985). Bu çalışmada, iç bağımlılığı ölçmenin etkili ve pratik bir yolu olan otoran katsayısı üzerinde durulacaktır.

5.2 İki Durumlu Markov Modeli

$X_1, X_2, \dots, X_n$ bir rastgele değişkenler dizisi ve X_0 önceden belirlenmiş bir eşik değeri olsun. Verilen dizinin X_0 seviyesinde kesilmesi birbirinden farklı iki değişken doğmasına sebep olur. Bunlardan birisi başarı olarak nitelendirilen $X_1 > X_0$ olma olayı diğeri ise başarısızlığı ifade eden $X_1 < X_0$ olayıdır. Birbirleri arasındaki geçişler ise iki durumlu Markov modeli ile ifade edilebilir (Şekil 5.1).

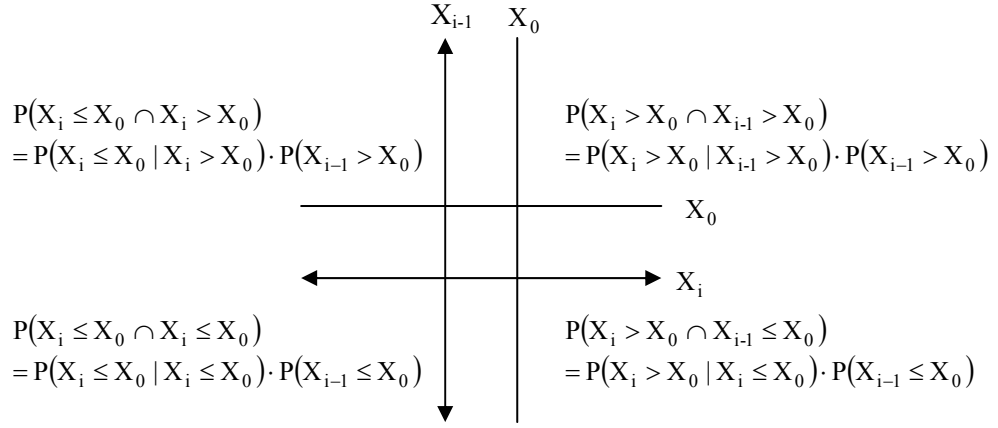


Şekil 5.1 İki durumlu Markov modelinin şekilsel olarak gösterimi

Markov zinciri geçiş matrisi

$$A = \begin{bmatrix} 1-p_{fs} & p_{fs} \\ p_{sf} & 1-p_{sf} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada, p_{fs} başarılı bir yılı başarısız bir yılın izleme olasılığı ve p_{sf} başarısız bir yılı başarılı bir yılın izleme olasılığıdır. Markov zinciri modeli ise P_t değişkenin şimdiki ve P_{t-1} bir önceki değeri olmak üzere $P_t = P_{t-1}A$ şeklinde tanımlanabilir (bkzn. Şekil 5.1). Belli bir eşik değeri X_0 ' a göre şartlı ihtimal bölgeleri Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Önceden belirlenen bir X_0 eşik değeri için şartlı ihtimal bölgeleri cinsinden 4 adet Markov geçiş bölgesi (Şen, 1976)

Şen (1976) tarafından ard arda gelen iki başarısızlık durumu için şartlı ihtimalleri cinsinden otoran katsayısı

$$r = 1 - p_{fs} = P(X_i > X_0 | X_{i-1} > X_0) = \frac{P(X_i > X_0 \cap X_{i-1} > X_0)}{p} \quad (5.2)$$

olarak tanımlanmıştır. Diğer 3 geçiş bölgesi için şartlı ihtimaller p , q ve r cinsinden

$$p_{fs} = P(X_i \leq X_0 | X_{i-1} > X_0) = 1 - r \quad (5.3)$$

$$p_{sf} = P(X_i \geq X_0 | X_{i-1} \leq X_0) = \frac{p}{q} \times (1 - r) \quad (5.4)$$

$$1 - p_{sf} = P(X_i \leq X_0 | X_{i-1} \leq X_0) = 1 - \frac{p}{q} \times (1 - r) \quad (5.5)$$

şeklinde verilirler. Burada p ve q sırasıyla aşılma ve aşılmama ihtimalleridir.

5.3 Otoran Katsayısı Hesabı

Teorik olarak otoran katsayısı Şen (1976) tarafından çift katlı integral kullanılarak aşağıdaki gibi verilmiştir. Burada akım değerlerinin log-normal dağıldığı kabulü vardır. X , log-normal olarak dönüştürülmüş akım verisinin yıllık maksimum veya minimum değerlerini temsil etmektedir.

$$P(X_t > X_0 \cap X_{t-1} > X_0) = \int_{X_0}^{\infty} \int_{X_0}^{\infty} \frac{1}{2\pi(1-\rho^2)^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}(x_i^2 - 2\rho x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)\right] dx_i dx_{i-1} \quad (5.6)$$

burada x_i ve x_{i-1} sıfır ortalama ve birim varyansa sahip normal dağılmış değişken; ρ ise log-normal dönüştürülmüş verinin bir aralıklı otokorelasyon katsayısını göstermektedir. Douglas ve diğ. (2002) bu denklemin çözümü için

$$r = \frac{ab^p p^c}{p} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} a &= 1 - 1.514\rho + 2.601\rho^2 - 1.0016\rho^3 - 1.620\rho^4 + 1.475\rho^5 \\ b &= 1 + 1.553\rho - 0.7789\rho^2 - 3.5810\rho^3 + 5.5638\rho^4 - 2.701\rho^5 \\ c &= 2 - 2.0855\rho + 2.3419\rho^2 - 2.2995\rho^3 + 1.6817\rho^4 - 0.6236\rho^5 \end{aligned} \quad (5.8)$$

çözümünü önermişlerdir. Fernandez ve Salas (1999) yaptıkları çalışmada otoran katsayısının hesabı için

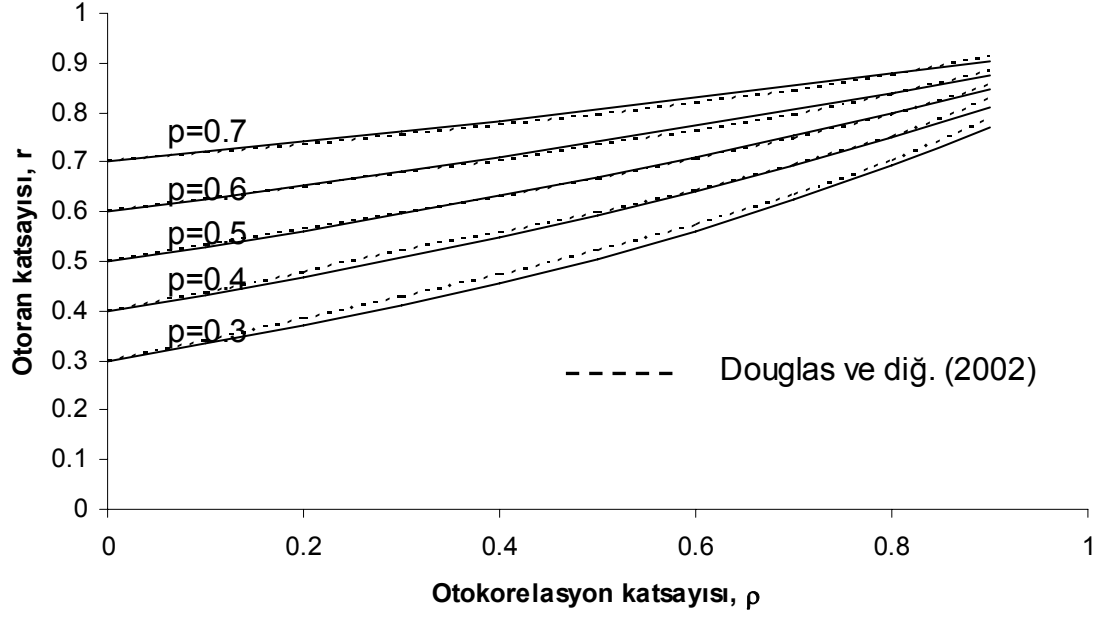
$$p_{ff} = p_f + \frac{1}{2\pi p_f} \int_0^p \frac{\exp\left[-Y_0^2/(1+z)\right]}{\sqrt{1-z^2}} dz \quad (5.9)$$

formülasyonunu önermiştir. Yukarıda anlatılanlardan görüldüğü gibi otoran katsayısının hesabı oldukça karmaşık işlemler gerektirmektedir. Bu hesabı kolaylaştırmak için, Şen (1976) tarafından çeşitli p ve ρ değerleri için elde edilen otoran katsayıları regresyon analizinde kullanılarak, aşağıdaki basit çözüm elde edilmiştir (Şen ve diğ., 2003).

$$r = pe^{\alpha p} \quad (5.10 a)$$

$$\alpha = -0.9 \ln p - 0.0383 \quad (5.10 b)$$

Douglas ve diğ. (2002) tarafından elde edilen ve yukarıda yeni formülasyonla bulunan otoran katsayısının karşılaştırılması Şekil 5.3 de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi değerler birbiri ile uyum içerisindedir. Dolayısıyla karmaşık işlemler yerine Denklem (5.10 a,b) nin kullanılması kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 5.3 Otoran katsayısının, farklı p ihtimalleri için otokorelasyon katsayısına göre değişimi

5.3.1 Verilerden otoran katsayısının tahmini

Otoran katsayısı analitik yollardan çıkarılabildiği gibi eldeki mevcut verilerden de tahmin edilebilir. Şen (1980) geçiş matrisinin elemanlarının hesaplanması için şu prosedürü sunmuştur:

1. X zaman serisi X_0 kritik değeri ile kesildikten sonra, her adım için başarı ve başarısızlık durumları belirlenir. Burada başarısız durum $X > X_0$, başarılı durum ise $X < X_0$ olarak göz önünde tutulmuştur.
2. Başarı, s , ve başarısızlık, f , durumlarını gösteren bir seri elde edilmiş olur. Örneğin „...ssfffsffsfffsfs...“, gibi. Ard arda gelen başarısızlıkların sayısı N_{ff} ile ve toplam başarısızlık sayısı N_f ile gösterilmiştir.
3. p_{ff} yani otoran katsayısı ise $p_{ff} = N_{ff}/N_f$ şeklinde hesaplanır.

$$\hat{p}_{fs} = \frac{N_{fs}}{N_{ff} + N_{fs}}; \quad \hat{p}_{sf} = \frac{N_{sf}}{N_{sf} + N_{ss}} \quad (5.11a, b)$$

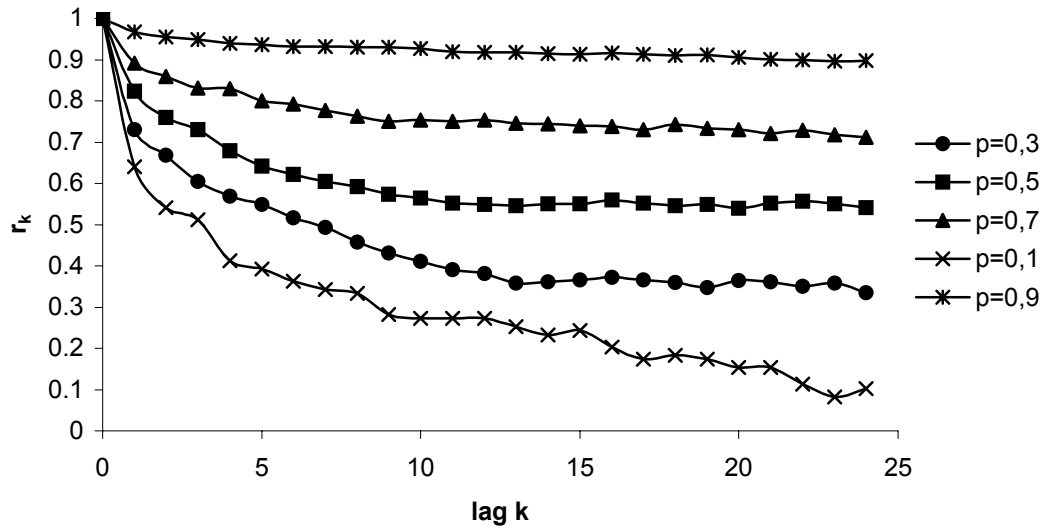
Burada N_{ij} , i durumundan j durumuna geçiş sayısını vermektedir. Başarısızlık olayları düşük bir ihtimalle meydana geleceği ve kayıtların yeterince uzun olmadığı durumlarda yukarıdaki prosedür tam güvenilir olmayabilir. Yukarıda anlatılan her iki yöntemde de otoran katsayısı hesaplanırken aşılma olasılığı kavramı denklem içinde

ifade edilmemiştir. Halbuki otoran katsayısı aynı zamanda aşılma olasılığı, p 'nin de bir fonksiyonudur. Bütün bunlar göz önünde bulundurularak yeni formülasyon,

$$\hat{r}_k = \frac{n_k}{p(n-k)} \quad (5.12)$$

şeklini alır. Burada k aralık, n_k ise ard arda gelen başarısızlıkların sayısıdır.

Şekil 5.4'ten de anlaşılacağı gibi bir otokorelasyon katsayısına her kesim seviyesi için bir otoran katsayısı karşı gelir. Ayrıca otoran katsayısı gidiş özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Aynı otokorelasyon katsayısı için söylenemez.



Şekil 5.4. Sentetik verilerden elde edilmiş bir serinin farklı aşılma ihtimallerine karşı gelen otoran fonksiyonları ($\rho=0.9$)

5.4 İç Bağımlı Serilerde Tekerrür Aralığı Hesabı

Bağımsız bir sürecin oluşma aralığı Feller (1967) tarafından

$$T=1/p \quad (5.13)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $E(.)$ beklenen değer operatörüdür. İç bağımlılık göz önüne alındığı durumda ise Fernandez ve Salas (1999),

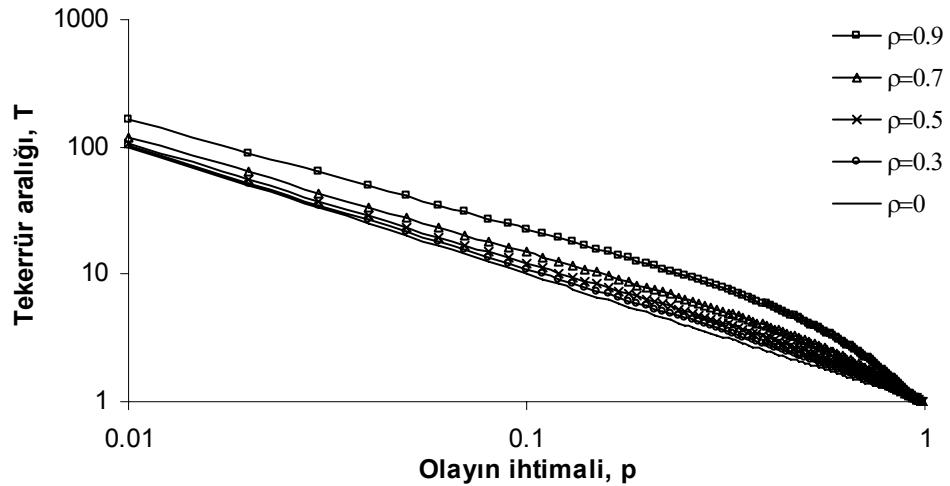
$$E(T) = 1 + \frac{q^2}{p(1-r)} \quad (5.14)$$

bağıntısını vermiştir. Burada p ve q incelenen olayın sırasıyla aşılma ve aşılmama ihtimallerini vermektedir. Aynı durum için Şen (1999b)' in önerdiği bağıntı ise,

$$E(T) = \frac{q^2}{\left[1 - \frac{p}{q}(1-r)\right]p(1-r)} \quad (5.15)$$

şeklinde olup $\rho=0$ ve $r=p$ olduğu zaman her iki denklem de $E(T)=1/p$ durumuna indirgenir. İki denklemin farkı başlangıç koşullarından kaynaklanmaktadır. İkinci denklem ilk yılı başarısız yıl olarak alırken, ikinci denklemde böyle bir şart söz konusu değildir.

Douglas ve diğ. (2002) ABD nehirlerinin yıllık düşük akımları üzerinde yaptığı incelemede, iç bağımlılığı göz önüne alarak yaptığı hesaplarda, klasik yöntemlere göre tekerrür aralığının beklenen değerinin %100 kadar büyük, riskin ise yaklaşık olarak %20 kadar küçük çıktığını tespit etmiştir. Şekil 5.5' te farklı otokorelasyon katsayılarına göre tekerrür aralığı grafiği verilmiştir. İç bağımlılığın yani otokorelasyon katsayısının artmasıyla beklenen tekerrür aralığının arttığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Çeşitli otokorelasyon katsayıları için tekerrür aralığının aşılma olasılığına göre değişimi

5.5 İç Bağımlı Serilerde Risk Hesabı

Genelde, yerel ölçekte, tatmin edici tekil çözümler veren deterministik yöntemler ile tahmin yapılmaktadır. İç bağımlılığın göz önüne alınmadığı olaylar için risk hesapları pratik olarak

$$R=1-(1-1/T)^L \quad (5.16)$$

şeklinde yapılır. Burada T tekerrür aralığını ve L yapının ömrünü göstermektedir. Yapının ömrü boyunca en az bir kere başarısızlıkla karşılaşılması risk olarak tanımlanabilir. Eğer iç bağımlılık göz önünde tutulursa risk formülasyonu,

$$R = 1 - P(x_i < x_0) \prod_{i=2}^n P(x_i \leq x_0/x_{i-1} \leq x_0) \quad (5.17)$$

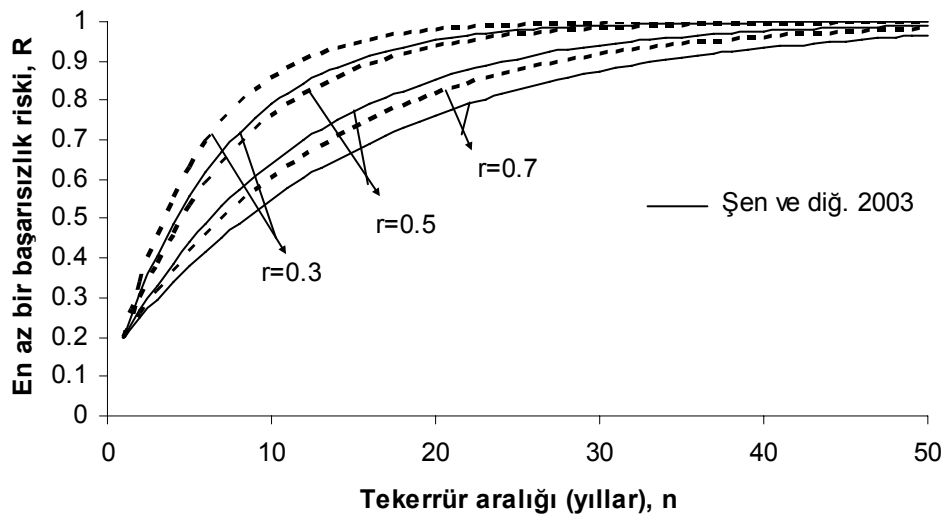
veya kısaca

$$R = 1 - q \left[1 - \frac{p}{q}(1-r) \right]^{n-1} \quad (5.18)$$

şeklinde olur. (5.18) bağıntısından açıkça görüleceği gibi, $p = 0$ ve $r = p$ olduğu zaman denklem $R = 1-(1-1/T)^L$ durumuna indirgenir. Bu son ifade

$$R = 1 - q \left[1 + \frac{p(n-1)}{r} \right] \quad (5.19)$$

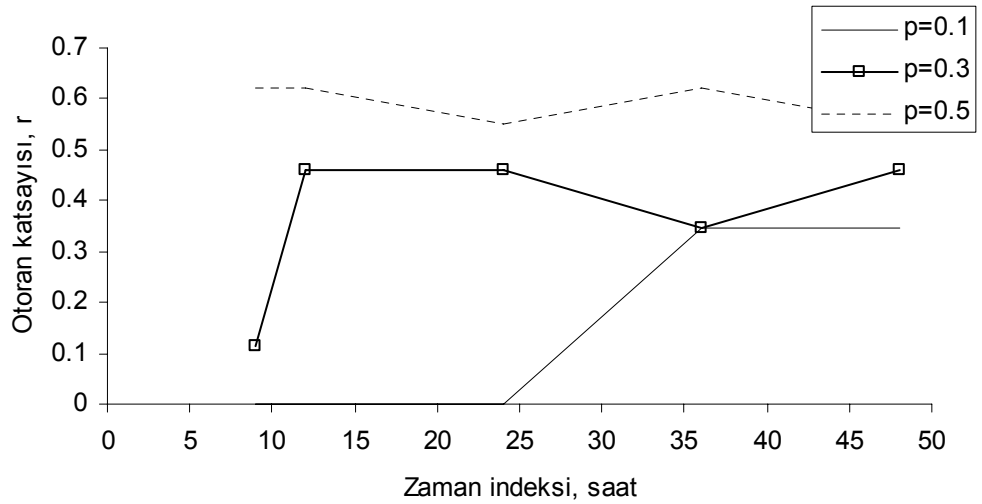
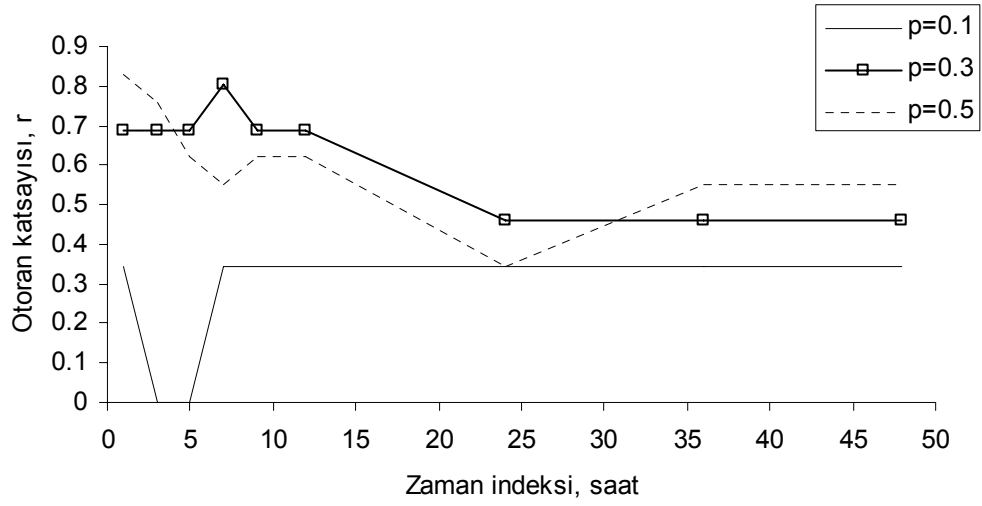
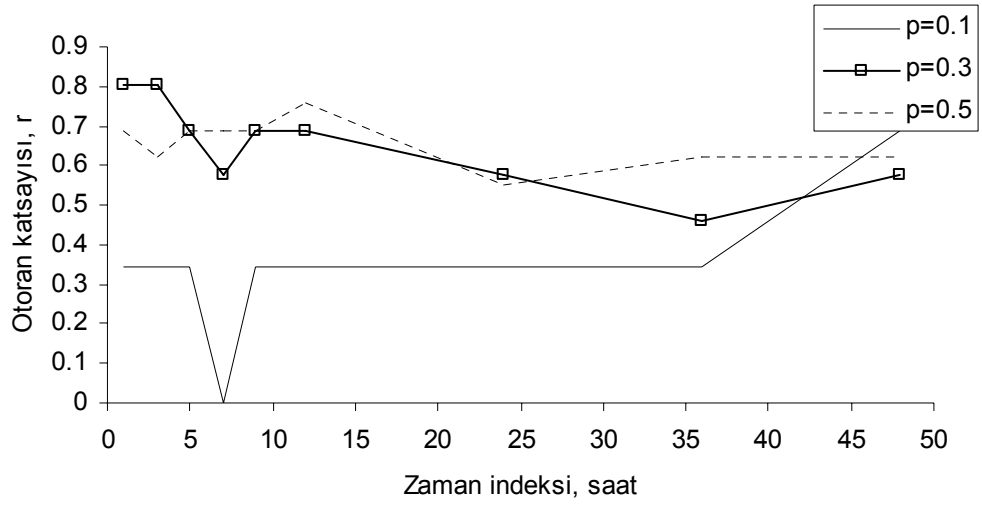
şeklinde daha da basitleştirilebilir (Şekil 5.6).



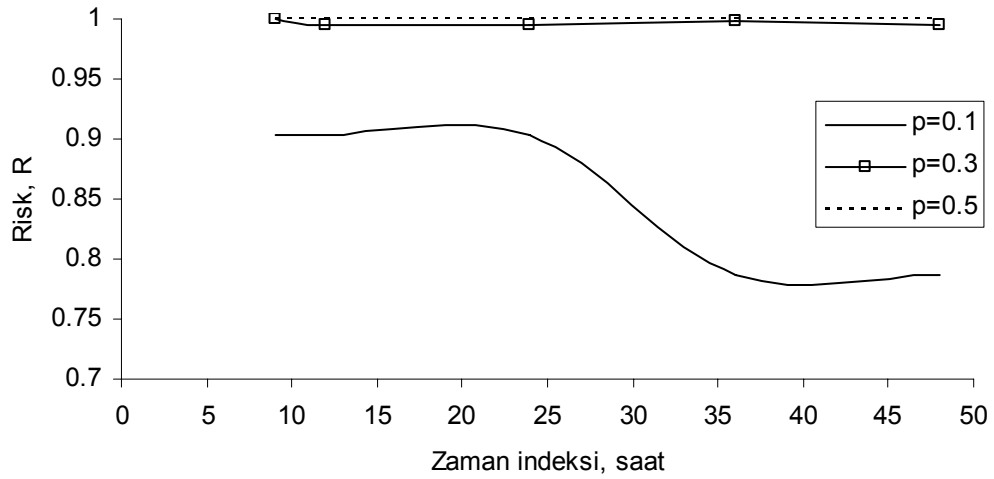
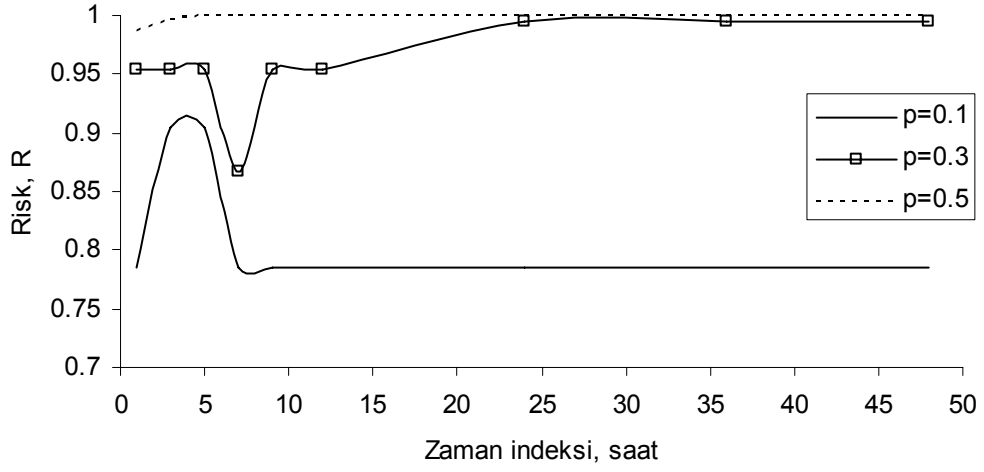
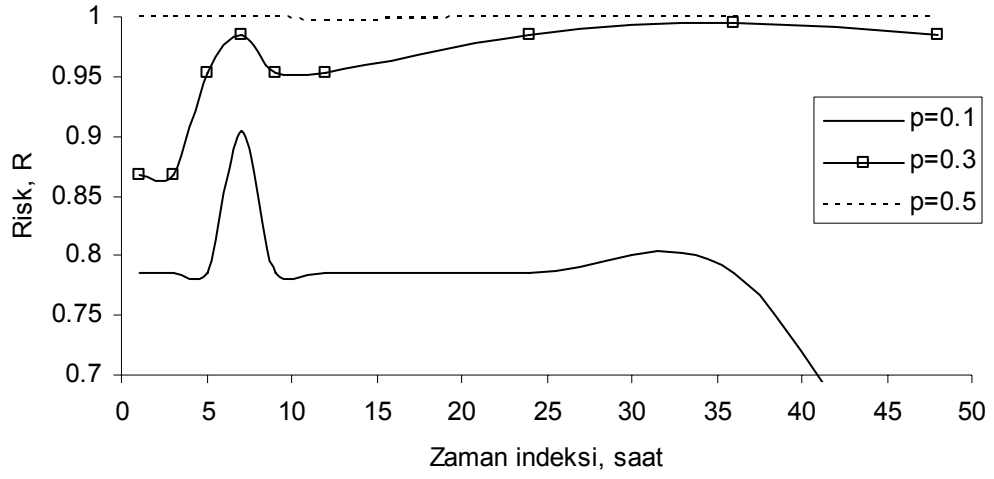
Şekil 5.6 Denklem (5.18) ve (5.19)' un karşılaştırılması

5.6 Dalga Verilerine Uygulaması

Denizlerdeki düşük dalga karakteristikleri dalga enerjisi platformlarının planlanmasında ve işletilmesinde önemlidir. Düşük dalgaları karakterize eden herhangi bir indeks şu ana kadar öne sürülmemiştir. Mesela hidrolojide düşük akımın tanımı bir akarsuda, uzun süre devam eden yağışsız dönem süresince bulunan akım olarak verilmektedir. Düşük akımların kullanıldığı tasarım çalışmalarında dizayn akım değeri olarak genelde en düşük 7 günlük ortalama akımların değerleri kullanılmaktadır. Buna benzer olarak bir sene boyunca meydana gelen minimum dalgalarından hangi zaman aralığında olanlarının alınacağı tasarım çalışmalarında önem arz etmektedir. Seçilen zaman aralığının minimum dalgaları temsil edebilir bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu seçimi yapabilmek için saatlik olarak ölçülen dalgaların analizi yapılmıştır. Önce bir sene boyunca ölçülen minimum dalga yüksekliği, daha sonrada sırasıyla birbirini takip eden 3, 5, 7, 9, 12, 24, 36 ve 48 saatlik minimum serilerin ortalama değerleri göz önüne alınmıştır. Sonra $p_f = 0.1, 0.3$ ve 0.5 kesim seviyeleri baz alınarak Denklem (5.11a, b) ve (5.18)'e göre sırasıyla otoran katsayısı ve risk değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar seçilen 3 istasyon ile yapılmıştır. İlk olarak farklı zaman aralıklarında otoran katsayısının değişimi (Şekil 5.7) daha sonrada meydana gelecek riskin değişimi Şekil 5.8 gözlemlenmiştir. Bu şekillerden 12-saatlik minimum değerlerin ortalamasından sonra değerlerin fazla bir saçılma göstermediği gözlemlenmiş ve bundan sonraki hesaplamalarda 12-saatlik ortalamaların kullanılmasına karar verilmiştir.

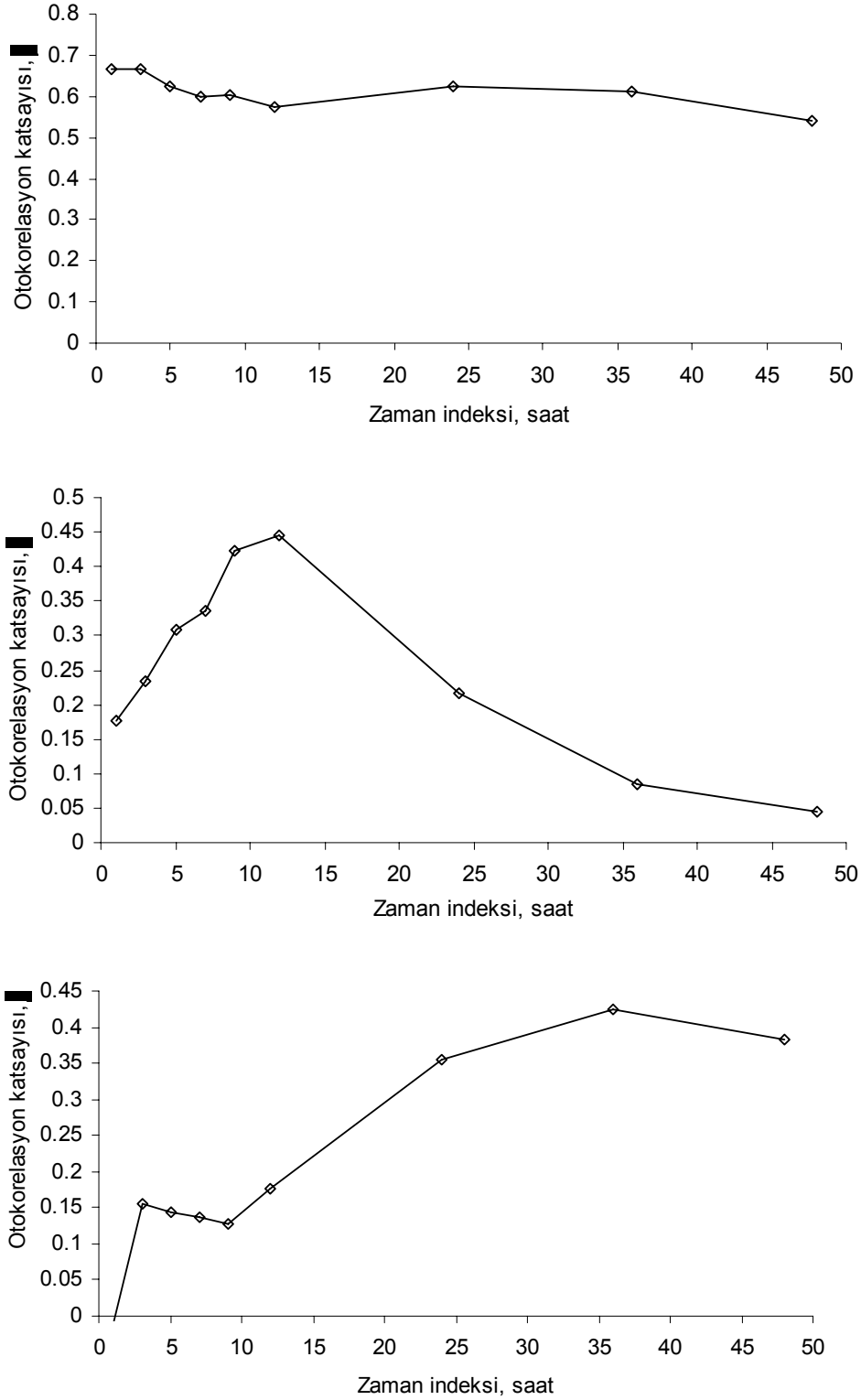


Şekil 5.7 Otoran katsayısının çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.

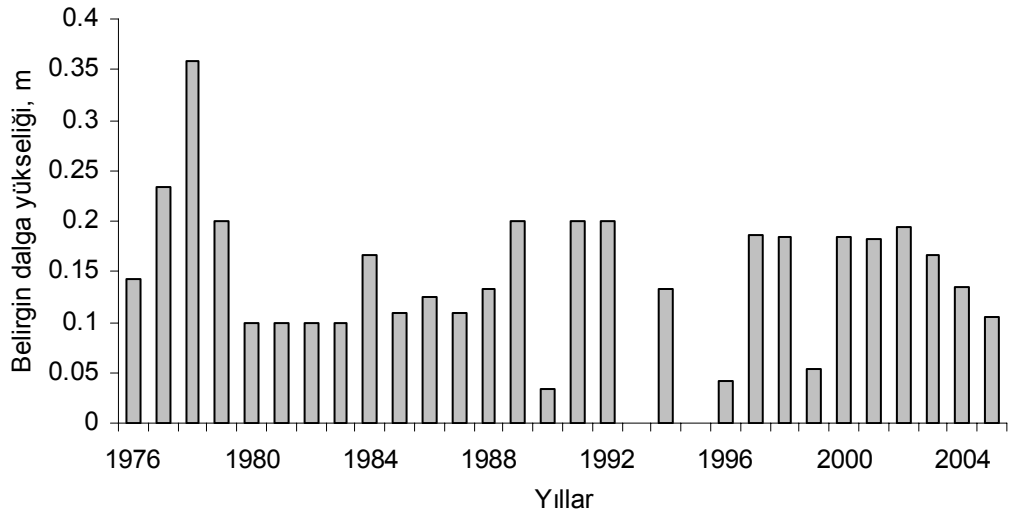
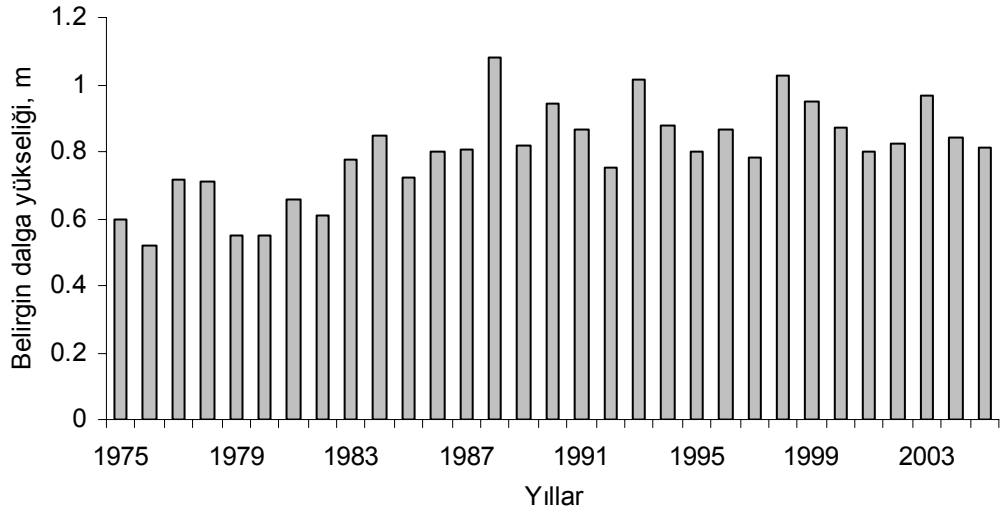
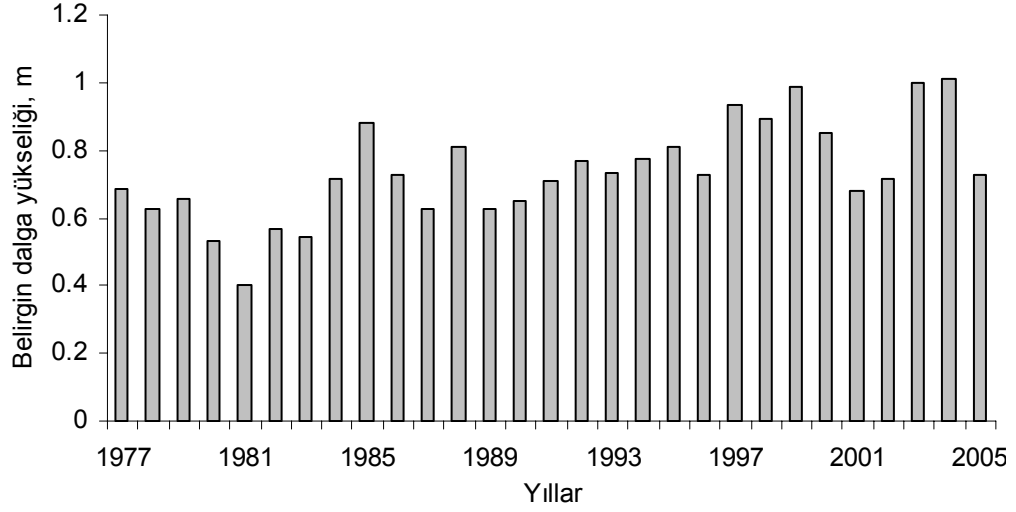


Şekil 5.8 Riskin çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.

Ayrıca otokorelasyon katsayısının zamana göre değişimi de Şekil 5.9'da verilmiştir. Her üç istasyona ait yıllık minimum 12-saatlik ortalama zaman serileri Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Otokorelasyon katsayısının çeşitli zaman aralıklarına göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için değişimi.



Şekil 5.10 Yıllık minimum 12-saatlik ortalamalara göre, (a) 46006, (b) 46002 ve (c) 42001 istasyonları için zaman serileri.

Pasifik Okyanusu'ndaki iki ve Meksika körfezinde bulunan bir istasyonda ölçülen yıllık dalga kayıtları bu çalışmada kullanılmıştır. Ortalama, standart sapma ve çarpıklık katsayısı gibi bazı temel istatistiksel parametreler Tablo 5.1'de sunulmuştur. Farklı kesim seviyeleri için gözlemlenen kritik enerji üretimsizlik süreleri de Tablo 5.2'de verilmiştir. 46002 no lu istasyona ait ortalamaya eşit talep seviyesi H_0 için dalga yükseklik serisi Şekil 5.11'de örnek olarak gösterilmiştir. Tablo 5.2'de çeşitli kesim seviyeleri (H_0) için aşılmama ihtimallerine $P(H \leq H_0) = p_f$ karşı gelen enerji üretememe süreleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Pasifik'te bulunan üç farklı dalga ölçüm istasyonuna ait istatistiksel özellikler

İstasyonlar	Yıllar	Uzunluk	Ortalama	Standart sapma	Çarpıklık katsayısı
46002	1975-2005	31	2.73	1.458	1.237
46006	1977-2005	29	2.68	1.419	1.290
42001	1975-2005	31	1.08	0.700	1.825

Tablo 5.2'de kesim (talep) seviyeleri, buna karşı gelen en uzun enerji üretememe süreleri $E_0 = c$ ve bu sürenin sona erdiği sene sunulmuştur. Kayıtlarda aynı uzunluğa sahip birden çok enerji üretememe süresi ile karşılaşıldığında, en çok eksikliğin gözlemlendiği seri kritik süre olarak alınır. Yıllık 12-saatlik minimum dalga yüksekliklerinin iç (serisel) bağımlılığı olmadığı kabul edilirse tekerrür aralığı Fernandez ve Salas (1999, Denklem 5.8) tarafından verilen bağıntı ile tahmin edilebilir.

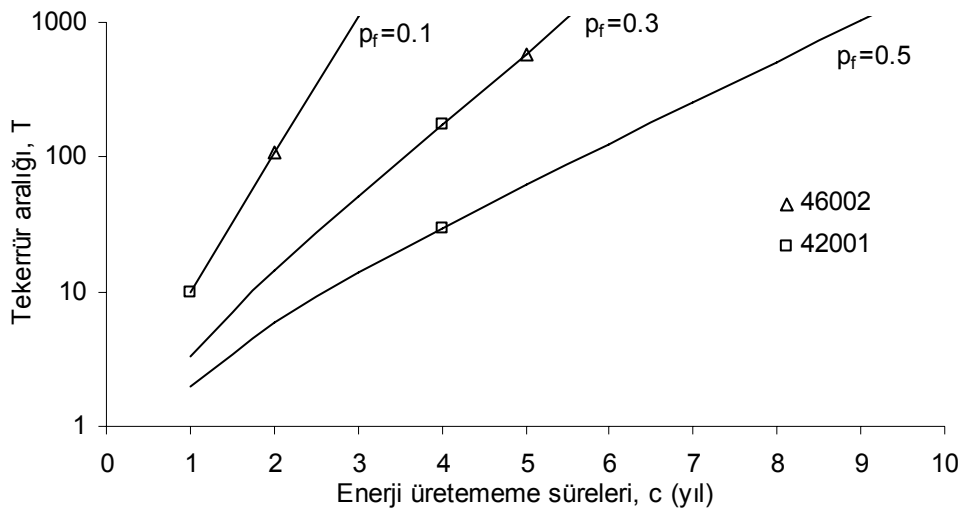
$$T = \frac{1 - p_f^c}{(1 - p_f)p_f^c} \quad (5.20)$$

Tahmin edilen tekerrür aralıkları Tablo 5.2'de verilmiştir. Sonuçları karşılaştırdığımızda p_f ve c değerlerinin değişmemesi durumunda, zaman serilerinden bağımsız olarak tekerrür aralıkları da birbirinin aynı olacaktır. Bu sonuç Denklem (5.20)'den açıkça görülmektedir. Eşit kritik süreye sahip enerji üretememe durumunda aşılmama olasılığı p_f arttıkça, tekerrür aralığı azalacaktır. Benzer şekilde aynı p_f değerleri için kritik süre değeri arttığı zaman tekerrür aralığı da artacaktır. Bu durum, T değerlerinin p_f ve c nin fonksiyonu olarak 46002, 46006 ve 42001

istasyonlarına ait gözlemlenen kritik süreler ile birlikte çizildiği Şekil 5.11’de grafiksel olarak görülebilir.

Tablo 5.2 Kullanılan istasyonların kritik enerji üretimsizlik süreleri ve tahmin edilen tekerrür aralıkları

İstasyon no ve özellikleri	Kesim (Talep) seviyesi $p_f = P(H \leq H_0)$		
	$p_f=0.1$	$p_f=0.3$	$p_f=0.5$
46002			
Kesim seviyesi H_0 (m)	0.6	0.775	0.81
Üretimsizlik süresi (sene)	2	5	9
Üretimsizliğin bittiği (sene)	1980	1982	1983
Tekerrür aralığı (sene)	110	586	1022
46006			
Kesim seviyesi H_0 (m)	0.566	0.6	0.726
Üretimsizlik süresi (sene)	2	5	8
Üretimsizliğin bittiği (sene)	1981	1983	1984
Tekerrür aralığı (sene)	110	586	510
42001			
Kesim seviyesi H_0 (m)	0.04	0.102	0.135
Üretimsizlik süresi (sene)	1	4	4
Üretimsizliğin bittiği (sene)	1989	1983	1988
Tekerrür aralığı (sene)	10	174	30



Şekil 5.11 46002 ve 42001 no' lu istasyonlarda gözlemlenen kritik enerji üretememe süreleri

Tablo 5.3. Tekerrür aralığı ve risk değerlerinin bağımlı ve bağımsız durum için karşılaştırılması.

$p_f=(H \leq H_0)$	46002 $\rho =0.444$				46006 $\rho =0.574$				42001 $\rho =0.176$			
	Bağımsız		Bağımlı		Bağımsız		Bağımlı		Bağımsız		Bağımlı	
	T (yıl)	R	T (yıl)	R	T (yıl)	R	T (yıl)	R	T (yıl)	R	T (yıl)	R
0.1	10	0.88	13	0.78	10	0.88	13	0.78	10	0.88	10	0.87
0.3	3	0.99	6	0.95	3	0.99	6	0.95	3	0.99	3	0.99
0.5	2	1	3	0.99	2	1.0	3	0.99	2	1.0	2	1.0

İç korelasyonun risk üzerindeki etkilerini de şekilden açıkça görmek mümkündür. Mesela, 20 yıllık ekonomik ömür planlanan bir dalga enerjisi üreten yapının, $p_f=0.1$ seviyesinin altında kalan dalgalar için enerji üretememe durumunu göz önüne alındığında ve serisel bağımsızlık düşünüldüğünde bu olayın tekerrür aralığı $T=1/p_f$ 'den 10 sene ve enerji üretememe riski $R=1-(1-p_f)^{20}$ den 0.88 olarak bulunmuştur. İç bağımlılık hesaba katıldığı zaman tekerrür aralığı Denklem (5.15)'den 13 sene ve risk ise Denklem (5.18)' den $R=0.78$ olarak bulunur. Yani bağımlı durumdaki tekerrür aralığı %23 daha fazla iken risk %11 daha az çıkmaktadır. 42001 no lu istasyonda otokorelasyon katsayısı düşük olduğu için Tablo 5.3'den görüldüğü gibi bağımsız ve bağımlı durum değerleri birbirine yakın çıkmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Teknolojisinin yeni olması ve rüzgar enerjisi gibi belli bir seviyeye gelmiş teknolojilerle rekabet edememesi gibi olumsuzluklara rağmen, dalga enerji türüne karşı hızla artan bir ilgi vardır. Bu bölümde yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan dalga enerjisinin, dalga karakteristiklerine göre değişimi incelenmiştir. Pasifik okyanusunda üzerinde çalışılan bölgeye ait eş ortalama dalga gücü haritası hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem, herhangi bir bölgede yapılacak olan dalga enerjisi kaynak araştırmasına rahatlıkla uygulanabilir. Daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için bu konu ile ilgili olarak yapılacak çalışmalarda bu yöntemin kullanılması önerilmektedir.

Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon yapısını ifade etmek ve tahmin belirsizliklerini modellemek için jeoistatistiksel yaklaşım kullanılmıştır. Bu yöntem değişkenlerin gözlem değerleri arasındaki benzerlik (komşuluk) kavramından yola çıkar. En büyük özelliği durağan olmayan verilere de uygulanabilmesidir. Girdi ve çıktı değişkenleri arasında doğrusal olmayan bir bağ kurabilir. Bu çalışmada belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu gibi dalga parametrelerini feç sınırlı ve süre sınırlı durumlarda tahmin edebilmek için bir yöntem uygulanmıştır. İlk olarak iki boyutlu uzayda değişkenlerin birbirlerine göre saçılmaları verilmiştir. Bu saçılmalar şablonlar olarak göz önüne alınırsa, girdi değişkenlerinin birbirinden bağımsız olduğu görülmektedir. Şablonlar aynı zamanda üçüncü değişken olarak göz önüne alınan çıktı için bir altlık görevi görmektedir. Çıktı değişkeni olarak göz önüne alınan üçüncü değişkenin bu saçılma alanında değişimi incelenmiştir. Bunun için önce değişkenlerin birbirine göre değişimlerine dayanan ve saçılma ortamının özelliklerini karakterize eden yarıvaryogramlar (YV) elde edilmiştir. Feç sınırlı durum için mesafe ve YV değerlerine göre saçılma diyagramı çizildiğinde buna uydurulacak en uygun modelin küresel YV modeli olduğu görülmüştür. Varyogram belirli bir değerden sonra artık mesafe ile değişmediğinden bir sırt değerinin varlığı aşıkardır. Bunun anlamı varyans değerinin sabitlenmesidir. Eşik (nugget) değerinin de sıfır olarak okunması, çok küçük

mesafelerde ani değişimlerin olmadığını gösterir. Mesafe arttıkça YV değerlerinin de hızlı bir şekilde artması birbirine çok yakın veri noktalarının ürettiği değerlerin çok farklılıklar içerdigi anlamına gelir. Aynı şekilde süre sınırlı durum için mesafe ile YV değerleri Gaussian modele uygunluk göstermektedir. Buna en iyi uyan model fonksiyonu bulunmuştur. YV değerinin belli bir değerden sonra sabitlendiği görölmektedir. Yani belirli bir sırt değeri ve buna karşı gelen etki alanı vardır. Bu incelenen olayın durağan olduğunu ve varyansının sabitlendiğini diğer yandan ise kovaryansının anlamlı olduğunu gösterir. Burada eşik etkisinin sıfıra çok yakın çıkması veriler arasında düzenliliğin ve sürekliliğin olduğunu gösterir. Mesafe arttıkça YV değerlerinde yavaş bir artışın olması birbirine yakın noktaların bezerliğini ifade eder.

Daha sonra değeri aranan nokta için Kriging ilkelerinden faydalanılarak en iyi (optimum) enterpolasyon yapılmıştır. Tahmin yapabilmek için eş dalga yüksekliği ve dalga periyodu haritaları hazırlanmıştır. Feç sınırlı durum için yatay ve düşey eksenleri sırasıyla feç uzunluğu ve rüzgar hızı iken bunlara dik eksenlerdeki değişken olarak dalga parametreleri alınmıştır. Aynı şekilde süre sınırlı durum için yatay eksen rüzgar esme süresini düşey eksen ise rüzgar hızını gösterirken bunlara dik eksenlerde ise yine dalga parametreleri bulunmaktadır. Feç sınırlı durum için küresel YV'lar kullanılarak geliştirilen haritalar gözlem değerlerine yakın sonuçlar vermiştir. Süre sınırlı durum içinde JONSWAP modeline göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca her iki durum için elde edilen YV'lar sayesinde veri yapıları hakkında bazı önemli çıkarımlar yapılmıştır. Üçlü diyagram yönteminin her iki durum içinde JONSWAP modeline göre daha iyi sonuçlar vermesine ek olarak çizilen haritalar yardımıyla bazı anlamlı mantıksal çıkarımlar da yapmak mümkün olabilmektedir. Yöntemin uygulanması aşamasında Ontario gölünde yapılan ölçümler kullanılmıştır.

Ayrıca üçlü diyagram yönteminde bulunan sonuçları daha da geliştirmek için yinelenmeli (adaptif) üçlü diyagram yöntemi sunulmuştur. Bu yöntem ile, elde edilen sonuçların daha da iyileştirildiği görölmüştür. İlk aşama sonucunda elde edilen hatalara göre tekrar bir harita hazırlanarak hatalar tahmin edilmiş ve üçlü diyagram yöntemine göre bulunan tahminleri üzerine eklenmiştir. Bu işlem en iyi model doğruluğu elde edilene kadar sürdürülebilmesine rağmen burada bir kez tekrarlandıktan sonra istenen sonuçlar elde edilmiştir. Süre sınırlı durum için tahmin

sonuçlarında meydana gelen değişmeler tam model çizgisi etrafındaki saçılmalar ve hata histogramları sayesinde açıkça gösterilmiştir. Daha sonra tahmin edilen dalga parametreleri kullanılarak dalga gücü haritaları hazırlanmış ve böylelikle rüzgar parametrelerinden dalga gücü tahmin edilebilmiştir. Rüzgar hızının feç uzunluğu ve esme sürelerine bakılarak dalga gücünde daha etkili olduğu görülmüştür. Feç uzunluğu ve esme süresinin çok düşük olduğu durumlarda etkisi hemen hemen hiç kalmamaktadır.

Ortalama tekerrür aralığı T , olayın ilk defa ortaya çıkma süresinin beklenen değeri olarak ifade edilmiştir. Burada olay bir eşik değerin aşılması veya aşılması olarak tanımlanabilir. Bu olayın riski ise ekonomik ömrü boyunca en az bir defa meydana gelme ihtimali olarak belirtilmiştir. Klasik yöntemde T ve R bulunurken serisel korelasyon yani iç bağımlılık ihmal edilmektedir. Burada iç bağımlılık, normal dağılım, doğrusallık ve eş varyanslılık gibi herhangi bir kabul içermeyen otoran katsayısını ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Otoran katsayısı çeşitli kesim seviyeleri için tanımlanmıştır. Ayrıca serisel korelasyon göz önünde tutularak tekerrür aralığı ve risk tahminleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar bağımlılığın göz önüne alınmadığı klasik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak iç bağımlılık göz önünde tutulduğunda tekerrür aralığının arttığı ve riskin de azaldığı görülmüştür. Herhangi bir dalga enerjisi üreten platformun inşa edilmeden önce mutlaka bu analizlerin yapılması gereklidir. Bunun için bu yöntem ile hem daha gerçekçi hem de daha ekonomik çözümler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, J.D., Deo, M.C., 2002. On-line wave prediction. *Marine Structures*, **15**, 57–74.
- Angström, A., 1924. Solar terrestrial radiation, *Q.J.R. Meteorological Soc.*, **50**, 121-126.
- Araghinejad, S., Burn, D.H., ve Karamouz, M., 2006. Long-lead probabilistic of streamflow using ocean atmospheric and hydrological predictors, *Water Resour. Res.*, **42**, W03431, doi:10.1029/2004WR003853.
- Arthur, R.S., 1947. A statistical study of wave conditions at five open localities along the California Coast, **Wave Rep. No. 68**, Scripps Inst. of Oceanography, La Jolla, CA.
- ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division, 1990a. Review of geostatistics in geohydrology: I. Basic concepts. *J. Hydraul. Engrg.*, **116**(5), 612–632.
- ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division, 1990b. Review of geostatistics in geohydrology: II. Applications. *J. Hydraul. Engrg.*, **116**(5), 633–658.
- Beccali, M., Cellura, M., Lo Brano, V. ve Marvuglia, A., 2004. Forecasting daily urban electric load profiles using artificial neural networks, *Energy Conver. & Mngmt.*, **45**(18-19), 2879-2900.
- Beyene A., Wilson H. J., 2006. Parameter Variation and Part-load Efficiencies of Wave Energy Conversion, , *J. of Energy Eng.*, **132** (1),15-26.
- Bishop, C.T., Donelan, M.A., ve Kahma, K.K., 1992. Shore protection manual's wave prediction reviewed, *Coastal Eng.*, **17**, 25–48.
- Bishop, C.T. 1983. Comparison of manual wave prediction models, *J. Wtrway Port Coast and. Ocean Engrg.*, **109**(1), 1-17.
- Blackman. R. B. ve Tukey, J. W., 1959. The Measurement of Power Spectra, New York. Dover Publications.
- Bretschneider, C.L., 1970. Wave forecasting relations for wave generation, *Look Lab, Hawaii*, **1**, 31-34.
- Bretschneider, C.L., 1973. Prediction of waves and currents, *Look Lab./ Hawaii*, **3**, 1-17.
- Bretschneider, C.I. ve Ertekin, R.C., 1990. Estimation of wave power as an energy resource for Hawaii, *Proc. ICOER' 89*, H.J. Krock ed., November 28-30, Honolulu, Hawaii, 189-201.
- Carter, D.J.C., 1982. Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results, *Ocean Engrg.*, **9**(1), 17-33.
- Clark, I., 1979. Practical Geostatistics Applied Science Publishers, London, U.K.
- Clarke, A., 1991. Wind energy progress and potential, *Energy Policy*, **19** (8), 742-755.

- Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, P., Sjöström, B.O., Sørensen, H.C., ve Thorpe, T., 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives, *Renew. and Sust. Ener. Rev.*, **6**, 405-431.
- Cooley, J.M. and Tukey, J.W., 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier transforms, *Math. Comput.*, **12**, 297-301.
- Cressie, N., 1985. Fitting variogram models by weighted least squares, *Mathematical Geology*, **17**, 653-702.
- Cressie, N., 1993, Statistics for Spatial Data, John Wiley and Sons, New York.
- Darbyshire, J., 1963. Forecasting wind generated sea waves, *Engineering*, **195**, 482-484.
- Deo, M.C., ve Kiran Kumar, N., 2000. Interpolation of wave heights, *Ocean Engrg.*, **27** (9), 907-919.
- Deo, M.C., ve Jagdale, S.S., 2003. Prediction of breaking waves with neural networks. *Ocean Engrg.*, **30**(9), 1163-1178.
- Deo, M.C., Jha, A., Chaphekar, A.S., ve Ravikant, K., 2001. Neural networks for wave forecasting. *Ocean Engrg.*, **28**(7), 889-898.
- Donelan, M.A., 1980. Smiliarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions, *Proceedings of Canadian Coastal Conference*, National Reasearch Council of Canada, 47-61.
- Donelan, M.A., Hamilton, J., Hui, W.H., 1985. Directional spectra of wind-generated waves, *Philos. Trans. R. Soc. Lond*, **A315**, 509-562.
- Douglas, E. M., Vogel, R. M. ve Kroll, C. N., 2002. Impact of streamflow persistence on hydrologic design, *J. Hydrol. Engrg.*, **7**(3), 220-227.
- Ertekin, R. C. ve Xu, Y., 1994. Preliminary assessment of the wave-energy resource using observed wave and wind data, *Energy*, **19**(7), 729-738.
- EİE, <http://www.eie.gov.tr/turkce/HESproje/turkeyhidro.doc>
- Faiman, D., Raviv, D. ve Rosenstreich, R., 2007. Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies, *Energy Policy*, **35**(1), 567-576.
- Falcao, A. F. ve Falcao, O.D., 2000. The shoreline OWC wave power plant at the Azores, *Proceedings Fourth European Wave Power Conference*, Aalborg, Denmark, paper B1.
- Feller, W., 1967. An Introduction to Probability Theory and Its Application. Vol.1, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Fernandez, B. ve Salas, J.D., 1999. Return period and risk of hydrologic events, I: Mathematical model, *J. of Hydrol. Engrg.*, **4**(4), 297-307.
- Gill, A., 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, New York.
- Gleick, P.H., 1986. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes, *J.of Hydrology*, **88** (1-2), 97-116
- Goda, Y., 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientfic Publishing.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973.

- Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deut. Hydrogr. Z.*, **A8(12)**.
- Heath, T., Whittaker, T. J. T. ve Boake, C. B.**, 2000. The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland), *Proceedings Fourth European Wave Power Conference*, Aalborg, Denmark, paper B2.
- Herbert, G.M.J., Iniyar, S., Sreevalsan, E. ve Rajapandian, S.**, 2007. A review of wind energy technologies, *Renew. and Sust. Ener. Rev.*, **11(6)**, 1117-1145.
- Isaaks, E.H. ve Srivastava, R.M.**, 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, Oxford.
- Journel, A., ve Huijbregts, A.**, 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, London, UK.
- Kazeminezhad, M.H., Etemad-Shahidi, A., ve Mousavi, S.J.**, 2005. Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters, *Ocean Engrg*, **32** (14-15), 1709-1725.
- 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, Cambridge University Press.
- Kriege, D.**, 1951. A statistical problem to some basic mining valuation problems on the Witwatersand, *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of the South Africa*, **7**, 119-139.
- Küçük, M.**, 2004. Dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak akım serilerinin modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Liu, P.C.**, 2000. Is the wind frequency spectrum outdated, *Ocean Engrg.*, **27**, 577-588.
- Makarynsky, O.**, 2004. Improving wave predictions with artificial neural networks, *Ocean Engrg*, **31** (5-6), 709-724.
- Makarynsky, O., Pires-Silva, A.A., Makarynska, D., ve Ventura-Soares, C.**, 2005. Artificial neural networks in wave predictions at the west coast of Portugal, *Computers Geosciences*, **31**, 415-424.
- Mandal, S., Rao, S., ve Raju, D.H.**, 2005. Ocean wave parameters estimation using backpropagation neural networks, *Marine Structures*, **18(3)**, 301-318.
- Mandelbrot, B.B. ve Wallis, J.R.**, 1969. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of non-cyclic long-term statistical dependence. *Water Resour. Res.*, **5(5)**, 967-988.
- Matheron, G.**, 1963. Principles of geostatistics, *Econ. Geol.*, **58**, 1246-1266.
- McCormick, M.**, 1981. Ocean wave energy conversion, Wiley, Annapolis, Maryland.
- McCormick, M.**, 1998. On the use of wind-wave spectral formulas to estimate wave energy resources, *J. of Energy Resour. Tech.*, **120**, 314-317.
- Myers, D.E., Begovich, C.L., Butz, T.R. ve Kane, V.E.**, 1982. Variogram models for regional groundwater chemical data, *Math. Geol.*, **14**, 629-644.
- Naithani, R. ve Deo, M.C.**, 2005, Estimation of wave spectral shapes using ANN, *Advances in Engineering Software*, **36** (11-12), 750-756.
- Nash, J.E. ve Sutcliffe, J.E.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1-A discussion of principles, *J. of Hydrology*, **10** (3), 282-290.
- Özger, M. ve Şen, Z.**, 2007. Prediction of wave parameters by using fuzzy logic approach, *Ocean Engrg.*, **34** (3-4), 460-469.

- Pierson, W. J. ve Moskowitz, L.,** 1964. A proposed spectral form for fully-developed wind sea based on the similarity law of S. A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, **69**, 5181-5202.
- Pontes M.T., Athanassoulis G.A., Barstow S., Bertotti L., Cavaleri L., ve Holmes B.,** 1998. The European wave energy resource, *3rd EWEC*, Patras, Greece.
- Pontes, M.T.,** 1998. Assessing the European wave energy resource, *J. of Offshore Mech. and Arctic Engrg.*, **120**(4), 226-231.
- Ross, D.,** 1995. Power from the waves. Oxford University Press.
- Salas, J.D., J.W., Delleur, V. Yevjevich ve Lane. W.L.,** 1985. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications, 484 sf.
- Saldarriaga, J. ve Yevjevich, V.,** 1970. Application of run-lengths to hydrologic series. Hydrology Paper 40, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Salter, S.H.,** 1989. World progress in wave energy—1988, *The Int. J. of Ambient Energy*, **10**(1), 3-24.
- Sırdaş, S. ve Şen, Z.,** 2003. Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey, *Hydrological Sci. J.*, **48** (5), 809-820.
- Sorensen, B.,** 2000. Renewable Energy, second ed. Academic Press, New York.
- Subyani, A. M.,** 1997. Geostatistical analysis of precipitation in southwest Saudi Arabia. *PhD Thesis*, Colorado State University.
- Subyani, A. M. ve Şen, Z.,** 1989. Geostatistical modeling of the Wasia aquifer in central Saudi Arabia, *J. of Hydrology*, **110**, 295-314.
- Steele, K.E., Teng, C-C., ve Wang, D. W-C.,** 1992. Wave direction measurements using pitch and roll buoys, *Ocean Engrg.*, **19**(4), 349-375.
- Şahin, A.D. ve Şen, Z.,** 1998. Statistical analysis of Angström Formula coefficients and applications for Turkey, *Solar Energy*, **62**, 29-38.
- Şen, Z.,** 1974. Small sample properties of stationary stochastic models and the Hurst phenomenon in hydrology. *Unpublished Ph. D. Thesis*, Imperial College of Science and Technology, University of London.
- Şen, Z.,** 1976. Wet and dry periods of annual flow series. *J. Hydraul. Div., ASCE*, **102**(10), 1503-1514.
- Şen, Z.,** 1978. Autorun analysis of hydrologic time series, *J. Hydrol.*, **36**, 75-85.
- Şen, Z.,** 1980. Critical drought analysis of periodic-stochastic processes, *J. of Hydrology*, **46** (3-4), 251-263
- Şen, Z.,** 1999a. Terrain topography classification for wind energy generation, *Renewable Energy*, **16**(1-4), 904-907.
- Şen, Z.,** 1999b. Simple small risk calculations in dependent hydrological series, *Hdrol. Sci. J.*, **44**(6), 871-878.
- Şen, Z.,** 2001. Angström equation parameter estimation by unrestricted method, *Solar Energy*, **71**, 95-107.
- Şen, Z.,** 2003. Temiz Enerji ve Kaynakları, Su Vakfı yayınları, İstanbul.
- Şen, Z.,** 2004. Solar energy in progress and future research trends, *Progress in Energy and Combustion Science*, **30**, 367-416.
- Şen, Z., Altunkaynak, A. ve Özger, M.,** 2003. Autorun persistence of hydrologic design, *J. Hydrol. Engrg.*, **8**(6), 329-338.
- Şen, Z., Altunkaynak, A. ve Özger, M.,** 2004. El Nino-Southern Oscillation (ENSO) templates and streamflow prediction, *J. Hydrol. Eng.*, **9**(5), 368-374.

- Tanwar, N.**, 2007. Clean development mechanism and off-grid small-scale hydropower projects: Evaluation of additionality, *Energy Policy*, **35**(1), 714-721.
- Thorpe, T.W.**, 1992. A review of wave energy. **ETSU-R-72**, London.
- Tsai, C.P., Lin, C., Shen, J.-N.**, 2002. Neural networks for wave forecasting among multi-stations, *Ocean Engrg.*, **29**(13), 1683–1695.
- Tucker, M.J. ve Pitt, E.G.**, 2001. Waves in Ocean Engineering, Elsevier Science, Oxford, UK.
- Warner, J.M.**, 1997. Wave energy conversion in a random sea, *PhD Thesis*, Technical University of Nova Scotia, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Fujii, F., Furuyama, H., and Fujita, T.**, 2000. The offshore floating type wave power device Mighty Wave: Open sea tests, *Proc, 10th ISOPE*, Seattle.
- Whitford, D.J.**, 2002. Teaching ocean wave forecasting using computer-generated visualization and animation Part 1: sea forecasting, *Computers & Geosciences* **28**, 537–546.
- Whittaker, T.J.T., McIlwaine, S.J., ve Raghunathan, R.**, 1993. A review of the Islay shoreline wave power plant, *Proceedings of European Wave Energy Symposium*, Edinburgh, 283-286.
- WMO.**, 1998. Guide to wave analysis and forecasting, World Meteorological Organization, WMO-No. 702, İsviçre.

ÖZGEÇMİŞ

01.04.1978 tarihinde Kayseri’ de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ahmet Paşa İlköğretim Okulu’nda, lise öğrenimini ise TED Kayseri kolejinde tamamladı. Lisans eğitimini İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde 1999 yılında tamamlayan Mehmet ÖZGER daha sonra yüksek lisans için İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Su Mühendisliği programına girmeye hak kazandı ve bu bölümden 2001 yılında mezun oldu. 2001-2002 öğretim yılı kış yarıyılından itibaren yüksek lisansı bitirdiği bölüm olan Su Mühendisliği programında doktora çalışmalarına başladı. Doktora programı ile birlikte, 2001 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Anabilim Dalı ’nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı. Halen tez aşamasında Doktora çalışmasına devam etmektedir. Aralık, 2006.