

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR KARAKTERİSTİKLERİNİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE
ORTAYA KONMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kemal DURAN

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR KARAKTERİSTİKLERİNİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE
ORTAYA KONMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Kemal DURAN
(511081008)**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kasım KOÇAK

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511081008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kemal DURAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**RÜZGAR KARAKTERİSTİKLERİNİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE ORTAYA KONMASI** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kasım KOÇAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yurdanur S. ÜNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hafzullah AKSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **24 Ocak 2013**

Anneme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın seçiminde, yürütülmesinde ve sonuçların değerlendirilmesinde desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Kasım KOÇAK'a teşekkür ederim.

17 Aralık 2012

Kemal Duran

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	5
2. ENERJİ KAYNAKLARINA GENEL BİR BAKIŞ	7
2.1 Enerji Kaynakları	7
2.2 Fosil Enerji Kaynakları	8
2.2.1 Petrol	8
2.2.2 Doğalgaz	9
2.2.3 Kömür	9
2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	10
2.3.1 Hidrolik enerji	10
2.3.2 Güneş enerjisi.....	11
2.3.3 Rüzgar enerjisi	11
2.3.4 Jeotermal enerji	12
2.3.5 Diğer yenilenebilir enerji kaynakları	13
2.4 Nükleer Enerji	13
3. RÜZGAR ENERJİSİ VE POTANSİYELİ.....	15
3.1 Rüzgarın Oluşumu ve Türleri.....	15
3.1.1 Küresel rüzgarlar	16
3.1.2 Yerel rüzgarlar	16
3.1.2.1 Kara ve deniz meltemleri	16
3.1.2.2 Dağ ve vadi rüzgarları	17
3.1.2.3 Türkiye’yi etkileyen hava kütleleri ve yerel rüzgarlar	17
3.2 Rüzgar Enerjisi ve Potansiyeli	18
3.2.1 Rüzgar enerjisinin tarihi.....	18
3.2.2 Dünyada rüzgar enerjisinin durumu.....	20
3.2.3 Türkiye’de rüzgar enerjisinin durumu	23
3.2.4 Rüzgar enerji santralleri	26
3.2.4.1 Rüzgar enerji türbinleri	27
Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	27
Düşey eksenli rüzgar türbinleri	28
Eğik eksenli rüzgar türbinleri.....	29
3.2.5 Rüzgar türbinleri için yer seçimi.....	29

4. RÜZGAR POTANSİYELİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ	31
4.1 Rüzgar Enerjisinin Genel Karakteristiği	31
4.2 Rüzgarın Düşey Değişimi.....	31
4.3 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri.....	32
4.3.1 Weibull dağılımı.....	33
4.3.2 Hata analizi.....	34
4.3.3 Güç yoğunluğunun belirlenmesi	34
5. DALGACIK ANALİZİ.....	37
5.1 Temel Kavramlar.....	37
5.1.1 Zaman serileri.....	37
5.1.2 Periyot	38
5.1.2.1 Periyodik fonksiyonlar	38
5.1.3 Frekans	39
5.1.4 Durağan ve durağan olmayan zaman serileri	40
5.1.5 İç çarpım.....	41
5.1.5.1 Vektörel iç çarpım.....	41
5.1.5.2 Fonksiyonlarda iç çarpım	41
5.1.5.3 Matrislerde iç çarpım	41
5.1.6 Ortogonal ve ortonormal kavramları.....	42
5.1.7 Dönüşüm kavramı nedir?	42
5.2 Dalgacık Analizinin Tarihsel Gelişim Süreci.....	44
5.3 Fourier Dönüşümü.....	47
5.4 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü	51
5.5 Dalgacık Teorisi	53
5.5.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü	57
5.5.1.1 Ölçekleme.....	59
5.5.1.2 Kaydırma.....	60
5.5.1.3 Bir zaman serisine sürekli dalgacık dönüşümünün uygulanması.....	60
5.5.1.4 Ölçek ile frekans ilişkisi.....	63
5.5.2 Ayırık Dalgacık Dönüşümü	64
5.5.2.1 Filtreleme ile Ayırık Dalgacık Dönüşümü	66
Alçak ve yüksek geçiren filtreler	66
Bir aşamalı filtreleme	67
Aşağı örnekleme.....	69
5.5.2.2 Çoklu Çözünürlük Analizi	70
Ayrıştırma yapılacak seviyenin belirlenmesi	72
5.5.2.3 Zaman serisinin sentezlenmesi.....	73
Ters dönüşüm filtrelemesi.....	74
Detay ve yaklaşım bileşenlerinin yeniden yapılandırılması.....	74
5.5.3 Dalgacık ayrışımalarında enerji dağılımları.....	76
5.5.3.1 Parseval Teoremi.....	76
5.5.4 Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu.....	77
5.5.5 Dalgacıklar ve özellikleri	79
5.5.5.1 Haar dalgacığı	79
5.5.5.2 Daubechies dalgacık ailesi	80
5.5.5.3 Mexican Hat dalgacığı	81
5.5.5.4 Morlet dalgacığı	81
5.5.5.5 Coiflet dalgacık ailesi.....	83
5.5.5.6 Symlet dalgacık ailesi.....	83
5.5.6 Dalgacık analizinin kullanım alanları	84

6. YÖNTEMİN VERİLERE UYGULANMASI.....	87
6.1 Çalışma Alanı ve Veri	87
6.2 Dalgacık Dönüşümünün Verilere Uygulanması	92
6.2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile spektral analiz.....	92
6.2.1.1 Dalgacık seçimi.....	92
6.2.1.2 Ölçek seçimi.....	94
6.2.1.3 Dalgacık analizi ile spektral gösterim	94
6.2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile analiz.....	106
6.2.2.1 Dalgacık seçimi.....	106
6.2.2.2 Kaç seviye ayrıştırma yapılacağının belirlenmesi.....	106
6.2.2.3 Çoklu Çözünürlük Analizi'nin gerçekleştirilmesi	107
Akhisar rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	109
Ayvalık rüzgar verilerinin analiz sonuçları:.....	111
Çanakkale rüzgar verilerinin analiz sonuçları:.....	113
Çorlu rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	114
Dikili rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	115
Edirne rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	116
Gökçeada rüzgar verilerinin analiz sonuçları:.....	117
İpsala rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	117
Şile rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	118
Simav rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	119
Uzunköprü rüzgar verilerinin analiz sonuçları:.....	120
Yalova rüzgar verilerinin analiz sonuçları:	121
6.2.2.4 Ayrıştırılmış detay ve yaklaşım bileşenlerindeki enerji değerleri....	122
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	131
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ.....	141

KISALTMALAR

OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
FD	: Fourier Dönüşümü
KZFD	: Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
DD	: Dalgacık Dönüşümü
SDD	: Sürekli Dalgacık Dönüşümü
ADD	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
ÇÇA	: Çoklu Çözünürlük Analizi
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
tYGF	: Ters Dönüşüm Yüksek Geçiren Filtre
tAGF	: Ters Dönüşüm Alçak Geçiren Filtre
REPA	: Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası
GDS	: Global Dalgacık Spektrumu
DGS	: Dalgacık Güç Spektrumu
EİE	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Atmosferik hareketlerin alan ve zaman ölçeği .	16
Çizelge 3.2 : Türkiye’de elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı	23
Çizelge 3.3 : Elektrik üretiminde kaynaklara göre birim maliyetler (E.İ.E.)	24
Çizelge 6.1 : Çalışmada kullanılan istasyonlara ait bilgiler	88
Çizelge 6.2 : Çalışmada kullanılan istasyonların veri durumları.....	89
Çizelge 6.3 : En yüksek güç değerine sahip periyodiklikler	104
Çizelge 6.4 : En yüksek 2. güç değerine sahip periyodiklikler	105
Çizelge 6.5 : Parseval Teoremi ile hesaplanan farklı seviyelere ait enerji değerleri.....	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Küresel kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi değişimi	21
Şekil 3.2 : Dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi ilk 10 ülke sıralaması	22
Şekil 3.3 : 2011 yılı rüzgar santrali kurulum kapasitelerinin ülkelere göre dağılımı.	22
Şekil 3.4 : Türkiye rüzgar enerji potansiyeli atlası (REPA).....	25
Şekil 3.5 : Türkiye’de kurulu rüzgar gücünün yıllara göre kümülatif değişimi	26
Şekil 3.6 : Yatay eksenli elektrik üreten üç kanatlı rüzgar türbinleri	27
Şekil 3.7 : Düşey eksenli rüzgar türbini	28
Şekil 5.1 : Bir sinüs fonksiyonunda periyot ve genlik	38
Şekil 5.2 : Durağan zaman serisi örneği	40
Şekil 5.3 : Durağan olmayan zaman serisi örneği	40
Şekil 5.4 : Kartezyen ve kutupsal koordinatlarda gösterim	43
Şekil 5.5 : Kare dalgasına ilk 4 adım Fourier yaklaşımları	48
Şekil 5.6 : Durağan bir zaman serisi ve Fourier Dönüşümü	49
Şekil 5.7 : Durağan olmayan bir zaman serisi ve Fourier Dönüşümü	49
Şekil 5.8 : Örnek zaman serileri ve Fourier dönüşümleri	50
Şekil 5.9 : KZFD’nin zaman serisine uygulanması ve pencereleme	52
Şekil 5.10 : Farklı pencere fonksiyonları için çözünürlük durumları	53
Şekil 5.11 : (a) FD (b) KZFD (c) DD pencereleme tekniği	54
Şekil 5.12 : Sinüs fonksiyonu	54
Şekil 5.13 : Bir dalgacık fonksiyonu	55
Şekil 5.14 : db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu	56
Şekil 5.15 : (a) KZFD pencerelemesi (b) SDD pencerelemesi	57
Şekil 5.16 : (a) KZFD pencerelemesi (b) SDD pencerelemesi	58
Şekil 5.17 : Sinüs ve dalgacık fonksiyonunun ölçeklenmesi	59
Şekil 5.18 : Bir dalgacığın zaman eksenini boyunca kaydırılması	60
Şekil 5.19 : Dalgacık ile serinin başlangıç kısmının karşılaştırılması	61
Şekil 5.20 : Dalgacığın zaman serisi üzerinde kaydırılması	61
Şekil 5.21 : Ölçeği değiştirilmiş dalgacık ile serinin karşılaştırılması	62
Şekil 5.22 : SDD ile elde edilen katsayıların 2 boyutlu görünümü	63
Şekil 5.23 : SDD ile elde edilen katsayıların 3 boyutlu görünümü	63
Şekil 5.24 : Farklı ölçeklenmiş dalgacık ile zaman serisinin durumları	64
Şekil 5.25 : ADD’nin zaman serisine uygulanması	66
Şekil 5.26 : Filtreleme ile yaklaşım ve detay bileşeni oluşumu	68
Şekil 5.27 : Filtreleme ile oluşan bileşenlerin veri durumları	68
Şekil 5.28 : Bir zaman serisinin aşağı örnekleme algoritması	69
Şekil 5.29 : Gerçek zamanlı serinin aşağı örnekleme	69
Şekil 5.30 : ÇÇA ile 3. seviye yaklaşım ve detay bileşenleri	70
Şekil 5.31 : Gerçek zamanlı bir zaman serisinin ayrıştırılması	71
Şekil 5.32 : ÇÇA ile frekans çözünürlüğü	72
Şekil 5.33 : Ters dönüşüm ile orjinal zaman serisinin elde edilmesi	73
Şekil 5.34 : (a) Zaman serisi (b) Zaman serisinin yukarı örnekleme.....	74

Şekil 5.35 : Karesel ayna (Misiti ve diğ., 1996)	74
Şekil 5.36 : Tek seviye yaklaşım bileşeninin sentezlenmesi	75
Şekil 5.37 : Tek seviye detay bileşeninin sentezlenmesi	75
Şekil 5.38 : Zaman serisinin yeniden yapılandırılması	76
Şekil 5.39 : Samsun istasyonunun basınç verilerinin DGS ve GDS	78
Şekil 5.40 : Samsun istasyonunun sıcaklık verilerinin DGS ve GDS	78
Şekil 5.41 : Edirne istasyonunun basınç verilerinin DGS ve GDS	78
Şekil 5.42 : Edirne istasyonunun sıcaklık verilerinin DGS ve GDS	78
Şekil 5.43 : Haar dalgacık fonksiyonu	79
Şekil 5.44 : Daubechies ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları	80
Şekil 5.45 : Mexican Hat dalgacığı.....	81
Şekil 5.46 : Morlet dalgacığının reel bileşeni	82
Şekil 5.47 : Morlet dalgacığının sanal bileşeni ile birlikte görünümü	82
Şekil 5.48 : Coif 2 ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu	83
Şekil 5.49 : Coif 4 ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu	83
Şekil 5.50 : Symlet dalgacıkları	84
Şekil 5.51 : Dalgacık analizinin kullanım alanları	85
Şekil 6.1 : Çalışmada kullanılan istasyonların bulundukları yerler	87
Şekil 6.2 : Akhisar, Ayvalık, Çanakkale, Çorlu, Dikili ve Edirne	90
Şekil 6.3 : Gökçeada, İpsala, Şile, Simav, Uzunköprü ve Yalova.....	91
Şekil 6.4 : Morlet dalgacığı, kesikli çizgi sanal, düz çizgi reel bileşen	93
Şekil 6.5 : Akhisar rüzgar verisine ait DGS ve GDS	95
Şekil 6.6 : Ayvalık rüzgar verisine ait DGS ve GDS	97
Şekil 6.7 : Çanakkale rüzgar verisine ait DGS ve GDS	98
Şekil 6.8 : Çorlu rüzgar verisine ait DGS ve GDS	98
Şekil 6.9 : Dikili rüzgar verisine ait DGS ve GDS	99
Şekil 6.10 : Edirne rüzgar verisine ait DGS ve GDS	100
Şekil 6.11 : Gökçeada rüzgar verisine ait DGS ve GDS	100
Şekil 6.12 : İpsala rüzgar verisine ait DGS ve GDS	101
Şekil 6.13 : Simav rüzgar verisine ait DGS ve GDS	101
Şekil 6.14 : Şile rüzgar verisine ait DGS ve GDS	102
Şekil 6.15 : Uzunköprü rüzgar verisine ait DGS ve GDS	103
Şekil 6.16 : Yalova rüzgar verisine ait DGS ve GDS	103
Şekil 6.17 : db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu	106
Şekil 6.18 : 32 verilik zaman serisinin 5 seviye ayrıştırılması	107
Şekil 6.19 : Dalgacık ağacı ile ayrıştırmanın gösterilmesi	108
Şekil 6.20 : Akhisar rüzgar verisinin 10 seviye ayrıştırılması	109
Şekil 6.21 : Akhisar 10. seviye yaklaşım ve detay serileri	109
Şekil 6.22 : 10. seviye Akhisar sentezlenmiş yaklaşım serisi	110
Şekil 6.23 : Akhisar'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	110
Şekil 6.24 : Ayvalık rüzgar verisinin 10 seviye ayrıştırılması	111
Şekil 6.25 : Ayvalık 10. seviye yaklaşım ve detay serileri	111
Şekil 6.26 : 10. seviye Ayvalık sentezlenmiş yaklaşım serisi	112
Şekil 6.27 : Ayvalık'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	112
Şekil 6.28 : Çanakkale 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	113
Şekil 6.29 : Çanakkale'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	113
Şekil 6.30 : Çorlu 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	114
Şekil 6.31 : Çorlu'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	114
Şekil 6.32 : Dikili 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	115
Şekil 6.33 : Dikili'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	115

Şekil 6.34 : Edirne 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	116
Şekil 6.35 : Edirne'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	116
Şekil 6.36 : Gökçeada 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	117
Şekil 6.37 : Gökçeada'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	117
Şekil 6.38 : İpsala 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	118
Şekil 6.39 : İpsala'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	118
Şekil 6.40 : Şile 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	119
Şekil 6.41 : Şile'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	119
Şekil 6.42 : Simav 10. Seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	119
Şekil 6.43 : Simav'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	120
Şekil 6.44 : Uzunköprü 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	120
Şekil 6.45 : Uzunköprü'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	120
Şekil 6.46 : Yalova 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi	121
Şekil 6.47 : Yalova'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi	121
Şekil 6.48 : A10 yaklaşım bileşenine ait enerji değerleri	124
Şekil 6.49 : D10 detay bileşenine ait enerji değerleri	125
Şekil 6.50 : D9 detay bileşenine ait enerji değerleri	125
Şekil 6.51 : D8 detay bileşenine ait enerji değerleri	125
Şekil 6.52 : D7 detay bileşenine ait enerji değerleri	126
Şekil 6.53 : D6 detay bileşenine ait enerji değerleri	126
Şekil 6.54 : D5 detay bileşenine ait enerji değerleri	126
Şekil 6.55 : D4 detay bileşenine ait enerji değerleri	127
Şekil 6.56 : D3 detay bileşenine ait enerji değerleri	127
Şekil 6.57 : D2 detay bileşenine ait enerji değerleri	127
Şekil 6.58 : D1 detay bileşenine ait enerji değerleri	128
Şekil 6.59 : Tüm bileşenlerdeki enerjilerin toplamı	128
Şekil 6.60 : İlk 4 detay bileşeninin atılması ile oluşan enerji toplamı	128

RÜZGAR KARAKTERİSTİKLERİNİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE ORTAYA KONMASI

ÖZET

Dünyada ve Türkiye’de sürekli artan enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın halen çok büyük oranda fosil yakıtlardan karşılanması büyük problemler oluşturmaktadır. Bu problemlerin başlıcaları olarak artan çevre kirliliği ve bu kaynakların yakın bir gelecekte tükenerek olması söylenebilir. Bu durum enerji ihtiyacının karşılanmasında sürdürülebilirlik problemi ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenlerden ötürü son yıllarda alternatif enerjilere olan ilgi artmıştır. Bu noktada alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmıştır. Bu kaynakların tükenme sorunlarının bulunmayışı ve çevreye dost enerji kaynakları olmaları, bu alandaki çalışmaları ve yaşanacak gelişmeleri daha da önemli kılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başlıcaları güneş, rüzgar, su, jeotermal ve biyokütle temeline dayanan enerjilerdir. Bu kaynaklar içinde rüzgar enerjisi son yıllarda gelişen teknolojisi ve bunun yanında üretilen enerjinin birim maliyetlerinde fosil yakıtlar ile rekabet edebilir duruma gelmesi sonucu diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının bir adım önüne geçmiştir. Bu özelliklerinin yanında dünyada ve Türkiye’de barındırdığı enerji potansiyelinin büyüklüğü rüzgarın önemini artıran diğer bir etkidir. Türkiye son yıllarda rüzgar enerjisinden yararlanma konusunda önemli atılımlar gerçekleştirmiş olmasına rağmen halen varolan potansiyelinin % 4’ü civarında bir oranını kullanmaktadır. Bu durum rüzgar potansiyeli alanında yapılacak çalışmaları daha da değerli kılmaktadır. Teknolojide yaşanabilecek gelişmeler ile gelecekte, bugün için rüzgar potansiyelleri düşük olarak kabul edilen ve rüzgar enerji santrali kurulumu için ekonomik olmayan bölgeler de enerji üretiminde kullanılabilir hale gelebilir.

Bir bölgede rüzgar enerji türbinlerinin kurulması için önemli fizibilite çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bu çalışmalar içinde en önemli yeri de inkar edilemez biçimde rüzgarın o bölgedeki enerji potansiyeli belirlemektedir. Bu nedenle bir bölgede rüzgar enerjisi potansiyelinin doğru şekilde belirlenebilmesi için güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde en yaygın olarak istatistiksel bir yöntem olan Weibull dağılımı veya Weibull dağılımını temel alan WASP, WIND PRO gibi modeller kullanılmaktadır.

Bu çalışmada rüzgarın genel karakteristikleri ve enerji potansiyelini belirlemek amacıyla alternatif bir yöntem olabilecek dalgacık analizi üzerinde durulmuştur. Dalgacık analizi, klasik rüzgar analiz yöntemleri olan istatistiksel yöntemlerin yerine zaman serilerinin analizinde matematiksel bir yaklaşım sunmaktadır. Dalgacık analizi, özellikle içinde durağansızlıklar barındıran zaman serilerinin analizinde son 30 yıl içinde farklı disiplinlerdeki birçok uygulaması ile önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Meteoroloji bilimi gibi, kullandığı değişkenlerin birçoğu durağansızlıklar içeren zaman serileri olan bir disiplinde, dalgacık analizi çok faydalı sonuçlar ortaya

koyabilir. Bu çalışmanın meteorolojik değişkeni olan rüzgar verisine ait zaman serileri de durağan olmayan zaman serileridir.

Dalgacık analizi kullandığı ölçekleme ve bunu istenilen zaman parçası büyüklüğünde yapabilmesi özelliği ile birçok klasik zaman serisi analiz yöntemine üstünlük sağlamıştır. Bu bahsedilen özelliğin gücünü anlatmak için artık dalgacık analizi denilince akla gelmesi ile klasikleşmeye başlayan bir cümleyi bu noktada belirtmekte fayda vardır. Dalgacık analizi gücünü aynı anda hem ormanı, hem ağaçları, hem de ağaçların yaprakları hakkında bilgi verebilmesi özelliğinden alır. Dalgacık analizi bize hem bir olayın genel hareketi hakkında bilgi sağlarken hem de o olay hakkında ayrıntı bilgileri aynı anda ortaya koyabilmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulamada, Dalgacık Analizi Türkiye'nin kuzeybatısında bulunan 12 meteoroloji gözlem istasyonundan alınmış olan 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verilerinin oluşturduğu zaman serilerine uygulanmıştır. Bu uygulamadaki amaç hem rüzgar verisine ait genel karakteristikleri tespit etmek hem de analiz edilen istasyon bölgelerindeki rüzgar enerji potansiyellerini kıyaslayabilmektir. Bu analiz Sürekli Dalgacık Dönüşümü ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Sürekli Dalgacık Dönüşümünün rüzgar verilerinin oluşturduğu zaman serisine uygulanması neticesinde zaman serisine ait spektral gösterimlere ulaşılmıştır. Bu sayede rüzgar verisinin sahip olduğu periyodiklikler ve bu periyodikliklerin sahip oldukları güç değerleri hesaplanmak suretiyle, hem rüzgar potansiyeli belirlemek noktasında bir yaklaşım elde edilmeye çalışılmış, hem de rüzgarın yıllar içindeki hareketinin sahip olduğu salınımlar tespit edilmiştir. Uygulamanın ikinci aşamasında ise Ayrık Dalgacık Dönüşümü rüzgar verisinin oluşturduğu zaman serilerine uygulanarak hem rüzgar verisine ait zaman serisinin genel trend özelliklerini yansıtan bir yaklaşım serisi sunmak hedeflenmiş, hem de rüzgar potansiyeli kıyaslaması yapabilmek için, Çoklu Çözünürlük Analizi ile ayrıştırılan zaman serilerinin farklı seviyelerdeki enerji değerleri hesaplanmıştır.

ANALYSIS OF WIND CHARACTERISTICS BY USING WAVELET TRANSFORM

SUMMARY

It is a widely acknowledged fact that there has been a great demand for any kind of energy for a couple of decades in numerous areas ranging from industry to housing. This huge demand for energy is not a local issue, but rather it is increasing continuously in every part of the world as well as in Turkey. Currently, fossil fuels which are commonly available on the earth, still dominate energy consumption with a ratio of 87 %. Oil is the leading fuel for years. Moreover, coal is the fastest growing fossil fuel and this naturally results in a predictable consequence: carbon emissions, which can be referred to as one of the most fatal factor threatening the natural circle of the world. Since fossil fuels have limited sources, in near future, it is expected that these energy sources will die out. Because of these reasons, there are needs for alternative energy sources for the present industrial areas and environment.

Renewable energy sources like wind and solar energy can be considered as some of the best alternatives. This is because, renewable energy systems are clean and they don't give any harmful waste into environment. In addition to these, renewable energy sources renew themselves everyday. These are very important characteristics of renewable energies compared to fossil fuels. Therefore, renewable energy systems have become a topic of great interest and investment in the world.

In recent years, among various alternative sources, wind energy has gained a great importance especially stemming from the development of wind power generation technology which make wind energy as most suitable and cost effective for electric power production. In addition to these, wind power is clean and renewable energy. Potential of wind energy is very much in Turkey and in the world. So, wind energy is very good alternative for fossil fuels.

For planning and successful implementations of good wind power plant projects, wind potential measurements are required. However, the wind has uncontrollable characteristics. It has an interesting variability in both time and space. It is influenced by topography and weather patterns. Therefore, wind data shows nonstationary characteristics.

The accurate estimation of wind characteristics needs a tool to analyze non-stationary time series. Although, statistical approaches like weibull distribution are common for analysis wind data, they do not provide an insight into time changes of time series. Time is very important variable for time series. Statistical approaches can't give any time information after the analysis. So, in order to fully understand the wind characteristics and their effects on structures, there is clearly a need for analysis tool to analyze non-stationary data.

Wavelet Transforms have been recently developed as a mathematical tool based on a convolution operation between an original time series and analyzing function called wavelet. The Wavelet Transform is a powerful analyzing tool for stationary and non-

stationary to find out hidden short events and at the same time general trends inside the time series. Moreover, the Wavelet Transform has more advantages over the conventional spectral analysis methods such as Fourier Transform and Short-Time Fourier Transform as to realize in simultaneously time frequency analysis with flexible resolution. Because of these advantages, it is used in this work.

During the past decade, the Wavelet Transforms have been applied to a variety of research areas. Their applications include signal and image denoising, compression, detection and pattern recognition. In addition to these, wavelets analysis can be applied for many different purposes which differ from science to medicine and finance. This work is a meteorological application of wavelet transform with the wind time series.

In this work, the wind speed data used 12 weather stations located in northwestern of Turkey. This part of Turkey is under the Icelandic low which give rise to northerly and northwesterly winds. Moreover, the so-called Etesian winds also play a significant role along the Aegan coast of Turkey. The data used for this analysis is 5 years long and average hourly wind speed data.

Aim of this work, a wavelet transform has been applied to analyze the wind speed data in the context of insight in the characteristics of the wind and selection of suitable locations for wind farm construction by determining wind potentials.

Methodology used in this work consists of two parts. They are the continuous wavelet transform and the discrete wavelet transform.

The continuous wavelet transform is calculated by the convolution between the time series and analysis function. A wavelet is oscillating function which contains both the analysis function and the window. The wavelet shifts over time series and this gives us time information. The frequencies are changed by scale and translation parameters of the wavelet function.

The discrete wavelet transform uses filters to perform the wavelet analysis. The discrete wavelet transform decomposes the time series into wavelet coefficients and the original time series can be reconstructed again. The wavelet coefficients represents the time series in various frequency bands.

In this work, the continuous wavelet transform is used for nonlinear spectral representation of the wind data. Wavelet spectral analysis provides a natural basis to estimate the time frequency-energy characteristics of the observed data. Wavelet Power Spectrum and Global Wavelet Spectrum are obtained after spectral analysis of wavelet. By means of these results, wind characteristics such as oscillations in time series of wind and energy potential of wind in a region are determined easily.

On the other hand, discrete wavelet transform can be realized by considering multiresolution analysis. The wavelet transform is used to decompose the non-stationary time series of wind data into detail parts associated with high frequencies and approximate part associated with low frequencies. After this decomposition, Parseval Theorem is used for determining of energies in different levels of detail and approximations. Energy of wavelet decompositions plays more significant role than the amplitude because the energy of wavelet decompositions relates to the energy contribution of coefficients on total energy of original time series.

As a result, wavelet transform is a new approach for determining wind energy potential and wind characteristics especially related to dominant periods of time series of wind speed data for different conditions during the year.

1. GİRİŞ

Enerji tüketiminin 1990 - 2011 yılları arasında yaklaşık % 45 arttığı dünyada, tüketilen bu enerjinin % 87'si fosil kaynaklı enerjiler olarak adlandırılan petrol, doğalgaz ve kömürden sağlanmaktadır. Petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil enerji kaynaklarının hem tükenme sorunu ile karşı karşıya olmalarından hem de bu kaynakların çevreye olan olumsuz etkileri dolayısıyla yerlerine alternatif olabilecek farklı enerji kaynaklarına ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda güneş, rüzgar ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları dikkat çekmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil kaynaklı enerjiler ile kıyaslandığında en önemli avantajları sürdürülebilir olmaları ve çevreye dost enerji kaynakları olmalarıdır. Bu nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Fakat, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji sürekli artmasına rağmen halen dünya enerji tüketimindeki payı % 2,1 gibi düşük bir düzeydedir ve bu yüzden gelişme kaydedilmesini bekleyen büyük bir potansiyel taşımaktadır (Url-1). Yenilenebilir enerji kaynakları özellikle elektrik enerjisi üretilmesi başta olmak üzere, ısınma ve su pompalama gibi enerji gerektiren ihtiyaçların karşılanmasında kullanılmaktadır.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları içinde rüzgar enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının bir adım önüne geçerek, elektrik enerjisi üretilmesi noktasında önemli bir artış trendine girmiştir. Bu artış trendinin yanında, barındırdığı potansiyelin dünya genelindeki ve Türkiye'deki durumuna bakıldığında, halen bu potansiyelin kullanımının çok düşük düzeylerde olması rüzgar enerjisinin önemini daha da artırmaktadır. Bu artış trendinin altında yatan diğer bir etken ise rüzgar enerjisi teknolojisinin gelişmesi sayesinde, rüzgardan üretilen enerjinin birim maliyetlerinin diğer birçok kaynakla karşılaştırıldığında daha uygun hale gelmiş olmasıdır. Aksi takdirde her konunun ekonomikliği ile ölçüldüğü günümüz dünyasında insanoğlunun bu enerji kaynağına yönelimi bu denli fazla olmayabilirdi.

Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının durumuna biraz daha ayrıntılı baktığımızda varolan potansiyeli ile kullanımı arasındaki çelişki özellikle Türkiye

gibi enerji konusunda dışa bağımlılığı çok yüksek olan bir ülke için anlaşılması güç bir durum oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında da odaklanılan konu rüzgar enerjisi potansiyeli olması itibari ile rüzgar enerjisinin Türkiye'deki durumuna burada kısaca değinilmesi faydalı olacaktır. Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilirliği açısından rüzgar potansiyelinin 48 000 MW olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye'nin 2011 yılı elektrik üretimi için toplam kurulu gücünün 62 475 MW olduğu gerçeği Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyelinin ne denli yüksek olduğunu göstermesi bakımından önemlidir (Url-2). Türkiye'nin 2012 yılı temmuz ayı itibari ile rüzgar enerji santralleri toplam kurulu gücü ise 2041,35 MW düzeyindedir (Url-3). Bu durumda Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin 48 000 MW olduğu düşünüldüğünde yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgarın potansiyelinin ancak % 4'ünün değerlendirildiği gerçeği ortaya çıkar. Bu veriler ışığında enerji konusunda sürekli dışa bağımlılıktan yakınan bir Türkiye için rüzgar enerjisinin ne kadar ciddiyetle ele alınması ve değerlendirilmesi gerektiği oldukça açıktır.

Diğer taraftan rüzgar teknolojisinin hızlı gelişimine devam etmesi ile yakın bir gelecekte rüzgar potansiyelinin düşük olduğu düşünülen ve kullanımının ekonomikliği olmayan birçok yerde rüzgarın kullanılabilir hale gelmesi muhtemeldir. Fosil yakıtların tükenmesi ile belki de yine yakın bir gelecekte her binada mini bir rüzgar türbini, güneş enerjisinden yararlanmak için paneller bulunacaktır. Bu yüzden Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin yeni yöntemler ile tekrar hesaplanması ve değerlendirilmesi önemli faydalar sağlayacaktır. Rüzgar enerjisindeki teknolojinin gelişmesi ile rüzgardan yararlanılabilecek alanlar ve üretilebilecek enerjinin daha da artmasının muhtemel olması ve hali hazırdaki rüzgar enerji potansiyelinin yeterli düzeylerde kullanılmayışı nedeniyle, bu tez çalışmasında rüzgar enerji potansiyeli konusuna odaklanılmıştır.

Rüzgar enerjisi santrallerinin kurulacağı alanın doğru seçilmesi rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde çok kritik bir öneme sahiptir. Doğru yerin belirlenmesinde rüzgar santralinin kurulacağı yerdeki rüzgar verisinden, rüzgar enerjisi potansiyel analizleri gereklidir ve en önemli belirleyicidir. Yapılacak hesaplamanın doğruluğu verimli bir rüzgar santrali kurulması açısından çok önemlidir. Bu tez çalışmasında rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmesi ve kıyaslanması için Weibull dağılımı ve Rayleigh dağılımı gibi istatistiksel yöntemlere alternatif olabilecek matematiksel bir yöntem olan Dalgacık (wavelet) Analizi kullanılmıştır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin

belirlenmesi amacıyla Dalgacık Analizi yöntemi 12 farklı istasyona ait 10 metre yüksekliğindeki 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verisine uygulanarak hem rüzgar verilerine ait karakteristik özellikler hem de hangi istasyon bölgesinin en yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntem sayesinde rüzgar enerji santrali kurulumu açısından en uygun yerin seçimi Dalgacık Analizi ile elde edilen rüzgar potansiyellerinin kıyaslanması ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Tezin içeriğinden biraz bahsetmek gerekirse, enerji kaynaklarının dünya ve Türkiye’deki genel durumu, yenilebilir enerji kaynakları hakkında ayrıntılı bilgiler tez çalışmasının ikinci bölümü olan Enerji başlığı altında, rüzgar, rüzgar enerjisi ve potansiyeli, dünya ve Türkiye’deki rüzgar enerjisinin durumu tez çalışmasının üçüncü bölümü olan Rüzgar Enerjisi ve Potansiyeli başlığı altında verilmiştir. Dördüncü bölüm olan Rüzgar Potansiyelinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler kısmında Weibull dağılımına değinilmiştir. Dalgacık dönüşümlerinden beşinci bölüm olan Dalgacık Analizi kısmında bahsedilmiştir. Altıncı bölümde Yöntemin Rüzgar Verilerine Uygulanması başlığı altında bu tez çalışmasında kullanılan rüzgar verileri hakkında bilgiler ve dalgacık dönüşümünün rüzgar verilerine uygulanması süreçlerinden bahsedilmiştir. Yedinci bölüm olan Sonuç ve Tartışma kısmında uygulamanın sonuçları yorumlanarak önerilerde bulunulmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Türkiye’nin kuzeybatı bölgesinde bulunan 12 adet meteoroloji gözlem istasyonundan alınmış 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verilerine Sürekli ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulamak suretiyle, Türkiye’nin kuzeybatı bölgelerinin rüzgar verisine ait genel karakteristiklerini tespit etmek ve bu istasyon bölgelerindeki rüzgar enerjisi potansiyellerini kıyaslayarak, rüzgar enerji santrali kurulumu için en uygun yerleri belirlemektir.

1.2 Literatür Araştırması

Türkiye’de rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmesine yönelik yapılmış birçok çalışma vardır. Dalgacık dönüşümünün de çeşitli disiplinlerdeki uygulamalarına ait

birçok çalışma vardır. Fakat dalgacık dönüşümü yöntemi uygulanarak rüzgar potansiyeli belirlenmesi üzerine yapılmış bir çalışma ülkemizde bulunmamaktadır.

Rüzgar potansiyeli belirleme üzerine yapılan çalışmalardan birinde Isparta ilindeki mevcut rüzgar potansiyeli, yapay sinir ağları ve ANFIS metodu ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak Isparta ilinin rüzgar potansiyelinin, rüzgar enerji santrali kurulumu için yeterli düzeyde olmadığı tespit edilmiştir (Özcan, 2011).

Diğer bir çalışma Denizli ilinin Tavas ilçesine ait rüzgar potansiyelinin hesaplanması üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada WASP Modeli ile analiz yapılmıştır. Weibull dağılımı ve Lambert formüllerinden de yararlanılmıştır. Sonuç olarak bu bölgede rüzgar santrali kurulumu yapılabileceği sonuçlarına varılmıştır (Talayoğlu, 2010).

Bir diğer çalışma Türkiye çapında 224 istasyonun 2005 yılındaki saatlik ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak yapılmıştır. Weibull Dağılımları ile rüzgar potansiyelleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak en yüksek enerji potansiyeli Bozcaada, Amasra, Maden, Çanakkale ve Gökçeada istasyon verilerinden elde edilmiştir. Yüksek potansiyelli bölgeler ise Batı Marmara, Kuzeybatı ve kısmen Doğu Karadeniz, Doğu ve Batı İç Anadolu, Güney Ege ve Ege sahilleri, Güneydoğu Anadolu, Güneybatı Anadolu, Doğu Akdeniz ve Akdeniz sahilleri olarak belirlenmiştir (Süzek, 2007).

Dalgacık dönüşümü rüzgar verisine uygulanarak rüzgar potansiyelinin tespit edilmesi ile ilgili bir çalışma Avdakovic ve diğerleri tarafından Bosna Hersek'te yapılmıştır. Planlı ve başarılı bir rüzgar çiftliği kurulumu için rüzgar potansiyelinin belirlenmesinde yeni bir yöntem olarak dalgacık dönüşümünü, rüzgar verisine uygulamışlardır. Bosna Hersek'teki üç istasyonun 1 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verisine dalgacık dönüşümü uygulanarak hangi istasyonda rüzgar enerji potansiyelinin daha yüksek olduğu tespit edilmeye çalışılmış ve rüzgar çiftliği kurmak için uygun yer belirlenmeye çalışılmıştır (Avdakovic ve diğ, 2011).

Türkiye'de gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise Dalgacık dönüşümü kullanılarak Diyarbakır bölgesine ait saatlik ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak yapay rüzgar verisi üretimi gerçekleştirilmiştir. Ardından yöntemin sonuçları ile gözlenen gerçek rüzgar verisi istatistiksel değerler bakımından kıyaslanmıştır (Aksoy ve diğ, 2004).

Diğer bir çalışmada dalgacık analizi deniz düzeyi gözlemlerine uygulanmıştır. Çalışmada Antalya gözlem verileri kullanılarak deniz düzeyi gözlemlerinin günlük ve yarı günlük periyodiklikler gösterdiği tespit edilmiştir. Dalgacık analizi yöntemiyle söz konusu periyodikliklerin yerleştirilmesi yapılarak yarı günlük hareketlerin bir hafta arayla olduğu ortaya çıkarılmıştır (Abbak 2007).

Dalgacık dönüşümü rüzgar potansiyeli tespiti için yeni bir yöntem olmasına rağmen uygulama alanı çok geniş olan matematiksel bir yöntemdir. Rüzgar potansiyeli belirlenmesindeki Weibull dağılımı ve Rayleigh dağılımı gibi istatistik yöntemlere ek olarak dalgacık dönüşümü gibi matematiksel bir yöntem kullanımı sayesinde farklı bir açıdan değerlendirme yapabilme imkanı kazanılacaktır.

1.3 Hipotez

Uygulamada verileri kullanılan 12 meteoroloji gözlem istasyonu Akhisar, Ayvalık, Çanakkale, Çorlu, Dikili, Edirne, Gökçeada, İpsala, Simav, Şile, Uzunköprü ve Yalova'dır. Bu istasyonların rüzgar verilerine uygulanan dalgacık dönüşümü sonucunda enerji potansiyeli en yüksek istasyonun Gökçeada ve ardından Çanakkale olması beklenir. Hem daha önce yapılan çalışmalardan hem de Gökçeada'nın bir ada oluşu bilgisi ve Çanakkale'nin deniz kıyısındaki konumu doğrultusunda böyle bir beklenti vardır. Beklenen diğer bir sonuç ise rüzgar verisinin önemli periyodik özellikler gösteren bir karakter ortaya koymasındır.

2. ENERJİ KAYNAKLARINA GENEL BİR BAKIŞ

2.1 Enerji Kaynakları

Fizik biliminde iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan enerjinin aslında herkes tarafından kabul edilen netleşmiş bir tanımı yoktur (Şen, 2003). Enerji birçok biçime sahiptir ve enerji bu biçimler arasında dönüşüme uğrayabilir. Enerjinin bu biçimleri mekanik, ısı, potansiyel, elektrik, manyetik, kimyasal ve nükleer olarak sayılabilir. İnsanın nefes alışından düşünmesine, ısınmasından ulaşımına, aydınlanmasından endüstriyel üretimine kadar kısacası bütün yaşamsal faaliyetlerde bulunması için enerji gereklidir.

Ülkelerin ekonomik kalkınma düzeylerine göre enerji tüketim miktarları incelendiğinde, gelişmiş ülkelerdeki kişi başına enerji tüketiminin gelişmekte olan ülkelerdeki kişi başına enerji tüketiminden çok daha fazla olduğu görülmüştür (Şen, 2003). Kısacası enerjinin insanlar ve yaşam için bu kadar önemli olduğu günümüzde enerji adeta ülkeler için bir gelişmişlik göstergesidir. Enerjinin akılcı ve verimli kullanımı ülkeler ve toplumlarının refah seviyesi için olmazsa olmaz unsurdur.

Dünya enerji tüketimi 2011 yılında, yıllardan beri sürmekte olan artış trendine paralel şekilde % 2,5 artmıştır. 2011 yılı verilerine göre yaklaşık 7 milyar olan dünya nüfusunun 2050 yılına doğru hızla artarak 9 milyarı aşacağı tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak gelişen teknoloji ve yaşam standartlarının da sürekli artıyor oluşu dünyanın enerji ihtiyacını sürekli artırmaktadır. Sonuçta bu durum yeni enerji kaynaklarına yönelimi ve enerji verimliliği konusunu insanoğlunun gündemine getirmektedir (Url-4).

Günümüz enerji kaynakları kendi aralarında birçok yönden ele alınıp sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflamalardan biri kaynağından çıkışında doğrudan kullanılabilen enerji kaynaklarına birincil enerji kaynakları (kömür, petrol, doğal gaz), bunların dönüşümü ile oluşan enerji kaynaklarına ikincil enerji kaynakları (elektrik, kok) denilmesi biçimindedir.

Diğer bir sınıflama ise enerji kaynaklarının oluşum şekillerine göre yapılmaktadır. Canlıların kalıntılarının yer altında kalıp belli bir zaman süreci sonucu olgunlaşması

ile oluşan enerji kaynaklarına fosil enerji kaynakları (petrol, taşkömürü, linyit, doğal gaz), teknolojik gelişmeler sonucu oluşturulan kaynaklara yeni enerji kaynakları (nükleer, hidrojen), tükenme sorunu olmayan ve dünya var olduğu sürece devam edecek olan enerji kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik, dalga) denir (Oral, 2010).

Bu tez çalışmasında sınıflama enerji kaynaklarının oluşum şekillerine göre yapılmıştır.

2.2 Fosil Enerji Kaynakları

2.2.1 Petrol

Günümüz teknolojilerinin birçoğu petrol ve türevlerine dayalı teknolojilerdir. Bunun sonucu olarak uzun yıllardır olduğu gibi 2011 yılı verilerine göre de % 33,1'lik küresel enerji pazar payı ile dünyada enerji ihtiyacının karşılanması bakımından petrol birinci sıradadır. Son 12 yıldaki enerji tüketimlerinin kaynaklara göre dağılımında, payı sürekli azalmış olmasına rağmen 2011 yılında tüketilen petrol 2010 yılına göre % 0,7 artmıştır. Fosil yakıtlar içinde kullanım oranı en az artan enerji kaynağıdır. Yakın bir gelecekte petrol kaynaklarının tükeneceği gerçeği ile karşı karşıya olan dünyada alternatif enerji kaynaklarına yönelim sürmektedir. Bu tükenme sorunu yüzünden enerji kaynağı olarak petrole bağımlı olan otomobil sektörü, kendisine yeni çözümler aramakta ve bu arayışların en somut göstergesi olarak elektrik ile çalışan otomobil teknolojisinde yapılan çalışmalar gelmektedir. Yakın bir gelecekte petrol kaynaklarının azalışı ve talep artışını karşılayamaması sonucu elektrik enerjisi ile çalışan otomobiller çok daha rekabetçi konuma gelecektir. Dünyada petrol tüketimine genel bir bakış yapıldığında, OECD ülkelerinde petrol tüketimi son altı yıl içinde beşinci defa azalarak 2011 yılında da % 1,2 azalmış ve 1995'ten beri en düşük düzeyine ulaşmıştır. Çin ise % 5,5'lik petrol tüketim artışı göstermiştir. Bu Çin için son 10 yılın en düşük artış oranı olmasına rağmen dünyanın geri kalanında yaşanan artışlar ile kıyaslandığında oldukça büyük bir artış oranıdır (Url-1).

Türkiye'de petrol tüketimine bakıldığında tam anlamıyla dışa bağımlı durumda olduğu gerçeği ile karşılaşılır. 2011 yılı istatistiklerine göre, Türkiye'de tüketilen petrolün % 92'si yurt dışından ithal edilmiştir. Türkiye gelecekte enerji konusunda daha güçlü ve sürdürülebilir bir politika için artık petrole yönelik teknolojiler yerine

potansiyeli fazla olan, mevcut yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaşmak zorundadır (Url-1).

2.2.2 Doğalgaz

Doğalgaz fosil kaynaklar içinde en temiz olan enerji kaynağıdır. Doğalgaz hızla artan çevre ve atmosfer kirliliği nedeniyle kullanımı son yıllarda büyük oranda artmış bir enerji kaynağıdır. 2011 yılında dünya doğalgaz tüketimi % 2,2 artmıştır. Dünya doğalgaz tüketiminin 2011 verilerine göre, toplam enerji tüketimindeki payı % 23,6 düzeyine yükselmiştir. 2011 yılında doğalgaz tüketimlerini Çin % 21,5, Suudi Arabistan % 13,2 ve Japonya % 11,6 oranında artırmıştır. Bu ciddi artışlara rağmen dünya doğalgaz tüketiminin % 2,2 gibi düşük sayılabilecek artış oranının altında yatan temel neden Avrupa’da doğalgaz tüketiminde yaşanan % 9,9’luk düşüştür (Url-1).

Türkiye, doğalgazı kullanım kolaylığı ve temizliği gibi özelliklerinden ötürü ısınma ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Fakat tükettiği doğalgaz açısından 2011 verilerine göre, % 98’lik dışa bağımlılığı bulunan Türkiye’nin bu politikasının, özellikle elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kısmı için akılcı ve sürdürülebilir olduğu söylenemez. 2011 verilerine göre, Türkiye’de üretilen elektriğin yaklaşık olarak % 45’i doğalgaz ile üretim yapan termik santrallerden karşılanmaktadır. Ayrıca, 2011 yılındaki doğalgaz tüketiminin 2010 yılındakine göre, % 17,3 artmış olması Türkiye’nin giderek bu enerji kaynağına bağımlılığının arttığının bir göstergesidir. Türkiye, 2011 yılında dünya doğalgaz tüketiminin % 1,4’ünü gerçekleştirmiştir (Url-2).

2.2.3 Kömür

Kömür dünyada en büyük rezerve sahip fosil yakıttır. 2011 yılında kömür tüketiminde % 5,4’lük bir artış söz konusudur. Bu artış oranı fosil kaynaklar içindeki en yüksek olanıdır. 2011 yılında dünya enerji tüketiminin % 30,3’lük kısmının gerçekleştirildiği kömür 1969 yılından beri en yüksek enerji tüketim payına ulaşmıştır. OECD ülkelerindeki kömür tüketiminde 2011 yılında % 1,1’lik düşüş yaşanırken, OECD dışındaki ülkelere % 8,4’lük artış söz konusudur. Bu artışa en büyük katkıyı Çin % 9,7’lik tüketimi ile yapmıştır (Url-1).

Kömürün çevreye olan olumsuz etkileri düşünüldüğünde, dünyadaki kömür tüketiminde yaşanan artışlar üzerinde dikkatle durulması gereken bir konudur.

Kömürün yanması sonucu açığa azot, kükürt oksitler ve karbondioksit çıkar. Azot ve kükürt oksitler asit yağmurlarına neden olurken, karbondioksit ise neden olduğu sera etkisi ile yeryüzünden ısı biçiminde uzaya gitmekte olan radyasyonu önleyerek yer yüzeyinin sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. İklim değişikliğine neden olan bu durum bilim adamları tarafından çeşitli çalışmalar ile her geçen gün tekrar vurgulanmaktadır. Bu duruma dur denilmediği takdirde dünyanın ikliminde ani değişiklikler, atmosferdeki ısının hızlı bir şekilde artmasına paralel kutuplardaki buzulların erimesinin daha da hızlanması kaçınılmaz olacaktır. Bunun yaşanması durumunda denizlerde su seviyesinin artması ile bazı adaların ve kıyı bölgelerdeki yerleşimlerin sular altında kalması durumları yaşanabilir. İklimde yaşanacak değişikliklerin yaşatacağı kuraklık, sel ve fırtına gibi diğer doğal afetlerde yakın gelecek tehlikeleri olarak dünyanın önünde durmaktadır (Atlı, 2000).

Türkiye'nin fosil kaynaklar bakımından en zengin kaynakları kömürden oluşmaktadır. Kalite bakımından en niteliklisi olan taşkömürü Zonguldak bölgesinden çıkarılmaktadır. Türkiye genelindeki linyit kömürü rezervlerinin yarısından fazlası 1500 kcal/kg gibi oldukça düşük bir değere sahip iken 3000 kcal/kg ve üstü ısı değere sahip linyit rezervleri ise toplamın % 7'sini oluşturmaktadır. Bu yüzden üretilen linyit kömürünün büyük bölümü ısınma yerine elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 2010 yılı verilerine göre, elektrik üretiminde kömürün payı % 25,25'tir. Fakat kömürde de dışa bağımlılık söz konusudur. Kömüre dayalı gerçekleştirilen elektrik üretiminin % 6,89'luk payı ithal kömür ile gerçekleştirilmektedir (Url-2).

2.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

2.3.1 Hidrolik enerji

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en yaygın kullanıma sahip olanıdır. 2011 yılında dünyada hidrolik enerji üretimi % 1,6 artış göstermiştir. Bu 2003 yılından bu yana görülen en düşük artış oranıdır. Hidrolik enerji sudan elektrik üretme üzerine kurulu bir sistemdir. Üretilen enerjinin miktarı suyun debi ve düşü değişkenlerine bağlıdır. Bir hidroelektrik santralin en sakıncalı tarafı yük faktörünün su rejimine bağlı olarak değişken ve oldukça düşük olmasıdır (Ültanır, 1999).

Hidrolik enerji, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilir. Suyun potansiyel enerjisi türbinde kinetik enerjiye, türbine bağlı olan jeneratör aracılığıyla da elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Hidrolik enerjinin üretim yeri olan barajların doğal çevreye olan etkileri üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bir barajın yapımı ve öncesinde uzun süreli yağış, akış ve jeolojik etütler yapılmalıdır. Baraj yapım maliyetleri arazi için ödenen istimlak bedelleri ve baraj inşaatının yapım maliyetlerinden dolayı bir hayli yüksektir.

Türkiye'nin su kaynakları açısından durumuna bakıldığında su kaynağı bakımından zengin fakat yüksek debili akarsu bakımından fakir bir ülke olduğu gerçeği ile karşılaşılır. 2011 yılı verilerine göre, Türkiye'de üretilen elektriğin % 25,6'lık kısmının hidrolik enerjiden karşılandığını görülmektedir (Url-2).

2.3.2 Güneş enerjisi

Güneş ışınlarının aynalar ve mercekler yardımıyla yoğunlaştırılmasıyla yüksek sıcaklık değerleri elde edilmesi temeline dayanmaktadır. Güneş enerjisi ısıtma, sıcak su elde edilmesi ve elektrik üretmek amaçlı kullanılmaktadır. 2011 yılı verilerine göre, güneş enerjisi kullanımı dünyada % 85,6 oranında artmıştır. Fakat toplam enerji kaynakları içindeki payı halen çok azdır.

Güneş enerjisinden elektrik elde etme çalışmalarının başlangıcı 1839 yılına dayanmakta olup 1954 yılında Amerika'da Bell Telefon Laboratuvarlarında PV güneş pillerinin yapımı ile bu çalışmalar başarıya ulaşmıştır (Ültanır, 1997).

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan teknikler fotoelektrik dönüşümü, termoelektrik dönüşümü, fotovoltatik güneş pilleri ve termodinamik dönüşüm olarak sayılabilir.

Güneş ışığının elektrik kaynağı olarak kullanıldığı bazı uygulama alanları meteoroloji istasyonları, masa ve cep tipi hesap makineleri, deniz fenerleri, karavanlar, su pompaları, uydu alıcıları radar istasyonları, mobil evler ve hastaneler, sokak lambaları ve mobil telefonlar olarak sayılabilir (Celayır, 2008).

2.3.3 Rüzgar enerjisi

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi, en hızlı artış oranı ve ciddi üretim potansiyeline sahip olması dolayısıyla en fazla rağbet görenidir. Bu durumun temel nedenleri olarak rüzgar enerjisinden elektrik elde etme

teknolojisinde yaşanan önemli gelişmeler ve rüzgar enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin birim maliyetlerinin düşmesi sayılabilir. 2011 yılında dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji % 17,7'lik bir büyüme gerçekleştirirken, rüzgar enerjisinden üretilen enerji % 25,8'lik bir artış göstermiştir.

Türkiye, rüzgar enerjisinden elektrik üretmeye 1998 yılında başlamasına rağmen 2006 yılına kadar ciddi gelişmeler ve artışlar olmamıştır. 2007 yılı itibari ile rüzgar enerjisinden üretilen elektrikte ciddi anlamda artışlar yaşanmaya başlamıştır. Türkiye hali hazırda 2012 temmuz ayı itibariyle 2041,35 MW'lık kurulu gücü ile 48 000 MW olduğu düşünülen potansiyelinin % 4 gibi çok düşük bir oranından yararlanmaktadır.

Öte taraftan, dünya rüzgar santrali kurulu gücü 2011 yılı itibariyle 237 000 MW değerine ulaşmıştır. Türkiye'nin rüzgar kurulu gücünün dünyadaki kurulu güç içindeki payı % 0,8'dir. Rüzgar enerjisi çevreye herhangi bir atık bırakmayan ve tükenme sorunu bulunmayan çevre dostu bir enerjidir. Türkiye açısından rüzgar enerjisi dış ülkelere bağımlılık oluşturmaması, yerli ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması itibariyle çok büyük öneme sahiptir (Url-5).

Rüzgar türbinlerinin yapısına bakıldığında herhangi bir büyüklükte imal edilebilen ve tek olarak ya da gruplar halinde kurulabilen bir durum görülmektedir. Rüzgar türbinlerinin, inşaatının başlamasından üretime geçmesi 3 ay gibi kısa bir sürede gerçekleşmesi nedeniyle oldukça pratiktir (Uyar,1998).

2.3.4 Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli katmanlarında birikmiş basınç altındaki su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaların içindeki ısı enerjisi demektir. Daha basit bir anlatımla yağmur ve kar suları, yerkabuğundaki çatlaklardan aşağı katmanlara doğru inerken magmanın ısıttığı kayalık katmanlarla karşılaşır ve ısınır. Bunun sonucunda ısınan sular, sıcak su kaynakları, buhar veya sıcak su-buhar karışımı halinde yeryüzüne ulaşır. Eğer suyun doğal olarak dolaşabilmesi için uygun kırık ve çatlaklar yoksa, yapay borular gibi teknikler kullanılarak, sıcak kuru kayalar dahi jeotermal enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Konutların ısıtılmasında ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilen bir kaynaktır (Celayir, 2008).

Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü 97000 MW'tır. Elektrik dışı kullanım ise 33000 MW'tır. Türkiye zengin jeotermal kaynaklara sahip olup, potansiyeli ile

dünyada 7. sırada bulunmaktadır. Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyelinin 1500 MW'lık kısmı elektrik üretimine uygun olmakla birlikte, 2011 yılı sonu itibari ile kurulu gücü 401 MW düzeyindedir (Url-2).

2.3.5 Diğer yenilenebilir enerji kaynakları

Biyokütle ve dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynakları olarak sayılabilir. Biyokütle enerjisi bitki ve hayvan atıklarından elde edilen enerjidir. Hayvan atıklarından biyogaz ve bitkilerden elde edilen biyodizel bu yöntemin uygulamalarıdır. Uygulama şekillerinden biri enerji elde edilecek atık maddelerin güç santraline getirilmesi ve burada yakılması üzerine kuruludur. Bu yanma sonucu ortaya çıkan gazlar çeşitli işlemlerden geçirilerek elektrik enerjisi elde edilir. Bir diğer yol ise atık ve kalıntıları bekletme tankları denilen ortamlarda çürümeye bırakma temeline dayanmaktadır. Bu tanklarda çürüyen maddelerden metan gazı çıkar ve bu gaz ısıtma amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Dalga enerjisi günümüzde çok yaygın değildir. Bu durumun en önemli nedenlerinden biri dalga enerjisi türbinlerinin şiddetli fırtınalarda zarar görmesidir. Dalga enerjisinden elektrik üretmenin temel prensibi denizlerde oluşan dalgaların itme gücünden yararlanmaya dayanmaktadır.

2.4 Nükleer Enerji

Nükleer enerji santrallerinin çalışma prensibi kömürle çalışan termik santrallerin çalışma prensibine çok benzerdir. Termik santrallerde kömür yakılarak veya son yıllarda yaygınlaştığı üzere doğalgaz yakılarak su kaynatılır, böylece elde edilen buhar gücü ile türbinlerin dönmesi ve elektrik üretilmesi sağlanır. Nükleer enerji santrallerinde ise gerekli olan ısı, atomların bir reaktörde bölünmesi ile üretilir. Bu işlem için kullanılan elementler uranyum ve plütonyumdur.

Bir atom çekirdeğinde bazı değişikliklere yol açan tepkimede açığa çıkan enerjiye nükleer enerji denir. Nükleer tepkimede atomlarda bulunan nötron ve protonlardan oluşan atom çekirdeği değişikliğe uğrar. Bu tepkime sırasında atom kütlelerinin bir bölümü enerjiye dönüşür. Nükleer bir tepkimede, herhangi bir kimyasal tepkimede (petrol, doğalgaz ve kömürün yanması gibi) açığa çıkabilecek olan, milyonlarca katı kadar enerji açığa çıkar ve kimyasal tepkimeden farklı olarak bir element başka bir elemente dönüşür.

Nükleer tepkimeler çekirdek bölünmesi (filyon) ve çekirdek birleşmesi (füzyon) olmak üzere iki çeşittir. Çekirdek birleşmesi yoluyla nükleer enerji üretimi mümkün olmakla beraber, bunun zorluğu nedeniyle günümüzde kullanılan reaktörlerde, ağır atomların parçalanması ile açığa çıkan çekirdek bölünmesi enerjisinden yararlanılmaktadır. Atom çekirdeği bölünebilen elementlere "bölünebilir element" denir. Doğada bulunan tek bölünebilir element uranyumdur. Uranyum doğada iki ana biçiminin (izotopunun) bir karışımı halinde bulunur. Bu karışımın % 99'undan çoğunu uranyum-238 (U-238), % 1'den daha azını da uranyum-235 (U-235) oluşturur. Buradaki rakamlar kütle numarasını, yani çekirdekteki proton ve nötron sayılarının toplamını göstermektedir. U-238'in çekirdeğinde üç nötron fazlası vardır ve bu nedenle iki izotop, farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Yalnızca U-235'in atomları bölünebilir, U-238'in atomları ise kolayca bölünmeye uğramazlar, ama yüksek hızdaki nötronları soğurarak, daha ağır bir element olan plütonyum-239 atomlarına dönüşürler. Plütonyumun bu izotopu ise bölünebilir özelliktedir (Celayir, 2008).

Nükleer enerji tüketimi dünyada 2011 yılında % 4,3 azalmıştır. Bu azalışın sebeplerinin temelinde Japonya'da yaşanan deprem sonrası Fukuşima nükleer santralinde meydana gelen sorunlar neticesinde devre dışı kalması ve OECD ülkelerinin geneline bakıldığında yaşanan % 6,4'lük bir azalma bulunmaktadır. OECD ülkelerindeki azalışın nedeni bazı nükleer santrallerin devre dışı kalması ve yerinin bir başkası ile doldurulmaması olabilir (Url-1).

Türkiye yıllardır tartıştığı nükleer enerjiye geçme noktasında, geline son süreçler ile somut adımlarla ilerlemektedir. Mersin Akkuyu Nükleer Enerji santralinin yapım aşamaları ve süreçleri başlamış durumdadır. Enerji Bakanlığı'nın hedefleri içinde 2023 yılına kadar 3 nükleer santrale ulaşmak vardır. Türkiye kuracağı Akkuyu nükleer santrali ile 4800 MW'lık enerji üretmeyi amaçlamaktadır (Url-6).

3. RÜZGAR ENERJİSİ VE POTANSİYELİ

3.1 Rüzgarın Oluşumu ve Türleri

Rüzgar enerjisi ve potansiyelini daha iyi anlayabilmek için öncelikle rüzgarın özelliklerini anlamak gereklidir. Rüzgar güneşten gelen enerjinin yeryüzünün her noktasında eşit ısınma sağlayamamasının sonucunda sıcaklık farklılıkları oluşması ve buna bağlı olarak oluşan basınç farklılıkları neticesinde havanın yer değiştirmesi sonucu meydana gelir. Rüzgar oluşum sürecinden anlaşılacağı üzere rüzgar enerjisinin kaynağı güneştir. Bir başka şekilde tanımlanacak olursa, yeryüzünün farklı ısınma ve soğumasından ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketine rüzgar denir. Rüzgar oluşumunun nedeni olan farklı sıcaklık dağılımları ise enlem farklılıkları, kara-deniz etkileri, yeryüzü şekilleri ve mevsim etkisi ile ortaya çıkar. Meteorolojik açıdan genel bir bakışla rüzgar, basınç farkının yüksek olduğu yerlerde, yüksek engebeyesiz tepe ve vadilerde, kıyı şeritlerinde, kanal etkilerinin meydana getirdiği dağ silsilelerinde oluşur (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgar enerjisinin oluşumu ise ısı enerjisinin hareket enerjisine dönüşmesi ile gerçekleşir. Hareket enerjisi ne kadar artarsa rüzgarın taşıdığı enerji de artacağından, rüzgar hızı rüzgarın sahip olduğu enerji potansiyelinin anlaşılmasında en önemli değişkendir. Kısacası, rüzgar hızı bir bölgedeki rüzgar potansiyelinin en önemli göstergesidir. Bu yüzden rüzgar hızını etkileyen faktörlerin incelenmesi rüzgar potansiyeli açısından oldukça önemlidir. Rüzgarın farklı hızlarda olmasının temel nedeni yeryüzünün topografik yapısıdır. Topografik yapı olarak bölgenin bitki yapısı, akarsuları, gölleri, denizleri, dağları, tepeleri ve o bölgedeki insan yapımı binalar sayılabilir. Bu yüzden herhangi bir bölgedeki rüzgar potansiyelinin saptanması ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerine uygun yer seçilebilmesi için kuvvetli ve zayıf rüzgar alanlarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekir.

Atmosferde meydana gelen hareketler, alan ve zaman ölçeklerine göre 4 farklı kategoride değerlendirilmektedir. Bu kategoriler Çizelge 3.1 de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Atmosferik hareketlerin alan ve zaman ölçeği.

Adı	Zaman Ölçeği	Uzunluk	Örnek
Genel Sirkülasyon	Hafta-Yıl	1000 km-40000 km	Ticaret Rüzgarları, Jet Akımı
Sinoptik Ölçek	Gün-Hafta	100 km-5000 km	Basınç Sistemleri, Tayfun
Mezo Ölçek	Dakika-Gün	1km-100 km	Meltem, Oraj, Tayfun
Mikro Ölçek	Saniye-Dakika	< 1 km	Türbülans

Yeryüzünde meydana gelen rüzgarları küresel ve yerel rüzgarlar olarak iki gruba ayırmak mümkündür (Durak ve Özer, 2008).

3.1.1 Küresel rüzgarlar

Daha önce de bahsedildiği üzere rüzgar, dünya yüzeyi üzerinde basınç farklılıklarının oluşması sonucu ortaya çıkmaktadır. Yeryüzü tarafından emilen güneş radyasyonu miktarı, kutuplara göre ekvator da daha fazladır. Bunun sonucu ekvatora yakın bölgeler daha fazla ısınırken kutuplara yakın bölgeler daha az ısınmaktadır. Ortaya çıkan bu ısı farklılıkları atmosferin en alt tabakası olan troposferde çeşitli küresel ölçekte sirkülasyonların oluşumuna neden olmaktadır. Rüzgar enerjisi uygulamalarında kullanılan rüzgarlar, yerel rüzgarlar olmasına rağmen dünyanın genel sirkülasyonuna bakmak rüzgarın genel karakteristiğini anlamak açısından önemlidir. Küresel ölçekte meydana gelen rüzgarlara atmosferin genel sirkülasyonları denir. Bunlar tropikal rüzgarlar, musonlar, orta enlem rüzgarları ve kutup rüzgarları olmak üzere dört ana başlıkta toplanırlar (Durak ve Özer, 2008).

3.1.2 Yerel rüzgarlar

Rüzgar enerjisi uygulamalarında kullanılan rüzgarlar yerel rüzgarlardır. Genellikle karalar ile denizlerin etkileşimi, gündüz ile gece etkileşimi, topografya ve kanal etkisi gibi sebeplerden ortaya çıkarlar (Durak ve Özer, 2008).

3.1.2.1 Kara ve deniz meltemleri

Kara ve deniz meltemleri, kara ile deniz arasındaki sıcaklık farkının bir sonucudur. Deniz melteminin gelişimi genellikle sabah başlar ve öğleden sonra son bulur. Kara meltemi ise, geceleyin başlar ve birkaç saatte son bulur. Kara meltemi, deniz meltemine göre daha zayıftır. Deniz meltemi daha pürüzsüz deniz yüzeyi üzerinden geldiğinden sürtünme etkisinden daha az etkilenir ve hızı daha fazladır. Deniz meltemleri nemli ve tuzlu hava taşıdığından, denize yakın yerdeki rüzgar enerji santralleri daha az ömürlü olabilmektedir (Durak ve Özer, 2008).

3.1.2.2 Dağ ve vadi rüzgarları

Dağ yamaçları güneşten gelen radyasyonla gün boyunca ısınır. Dolayısıyla sıcak olan bu yamaçlar ile temas halindeki vadi ısınır. Isınan hava yamaçlar boyunca yükselmeye başlar. Yükselen havanın yerine yukardan düşey olarak daha soğuk ve ağır olan hava geçer. Belirli bir süre sonra bu havada ısınır ve yükselir. Bu işlem gün boyunca devam eder ve bir çevrim oluşturur. Geceleri aynı çevrim tersine döner. Bu yüzden vadi rüzgarları, geceleri yamaçtan vadiye doğru eser. Vadideki hava gün boyu ısındığından, eğimli yüzey boyunca yükselir ve buna anabatik rüzgar denir. 3 m/s civarında olan ve enerji üretimi için yetersiz olan anabatik rüzgarlar, bazen türbülansın artmasıyla sırtlarda bulunan rüzgar türbinleri için önemli olabilmektedir. Dağ yüzeyindeki hava gece boyunca soğuduğundan, vadiye doğru hareket eder, bu şekilde oluşan rüzgara da katabatik rüzgar denir. Katabatik rüzgarlar bazen çok güçlü olabilmektedirler. Karla örtülü step eğimlerinde kuvvetlidirler. Bu rüzgarlar, vadi ve geçite yönlendiğinde daha da hız kazanır (Durak ve Özer, 2008).

3.1.2.3 Türkiye’yi etkileyen hava kütleleri ve yerel rüzgarlar

Hava kütlesi, aynı özelliklere sahip (uniform) büyük bir yüzey üzerinde, bu yüzeyle denge durumuna erişinceye kadar kalan yatay doğrultuda, özellikle sıcaklık ve nem bakımından homojen olan büyük hava parçalarıdır. Türkiye soğuk aylarda kutuplardan gelen kutupsal, sıcak aylarda ise tropiklerden gelen tropikal hava kütlelerinin etkisi altındadır.

Rüzgârlar estikleri yönlere göre isim alırlar. Kuzeyden esen rüzgara yıldız, güneyden esene kible, doğudan esene gündoğusu, batıdan esene günbatısı, kuzeydoğudan esene poyraz, kuzeybatıdan esene karayel, güneydoğudan esene keşişleme, güneybatıdan esene ise lodos denir. Bu rüzgarlardan bazılarının özellikleri aşağıda verilmiştir:

İmbat: İzmir ve çevresinde Ege denizinden yazın tam kuzeyden esen meltem rüzgarıdır.

Karayel: Kuzeybatı yönünden esen rüzgarlara verilen addır. Geçici siklonların ülkemize sokulduğu kış mevsimlerinde görülür. Siklonların soğuk cephesinin geçişini izler. Genellikle sıcakların düşmesine ve yağmur veya kar yağışına sebep olur.

Lodos: Güneybatıdan esen rüzgarlara verilen addır. Gezici siklonlarının (fırtına) ülkemize sokulduğu kış mevsiminde çok görülür. Bu siklonların sıcak cephesinin

geçişini izler. Sıcaklıkların yükselmesine neden olur. Lodos özellikle İstanbul bölgesinde görülen güneybatılı bir rüzgardır. Daha çok kış aylarında görülür. Sıcak ve nemli rüzgarlardır.

Poyraz: Özellikle kış mevsiminde daha sık görülür. Bu mevsimde Türkiye üzerine Rusya ve Sibiryâ üzerinden kutupsal havayı getirir. Sıcaklığın belirgin olarak düşmesine neden olur. Yaz mevsiminde aşırı yüksek basınç alanından Basra üzerindeki alçak basınç alanına doğru ilerleyen hava kütlelerinin Ege ve Türkiye üzerinde sapmaya uğraması sonucu kuzey doğudan esen poyraza dönüşür. Bu mevsimde serinletici etkisi vardır. Karadeniz, Marmara ve İç Anadolu bölgelerinde kuzeydoğudan esen soğuk ve şiddetli rüzgardır. Poyraz İstanbul ve civarının hâkim rüzgarıdır (Durak ve Özer, 2008).

3.2 Rüzgar Enerjisi ve Potansiyeli

3.2.1 Rüzgar enerjisinin tarihi

İnsanlık tarihine bakıldığı zaman, rüzgar kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. Rüzgar enerjisinden yararlanma konusunda tahıl öğütme ve yelkenli gemilerin yözdürülmesi ilk uygulamalar olarak karşımıza çıkmaktadır. M.Ö. 5000 yıllarında Nil nehrinde kayıkları hareket ettirmek için rüzgar enerjisinden yararlanılırken, Çin’de basit yel değirmenleriyle su pompalamak için yararlanılmıştır. M.Ö. 2000’li yılların başında Babil uygarlığı tarafından bir pervane ile mile bağlanmış dairesel hareket üreten ilk gerçek yel değirmeni inşa edilmiştir. M.Ö. 700 yıllarına gelindiğinde ise İranlıların düşey eksenli yel değirmenleri kullandığı bugüne değin yaşamayı başarmış somut kanıtları ile bilinmektedir. Rüzgar enerjisi hakkında ilk yazılı bilgiler M.Ö. 200-300 yıllarında yatay eksenli yel değirmenleri ile ilgilidir (Durak ve Özer, 2008).

Birçok konuda yaşanan gelişimlerin tarihsel sürecinde görüldüğü üzere rüzgar enerjisinden yararlanma Asya medeniyetleri ile başlamıştır. Avrupa’nın ise rüzgar enerjisi kullanımı ile tanışmasının 10. yüzyıl civarında Asya’dan Avrupa’ya geçişiyle olduğu düşünülmektedir. Bu geçişin ilk belirtileri olarak 11. ve 12. yüzyılda İngiltere’de yel değirmenlerinin kullanımı olarak görülmektedir. Ayrıca, Haçlı seferlerinin de birçok yeniliğin Asya’dan Avrupa’ya geçişinde üstlendiği rol burada da karşımıza çıkmaktadır. 1190’lı yıllardaki Haçlı Seferleri sırasında Almanlar yel

değirmenlerini Suriye'den ülkelerine götürmüşlerdir. Ortaçağdan bu yana kullanılan yel değirmenleri, kuyulardan su çekmek ve tahıl öğütmek amacı ile kullanılmıştır. Hollanda ve Akdeniz'deki birçok adada somut örnekleri görülmektedir (Özgür, 2006).

Türkiye coğrafyasında da yel değirmenlerinin kullanımı çok eski tarihlere dayanmaktadır. Tarihi kaynaklarda, İstanbul'un Kadıköy ilçesindeki Yel Değirmeni Semti'nin ismini o bölgede bulunan çok sayıdaki değirmenden aldığı belirtilmektedir. Türkiye'deki yel değirmeni ile ilgili en eski bulgular eski Troya Uygarlığı'na kadar gitmekte olup Anadolu'da ilk yel değirmeninin ne zaman kurulduğu bilinmemektedir. M.S. 1389 tarihli bir askeri haritaya göre, İzmir Körfezi boyunca yel değirmenleri görülmektedir (Özgür, 2006).

Günümüze gelindiğinde rüzgar enerjisi elektrik elde etme ve su pompalama gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinden elektrik elde etme fikri, ilk olarak Danimarkalı meteorologist Poul la Cour tarafından düşünülmüştür. Aynı zamanda aerodinamik çalışmalarda da bulunan Poul la Cour, Danimarka'da kurduğu Askow Folk High School'da rüzgar enerjisi ile ilgili dersler vermiş ve 1897 yılında da 89 W gücünde ilk elektrik üretim amaçlı rüzgar türbinini yapmıştır (Durak ve Özer, 2008). Danimarka'da 1940-1950'li yıllar boyunca mühendislik şirketi olan F.L. Smidth 2 ve 3 kanatlı rüzgar türbinleri yapmıştır. 1942 yılında Bogo adasında kurulmuş olan rüzgar türbini, rüzgar-dizel sistemine göre çalışan hibrit bir sistem olup o dönemlerde adanın elektrik ihtiyacını karşılamıştır. Poul la Cour'un ilk öğrencilerinden olan Johannes Jual, 1950 yılında ilk alternatif akım ile çalışan rüzgar türbinini geliştirmiştir. 1956 yılında 200 kW kurulu gücünde Gedser rüzgar türbini Danimarka'nın güneyinde çalışmaya başlamıştır. Modern rüzgar türbinlerinin öncüsü niteliğindeki bu türbinler, elektromekanik dönüş sistemi ve asenkron jeneratöre aynı zamanda aerodinamik uç fren sistemine de sahiptirler (Özgür, 2006; Ackerman ve diğ; 2003).

Bu gelişmelerin paralelinde Amerika'da 1920 lerin sonunda, elektriği olmayan kırsal alanlarda küçük yel değirmenleri elektrik üretiminde kullanılmıştır. Amerika'da 1920 ile 1930 yılları arasında yel değirmenlerinin kullanımında büyük bir artış yaşanmıştır. Çeşitli tiplerdeki Amerikan yel değirmenleri, zirai amaçlı olarak halen bütün dünyada kullanılmaktadır. 1930 ve 1940'larda, elektrik üreten binlerce yel değirmeni Amerika'da inşa edilmiş olup bu türbinlerin elektrik jeneratörünü hareket ettiren, yüksek hızlarda dönen iki veya üç kanatları bulunmaktadır. Bunlar, elektrik

hattının ulaşamadığı çiftliklere elektrik sağlamada ve tipik akü depolamada kullanılmıştır.

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra petrol fiyatlarının düşmesiyle, rüzgar türbinlerine olan ilgi azalmıştır. Danimarka'da 1960'ların ortasına kadar çalışan Gedser rüzgar türbini, fosil yakıtların fiyatlarının düşmesiyle rüzgar enerjisinin tekrar pahalı duruma gelmesi sonucu yerini buhar ile çalışan türbinlere bırakmıştır. Bundan sonra 1970'li yıllara kadar rüzgar enerjisinde hızlı bir gelişme olmamıştır. Fakat 1970'li yıllardaki petrol krizi ve 1980'li yıllardan itibaren artan çevre bilinci, insanlığı yeni enerji kaynakları aramaya itmiştir. Bu araştırmalar sonucunda rüzgar enerjisi tekrar önem kazanmış ve rüzgar çiftliklerinin Amerika ve Avrupa için yararlı olacağı görülmüştür. 1970'lerden itibaren gelişmeye başlayan rüzgar teknolojisinin, özellikle 1995 yılı itibarıyla gösterdiği gelişim çok dikkat çekicidir. 1995'li yıllara kadar kW mertebesinde olan rüzgar türbinleri 1995'li yıllardan sonra MW mertebesine yükselmiştir. Kurulu güç artışı ile beraber rüzgar türbinlerinin pervane çapında da artışlar görülmüştür. Artan kurulu güç ile beraber, rüzgar türbinlerinin sadece pervane çapı değil, boyları da uzamıştır. 1960'lı yıllarda 20 m civarında olan rüzgar türbin boyları 2000'li yıllara gelindiğinde 120 metreye kadar ulaşmıştır (Durak ve Özer, 2008).

3.2.2 Dünyada rüzgar enerjisinin durumu

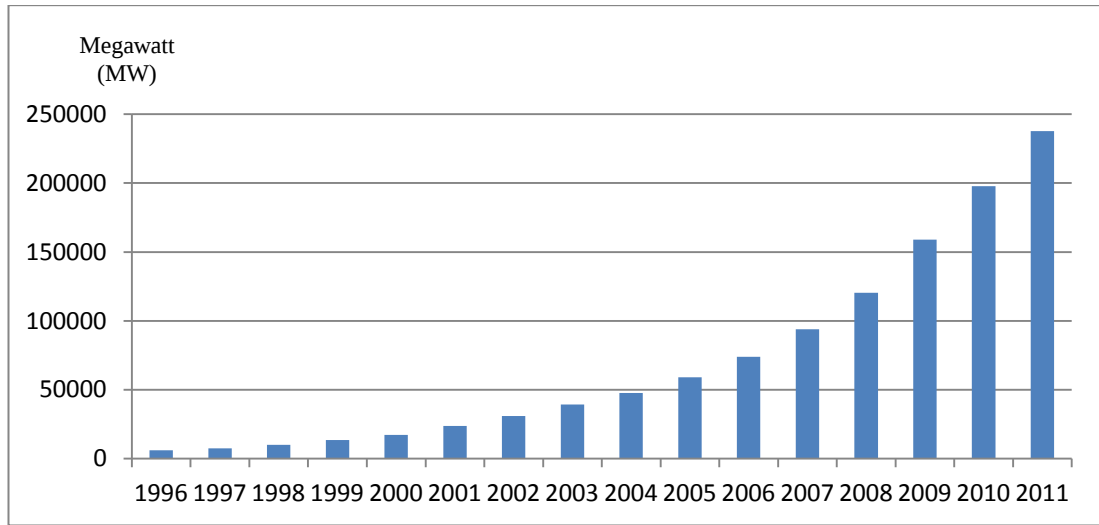
Rüzgarın tarihsel süreci anlatılırken değinildiği üzere, dünyada modern anlamda rüzgar enerjisi kullanımının 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi ile başladığı kabul edilmektedir. Bu kriz başka enerji kaynaklarına yönelik araştırmaların ve çalışmaların hızlanmasını sağlamıştır. Ayrıca, fosil kaynaklarının ömrünün oldukça sınırlı olması ve çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimine ağırlık verilmiştir. Bu yönelimin sonucu rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi dönüşüm sistemleri ve elektrik enerjisi üretim maliyetleri fosil yakıtlı güç santralleriyle rekabet edebilecek düzeylere inmiştir.

1980'li yıllarda yürütülen çalışmalar sonucu ABD, Danimarka, Hollanda, İngiltere ve İsveç'in katkılarıyla, deniz üstünde kıyıdan uzak rüzgar santralleri teknolojisi geliştirilmiş ve Avrupa'nın ilk deniz üstü rüzgar türbini olan İsveç'teki 220 kW'lık Nagersund türbini 1990'da işletmeye alınmıştır. 11x450 kW'lık makinelerden oluşan

Danimarka'nın Vindeby adasında kurulmuş olan 5 MW'lık çiftlik ise dünyanın ilk deniz üstü rüzgar çiftliğidir.

1980'lerde, Amerika'da vergi kredileri ile desteklenen rüzgar endüstrisi, çok hızlı bir gelişim dönemine girmiş ve bu gelişim süreci, 1980-1990 yılları arasında rüzgar türbin maliyetlerinin % 80 azalmasına yol açmıştır. 1989 yılında California Enerji Komisyonu, santralleri tüm ömürleri göz önüne alınarak yakıt, yatırım ve işletme maliyetleri değerlendirildiğinde, rüzgar enerjisinin diğer tüm geleneksel enerji kaynaklarından daha ucuz olduğu sonucuna varmıştır. 1989 yılında California'da bulunan rüzgar santralleri San Francisco'nun bir yıllık ihtiyacına yetecek kadar elektrik üretmeyi başarmıştır (Uyar,1998).

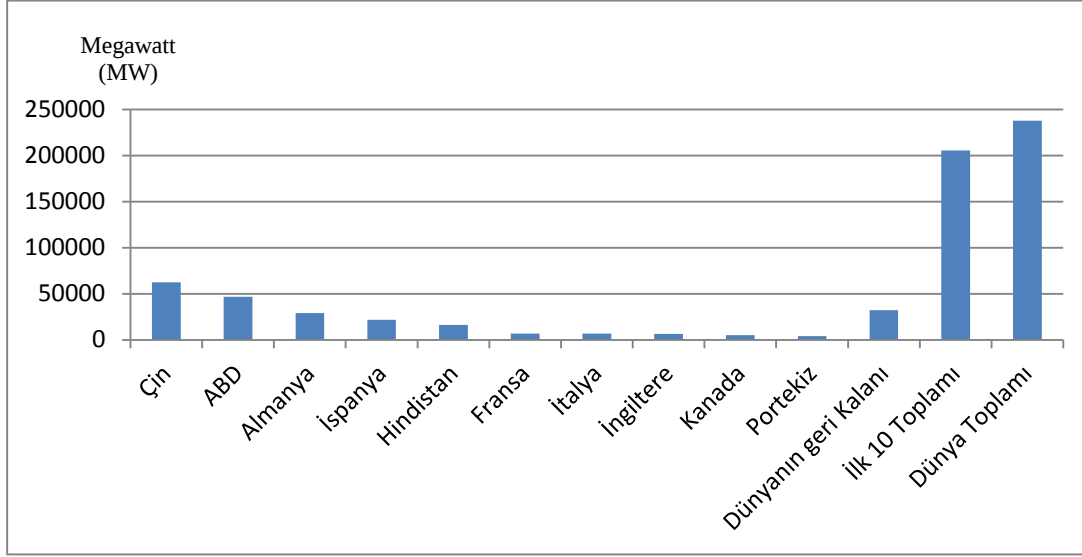
Amerikan rüzgar endüstrisinin kurulması, rüzgar enerjisi alanındaki çok büyük gelişmelerin temelini oluşturmaktadır. 1982-1992 yılları arasında Kaliforniya'da, yaklaşık 15 000 rüzgar türbini kurulmuş, 1993 yılında bu çiftliklerden 3 milyar kWh elektrik üretilmiştir.



Şekil 3.1 : Küresel kümülatif kurulu rüzgar gücü kapasitesi değişimi.

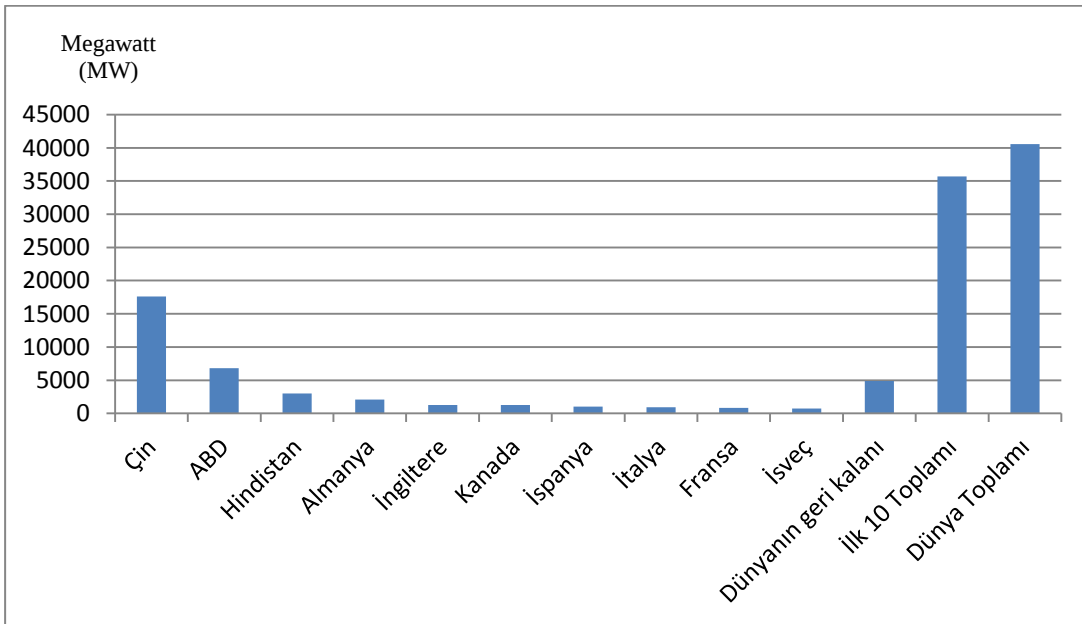
Şekil 3.1'de görüleceği üzere, 1996 yılından 2011 yılına kadar dünyanın kurulu rüzgar gücü kapasitesinin sürekli arttığı görülmektedir. 1996'da 6100 MW olan kapasite, 2011'de 237 669 MW değerine ulaşmıştır. 1996 yılından 2011 yılına kadar yaklaşık 39 kat artan bir kurulu güç kapasitesi göze çarpmaktadır. 2010 ile 2011 kurulu güç kapasitelerine bakıldığında yaklaşık % 20'lik artış görülmektedir. Bu veriler rüzgar enerjisinin Dünya'daki artan değerini gözler önüne sermektedir. Dünya'da kurulu rüzgar gücü kapasitesi bakımından ilk 10 ülke sıralaması ve bu kapasitelerin miktarsal dağılımı Şekil 3.2'de görülmektedir. Dünya'da 2011 yılında

kurulan rüzgar santrallerinin, kurulu güçlere göre dağılımında ilk 10 ülke sıralaması Şekil 3.3'te görülmektedir (Url-3).



Şekil 3.2 : Dünya kurulu rüzgar gücü kapasitesi ilk 10 ülke sıralaması.

Şekil 3.2 ve 3.3'ten görüleceği üzere, Çin ve ABD rüzgar enerjisinden elektrik üretme noktasında gerek kurulu güçler, gerekse yeni rüzgar santralleri kurulumları bakımından başı çeken ülkelerdir. Almanya, İspanya ve Hindistan hali hazırda önemli kurulu güç kapasitelerine sahip ve halen bu kapasitelerini artırma noktasında önemli atılımlar göstermektedirler.



Şekil 3.3 : 2011 yılı rüzgar santrali kurulum kapasitelerinin ülkelere göre dağılımı.

3.2.3 Türkiye’de rüzgar enerjisinin durumu

Türkiye’nin ihtiyaç duyduğu enerji günden güne artmaktadır. Kalkınmanın itici gücü olan enerji kaynaklarının çeşitlilik bakımından neredeyse tamamına sahip Türkiye’de, fosil yakıt tabanlı yerli kaynaklar miktar bakımından yeterli değildir. Dünya genelinde olduğu gibi Türkiye’de de enerji ihtiyacı büyük oranda fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu nedenle günümüzün en önemli enerji kaynakları olan doğalgaz ve petrol bakımından Türkiye dışa bağımlıdır (Yiğitgüden, 2001; Gökçınar, 2008). Türkiye fosil kaynaklardan olan kömür bakımından, petrol ve doğalgaz ile kıyaslandığında oldukça iyi durumdadır. Bu kaynak durumu düşünüldüğünde, elektrik enerjisi üretiminin büyük ölçüde fosil kaynaklı yakıtlar ile sağlanması Türkiye açısından hiçte sürdürülebilir bir politika değildir. 2011 yılı Elektrik Piyasası Kurulu’nun yayınladığı istatistik raporundaki elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklara göre dağılım Çizelge 3.2’de görülmektedir. Bu veri ışığında Türkiye’nin 2011 yılında doğalgaz ile üretilen elektrik miktarının % 44,7’lik bir orana ulaşması dikkate değer bir noktadır. Alternatif enerji kaynak arayışları bu nedenle Türkiye açısından çok önemlidir. Bu noktada yenilebilir enerji kaynakları olan rüzgar, güneş ve jeotermal bakımından zengin potansiyellere sahip olan Türkiye, bu kaynaklarını verimli kullanmanın yollarını aramak zorundadır.

Çizelge 3.2 : Türkiye’de elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı.

Kaynak	Toplam Üretimdeki Payı (%)
Doğalgaz	44,7
Hidrolik	22,8
Linyit	16,9
İthal Kömür	10
Rüzgar	2,1
Fuel-oil	1,5
Diğerleri	2
Toplam	100

Son yıllarda rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri teknolojisinde yaşanan gelişmeler ve bunun sonucu rüzgardan elektrik üretim maliyetlerin büyük düşüşler göstermesi sonucu diğer yenilebilir enerjiler ile kıyaslandığında ön plana çıkmıştır. Çizelge 3.3 elektrik enerjisi üretim birim maliyetlerinin enerji kaynak çeşitlerine göre değerleri verilmiştir. Türkiye üç tarafının denizlerle çevrili olması ve yaklaşık 3500 km kıyı şeridine sahip olmasının sonucu özellikle Marmara ve Ege kıyı şeritlerinde sürekli ve

düzenli rüzgarlar almaktadır. Rüzgar potansiyeli bakımından Türkiye, Avrupa'nın en zengin ülkelerinden birisi olmakla beraber bunu değerlendirme açısından iyi bir yerde değildir. Bu nedenle enerji kaynakları bakımından dışa bağımlı durumda olan Türkiye'nin bu potansiyelini iyi kullanması önem taşımaktadır (Öztürk ve diğ., 2006). Fakat bu noktada mevcut duruma bakıldığında rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere, % 2,1'lik pay ile Türkiye'nin toplam üretiminin içinde oldukça yetersiz bir şekilde yer almaktadır (Url-2).

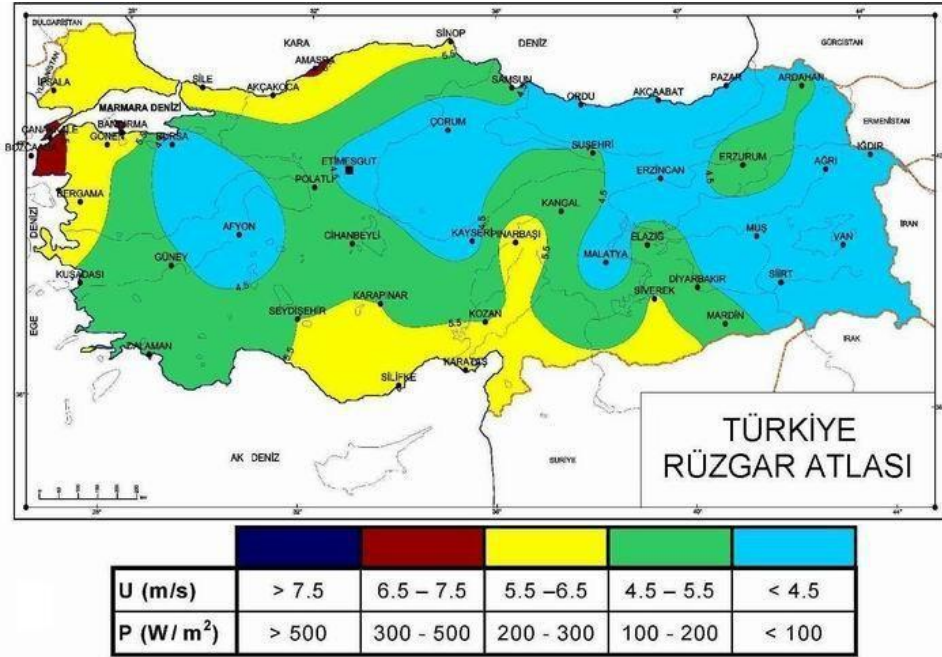
Türkiye'de rüzgar enerjisinin gelişim süreci incelendiğinde gerçek anlamıyla rüzgar enerjisi çalışmalarının 1996 yılında başladığı söylenebilir. Üç türbinden oluşan ve 1,5 MW kurulu güce sahip olan ilk santral 1998 yılında Germiyan'da kurulmuş ve "Oto Prodüktör" statüde üretime başlamıştır. Alaçatı'da toplam 7,2 MW (12x600kW) kurulu güce sahip ikinci santral yine aynı yıl kurulmuştur. 2000 yılında Çanakkale Bozcaada'da toplam kurulu gücü 10,2 MW (17x600kW) olan diğer bir santral kurulmuştur. Gerçek anlamda Türkiye'de rüzgar enerjisinden yararlanma 2007 yılı itibari ile ivme kazanmış ve 2012 Temmuz ayına kadar olan veriler ışığında 2041 MW'lık kurulu güce ulaşıldığı görülmektedir (Url-1).

Çizelge 3.3 : Elektrik üretiminde kaynaklara göre birim maliyetler (EİE).

Enerji Kaynağı	Enerji Maliyeti (\$ cent / kWh)
Kömür	4,8 - 5,5
Doğal Gaz	3,9 - 4,4
Hidroelektrik	5,1 - 11,3
Biyokütle	5,8 - 11,6
Nükleer	11,1 - 14,5
Rüzgar	4,0 - 6,0

Rüzgar potansiyeli çalışmalarının başında Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİE) tarafından 2007 yılı başlarında Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası (REPA) oluşturulması gelmektedir. REPA orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar hızı kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası'dır. REPA ile denizlerde, kıyılarda ve yüksek rakımlı bölgelerde daha önce ölçülemeyen yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir. Şekil 3.4'de Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyel atlası görülmektedir. Bu haritada 30 m yükseklikteki bölge bölge ortalama rüzgar hızları gösterilmektedir. Bu haritada mavi renkten kahverengi renge doğru gidildikçe

ortalama rüzgar hızları artmaktadır. Santral kurulumunda arazinin engebeli olmaması veya deniz gibi sürtünmesiz yüzeylere yakın ve bu yüzeylerde olması tercih edilir. Türkiye gibi üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke için santral kurulumlarında bu ölçüler düşünüldüğünde uygun yerlerin oldukça fazla olduğu söylenebilir. Şekil 3.4'teki haritaya bakıldığında batı kıyıları özellikle Çanakkale ili ve çevresindeki bölgelerin santral kurulumu için elverişli olduğu görülmektedir.

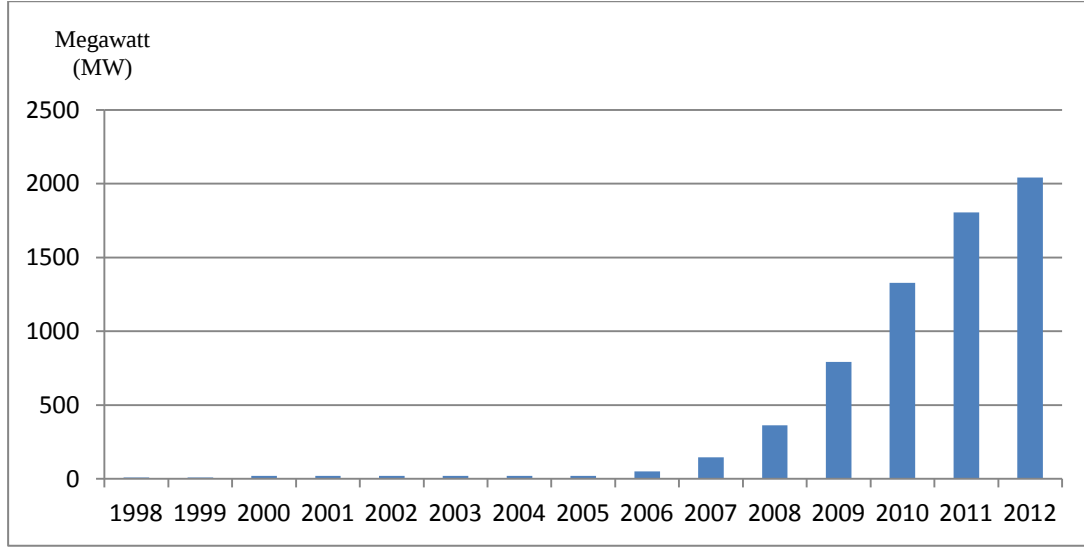


* Açık yüzeyler için (yer düzeyinden 50 m yükseklikteki) rüzgar potansiyeli sınıf aralıkları

Şekil 3.4 : Türkiye rüzgar enerji potansiyeli atlası (REPA).

Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeline sayısal veriler açısından bakıldığında rüzgar santralleri ile ilgili teknik potansiyelinin 83000 MW olduğu düşünülmektedir. Bu potansiyel, rüzgar enerjisi üretimi ve kullanımının % 30 kapasite ile yapıldığı dikkate alındığında yıllık 238 milyar kWh enerji üretimine denk gelmektedir. Bu duruma göre, Türkiye'nin şu anki enerji ihtiyacı bu santrallerden karşılanabilir durumdadır. Fakat maliyet olarak düşünüldüğünde Türkiye'nin sahip olabileceği kurulu güç en az 20000 MW değerinde olup, bu güçten üreteceği enerji miktarı ise 53 milyar kWh'dir (Öztürk ve diğ, 2006). Şekil 3.5'de Türkiye'nin rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından kümülatif dağılımının yıllar içindeki değişimi gösterilmiştir. Bu veriler ve Şekil 3.5'te görülmekte olan Türkiye'nin 2012 yılı temmuz ayı itibari ile kurulu rüzgar gücü kapasitesi olan 2041,35 MW değeri gösteriyor ki Türkiye'nin rüzgar enerjisinden yararlanma noktasında alması gereken önemli mesafeler bulunmaktadır. Türkiye'de rüzgar enerji santrali kurulumlarının artması için gerekli

verilerin hem daha kolay ulaşılabilir olması, hem de yardımcı programlar yardımıyla fizibilite çalışmalarının doğru ve kısa sürelerde yapılabilmesi önem taşımaktadır. Bu noktada bu tez çalışması bir bölgenin rüzgar potansiyeli belirlenmesinde eldeki verilere matematiksel bir yöntem olan dalgacık dönüşümü tekniğini uygulayarak, yeni bir bakış açısı getirmesi bakımından önemlidir.



Şekil 3.5 : Türkiye’de kurulu rüzgar gücünün yıllara göre kümülatif değişimi.

3.2.4 Rüzgar enerji santralleri

Rüzgar enerjisi üretmeye elverişli olan bir yere rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürülebilecek türbinlerin kurulmasıyla ortaya çıkan sahaya rüzgar santrali (rüzgar çiftliği) adı verilir. Rüzgar santralleri yaklaşık 100-200 m aralıklarla rüzgar türbinlerinin yerleştirilmesiyle ortaya çıkar. Rüzgar santrallerinin ana elemanı rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çeviren rüzgar türbidir. Rüzgar türbinlerinin çalışma prensibi rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, ardından da bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek üzerine kuruludur. Rüzgar türbininin temel elemanları kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri, elektrik-elektronik ekipmanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye dönüştürülür. Rotor milinin devir hareketi artırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Modern rüzgar türbinleri aerodinamik olarak rüzgarın sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinden yararlanarak çalışır. Sürüklenme kuvveti rüzgarın esme yönünde türbin yüzeyine rüzgar tarafından yapılan basınç kuvveti, kaldırma kuvveti ise esme yönüne dik olan kuvvettir.

3.2.4.1 Rüzgar enerji türbinleri

Rüzgar enerji türbinleri yatay , düşey ve eğik eksenli olmak üzere dönme eksenini ile rüzgar akımı arasındaki konumlarına göre üç başlıkta sınıflandırılırlar (Altuner, 2009).

Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Dönme eksenini ile rüzgar akım çizgilerinin paralel konumda olduğu rüzgar türbinleridir. Kanatları rüzgar yönüyle dik açı yapar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerin yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır.

Yatay eksenli türbinlere örnek olarak pervane tipi rüzgâr türbinleri verilebilir. Bu tip türbinlerin kanatları tek parça olabileceği gibi iki ve daha fazla parçadan da oluşabilir. Günümüzde en çok kullanılan tip üç kanatlı olanlardır. Bu türbinler elektrik üretmek için kullanılır. Geçmişte çok kanatlı türbinler tahıl öğütme, su pompalamak ve ağaç kesmek için kullanılmıştır. Yatay eksenli elektrik üreten üç kanatlı rüzgar türbinleri Şekil 3.6’da görülmektedir (Altuner, 2009).



Şekil 3.6 : Yatay eksenli elektrik üreten üç kanatlı rüzgar türbinleri.

DüŖey eksenli rüzgar türbinleri

Dönme eksenini ile rüzgar akım çizgilerinin birbirine dik konumda olduğu rüzgar türbinleridir. Daha çok deney amaçlı üretilirler. Ticari kullanımları çok azdır (Altuner, 2009). Bu türbinlerin sağladığı avantajlar şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez ve böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur ve dolayısıyla dümen sistemi gerekmez.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakımı ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi kolaydır.

Bu türbinlerin dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

- Yere yakın oldukları için bulundukları yüksekliklerde rüzgar hızları düşüktür ve bu nedenle verimleri de düşüktür.
- Çalışmaya başlayabilmesi için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyaç vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gereklidir, bu durum da hiç pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir.

DüŖey eksenli rüzgar türbini örneği Şekil 3.7’de görölmektedir.



Şekil 3.7 : DüŖey eksenli rüzgar türbini.

Eğik eksenli rüzgar türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle rüzgar yönünde belirli bir açu yapan rüzgar türbinlerdir. Ayrıca kanatlar ve dönme eksenini arasında da belirli bir açu bulunmaktadır. Yaygın bir kullanım alanı yoktur (Altuner, 2009).

3.2.5 Rüzgar türbinleri için yer seçimi

Rüzgar enerjisinden, maksimum verim elde edebilmek için rüzgar türbinlerinin yerlerinin seçimi en önemli aşamadır. Yer seçiminde güç verimini arttırmak için sistemin ömrünü azaltan, bakım masraflarını artıran kuvvetli türbölans bölgelerinden kaçınmak gerekir. Rüzgar türbini monte edilmeden önce, rüzgar enerjisi maliyeti hassas olarak belirlenmelidir. Böyle bir değerlendirme türbin yerleşim alanındaki rüzgar karakteristiklerinin iyi bilinmesini gerektirir. Rüzgar değışken ve yerleşim alanına bağılı olduğundan, bir rüzgar türbininin mevcut üretim sistemlerinden farklı bir değerlendirmeye tabi tutulması gerekir.

4. RÜZGAR POTANSİYELİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ

4.1 Rüzgar Enerjisinin Genel Karakteristiği

Rüzgar enerjisinin taşımakta olduğu enerji hareket temeline dayanan kinetik enerjidir. Bir cismin taşıdığı kinetik enerji (4.1) eşitliği ile ifade edilir.

$$KE = \frac{1}{2}mV^2 \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte m cismin kütlesini ve V cismin hızını göstermektedir. Rüzgarın kinetik enerjisinin hesaplanması ise klasik kinetik enerji denklemindeki kütlenin yerini birim zamandaki kütleli debiye bırakması ile gerçekleşir. Kütleli debi (4.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$\dot{m} = \rho AV \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte $\dot{m}$ kütleli debiyi, ρ havanın yoğunluğunu, A rüzgarın akış alanını ve V rüzgar hızını temsil etmektedir. Kütleli debi kullanılarak yazılan rüzgarın güç denklemi ise (4.3) eşitliğinde görülmektedir.

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte P ; rüzgar gücünü göstermektedir. Rüzgar gücünü etkileyen en önemli faktör rüzgarın hızıdır. Çünkü rüzgar akımının taşıdığı enerji rüzgar hızının kübü ile orantılı artmaktadır. Bir diğer etkili faktör ise havanın yoğunluğudur. Bu denklemde akış alanının birim alan seçilmesi ile (4.4) eşitliğinde verilen birim alandaki güç denklemi ortaya çıkar.

$$P = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (4.4)$$

4.2 Rüzgarın Düşey Değişimi

Günümüzde rüzgar ölçümleri genellikle 10 ve 30 metre yüksekliklerde yapılmaktadır. Fakat bazı istasyonlarda farklı anemometre yüksekliklerinde de

ölçümler olabilmektedir. Bu durumda ölçüm yüksekliklerinde bir standartlaştırma için (4.5) eşitliğindeki düşey rüzgar profili kanunu kullanılmaktadır.

$$V_h = V_a \left(\frac{z_h}{z_a} \right)^x \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte z_h ; indirgenmenin yapılacağı yüksekliği, z_a ; istasyondaki anemometre yüksekliğini, V_h ; z_h yüksekliğindeki rüzgar hızını, V_a ; z_a yüksekliğindeki rüzgar hızını göstermektedir. (4.5) eşitliğindeki x değeri ise (4.6) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$x = a + b \ln V_a \quad (4.6)$$

(4.6) denklemi ile hesaplanan x değeri anemometre yüksekliğinde ölçülmüş olan V_a rüzgar hızına bağlı değişkendir. x değerinin hesaplanmasında kullanılan a ve b katsayıları sırasıyla (4.7) ve (4.8) eşitliklerinde verilmiştir (Justus, 1978).

$$a = 0,37 / (1 - 0,088 \ln \left(\frac{z_a}{10} \right)) \quad (4.7)$$

$$b = -0,088 / (1 - 0,088 \ln \left(\frac{z_a}{10} \right)) \quad (4.8)$$

4.3 Rüzgar Potansiyeli Hesaplama Yöntemleri

Bir bölgede rüzgar enerji potansiyeli değerlendirmesi yapabilmek için en az 1 yıllık rüzgar verisi kullanılmalıdır. Daha doğru değerlendirmeler için daha da uzun zaman dönemine ait rüzgar verisi kullanılması gereklidir. (4.4) eşitliğinde daha önce değinildiği üzere rüzgar enerjisi, rüzgar hızının küpü ve havanın yoğunluğu ile orantılı olarak artmaktadır. Rüzgar enerjisi potansiyelini etkileyen en önemli faktör rüzgar hızının büyüklüğüdür. Bu nedenle rüzgar ölçümlerinde yapılacak hata, rüzgar enerji potansiyeli hesaplamalarına çok daha büyük hata olarak yansımaktadır. Rüzgar santralinin kurulmasından önce yapılması gereken işlemlerden bir tanesi bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin hesaplanmasıdır.

Günümüzde rüzgar enerjisi potansiyeli WASP, Wind Pro, Alvin, RetScreen gibi yazılımların kullanılması ile hesaplanmaktadır (Patel,2006; Özerdem ve diğ, 2006). Bu yazılımlara ek olarak uydu verileri aracılığı ile de rüzgar potansiyeli hesaplanabilmektedir (Kenisarin ve diğ, 2006). Yaygın ve klasik yöntem istatistiksel metotlardır. İstatistiksel olarak yapılan çalışmalar rüzgar hız dağılımının Weibull dağılımına uyduğunu göstermiştir. Fakat her bölge için rüzgar davranışının hangi

dağılıma uyduğunun incelenmesi gereklidir. Bununla birlikte WASP, Wind Pro, Alwin gibi yazılımlar hesaplamalarında Weibull dağılımını kullanmaktadır.

4.3.1 Weibull dağılımı

Weibull dağılımı, boyutsuz şekil (k) ve rüzgar hızı ile aynı birime sahip ölçek (c) parametrelerinden oluşan iki parametrelili bir dağılımdır. İki parametrelili Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (4.9) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte V rüzgar hızını (m/s), k boyutsuz şekil parametresini, c ölçek parametresini (m/s) göstermektedir. Weibull dağılımının eklenik (kümülatif) olasılık yoğunluk fonksiyonu ise (4.10) eşitliği ile ifade edilir.

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.10)$$

Rüzgar verilerinin dağılımını göstermek için yapılan çalışmalar Weibull dağılımının bu işlevi en iyi gerçekleştiren dağılım olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bir çok çalışmada rüzgar enerjisi potansiyelinin hesaplanmasında Weibull dağılımı yaygın olarak kullanılmıştır (Çelik, 2003; Zhou ve diğ, 2006). Bununla birlikte bazı bölgelerde rüzgar verileri iki parametrelili Weibull dağılımına uymamaktadır (Jaramillo ve diğ, 2004; Ramirez ve diğ, 2006).

Weibull dağılım parametrelerini hesaplamak için literatürde bir çok yöntem geliştirilmiştir (Tar ve Dorvlo, 2002). Yapılan çalışmalar Grafik yöntem, En Yüksek Olabilirlik yöntemi ve Moment yönteminin şekil ve ölçek parametrelerini hesaplamada iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Grafik yöntem, en yüksek olabilirlik yöntemi ve moment yöntemi kullanılarak Weibull dağılım parametrelerinin hesaplanmasında benzer sonuçlar çıkabildiği gibi çok farklı sonuçlar da çıkabilmektedir (Yingni ve diğ, 2006; Cook, 2001). Bu nedenle Weibull dağılım parametrelerini hesaplama yöntemlerine ait sonuçların gerçek veri ile hata analizi yapılarak hangi yöntemin daha iyi sonuçlar verdiğine bakılmalıdır.

Weibull dağılımı rüzgar verilerine uygulandığı zaman, şekil parametresinin ekvator yakınlarında 1 civarında, ılıman enlemlerde 2 civarında ve sürekli rüzgar alanlarında ise 3 civarında olduğu bilinmektedir (Akdağ ve diğ, 2007). Weibull dağılımında şekil parametresinin 1 ve 2' ye eşit olduğu zaman, özel durumlar söz konusudur. Şekil

parametresinin 1'e eşit olması durumunda dağılım Gaussian dağılıma benzerken, 2 değerine eşit olması durumunda ise Rayleigh dağılımı olarak bilinen tek parametrelili bir dağılıma dönüşmektedir. Weibull dağılımının kullanılmasındaki sakıncalardan biri 0-1 m/s gibi düşük değerlerdeki hız verilerini bu dağılımın yeterince temsil edememesidir. Fakat rüzgar türbinlerinin enerji üretimine başlama hızları genelde 3 ile 4 m/s arasında olması nedeni ile Weibull dağılımının kullanılması sonucundaki hata yok denecek kadar az olmaktadır.

4.3.2 Hata analizi

Grafik, moment, en yüksek olasılık yöntemleri sonucunda elde edilen şekil ve ölçek parametrelerinin hangisinin gerçek veri için daha uygun olduğunun bulunması için hata analizinin yapılması gereklidir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler iki farklı hata hesabı formülü ile analiz edilmiştir. Bunlardan birincisi R^2 analizidir ve (4.11) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.11)$$

İkinci hata formülü ise RMSE formülüdür ve (4.12) ile ifade edilmektedir.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right)^{0,5} \quad (4.12)$$

Bu eşitliklerde n gözlem sayısını, y gerçek değerleri, x Weibull dağılımı ile hesaplanan değerleri ve $\bar{y}$ ortalama gerçek değeri temsil etmektedir. R^2 değeri büyük olan veya RMSE değeri küçük olan dağılım fonksiyonu en iyi dağılım fonksiyonu olarak kabul edilir (Akpınar, 2006).

4.3.3 Güç yoğunluğunun belirlenmesi

Weibull dağılımında güç yoğunluğu (4.13) eşitliği ile gösterilmektedir (Chang ve diğ, 2003).

$$P_w = \int_0^{+\infty} P(V) f(V) dV \quad (4.13)$$

(4.4) ve (4.9) eşitliklerinin, (4.13) eşitliğinde kullanılması ile Weibull dağılımı güç yoğunluğu (4.14) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{+\infty} V^3 \frac{k}{V} \left(\frac{V}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{V}{c} \right)^k} dV = \frac{1}{2} \rho \int_0^{+\infty} V^2 k \left(\frac{V}{c} \right)^k e^{-\left(\frac{V}{c} \right)^k} dV \quad (4.14)$$

Yapılan sadeleştirmeler ve Gamma fonksiyonunun kullanılması ile de (4.15)'de görülmekte olan eşitlik elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.15)$$

5. DALGACIK ANALİZİ

5.1 Temel Kavramlar

Bu bölümde dalgacık dönüşümünü anlatmaya başlamadan önce bazı temel kavramlar hakkında genel bilgiler verilecektir. Bu alt başlık konunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından gerekli görülmüştür.

5.1.1 Zaman serileri

Bu çalışmada rüzgar verisine dalgacık analizi uygulanmıştır. Rüzgar verisi bir zaman serisi olduğundan, zaman serilerinin genel karakteristiklerinden bahsetmek çalışmanın daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Bir fiziksel büyüklüğün bir veya birden çok bağımsız değişkene göre durumunu veren gözlemler topluluğuna zaman serisi denir. Burada dikkat edilmesi gereken husus gözlemlerin toplanma zamanlarına göre sıralanmasıdır. Zaman serileri, adını genellikle bağımsız değişkenin zaman olmasından almasına rağmen konumun da bağımsız değişken olduğu zaman serileri vardır. Gravite (çekim alanı) ve jeoloji verilerine ait zaman serileri, konumun bağımsız değişken olduğu durumlara örnek gösterilebilir. Bu tez çalışmasında kullanılan rüzgar verilerinin oluşturduğu zaman serilerinde bağımsız değişken zamandır.

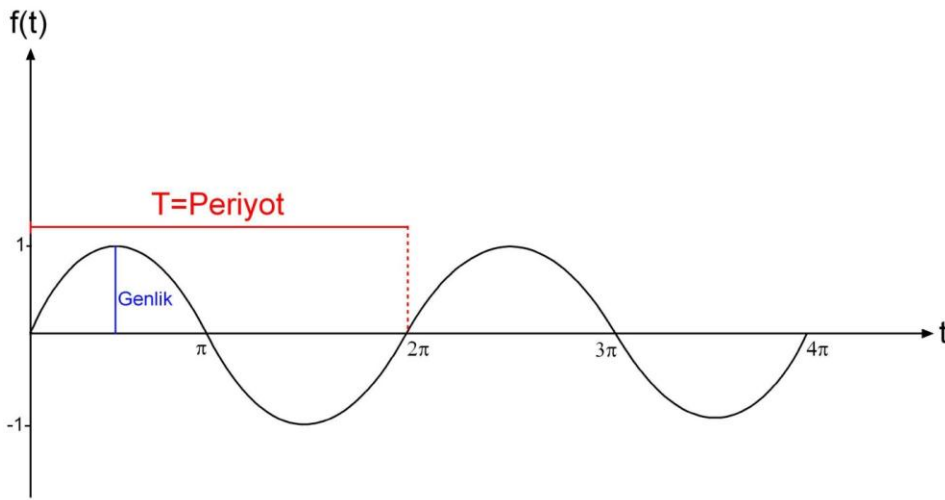
Zaman serileri fiziksel olayın takibi için etkilediği büyüklüğün bağımsız değişkene göre durumunu gösteren ardışık gözlemlerden oluşturulur. Bu gözlemler grafik olarak çizildiğinde fiziksel olayın davranışı hakkında kabaca fikirler söylenebilir. Bu grafikler sayesinde doğru analiz yönteminin seçilmesi de kolaylaşır. Rüzgar verisine ait zaman serilerinin grafiklerine bakıldığında belli bir periyodiklik göze çarptığından, spektral analiz ve bu tez çalışmasında kullanılan analiz yöntemi olan dalgacık dönüşümünün, rüzgar verisinin genel karakteristiklerinin anlaşılması konusunda yardımcı olabileceği öngörüsünde bulunulabilir.

Bir olaya ait gözlemler zamana bağlı olarak sürekli (kesintisiz) şekilde gözleniyorsa sürekli zaman serileri (örn. sismograf kayıtları), sürekli değil de belirli zaman

aralıklarında gözleniyorsa ayrık zaman serileri (örn. günlük toplam yağış) adı verilir. Sürekli zaman serileri sayısal analize uygun olmadığından sayısallaştırma yapılarak ayrık zaman serileri haline getirilmesi gerekir (Abbak, 2007).

5.1.2 Periyot

Periyot bir sürecin döngüsel hareketini tamamlaması için gerekli zaman uzunluğu olarak tanımlanabilir. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere, sürekli aynı döngüyü tekrar eden bir dalga olan sinüs fonksiyonunun periyot uzunluğu verilmiştir. Periyot literatürde genellikle T harfi ile gösterilmektedir. Şekil 5.1’de görülmekte olan sinüs fonksiyonunun periyot uzunluğu 2π ’dir.



Şekil 5.1 : Bir sinüs fonksiyonunda periyot ve genlik.

5.1.2.1 Periyodik fonksiyonlar

Belirli bir zaman aralığında kendini sürekli olarak tekrar eden fonksiyonlara periyodik fonksiyonlar denilmektedir. Periyodik fonksiyonların en bilinen örneği trigonometrik fonksiyonlardır. Periyodik süreç ve fonksiyonlar başta matematik ve fizik olmak üzere pek çok alanda yaygın şekilde bulunmaktadır. Bir süreç içindeki periyodikliklerin bilinmesi analiz yapan kişiye öngörü ve sürecin genel karakteristikleri hakkında yorum yapabilme yeteneği kazandırması bakımından önemlidir.

Periyodik fonksiyonların özellikleri:

1. $-\infty < x < \infty$ aralığında tanımlı bir $f(x)$ fonksiyonu ve $k \in \mathbb{Z}$ için (5.1) eşitliği sağlanıyorsa bu fonksiyon periyodiktir ve periyodu P değeridir (Karaoğlu,1994).

$$f(x) = f(x + P) = f(x + 2P) = f(x + 3P) = \dots = f(x + kP) \quad (5.1)$$

2. $f(x)$ ve $g(x)$ birer periyodik fonksiyon ve $a, b \in R$ olmak üzere (5.2) eşitliğindeki ifadenin sonucu da periyodiktir (Gürsakal, 2009).

$$a.f(x) \pm b.g(x) \quad (5.2)$$

3. $f(x)$ integrali alınabilen, periyodu T olan bir fonksiyon ve $a \in R$ için (5.3) integral eşitliği sağlanır (Mickens, 2004).

$$\int_a^{a+T} f(x)dx = \int_0^T f(x)dx \quad (5.3)$$

5.1.3 Frekans

Frekans bir olayın birim zaman (1 saniye) içinde kaç defa tekrarlandığını gösterir. Matematiksel ifadeyle periyodun çarpmaya göre tersidir. Bu durum (5.4) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.4)$$

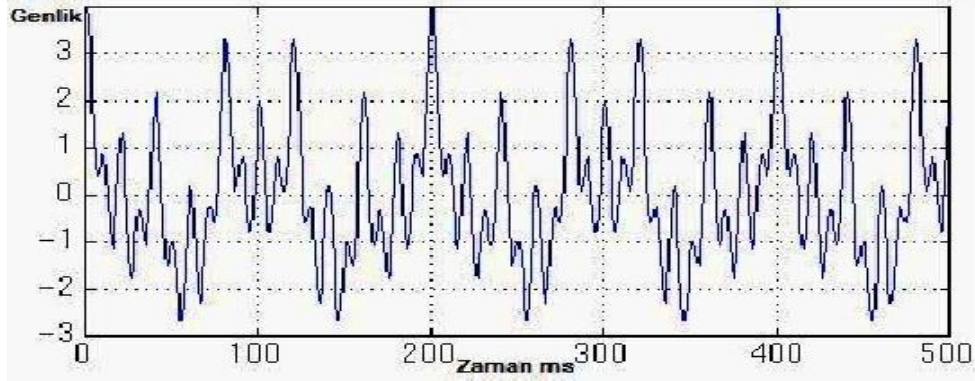
Bu eşitlikte f frekansı, T ise periyodu göstermektedir. SI birim sisteminde frekans, Hertz (Hz) ile gösterilir. Bir Hertz, bir olayın saniyede bir tekrarlandığı anlamına gelir. Olayın iki Hertzlik bir frekansa sahip olması ise, olayın saniyede kendini iki defa tekrar ettiğini ifade eder. Kısaca söylemek gerekirse, frekansın artması bir zaman serisindeki salınımların sayısının artması, frekansın azalması ise zaman serisindeki salınımların azalması ile sonuçlanır. Bu nedenle frekans bilgisi ile zaman serileri hakkında önemli bilgiler elde edilebilmektedir.

Frekans kavramı bir zaman serisi veya fonksiyonun içinde farklı periyoda sahip bileşenlerin tanımlanmasına imkan vermesi nedeniyle araştırmacılar için oldukça önemlidir. Örneğin, bir zaman serisi olan EKG (kalp atışlarının zamana göre değişimi) grafiğini ele aldığımızda bir kardiyolog sağlıklı bir insana ait EKG grafiğinin nasıl olması gerektiğini bilir. Önemli sayılabilecek bir sapma olduğunda sağlık sorununu tespit edebilir. Fakat bu işin gözle yapılması yerine, EKG verilerine ait zaman serisi frekans ortamına dönüştürüldüğünde sistematik bir şekilde zaman serisi yorumlanabilir. Kardiyolog olmayan birisi de frekans alanında inceleme yaptığında meydana gelmiş olan farklılıkları tespit etme imkanı bulabilir (Gürsakal, 2009).

Frekans alanının önemi nedeniyle, zaman alanını frekans alanına dönüştüren matematiksel araçlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu işlemi gerçekleştiren birçok analiz yöntemi vardır. Bu analiz yöntemleri içinde en bilinen ve kullanılan yöntem Fourier dönüşümüdür. Bunun yanında Wigner dağılımı, Hilbert ve Radon dönüşümü de sayılabilir (Qiao, 2005). Son yıllarda yeni ve en gelişmiş analiz yöntemlerinden biri olan dalgacık dönüşümü de bu amaçla kullanılmaktadır.

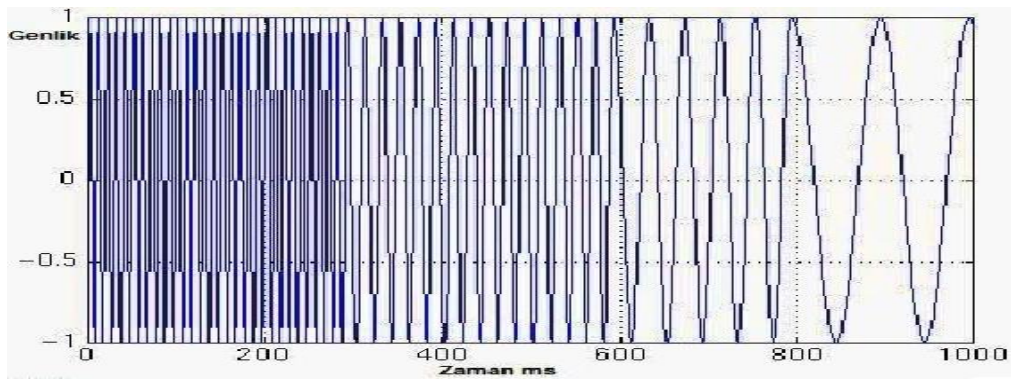
5.1.4 Durağan ve durağan olmayan zaman serileri

Bir zaman serisinin frekans içeriği zamanla değişmiyor ise bu tür serilere durağan (stationary) zaman serileri denir. Şekil 5.2’de durağan bir zaman serisi örneği görülmektedir.



Şekil 5.2 : Durağan zaman serisi örneği.

Zaman içinde frekans içeriği değişkenlik gösteriyorsa bu tür serilere ise durağan olmayan (nonstationary) zaman serileri denir. Meteorolojik uygulamalardaki zaman serileri genellikle durağan olmayan özellikler gösterir. Bu tez çalışmasında kullanılan rüzgar verilerine ait zaman serileri de durağan olmayan zaman serileridir. Şekil 5.3’de durağan olmayan bir zaman serisi örneği görülmektedir.



Şekil 5.3 : Durağan olmayan zaman serisi örneği.

5.1.5 İç çarpım

Dalgacık analizi, dalgacık fonksiyonu ile zaman serisinin iç çarpımı sayesinde gerçekleşmesi dolayısıyla, iç çarpımın özelliklerini bilmek konunun anlaşılması noktasında faydalı olacaktır. İç çarpım, vektörler, fonksiyonlar ve matrisler arasında gerçekleşmesi nedeniyle üç başlık altında incelenmiştir.

5.1.5.1 Vektörel iç çarpım

$n \times n$ boyutlu uzayda tanımlı x ve y vektörleri, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ve $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ olmak üzere, x ve y vektörlerinin iç çarpımı (5.5) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$\langle x, y \rangle = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n \quad (5.5)$$

İç çarpımın sonucu vektörel değil, skaler bir büyüklüktür. Bu skaler değer, söz konusu vektörlerin arasındaki açının kosinüs değeri ile bu iki vektörün uzunlukları çarpımına eşittir.

5.1.5.2 Fonksiyonlarda iç çarpım

$f(x)$ ve $g(x)$ birer fonksiyon olmak üzere, a ile b aralığında bu iki fonksiyonun iç çarpımı (5.6) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$\langle f(x), g(x) \rangle = \int_a^b f(x) g(x) dx \quad (5.6)$$

Dalgacık katsayılarının oluşmasının temeli, dalgacık fonksiyonu ile zaman serisinin iç çarpımının sonucu olması dolayısıyla fonksiyonların iç çarpımını bilmek önemlidir.

5.1.5.3 Matrislerde iç çarpım

$M_{n \times n}$ matris uzayında tanımlı A ve B matrisleri için iç çarpımı (5.7) eşitliğinde verilmiştir.

$$\langle A, B \rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij} \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte, $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ve $B = (b_{ij})_{n \times n}$ matrisleridir.

5.1.6 Ortogonal ve ortonormal kavramları

Eğer iki vektörün iç çarpımı sifira eşit ise o iki vektör birbirine (dik) ortogondur.

x ve y boyutları aynı iki vektör olmak üzere (5.8) eşitliği ile ortogonal iki vektörün sağlanması gerekli şart gösterilmiştir.

$$\langle x, y \rangle = 0 \quad (5.8)$$

Bu durum aynı şekilde fonksiyonların ortogonallığı için de geçerlidir ve (5.9) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$\langle f(x), g(x) \rangle = 0 \quad (5.9)$$

Ortonormallik kavramına geldiğimizde vektör veya fonksiyonların birbirine dik olmasına ek bir şart daha ortaya çıkar. Bu şart birbirine dik olan vektör veya fonksiyonların uzunluklarının da 1 olması gerekliliğidir. Vektörlerde uzunluk (5.10) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \quad (5.10)$$

Uzunlukları 1 olan iki vektörün iç çarpımlarının sıfır etmesi durumunda x ile y için ortonormal vektörler denir. Aynı durum fonksiyonlar için de geçerlidir.

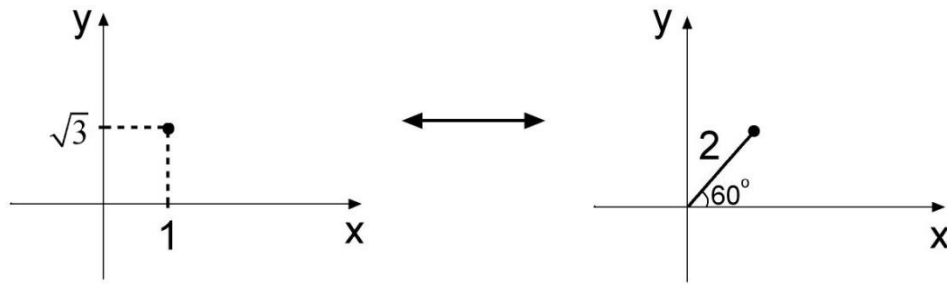
5.1.7 Dönüşüm kavramı nedir?

Bir durum veya halden, başka bir durum veya hale geçiş dönüşüm olarak tanımlanabilir. Dönüşüm yapıldığında farklı bir gösterim elde edilir ve ilk halde görülemeyen birçok bilgi dönüştürülmüş halde görülebilir. Bu bazen mevcut bir problemi daha iyi anlama imkanı verir. Enerjilerin birbirleri arasındaki dönüşümlerinden, kimyasal dönüşümlere ve en önemlisi bu tez çalışmasına konu olan dalgacık dönüşümü gibi matematiksel dönüşümlere kadar dönüşüm kavramı günlük hayatın hemen her aşamasında karşımıza çıkmaktadır (Küçük, 2004).

Dönüşümün sağladığı faydaları görmek açısından birkaç dönüşüm örneğini incelemek yararlı olacaktır. Romen rakamları ile yazılan LXXXI ve XCIX sayılarının çarpımı sorulduğunda bu halleri ile düşünüp işlem yapılabilmesi kolay değildir. Fakat $LXXXI = 81$ ve $XCIX = 99$ dönüşümleri yapıldığında $81 \times 99 = 8019$ değeri kolaylıkla bulunabilir. Çünkü Romen rakamları ile işlem yapma bilinmeyen bir işlemdir, öte taraftan dönüşümün yapıldığı onluk tabanda kabul

edilmiş rakamlarla oluşan sayılarda çarpma hemen herkes tarafından nasıl yapılacağı bilinen bir işlemdir.

Bir başka örnek, lise yıllarından hatırlanacağı üzere karmaşık sayılardaki kartezyen koordinatlardan (x,y) , kutupsal koordinatlara (r,θ) yapılan dönüşümdür. Bir karmaşık sayının kartezyen koordinatlardaki yazımı $z = 1 + i\sqrt{3}$ iken kartezyen koordinatları $(1, \sqrt{3})$ olmaktadır. Öte taraftan aynı karmaşık sayının kutupsal koordinatlardaki yazımı $z = 2(\cos 60^\circ + i\sin 60^\circ)$ şeklindedir ve kutupsal koordinatları $(2, 60^\circ)$ 'dir. Bu iki gösterim de aynı veriyi temsil ederken bu verinin farklı özelliklerini ortaya koyarlar. Kartezyen koordinatlar bir karmaşık sayının x ve y eksenlerine olan uzaklıkları ile analitik düzlemdeki yerini anlatır. Kutupsal koordinatlar ise karmaşık sayının yerini orjine olan uzaklığı ve bu uzaklığı gösteren yarıçap doğrusunun, x eksenine ile arasındaki açı cinsinden söyler. Bu kişilerin amaçlarına göre onlara farklı faydalar sağlayabilir. Bu farklı gösterim durumları Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4 : Kartezyen ve kutupsal koordinatlarda gösterim.

Bu çalışmada kullanılacak dönüşümler ise zaman serileri ve fonksiyonların ilk bakışta görmekte zorlanılan özelliklerinin bulunmasına yarayan dönüşümlerdir. Çünkü bir fonksiyonun dönüşümü, orijinal fonksiyon hakkında ilave veya gizli kalmış bilgilerin açığa çıkmasını sağlar. Dönüşüm yapmaktaki asıl amaç karmaşık fonksiyonları basit yapı taşları ile temsil etmektir.

Matematiksel dönüşümlerden bazılarını saymak gerekirse Laplace Dönüşümü, Fourier Dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümü başlıcalarıdır. Çok temel olarak bu dönüşümlerin faydalarına bakılacak olursa Laplace Dönüşümü çözümsüz durumda bulunan birçok diferansiyel denklemi çözümsüzlük alanından alıp çözüm yapılabilecek bir alana taşıma imkanı vermesi açısından, Fourier Dönüşümü ileride ayrıntılı bir şekilde bahsedileceği üzere bir zaman serisinin zaman ortamından frekans ortamına geçişini sağlaması bakımından ve en son olarak bu tez çalışmasında

da kullanılan Dalgacık Dönüşümü ise zaman serisini zaman ortamından ölçek ortamına geçiş imkanı sağlaması ve zaman bilgisini de bu dönüşüm esnasında koruması bakımından büyük öneme sahiptir. Bir dönüşümün kalite ölçütlerinden birisi de ters dönüşümün varlığıdır. Bu noktada Laplace, Fourier ve Dalgacık Dönüşümleri bahsedilen kriteri sağlamaları nedeniyle uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler.

5.2 Dalgacık Analizinin Tarihsel Gelişim Süreci

Dalgacık teorisinin ve uygulamalarının kullanımı uzun bir geçmişe sahip değildir. Bilim dünyası için büyük bir uygulama alanı olmasının yanında, halen birçok alan için uygulanabilirliği keşfedilmeyi beklemektedir. Matematik tarihi açısından dalgacık teorisi, günümüzde literatüre girdiğı tarihler olarak kabul edilen 1980’li yıllardan çok daha eskilere dayanmaktadır. Matematiksel altyapısı 1930’lu yıllara dayanmaktadır (Meyer, 1993). Aslında süreç daha da ayrıntılı incelendiğinde dalgacık düşüncesinin oluşmasına temel oluşturabilecek Joseph Fourier’in frekans boyutlu analizlerinin başlangıç noktası olan 1807 yılına kadar geri dönülmelidir. Fourier, periyodu 2π olan herhangi bir $f(x)$ fonksiyonunun, Fourier serisi diye bilinen (5.11) eşitliğindeki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamı ile ifade edilebileceğini göstermiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (5.11)$$

Bunun sonucunda Fourier yeni bir fonksiyon dünyasının oluşmasına öncülük etmiştir (Graps, 1995).

Fourier’in yaptığı bu katkı sürecinin ardından dalgacık kelimesini ilk kez tez çalışmasında 1909 yılında Alfred Haar kullanmıştır (Graps, 1995). Haar’ın ardından 1930’lu yıllarda birbirlerinden bağımsız olarak çalışan birkaç grubun çalışmaları görülmektedir. Bu gruplar ölçeğı değişebilen baz fonksiyonlarını kullanarak fonksiyonları temsil etme fikri üzerine araştırma yapmışlardır. Fourier’in de aslında yaptığı şey esas itibari ile bu gruplar ile aynıdır. Gerek bu gruplar gerekse Fourier fonksiyonları başka bir formda temsil etme amacındadırlar. Fakat temel farklılık Fourier frekans ortamında temsiliyet peşinde iken, bu gruplar ölçek ortamında temsiliyet peşindedir. Tarihsel sürece bakmaya devam edildiğinde 1930’lu yıllarda fizikçi Paul Levy, Haar baz fonksiyonu olarak adlandırılan ölçeğı değişen baz

fonksiyonlarını kullanarak rassal bir sinyal olan Brownian hareketlerini araştırmıştır (Meyer, 1993). Anlaşılacağı üzere baz fonksiyonu olarak adlandırılan çalışmalar dalgacık fonksiyonlarına geçişin başlangıcı olarak kabul edilebilir. Levy'nin araştırmaları sonucunda, Brownian hareketlerdeki küçük karmaşık detaylar üzerinde çalışırken Haar baz fonksiyonu, Fourier baz fonksiyonundan daha üstün sonuçlar ortaya koymuştur (Graps, 1995).

1930'lu yıllarda Littlewood, Paley ve Stein tarafından yapılan diğer bir çalışmada $f(x)$ fonksiyonunun enerjisinin hesaplanması amaçlanarak (5.12)'deki eşitlik elde edilmiştir (Graps, 1995).

$$E = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} |f(x)|^2 dx \quad (5.12)$$

1946 yılına gelindiğinde durağan olmayan sinyallerin işlenmesinde Fourier dönüşümünün yetersizliği üzerine Denis Gabor, Gabor dönüşümü olarak adlandırılan Fourier tabanlı analiz yöntemini geliştirmiştir. Gabor dönüşümü günümüzde yerini Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümüne bırakmasına rağmen bu yöntemin kaynağıdır. Gabor pencereleme yöntemini kullanarak sinyalin küçük bir parçasını zaman tanım aralığında ele almıştır. Sonuç olarak sinyali, zaman ve frekansın fonksiyonu olarak iki boyutta ifade etmiştir. Bu yöntemde kullanılan pencere fonksiyonu Gauss hata fonksiyonudur (Robertson ve diğ, 1998).

Şimdiye kadar olan tarihsel süreçten görüleceği üzere Fourier temelli analiz yaklaşımlarının ileride bahsedilecek olan dezavantajları sinyal analizi ile uğraşan bilim adamlarını farklı yollara itmiş ve bunun sonucunda Fourier serisi yaklaşımı ile başlayan sinyal frekans analizi kavramı yerini ölçek analizi kavramı ve dolayısıyla dalgacık dönüşümüne bırakmıştır.

Bu çalışmaların ardından 1960 ve 1980 yılları arasında Guido Weiss ve Ronald R. Coifman atomlar diye isimlendirilmekte olan bir fonksiyon uzayının en basit elemanları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Matematikçi olan Coifman ve Weiss'in amacı ortak bir fonksiyon için atomları ve bu atomları kullanarak fonksiyon uzayının tüm elemanlarını yeniden yapmaya izin veren "toplanma kuralları" nı bulmaktır. Bu çalışmalara bakıldığında dalgacık fonksiyonları ve bu fonksiyonlar sayesinde gerçekleştirilen dalgacık dönüşümlerinin temellerine gidiş açıkça görülmektedir. 1980'li yıllara gelindiğinde bir fizikçi olan Alex Grossman ve bir mühendis olan Jean Morlet kuantum fiziğini kullanarak dalgacıkları genel olarak tanımlamışlardır.

Morlet ve Grossman dalgacıklar hakkında fiziksel sezgiye dayanan bir düşünce biçimi sağlamışlardır (Graps, 1995). 1985 yılına gelindiğinde, Stephane Mallat dijital sinyal işleme konusundaki çalışmaları sayesinde dalgacık analizinin gelişimini daha da hızlandırmıştır. Mallat ikinci derece ayna filtreleri, piramit algoritmaları ve ortogonal dalgacık bazları arasında bazı ilişkiler olduğunu keşfetmiştir. Bu sonuçlardan esinlenen Y. Meyer tam dayanıklı olmayan dalgacıkları oluşturmuştur. Haar dalgacıklarının türevi sürekli olmamasına rağmen, Meyer dalgacıklarının türevleri sürekli dir. Buna rağmen Meyer dalgacıklarının $-\infty$ 'dan $+\infty$ 'a ortalaması sıfır değildir (Graps, 1995).

1984 yılından Grossman ve Morlet sismik sinyalleri, dalgacık "wavelet" adı verilen sonlu süreli ve titreşimli bir işaretin çeşitli zamanlardaki uygun şekilleriyle birleştirerek modellemeye çalışmışlar ve sürekli dalgacık dönüşümünü (SDD) uygulama alanına geçirmeyi başarmışlardır (Grossman ve Morlet, 1984).

1988 yılında dalgacık dönüşümünün ilk uygulama alanları, fonksiyonel gösterimler, kuantum mekaniği ve işaret işlemede olmuştur. Dalgacık dönüşümünün işaret işleme alanında uygulamaları, I. Daubechies ve S. Mallat ile başlamıştır (Mallat, 1989).

1990 ile 1996 yılları arasında araştırmacılar, dalgacık ayrıştırması konusunda birçok teori geliştirerek ayırık dalgacık dönüşümünün temelini atmışlardır. Dönüşümün işaret işleme alanında uygulamaları, Daubechies ile başlamıştır (Daubechies, 1992).

Daubechies, dalgacık ayrıştırması konusunda birçok teori geliştirerek ayırık dalgacık dönüşümünün temelini atmıştır. Sonraki yıllarda, dalgacık dönüşümünde büyük gelişmeler olmuştur. Daubechies, Daubechies fonksiyonları (tabanları) olarak bilinen, düzgün, yoğun olarak destekli ve ortonormal dalgacık tabanlarını geliştirmiştir. Fransız işaret analizcilerinden Mallat ve Meyer dalgacık tabanlı genel bir metot önermişlerdir (Mallat, 1989; Meyer 1993). Çoklu çözünürlük analizi (Multiresolution Analysis) olarak bilinen metot, işaret analizinde, yan bant kodlaması (Sub-band Coding) olarak uygulanmaktadır. Sonuç olarak, yeni bir zaman-frekans analizi metodu yapılandırılmıştır . Bu yolla zaman serileri, öz uyumlu olarak, aynı anda, hem zaman ve hem de frekans uzaylarında incelenebilir hale gelmiştir. Birkaç yıl sonrasında da günümüzdeki uygulamaların tam anlamıyla temelini oluşturan Ingrid Daubechies ve Mallat'ın çalışmaları sonucu normal-dikey temel dalgacık fonksiyonları oluşturulmuştur.

5.3 Fourier Dönüşümü

Fourier Dönüşümünü daha iyi anlayabilmek açısından bu dönüşüme temel oluşturan Fourier serilerine bakmak faydalı olacaktır. Fourier serileri, periyodik bir fonksiyonu sinüs ve cosinüs fonksiyonlarının toplamı biçiminde yazma temeline dayanmaktadır. Başka bir şekilde söylenecek olursa, Fourier periyodik bir fonksiyonun sonsuz sayıdaki kompleks üstel fonksiyonların toplamıyla ifade edilebileceğini göstermiştir. Fourier serileri, Joseph Fourier tarafından bir metal çubuk ve demir levhadaki ısı denklemlerinin çözümü için kullanılmıştır. Fourier bu hedefine ulaşmak için geliştirdiği yaklaşım ile çok önemli dönüşüm ve analiz yöntemlerinin oluşmasına neden olan bir kıvılcımı ateşlemiştir. Fourier serisi (5.13) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (5.13)$$

Bu eşitlikte $f(x)$ periyodu 2π olan bir fonksiyonu, a_0 , a_k ve b_k Fourier katsayılarını temsil etmektedir. Fourier katsayılarının elde edilmesinde (5.14), (5.15) ve (5.16) eşitlikleri kullanılmaktadır.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (5.14)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx, \quad n \geq 0 \quad (5.15)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx, \quad n \geq 1 \quad (5.16)$$

Katsayıların hesaplanmasında kullanılan integrallerin çözümünde $f(x)$ fonksiyonunun tek veya çift fonksiyon oluşuna göre (5.17) ve (5.18) eşitliklerinden yararlanılır.

$f(x)$ tek fonksiyon ise;

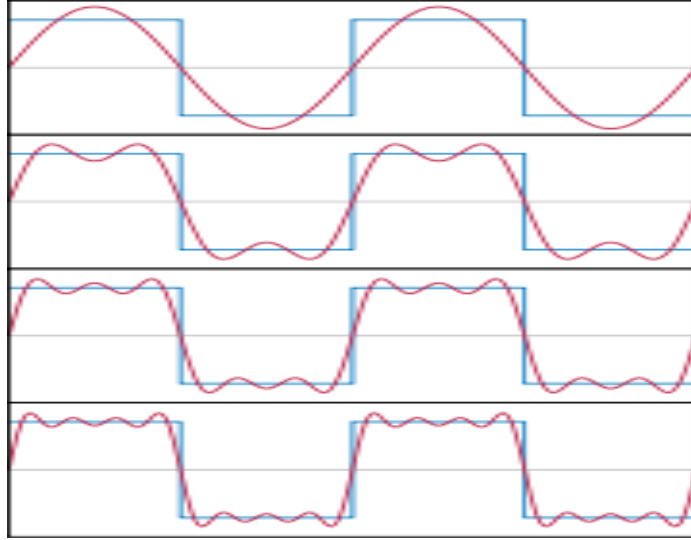
$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 0 \quad (5.17)$$

$f(x)$ çift fonksiyon ise;

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 2 \int_0^{\pi} f(x) dx \quad (5.18)$$

Fourier serilerinin katkısı sonucu oluşan Fourier dönüşümüne gelindiğinde, bir zaman serisini zaman ortamından frekans ortamına dönüştüren bir yöntem karşımıza çıkmaktadır. Bu dönüşüm sonrası zaman bilgisinin kaybolması ve sadece zaman serisine ait frekans bilgisinin kalması, bu yöntemin en büyük eksikliğidir. Zaman bilgisine ihtiyaç olmaksızın sadece frekans değerlerine ihtiyaç olan durumlar için son

derece yararlıdır. Durağan zaman serilerinin analizinde çok büyük fayda sağlayan bu yöntem, durağan olmayan zaman serilerinin analizinde çok anlamlı sonuçlar vermez. Durağan olmayan zaman serilerinde, Fourier dönüşümünün yaşadığı en temel sorun zaman bilgisinin analiz sonrasında kaybedilmesidir (Robertson ve diğ, 1998).



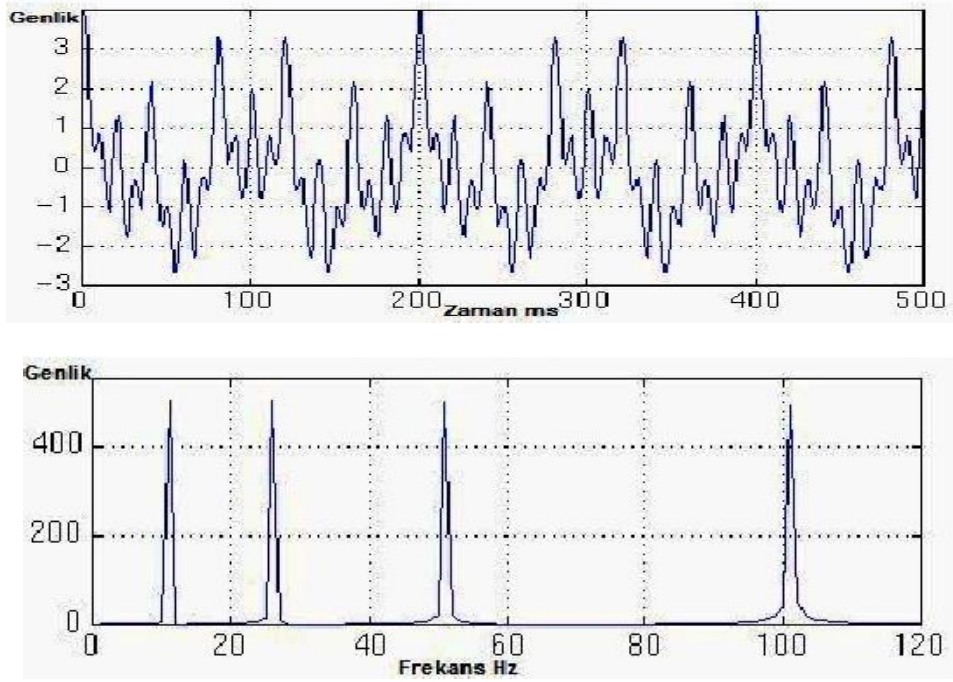
Şekil 5.5 : Kare dalgasına ilk 4 adım Fourier yaklaşımları.

Şekil 5.6 ve 5.7’de sırasıyla durağan ve durağan olmayan zaman serilerinin Fourier dönüşümleri verilmiştir. Şekil 5.6’da üstte 10, 25, 50 ve 100 Hz sinyal bileşenlerinden oluşan durağan bir zaman serisi görülmektedir. Bahsedilen frekanslar zaman ekseninin tamamına yayılmıştır. Yani herhangi bir zaman anında tüm frekanslar mevcuttur, zaman serisinin başlangıcındaki frekanslar zaman içinde değişmez. Bunun sonucu Fourier dönüşümü net bir şekilde frekans değerlerini vermektedir.

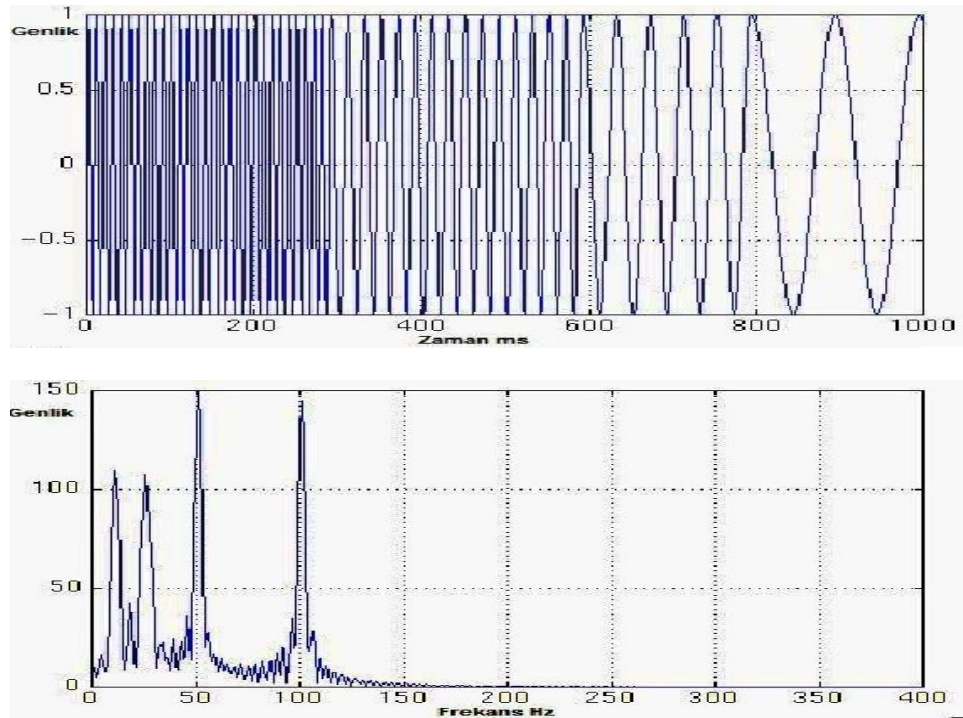
Öte taraftan, Şekil 5.7’de üstte durağan olmayan bir zaman serisi ve altta bu zaman serisinin Fourier Dönüşümü görülmektedir. Bu iki şekil arasındaki Fourier dönüşümünün sonuçları kıyaslandığında frekanslar arasındaki dalgalanmalar ve genlik farklılıkları düşünülmediği takdirde durağan olmayan zaman serisindeki sonuçlar da durağan zaman serisindeki ile aynıdır. Durağan olmayan zaman serisinin Fourier dönüşümündeki iki frekans değeri arasındaki dalgalanmaların sebebi zaman içinde frekans değerlerindeki ani değişimlerdir. 100 ve 50 Hz frekans değerlerindeki genliklerin büyük olmasının sebebi ise diğer frekans değerlerine göre zaman ekseninde daha uzun süre yer almalarıdır.

Fourier dönüşümünün durağan olmayan zaman serilerine uygun olmamasının sebebi, dönüşümün kendisinden çok zaman serisinin yapısından kaynaklanır. Durağan

olmayan zaman serilerinin Fourier dönüşümü ile seriye ait tüm frekans değerlerini görebilir ancak hangi zamanda gerçekleştiklerine dair bilgiye ulaşamayız.



Şekil 5.6 : Durağan bir zaman serisi ve Fourier dönüşümü.



Şekil 5.7 : Durağan olmayan bir zaman serisi ve Fourier dönüşümü.

Durağan zaman serilerinde böyle bir sorunun olmamasının sebebi, seride bulunan frekans değerlerinin zamanla değişmiyor olmasıdır. Bu nedenle durağan zaman serileri

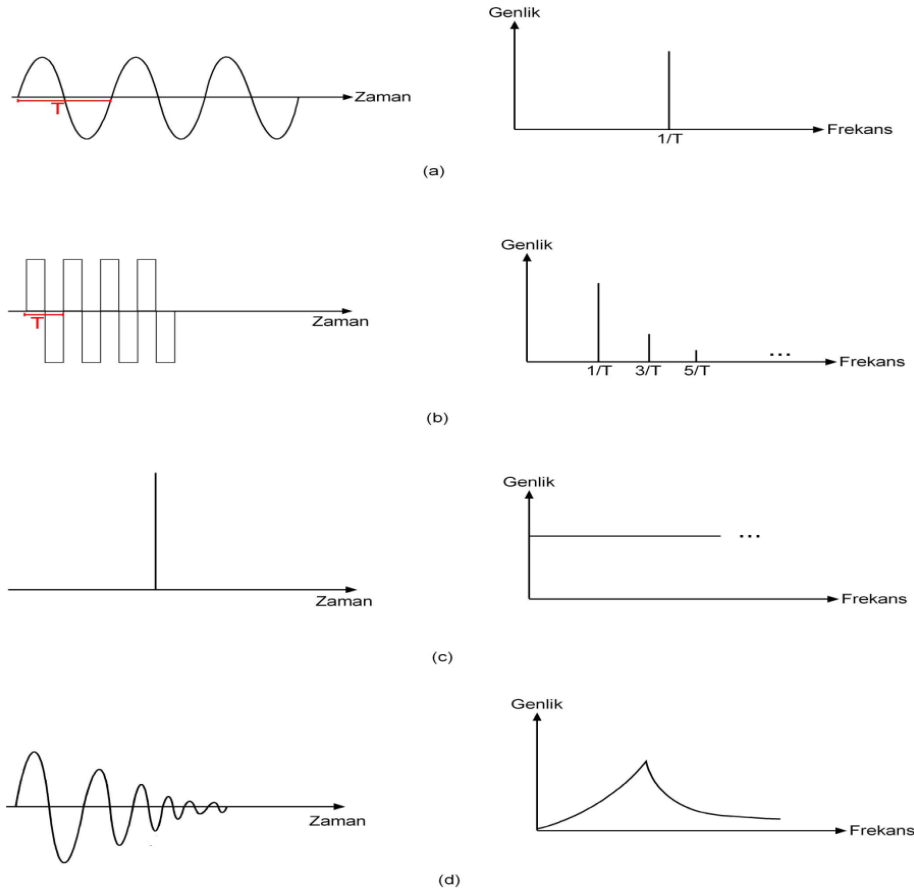
ile gerçekleştirilen frekans analizlerinde zaman çözünürlüğüne ihtiyaç duyulmaz (Coifman ve diğ, 1991).

Fourier dönüşümünün temel denklemleri (5.19) ve (5.20) de görülmektedir.

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi ift} dt \quad (5.19)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f)e^{2\pi ift} df \quad (5.20)$$

Bu eşitliklerden (5.19) Fourier dönüşümünün denklemidir ve zaman serisini, zaman ortamından frekans ortamına dönüştürmekte kullanılır. (5.20) eşitliği ise ters Fourier dönüşümünün denklemidir ve frekans ortamındaki zaman serisini zamana bağlı ilk durumuna geri çevirmeye yarar. Bu denklemlerde t zamanı, f frekansı, $x(t)$ orijinal zaman serisini ve $x(f)$ Fourier dönüşümünü temsil etmektedir. Şekil 5.8’de Fourier dönüşümüne uğramış çeşitli fonksiyonların spektral analizi konunun daha iyi anlaşılabilmesi için verilmiştir.



Şekil 5.8 : Örnek zaman serileri ve Fourier dönüşümleri.

Zaman serilerinin analizinde en çok bilinen ve kullanılan teknik olan Fourier Dönüşümü bir zaman serisine ait farklı frekans değerlerini hesaplar. Fourier Dönüşümü tekniği frekans değerlerini belirlemesine rağmen önemli dezavantajlara

sahiptir. En önemlisi frekans alanına geçişte zaman bilgisinin kaybolmasıdır ki bunun sonucunda zaman serisinin Fourier dönüşümüne bakıldığında özel bir olayın hangi zamanda gerçekleştiğine dair bilgi elde edilemez. Eğer zaman serisinin karakteristik özelliği zaman boyunca değişmez ise (yani zaman serisi durağan ise) bu dezavantaj önemli değildir. Buna karşın, çoğu zaman serisi önemli sayılabilecek durağansızlıklar veya geçici özellikler (eğim, ansızın değişim, kırılma ve olayların başlangıç ve bitişlerini) içerir. Bu beklenmedik özellikler belki de zaman serisinin en önemli ve can alıcı kısımlarını oluşturmaktadır. Fourier analizi bunları temsil etmek için uygun değildir. Bu nedenle kullanılacak yöntemin zaman serisindeki durağansızlıklara duyarlı olması gerekir. Dalgacık dönüşümü bu noktada Fourier dönüşümüne önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat Fourier Dönüşümünden Dalgacık Dönüşümüne geçiş öncesinde Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ile Fourier Dönüşümünün eksikliklerine çözüm aranmış ve böylece dalgacık dönüşümüne geçişin ilk adımları atılmıştır.

5.4 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümünün bir zaman serisine ait frekansları gösterdiği fakat hangi zaman değerlerinde hangi frekansların mevcut olduğu bilgisini vermediğinden bir önceki bölümde bahsedilmişti. Bu özelliği nedeniyle Fourier dönüşümü durağan zaman serilerinin analizinde oldukça iyi bir yaklaşımdır, fakat durağan olmayan zaman serilerinin analizinde istenilen neticeleri vermez. Bu durum zaman değişkenine duyarlılığı olan yeni bir dönüşüme ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü, bu duruma bir çözüm olarak Denis Gabor tarafından 1946 yılında geliştirilmiştir. Bu dönüşüme aynı zamanda Gabor Dönüşümü de denmektedir (Mallat, 1998). Gabor analiz edilecek zaman serisinin küçük bir parçasını zaman tanım aralığında ele almış ve böylece zaman serisini, zaman ve frekansın fonksiyonu olarak iki boyutta ifade etmiştir. Bu sayede KZFD, tanım kümesi zaman ve frekans olan zaman serileri hakkında bilgi vermek için kullanılabilir. Bu dönüşümde zaman serisi durağan olduğu kabul edilen küçük parçalara bölünür. Bundan sonraki süreç Fourier dönüşümündeki gibi devam eder. Durağanlığın olduğu kabul edilen bu zaman serisi parçaları ile pencere fonksiyonunun çarpılması ile dönüşüm tamamlanır (Polikar, 1999). Kısacası, KZFD’de amaç pencereleme yöntemini kullanarak, Fourier dönüşümünü belirli bir zaman penceresi içerisinde uygulamaktır. Fakat durağan

kabul edilen parçanın içinde de durağınsızlıkların mevcut olması durumunda, Fourier dönüşümündeki problemin bir benzerinin tekrar karşımıza gelmesine neden olur. Şekil 5.9'da KZFD'nin bir zaman serisine uygulanması ve pencereleme yöntemi görülmektedir.



Şekil 5.9 : KZFD'nin zaman serisine uygulanması ve pencereleme.

KZFD yöntemi belli oranda zaman bilgisini vermesine rağmen frekans değerleri için halen sorun teşkil etmektedir. Bu metotla da belirli bir frekansın hangi zaman noktasında mevcut olduğu değil sadece mevcut olduğu zaman aralığındaki frekans bileşenleri belirlenebilir (Papoulis, 1962; Goswami, 1999).

KZFD'de kullanılan pencere fonksiyonunun sonlu bir enerjiye sahip olması ve integralinin alınabilmesi gereklidir. KZFD yönteminde zaman ekseninde bir K noktasına $w(t)$ pencere fonksiyonu yerleştirilerek zaman serisinin Fourier dönüşümü gerçekleştirilir. Bahsedilen bu durumun matematiksel ifadesi (5.21) eşitliğinde verilmiştir.

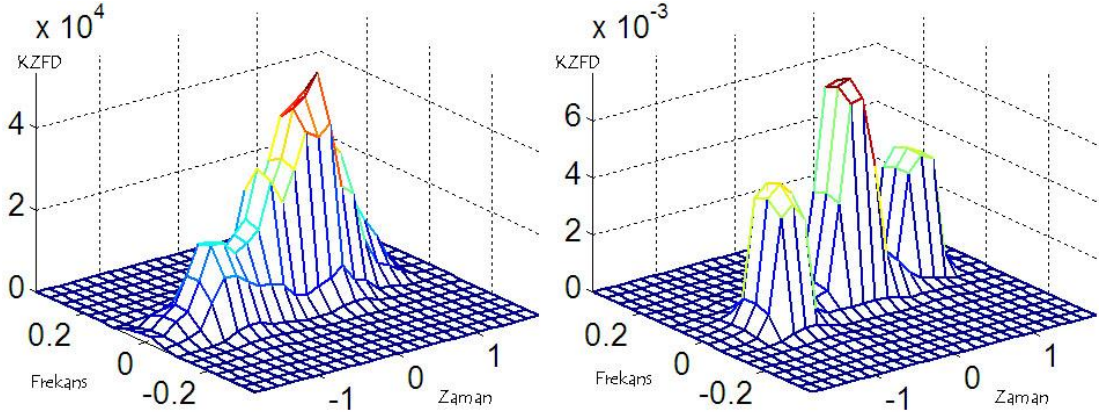
$$g_{f,t}(t) = e^{2\pi i f t} w(t - K) \quad (5.21)$$

İşleme pencerenin kaydırılması ve tekrar Fourier dönüşümünün alınması ile devam edilir. Bu işlemin ise matematiksel gösterimi (5.22) eşitliği ile verilmiştir.

$$KZFD(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t - K) e^{-2\pi i f t} dt = \langle g_{f,t}(t), x(t) \rangle \quad (5.22)$$

Bu eşitlikte $x(t)$ analiz edilen zaman serisini, $w(t - K)$ zaman ekseninde K noktasına yerleştirilmiş pencere fonksiyonunu ve f frekansı göstermektedir. Dönüşümün performansı seçilen pencere fonksiyonuna ($w(t)$) bağlıdır. Kısa bir pencere uzunluğu ile iyi bir zaman çözünürlüğü elde edilmekte, fakat farklı frekanslar iyi tanımlanamamaktadır. Şekil 5.10 (a)'da kısa pencere uzunluğu ile düşük frekans çözünürlüğünün yanında iyi zaman çözünürlüğü sağlanırken, (b)'de uzun pencere uzunluğu ile düşük zaman çözünürlüğünün yanında iyi frekans çözünürlüğü sağlanmaktadır. (a) ile kıyaslandığında (b) son derece iyi sayılabilecek

frekans çözünürlüğü vermektedir. Aynı anda hem iyi bir zaman hem de iyi bir frekans çözünürlüğü KZFD’de mümkün olamamaktadır. Bu aynı zamanda “Heisenberg Eşitsizliği” olarak da bilinmektedir (Mery, 2005).



Şekil 5.10 : Farklı pencere fonksiyonları için çözünürlük durumları.

KZFD ters dönüşüm özelliğine sahiptir ve istenildiğinde $x(t)$ fonksiyonu tekrar elde edilebilir. Bu durum matematiksel olarak (5.23) eşitliği ile ifade edilir.

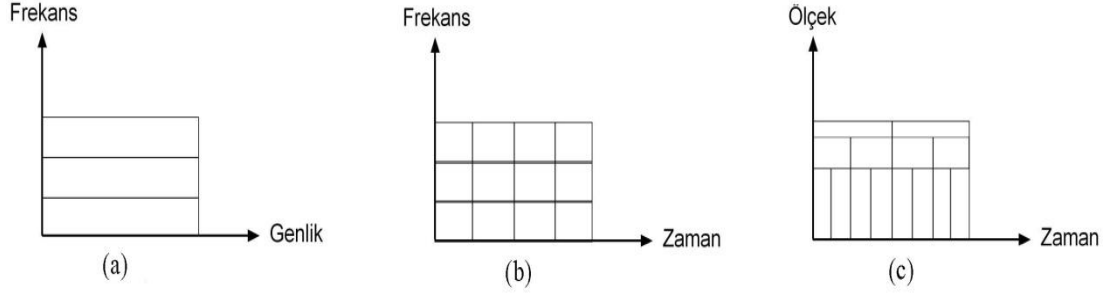
$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} KZFD(t, f) g_{f,t}(t) df dk \quad (5.23)$$

KZFD, zaman serisine ait zaman ve frekans bileşenleri arasında bir uyum yakalayarak, analiz yapan kişiye hangi frekansta nasıl bir olay gerçekleştiğine dair bilgi sağlar. Bu durum Fourier dönüşümü ile kıyaslandığında büyük ilerleme sağlamış olmasına rağmen, sağladığı bilgi doğruluk açısından seçilmiş olan pencerenin büyüklüğüyle ilişkili sınırlandırmalara tabidir. KZFD yapılırken bütün frekanslar için sabit bir pencere kullanılır ki birçok zaman serisi daha esnek yaklaşım ister. Zaman serisi analizindeki frekans temeline dayalı dönüşüm yöntemlerindeki yetersizlikler, frekans ile ilişkiye sahip olan ve aynı zamanda, zaman bilgisini de çok iyi şekilde sağlayan, ölçek temeline dayalı dalgacık dönüşümünün ortaya çıkmasına neden olmuştur.

5.5 Dalgacık Teorisi

Dalgacık Dönüşümü, değişken büyüklüklerde pencereleme tekniği ile Fourier ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü’nün çözüm üretemediği zaman belirsizliğinin üstesinden gelerek, zaman serisi ve sinyal analizi yöntemlerine yeni bir yaklaşım getirmiştir. Dalgacık Dönüşümü, FD ve KZFD’nin aksine zaman-frekans bölgesi

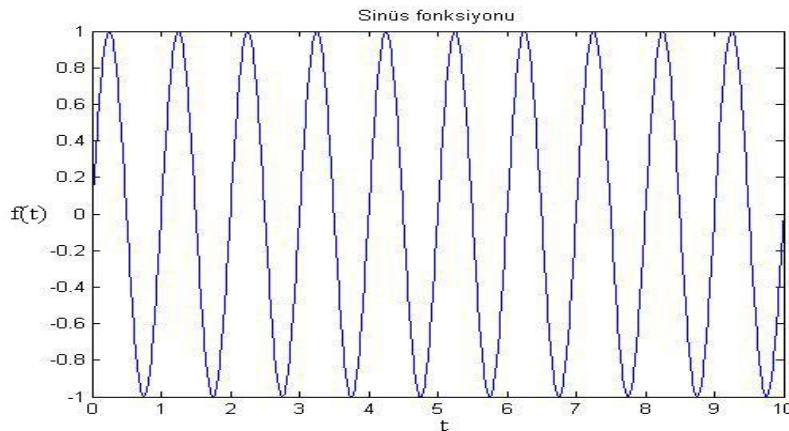
yerine zaman-ölçek bölgesini kullanır. Bu sayede düşük frekanslarda uzun zaman aralıklı, yüksek frekanslarda ise kısa zaman aralıklı pencereleme yapılmasını sağlar. Şekil 5.11’de FD, KZFD ve Dalgacık Dönüşümü’nün pencereleme yöntemleri verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde Dalgacık Dönüşümü’nün pencereleme noktasında sahip olduğu esneklik göze çarpmaktadır.



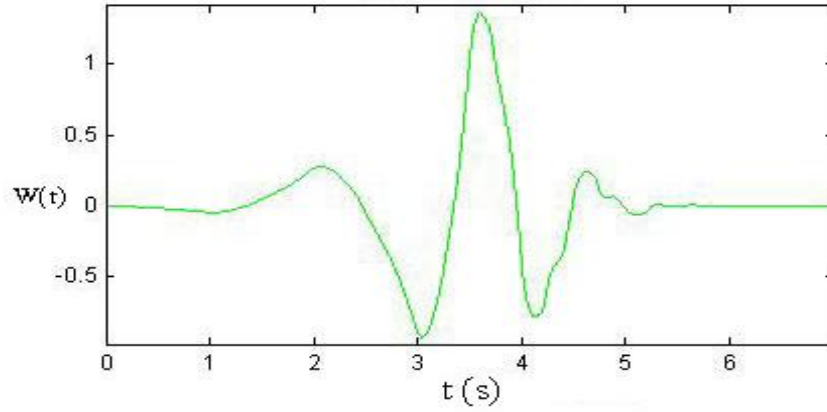
Şekil 5.11 : (a) FD (b) KZFD (c) DD pencereleme tekniği.

Dalgacık Dönüşümü’nün en önemli avantajı, zaman serisinin yerel olarak analizine imkan sağlamasıdır. Örneğin, kısa bir zaman sürecinde, süreksizliğe sahip sinüzoidal bir dalga ele alınırsa, dalgacık katsayıları süreksizliğin zaman boyutunda tam olarak nerede olduğunu verebilir. FD ve KZFD ise bu bilgiyi sağlayamaz.

Dalgacık kelime anlamından yola çıkılarak tanımlandığında dalganın küçüğü anlamına gelmektedir. Dalgacıklar sınırlı zaman diliminde tanımlıdırlar. Fourier analizinin temelini oluşturan sinüs ve kosinüs fonksiyonlarına bakıldığında $-\infty$ ’dan $+\infty$ ’a kadar olan aralıkta sürekli ve yumuşak geçişlere sahip oldukları görülür. Öte yandan dalgacıklar düzensiz ve asimetrik özellikler göstermektedirler. Bahsedilen özelliklerin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 5.12’de sinüs fonksiyonu ve Şekil 5.13’de bir dalgacık fonksiyonu örneği verilmiştir.



Şekil 5.12 : Bir sinüs fonksiyonu.



Şekil 5.13 : Bir dalgacık fonksiyonu.

$(-\infty, +\infty)$ aralığında tanımlı dalgacık fonksiyonları $(\Psi(t))$ ele alındığında bu fonksiyonların genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

1. Dalgacık fonksiyonunun $(-\infty, +\infty)$ aralığında integrali sıfırdır. Bu durum (5.24) eşitliği ile gösterilmiştir. Bu eşitlik $(-\infty, +\infty)$ aralığında dalgacık fonksiyonunun ortalamasının sıfır olduğunu gösterir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (5.24)$$

2. Bir fonksiyonun enerjisi, kendi alanı boyunca integrali alınan kareli bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Dalgacık fonksiyonunun $(-\infty, +\infty)$ aralığında karesinin integrali bire eşittir ve dolayısıyla ana dalgacık fonksiyonu birim enerjiye sahiptir. Bu durum (5.25) eşitliği ile gösterilmiştir (Gürsakal, 2009).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^2(t) dt = 1 \quad (5.25)$$

3. Daha önce bahsedildiği üzere dalgacık fonksiyonları sınırlı olmalıdır. Sınırlı bir fonksiyonun mutlak değerinin integrali de sınırlı olmak zorundadır. Bu durum (5.26) eşitliği ile gösterilmiştir. Sinüs fonksiyonu gibi sınırlı olmayan bir fonksiyonun integralinin durumu (5.27) eşitliği ile verilmiştir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)| dt < \infty \quad (5.26)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\sin t| dt = +\infty \quad (5.27)$$

4. Frekans değeri f sıfıra yaklaşırken, dalgacık fonksiyonu $\Psi(t)$ 'nin Fourier dönüşümünü temsil eden ve frekansın bir fonksiyonu olan $\Psi(f)$ 'de sıfıra

yaklaşmalıdır. Bu durum literatürde kabul edilebilirlik (admissibility) koşulu olarak bilinen (5.28) eşitsizliğini ortaya çıkarmaktadır (Chiann ve diğ., 1998). (5.29) eşitliği ise $\Psi(t)$ dalgacık fonksiyonunun Fourier dönüşümünü göstermektedir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{|f|} df < \infty \quad (5.28)$$

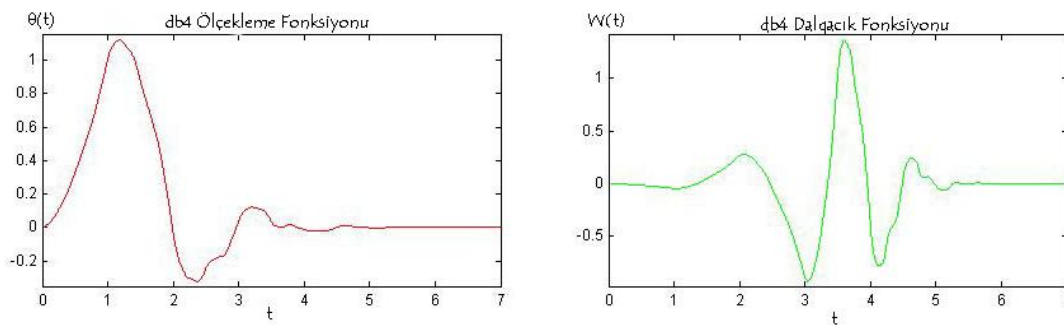
$$\Psi(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) e^{-ift} dt \quad (5.29)$$

Bu dört özelliği sağlayan fonksiyonlar ana dalgacık fonksiyonu (mother wavelet) olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikleri sağlaması bir fonksiyon için ölçeklenebilme, dönüşüm ve ters dönüşüm özelliklerini gösterebilmesini sağlaması bakımından önemlidir. Ölçeklenme ve dönüşüm yoluyla da dalgacık ailesi oluşur (Miner, 1998). Bu özelliklerin hepsini sağlayan dalgacıklar, ana dalgacık fonksiyonu ve ölçekleme fonksiyonu (father wavelet) olmak üzere iki bileşenden oluşur (Crowley, 2007).

Ana dalgacık fonksiyonunun tersine, ölçekleme fonksiyonunun integrali 1 değerine eşittir. Bu durum (5.30) eşitliğinde gösterilmiştir. Bu eşitlikteki $\phi(t)$ ölçekleme fonksiyonudur.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (5.30)$$

Ölçekleme fonksiyonu zaman serisinin alçak frekansa sahip genel trend özelliklerini temsil ederken, ana dalgacık fonksiyonu yüksek frekansa sahip zaman serisinin detay özelliklerini temsil etmektedir (Gürsakal, 2009). Şekil 5.14 Daubechies dalgacık ailesinden db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 5.14 : db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu.

Ana dalgacık fonksiyonu ayrık dalgacık dönüşümündeki detay katsayılarını veren yüksek frekansları geçiren dalgacık filtresini (h_k), ölçekleme fonksiyonu ise yaklaşım katsayılarını veren düşük frekansları geçiren dalgacık filtresini (g_k) temsil

etmektedir (Miner, 1998). Bu filtreleme özelliklerinden ayrık dalgacık dönüşümü bölümünde ayrıntılı şekilde bahsedilecektir.

Bir ana dalgacık fonksiyonunun yazımı ölçek parametresi (a) ve konum parametresi (u) katılımlarıyla (5.31) eşitliğindeki gibidir.

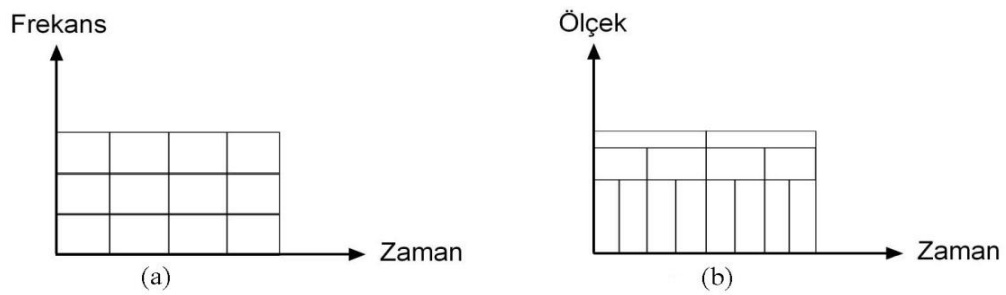
$$\Psi_{a,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-u}{a}\right) \quad (5.31)$$

Bu eşitlikte $a, u \in R$ ve $a \geq 0$ olmalıdır. Dalgacık Dönüşümü, Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) olmak üzere iki ana başlık altında incelenecektir.

5.5.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ndeki pencereleme fikrine benzemektedir. Fakat bu iki dönüşüm arasındaki en temel farklılık, SDD'de KZFD'nin aksine zaman frekans boyutu yerine ölçek zaman boyutu kullanılır. Bunun sonucu olarak, SDD'de zaman serisinde bulunan yüksek ve alçak frekans bilgilerini en iyi biçimde analiz etmesini sağlayan farklı büyüklükte pencerelere ayrılma özelliği vardır. KZFD'de ise pencere büyüklükleri sabittir ve tüm frekans bilgisi aynı zaman-frekans çözünürlüğünde analiz edilmek zorundadır (Toprak, 2007). Şekil 5.15 ve 5.16'da bu pencereleme özelliklerini ve farklılıklarını görülmektedir.

Sürekli Dalgacık Dönüşümü, analiz edilen zaman serisi ile dalgacık fonksiyonunun ölçekli ve kaydırılmış versiyonlarının bütün zaman değerlerinde çarpılarak toplanması sonucu elde edilir (Misiti ve diğ, 1997).

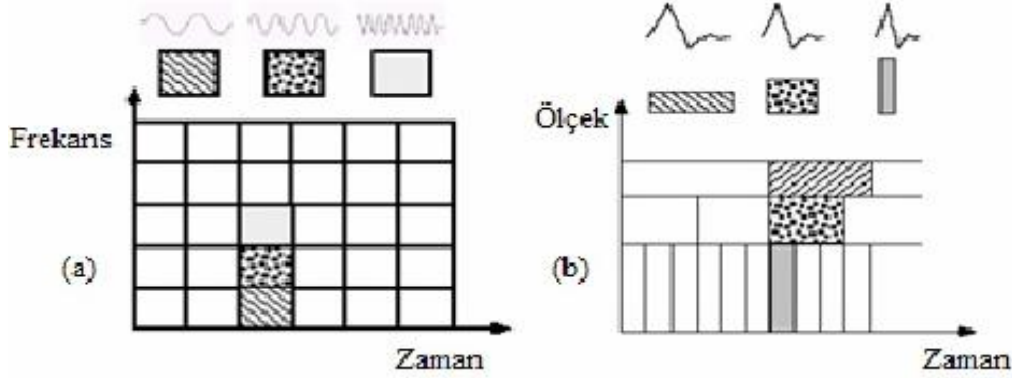


Şekil 5.15 : (a) KZFD pencerelemesi (b) SDD pencerelemesi.

SDD'de ölçek (a) ve konum (u) parametreleri reel (gerçek) sayılarda tanımlı (R) ve $a \geq 0$ kısıtlaması altında sürekli biçimde değişmektedir (Daubechies, 1992). SDD'nin matematiksel ifadesi (5.32) eşitliği ile verilmiştir.

$$C(a, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^*(a, u, t) dt \quad (5.32)$$

Bu eşitlikte $C(a,u)$; sürekli dalgacık dönüşümü sonucu oluşan katsayıları, $\Psi^*(t)$; dalgacık fonksiyonunun eşleniğini, $x(t)$; dönüşümün uygulandığı zaman serisini, a ; ölçek parametresini, u ; konum parametresini temsil etmektedir.



Şekil 5.16 : (a) KZFD pencerelemesi (b) SDD pencerelemesi.

SDD’de hem sadece reel içeriğe sahip dalgacıklar kullanılabiliyor iken hem de Morlet ve Paul gibi sanal içeriğe sahip dalgacıklar da kullanılabilmektedir. Eğer sanal içeriğe sahip olmayan bir dalgacık kullanılıyorsa eşleniğin bir anlamı yoktur. Çünkü eşlenik, sanal bileşenin işaretinin değişmesi ile ilgili bir kavramdır. Eğer karmaşık içeriğe sahip bir dalgacık kullanıyorsak SDD esnasında eşleniğini kullanmalıyız. Ayrıca belirtilmesinde fayda görülen bir nokta da karmaşık içeriğe sahip dalgacıkların sadece SDD dönüşümünde kullanılabılır olmalarıdır. Ayırık Dalgacık Dönüşümü’nde sanal içeriğe sahip dalgacıklar kullanılamaz.

Ölçek ve konum parametrelerine bağlı dalgacık fonksiyonunun yazımı (5.33) eşitliği ile gösterilmiştir. Bu kısımdan itibaren kullanılan dalgacıklar reel kabul edilerek formüller oluşturulmaya devam edilecektir.

$$\Psi(a, u, t) = \Psi_{a,u}(t) \quad (5.33)$$

Bu eşitlikteki $\Psi_{a,u}(t)$ ifadesinin (5.34) eşitliğinde açık yazımı verilmiştir.

$$\Psi_{a,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-u}{a}\right) \quad (5.34)$$

(5.32) nolu eşitlikte, (5.33) ve (5.34) eşitliklikleri yazılarak (5.35)’deki SDD katsayılarının oluşmasını sağlayan formüle ulaşılır.

$$C(a, u) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-u}{a}\right) dt \quad (5.35)$$

Zaman boyunca kaydırılmış ve ölçeklenmiş ana dalgacık fonksiyonu zaman serisine uygulandığında, karmaşık yapıda bulunan zaman serisi daha basit bileşenlere ayrıştırılır. Bu işlem zaman serisinin ayrıştırılması veya analiz edilmesi olarak

adlandırılır. Eğer dalgacık fonksiyonu kabul edilebilirlik (admissibility) koşulunu sağlarsa, ters alma işlemi ile dalgacık katsayıları kullanılarak zaman serisi tekrar elde edilebilir. Bu işleme ise sentezleme (reconstruction) denilmektedir. (5.36) eşitliğinde kabul edilebilirlik koşuluna sahip dalgacık ile ters dönüşümün gerçekleşmesini sağlayan formülasyon verilmiştir.

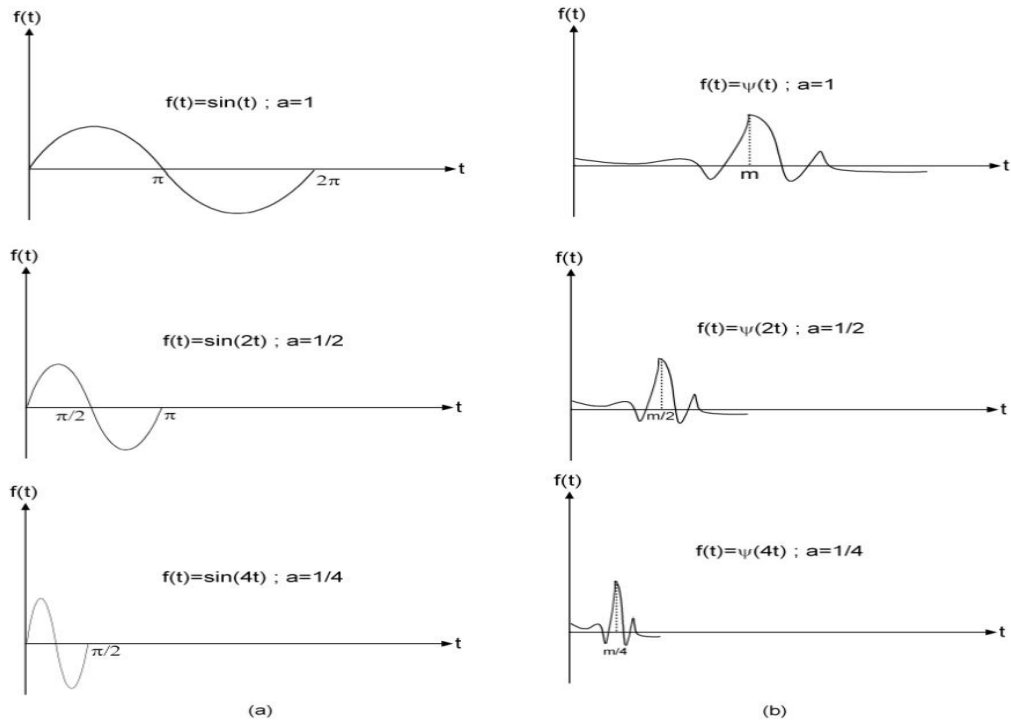
$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(a, u) \Psi_{a,u}(t) du \frac{da}{a^2} \quad (5.36)$$

Sonuç olarak (5.35) eşitliği ile gerçekleştirilen SDD ile çok büyük sayıda dalgacık katsayısı elde edilir. Farklı ölçek ve zamanlarda elde edilmiş olan dalgacık katsayıları ile uygun ölçeklenmiş ve kaydırılmış dalgacık çarpılarak, işlemin tersine döndürülmesi sağlanır ve başlangıçtaki zaman serisi tekrar elde edilebilir.

Sürekli dalgacık dönüşümünün gerçekleştirilmesinde büyük öneme sahip olan ölçek ve konum parametrelerinin özelliklerini incelemek dönüşümün dayandığı temelleri anlamak açısından gereklidir.

5.5.1.1 Ölçekleme

Ölçekleme bir fonksiyonu sıkıştırma veya genişletmeye yarar.



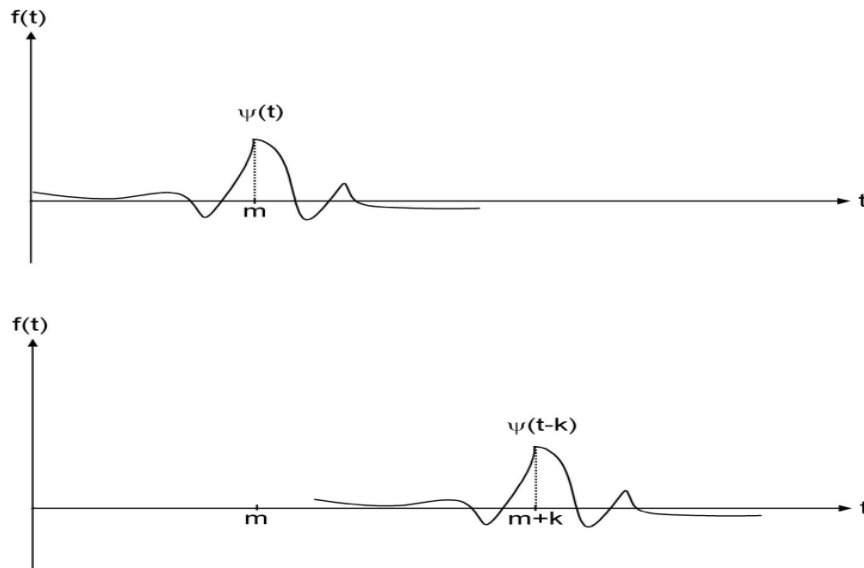
Şekil 5.17 : Sinüs ve dalgacık fonksiyonunun ölçeklenmesi.

Her fonksiyonun ölçeklenebilmesi mümkün değildir. Ölçekleme fikrinin daha iyi anlaşılabilmesi için ölçeklenebilme özelliğine sahip periyodik bir fonksiyon $f(t) =$

sint ile aynı biçimde ölçeklenebilme özelliğine sahip olan bir dalgacık Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere ölçekleme bir fonksiyonun sıkıştırılması ve genişletilmesi ile ilgili bir olaydır. Ölçekleme ile fonksiyonun gerçekte var olan hiçbir özelliği kaybolmaz.

5.5.1.2 Kaydırma

Aynı şekilde matematiksel olarak $\Psi(t)$ dalgacık fonksiyonunun zaman eksenı boyunca kaydırılmış biçimi $\Psi(t - k)$ olarak gösterilir. Kaydırma miktarını belirleyen k bütün reel sayı değerlerini alabilmektedir. Kaydırma işlemi sayesinde, belirli bir ölçek değeriyle sıkıştırılmış dalgacık fonksiyonu ile analiz edilen zaman serisinin en uyumlu kısmı belirlenebilmektedir.



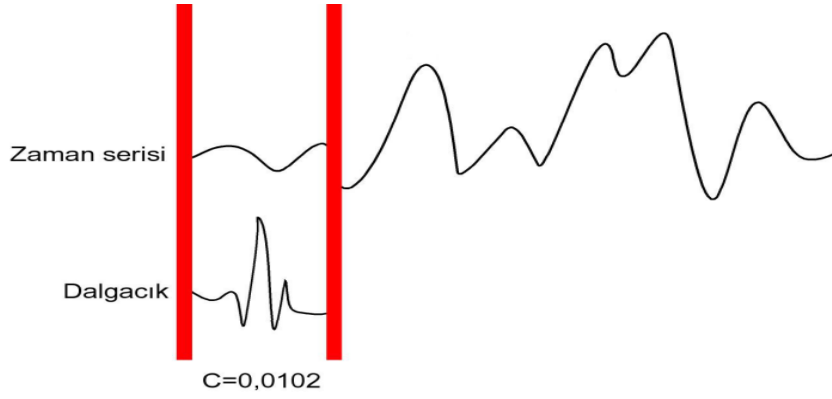
Şekil 5.18 : Bir dalgacığın zaman eksenı boyunca kaydırılması.

5.5.1.3 Bir zaman serisine sürekli dalgacık dönüşümünün uygulanması

Daha önce de belirtildiği üzere sürekli dalgacık dönüşümü, bir zaman serisinin analizde kullanılan dalgacığın ölçeklenmiş ve kaydırılmış bütün versiyonları ile çarpılması sonucu ortaya çıkan değerlerin toplanması sürecine dayanmaktadır. Bu işlem sonucunda ölçek ve konumun birer fonksiyonu olan dalgacık katsayıları çıkar.

SDD aşağıda bahsedilen 5 adımlık alırtımadan oluşmaktadır.

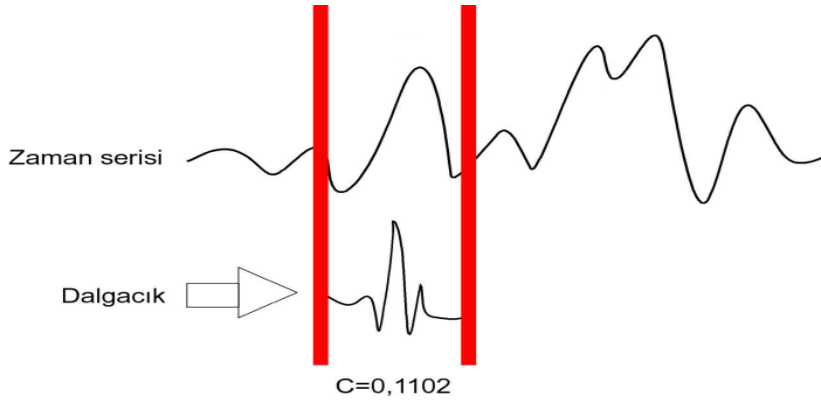
1.adım: Uygun bir dalgacık seçilir ve analiz edilecek zaman serisinin başlangıç kısmındaki bir parça ile karşılaştırılır. Şekil 5.19’da bu durum görülmektedir.



Şekil 5.19 : Dalgacık ile serinin başlangıç kısmının karşılaştırılması.

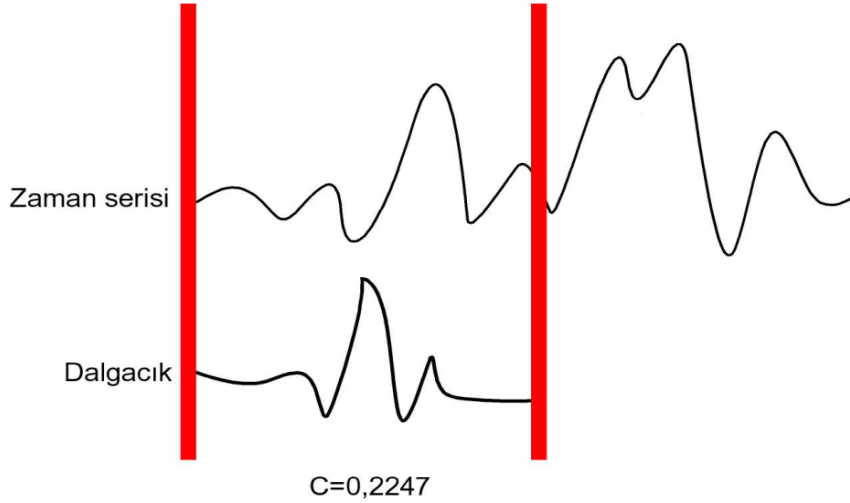
2.adım: Bu karşılaştırma sürekli dalgacık katsayıları olan C değerlerinin hesaplanması ile gerçekleştirilir. Elde edilen bu katsayılardan büyük C değerleri zaman serisi ile analizde kullanılmakta olan dalgacık arasındaki benzerliğin fazla, küçük C değerleri ise az olduğunu göstermektedir. Şekil 5.19’da elde edilmiş 0,0102’lik değeri ile C değeri görülmektedir. Benzerliğin son derece az olduğu bu karşılaştırmada C değeri de son derece düşük çıkmıştır. Eğer zaman serisinin enerjisi ve dalgacığın enerjisi 1 değerine eşit kabul edilirse, dalgacık katsayıları olan C değerleri dalgacık ile zaman serisi arasındaki korelasyon katsayıları olarak yorumlanabilir. Buradan anlaşılması gereken C değeri 1’e yaklaştıkça, dalgacık ile zaman serisi arasındaki benzerlik artar.

3.adım: Dalgacık sağa doğru kaydırılarak 1. ve 2. adımlar zaman serisinin bitimine kadar sürekli tekrarlanır ve bütün dalgacık bu şekilde analiz edilmiş olur. Bu işlem sayesinde seçilmiş olan dalgacık ile zaman serisinin karşılaştırılması sonucu ortaya çıkan C değerleri sayesinde benzerliğin en yüksek olduğu zaman değeri belirlenebilir.



Şekil 5.20 : Dalgacığın zaman serisi üzerinde kaydırılması.

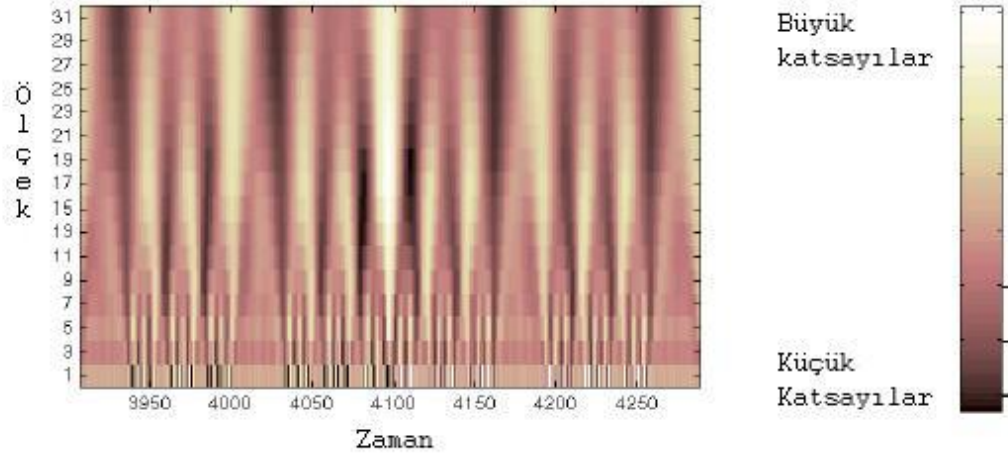
4.adım: Bu aşamadan itibaren ölçek müdahalesi başlar. Dalgacık ölçeği değiştirilerek genişletilir ve 1’den 3’e kadar olan adımlar tekrar hesaplanır. Bu sayede ölçek analize dahil olur. Bu şekilde belirli bir ölçek ve zamandaki, dalgacık ile zaman serisi arasındaki benzerlikler belirlenir. Şekil 5.21’deki ölçeklenerek genişletilmiş olan dalgacık ile zaman serisinin C değeri hesaplanmıştır. Benzerlik artışı Şekil 5.19 ile kıyaslandığında, hem gözle hem de çıkan C değeri ile açıkça görülmektedir.



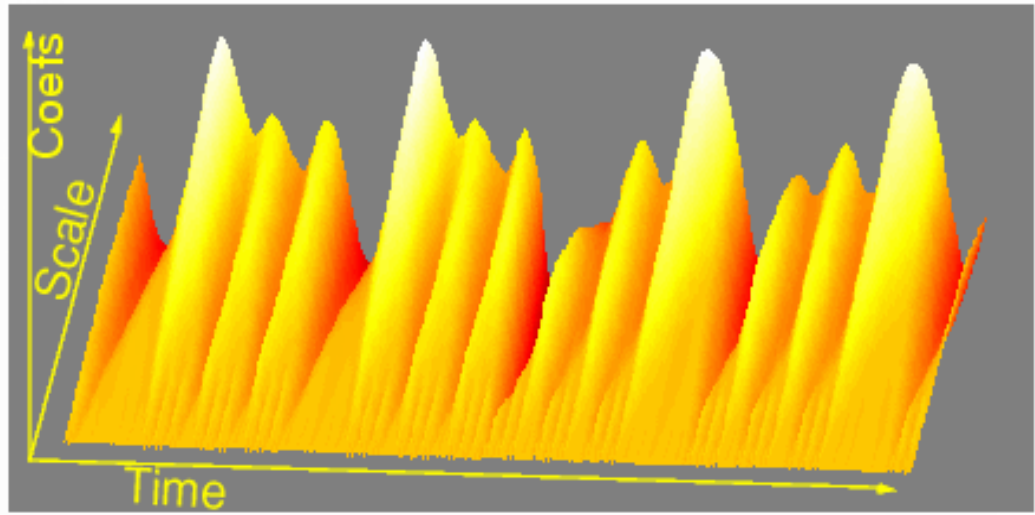
Şekil 5.21 : Ölçeği değiştirilmiş dalgacık ile serinin karşılaştırılması.

5.adım: Son adımda ise 1’den 4’e kadar olan adımlar bütün ölçek değerleri için hesaplanır. Bu sayede konum ve ölçeğin birer fonksiyonu olan çok büyük miktarda katsayıya ulaşılır.

Bu beş işlem sonucunda, farklı ölçeklerde ve sinyalin farklı parçalarındaki dalgacık katsayıları elde edilir. Bu katsayılar zaman serisi üzerine uygulanan dalgacığın regresyon sonuçlarını oluşturmaktadır. Bu işlemler sonucu oluşan dalgacık katsayıları sayısal değerlerinin alınıp incelenmesi çok mümkün olmayan büyük bir veri yığını oluşturmaktadır. Bu nedenle sonuçların grafiklere aktarılması vasıtasıyla analiz edilen veri hakkında yorum yapma imkanı elde edilebilir (Misiti ve diğ, 1997). Bu beş adımlık analizin tamamlanması ile Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de görülen grafikler elde edilir. Şekil 5.22’de analiz sonuçlarını 2 boyutta gösteren grafik, Şekil 5.23’de ise analiz sonuçlarını 3 boyutlu gösteren grafik verilmiştir. Bu grafikler sayesinde zaman serisinin yorumlanabilmesi mümkün hale gelmektedir.



Şekil 5.22 : SDD ile elde edilen katsayıların 2 boyutlu görünümü.

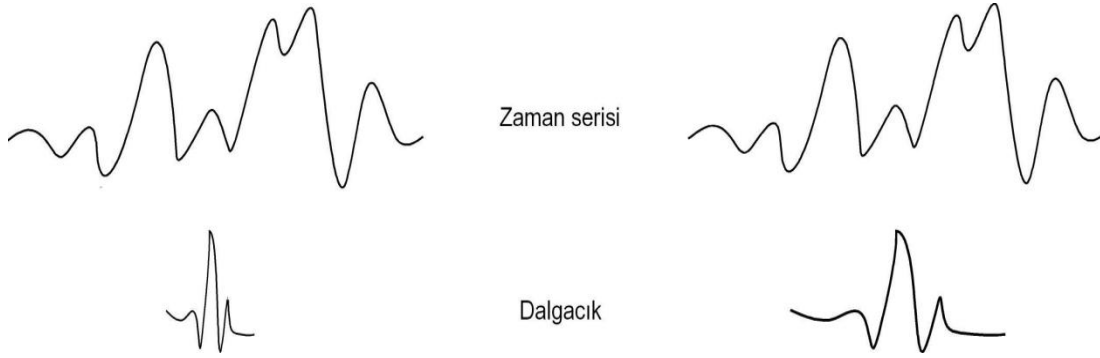


Şekil 5.23 : SDD ile elde edilen katsayıların 3 boyutlu görünümü.

5.5.1.4 Ölçek ile frekans ilişkisi

Şekil 5.21 ve 5.22’de ölçek değerleri 1 ile 31 arasında değişmektedir. Daha önce de değinildiği üzere, yüksek ölçek değerleri daha genişletilmiş dalgacıklar üretirken, düşük ölçek değerleri sıkıştırılmış dalgacıklar üretir. Ölçeklendirmede dikkat edilmesi gereken husus, ölçeklendirilmiş dalgacığın uzunluğu, analiz edilen zaman serisinin uzunluğunu geçmemelidir. Yapılacak analizde, zaman serisi içinde dalgacığın en az iki salınım yapmasına izin verecek ölçek değeri maksimum seçeceğimiz ölçek değeri olmalıdır. Aksi takdirde sürekli dalgacık dönüşümünün veri içindeki periyodiklikleri yakalama özelliğini kaybetmesine sebep oluruz. Bu noktada kullanılacak zaman serisinin uzunluğunun ikinin bir kuvveti olması durumunda ölçek belirlenmesi kolaylaşır. Aksi takdirde analiz esnasında zaman serisinin sonuna yapay

olarak sıfırlar eklenmesi (zero padding) ile zaman serisindeki veri adedi ikinin kuvvetlerine tamamlanır. Bu durum elde edilecek sonuçlara yapay bir etkidir ve sonuçların doğruluğunu etkileme özelliğine sahiptir.



Şekil 5.24 : Farklı ölçeklenmiş dalgacık ile zaman serisi durumları.

Ölçek ile frekans ilişkisi:

Düşük Ölçek Değerleri; Sıkıştırılmış Dalgacık Üretir. Hızlı değişen detaylar daha iyi yakalanır ve dolayısıyla yüksek frekans değerleri tespiti için uygundur.

Yüksek Ölçek Değerleri; Genişletilmiş Dalgacık Üretir. Yavaş değişen özellikler, yani verinin genel trendini yansıtan özellikler daha iyi yakalanır ve dolayısıyla alçak frekans değerleri tespiti için uygundur.

5.5.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile bütün ölçeklerde hesaplanan dalgacık katsayıları çok büyük veri yığını oluşmasına neden olur. Bu verilerin bütünü üzerinde hesaplama yaparak çalışma yapılması çok büyük zorluklar içermektedir. Bu noktada bütün ölçek ve konum değerlerinde hesaplama yapmak yerine, bu ölçek ve konum değerlerinin işimize yarayacağını düşündüğümüz alt kümeleri ile çalışma fikri Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nün çıkış noktasını oluşturmaktadır (Misiti ve diğerleri, 1996).

Mühendislik alanındaki dalgacık dönüşümü uygulamaları genellikle ayrık dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilir. Ayrık dalgacık dönüşümünde sırasıyla ölçek ve konum parametreleri ayrıklaştırma işlemine uğrayarak (5.37) ve (5.38) eşitliklerindeki hale gelirler.

$$a = a_0^m \quad (5.37)$$

$$u = nb_0a_0^m \quad (5.38)$$

Bu eşitliklerdeki m ve n birer tamsayıdır.

Yeni elde edilen bu ölçek ve konum parametreleri ile dalgacık fonksiyonu (5.39) eşitliğindeki halini alır.

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (5.39)$$

Bu denklemde tamsayı olan m ve n değerleri sırasıyla frekansın ve zamanın yerini belirtir. Ayırıklaştırma işleminin bu noktasında genellikle ölçek ve konum parametreleri ikinin kuvvetleri ile gösterim fikrini temel almaktadır. İkili (dyadic) ölçek ve konumlar olarak adlandırılan bu seçim, yapılan analizlerin çok daha verimli ve doğru olmasını sağlar. İkili ölçek ve konum belirleme işlemi $a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ alınması (5.37) ve (5.38) eşitliklerine bu durumun uygulanması ile sırasıyla (5.40) ve (5.41) eşitlikleri ortaya çıkar.

$$a = 2^m \quad (5.40)$$

$$u = n \cdot 2^m \quad (5.41)$$

Bu yeni oluşan ölçek ve konum parametreleri (5.39) eşitliğinde yerine yazılarak ikili ölçekleme ve konumlamaya dayanan ADD uygulamalarında kullanılan dalgacığa (5.42) eşitliğinde verilen şekli ile ulaşılmış olur.

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \Psi(2^{-m}t - n) \quad (5.42)$$

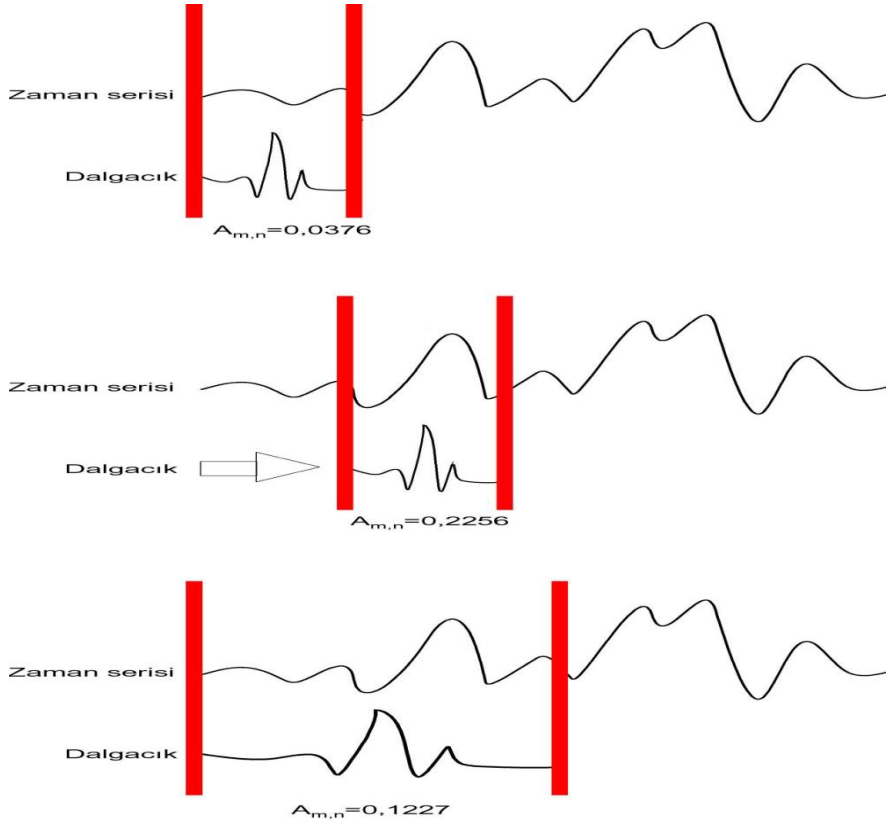
Bu ikili ölçekleme ve konumlama işlemi filtreleme işleminin de temeli oluşur.

ADD katsayılarının elde edilmesini sağlayan matematiksel ifadeye (5.40), (5.41) ve (5.42) eşitliklerinin SDD formülünde yerine konulması sonucu (5.43) eşitliği ile ulaşılır.

$$A_{m,n} = 2^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi(2^{-m}t - n) dt \quad (5.43)$$

Bu eşitlikte $A_{m,n}$, zaman serisi ile ayırık dalgacık fonksiyonunun işleme girmesi ile oluşan dalgacık katsayılarını göstermektedir. Dalgacık analizinde katsayılar, zaman serisi ile dalgacık arasındaki uyumun bir ölçüsüdür. Katsayılar ne kadar büyük ise uyum o kadar fazladır (Miner, 1998). Şekil 5.25 ayırık dalgacık dönüşümünün zaman serisine uygulanması ve bu uygulama sonucu ortaya çıkan dalgacık katsayıları gösterilmiştir.

Sürekli dalgacık dönüşümünde sırasıyla ölçek ve konum parametreleri olan a ve u reel sayı değerleri alırken, ayırık dalgacık dönüşümünde tamsayı değeri almaktadırlar. Bu iki dönüşümde de ölçek değeri sıfıra eşit olamaz (Daubechies,1992).



Şekil 5.25 : ADD'nin zaman serisine uygulanması.

5.5.2.1 Filtreleme ile Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Ayrık dalgacık dönüşümünün ikili ölçekleme ve konumlamaya dayanan uygulama şekli filtrelemenin temelini oluşturmaktadır. Filtreleme ile analiz, 1988 yılında Mallat tarafından geliştirilen son derece etkili ve verimli bir şekilde ayrık dalgacık dönüşümü uygulamaları sağlayan bir yöntemdir. Mallat'ın bu yöntemi basit bir şekilde anlatılacak olursa bir kutudan zaman serisi geçirilerek son derece hızlı bir şekilde dalgacık katsayıları oluşturulur. Filtreleme uygulamalarına geçmeden önce dalgacık dönüşümünde kullanılan filtreler olan alçak geçiren filtre ve yüksek geçiren filtreleri incelemek faydalı olacaktır.

Alçak ve yüksek geçiren filtreler

Zaman serisini farklı frekans aralıklarına ayırtırmak, zaman serisinin ard arda yüksek ve alçak geçiren filtrelerden geçirilmesi ile sağlanır. Zaman serisi ($x(t)$), önce yarım bantlı yüksek geçiren ($g(k)$) filtresinden ve ardından alçak geçiren ($h(k)$) filtresinden geçirilir. Filtrelemeden sonra zaman serisindeki en yüksek frekans f yerine $f/2$ olur ve Nyquist kriterine göre zaman serisindeki örneklerin yarısı elenir.

Bu işlemde kullanılan filtrelerin matematiksel ifadeleri (5.44) ve (5.45) eşitliklerinde verilmiştir.

$$g(k) = \sum_n x(t)g(2k - t) \quad (5.44)$$

$$h(k) = \sum_n x(t)h(2k - t) \quad (5.45)$$

Ayrık dalgacık dönüşümünün önemli özelliklerinden biriside yüksek geçiren ve alçak geçiren filtrelerin birbirinden bağımsız olmayıp aralarında aşağıdaki gibi bir ilişkinin bulunuyor oluşudur. Bu ilişki (5.46) eşitliği ile verilmiştir. Bu eşitlikte L filtre uzunluğudur ve çift sayı olmak zorundadır.

$$g(L - 1 - k) = (-1)^k \cdot h(k) \quad (5.46)$$

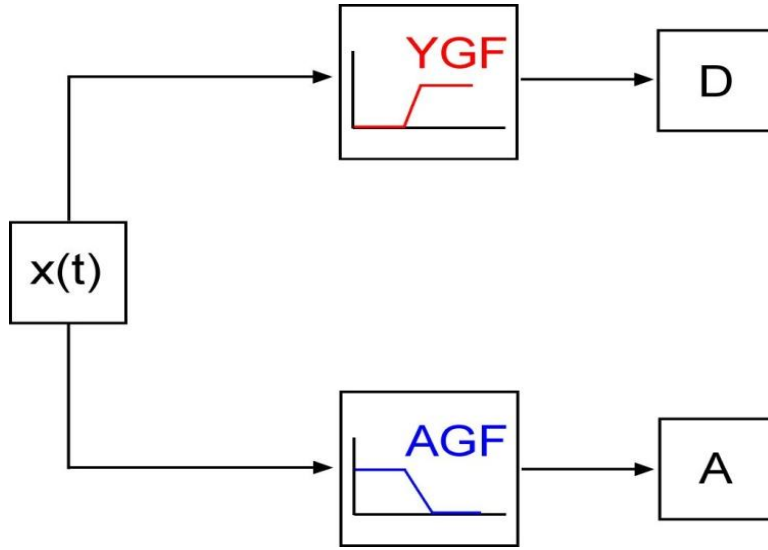
Bir aşamalı filtreleme

Birçok zaman serisi için alçak frekans bileşeni, serinin en önemli kısmını oluşturur. Bu kısım zaman serisinin ana karakterini göstermenin yanında serinin genel davranışı hakkında da bilgi verir. Öte yandan yüksek frekans bileşenleri zaman serisindeki ayrıntılar hakkında bilgi verir. Alçak ve yüksek frekans bileşenlerinin bir zaman serisine etkisi insan sesine ait zaman serisi üzerinden çok daha iyi anlaşılabilir. Bir insan sesinin oluşturduğu zaman serisindeki yüksek frekans bileşeni ortadan kaldırılırsa sadece sesin tonunda değişim gözlenirken alçak frekans bileşeni ortadan kaldırılırsa anlaşılması mümkün olmayan bir ses duyulur (Misiti ve diğ, 2002).

Bir aşamalı filtreleme sayesinde ayrık dalgacık dönüşümü ile zaman serileri alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrıştırılır. Bu bileşenler yaklaşım (approximations) ve detay (details) bileşenleri olarak adlandırılır. Burada yaklaşım bileşeni yüksek ölçek değerlerine sahip olmakla beraber zaman serisindeki alçak frekans değerlerini temsil eder. Detay bileşenleri ise düşük ölçek değerlerine sahip zaman serisinin yüksek frekans değerlerini temsil eder. Yaklaşım bileşeni A harfi ile detay bileşenleri D harfi ile gösterilmektedir. Bir aşamalı filtreleme Şekil 5.26'da basit bir şekilde gösterilmiştir.

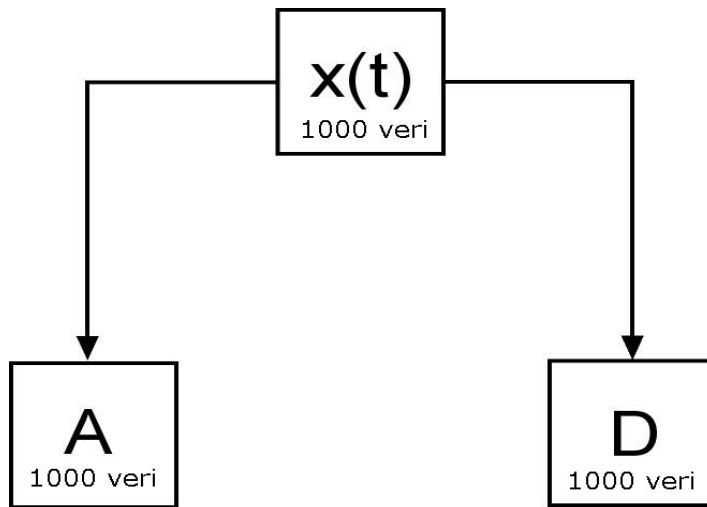
Ayrıştırma işlemi Şekil5.26'da görüleceği üzere orijinal zaman serisinin 2 farklı filtreden geçirilmesi ile gerçekleşir. Bu filtreler Alçak Geçiren Filtre (AGF) ve Yüksek Geçiren Filtre (YGF)'dir. AGF alçak frekans değerlerine sahip yaklaşım bileşenini oluştururken, diğer taraftan YGF yüksek frekans değerlerine sahip detay bileşenini oluşturur. Bu ayrışımı sağlayan filtreler bu işlemi gerçekleştirirken AGF

ölçekleme fonksiyonu olan $\phi(t)$ 'yi (father wavelet) kullanırken, YGF ise dalgacık fonksiyonu olan $\psi(t)$ 'yi kullanır.



Şekil 5.26 : Filtreleme ile yaklaşım ve detay bileşeni oluşumu.

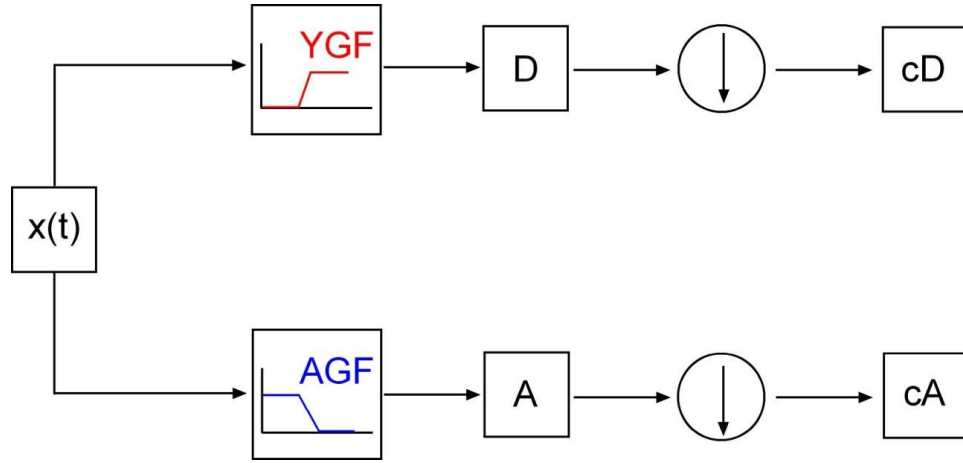
Bu işlem gerçek zamanlı sayısal bir veri ile gerçekleştirildiğinde başlangıçtaki durumdan daha fazla sayıda veriyle işlem sonuçlanır. Örnek olarak 1000 adet veri bulunan bir zaman serisine bu işlem uygulanırsa her biri 1000 er adet veriden oluşan A ve D bileşenlerinin ortaya çıkışı ile toplamda 2000 adet veri ortaya çıkar. Şekil 5.27’de filtreleme sonucu oluşan bu katsayı durumu verilmiştir. Orijinal zaman serisi kendisiyle aynı sayıda veri yerine 2 katı veri ile temsil edildiğinden bu istenilmeyen bir durumdur. Bu aşamada orijinal veri adedinin korunması için aşağı örnekleme (downsampling) denilen yeni bir işleme ihtiyaç vardır.



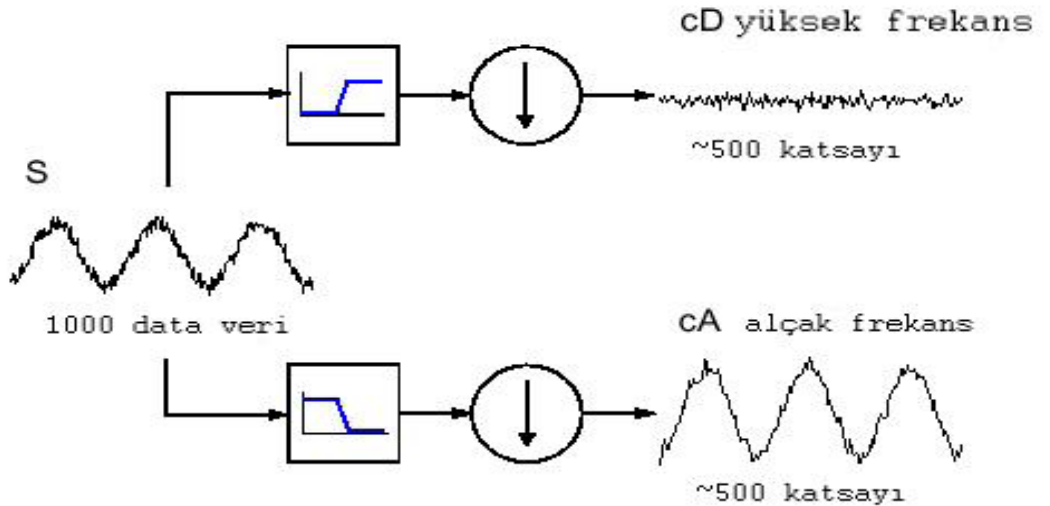
Şekil 5.27 : Filtreleme ile oluşan bileşenlerin veri durumu.

Aşağı örnekleme

Bir önceki bölümde verilmiş olan sayısal örnek yardımıyla aşağı örnekleme anlatılacak olursa, başlangıçta 1000 veriye sahip olan zaman serisi ile aynı sayıda veri elde edebilmek için AGF ve YGF ile filtrelemenin ardından ortaya çıkan 2000 veriden herbirinde 2 noktadan sadece birinin alınması ile filtreme işlemi sürdürülerek yine 1000 adet veri elde edilir. Bu işlem sonucu yaklaşık olarak 500 yaklaşım katsayısı (cA) ve 500 adet detay katsayısı (cD) elde edilmiş olur. Bu işlem aşağı örnekleme (down-sampling) olarak adlandırılır. Şekil 5.28’de bir zaman serisinin aşağı örnekleme süreci grafik ile gösterilmiştir. Şekil 5.29’da ise gerçek zamanlı bir zaman serisinin aşağı örnekleme süreci gösterilmiştir.



Şekil 5.28 : Bir zaman serisinin aşağı örnekleme algoritması.



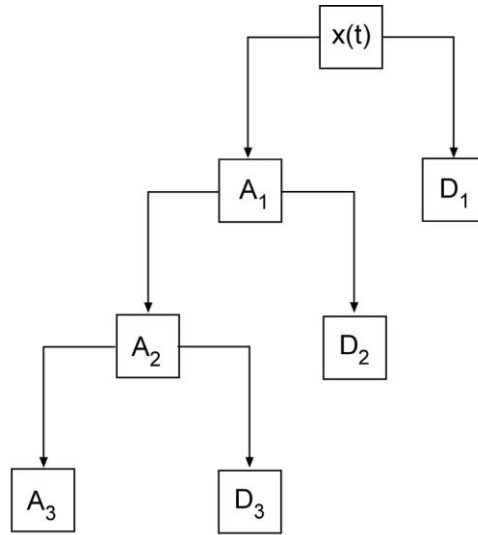
Şekil 5.29 : Gerçek zamanlı serinin aşağı örnekleme süreci.

Aşağı örnekleme sonucu oluşan yaklaşım ve detay bileşenlerine ait katsayı adetleri veri adedinin yarısından çok küçük bir oranda daha fazla olabilir. Bunun nedeni

filtrelemeden kaynaklı konvolüsyon işleminin zaman serisine ekstra veriler ekleyerek, onu yaymasıdır. Örnekle anlatmak gerekirse, 1000 veri ile oluşmuş bir zaman serisi filtreleme ve aşağı örneklemenin ardından 1000 katsayı yerine 1001, 1002 veya 10003 gibi çok az bir fazlalık katsayı adedine sahip olabilir (Misiti ve diğ., 1996).

5.5.2.2 Çoklu Çözünürlük Analizi

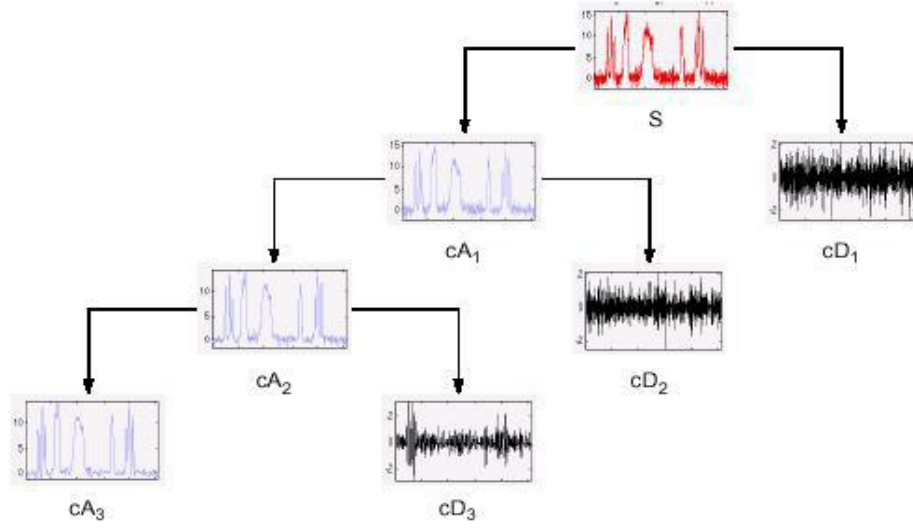
Bir filtreli ayrışım işlemi ardışık bir şekilde her ayrışımın ardından çıkan yaklaşım bileşeninin tekrar filtreler kullanılarak ayrıştırılması biçiminde ardışık olarak gerçekleştirilirse, bu işlem Çoklu Çözünürlük Analizi (Multiresolution Analysis) olarak adlandırılır. Bu işlemi biraz daha ayrıntısına girerek vermek gerekirse, zaman serisi 1 kez ayrıştırmaya uğrarsa 1 yaklaşım ve 1 detay bileşeni ortaya çıkar. Ardından işlem yaklaşım bileşeninin diğer filtreden geçirilmesi ile devam eder ve tekrar farklı çözünürlüğe sahip yeni yaklaşım bileşeni ve detay bileşeni elde edilir. Şekil 5.30'da ardışık olarak gerçekleştirilen bu işlemi gösteren dalgacık ayrışım ağacı görülmektedir. Bu şekilde 3. seviyeye kadar ayrıştırma yapılmıştır. Gerçek zamanlı bir zaman serisine aynı işlemin uygulanması Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30 : ÇÇA ile 3. seviye yaklaşım ve detay bileşenleri.

Şekil 5.31'deki ayrıştırma işlemi biraz daha ayrıntılı incelenecek olursa en son yaklaşım bileşeni olan cA_3 başlangıçtaki zaman serisine ait genel özellikleri çok daha sadeleşmiş biçimde göstererek iyi bir yaklaşım sunmaktadır. Aynı şekilde, detay

bileşenlerine bakılacak olursa, zaman serisi içindeki ani değişimlere sahip yüksek frekanslı kısımlara ait bilgiler verdikleri görülmektedir.



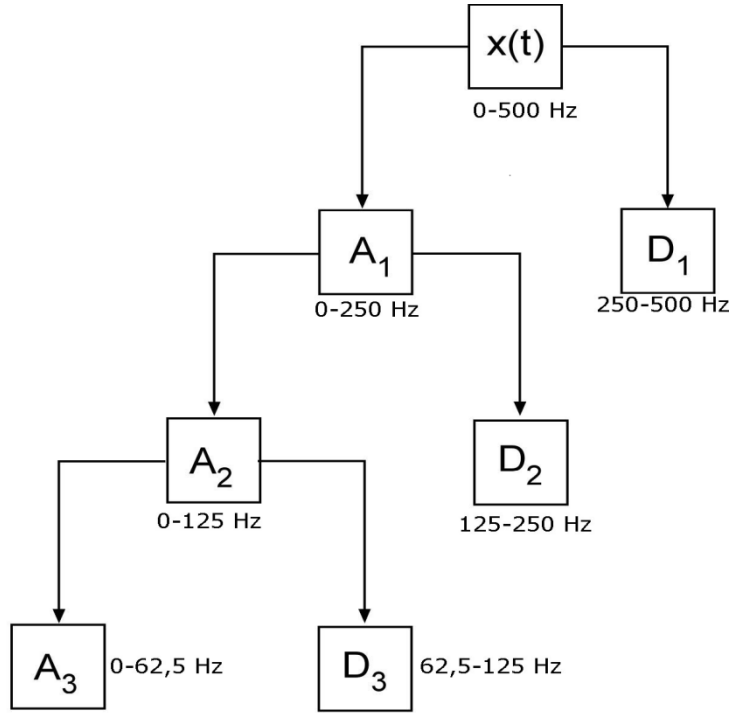
Şekil 5.31 : Gerçek zamanlı bir zaman serisinin ayrıştırılması.

Çözünürlük kısmından biraz bahsedilecek olursa yarım bantlı alçak geçiren filtre zaman serisindeki en yüksek frekansın yarısından büyük olan tüm frekansları yok ederken, yarım bantlı yüksek geçiren filtre ise zaman serisindeki en yüksek frekansın yarısından küçük tüm frekansları yok eder. Örneğin bir zaman serisi 500 Hz'lik en yüksek frekans değerine sahip ise, yarım bantlı alçak geçiren filtreleme ile 250 Hz'in üzerindeki tüm frekanslar, yarım bantlı yüksek geçiren filtre ile 250 Hz'in altındaki tüm frekanslar yok edilir. Bu durum Şekil 5.32'de gösterilmiştir. Sonuçta, zaman serisinin bu işlemlerin ardışık tekrarları sonucu birçok alt frekans bandında çözünürlük analizi gerçekleştirilmiş olur. Yaklaşım bileşeni, zaman serisinin yüksek ölçekli veya düşük frekanslı kısmını, detay bileşenleri ise düşük ölçekli ve yüksek frekanslı kısımları temsil eder.

Çoklu Çözünürlük Analizi sonuçlarının yorumlanması şu şekilde olmalıdır. Düşük ölçekler, sıkıştırılmış bir dalgacık yardımıyla elde edilir ve zaman serisindeki hızlı değişimlere sahip yüksek frekanslı bileşenleri gösterir. Öte taraftan, yüksek ölçekler ise genişletilmiş bir dalgacık fonksiyonu yardımıyla elde edilir ve zaman serisindeki yavaş değişimleri, trend veya düşük frekanslı mevsimsel değişimleri gösterir.

ÇÇA yüksek frekans değerlerinde düşük frekans çözünürlüğü ve yüksek zaman çözünürlüğü, alçak frekans ise düşük zaman çözünürlüğü ve yüksek frekans çözünürlüğü sağlar. Ayrıca bu yaklaşım kısa süren yüksek frekanslı zaman serisi parçaları ve uzun süren düşük frekanslı zaman serisi parçalarının bulunması

durumunda sonuçları çok daha anlamlı hale getirir. Bu noktada durağan olmayan zaman serileri bu özelliği taşıdığından bu yaklaşım çok önemlidir.



Şekil 5.32 : ÇÇA ile frekans çözünürlüğü.

Bu analiz yönteminde her zaman serisi bir yaklaşım bileşeni ve kaçınıcı seviyeye kadar ayrıştırma yapılmışsa o kadar detay bileşeninden oluşur. Bu noktada kaç seviye ayrıştırma işlemi yapılması gerektiğinin belirlenme kriterlerini de incelemek faydalı olacaktır.

Ayrıştırma yapılacak seviyenin belirlenmesi

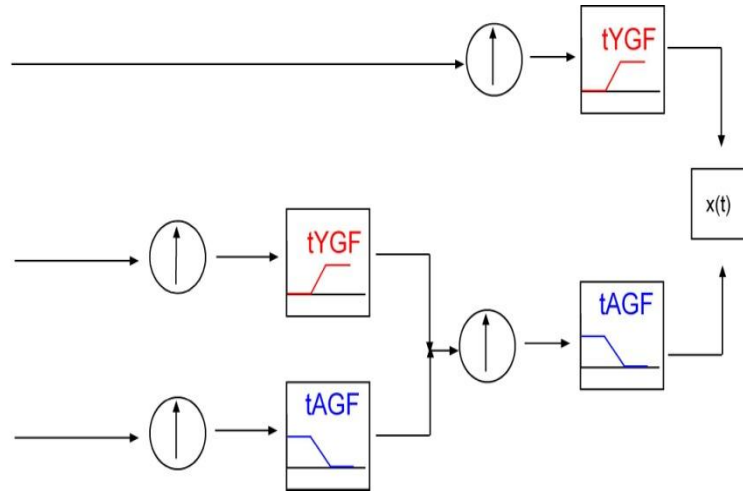
Çoklu çözünürlük analizinde gerçekleştirilen işlem zaman serisini sürekli en yüksek frekans değerinden ikiye bölerek yaklaşım ve detay bileşenlerini oluşturmak olduğundan ve ayrıştırma seviyesinden sonra çıkan yaklaşım bileşenine aynı işlem uygulandığından teorik olarak bu işlem sonsuza kadar devam ettirilebilir. Fakat, ADD ayırık verilere uygulandığından ayrıştırma işlemi son ayrıştırma seviyesinde 1 yaklaşım ve 1 detay katsayısı kalıncaya kadar uygulanabilir. Pratikte, bu seçim analiz yapan kişinin kararına kalmıştır. Bu kararı etkileyebilecek olan faktörler ise zaman serisinin özellikleri ve analizin amacı olarak söylenebilir. Kaç seviye ayrıştırma yapılabileceği N veri adedi ve L ayrıştırma yapılacak seviyeyi göstermek üzere (5.47) eşitliği ile verilmiştir.

$$2^L = N \quad (5.47)$$

Burada L yapılabilecek maksimum ayrıştırma seviyesini göstermektedir. İstenildiği takdirde daha az seviye de seçilebilir. Bu seçim analiz yapanın amaçlarına göre değişkenlik gösterir. Eğer N değeri ikinin bir kuvveti değil ise N değerinden büyük en yakın ikinin kuvvetine eşit kabul edilerek maksimum ayrıştırma yapılabilecek seviye bulunur.

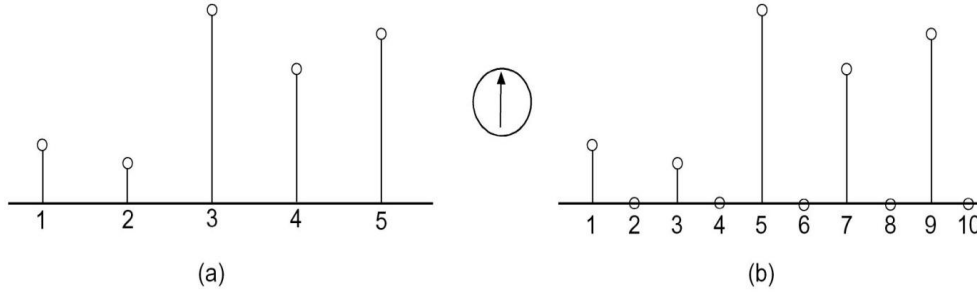
5.5.2.3 Zaman serisinin sentezlenmesi

İstenildiği takdirde gerçekleştirilen ayrıştırma işlemi ile elde edilen yaklaşım ve detay bileşenleri kullanılarak, orijinal zaman serisi tekrar herhangi bir kayıp yaşanmaksızın tekrar geri elde edilebilir. Bu işleme sentezleme denir. Aynı ayrıştırma seviyesindeki iki filtre çıkışı sentezlenerek, filtrelerden geçirildikten sonra toplanırsa bir üst seviyedeki yaklaşım bileşeni elde edilir. Bu işlem ardışık olarak tekrar edilerek orijinal zaman serisi ($x(t)$) yeniden oluşturulabilir. Sonuç olarak, ayrık dalgacık dönüşümü uygulanan zaman serisi, dalgacık katsayılarından tekrar elde edilebilmektedir.



Şekil 5.33 : Ters dönüşüm ile orijinal zaman serisinin elde edilmesi.

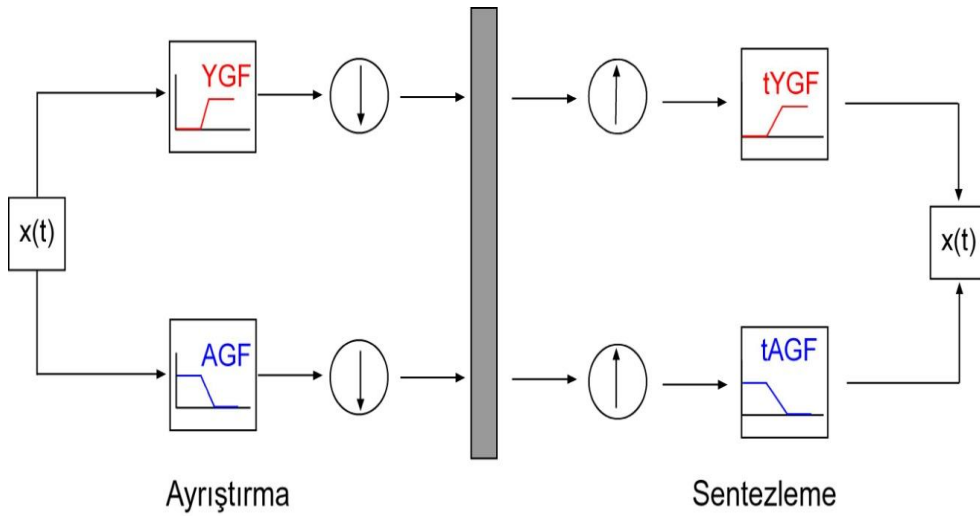
Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile yapılan Çoklu Çözünürlük Analizi'nde ayrıştırma işlemi filtrelemenin ardından aşağı örnekleme ile yapılırken, zaman serisinin sentezlenmesi yapılırken gerçekleştirilen ters dönüşüm işleminde önce yukarı örnekleme (upsampling) ardından filtreleme yapılır. Yukarı örneklemenin gerçekleştirilmesi örnekler arasına sıfır eklenmesi ile yapılır. Şekil 5.33 gerçekleştirilen ters dönüşüm işlemini, Şekil 5.34 ise bir zaman serisinin yukarı örneklenmesinde gerçekleşen süreci göstermektedir.



Şekil 5.34 : (a) Zaman serisi (b) Zaman serisinin yukarı örnekleme.

Ters dönüşüm filtrelemesi

Ters dönüşüm filtreleri, orijinal zaman serisinin elde edilmesinde uygun filtrenin seçiminin önemli olmasından ötürü tartışma konusu olmuştur. Mükemmel bir ters dönüşüm olmayacağı muhakkaktır. Aşağı örnekleme işlemi sırasında bazı bozulmalardan bahsedilmiştir. Bu bozulma ancak çok dikkatli seçilen ters dönüşüm filtreleriyle durdurulabilir. Karesel Ayna olarak bilinen Şekil 5.35 bu ters dönüşüm filtrelemesini göstermektedir. Dönüşüm filtreleri AGF ve YGF olarak filtreleme başlığı altında daha önce bahsedilmiştir. Ters dönüşüm filtreleri ise tAGF ve tYGF biçiminde gösterilmiştir.

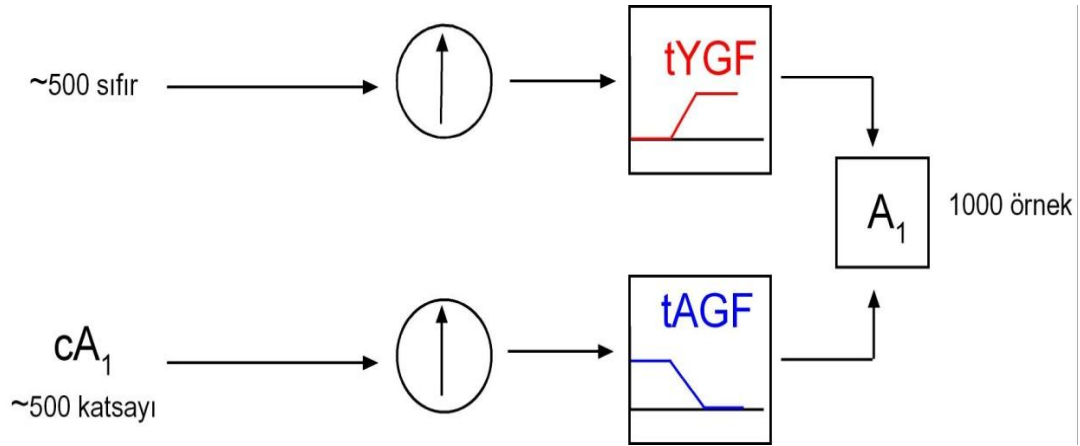


Şekil 5.35 : Karesel ayna (Misiti ve diğ., 1996).

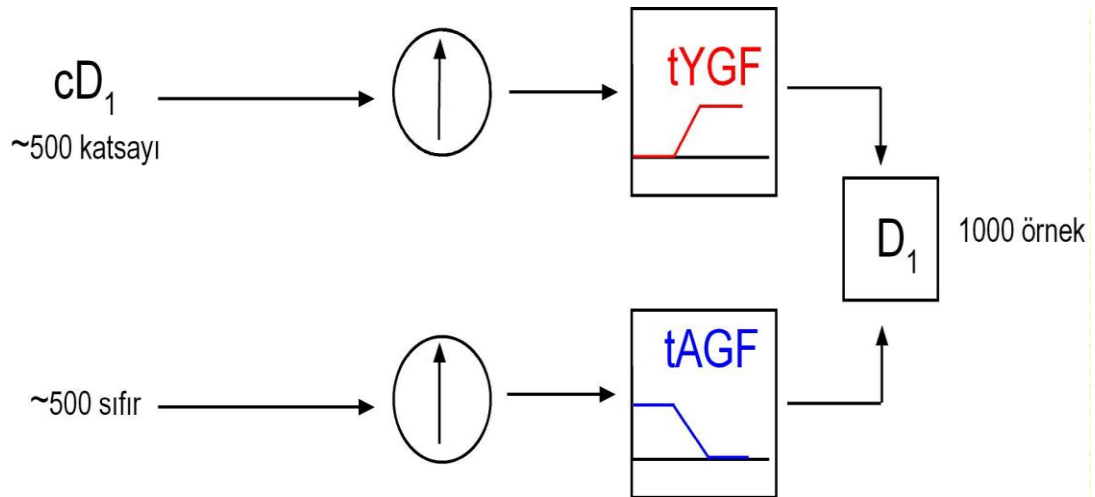
Detay ve yaklaşım bileşenlerinin yeniden yapılandırılması

Yaklaşım ve detay bileşenleri, kendi içlerinde katsayı vektörleriyle oluşturulabilir. Tek seviye yaklaşıma ait zaman serisi (A_1) oluşturulmak istenildiğinde, cd_1 yerine sıfırlardan oluşan bir vector kullanılır. Şekil 5.36 bu işlemin gerçekleştirilmesini göstermektedir. Bu işlem sayesinde oluşan A_1 zaman serisi orijinal zaman serisi ile aynı uzunlukta ve orijinal zaman serisine gerçek bir yaklaşımı temsil eder. Aynı işlem

tek seviye detay bileşenine ait zaman serisinin (D_1) oluşturulmasında da kullanılabilir. Şekil 5.37’de detay serisinin yeniden yapılandırılması gösterilmiştir.



Şekil 5.36 : Tek seviye yaklaşım bileşeninin sentezlenmesi.

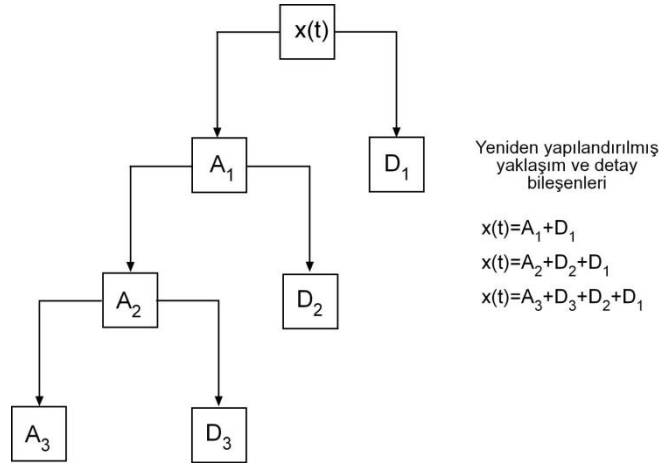


Şekil 5.37 : Tek seviye detay bileşeninin sentezlenmesi.

Ters dönüşümün detay ve yaklaşım sonuçları zaman serisinin gerçek yapı taşlarıdır. Yeniden yapılandırılmış zaman serisi bu ikisinin toplamından elde edilir. Bu elde edilme işlemi (5.48) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$x(t) = D_1 + A_1 \quad (5.48)$$

Bu tekniğin çok seviyeli analize uygulanması ile tüm ters dönüşümlerde benzer bir ilişkiye ulaşılır. Bu sayede orijinal zaman serisine ulaşmada birçok alternatif yol ortaya çıkar. Bu durum Şekil 5.38’de gösterilmiştir.



Şekil 5.38 : Zaman serisinin yeniden yapılandırılması.

5.5.3 Dalgacık ayrışımalarında enerji dağılımları

Bir zaman serisinin toplam enerjisi matematiksel olarak (5.49) eşitliği ile gösterilmektedir (Angrisani ve diğ, 1998; Lyons 1999).

$$\sum_{n=1}^N |x(n)|^2 = \sum_{n=1}^N |a_j(n)|^2 + \sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2 \quad (5.49)$$

N veri sayısı, l ayrıştırma seviyesinin toplam sayısıdır. Bu denklem bir zaman serisinin toplam enerjisinin, j . seviyedeki alçak frekans bileşeni ile 1'den j 'ye kadar tüm yüksek frekans bileşenlerinin enerjilerinin toplamına eşit olduğunu göstermektedir.

5.5.3.1 Parseval Teoremi

Parseval Teoremi, ayrık dalgacık dönüşümü sonucu ortaya çıkan yaklaşım ve detay katsayıları yardımıyla farklı çözünürlük seviyelerinin enerjilerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede farklı seviyelerin enerji değerleri birbirleri ile kıyaslanabilir duruma gelmektedir. Matematiksel olarak (5.50) eşitliği detay bileşenlerine ait enerjilerin belirlenmesinde, (5.51) eşitliği ise yaklaşım bileşenine ait enerjinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

$$ED_i = \sum_{j=1}^N |D_{ij}|^2 \quad (5.50)$$

$$EA_k = \sum_{j=1}^N |A_{kj}|^2 \quad (5.51)$$

Bu denklemlerde $i = 1, 2, 3 \dots \dots k$ olmak üzere ayrıştırılmış dalgacık seviyelerini temsil etmektedir. Bu seviyelerin 1'den k 'ya kadar olan kısmı detay katsayılarına ait seviyeleri gösterirken, yaklaşım sadece son seviye olan k seviyesinde bulunur. N değeri her seviyede detay veya yaklaşıma ait olan katsayıların sayısını

göstermektedir. ED_i ifadesi i . seviyedeki detay bileşeninin enerjisini göstermektedir. EA_k ise k . seviyedeki yaklaşım bileşeninin enerjisini göstermektedir.

5.5.4 Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu

Dalgacık dönüşümü ile elde edilen vektörlerin değerlerinin zaman eksenini boyunca toplanması sonucunda Dalgacık Güç Spektrumu (DGS) elde edilir. Dalgacık dönüşümü çizimi boyunca, eğer dikey bir dilim bir yerel spektrum değeri olarak tanımlanırsa belirli bir periyot için zamansal olarak dalgacık spektrumu (5.52) eşitliği ile ifade edilebilir (Güneş, 2010).

$$\overline{W_n^2}(s) = \frac{1}{n_a} \sum_{n=n_1}^{n_2} |W_n(s)|^2 \quad (5.52)$$

Bu eşitlikte W_n ; dalgacık dönüşümünü, s ; ölçek değerini, n ; n_1 ve n_2 noktalarının ortası olan rastgele atanmış indeks sayısını, n_a ; n_2 ile n_1 arasında ortalanmış noktaların sayısının temsil eder. n_a değeri (5.53) eşitliği ile bulunur.

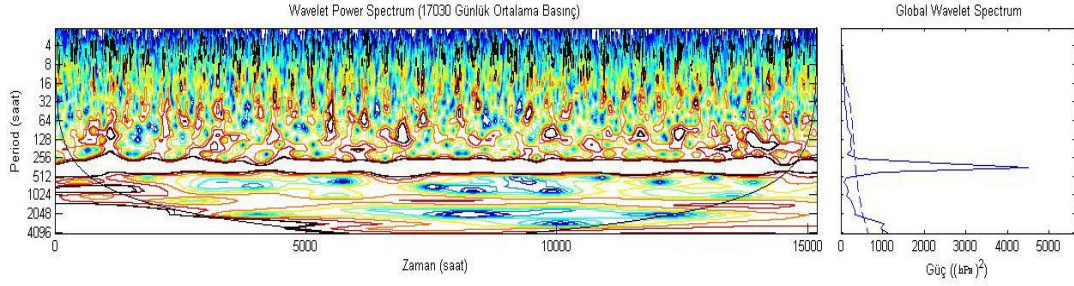
$$n_a = n_2 - n_1 + 1 \quad (5.53)$$

Bu işlem bütün zaman aralıkları boyunca tekrar edildiğinde belirli bir pencere uzunluğuna bağlı olarak düzleştirilmiş dalgacık çizimi elde edilmiş olur. Eğer tüm zaman eksenini boyunca elde edilen spektrumların ortalamaları alınırsa sonuçta Global Dalgacık Spektrumu (GDS) elde edilir. GDS (5.54) eşitliği ile matematiksel olarak ifade edilmektedir (Güneş, 2010).

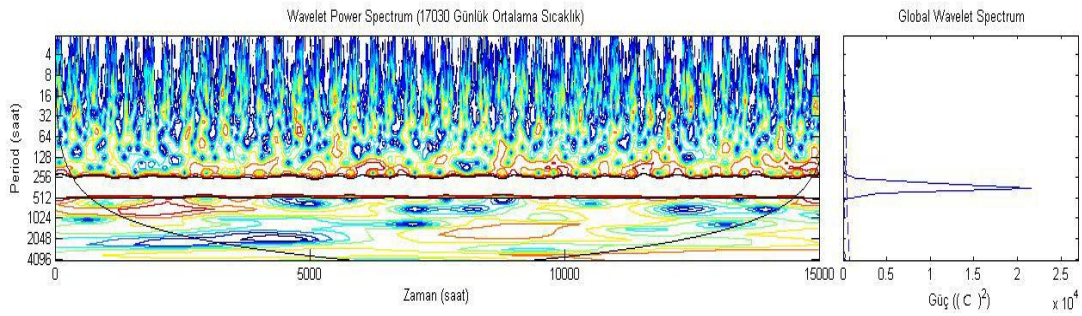
$$\overline{W_n^2}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (5.54)$$

Şekil 5.39, 5.40, 5.41 ve 5.42’de MATLAB kodları kullanılarak gerçek zamanlı günlük ortalama basınç ve sıcaklık verilerine bu yaklaşım uygulanarak Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumuna ait grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler uygulamada ayrıntılı şekilde anlatılacağı üzere bir zaman serisindeki periyodikliğin ve bu periyodikliğe ait gücün yoğunluğunu vermesi bakımından önemlidir. Bu sayede zaman serisinin frekans bilgisine de ulaşılabilme imkanı vardır. Şekil 5.39’da 1970 ile 2011 yılları arasında Samsun meteoroloji gözlem istasyonunda gözlenmiş günlük ortalama basınç değerlerinin grafikleri görülmektedir. Bu grafik çok açık şekilde günlük ortalama basınç verisine ait zaman serisinin yıllık bir salınma sahip olduğunu göstermektedir. Bu salınımın güç değerine bakıldığında ise 4000’nin üzerinde bir değer görülmektedir. Aynı istasyonun aynı zaman dilimindeki ortalama sıcaklık verisine ait Şekil 5.40’daki grafikler incelendiğinde yine çok net yıllık bir salınımın olduğu görülmektedir. Kıyaslama ölçütü olabilmesi açısından

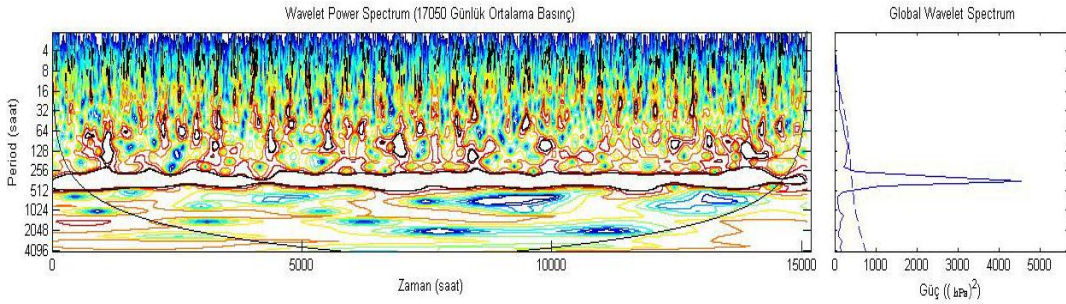
Edirne gözlem istasyonuna ait aynı yıllar arasında günlük ortalama basınç ve sıcaklık verilerine ait grafikler sırasıyla Şekil 5.41 ve 5.42’de verilmiştir.



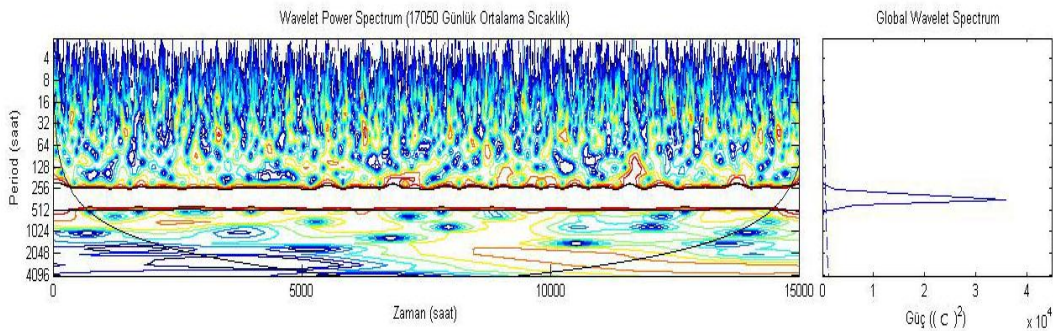
Şekil 5.39 : Samsun istasyonunun basınç verilerinin DGS ve GDS.



Şekil 5.40 : Samsun istasyonunun sıcaklık verilerinin DGS ve GDS.



Şekil 5.41 : Edirne istasyonunun basınç verilerinin DGS ve GDS.



Şekil 5.42 : Edirne istasyonunun sıcaklık verilerinin DGS ve GDS.

5.5.5 Dalgacıklar ve özellikleri

Dalgacık türleri ölçekleme fonksiyonunun varlığı, ortogonalite veya biortogonalite özelliğine sahip olma, süreklilik özelliğine sahip olma, simetri özelliğinin varlığı, sıkıştırma için faydalı olan momentlerin sayısı ve düzenlilik gibi özellikleri ile sınıflandırılırlar.

5.5.5.1 Haar dalgacığı

Bilinen en eski ve basit olan dalgacık türüdür. Sonlu bir aralık dışında bir dalgacığın sıfır olması olarak tanımlanan kompakt desteğe sahip bir dalgacıktır. Haar dalgacığında ölçekleme fonksiyonu $\phi(t) = 1$ dir. Haar dalgacık fonksiyonunun matematiksel ifadesi (5.55) eşitliği ile verilmiştir.

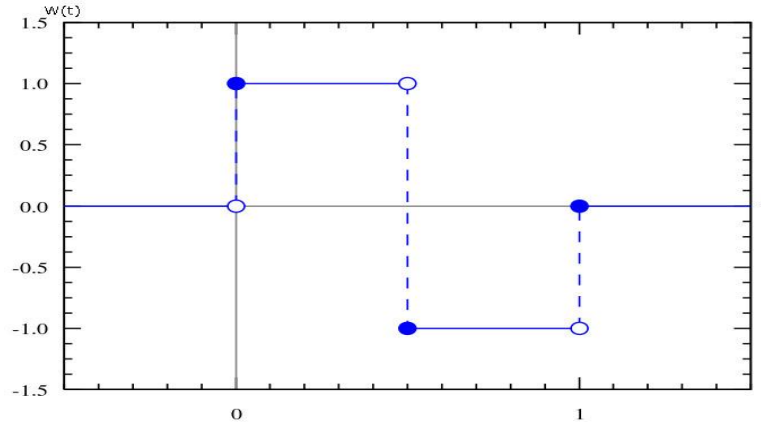
$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & , 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & , \text{diğer dur.} \end{cases} \quad (5.55)$$

Haar dalgacığı, uzunluğu $L = 2$ olan bir dalgacık filtresidir ve kendisinin ölçekleme filtre katsayıları ile tanımlanabilir. Bu filtre katsayıları (5.56) ve (5.57) eşitliklerinde verilmiştir (Gençay ve diğ, 2002).

$$g_0 = g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.56)$$

$$h_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{ve} \quad h_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5.57)$$

Şekil 5.43'de Haar dalgacığına ait ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu verilmiştir. Haar dalgacığının basit ve hızlı olması, etkili bir hafızaya sahip olması ve tersine çevrilebilir olması gibi bir takım avantajları vardır (Elfouly, 2008).



Şekil 5.43 : Haar dalgacık fonksiyonu.

Haar dalgacığının türevi sürekli değildir ve bu özellik Haar dalgacık filtresinin birçok alanda kullanımını sınırlamaktadır. Haar dalgacığı ortogonallık, biortogonallık, simetriklik özelliklerini sağlarken süreklilik özelliğini sağlamaz ve sıfıra eşit olan momentlerinin sayısı 1’dir. Hem sürekli dalgacık dönüşümü, hem de ayrık dalgacık dönüşümü uygulamalarında kullanılabilme özelliğine sahiptir.

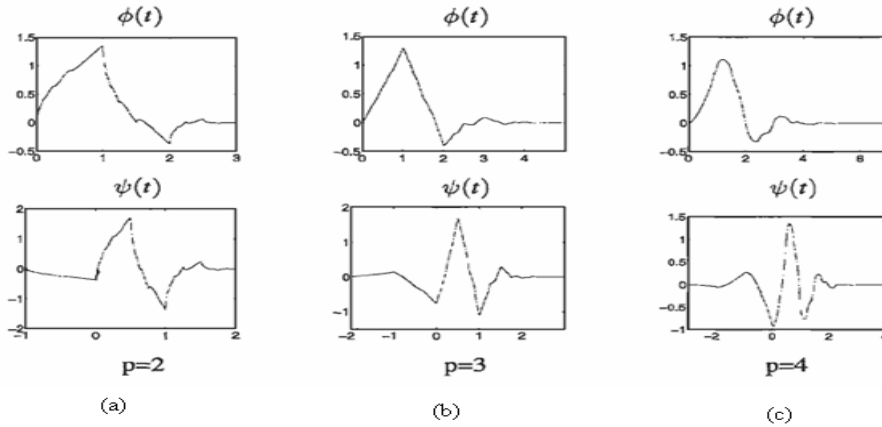
5.5.5.2 Daubechies dalgacık ailesi

Daubechies dalgacığı, Haar dalgacığıyla kıyaslandığında daha karmaşıktır ve hesaplama açısından daha uzun ve karmaşık işlemler gerektirmektedir (Elfouly, 2008). Daubechies dalgacığının sırasıyla ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları (5.58) ve (5.59) eşitliklerinde verilmiştir (Cascio ve Iolanda, 2007).

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k) \quad (5.58)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \phi(2t - k) \quad (5.59)$$

Daubechies dalgacığı, kompakt desteğe sahip dalgacık fonksiyonunun sıfıra yaklaşan (vanishing) momentlerinin sayısına bağlıdır. Sıfıra yaklaşan bu momentlerin sayısı filtre uzunluğunun (L) yarısına eşit olmaktadır. Örneğin Haar dalgacığının sıfıra yaklaşan moment sayısı birdir. Daubechies (4) dalgacığında ise sıfıra yaklaşan momentlerin sayısı 8’dir. Bu özellik doğrultusunda, daha uzun dalgacık filtreleri yüksek dereceli durağan olmayan stokastik süreçlerden durağan dalgacık katsayı vektörleri üretmektedir (Gençay ve diğ, 2002).



Şekil 5.44 : Daubechies ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları.

Şekil 5.44 farklı filtre uzunluklarına sahip çeşitli Daubechies dalgacık türlerini göstermektedir. Şekildeki p değerleri sıfıra yaklaşan momentlerin sayısını ifade etmektedir. Şekil 5.44’de (a); p=2 değeri için Daubechies (4), (c); p=4 değeri için

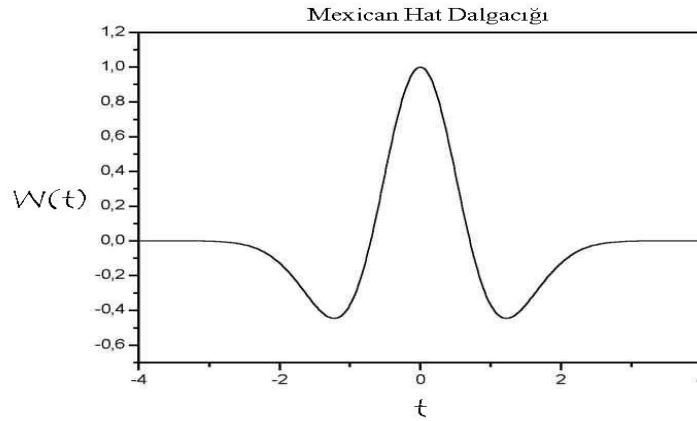
Daubechies (8) dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonlarını göstermektedir (Mallat, 1998).

Daubechies dalgacık ailesi ortogonallık, biortogonallık özelliklerini sağlarken hem sürekli dalgacık dönüşümü, hemde ayrık dalgacık dönüşümü için kullanım özelliği taşımaktadır. Mühendislik uygulamalarında en fazla kullanılan dalgacık ailesidir.

5.5.5.3 Mexican Hat dalgacığı

Mexican Hat dalgacığı normal dağılım fonksiyonunun ikinci türevi alınarak elde edilmektedir (Siluyele, 2005). Mexican Hat dalgacığının ölçekleme fonksiyonu yoktur ve bu nedenle ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılamaz. Mexican Hat dalgacığının dalgacık fonksiyonu (5.60) eşitliğinde verilmiştir. Şekil 5.45’de Mexican Hat dalgacığı görülmektedir. Adını Meksikalıların giydikleri şapkaya benzerliğinden almaktadır.

$$\Psi(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -\infty < t < +\infty \quad (5.60)$$



Şekil 5.45 : Mexican Hat dalgacığı.

Simetri özelliğine sahip olan bu dalgacık kompakt desteğe sahip değildir. Ayrıca ortogonallık, biortogonallık özelliklerini sağlamaz. Mexican Hat dalgacığı sadece sürekli dalgacık dönüşümünde kullanılabilir.

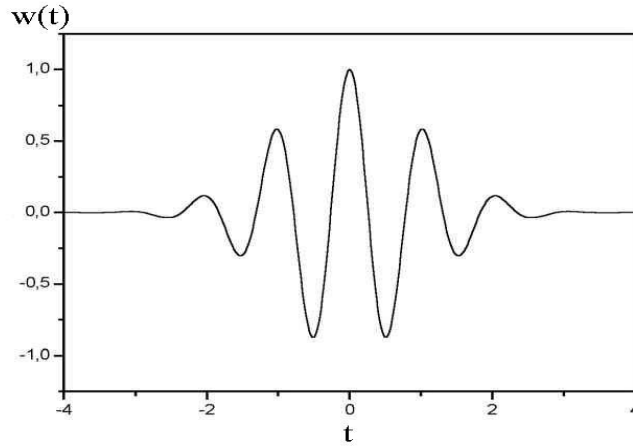
5.5.5.4 Morlet dalgacığı

Morlet dalgacığı, sürekli dalgacık dönüşümünün en klasik örneğidir. Morlet dalgacığının ana dalgacık fonksiyonunun matematiksel ifadesi (5.61) eşitliğinde verilmiştir.

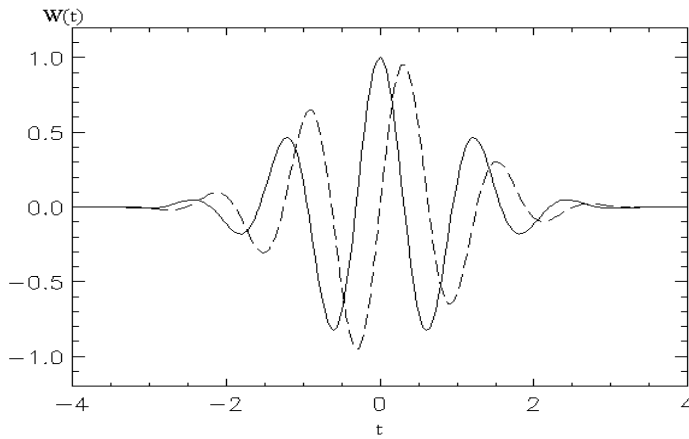
$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ift} e^{\frac{-t^2}{2}} \quad (5.61)$$

Bu eşitlikte f dalgacığın merkezi frekansını temsil etmektedir. Morlet dalgacığının ölçek fonksiyonu yoktur. Morlet dalgacığı karmaşık sayıları içermesi nedeniyle hem genlik hem de faz bileşenini aynı anda tespit edebilir (Lau ve Weng,1995). Ayrıca bu dalgacık ani değişimler yapmayan yumuşak geçişleri olan zaman serilerinde daha iyi sonuçlar vermektedir.

Simetri özelliğine sahip olan Morlet Dalgacığı, ortogonallık, biortogonallık ve kompakt desteğe sahip olma gibi özellikleri sağlamamaktadır. Bu nedenle Morlet dalgacığı sadece sürekli dalgacık dönüşümünde kullanılabilir. Ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılamaz. Şekil 5.46'da Morlet dalgacığının sadece reel bileşeni, 5.47'de ise düz çizgi ile reel bileşeni ve kesikli çizgi ile de sanal bileşeni gösterilmiştir.



Şekil 5.46 : Morlet dalgacığının reel bileşeni.



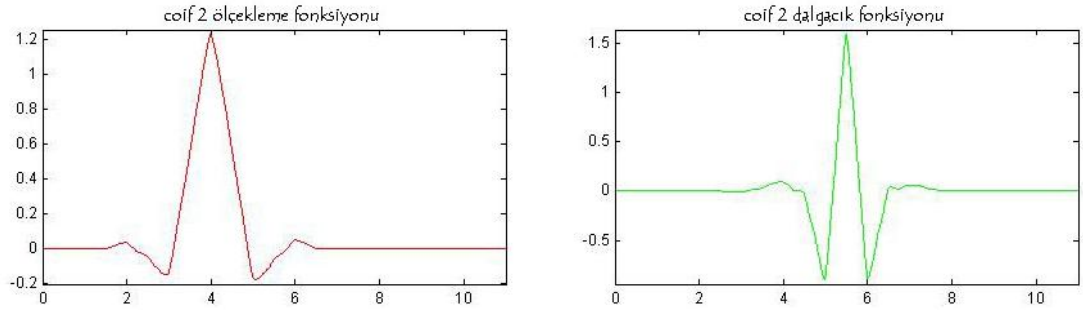
Şekil 5.47 : Morlet dalgacığının sanal bileşeni ile birlikte görünümü.

5.5.5.5 Coiflet dalgacık ailesi

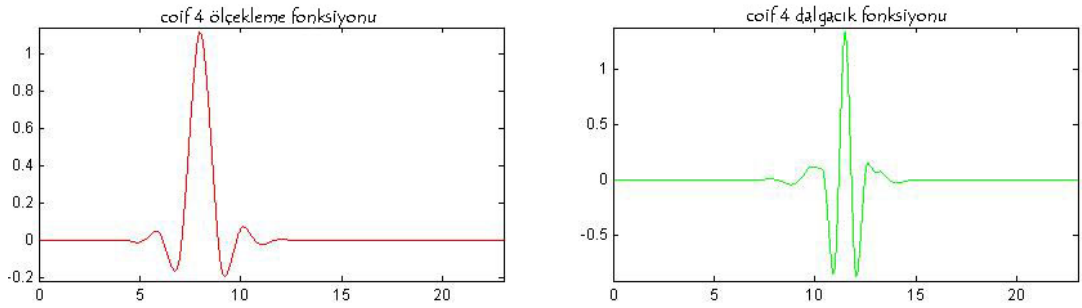
Coiflet dalgacı, Ronald Coifman'ın önerisi ile yine Daubechies tarafından geliştirilen bir dalgacık türüdür. Bu nedenle Coiflet dalgacı olarak isimlendirilmiştir. Coiflet dalgacığında Daubechies dalgacık ailesine benzer şekilde yine sıfıra yaklaşan momentler (vanishing moments) temel alınmıştır. Ancak ölçekleme fonksiyonunun (5.62) eşitliğindeki özellikleri taşıması üzerinde durulmuştur.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) dt = 1 \text{ ve } \int_{-\infty}^{+\infty} t^k \phi(t) dt = 0, \quad 1 < k < p \quad (5.62)$$

Coiflet dalgacı Daubechies dalgacığına göre daha simetriktir. Çünkü ölçek uzunluğu sıfıra yaklaşan momentlerin sayısına göre 2P-1 yerine artık 3P-1 olarak belirlenmektedir. Şekil 5.48'de coif 2 ve 5.49'da coif 4 dalgacıklarına ait ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları görülmektedir. Sürekli ve ayık dalgacık dönüşümlerinin her ikisinde de kullanılabilmektedir.



Şekil 5.48 : Coif 2 ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu.

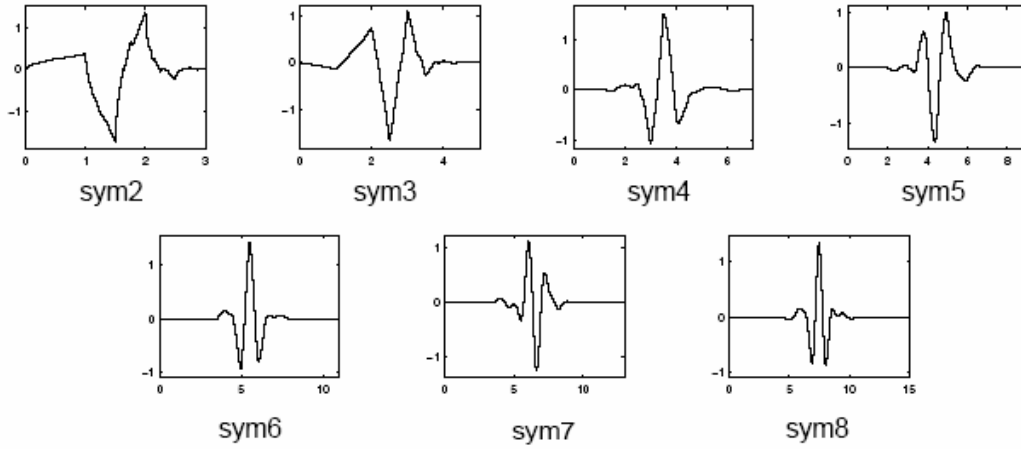


Şekil 5.49 : Coif 4 ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu.

5.5.5.6 Symlet dalgacık ailesi

Symlet dalgacıkları, Daubechies ailesinin şekillendirilmesi ile Daubechies dalgacıklarıyla simetrik dalgacıklar olarak sunulmaktadırlar. Symlets dalgacıkları

Daubechies dalgacılarıyla benzer özellikler taşımaktadırlar. Şekil 5.50’de Symlet dalgacıları verilmiştir.



Şekil 5.50 : Symlet dalgacıları.

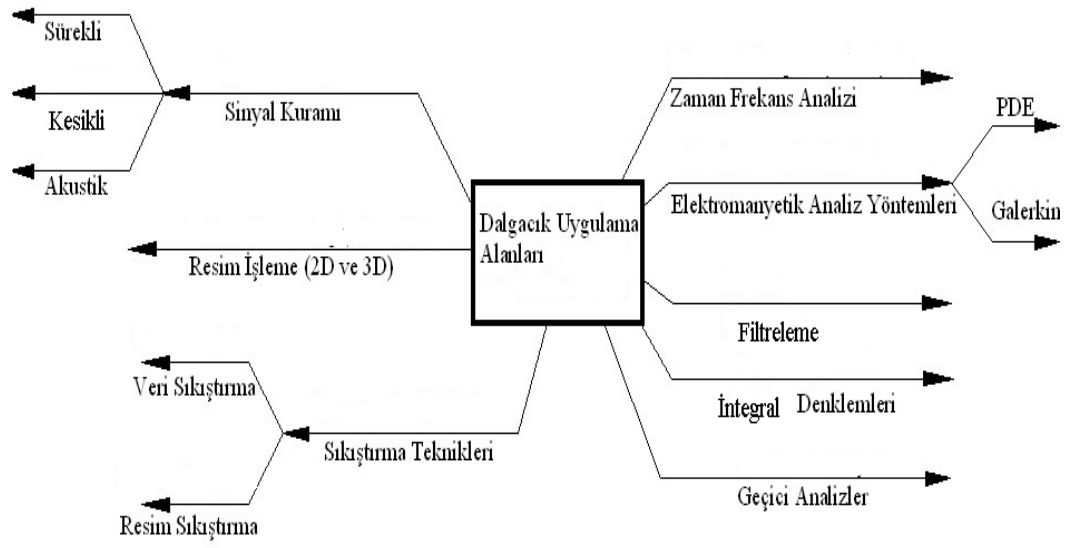
Ortogonalite, biortogonalite ve kompakt desteğe sahip olma özelliklerini taşırlar ve bu nedenle hem sürekli dalgacık hemde ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılabilirler.

5.5.6 Dalgacık analizinin kullanım alanları

1980’li yılların sonlarında teorik temelleri oluşturulduktan sonra, dalgacıkların ilk uygulamalarından biri depremin tahmin edilmesi ile ilgili olmuştur. Bu alanda dalgacıklar, Fourier analizinin yapamadığı, durağan olmayan sismik sinyallerin zaman ve frekans boyutlu analizleri noktasında faydalı olmuştur. Dalgacıkların durağan olmayan sinyalleri de analiz edebilme özelliği, veri sıkıştırma da faydalı olmuş ve 1992’de FBI dalgacıkların, görüntü sıkıştırma özelliğini kullanarak parmak izi veritabanını yeniden oluşturmuştur (Schleicher ve Cristoph, 2002).

Günümüzde farklı disiplinlerde dalgacıklar metodolojisi kullanılarak yapılmış olan çok sayıda çalışma mevcuttur. Dalgacık analizi özellikle akustik, astronomi, mühendislik, jeoloji, tıp, meteoroloji, ekonomi ve fizik alanlarında oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Crowley, 2007).

Şekil 5.51’ dalgacık analizinin uygulama alanları verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, dalgacıkların sinyal işleme, görüntü (resim) işleme ve sıkıştırma, zaman-frekans analizleri, elektromanyetik analizler, filtreleme v.b. gibi çok çeşitli kullanım alanları mevcuttur.

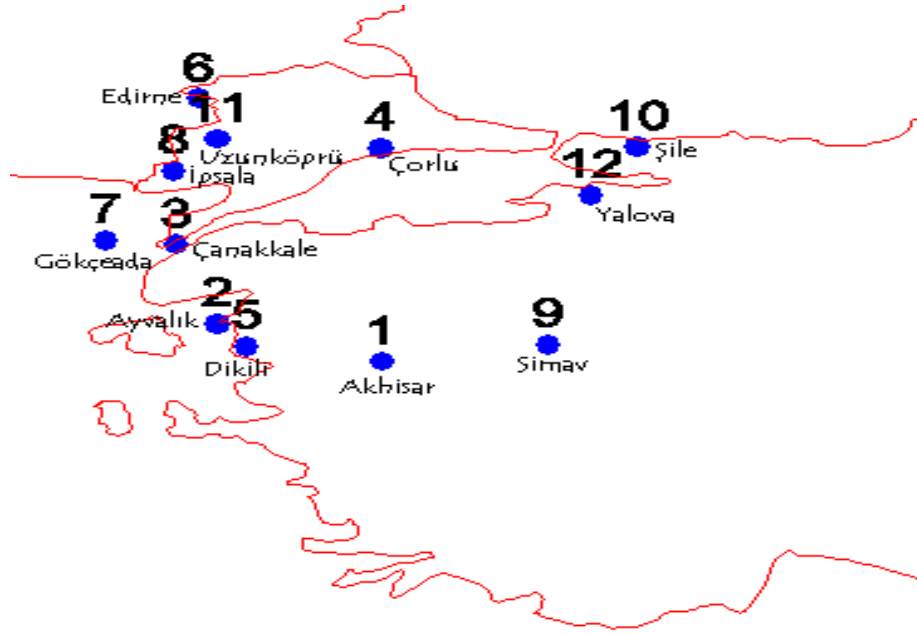


Şekil 5.51 : Dalgacık analizinin kullanım alanları.

6. YÖNTEMİN VERİLERE UYGULANMASI

6.1 Çalışma Alanı ve Veri

Türkiye için yapılan rüzgar potansiyeli ile ilgili önceki çalışmalar ülkenin kuzey batısı, kuzeyi ve güney doğu bölgelerinde rüzgar enerjisi üretimi için önemli alanlar ortaya çıkarmıştır. Bu tez çalışmasında da Türkiye'nin kuzeybatı bölgesinde bulunan 12 meteoroloji istasyonuna ait saatlik ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. İstasyonların bulundukları yerler Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Çalışmada kullanılan istasyonların bulundukları yerler.

Türkiye'nin bu bölgeleri İzlanda alçak basınç merkezinin etkisi altındadır. Bunun sonucu olarak kuzeyli ve kuzeybatılı rüzgarlar özellikle kuzey Ege denizinde etkili olmaktadır. Buna ek olarak mevsimlik rüzgarlar Ege kıyılarında önemli etkiye sahiptirler. Ayrıca kıyı bölgeleri boyunca gözlenen kara ve deniz meltemleri enerji üretimi için uygundur (Öztopal ve diğ, 2000).

Bu tez çalışmasında kullanılan veriler 1980-1985 yılları arasındaki 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verisidir. Çalışmada kullanılan istasyonlara ait bilgiler Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1 : Çalışmada kullanılan istasyonlara ait bilgiler.

İstasyon Numarası	İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Anemometre Yüksekliği (m)
1	Akhisar	38.55	27.51	93	10
2	Ayvalık	39.18	26.42	4	14
3	Çanakkale	40.13	26.42	6	10
4	Çorlu	41.1	27.47	183	9
5	Dikili	39.04	26.53	3	10
6	Edirne	41.67	26.57	51	10
7	Gökçeada	40.11	25.54	72	7
8	İpsala	40.56	26.24	10	14
9	Simav	39.05	28.59	809	10
10	Şile	37.56	32.25	150	10
11	Uzunköprü	41.16	26.41	52	10
12	Yalova	40.39	29.16	2	10

Rüzgar enerjisi potansiyelinin ve rüzgara ait karakteristik özelliklerin belirlenmesinde uzun dönem rüzgar verisi ile çalışmak daha doğru sonuçlar vereceğinden bu çalışmada 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verisi kullanılmıştır.

Çizelge 6.1’de verilen istasyonların anemometre yükseklikleri farklı olduğundan bu istasyonlarda ölçülen rüzgar hızları, sonuçlar arasında kıyaslamaların daha sağlıklı yapılabilmesi için 10 metreye indirgenmiştir. Bu işlemler için (6.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$V_h = V_a \left(\frac{z_h}{z_a} \right)^x \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte z_h ; indirgenmenin yapılacağı anemometre yüksekliğini, z_a ; istasyondaki anemometre yüksekliğini, V_h ; z_h olan anemometre yüksekliğinde ölçülmüş rüzgar hızını, V_a ; z_a anemometre yüksekliğinde ölçülmüş rüzgar hızını göstermektedir. (6.1) eşitliğindeki x değeri ise (6.2) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$x = a + b \ln V_a \quad (6.2)$$

(6.2) eşitliği ile hesaplanan x değeri anemometre yüksekliğinde ölçülmüş olan V_a rüzgar hızına bağlı değişkendir. x değerinin hesaplanmasında kullanılan a ve b katsayıları sırasıyla (6.3) ve (6.4) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$a = 0,37/(1 - 0,088\ln\left(\frac{z_a}{10}\right)) \quad (6.3)$$

$$b = -0,088/(1 - 0,088\ln\left(\frac{z_a}{10}\right)) \quad (6.4)$$

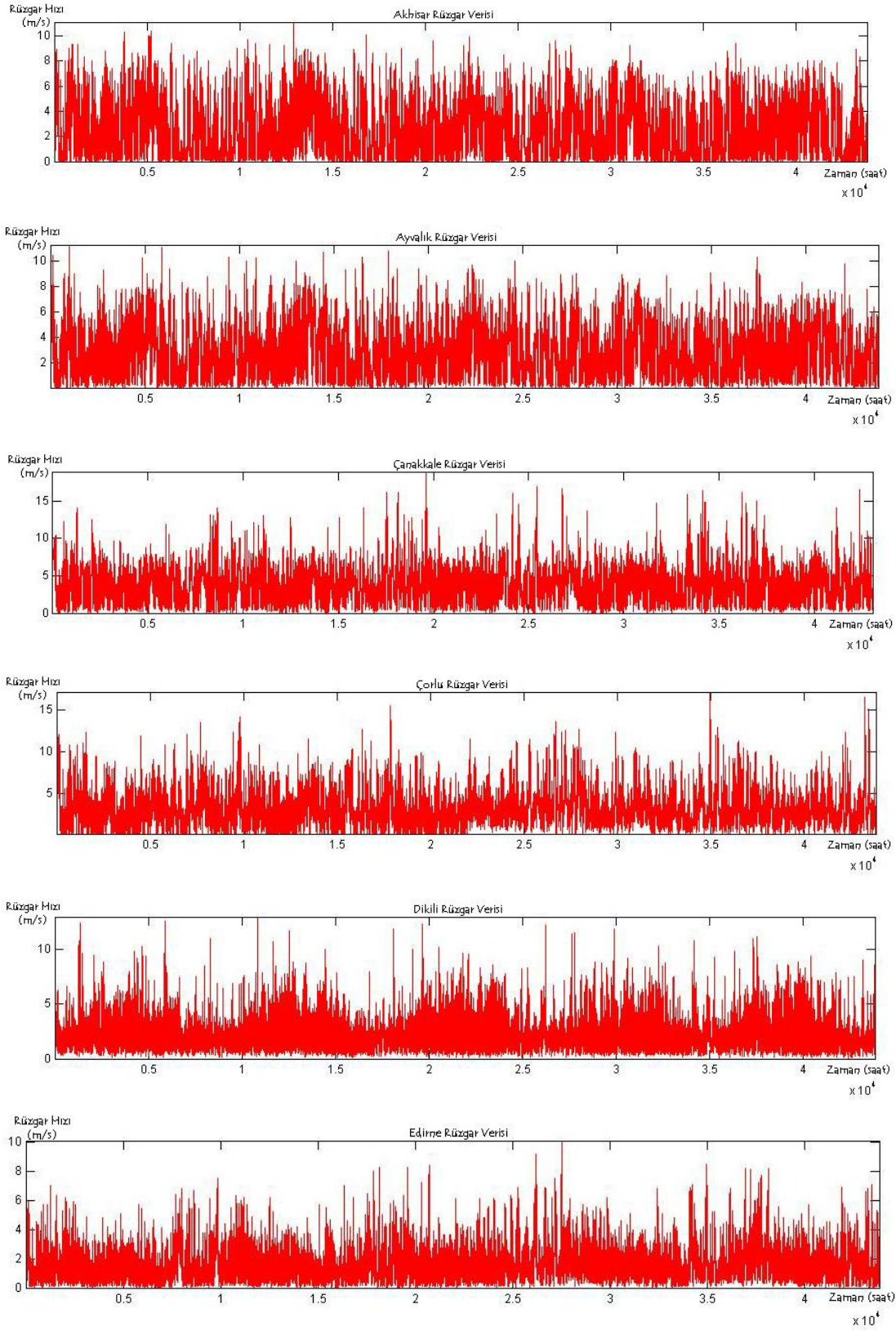
Bu çalışmada tüm istasyonlardaki rüzgar hızı verileri 10 metre anemometre yüksekliğine getirilmiştir (Justus, 1978).

Çalışmada 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verisi kullanıldığından, bir istasyona ait zaman serisinde toplamda 43824 adet veri olması gereklidir. Fakat bazı istasyon verilerinde eksiklikler söz konusudur. Eksik veri olması dalgacık analizinin sonuçlarını etkilemektedir. Buna rağmen Türkiye'nin kuzey batı bölgesinin rüzgar karakteristiği ve potansiyelinin belirlenmesinde yeterli sayıda verisi tam istasyon bulmanın zorluğu dolayısıyla veri eksikliği bulunan Çanakkale, Uzunköprü ve Yalova'da çalışmaya dahil edilmiştir. Bu çalışmada Ayrık Dalgacık Dönüşümü yaparken uyguladığımız Çoklu Çözünürlük Analizi ile detay ve yaklaşım bileşenlerine ayrıştırılan zaman serisi biçimindeki rüzgar verisinde, % 2 eksik veri adedine kadar yaklaşım bileşenindeki katsayı adedi değişime uğramadığından eksik verilere sahip bu istasyonlar da hesaplamalarda kullanılmıştır. Çizelge 6.2'de çalışmada kullanılan istasyonlar, bu istasyonlara ait veri adetleri ve eksik veri yüzdeleri verilmiştir.

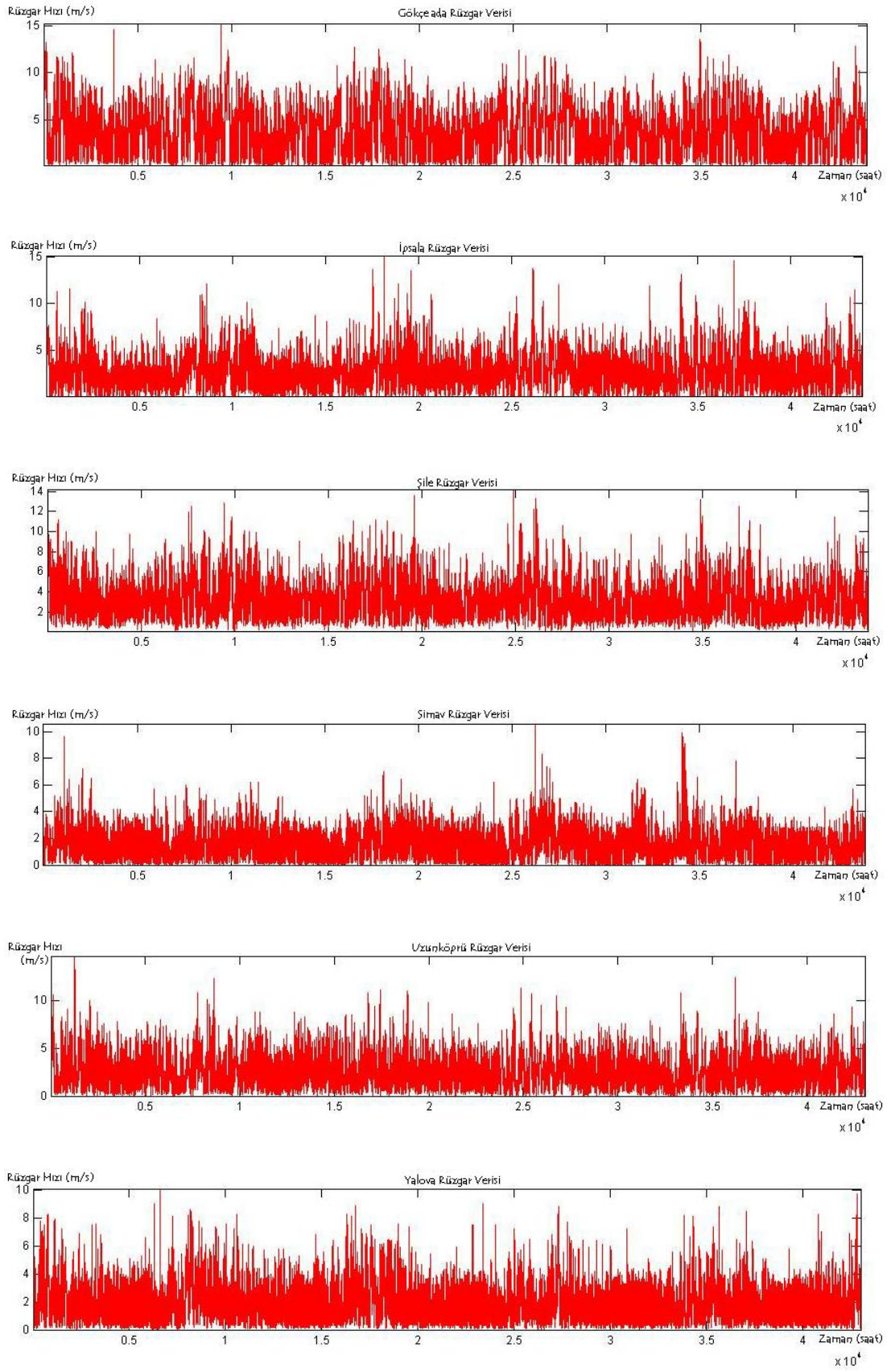
Çizelge 6.2 : Çalışmada kullanılan istasyonların veri durumları.

İstasyon Adı	Veri Adedi	Eksik Veri (%)
Akhisar	43824	Tam
Ayvalık	43824	Tam
Çanakkale	43080	1,7
Çorlu	43824	Tam
Dikili	43824	Tam
Edirne	43824	Tam
Gökçeada	43824	Tam
İpsala	43824	Tam
Simav	43824	Tam
Şile	43824	Tam
Uzunköprü	43080	1,7
Yalova	43016	1,8

Şekil 6.2'de çalışmada kullanılan Akhisar, Ayvalık, Çanakkale, Çorlu, Dikili ve Edirne istasyonlarına ait rüzgar verileri zaman serisi biçiminde gösterilirken Şekil 6.3'de ise Gökçeada, İpsala, Simav, Şile, Uzunköprü ve Yalova istasyonlarının zaman serileri verilmiştir.



Şekil 6.2 : Akhisar, Ayvalık, Çanakkale, Çorlu, Dikili ve Edirne.



Şekil 6.3 : Gökçeada, İpsala, Şile, Simav, Uzunköprü ve Yalova.

6.2 Dalgacık Dönüşümünün Verilere Uygulanması

Bu tez çalışmasında 12 meteoroloji istasyonundan alınmış 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verilerine Sürekli Dalgacık Dönüşümü ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulanarak, bu istasyonların bulundukları bölgelerin rüzgar karakteristikleri hakkında bilgiler elde edilmeye çalışılmış ve bu bölgelerdeki rüzgar potansiyellerinden hangilerinin daha yüksek olduğu iki farklı dalgacık analiz yöntemiyle belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Bu analiz metodlarından ilki olan Sürekli Dalgacık Dönüşümünde, Morlet dalgacı kullanılarak rüzgar verilerine ait zaman serilerinin spektral analizi yapılmıştır. Bu analizin sonucunda Dalgacık Güç Spektrumu (Wavelet Power Spectrum) ve Global Dalgacık Spektrumu (Global Wavelet Spectrum) grafikleri her bir istasyon için elde edilmiştir. Bu sayede rüzgar hızı verisinin içerisindeki periyodikliklerin tespiti, görülme zamanları ve hangi istasyona ait verinin rüzgar potansiyelinin daha yüksek olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

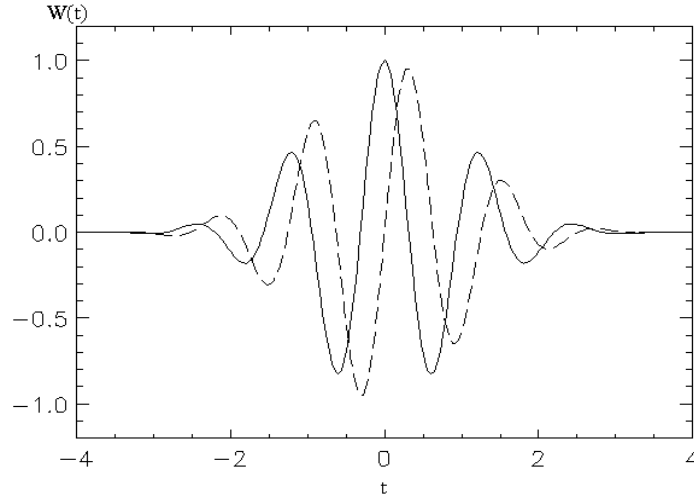
İkinci analiz metodunda ise ilk olarak Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nde veriyi alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrıştırma temeline dayanan Çoklu Çözünürlük Analizi ile veriler db4 (Daubechies 4) dalgacı kullanılarak 10. seviyeye kadar detay (details) ve yaklaşım (approximation) bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırma sayesinde ortaya çıkan yaklaşım ve detay serileri ile bu bölgelerdeki rüzgarın karakteristiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Uygulamanın devamında bu ayrıştırma sayesinde ortaya çıkan yaklaşım ve detay bileşenlerine ait dalgacık katsayıları kullanılarak Parseval Teoremi'nin farklı ayrıştırma seviyelerindeki enerjilerinin hesaplanmasına olanak veren yaklaşımı kullanılarak, farklı seviyelere ait enerji değerlerini kıyaslamamıza yarayan sonuçlara ulaşılmıştır. Hesaplanan bu değerler sayesinde, istasyonların bulundukları bölgelerin rüzgar enerji potansiyelleri arasında kıyaslama yapılmıştır.

6.2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile spektral analiz

6.2.1.1 Dalgacık seçimi

Bilindiği üzere dalgacık dönüşümü ile yapılacak analizlerde dalgacık seçimi en önemli noktalardan birini oluşturmaktadır. Bu yöntemde analiz yapılacak dalgacık olarak daha önce de belirtildiği üzere Morlet dalgacık fonksiyonu seçilmiştir. Burada bu seçimin nedenlerinden bahsedilecektir.

Morlet dalgacık fonksiyonunu ortogonal olmayan (diklik özelliğine sahip olmayan) bir dalgacıktır. Bu tür dalgacıklar dalgacık spektrum analizinde ortogonal dalgacık fonksiyonlarına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Morlet gibi ortogonal olmayan dalgacıklar ile yapılan analizlerde, büyük ölçek değerleri oldukça yüksek artıklık (redundant) değerine sahiptir ki dalgacık spektrumu bu ölçeklerde yüksek korelasyona sahip olur (Torrence ve Combo, 1998).



Şekil 6.4 : Morlet Dalgacığı, kesikli çizgi sanal,düz çizgi reel bileşen.

Morlet fonksiyonunun tercih edilmesindeki en önemli nedenlerden biri ise sanal içeriğe sahip bir dalgacık fonksiyonu oluşudur. Karmaşık sayı içeriğine sahip dalgacık fonksiyonları sahip oldukları sanal ve reel bileşenler sayesinde genlik ve faz bilgilerini sağlamada çok daha başarılı ve en önemlisi zaman serisi analizlerinde periyodiklik davranışını yakalamada çok daha başarılıdır. Hatırlanmalıdır ki spektral analiz yöntemi olan Fourier analizi de karmaşık sayı içeriğine sahip bir dönüşüm tekniğidir. Sadece reel içeriğe sahip dalgacık fonksiyonları tek bir değişken gücüne sahiptir ve tepe değerleri veya süreksizlikleri yakalamada daha başarılıdır (Torrence ve Combo, 1998). Morlet dalgacığı reel ve sanal bileşen içermesinden ötürü sadece reel bileşene sahip dalgacıklarla kıyaslandığında çok daha fazla salınıma sahiptir. Bu sayede dalgacığın gücünün pozitif ve negatif tepe noktaları, tek ve geniş bir tepe noktası olarak birleşmesi ile sonuçlanır (Torrence ve Combo, 1998). Bu özellikleri sayesinde, Morlet dalgacığının dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan spektral analizde periyodikliğin tespiti noktasında en başarılı dalgacık olduğu söylenebilir.

6.2.1.2 Ölçek seçimi

Dalgacık seçiminin ardından önemli ikinci nokta ölçek seçimidir. Bu çalışmada kullanılan veriler saatlik ortalama rüzgar hızı verileri olduklarından değişkenlerin belirlenmesi şu şekilde gerçekleşmiştir. Veri aralığı $\Delta t = 1$ saat ve ölçek değeri olan $s = 2\Delta t$ olduğundan $s = 2$ olur. Diğer bir söylemle, bu çalışmada kullanılan rüzgar verileri bir saat aralıklarla değiştiğinden ölçek değeri 2 seçilir. Her sekizlide (octave) 4 adet alt sekizli oluşturmak için $\Delta j = 0,25$ seçilmiştir ve 2 nin 13. kuvvetine kadar her bir üs için alt sekizli oluşması amacıyla $j_1 = 13/\Delta j$ olarak alınmıştır.

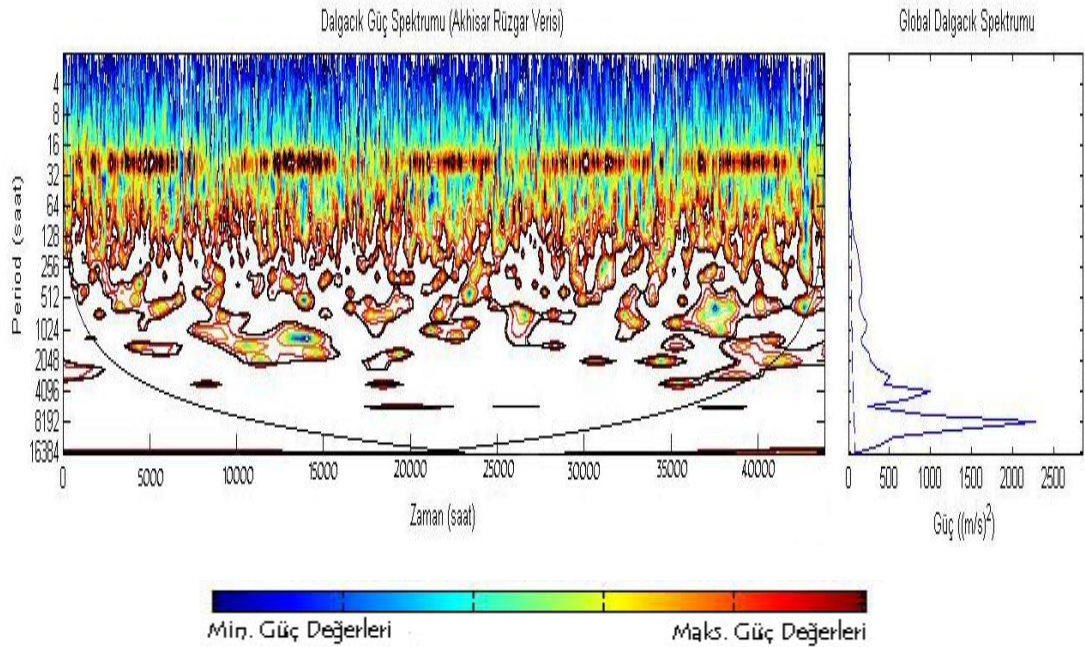
6.2.1.3 Dalgacık analizi ile spektral gösterim

Dalgacıkların kullanımı ile yapılan spektral analiz zaman serilerindeki zaman-frekans-enerji karakteristiklerini anlama ve tahmin etme konusunda klasik spektral analiz yöntemlerine büyük üstünlükler sağlamaktadır. Klasik spektral analiz yöntemlerinin yaşadığı zaman ve frekans bilgisini aynı anda sağlayamama durumu, dalgacık analizi yönteminin bir boyutlu zaman serilerinden ayrıştırma veya dönüştürme yapabilmesi sayesinde iki boyutlu zaman ve frekans bilgisini aynı anda yansıtan görüntüler vermesi ile ortadan kalkmaktadır. Bu zaman ve frekans özelliklerinin aynı anda yansıtılması Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafikleri ile sağlanmaktadır. Bu sayede bir zaman serisi içindeki periyodikliğin hem genliği hem de bu genliğin zaman içinde nasıl değiştiği belirlenebilmektedir.

Bu kısımda da gerçekleştirilen dalgacık analizi ile spektral analiz, Morlet dalgacığının farklı ölçeklerde ve zamanlarda verilere uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki uygulamalar MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafikleri MATLAB kodları kullanılarak oluşturulmuştur (Torrence and Combo, 1998). Şekil 6.5'den başlayarak Şekil 6.16'ya kadar olan grafiklerde bu çalışmada kullanılan 12 istasyona ait rüzgar verilerine uygulanmış olan Morlet dalgacığının spektral analizi sonucu oluşan Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafikleri görülmektedir.

Rüzgar verilerine uygulanan Sürekli Dalgacık Dönüşümü temeline dayanan spektral analiz sonucu ortaya çıkan grafiklerden Dalgacık Güç Spektrumu ile rüzgar verisi içindeki güç dağılımlarının zamana göre değişimi görülebilmektedir. Bu grafikte

mavi renkler düşük güç değerlerine karşılık gelirken kırmızı renkler yüksek güç değerlerine karşılık gelmektedir. Mavi renkten kırmızı renge doğru renk geçişlerinde güç değerleri artmaktadır. Burada dalgacık dönüşümü ile güç elde edilmesi dalgacık katsayılarının mutlak değerlerinin karesinin alınması ile olmaktadır. Bu işlem sayesinde belirli zaman ve ölçekteki güç değeri tespit edilebilmektedir. Bu güçlerin zaman içinde yaşadığı değişimler ile rüzgar hızı verisine ait zaman serisinin içindeki salınımlar ortaya çıkmaktadır. Global Dalgacık Spektrumu grafiği ise rüzgar verisinde görülen periyot değerlerinin güç yoğunluğunu vermektedir. Bu grafik gücün yoğunluğunun yanında frekans ve zaman bilgisini de verebilmesi dolayısıyla klasik spektral analiz yöntemlerine göre fazlasıyla üstündür.



Şekil 6.5 : Akhisar rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Grafikler üzerindeki bilgileri yorumlamaya başlamadan önce bu grafiklerin oluşum mekanizmaları ve grafikler üzerindeki bilgilerin ne anlama geldiğinden biraz bahsetmek konunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Dalgacık Güç Spektrumu oluşumunda, SDD ile gerçekleştirilen spektral analizin sonsuz bir zaman serisine uygulanma mantığı içermesinden dolayı yapay bir etki olarak nitelenebilecek sınırlarda analiz edilen veriye sıfır ekleme (zero padding) işlemleri yapılır ve bunun sonucunda etki konisi (cone of influence) denilen bir bölge oluşur. Bu bölge, 5 yıllık rüzgar verisi gibi sonlu veriler ile analiz yapılmasının sonucunda dalgacık güç spektrumlarının başında ve sonunda çıkan hataların

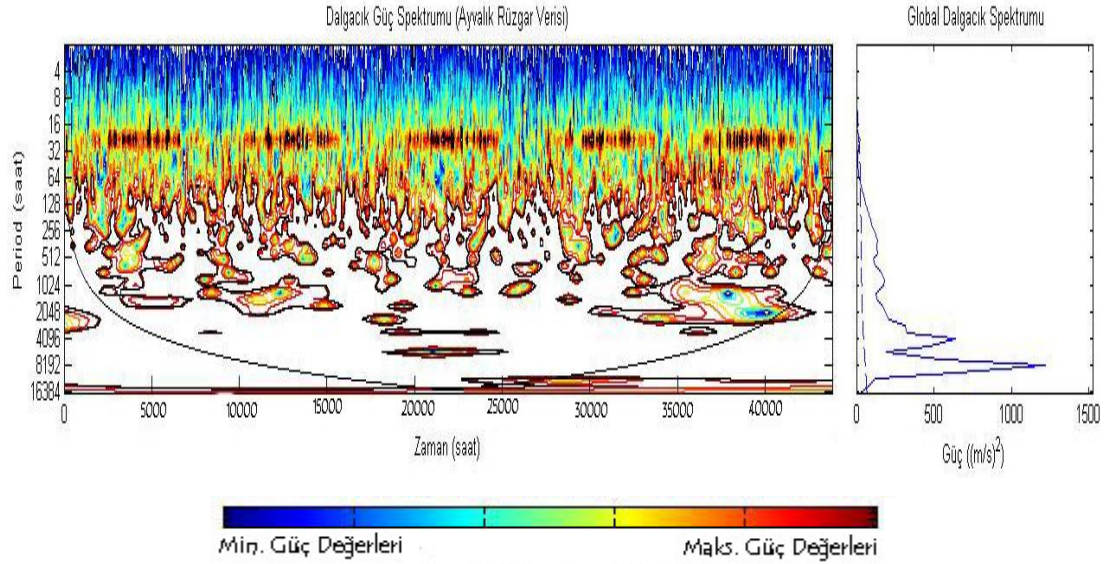
bulunduğu bölgedir. Bu etki konisi denilen bölge dalgacık güç spektrumlarına ait grafiklerdeki yay biçimindeki siyah çizgi ile gösterilmektedir. Yorumlar yapılırken bu çizginin iç bölgesi veya yukarı bölgesi dikkate alınmalıdır.

Global Dalgacık Spektrumunun grafiğindeki kesikli çizgi ise güven aralığını temsil etmektedir. Kesikli çizginin sağında kalan kısım % 95 güven aralığını temsil ederken solunda kalan alan % 5'lik güven aralığını temsil etmektedir. Yapılan yorumlarda % 95 güven aralığındaki güç değerleri dikkate alınmalıdır. Global Dalgacık Spektrumları ile zaman serileri içindeki baskın periyotlar ve bu periyotların güç değerleri belirlenebilmektedir.

Dalgacık Güç Spektrumu grafiğinde yatay eksen zamanı temsil ederken düşey eksen periyodu göstermektedir. İç bölge ise renkler vasıtasıyla güç yoğunluklarını göstermektedir. Global Dalgacık Spektrumu grafiğinde yatay eksen güç değerlerini, düşey eksen Dalgacık Güç Spektrumu'ndaki düşey eksenle aynı olmakla beraber periyodu göstermektedir.

Bu bilgilerin ardından bu çalışmada kullanılan verilere uygulanarak elde edilmiş olan Şekil 6.5'den Şekil 6.16'ya kadar olan grafikleri yorumlamaya geçilebilir. İlk olarak Şekil 6.5'deki Akhisar rüzgar verisine ait Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafikleri incelenecek olursa, Global Dalgacık Spektrumu grafiği 5 adet yerel maksimum değerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu yerel maksimum değerlerinin gerçekleşme zamanları periyodun uzunluğu bilgisini vermesi bakımından önemlidir. Bu sonuç itibari ile 400, 900, 3072, 4096 ve 8192 saatte bir görülmekte olan periyotların varlığı bilgisine ulaşılmış olur. Bu periyotların hangi mevsimlerde görüldüğü bilgisine ulaşmak hiç de zor değildir. Bu işlem için yatay eksen zaman bilgisini barındırmakta olan DGS grafiğine bakılabilir. Bu sayede hakim bir periyodun yılın hangi dönemlerinde gerçekleştiği bilgisi elde edilebilir. Bu sayede rüzgar verisinin sahip olduğu rüzgar karakteri hakkında yorum yapılabilir. Akhisar rüzgar verisine ait GDS grafiğindeki 400 saatte bir görülmekte olan periyot yaklaşık 17 günde bir gerçekleşen bir periyodikliği, 900 saatlik periyot yaklaşık 40 günde bir görülen bir periyodikliği, 3072 saatlik periyot yaklaşık 4 ayda görülen bir periyodikliği, 4096 saatlik periyot yaklaşık 6 ayda bir görülen periyodikliği, 8192 saatlik periyot ise yaklaşık olarak yıllık bir periyodikliği göstermektedir. Bu bilgiler ışığında hakim güç yoğunluğuna sahip periyotlar $2100 (m/s)^2$ 'lik güçle yıllık bir salınım ve yaklaşık $900 (m/s)^2$ 'lik güç değerine sahip 6 ayda bir görülen ikinci bir salınım takip etmektedir. Bu iki periyodiklik Akhisar rüzgar verisine ait yaz ve kış

aylarına denk düşen 6 ayda bir kendini tekrar eden hakim bir rüzgarın varlığına işaret ediyor. Ayrıca Global Dalgacık Spektrumu'ndan belirlenemeyen fakat Dalgacık Güç Spektrumu'nda kendini çok güçlü şekilde gösteren 24 saatlik periyoda sahip bir rüzgar görülmektedir. Bu 24 saatlik periyod, grafikte mavi renkten kırmızı renge geçişin başladığı yerde baskın kırmızı renkler olarak görülmektedir.



Şekil 6.6 : Ayvalık rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

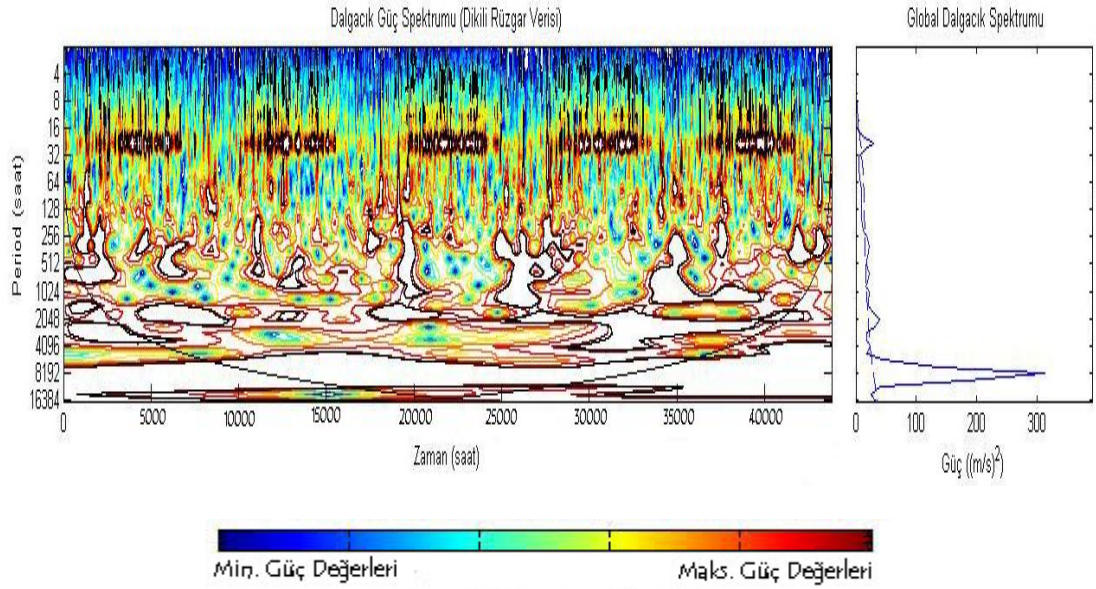
Şekil 6.6'da Ayvalık rüzgar verisine ait Global dalgacık spektrumu grafiği incelendiğinde 4 temel periyodiklik Akhisar rüzgar verisine çok benzer biçimde göze çarpmaktadır. Bunlar 400, 900, 4096 ve 8192 saatlik periyotlardır. Rüzgar güç yoğunluklarından görülen periyodikliklerin bu kadar benzer oluşu sonucu, Ayvalık ve Akhisar'ın aynı iklimsel karaktere sahip bölgede oldukları ve aynı hakim rüzgarları farklı şiddetlerde aldıkları söylenebilir. Güç yoğunluk değerlerine bakıldığında en yüksek iki değer $1200 (m/s)^2$ 'lik güç değeri ile 8192 saatlik periyot ve $650 (m/s)^2$ lik güç değeri ile 4096 saatlik periyot olarak görülmektedir. 24 saatlik periyoda sahip fakat Global Dalgacık Spektrumu'nda net biçimde görülemeyen güç değeri Ayvalık rüzgar verisi içinde Dalgacık Güç Spektrumu grafiğinden seçilebilmektedir.

Şekil 6.7'deki Çanakkale rüzgar verisine ait Global Dalgacık Spektrum grafiği incelendiğinde 24, 300, 512, 750, 1800, 3072 ve 8192 saatlik olmak üzere 7 adet periyodiklik görülmektedir. Akhisar ve Ayvalık rüzgar verilerine ait Global Dalgacık Spektrumlarında net olarak görülemeyen 24 saatlik periyot Çanakkale'ye ait grafikte kendisini göstermiştir. Bunun nedeni olarak Global Dalgacık Spektrumu grafiğinin

Şekil 6.8’de Çorlu rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 24, 380, 1024, 2048, 4096 ve 8192 saatlik 6 temel periyodiklik görülmektedir. Bunlardan 8192 saatlik periyoda sahip $700 (m/s)^2$ güç değeri ile 4096 ve 2048 saatlik periyotlar 400 ($m/$

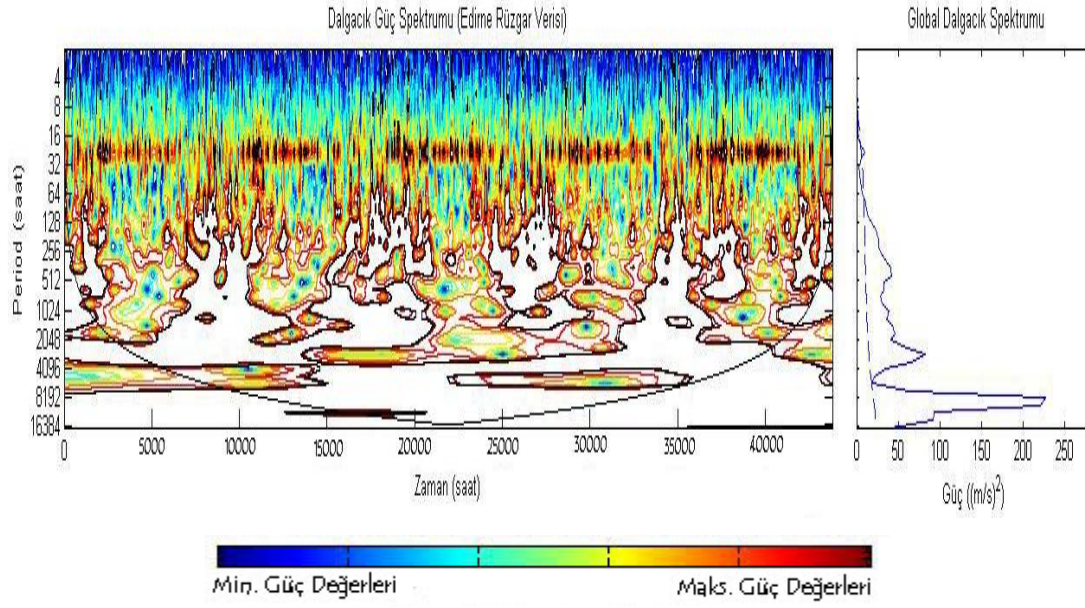
$s)^2$ 'lik eşit güç değerlerine sahip olmak üzere toplamda üç önemli periyodiklik göze çarpmaktadır. Bu özelliği ile şu ana kadar bahsedilen Akhisar, Ayvalık ve Çanakkale'den farklı bir rüzgar karakteri ortaya koymaktadır. Akhisar, Ayvalık ve Çanakkale iki güçlü periyodiklik karakteri gösterirken Çorlu 3 önemli güç değerine sahip periyodiklik göstermektedir.

Şekil 6.9'da Dikili rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde ise 3 temel periyodiklik 24, 2048 ve 8192 saatlik değerleri ile karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan 8192 saatlik periyot $300 (m/s)^2$ güç değeri ile en yüksek güç değerine sahip olan iken diğer periyotların sahip oldukları güç değerlerinin büyüklüğü bakımından pek dikkate değer değildir. Periyodiklik sayısının azlığı ve bu periyodikliklere ait güç değerlerinin düşüklüğü göz önünde bulundurulduğunda şimdiye kadar incelenen istasyonlar içinde rüzgar enerjisi potansiyeli en düşük olan istasyon olduğu söylenebilir.

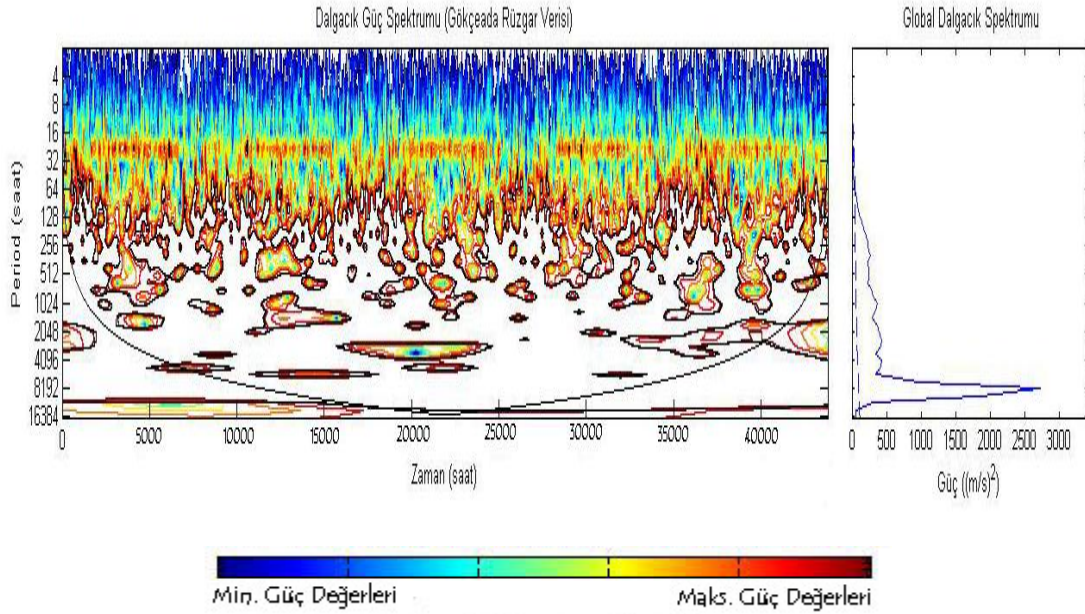


Şekil 6.9 : Dikili rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Şekil 6.10'da Edirne rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 24, 450, 1024, 1950, 3072 ve 8192 saatlik olmak üzere 6 adet periyodiklik görülmektedir. Edirne rüzgar verisine ait bu periyodikliklerin güç değerleri de oldukça düşüktür. $230 (m/s)^2$ 'lik güç değerine sahip 8192 saatlik periyot ile $80 (m/s)^2$ 'lik güç değerine sahip 3072 saatlik periyot görülen en yüksek güç değerleridir. Bu istasyon içinde rüzgar potansiyelinin ayrıntılı bir bakışa gerek olmaksızın düşük olduğu söylenebilir.



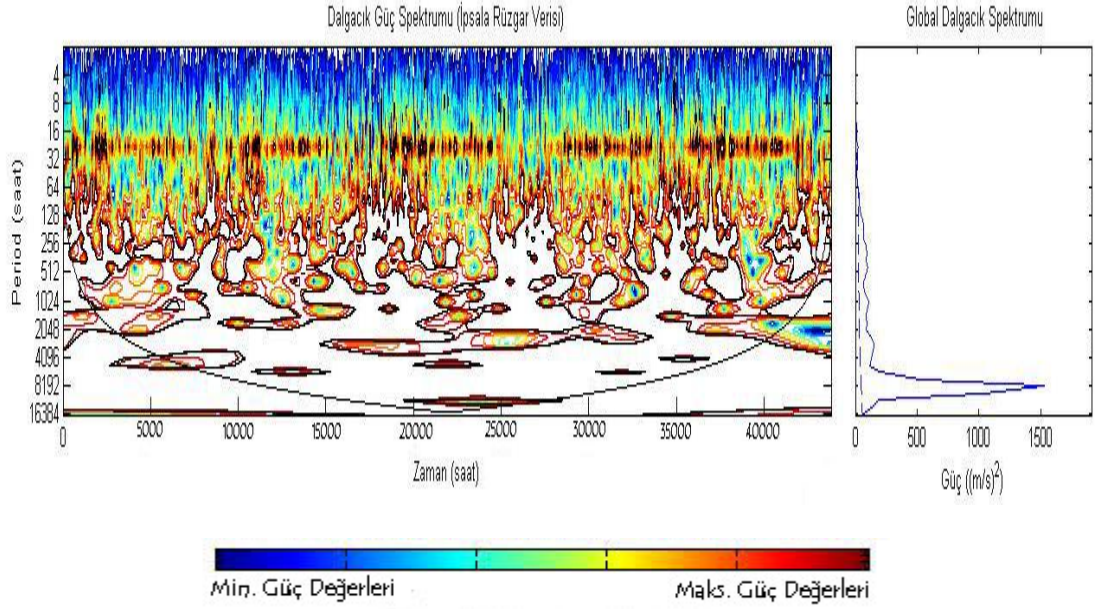
Şekil 6.10 : Edirne rüzgar verisine ait DGS ve GDS.



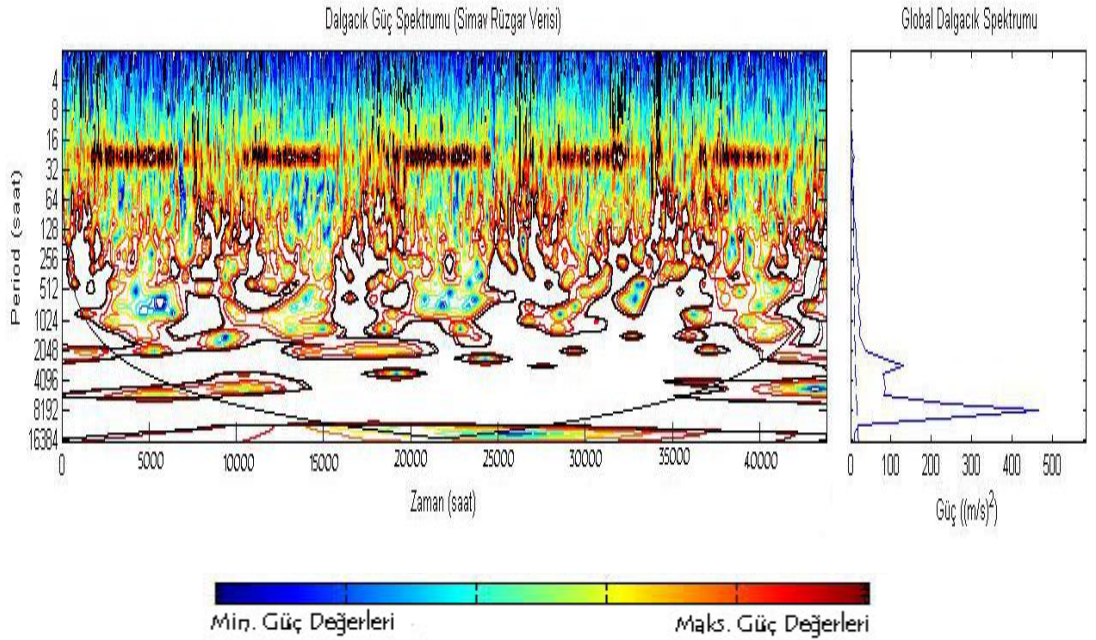
Şekil 6.11 : Gökçeada rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Şekil 6.11’de Gökçeada rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 300, 1024, 2500, 4096 ve 8192 saatlik 5 temel periyodiklik görülmektedir. Bunlardan 8192 saatlik periyodun sahip olduğu $2700 (m/s)^2$ güç değeri ile analiz edilen istasyonların içinde en yüksek güç değerine sahip periyodiklik olarak dikkat çekmektedir. Bunun yanında diğer periyodiklikler de önemli güç değerlerine sahiptir. İlk bakış ile bu istasyonun şimdiye kadar incelenmiş olan istasyonlar içinde en yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 6.12’de İpsala rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 300, 1024, 3072 ve 8192 saatlik 4 adet periyodiklik görülmektedir. Bu periyodikliklerden 8192 saatlik olanı $1500 (m/s)^2$ ’lik güç değeri ile en dikkat çeken iken diğer periyodiklikler bu değer ile kıyaslandığında bir hayli düşük güç değerleri olarak kalmaktadır.



Şekil 6.12 : İpsala rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

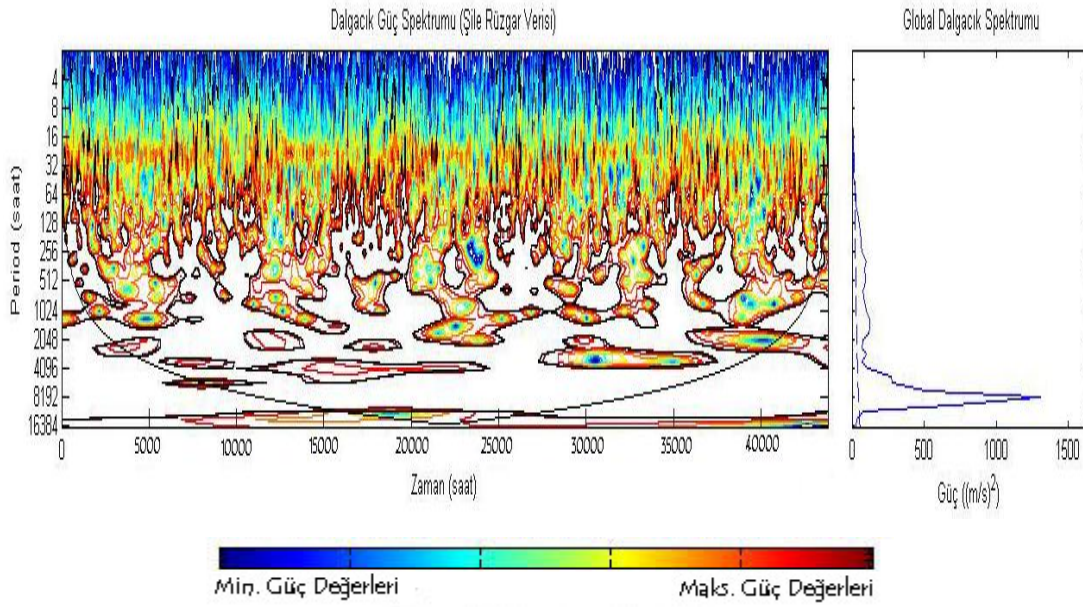


Şekil 6.13 : Simav rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Şekil 6.13’de Simav rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 2 temel periyodiklik 3072 ve 8192 saatlik değerleri ile göze çarpmaktadır. Bu periyodiklikler de sırasıyla

120 $(m/s)^2$ ve 460 $(m/s)^2$ 'lik güç değerlerine sahiptirler. Bu istasyona ait rüzgar verisi içinde periyodikliğin çok az oluşu ve bu periyodikliklere ait güç değerlerinin de düşük oluşu göz önünde bulundurulduğunda rüzgar enerji potansiyelinin düşük olduğunu söylenebilir.

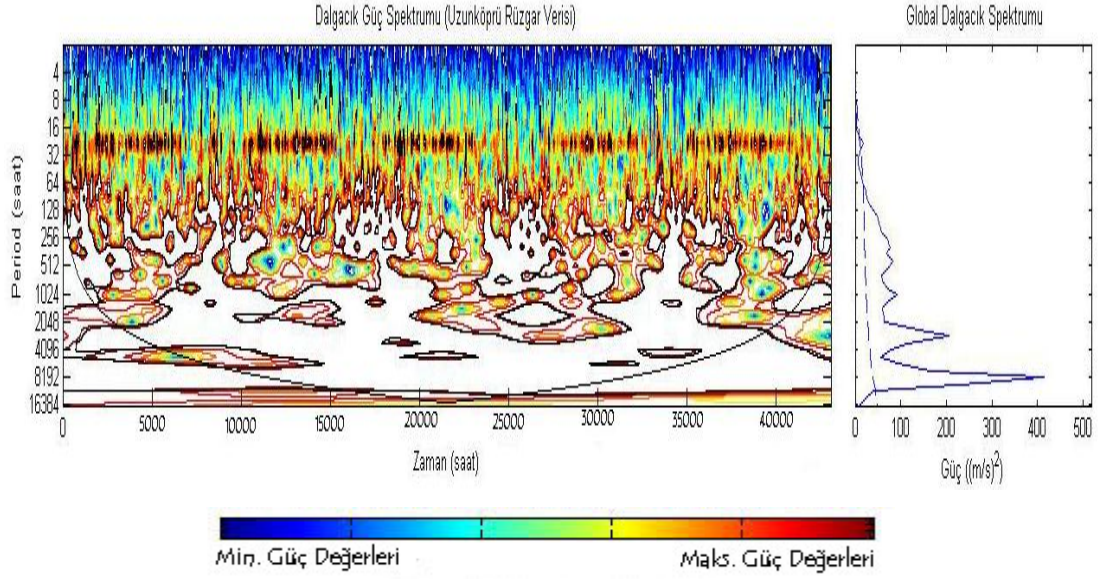
Şekil 6.14'de Şile rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 300, 500, 1500, 3072 ve 8192 saatlik periyotlar görülmektedir. Bunların içinde 8192 saatlik periyot 1350 $(m/s)^2$ 'lik güç değeri ile dikkat çekmektedir.



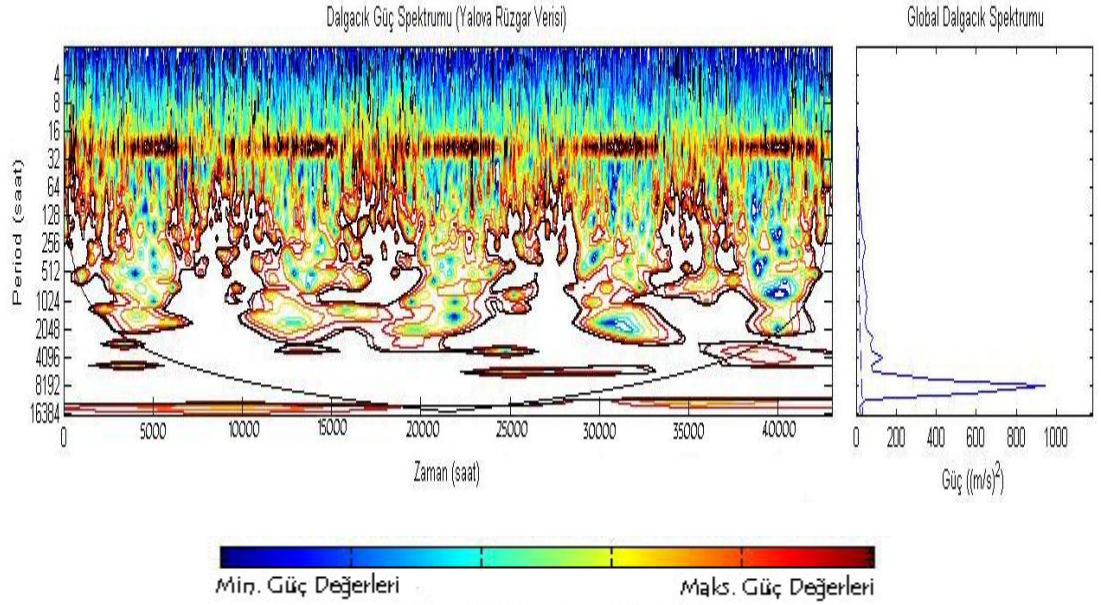
Şekil 6.14 : Şile rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Şile rüzgar verisi belirli düzeyin üstünde enerji potansiyeli göstermekle beraber örnek verilecek olursa Ayvalık veya Çorlu verilerine ait potansiyel ile kıyaslandığında durumunun ne düzeyde olduğu sorusuna cevap vermek sadece Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafiklerine bakarak pek mümkün gözükmemektedir. Bu noktada Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile yapılacak analizler çok önemli olacaktır.

Şekil 6.15'de Uzunköprü rüzgar verisine ait grafiklere bakıldığında 24, 300, 512, 1024, 3072 ve 8192 saatlik olmak üzere 6 adet periyot görülmektedir. Bunlardan en önemli olanları 400 ve 200 $(m/s)^2$ 'lik güç değerleri ile sırasıyla 8192 ve 3072 saatlik periyot değerlerine sahip olanlarıdır. Güç değerleri düşük görülmekle beraber periyodiklik adedinin fazlalığı rüzgar enerji potansiyeli için yorum yapmayı güçleştiren bir etkiye sahiptir.



Şekil 6.15 : Uzunköprü rüzgar verisine ait DGS ve GDS.



Şekil 6.16 : Yalova rüzgar verisine ait DGS ve GDS.

Şekil 6.16’da Yalova rüzgar verisine ait grafikler incelendiğinde 300, 3000, 4096 ve 8192 saatlik 4 temel periyot değeri görülmektedir. Bunlardan 8192 saatlik periyoda sahip olanı $900 (m/s)^2$ ’lik güç değeri ile dikkat çekmekte iken diğerlerinin güç değerleri $200 (m/s)^2$ ’nin altındadır.

SDD uygulayarak elde edilen 12 farklı istasyona ait spektral gösterim şekilleri olan Dalgacık Güç Spektrum ve Global Dalgacık Spektrumlarına bakılarak genel bir yorum yapılacak olursa, verilerin birçok geçici değişkenliğe sahip olduğu hem

Dalgacık Güç Spektrumundaki renk değişkenlikleri hem de Global Dalgacık Spektrumundaki güç yoğunluğunun zamana göre değişimini gösteren grafiklerdeki dalgalanmalardan kolaylıkla görülebilir. Bunun yanında analiz edilen bütün istasyonlarda 8192 saatlik en büyük güç değerine sahip periyodiklikler mevcuttur. Bu 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verilerine ait Global Dalgacık Spektrumu'nun karakteristik bir özelliği olarak görülmektedir. Bu rüzgar verisinin uzun yıllar içinde sürekli bir yıllık periyoda sahip olduğunu göstermektedir. Öte taraftan, rüzgar potansiyelinin ilk değerlendirme ölçütü olarak 8192 saatlik periyodundaki rüzgar gücü değerine bakılabilir. Çizelge 6.3, 8192 saatlik periyodun istasyonlara göre güç değişimini göstermektedir. Bu çizelgedeki değerlerden en yüksek potansiyelin Gökçeada'da olduğu, bu istasyonun Akhisar, İpsala, Şile ve Ayvalık sıralamasıyla takip edildiği görülür. En düşük rüzgar enerji potansiyeline sahip istasyonlar da Edirne, Dikili ve Uzunköprü sıralaması biçimindedir. Çizelge 6.4'de en yüksek 2. güç değerine sahip periyodiklikler görülmektedir. Bu çizelgede en yüksek güç değerine sahip istasyon Akhisar'dır.

Çizelge 6.3 : En yüksek güç değerine sahip periyodiklikler.

Rüzgar verisi	En Yüksek Güç Değeri (m/s) ²	Periyodu (saat)
Akhisar	2300	8192
Ayvalık	1250	8192
Çanakkale	720	8192
Çorlu	720	8192
Dikili	310	8192
Edirne	230	8192
Gökçeada	2750	8192
İpsala	1550	8192
Simav	470	8192
Şile	1300	8192
Uzunköprü	320	8192
Yalova	950	8192

Bir zaman serisinde periyodiklik bulunması ve bu periyodikliğin gücünün bilinmesi, rüzgar potansiyeli belirlenmesi noktasında kabaca bazı fikirler oluştursa da rüzgar potansiyeli hakkında net bilgi verdiği söylenemez. Çünkü, periyodikliğin zaman serisi içinde kaç defa tekrar ettiği bilgisi Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafiklerinden net olarak elde edilemez, sadece var olduklarından emin olunabilir.

Çizelge 6.4 : En yüksek 2. güç değerine sahip periyodiklikler.

Rüzgar verisi	En Yüksek Güç Değeri $(m/s)^2$	Periyodu (saat)
Akhisar	900	4096
Ayvalık	650	4096
Çanakkale	390	3072
Çorlu	400	4096
Dikili	50	2048
Edirne	80	3072
Gökçeada	500	4096
İpsala	200	3072
Simav	120	3072
Şile	200	1500
Uzunköprü	200	3072
Yalova	150	4096

Bunun sonucunda, görece diğerlerine göre düşük periyodikliklere sahip bir zaman serisi, o düşük değerlere sahip periyodikliğin zaman serisi içindeki görülme sıklığından ötürü, daha yüksek güç değerli periyodikliklere sahip zaman serilerinden daha yüksek rüzgar enerji potansiyeline sahip olabilir. Burada periyodikliğin varlığı sayesinde analiz edilen rüzgar verilerinin aykırı veriler olmayıp zaman içinde kendilerini tekrar ettiklerini göstermesi bakımından önemlidir İlk bakış olarak bu grafiklerden rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında yorum yapılmak istenirse en yüksek güç değerini baz almak doğru sonuçlar vermeyebilir. Bu noktada periyodiklik sayısının fazlalığı en yüksek güç değerli periyottan daha önemli bir kriter olarak değerlendirilmelidir.

Meteorolojik açıdan yapılacak değerlendirme ile günlük salınımların meteorolojideki zaman ölçeği 1 güne denk gelen kara ve deniz meltemleri veya dağ ve vadi meltemlerinin salınımlarına denk düştüğü söylenebilir. Bu tür yerel rüzgar sistemleri sıcaklık kontrastının maksimum olduğu zamanlarda en şiddetli biçimde görülür. Bu dönemler de DGS grafiklerinden de açıkça görüleceği üzere yaz dönemlerine denk düşmektedir. Ayrıca DGS ve GDS grafiklerinden açık şekilde mevsimlik ve yıllık salınımlar açıkça görülmektedir.

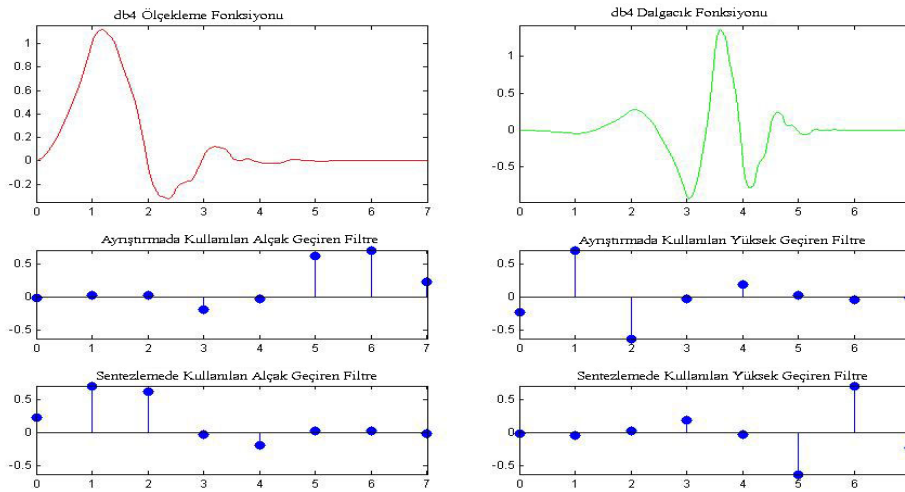
Uygulamanın ikinci kısmında Ayırık Dalgacık Dönüşümünün zaman serisi analizindeki Çoklu Çözünürlük Analizi yaklaşımı görülecektir.

6.2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile analiz

6.2.2.1 Dalgacık seçimi

Ayrık dalgacık analizi için Daubechies dalgacık ailesinden db4 dalgacığı seçilmiştir. Daha önceden bahsedildiği üzere db4 ortogonalılık (diklik) özelliğine sahip bir dalgacık fonksiyonudur. Bu dalgacığın tercih edilmesinin sebebi analiz ettiği zaman serisini yumuşatma, düzgünleştirme (smoothing) özelliği ile rüzgar verisinin özelliklerini ortaya çıkarmada daha iyi bir yaklaşım getireceğinin düşünülmesidir.

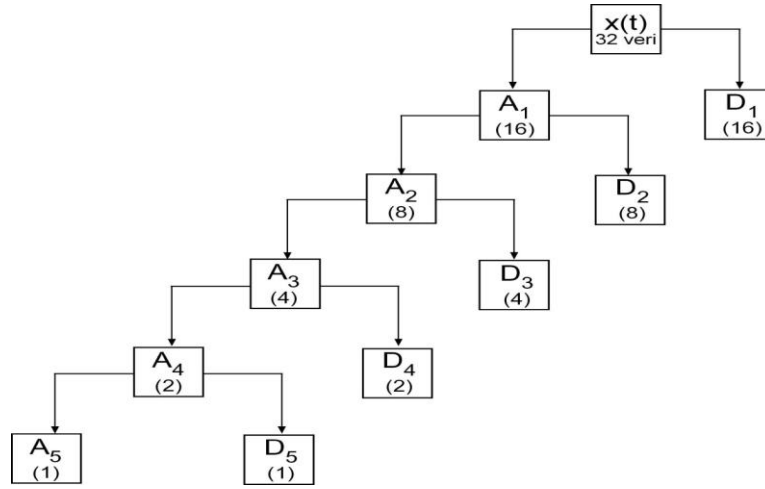
Ayrıca zaman serisi ve mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanıma sahip dalgacık olması db4 dalgacığının seçilmesinde rol oynayan diğer bir etkidir. Şekil 6.17’de db4 dalgacığının ölçek ve dalgacık fonksiyonları, ayrıca ayırıştırma ve sentezleme işlemlerinde kullanılan alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreleri görülmektedir.



Şekil 6.17 : db4 dalgacığının ölçekleme ve dalgacık fonksiyonu.

6.2.2.2 Kaç seviye ayırıştırma yapılacağıının belirlenmesi

Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulaması Çoklu Çözünürlük Analizi (ÇÇA) ile gerçekleştirilecektir. ÇÇA’da en önemli konulardan birini ayırıştırmanın yapılacağı seviyenin belirlenmesi oluşturur. Seviye belirlenmesinde dalgacık teorisinin matematiksel temeli, ayırıştırma işlemi gerçekleştirildiğinde ortaya çıkan yaklaşım (A) ve detay (D) bileşenlerinde son seviyede birer adet dalgacık katsayısı kalmasını sağlayacak seviyeye kadar ayırıştırma yapılmasını önerir. Bu formüsel olarak N veri sayısını ve k ayırıştırma yapılacak seviyeyi göstermek üzere, $2^k = N$ eşitliği ile gösterilir.



Şekil 6.18 : 32 verilik zaman serisinin 5 seviye ayrıştırılması.

Şekil 6.18’de 5 seviye ayrıştırma ile son seviyede yaklaşım ve detay bileşenlerinde birer adet dalgacık katsayısının kalışı gösterilmiştir. Fakat bu zaman serisi uygulamalarında pek mantıklı değildir. En son yaklaşım bileşeninde kalacak dalgacık katsayı adedi ile zaman serisinin detay bileşenlerinden ayrıldıktan sonra kalan asıl karakteri görülmek istenir. Teoride bahsedilen duruma dönecek olursak yukarıda verilen örnekte son seviye ayrıştırmanın ardından 1 yaklaşım katsayısı kalır ki analiz edilen verinin asıl karakterinin anlaşılmasına imkan vermez.

Bu nedenle kaç seviye ayrıştırma işleminin yapılacağı çalışmayı yapan kişinin belirlediği amaçlara ve analiz edilen verinin çeşidine göre analizi yapan kişi tarafından belirlenmelidir. Bu tez çalışmasında ayrıştırma yapılacak seviye 10 olarak belirlenmiş ve rüzgar verileri 10 detay ve 1 yaklaşım bileşenine ayrılarak yorumlar ve hesaplamalar yapılmıştır. Bu seçilen seviye sonucunda 43824 veriye sahip rüzgar verisine ait zaman serisinin 49 katsayıdan oluşan 10. seviye yaklaşım katsayılarından oluşan seri ile en iyi temsiliyete ulaştığı düşünülmüştür.

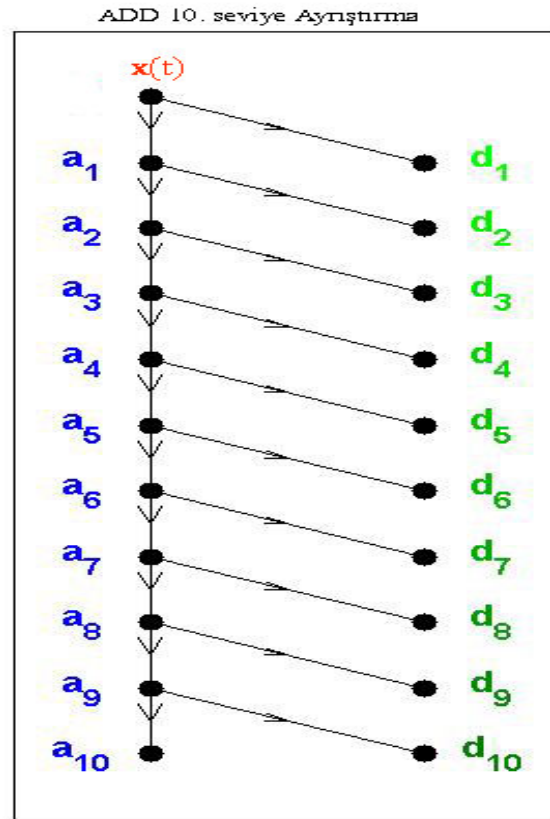
6.2.2.3 Çoklu Çözünürlük Analizi’nin gerçekleştirilmesi

Çoklu Çözünürlük Analizi rüzgar verilerini alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrıştırırken yüksek geçiren ve alçak geçiren filtreleri kullanmaktadır. Bu filtreler sayesinde ayrıştırılan rüzgar verisinin oluşturduğu zaman serisindeki veri sayısı ile aynı veri sayısına sahip alçak ve yüksek frekans bileşenlerinden oluşan sırasıyla yaklaşım ve detay serileri ortaya çıkmaktadır. Bu filtreleme işleminin ardından yüksek ve alçak frekans bileşenlerinde artık veri ortaya çıkar. Çünkü alçak frekans bileşenlerinin oluşturduğu seri olan yaklaşım serisi ile yüksek frekans bileşenlerinin

oluşturduğu veri sayısı, ayrıştırmaya uğrayan zaman serisi ile aynı olduğundan filtrelemenin ardından başlangıçtaki veri sayısının iki katı veri oluşur. Bu durumdan kurtulmak için 2 ile aşağı örnekleme (down-sampling) yapılarak her iki veriden biri atılarak hiçbir bilgi kaybına uğramaksızın artıklık olarak nitelendirilen veri fazlalığından kurtulma sağlanmış olur.

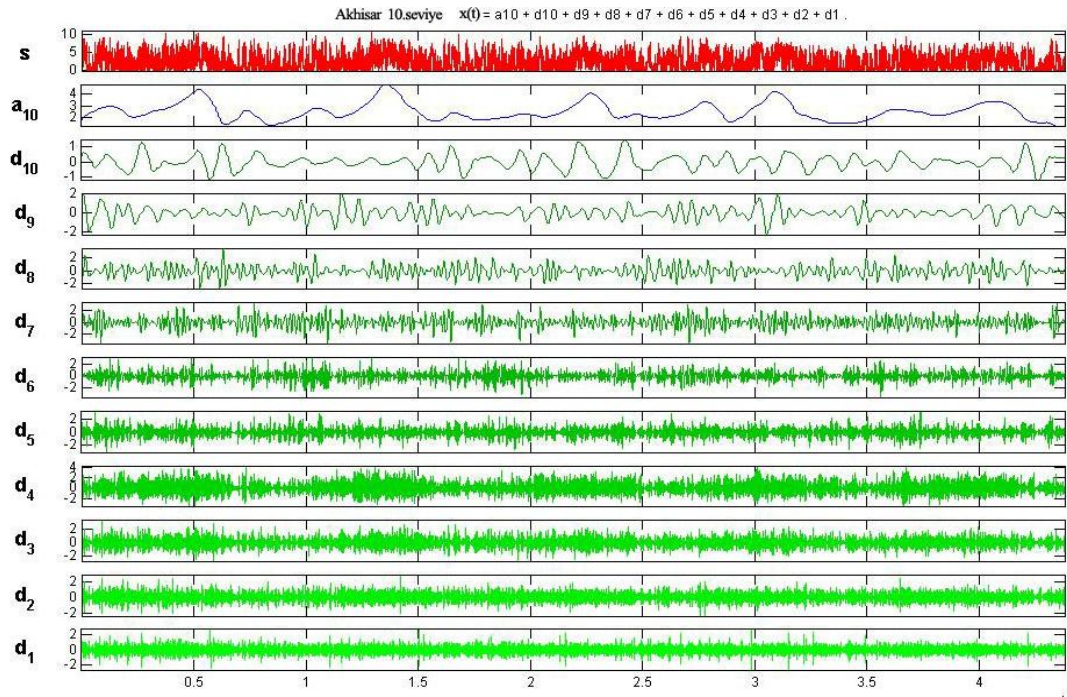
Bir önceki bölümde belirtildiği üzere burada gerçekleştirilen Çoklu Çözünürlük Analizi 10 seviye ayrıştırma işlemi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler MATLAB programında bulunan *wavemenu* ara yüzü ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarını gösteren grafikler bu ara yüzden alınmıştır. Bu 10 seviye ayrıştırma işlemi Şekil 6.19'da dalgacık ağacı biçiminde gösterilmiştir.

Bu ayrışım işleminde detay bileşenleri yüksek frekans bileşenlerini temsil ederken yaklaşım bileşeni alçak frekans bileşenini temsil eder. Bu yaklaşım yüksek frekans bileşenleri sayesinde zaman serisi veya analiz edilen sinyaldeki süreksizlik ve kırılma noktalarının tespitini sağlarken, alçak frekans bileşeni ise zaman serisi veya analiz edilen sinyalin uzun zamanlık değişimlerinin belirlenmesi, saf frekans bileşeninin ve içindeki benzerliklerin tespiti açısından önemlidir.

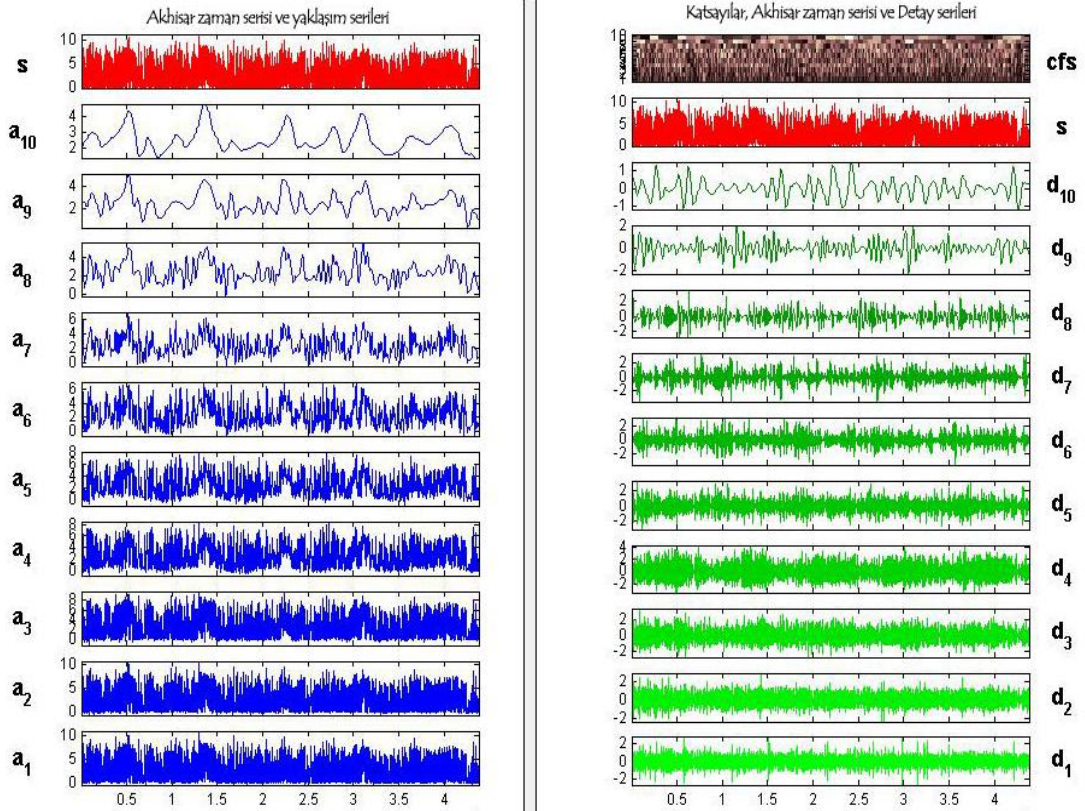


Şekil 6.19 : Dalgacık ağacı ile ayrıştırmanın gösterilmesi.

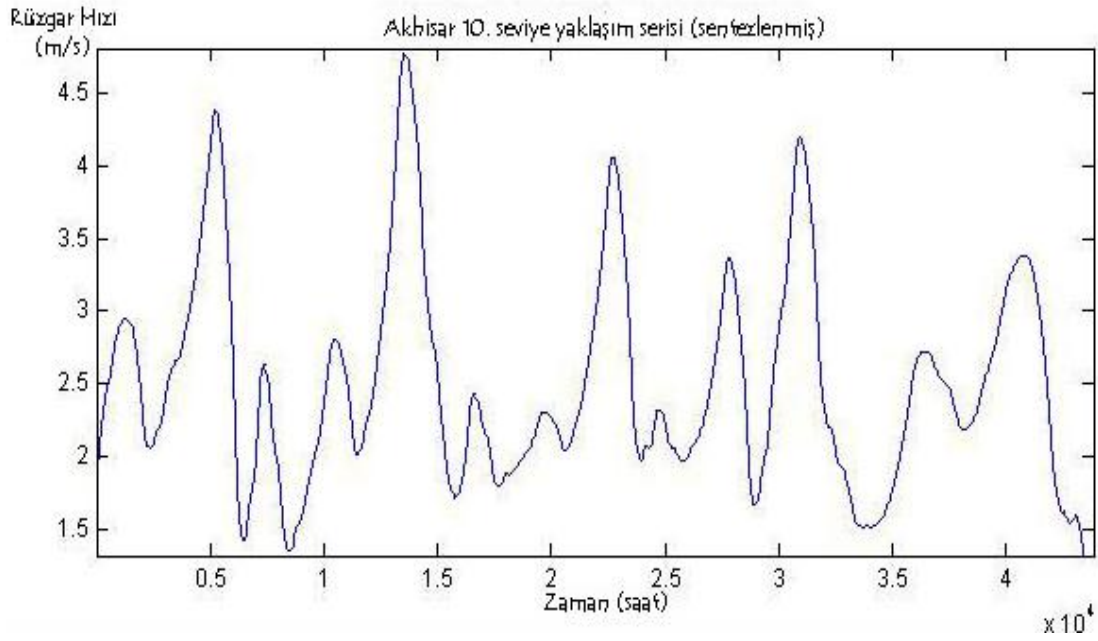
Akhisar rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



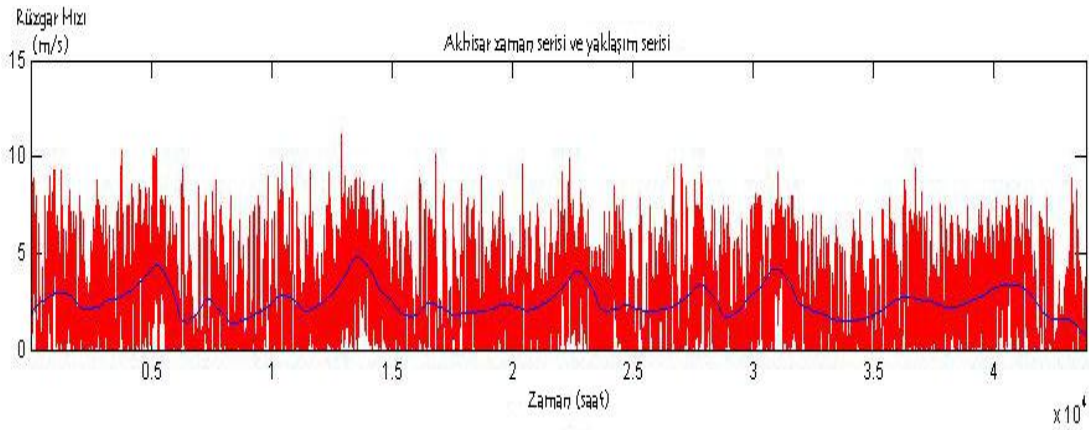
Şekil 6.20 : Akhisar rüzgar verisinin 10 seviye ayrıştırılması.



Şekil 6.21 : Akhisar 10. seviye yaklaşım ve detay serileri.



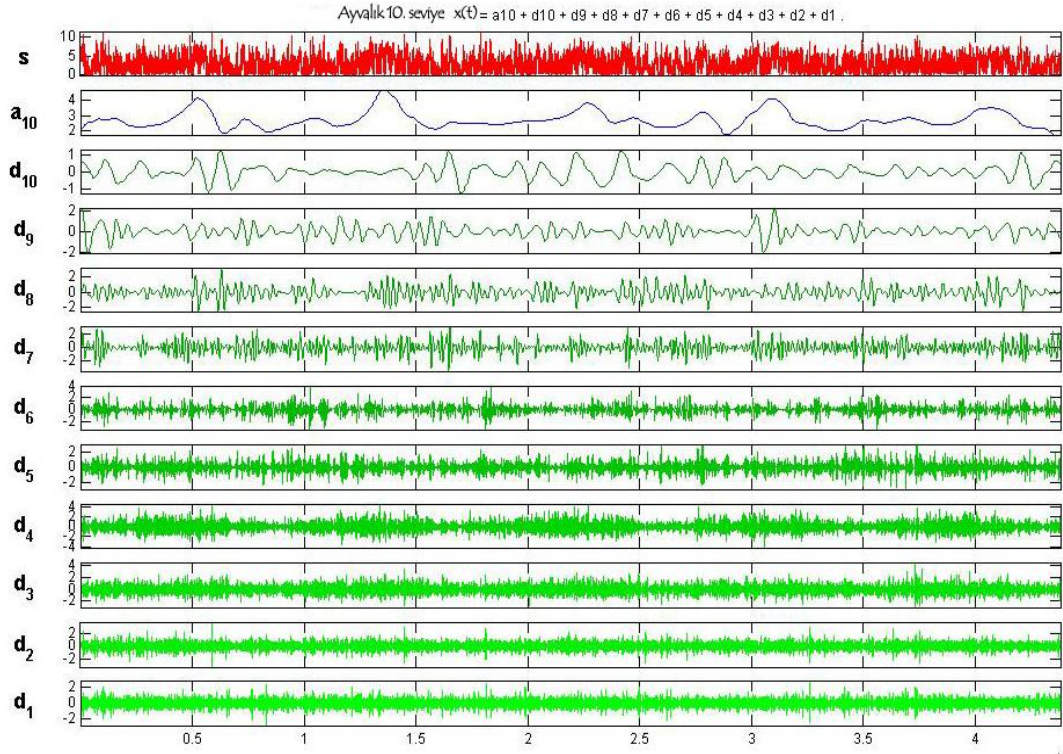
Şekil 6.22 : 10. seviye Akhisar sentezlenmiş yaklaşım serisi.



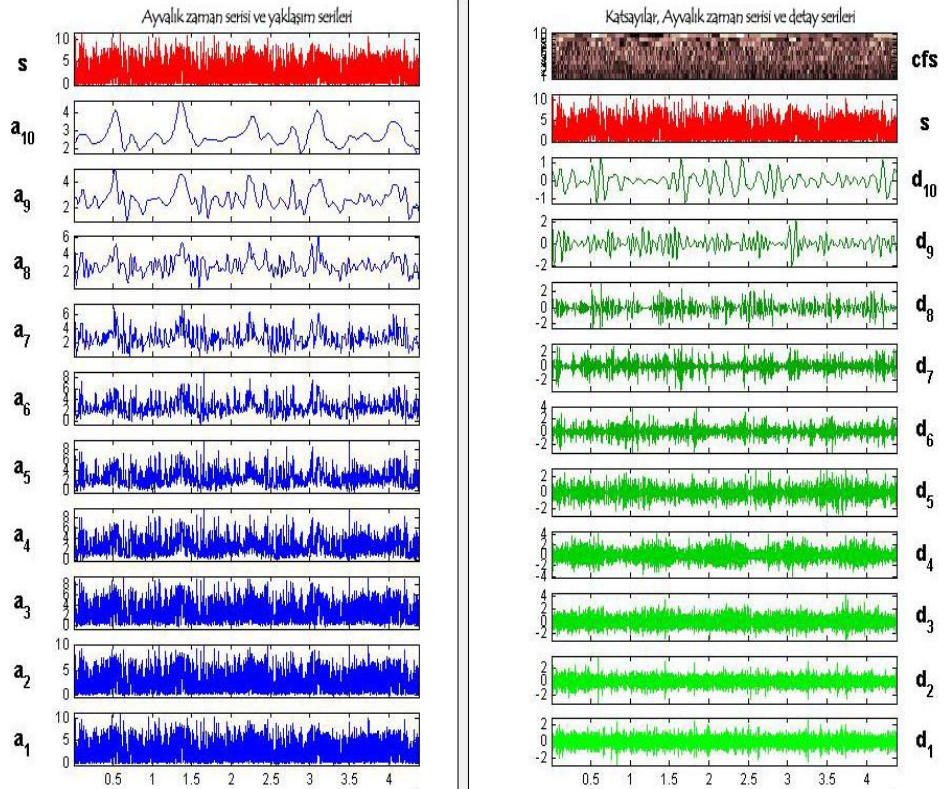
Şekil 6.23 : Akhisar'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Akhisar verisine ait Şekil 6.22'deki sentezlenmiş 10. seviye yaklaşım serisi ile zaman serisi durumunda iken algılanamayan birçok özellik bu şekil sayesinde algılanabilir hale gelmiştir. Periyodiklikler açık bir şekilde görülebilmektedir. Yıllık görülen hakim bir rüzgara ait periyodiklik açık bir şekilde görülür iken, bu periyodikliğe ek 6 ayda bir görülen diğer bir periyodiklik söz konusudur. Bu grafik ile Global Dalgacık Spektrumu grafiği birbirini doğrulayan özellikler göstermektedir. GDS grafiğinde de yıllık ve mevsimsel salınımlar açık şekilde görülmekte idi.

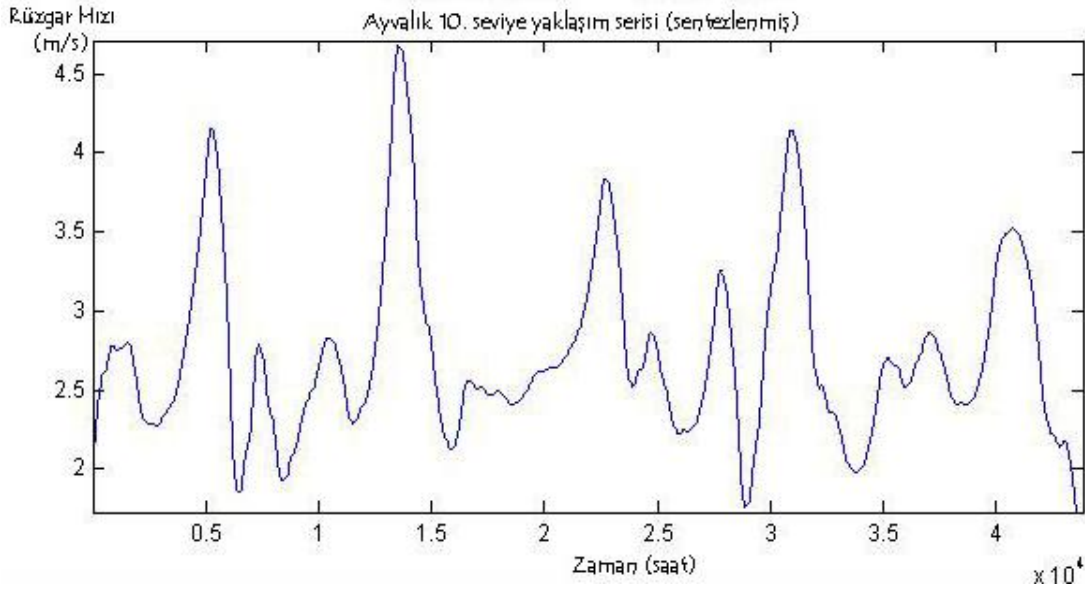
Ayvalık rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



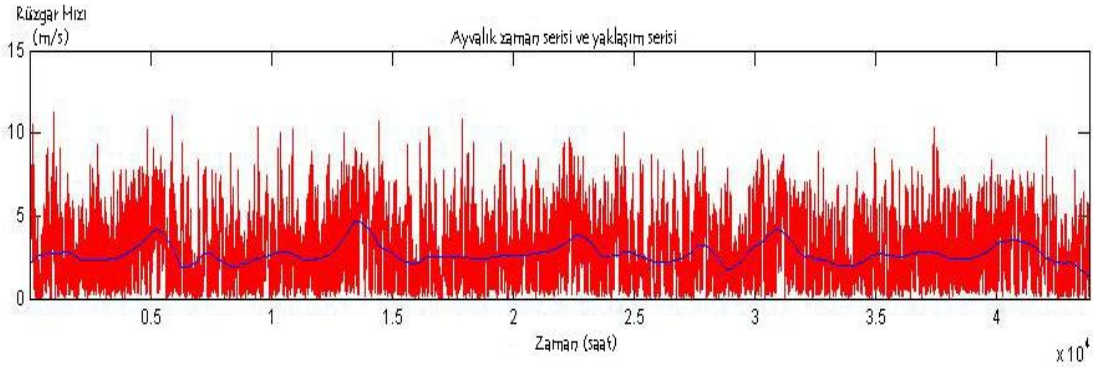
Şekil 6.24 : Ayvalık rüzgar verisinin 10 seviye ayrıştırılması.



Şekil 6.25 : Ayvalık 10. seviye yaklaşım ve detay serileri.



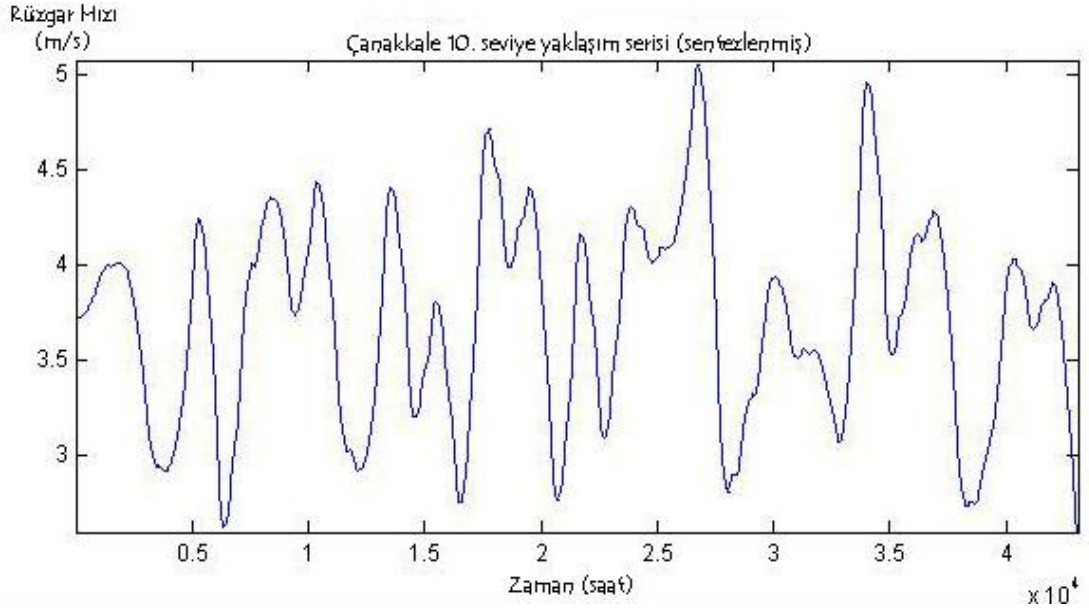
Şekil 6.26 : 10. seviye Ayvalık sentezlenmiş yaklaşım serisi.



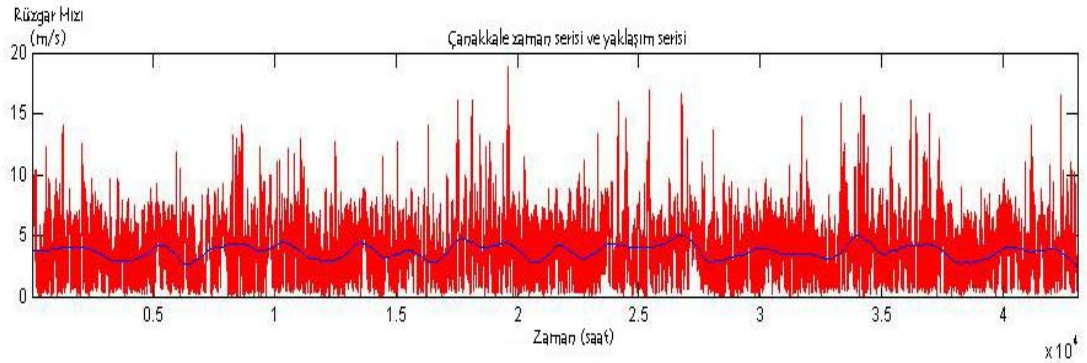
Şekil 6.27 : Ayvalık'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Şekil 6.26'daki sentezlenmiş yaklaşım serisi grafiğinden Ayvalık için de Akhisar için söylenenlerin geçerliliği görülmektedir. Yılda bir görülen güçlü bir periyodikliğin yanında bahar aylarında sürekli bir ikinci periyodiklik söz konusudur. Akhisar ve Ayvalık bölgelerinin aynı karakterde bir rüzgardan etkileniyor oldukları söylenebilir. Bu aşamadan sonra ilk iki istasyon için verilen ayrıştırma işleminin sonuçlarının görülmekte olduğu rüzgar verilerinin 10 seviye ayrıştırılmasını gösteren ve bu ayrıştırma işlemi sonucunda ortaya çıkan farklı seviyelere ait yaklaşım ve detay serilerinin grafikleri verilmeyecektir. Bu ayrıştırmanın zaman serisine yaklaşımını gösteren ve ayrıştırmanın ardından ortaya çıkan yaklaşım bileşenindeki katsayılar ile sentezlenmiş 10. seviye yaklaşım serilerine ait grafiğin verilmesi ile yorumlamalara devam edilecektir.

Çanakkale rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



Şekil 6.28 : Çanakkale 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.

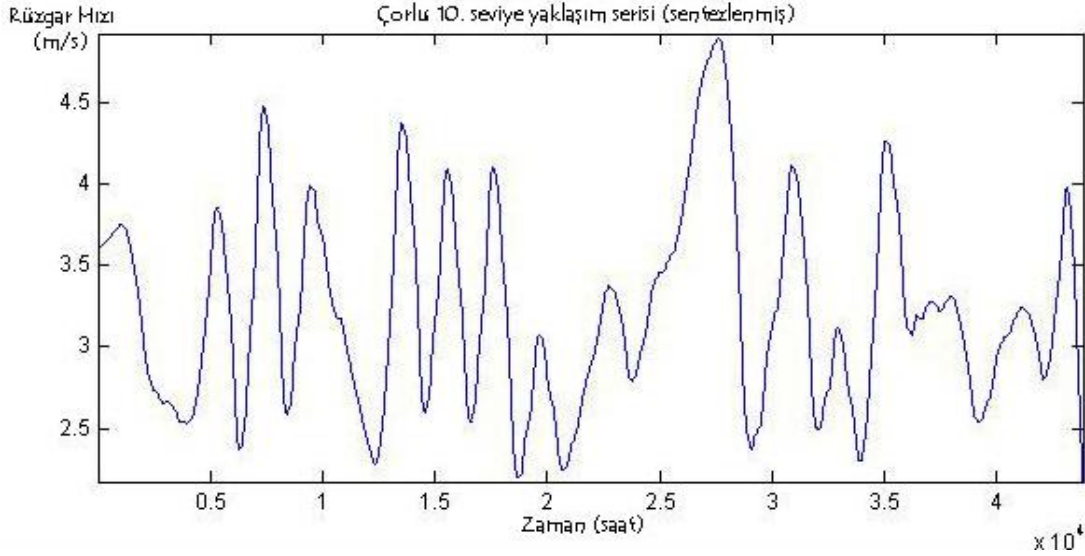


Şekil 6.29 : Çanakkale’ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

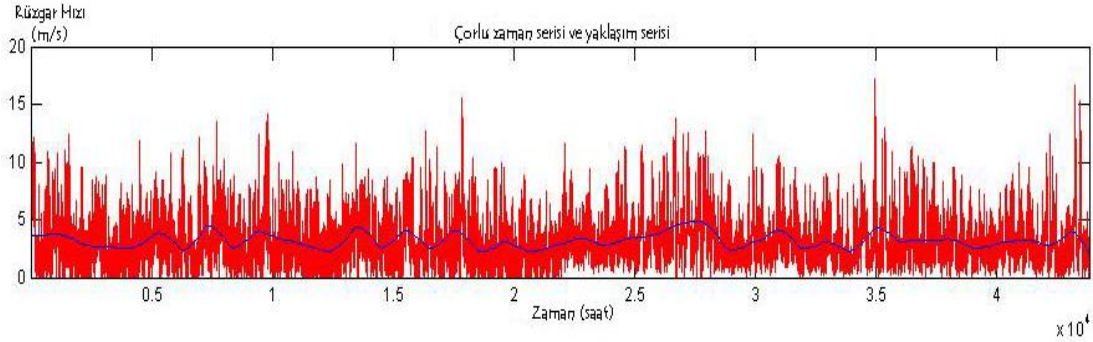
Şekil 6.28’de Çanakkale rüzgar verisine ait sentezlenmiş yaklaşım serisine bakıldığında pek düzenli olmayan çeşitli periyodiklikler vardır. Bu üç periyodikliğe ait rüzgar hızları da yaklaşık olarak eşit seyretmektedir. Yıl içinde hakim 3 periyot söz konusudur. Bunların da çoğunluğu 4 m/s hız değerinin üzerinde seyretmektedir. Akhisar ve Ayvalık için bir hakim rüzgar periyodu 4 m/s üzerinde seyretmektedir. Bu özelliği ile Çanakkale’nin rüzgar potansiyelinin Akhisar ve Ayvalık bölgelerinden daha fazla olması beklenmelidir. Halbuki GDS grafiğinden elde edilen en yüksek güç değeri Akhisar ve Ayvalık’tan düşük seyreden bir istasyon Çanakkale, yaklaşım serisine bakıldığında bu iki istasyondan daha yüksek rüzgar potansiyeline

sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle GDS grafiği yorumlanırken hem en yüksek güç değerlerine hem de periyodikliklerin sayısına dikkat edilmelidir.

Çorlu rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



Şekil 6.30 : Çorlu 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.

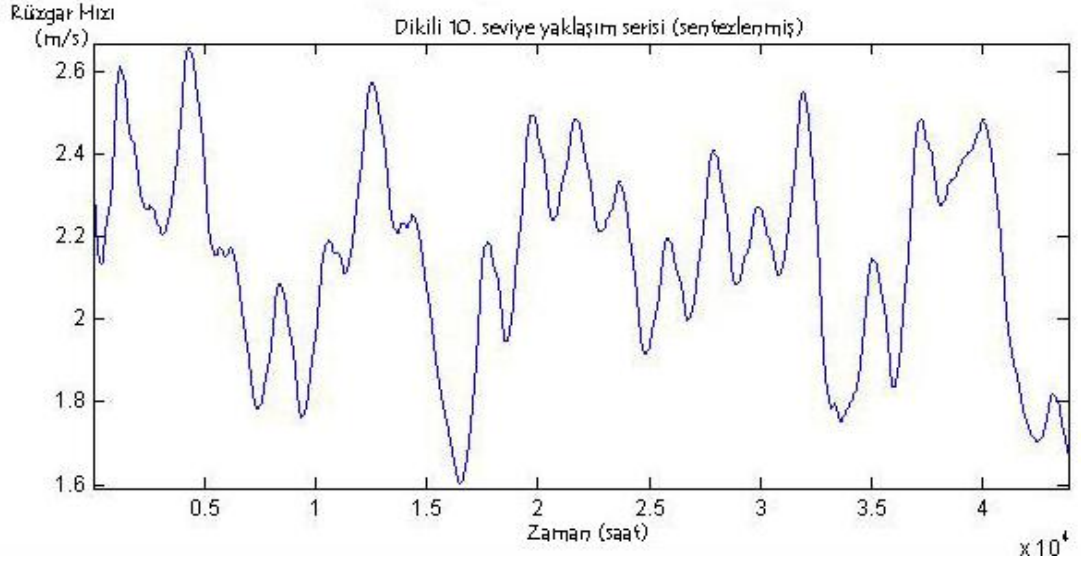


Şekil 6.31 : Çorlu'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

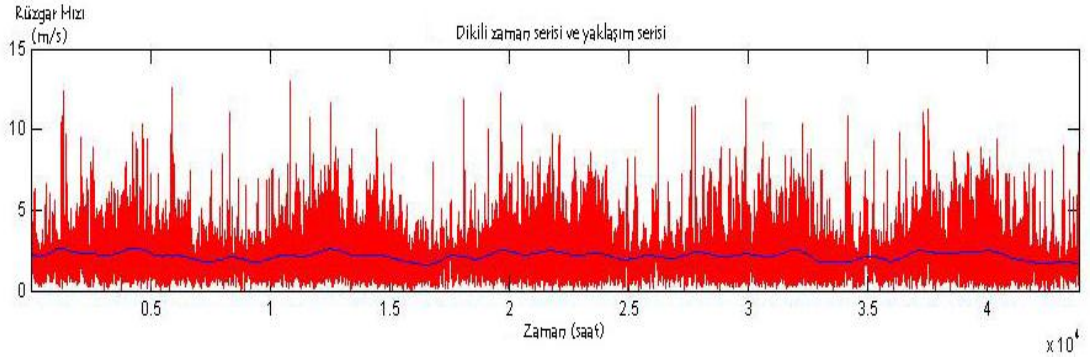
Şekil 6.30'daki Çorlu'ya ait yaklaşım serisi incelendiğinde net olarak yıllar içinde düzenli gelişmekte olan bir rüzgar periyodunun varlığı görülememektedir. Bu özelliği ile Çanakkale'ye benzerlik göstermektedir. İlk 2 yıl birbirlerine yakın olan 4 m/s hız civarlarında olan üçer adet periyodiklik görülmektedir. 3. yıl ise 1 hakim periyoda 2 küçük periyot eşlik ederken, 4. yıl çok güçlü 4,5 m/s nin üzerinde bir periyodikliğe sahip rüzgar göze çarpmaktadır. 5. yıl ise yine ilginç bir şekilde farklı rüzgar karakteri gösteriyor. Çorlu'ya ait bu yaklaşım serisinden çıkartılabilecek olan durum net bir şekilde yıldan yıla kendisini benzer şekilde tekrar etmekte olan rüzgar karakteri yerine değişkenliklere sahip bir rüzgar karakterinin varlığıdır. Bu duruma bakarak Çorlu için farklı hakim rüzgarlara sahip olduğu, bazı yıllar birinin diğerine

daha baskın olduğu durumların yaşandığı görülmektedir. Yaklaşımına ait bu seriden rüzgar potansiyeli hakkında bir şeyler söylemek gerekirse, Akhisar ve Ayvalık'tan fazla olduğu, fakat Çanakkale ile arasındaki durum hakkında net şeyler söylemeye elverişli bilgi olmadığı söylenebilir. Bu noktadaki belirsizlikten uygulamanın son adımı olan sayısal analiz kurtulma imkanı olacaktır.

Dikili rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



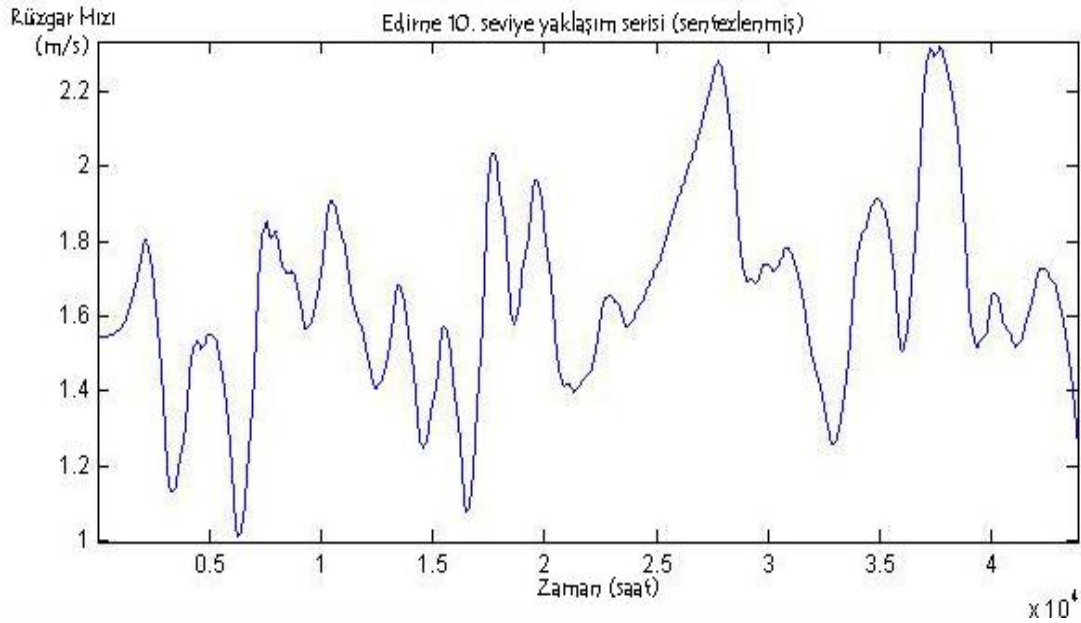
Şekil 6.32 : Dikili 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.



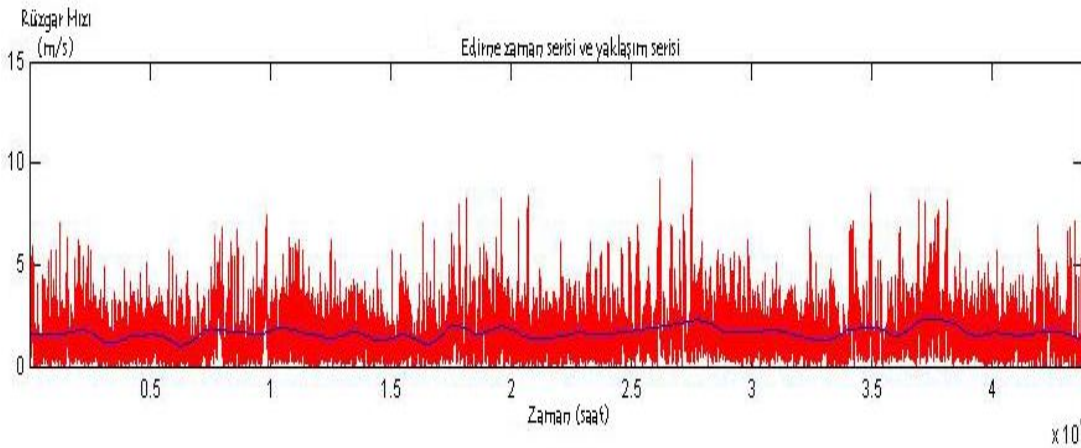
Şekil 6.33 : Dikili'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Dikili yaklaşım serisi incelendiğinde hakim bir rüzgar karakteristiği dikkati çekmektedir. Kış aylarında düşük seyreden diğer aylarda ise hemen hemen aynı hız değerlerine sahip periyodik salınımlar gösteren bir bölge olduğu söylenebilir. Genel olarak periyodikliklerinin seyrettiği hız değerleri 2,5 m/s'dir ki şimdiye kadar olan bütün istasyonlar içinde en düşük potansiye sahip bölge olduğu söylenebilir.

Edirne rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



Şekil 6.34 : Edirne 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.

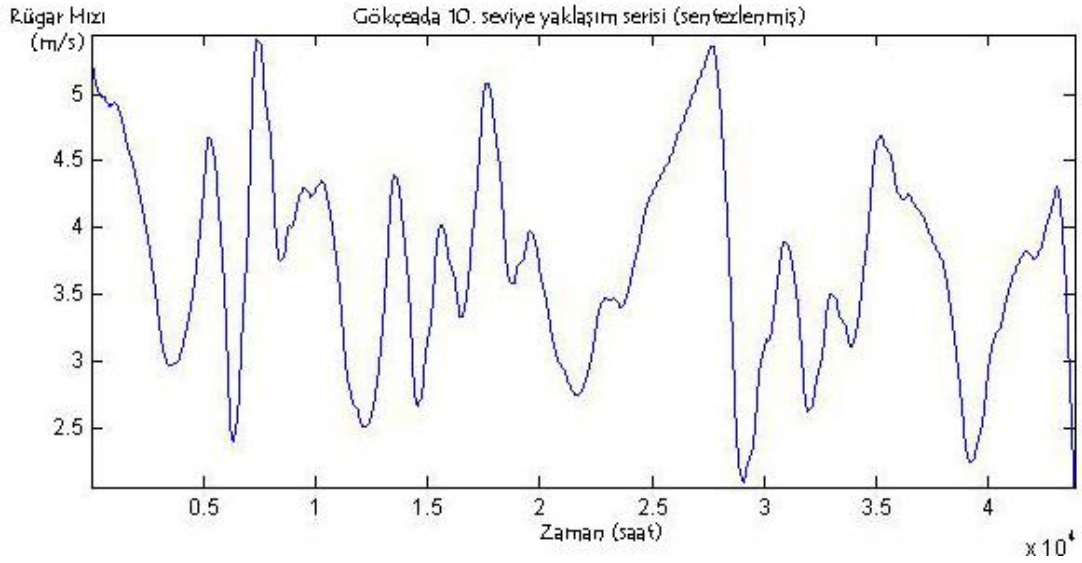


Şekil 6.35 : Edirne'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

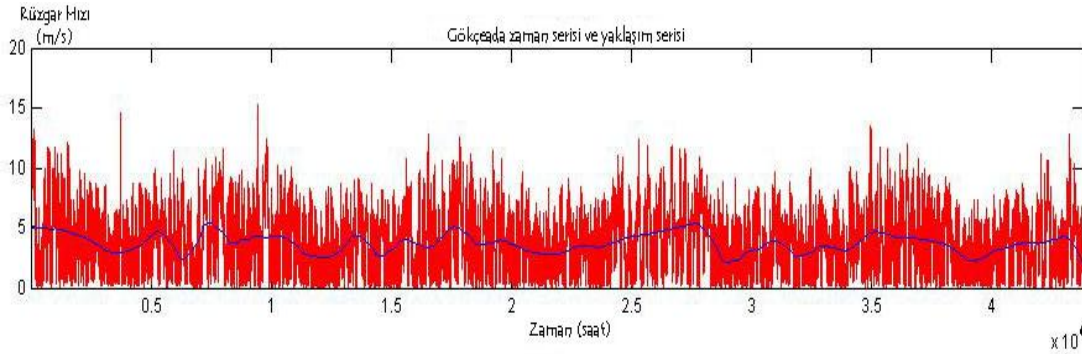
Şekil 6.34'deki Edirne'ye ait yaklaşım grafiği incelendiğinde, Çorlu'ya benzer şekilde net bir karakter ortaya koymadığı görülür. Çorlu ile Edirne'nin benzer bir karakter ortaya koyması bulundukları bölgenin birbirine yakın olması ile açıklanabilir. Fakat yıl içinde bazı yıllar 3, bazı yıllar 4 periyodiklik söz konusu olmaktadır. Periyodiklikler genel olarak 1,8 m/s ile 2,2 m/s arasında değişmektedir. Bu durumu itibari ile potansiyelinin Dikili bölgesinin bile gerisinde olduğu söylenebilir.

Gökçeada rüzgar verilerinin analiz sonuçları:

Şekil 6.36'da verilen Gökçeada yaklaşım serisi incelendiğinde, 5 yıl içinde birçok periyodiklik söz konusudur. Fakat baskın bir periyot karakteri görülmemektedir. Bu durum bölgenin ada olması ile açıklanabilir. Ada olması nedeniyle birçok farklı hakim rüzgarın etkisinde kalmaktadır. Periyodikliklerin 4 m/s ile 5 m/s ve üzerinde seyretmesi itibari ile şimdiye kadar olan en güçlü rüzgar potansiyeline sahip yer olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.36 : Gökçeada 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.

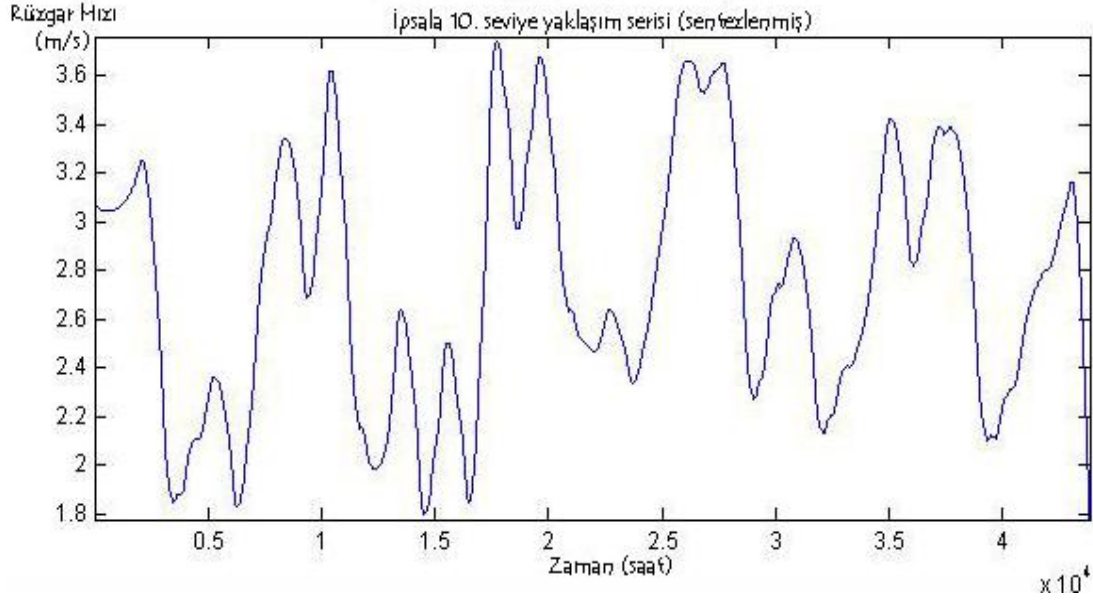


Şekil 6.37 : Gökçeada'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

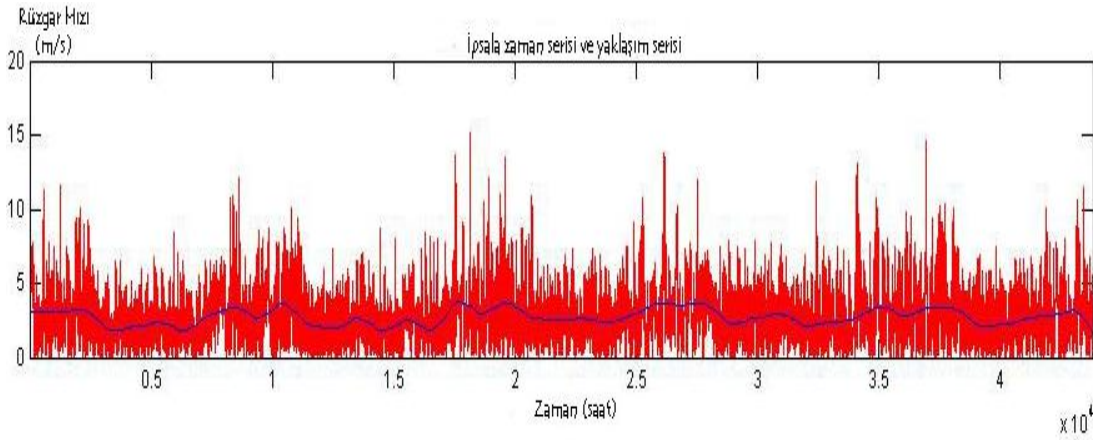
İpsala rüzgar verilerinin analiz sonuçları:

Şekil 6.38'deki Ipsala'ya ait yaklaşım serisi incelendiğinde iki tepeli bir periyodiklik ve bunu takip eden küçük periyodiklikler mevcuttur. Bu iki tepeli yapı birbirini takip eden rüzgar periyodikliklerini göstermektedir. Genel de hakim periyodiklikler 3,5 m/s olarak gerçekleşmektedir. Bu durumu itibari ile rüzgar potansiyelinin Dikili ve Edirne'den fazla, Çanakkale, Gökçeada ve Çorlu'dan az, Akhisar ve Ayvalık ile

kıyaslandığında iki tepeli periyodikli yapısı ile Akhisar ve Ayvalık bölgeleri ile durumuna sayısal sonuçlar elde edilecek olan son bölümde değerlendirme yapmak daha doğru olacaktır.



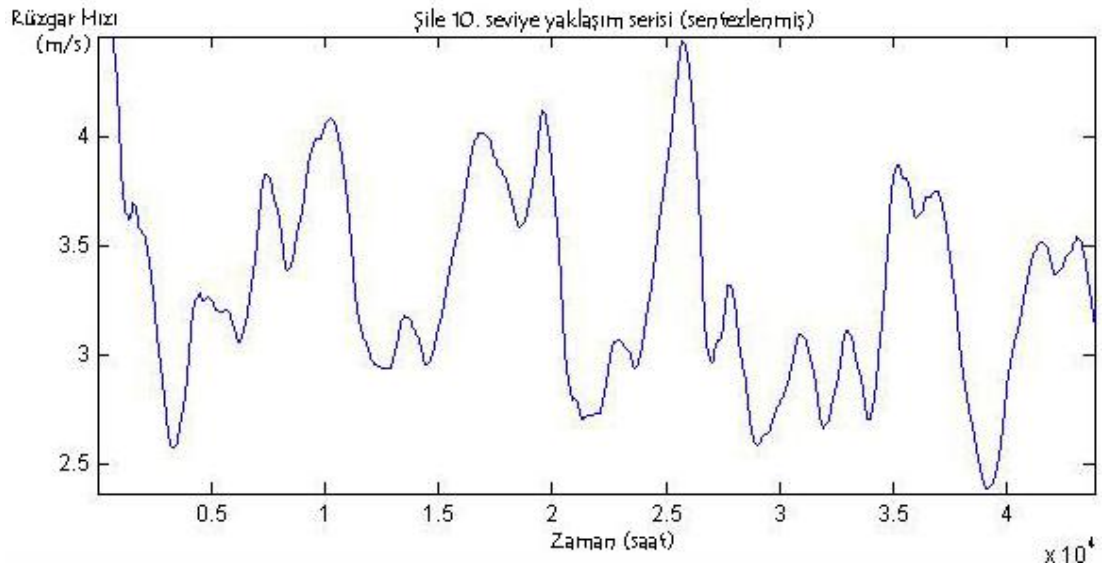
Şekil 6.38 : İpsala 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.



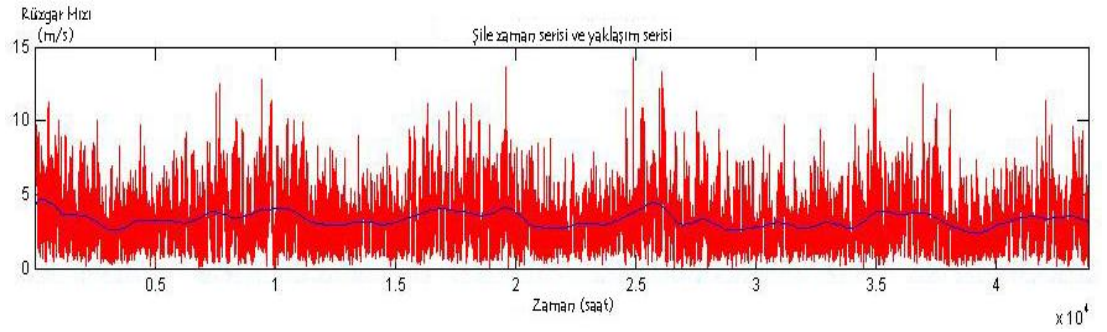
Şekil 6.39 : İpsala'ya ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Şile rüzgar verilerinin analiz sonuçları:

Şekil 6.41'deki Şile rüzgarına ait yaklaşım serisi incelendiğinde 3,5 m/s ve 4,5 m/s arasında değişen hakim ikili periyot yapısı görülmektedir. Bu ikili yapı bazı yıllar tekli hale dönüşmektedir. Bu yapısı ile Gökçeada'nın ve Çanakkale'nin gerisinde olduğu, Edirne, Dikili ve belki İpsala'nın da önünde olmakla beraber diğerleri ile ilgili potansiyeli kıyaslayabilmek için yine sayısal uygulamaya bakmakta fayda vardır.

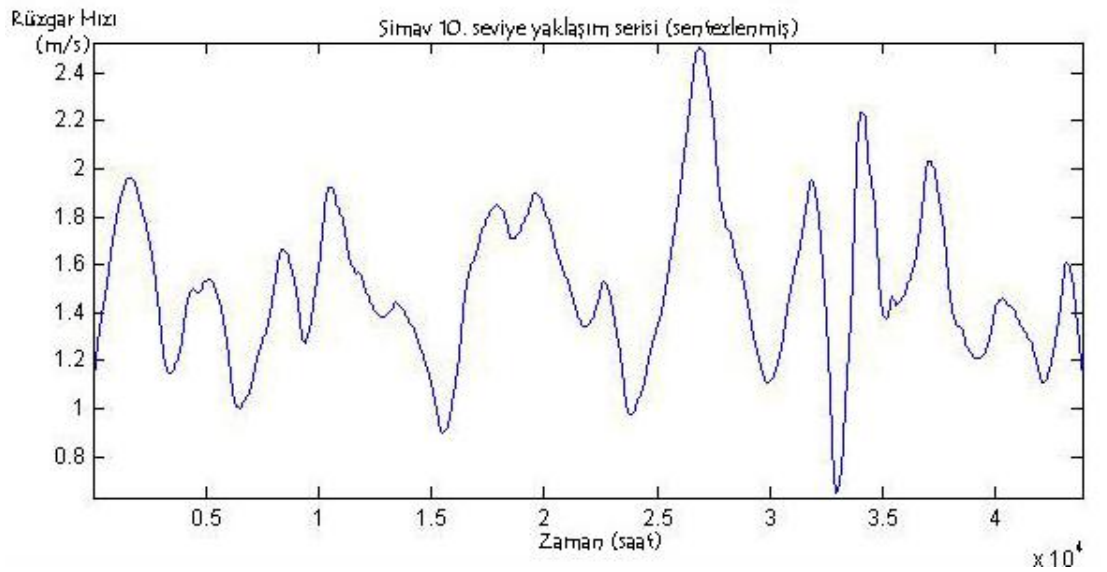


Şekil 6.40 : Şile 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.

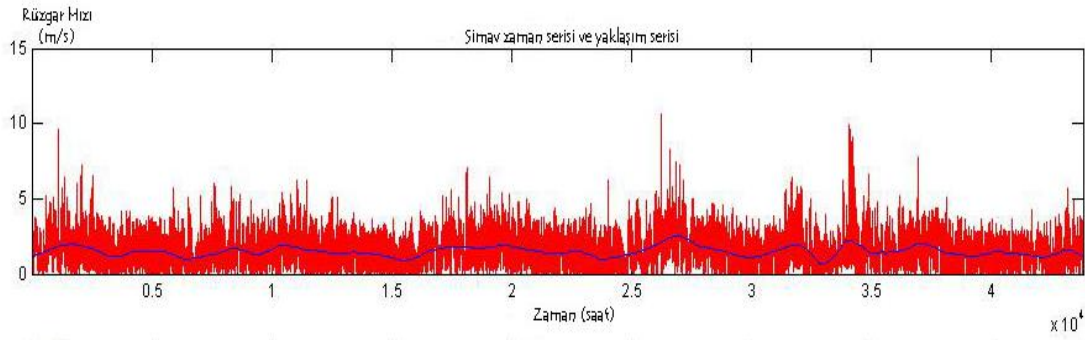


Şekil 6.41 : Şile'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Simav rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



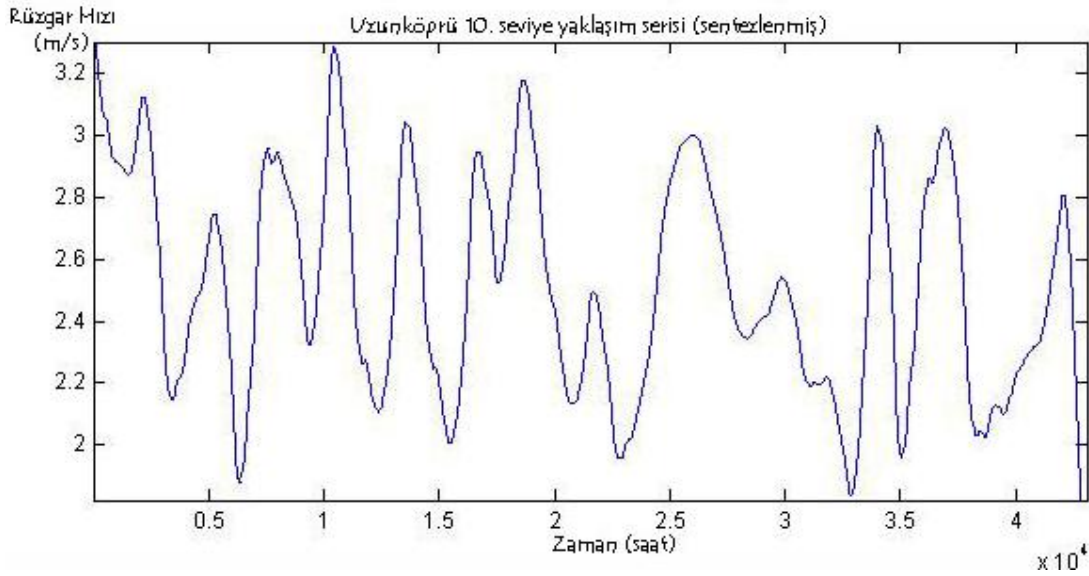
Şekil 6.42 : Simav 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.



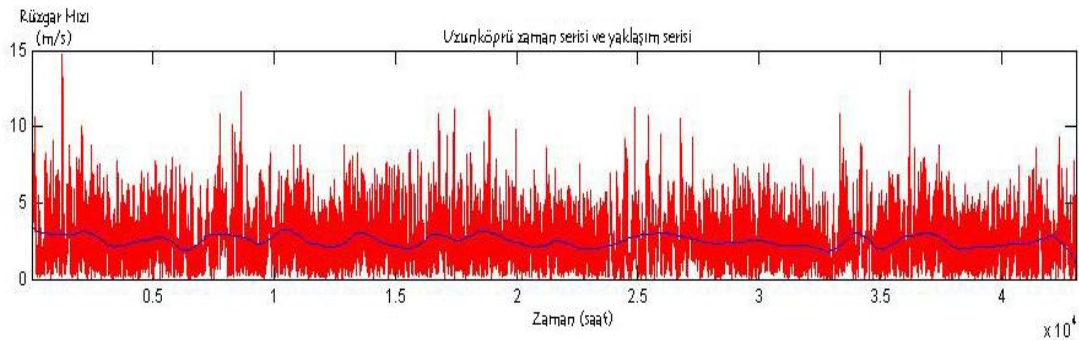
Şekil 6.43 : Simav'a ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Şekil 6.42'deki Simav rüzgar verisine ait yaklaşım serisi incelendiğinde yıl içinde 2 veya 3 periyodikliğin bulunduğu ve bu periyodikliklerin ortalama 1,6 ile 2,2 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Bu durumu itibari ile tahminen en düşük rüzgar gücüne sahip bölge olmaya Edirne ile birlikte adaydır.

Uzunköprü rüzgar verilerinin analiz sonuçları:

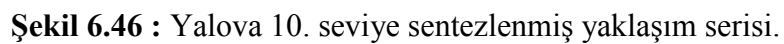


Şekil 6.44 : Uzunköprü 10. seviye sentezlenmiş yaklaşım serisi.



Şekil 6.45 : Uzunköprü'ye ait zaman serisi ve yaklaşım serisi.

Yalova rüzgar verilerinin analiz sonuçları:



121

Çanakkale'nin bile önünde iken, yaklaşım serisine bakıldığında çok daha sağlıklı bir potansiyel değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa çok büyük veri yığınının sahip bir zaman serisinin asıl karakterini anlayabilmek için bu verilerin hepsine bakabilmek kolay değildir. Bu noktada ADD'nin, ÇÇA ile rüzgara ait zaman serilerini, aslını temsil eden yapıtaşları olan sentezlenmiş yaklaşım serileri biçiminde temsil etmek değerlendirmelerin çok daha sağlıklı yapılmasını sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında ayrıştırma seviyesi 10 olarak belirlenmiş ve 43 000 üzerinde veriye sahip zaman serileri ayrıştırmaya uğramışlar ve 10. seviye yaklaşım bileşeni 49 dalgacık katsayısına sahip olmuştur. Bu seviyedeki yaklaşım bileşeni sentezlenerek orijinal zaman serisinin genel trendini gösteren 10. seviye yaklaşım serileri oluşturulmuş ve değerlendirmeler bu grafikler üzerinden yapılmıştır. Sentezlenmiş yaklaşım serileri, rüzgarın genel trendini yansıtan hız değerlerini vermesi bakımından çok önemlidir. Ayrıca, Akhisar ve Ayvalık için verilen yaklaşım ve detay ait bileşenlerine ait zaman serileri ile 10 seviye ayrıştırma yapılmasının nedeni gösterilmeye çalışılmıştır. Verilen yaklaşım serisi ile orijinal zaman serisinin kıyaslandığı grafiklerde yaklaşım serimizin orijinal serimizi ne kadar iyi temsil ettiğini anlamamızı sağlaması bakımından önemlidir.

6.2.2.4 Ayrıştırılmış detay ve yaklaşım bileşenlerindeki enerji değerleri

Bu bölümde Çoklu Çözünürlük Analizi ile 10 seviye ayrıştırdığımız 12 istasyona ait saatlik ortalama rüzgar hızı verilerinin, bu ayrıştırma işlemi sonucu ortaya çıkan 1 yaklaşım (A10) bileşenindeki ve 1. seviyeden 10. seviyeye kadar 10 detay (D1, D2, ..., D10) bileşenindeki dalgacık katsayılarından yararlanarak ayrıştırmanın farklı seviyelerindeki enerjileri hesaplamakla rüzgara ait zaman serilerinin farklı parçalarının yoğunluklarını kıyaslayabilmek ve daha önemlisi elde ettiğimiz enerjiler ile rüzgar potansiyeli kıyaslamasını sayısal analiz temelinde yapabilmektir.

Bu farklı ayrıştırılmış seviyelerdeki enerjiler daha önce de belirtildiği üzere Parseval Teoremine dayanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar öncesinde Parseval Teoremini kısaca hatırlamak gerekirse ADD sonucu ortaya çıkan yaklaşım ve detay katsayıları yardımıyla farklı çözünürlük seviyelerinin enerjilerinin belirlenmesi prensibine dayanmaktadır. Yaklaşım bileşeni katsayılarından (6.5) denklemi ile, detay

bileşenlerindeki katsayılardan ise (6.6) denklemi ile bulundukları seviyelerin enerjileri hesaplanmıştır.

$$EA_k = \sum_{j=1}^N |A_{kj}|^2 \quad (6.5)$$

$$ED_i = \sum_{j=1}^N |D_{ij}|^2 \quad (6.6)$$

Bu denklemlerde $i = 1, 2, 3 \dots \dots k$ olmak üzere, ayrıştırılmış dalgacık seviyelerini 1 den k değerine kadar temsil etmektedir. Bu seviyeleri 1'den k 'ya kadar olan kısmı detay katsayılarına ait seviyeleri gösterirken, yaklaşım sadece son seviye olan k seviyesinde bulunur. N değeri her seviyede detay veya yaklaşıma ait olan katsayıların sayısını göstermektedir.

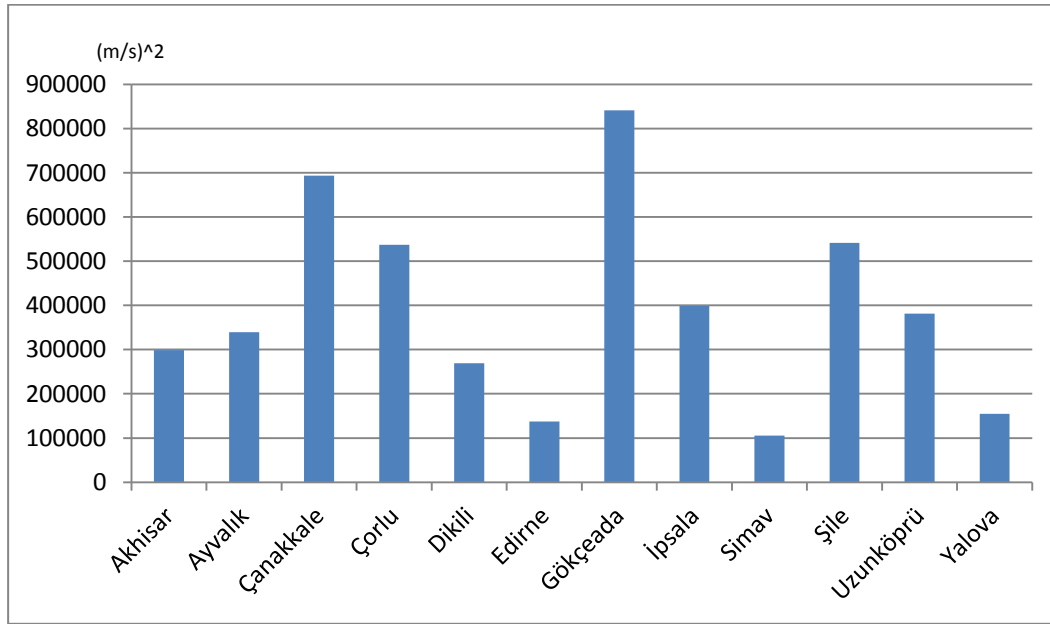
Çizelge 6.5 : Parseval Teoremi ile hesaplanan farklı seviyelere ait enerji değerleri.

	Akhisar (m/s) ²	Ayvalık (m/s) ²	Çanakkale (m/s) ²	Çorlu (m/s) ²	Dikili (m/s) ²	Edirne (m/s) ²
ED1	4164,57	4339,7	5245,2	3980,8	4983,6	2311,9
ED2	5870,36	6265,7	8336	6541,3	8236,9	3477,2
ED3	10722,	12008	19699,1	12430,5	11268,3	5707,2
ED4	40504,9	27923,1	43970,7	33808,3	36701,4	13406,6
ED5	17088,3	14796,6	29963,9	23982,8	9322,7	6241,4
ED6	27230,9	22943,5	45807,3	33792,7	6383,3	7895,3
ED7	31693,3	27887,3	46186,2	40691,5	3783,7	7812,1
ED8	27263	22415,2	29504,4	29539,5	3337,4	5761,9
ED9	15889,8	14233,2	17743,4	21720,2	1851,9	3371,7
ED10	11140,8	9118,7	12005,7	12697,6	1213,8	2322,9
EA10	298968,5	339578,4	693651,5	537100,3	269473,7	137586
Toplam	490536,5	501509,4	952113,22	756285,7	356556,8	195894

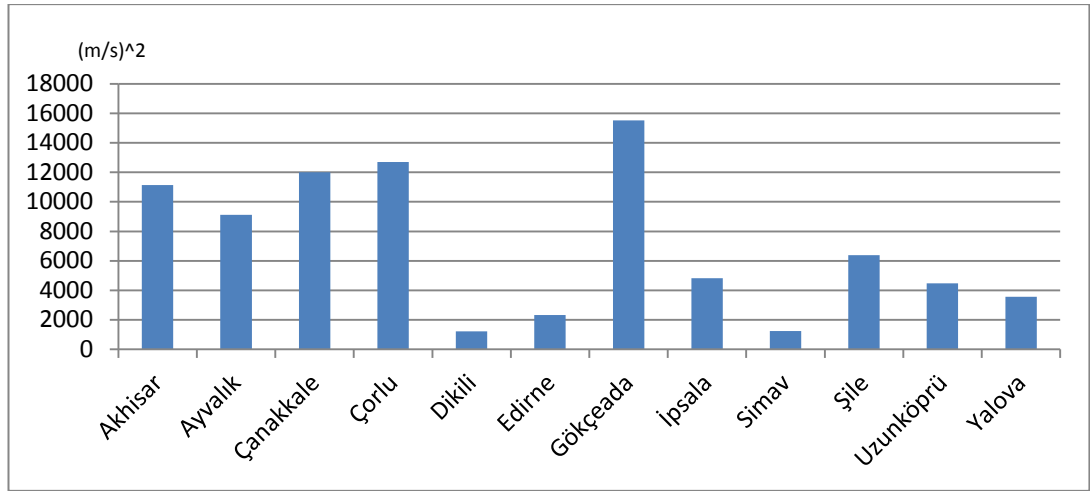
	Gökçeada (m/s) ²	İpsala (m/s) ²	Simav (m/s) ²	Şile (m/s) ²	Uzunköprü (m/s) ²	Yalova (m/s) ²
ED1	4269,3	3611,6	2767,4	5096,3	3689,6	3878,4
ED2	6831,4	5720,1	3499,4	7700,9	5593,2	5029,7
ED3	16505,6	11539,4	5264,7	11295,6	11058,5	8690,8
ED4	29435,1	31850,7	11785,7	21198,1	24444,4	19331,3
ED5	28474,6	16078,3	5133,9	18803,3	14119,1	9101,9
ED6	48962,3	20449,4	5578,1	20905,4	16772,9	11070,3
ED7	56651,6	21063,5	4777,4	19094,4	16946,2	8285,5
ED8	38709,7	14744,1	3380,9	14329,9	11536,9	7832,1
ED9	29523,1	8571,5	1752,7	8544,3	7360,1	5085,6
ED10	15519,5	4821,9	1231,9	6388,9	4470,5	3570,9
EA10	841340,8	398531	105665,3	541371,5	381469,9	155046,5
Toplam	1116222,9	536981,4	150837,4	674728,6	497461,2	236923

Bu yaklaşım 12 istasyona ait saatlik ortalama rüzgar hız verilerine uygulanmış ve her bir istasyon için 10 detay ve 1 yaklaşım bileşenine ait olan dalgacık katsayılarından farklı sevilere ait detay ED_i ($i = 1, \dots, 10$) ve yaklaşım EA_k ($k = 10$) seviyelerine ait enerjiler hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın sonucunda ortaya çıkan enerji değerleri Çizelge 6.5’de verilmiştir.

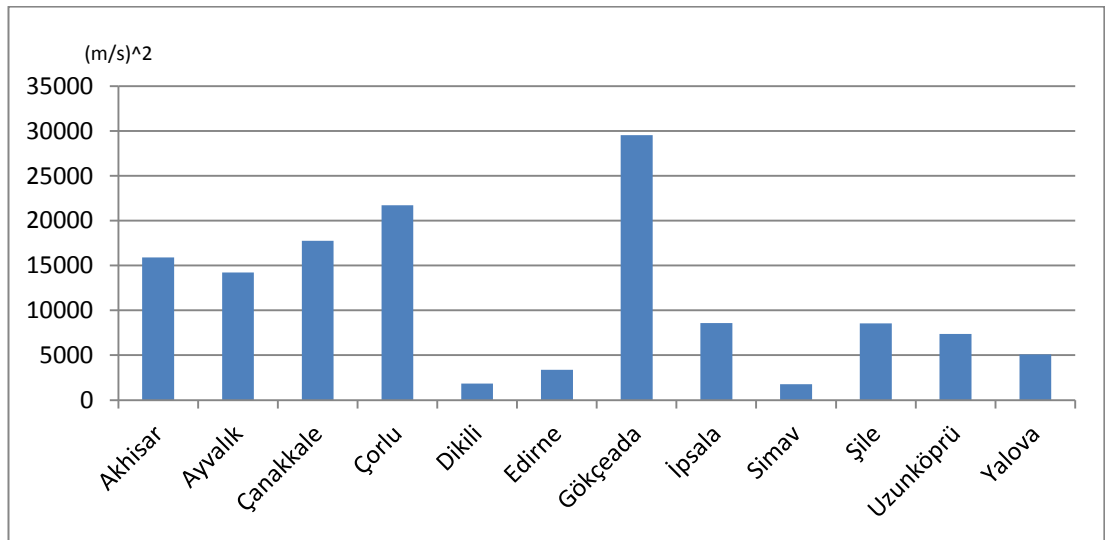
Farklı ayrışım seviyelerindeki enerjilerin hesaplanması ile farklı istasyonlara ait rüzgar verilerinin enerji potansiyellerinin kıyaslanması mümkün hale gelmiştir. 12 istasyona ait rüzgar verilerinin bu hesaplama sonucu çıkan enerji düzeylerinin kıyaslamaları Şekil 6.48’den Şekil 6.58’e kadar görülmektedir. Bu hesaplamalar sonucu ortaya çıkan D1, D2, D3 ve D4 bileşenlerine ait ED1, ED2, ED3 ve ED4 incelendiğinde toplam rüzgar enerji potansiyellerinin sıralandığı Şekil 6.59 ile benzemediği görülmektedir. Bu bileşenlerdeki enerjilerin rüzgarın genel karakteristiğinden kaynaklanmadığı, lokal etkiler veya geçici durumları yansıttığı söylenebilir. Bu bileşenler gürültü olarak da kabul edilebilir. Bu nedenle rüzgar enerji potansiyellerine göre istasyonlar sıralanırken bu dört seviyenin enerjilerinin hesaplama dahil edilmediği Şekil 6.60 grafiği dikkate alınmıştır.



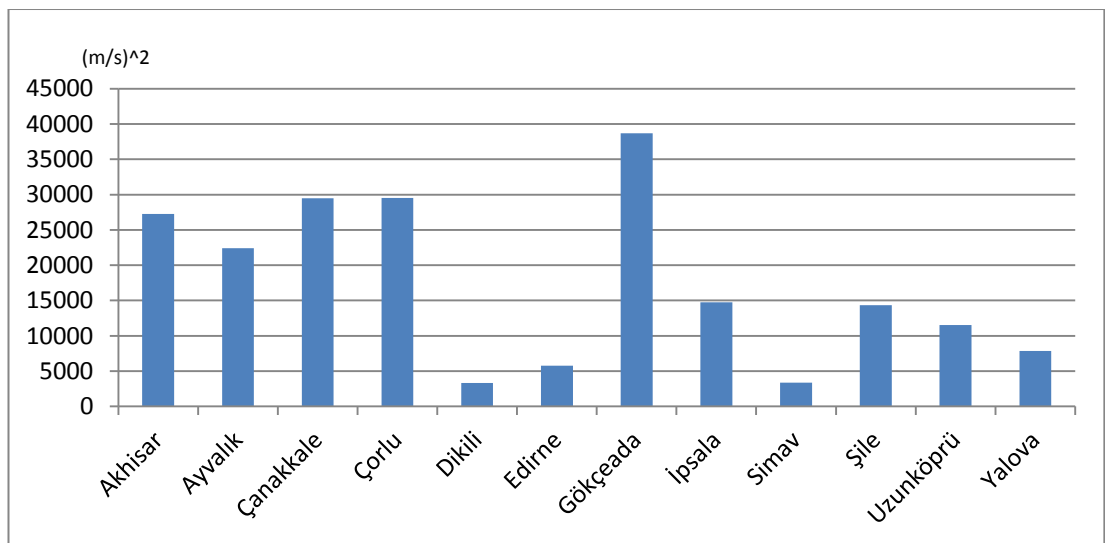
Şekil 6.48 : A10 yaklaşım bileşenine ait enerji değerleri.



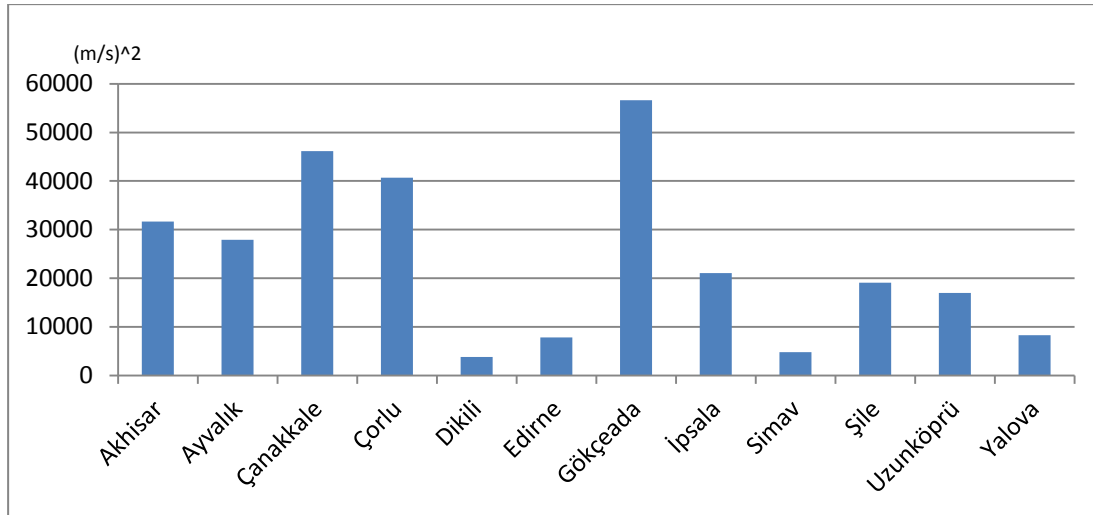
Şekil 6.49 : D10 detay bileşenine ait enerji değerleri.



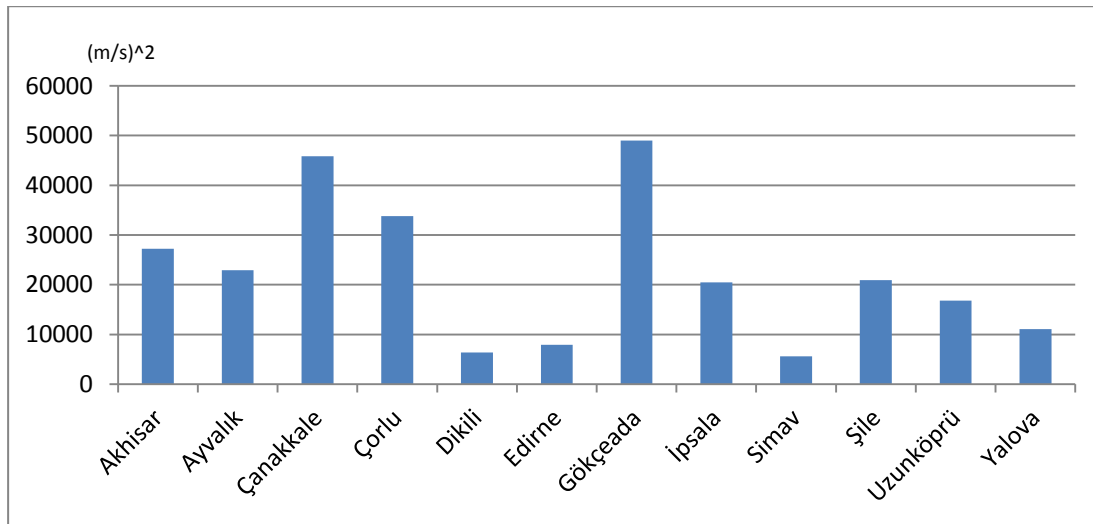
Şekil 6.50 : D9 detay bileşenine ait enerji değerleri.



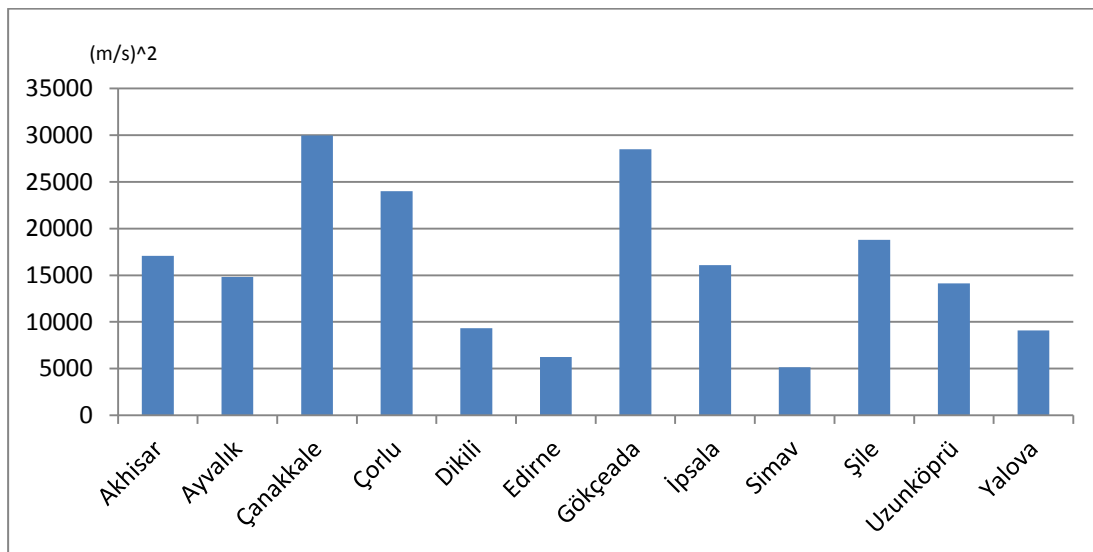
Şekil 6.51 : D8 detay bileşenine ait enerji değerleri.



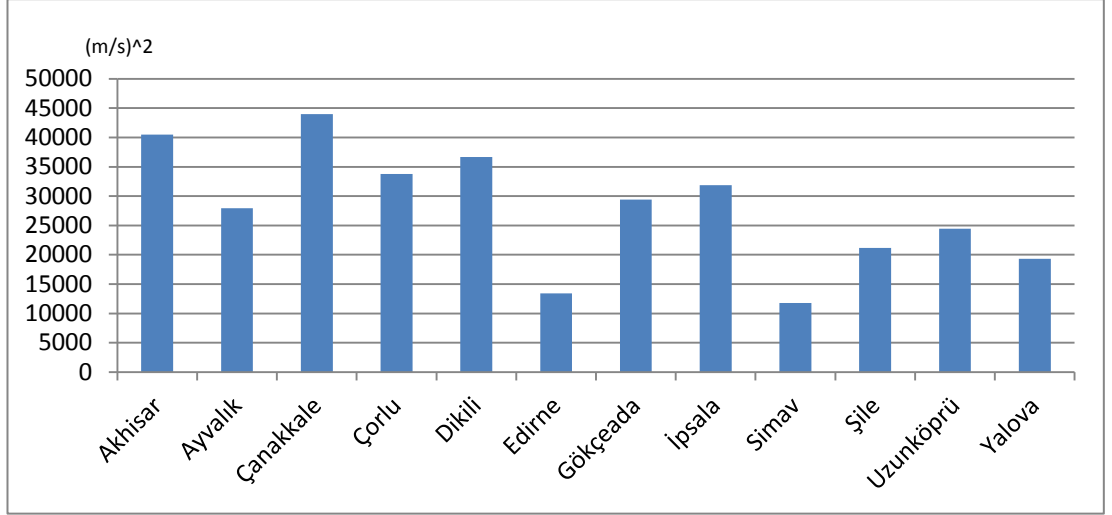
Şekil 6.52 : D7 detay bileşenine ait enerji değerleri.



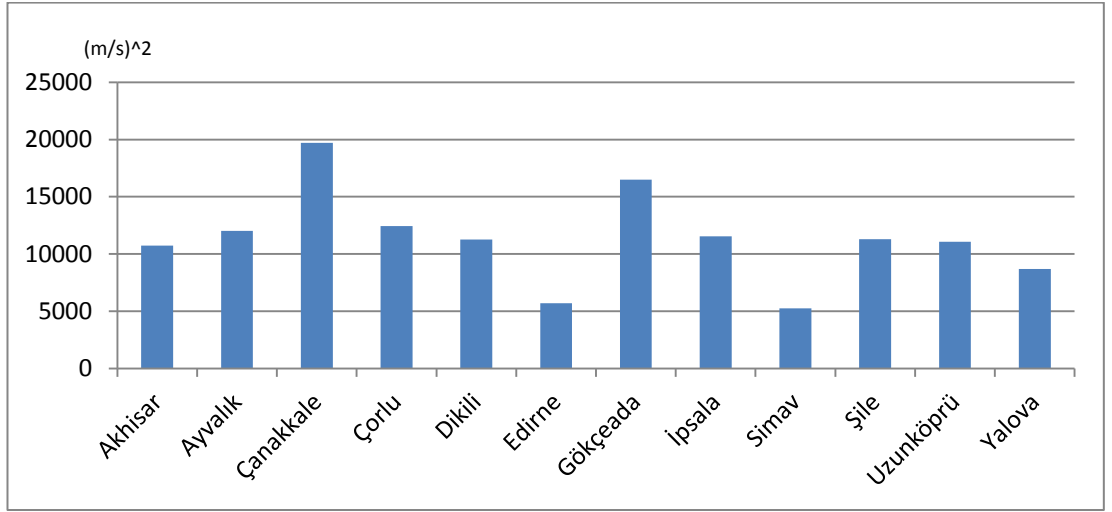
Şekil 6.53 : D6 detay bileşenine ait enerji değerleri.



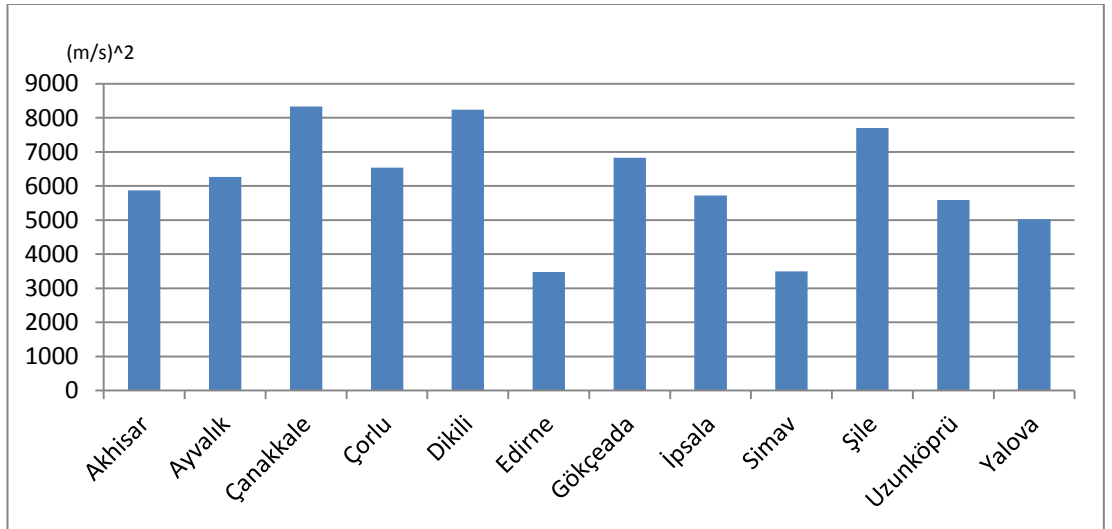
Şekil 6.54 : D5 detay bileşenine ait enerji değerleri.



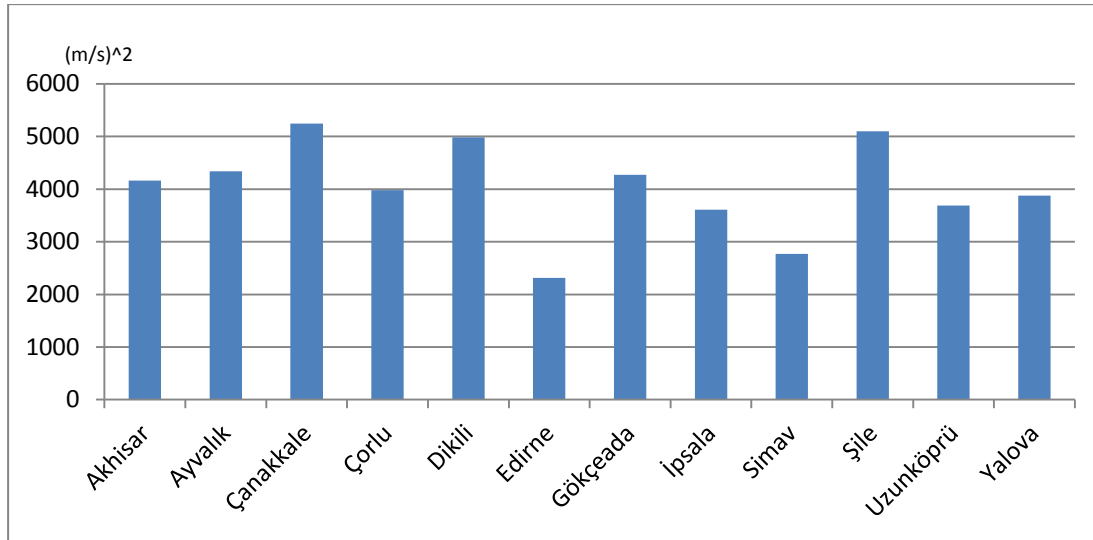
Şekil 6.55 : D4 detay bileşenine ait enerji değerleri.



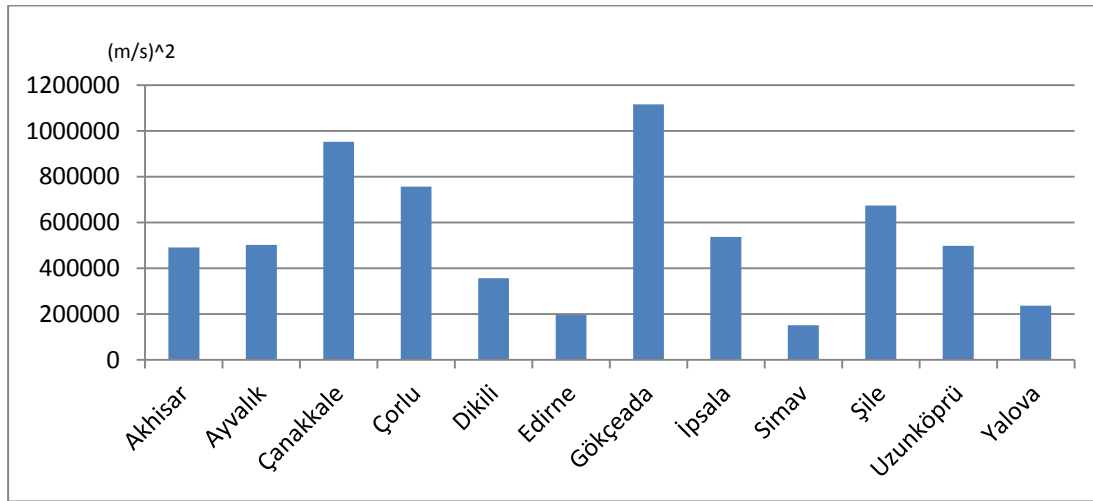
Şekil 6.56 : D3 detay bileşenine ait enerji değerleri.



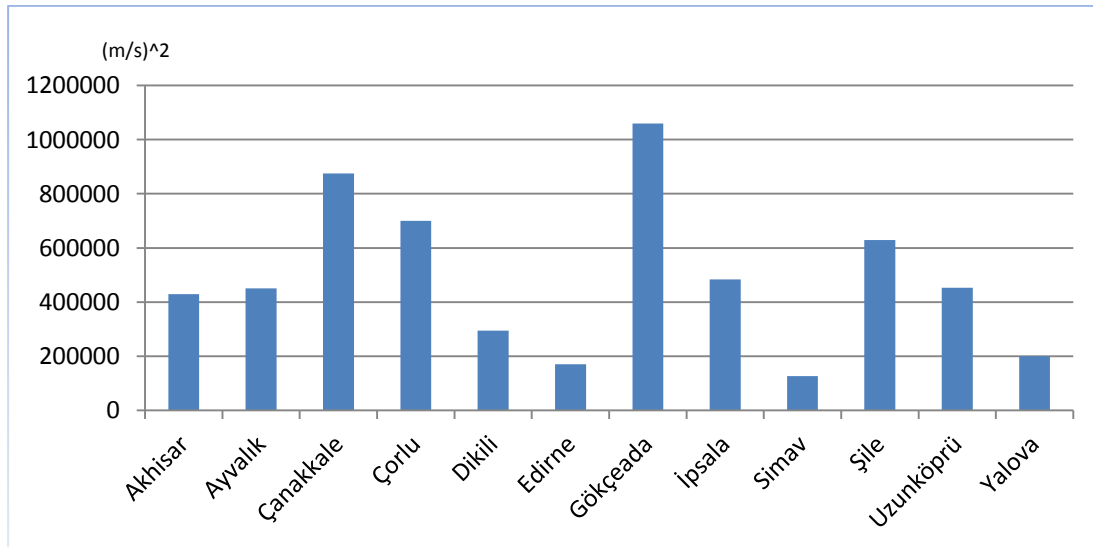
Şekil 6.57 : D2 detay bileşenine ait enerji değerleri.



Şekil 6.58 : D1 detay bileşenine ait enerji değerleri.



Şekil 6.59 : Tüm bileşenlerdeki enerjilerin toplam değerleri.



Şekil 6.60 : İlk 4 detay bileşenin atılması ile oluşan enerji toplamaları.

Şekil 6.60’da ED1, ED2, ED3, ED4 bileşenleri dahil edilmeden yapılan sıralama da tüm seviyelerdeki toplam enerjilerin sıralandığı grafikteki sıralamanın bir benzeridir. Bu sonuç bu dört bileşendeki enerji değerlerinin, rüzgarın genel karakteristiği yansıtmadığını göstermesi bakımından önemlidir. Aynı zamanda 10. seviye yaklaşım bileşenine ait enerjilerin sıralaması da Şekil 6.59 ve 6.60’daki sıralamaların bir benzerini vermektedir. Bu da bir önceki bölümde ayrıştırmanın ardından 10. seviye yaklaşım serisinin sentezlenerek rüzgar istasyonları hakkında yapılan yorumların ne kadar doğru olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

İstasyonlar rüzgar enerjisi potansiyelleri bakımından sıralandığında, Gökçeada’nın en yüksek potansiyele sahip olduğu ardından Çanakkale’nin önemli bir potansiyel değeri ile onu takip ettiğini görülmektedir. Gökçeada ve Çanakkale, rüzgar enerji santrali kurulumu için sadece rüzgar enerjisi potansiyeli baz alındığında tercih edilmesi gereken ilk iki bölgedir. Gökçeada ve Çanakkale’nin ardından önemli potansiyel değerlerine sahip olan Çorlu ve Şile bölgeleri gelmektedir. Bu iki bölgede önemli potansiyeller sunduklarından Gökçeada ve Çanakkale’nin ardından rüzgar enerji santrali kurulumu için tercih edilecek yerler olmalıdırlar. Bahsedilen 4 istasyona ait potansiyellerin ardından Akhisar, Ayvalık, İpsala ve Uzunköprü çok yakın değerler ile önemli rüzgar potansiyellerine sahiptirler. Bu 4 bölgede rüzgar santrali kurulumu için tercih edilebilir. En düşük potansiyele sahip 4 istasyon ise en düşükten başlayarak sırasıyla Simav, Edirne, Yalova ve Dikili’dir. Bu bölgeler rüzgar enerji santrali kurulumu için uygun değildir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, Dalgacık Analizi rüzgar verilerinin oluşturduğu zaman serilerine uygulanarak rüzgar verisine ait genel karakteristiklerin ortaya konması ve rüzgar türbin kurulumları için uygun yer seçimi yapabilmek amacıyla rüzgar potansiyelleri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan 12 meteoroloji istasyonuna ait 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verileri kullanılmıştır.

Çalışmada öncelikle Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile rüzgar verilerinin spektral analizinin gerçekleştirilmesi ve MATLAB kodları kullanılarak Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu grafikleri elde edilmiştir. Bu iki grafik Dalgacık Analizi ile gerçekleştirilen spektral analizin en önemli sonuçlarıdır. Bu grafikler zaman serileri hakkında iki temel bilgi vermeleri nedeniyle çok önemlidir. İlki zaman serisi içinde görülen periyodiklikleri ve bu periyodikliklerin zaman içinde ne zaman görüldükleri bilgisini vermesidir. Bu bilgi sayesinde zaman serisi içindeki frekans bilgisi elde edilmiş olmaktadır. Dalgacık analizinin, klasik spektral analiz yöntemlerine göre en büyük üstünlüğü, aynı zamanda bu frekansa ait zaman bilgisini veriyor olmasıdır. Bu çalışmada da 12 istasyona ait 5 yıllık saatlik ortalama rüzgar hızı verilerinin oluşturduğu zaman serileri içindeki hakim periyotlar ortaya konmuştur. Bu sayede rüzgar verisinin yıllar içinde belli periyodikliklere sahip olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Ayrıca bu periyodikliklerin yılın hangi dönemlerinde gerçekleştiği de öğrenilebilmektedir. Bu bilgiler sayesinde belirli bir istasyona ait rüzgar verisinin genel karakteristiği hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir. Bu grafiklerin ikinci verdiği bilgi ise zaman serileri içinde görülen periyodikliklerin sahip oldukları ortalama güç bilgisidir. Bu güç bilgisi sayesinde rüzgara ait zaman serilerinin sahip oldukları enerji potansiyeli hakkında kabaca bir fikir elde edilebilir. Çünkü periyodikliklerin sahip oldukları ortalama güç ile oluşan grafiklerde, o ortalamanın temsil ettiği olayı temsilinin ne kadar doğru olduğu problemleri söz konusudur. Bunun üstesinden uzun zaman süreçlerine yayılmış rüzgar verileri ile

çalışmakla gelinmesi mümkün olabilir. Ancak bu çalışma için elde edilmiş olunan güç bilgisini rüzgar potansiyelleri hakkında net bir sınıflandırmada bulunulmasına yetecek bilgi olarak kabul etmek doğru olmayabilir. Bu nedenle bu bilginin aynı zamanda sayısal sonuçlar veren bir yöntemle desteklenmesinde fayda vardır. Bu çalışmada sayısal sonuçlar Ayırık Dalgacık Dönüşümü ile gerçekleştirilen Çoklu Çözünürlük Analizi ile elde edilmiştir.

Her yöntemde olduğu gibi Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile gerçekleştirilen spektral analizinde de sorunlu kısımlar bulunmaktadır. Bu kısımlardan da bahsetmek bu yöntemi kullanacak kişilere yol gösterici olacaktır. İlk olarak, kullanılacak olan veriler arasında kısa boşlukların olması veya verilerin eşit aralıklı olmaması durumunda enterpolasyonla ilgili kısımların doldurulması gerekir. Aksi takdirde analiz yönteminin kullandığı algoritmanın bir sonucu olarak doğru bir analiz yapılmamış olur (Abbak, 2007).

Diğer bir nokta ise yine kullanılacak veri ile ilgilidir. Dalgacık Dönüşümleri ile yapılan analizlerde kullanılan veri sayısı ikinin bir kuvvetine eşit olacak sayıda olmalıdır. Olmadığı durumlarda analiz yapılırken veriler en yakın ikinin kuvvetine kadar sıfır ile doldurulma gibi yapay bir etkiye maruz kalır. Bu nedenle bu grafikler yorumlanırken iki noktaya dikkat edilmelidir. Dalgacık Güç Spektrumu grafiklerinde bulunan etki konisine ait yay biçimindeki çizgi ve Global Dalgacık Spektrumlarında bulunan % 5 güven aralığını temsil eden kesikli çizgidir. Bu noktalar maruz kalınan yapay etkinin sonuçlarını, yorumlama yaparken azaltması nedeniyle önemlidir.

Önemli noktalardan bir diğeri ise spektral analizde ölçek değişim miktarı olması gerektiği düzeyde belirlenmelidir. Bu analiz yapan kişilerin dikkat etmesi gereken en önemli noktalardan birini oluşturmaktadır. Çok küçük olması işlem hızının yavaşlamasına neden olurken, çok büyük olması frekansın çözünürlüğünü düşürmektedir (Abbak, 2007).

Sonuç olarak, Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile spektral analiz frekansında ani değişimler gösteren zaman serilerinin analizinde sonuçların yorumlanmasını kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla, önemli durağansızlıklar içeren meteorolojik verilerin oluşturduğu zaman serilerinde bu yöntemin kullanılması önemli faydalar sağlayacaktır.

Çalışmanın ikinci aşaması Ayrık Dalgacık Dönüşümünün verilere uygulanmasıdır. Bu uygulama Çoklu Çözünürlük Analizi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kısım MATLAB programında bulunan “*wavemenu*” arayüz programı kullanılarak yapılmıştır. Uygulamanın bu kısmı da kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. İlk kısımda yapılan 10 seviye ayrıştırma sonucu rüzgar verisine ait zaman serileri 1 yaklaşım ve 10 detay bileşenine ayrılmıştır. Buradaki detay serileri incelenerek rüzgar verilerinin maruz kaldıkları lokal etkileri, geçici bazı değişkenlikleri ve gürültü bileşeni hakkında yorumlar yapılırken elde edilen yaklaşım bileşeni ile rüzgar verisinin sahip olduğu genel trend ve özünü oluşturan bilgilere ulaşılmaktadır. Çok fazla veri içeren zaman serilerinden kısa zamanda genel özelliklerine dair bilgiler elde etmek isteyen araştırmacıların başvurmaları gereken bir analiz yöntemidir. Bu ilk kısımda 10 seviye ayrıştırma sonucu yaklaşım bileşeninde bulunan 49 katsayı sentezlenerek orijinal rüzgar verisinin oluşturduğu 48 000 civarındaki veri uzunluğuna getirilmesi ile yorumlar yapılmıştır. Bu sentezlenmiş yaklaşıma ait zaman serisi bize rüzgar verilerine ait genel trendi vermesinin yanında, 1. aşamada elde edilen Dalgacık Güç Spektrumu ve Global Dalgacık Spektrumu gibi rüzgar potansiyeli hakkında kabaca fikirler söyleme yeteneği kazandırır.

Bu kısımda en önemli husus ayrıştırmanın yapılacağı seviyenin çok doğru seçilmesidir. Ne fazla düşük seçilip fazla ayrıntı bilgisi ile yorumlar karmaşılaştırılmalı, ne de seviyenin gereğinden fazla seçilmesi ile en son yaklaşım bileşenindeki kalan katsayıların azlığı ile sentezleme sonucu yaklaşım serisinin, orijinal zaman serimize bir yaklaşım olmaktan çıkıp temsiliyetini kaybetmesi ile sonuçlanmalıdır.

Çoklu Çözünürlük Analizinin 2. kısmında grafik yorumlaması bırakılıp sayısal analize geçilmiştir. Burada yapılan analiz 10 seviye yapılan ayrıştırma sonucu ortaya çıkan 10 detay ve 1 yaklaşım bileşeninde bulunan katsayıların Parseval Teoremine dayanan hesaplamalarla bulundukları seviyelerin enerjilerini vermesi ile gerçekleşir. Burada ilk 4 detay bileşeninden hesaplanan enerjilerin rüzgarın genel karakteristiğini yansıtmadığını yaklaşım seviyesindeki sıralamalardan anlarız. İlk 4 detay bileşeninde gerçekleşen sıralamalar yaklaşımları temsil etmediklerine göre rüzgar verilerinin bulundukları bölgelere ait lokal etkiler, geçici özellikler ve de gürültü etkisini yansıtıyor olabilirler. Bu nedenle 12 istasyona ait rüzgar verilerinden hangisinin daha yüksek potansiyele sahip olduğunun belirlenmesi 5. detay bileşeninden başlayıp 10.

detay bileşenine kadar olan enerji değerlerinin toplanarak yaklaşım seviyesine ait enerji değerine eklenmesi ile yapılmıştır. Bu sonuçların neticesi Gökçeada en yüksek enerji potansiyeline sahip olurken, Çanakkale güçlü bir rüzgar potansiyeli ile Gökçeada'yı takip etmiştir. Bu iki istasyon Çorlu ve Şile tarafından sırasıyla birbirlerine yakın rüzgar potansiyeli değerleri ile takip edilmektedir. Bu 4 istasyonu Akhisar, Ayvalık, İpsala ve Uzunköprü birbirlerine çok yakın enerji potansiyeli değerleri ile takip etmektedirler. En son 4 sırada ise Simav, Edirne, Yalova ve Edirne gelmektedir. Bu son 4 sıradaki istasyon bölgeleri rüzgar türbini kurulumları için uygun bölgeler değildir.

Sonuç olarak, rüzgarın karakteristiğini anlamada ve rüzgar potansiyellerinin kıyaslanması konusunda Dalgacık Dönüşümü tekniği istatistiksel yöntemlere alternatif olan önemli bir matematiksel yöntemdir. Bu çalışmada 5 yıl uzunluğunda saatlik ortalama rüzgar hızı verisi kullanılmıştır. Daha uzun yıllarla yapılacak çalışmaların kısa dönemli yapılan çalışmalar ile kıyaslamalarına dayanan bir başka konu bu alanda çalışma yapacaklara önerilir. Aynı şekilde, Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile gerçekleştirilen spektral analiz ile Türkiye genelinde bir çalışma gerçekleştirilerek, rüzgar verilerinin hakim periyodiklikleri ve genel karakteristiklerinin bir haritası çıkarılabilir. Ayrıca rüzgar verileri dışında hemen hemen bütün meteorolojik verilere uygulanabilme kabiliyeti bulunan bir yöntem olması dolayısıyla Dalgacık Dönüşümü yöntemi meteoroloji alanında çalışan araştırmacılara tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

- Abbak, R. A.** (2007). *Jeodezide Zaman Dizilerinin Dalgacık (Wavelet) Analizi*. Doktora Semineri, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ackerman, T. ve Soder, L.** (2003). An overview of wind energy status. *Renewable and Sustainable Energy Review* 2003; 6: 67-128.
- Akdağ, S. A., Dinler A. ve Menteş Ş. S.** (2007). Rüzgar Karakteristiğinin Analizi, *YEKSEM 07*, Gaziantep.
- Akpınar, E. K.** (2006). Statistical Investigation of Wind Energy Potential. *Energy Sources Part A*, 807-820.
- Aksoy, H., Toprak, Z. F., Aytek, A. ve Unal, N. E.** (2004). Stochastic generation of hourly mean wind speed data. *Renewable Energy (under review)*.
- Altuner, S.** (2009). *Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü*, (yüksek lisans tezi), Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Angrisani, L., Daponte, M., D'apuzzo ve M., Testa, A.** (1998). A Measurement Method Based on the Wavelet Transform for Power Quality Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No.4.
- Atlı, C.** (2000). *Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi*, (yüksek lisans tezi), Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Avdakovic, S., Lukac, A., Nuhanovic, A. ve Music, M.** (2011). Wind Speed Data Analysis using Wavelet Transform. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 75.
- Cascio, L. I.** (2007). *Wavelet Analysis and Denoising: New Tools for Economists*, Queen Mary University of London, Department of Economics, Working Paper.
- Celayir, N.** (2008). *Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Gelişimi ve Türkiye'deki Potansiyeli*, (yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chang, T. J., Wu Y. T., Hsu, H., Chu C. ve Liao C.** (2003). Assesment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28, Sf 851-871.
- Chang, S. G., Yu, B., Vetterli, M.** (2000). Adaptive Wavelet Thresholding for Image Denoising and Compression. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, No.9.
- Chiann, C. ve Morettin, A. P.** (1998). Wavelet Analysis for Time Series. *Journal of Nonparametric Statistics*, Vol. 10, Sf 1-46.

- Cook, N. J.** (2001). Discussion on modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind speed energy analysis. *J. Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, 89, Sf 867-869.
- Crowley, P. M.** (2007). Guide to Wavelets for Economics. *Journal of Economic Surveys*, Vol.21, No.2, Sf 207-267.
- Çelik, A. N.** (2003). A statistical analysis of wind power density based on the weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy* 29: 593-604.
- Daubechies, I.** (1992). Ten Lectures on Wavelets, *Capital City Press*, Montpelier, Vermont.
- Dorvlo, A. S.** (2002). Estimating wind speed distribution. *Energy Conversion and Management*, 43, Sf 2311-2318.
- Durak, M. ve Özer, S.** (2008). Rüzgar enerjisi: teori ve uygulama, Türkiye Rüzgar Birliği Yayını, Ankara.
- Elfouly, F. H. ve diğerleri.** (2008). Comparison between Haar and Daubechies Wavelet Transformation on FPGA Technology. *International Journal of Computer Information, and Systems Science, and Engineering*.
- Gençay, R., Selçuk, F. ve Whitcher, B.** (2005). Multiscale Systematic Risk. *Journal of International Money and Finance*, 24, Sf 55-70.
- Goswami, J. C. ve Chan, A. K.** (1999). *Fundamentals of Wavelets Theory, Algorithm and Applications*, John Wiley and Sons, USA.
- Gökçınar, R. E. ve Uyumaz, A.** (2008). Rüzgar Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri. *7. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, UTES, İstanbul.
- Graps, A.** (1995). *An Introduction to Wavelets*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Grossman, A. ve Morlet, J.** (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math Anal*, 15, Sf 723-736.
- Güneş, M.** (2010). *Sultan Sazlığı Göl Su Seviyelerinin Yapay Sinir Ağı-Dalgacık Modeli ile Tahmini*, (yüksek lisans tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Gürsakal, S.** (2009). *Finansal Zaman Serileri Analizine Frekans Boyutu Yaklaşımı: Dalgacıklar Yöntemi ve IMKB’de Bir Uygulama*, (doktora tezi), Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa.
- Jaramillo O. A. ve Borja M. A.** (2004). Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a binomial probability distribution case. *Renewable Energy*, 29, Sf 1613-1630.
- Justus, C. G.** (1978). Wind energy statistics for large array of wind turbines (New England and central US region). *Solar Energy*, 20, Sf 379-86.
- Karaoğlu, B.** (1994). Fizikte ve Mühendislikte Matematik Yöntemler, Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul.

- Kenisarin, M., Karlı, V. M. ve Çağlar M.** (2006). Wind power engineering in the world and perspectives of its development in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Sf 341-369.
- Küçük, M.** (2004). *Dalgacık Dönüşümü Tekniği Kullanılarak Akım Serilerinin Modellenmesi*, (doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Lau, K. M. ve Weng, H.** (1995). Climate signal dedection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 76, Sf 2391-2402
- Lyons, R. G.** (1999). *Understanding Digital Signal Processing*, Addison Wesley Longman Inc.
- Mallat, S.** (1989). A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, Sf 674-693.
- Mallat, S.** (1998). *A wavelet tour of Signal Processing*, Academic Press, London.
- Mery, R. J. E.** (2005). *Wavelet Teory and Application: A literature study*, Eindhoven University of Technology Departmentof Mechanical Engineering Working Paper , Sf 1-49.
- Meyer, Y.** (1993). *Wavelets: Algorithms and Applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- Mickens, R. E.** (1988). *SYN3: Mathematical Methods for Natural and Engineering Sciences*, World Scientific Publishing, USA.
- Mickens, R. E.** (2004). *Mathematical Methods for Natural and Engineering Sciences*, World Scientific Publishing, USA.
- Miner, N. E.** (1998). An Introduction to Wavelet Analysis. *Sandia Report*, NM, October Sf 1-25.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi ve J. M.** (1996-2002). Wavelet Toolbox for use with MATLAB, User's Guide, The Mathworks Inc.
- Misiti, M. ve et all.** (2007). *Wavelets and Their Applications*, ISTE, USA .
- Oral, F.** (2010). *Sakarya-Esentepe Yöresi Rüzgar Enerji Potansiyelinin Yeni Bir Yaklaşım ile Belirlenmesi*, (doktora tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özcan, İ.** (2011). *Isparta İlinde Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi ve Bir Rüzgar Santrali Tasarımı*, (yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özerdem, B., Özer, S. ve Tosun, M.** (2006). Feasibility study of wind farm: A case study for İzmir, Turkey. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2006, 94, Sf 725-743.
- Özgür, M. A.** (2006). *Kütahya rüzgar karakteristiğinin istatiks el analizi ve elektrik üretimine uygulanabilirliği*, (doktora tezi), Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Öztopal, A., Şahin, A. D., Akgün, N. ve Şen, Z.** (2000). On the regional wind energy potential of Turkey, 20, Sf 189-200.

- Papoulis, A.** (1962). *The Fourier Integral and Its Applications*, Mc Graw Hill, Newyork.
- Patel, M. R.** (2006). *Wind and Solar Power System Design Analysis and Operation*, Taylor and Francis, Raton.
- Polikar, R.** (1999). The Engineer's Ultimate Guide To Wavelet Analysis The Wavelet Tutorial.
- Qiao, F.** (2005). *Introduction to wavelet. A tutorial*, In workshop on wavelet application in transportation engineering.
- Ramirez, P., Carta, J. A.** (2006). The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Conversion Management*, 47, Sf 2564-2577.
- Schleicher, C.** (2002). An introductions to Wavelets for Economists. *Bank of Canada Working Paper 3*, Sf 1-41.
- Siluyele, J. I.** (2005). Application of Wavelet Analysis to Time Series Data. *An essay of African Institute for Mathematical Sciences*, Sf 1-40.
- Süzek, F.** (2007). *Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şen, Ç.** (2003). *Gökçeada’nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması*, (yüksek lisans tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Talayoglu, S.** (2010). *Denizli İlinin Tavas İlçesine Ait Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanması ve Ekonomik Analiz*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tar, K.** (2002). Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Toprak, İ. B.** (2007). *EEG Sinyallerinin Dalgacık Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları ile Analizi*, (yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Torrence, C. ve Combo, G. P.** (1998). (1998) *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, Vol. 79, No.1, 1 January.
- Uyar, T. S.** (1998). *Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı*, Elektrik Mühendisliği, TMMOB Elektrik Mühendisleri Yayını.
- Uyar, T. S.** (2000). *Türkiye Enerji Sektöründe Karar Verme ve Rüzgar Enerjisinin Entegrasyonu*, Kocaeli Üniversitesi, TEF.
- Ültanır, M. Ö.** (1997). *Türkiye’de Güneş ve Rüzgar Elektrik Santrallerinin Kurulması*, Enerji Uzman Yayıncılık A.Ş., Yıl 2, Sayı 5, Sf 34-38, İstanbul.
- Ültanır, M. Ö.** (1998). *21. Yüzyıla Giderken Türkiye’nin Enerji Stratejisini Değerlendirmesi*, TÜSİAD, İstanbul.
- Ültanır, M. Ö.** (1999). Türkiye Açısından Hidroelektrik Enerji. *Enerji*, Yıl4, Sayı 3. Uzman Yayıncılık A.Ş., Sf 57-61, İstanbul.

Yingni, J., Xiulinga Y., Jianmeia, F. ve Xiaojunb, C. (2006). Wind Power Density Statistics using the Weibull Model for Inner Mongolia, China.

Zhou, W., Yang, H. ve Fang, Z. (2006). Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China. *Renewable Energy*, 31, Sf 739-753.

Url-1 <<http://www.bp.com/statisticalreview/>>, alındığı tarih: 15.11.2012.

Url-2 <<http://www.epdk.gov.tr>>, alındığı tarih: 11.12.2012.

Url-3 <<http://www.tureb.com.tr>> alındığı tarih : 11.12.2012

Url-4 <<http://www.tuik.gov.tr>> alındığı tarih :17.11.2012

Url-5 <<http://www.renewableenergy.org>> alındığı tarih:10.11.2012

Url-6 <<http://www.enerji.gov.tr>> alındığı tarih: 10.12.2012

ÖZGEÇMİŞ

VESİKALIK
FOTO

Ad Soyad: Kemal Duran

Doğum Yeri ve Tarihi: Tekirdağ/01.01.1983

Adres: Gülbahar mah., Güney sok., No:30, D:30, Şişli, İstanbul

E-Posta: kemalduran@itu.edu.tr

Lisans: Boğaziçi Üniversitesi Matematik Öğretmenliği

Yüksek Lisans:

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Yayın ve Patent Listesi

