152284

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

152284

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TEKNİĞİ KULLANILARAK AKIM SERİLERİNİN MODELLENMESİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Murat KÜÇÜK
(501002152)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Temmuz 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 03Eylül 2004

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Necati AĞIRALİOĞLU**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof.Dr. M. Emin SAVCI (İ.T.Ü.)**
	Prof.Dr. Serhat ŞEKER (İ.T.Ü.)
	Prof.Dr. Zekai ŞEN (İ.T.Ü.)
	Y.Doç.Dr. Fuad OKAY (KOÜ)

EYLÜL 2004

ÖNSOZ

Su kaynakları sahasında onlarca değişik türdeki tabi değişkene ait gözlem değerleri, aslında farkına varamadığımız bir çok bilgiyi de bünyelerinde barındırır. İlk olarak işaret işleme sahasında bir analiz tekniği olarak kullanılan ve büyük rağbet gören dalgacık dönüşümlerinin su kaynakları sahasında kullanımının artması, belki de tahmin edilemeyen bir çok tabi olayın içi yüzünün daha iyi anlaşılmasına neden olacaktır. Bu açıdan bakıldığında gelecekte işaret işleme ve yer bilimleri gibi bir çok disiplinler arası sahada ki ortak çalışmalara tanık olabileceğimiz görülmektedir.

Bu çalışmanın başlangıcında dalgacık dönüşümleri gibi farklı disiplinde kullanımı olan bir teknikle çalışmaya başlamak heyecan verici olduğu gibi korkuda hissettirmekteydi. Acaba şu da olabilir mi dediğimiz bir çok şeyin kısa zamanda dünyada ki diğer bilim adamları tarafından çalışılmaya başlandığını tez süresince hayretle gözlemledik. Bu nedenle bilimsel çalışmalarda kaliteyi yakalamak için disiplinler arası çalışmaların cesaretle arttırılması ve keşf etmenin verdiği motivasyon ile çalışmaların sürdürülmesi, ülkemiz bilimi açısından da önemli bir sıçrama tahtası olacağı kanaatindeyim. Yurdumuzda sayıları giderek artan disiplinler arası çalışmalar da zaten gelecek adına bilimsel seviyemizin çok üst sıralara çıkacağına bir işarettir.

Doktora tez çalışması gibi önemli ve yararlı bir çalışmada maddi manevi desteklerinin yanımda hissettiğim babam Hüseyin KÜÇÜK, annem Nezahat KÜÇÜK, kardeşlerim, Y. Doç. Dr. Ayfer KÜÇÜK, Dr. Aysel KÜÇÜK ve Öğr. Görv. Fırat KÜÇÜK'e şükranlarımı bildiririm. Bu tez çalışmasının ortaya çıkış aşamasından beri çok kıymetli destekleri, sabrı ve tavsiyeleri ile yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen değerli bilim adamı, sayın hocam Prof. Dr. Necati AĞIRALİOĞLU'na teşekkürü borç bilirim. Tezimin gidişatı sırasında danışmanlıklarını esirgemeyen, Prof. Dr. M. Emin SAVCI'ya, kendisini rahmetle andığım sayın hocam Prof. Dr. Seyidali Akhiev SEYİDOĞLU'na ve kıymetli desteklerinden ötürü Prof. Dr. Serhat ŞEKER'e teşekkür ederim. Çalışma sırasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma, bölümümüzün çok kıymetli hocalarına ve birbirinden parlak, yardım sever mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim. Verdikleri proje desteği ile bu doktora çalışmasını destekleyerek, hızlanıp kolaylaşmasına katkıda bulunan değerli üniversite yöneticilerine de bu vesile ile teşekkür ederim.

Temmuz 2004 **Murat KÜÇÜK**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	**vi**
TABLO LİSTESİ	**vii**
ŞEKİL LİSTESİ	**viii**
SEMBOL LİSTESİ	**xii**
ÖZET	**xiv**
SUMMARY	**xvi**
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Model kavramı	1
1.1.1. Matematik model	2
1.2. Akım modelleri	5
1.2.1. İstasyonlar arası modelleme	5
1.2.1. Akım serileri modelleri	7
1.3. Yapılacak çalışmanın önemi, amacı ve kapsamı	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	**13**
2.1. Hidrometeoroloji ile ilgili çalışmalar	14
2.2. Su kaynakları ile ilgili çalışmalar	28
2.3. Hidrodinamik uygulamaları ile ilgili çalışmalar	51
2.4. Modelleme ile ilgili çalışmalar	60
3. DALGACIK DÖNÜŞÜMLERİ	**65**
3.1. Zaman serileri	65
3.1.1 Zamanla değişmez, durağan işaretler (Stasyonerlik)	66
3.1.2 Zamanla değişen, durağan olmayan işaretler (Non Stasyonerlik)	67
3.2. İşaret işleme teknikleri	68
3.3 Dönüşüm nedir, dönüşüme neden ihtiyaç duyulur?	70
3.3.1 Dönüşümlerin özellikleri-dönüşümlerin türleri	70
3.3.1.1 Dönüşüm işlemi nasıl yapılır?	71
3.3.1.2 Bazı dönüşümler	72
3.3.2 Doğrusal (lineer) dönüşümler	73
3.3.2.1 Özdeğer ve özvektör kavramları	73
3.3.2.2 Vektör uzayları	74
3.3.2.3 Vektör alt uzayları	74
3.3.2.4 Doğrusal kombinasyon	75

3.3.2.5 Uzayın gerilmesi (span) 76
3.3.2.6 Taban vektörleri 76
3.3.2.7 Vektör normları 77
3.3.2.8 İç çarpım 77
3.3.2.9 Norm ve mesafe 77
3.3.2.10 Standart normlar için iç çarpımı 78
3.3.2.11 Ortogonallik (dikgenlik) 78
3.3.2.12 Ortonormal (birim dikgen) tabanlar 79
3.3.2.13 Ortogonal izdüşümler 80
3.3.2.14 Biortogonal (çiftdikgen) tabanlar 82
3.3.2.15 Çerçeveler 82
3.3.2.16 Fonksiyonlarla ilgili tanımlar ve işlemler 83
3.3.3 Fourier dönüşümleri (FD) 84
3.3.4 Kısa süreli Fourier dönüşümü (KSFD) 89
3.3.5 Dalgacık dönüşümü (DD) 91
3.3.5.1 Dalgacık nedir? sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) 93
3.3.5.2 Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) 98
3.3.5.3 Çok çözünürlüklü analiz (ÇÇA) 100
3.3.5.4 Global dalgacık spektrumu 105
3.3.5.5 Çapraz spektrum 105

4. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ KULLANILARAK MODELLEME 106
4.1 Regresyon modelleri ve belirsizlik 107
4.2. Modellerin güvenilirlikleri 110
4.2.1. Ortalama karesel hata (OKH) 110
4.2.2. Mutlak hata (TMH) 110
4.2.3. Rölatif hata (RH) 111
4.2.4. Ki-kare testi 111
4.3 İstasyonlar arası akım modellemesi 112
4.3.1 Bölge ve veriler 113
4.3.2 Bileşenlerin eldesi 115
4.3.3 Bileşenlerin analizi 117
4.3.3.1 Bileşenlerin şekil olarak incelenmesi 117
4.3.3.2 Bileşenlerin enerji spektrumlarının incelenmesi 119
4.3.4 İstasyonlar arası modelleme ve sonuçları 121
4.1.4.1 Tahmin dağılımlarının karşılaştırılması 124
4.1.4.2 Tahminlerin saçılma diyagramlarına göre karşılaştırılması 125
4.1.4.3 Modellerin belirsizliği ve dönüşümler 127
4.3.5 Coğrafyanın model üzerine etkisi 130

4.4 Akım serilerinin modellenmesi 136
4.4.1 Akım serisinin Fourier ve Kısa süreli Fourier ile analizi 139
4.4.2 Akım serisinin sürekli dalgacık dönüşümü ve global spektrumla analizi 141
4.4.3 Akım serisi için uygun model seçimi 146
4.4.4 Akım serisi modellemeleri ve sonuçları 146
4.4.5 Kısa aralıklı ölçüme sahip akım serilerinin modellenmesi 153
4.4.5 Akım modellerinin Fourier dönüşümü ile karşılaştırılması 162
4.5 Dalgacık dönüşümleri için kullanılan programlar 165

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 167

KAYNAKLAR 176

EKLER 181

ÖZGEÇMİŞ 186

KISALTMALAR

ENSO	: El Nino-Southern Oscillation.
SST	: Deniz yüzü sıcaklığı (Sea Surface Temperature)
AR1	: 1. dereceden otoregresif model
Nino3 SST	: El Nino deniz suyu yüzeyi sıcaklığı
SOI	: Güney Atlantik salınımları (Southern Oscillation Index)
SLP	: Deniz seviyesi basınç değeri (Sea Level Pressure).
DD	: Dalgacık dönüşümü
GL	: Buzul erimeleri akıntı ölçüm noktası (Glacial Level)
BR	: Bow nehri akım ölçümleri (Bow River)
OF	: Çıkış ölçüm noktası (Outflow)
NRE	: Neuse Nehir Halici (Neuse River Estuary)
MODMON	: Verileri toplama programı (Modeling and monitoring of the NRE)
ADCIRC-2DDI	: Barotropik sonlu elemanlar çevrinti modeli
NWPT	: Ondalık olmayan dalgacık paket dönüşümü (Nondecimated Wavelet Packet Transform)
FD	: Fourier dönüşümü
KSFD	: Kısa süreli Fourier dönüşümü
SD	: Sürekli dalgacık dönüşümü
ADD	: Ayrık dalgacık dönüşümü
ÇÇA	: Çok çözünürlüklü analiz
2B-AD	: 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü
YDD	: Yarı dalgacık dönüşümü
YGF	: Yüksek geçiren filtre
AGF	: Alçak geçiren filtre
OKH	: Ortalama karesel hata
TMH	: Toplam mutlak hata
RH	: Rölatif hata
USGS	:ABD jeolojik araştırmalar servisi (United States Geological Survey)

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	Detay bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	20
Tablo 2.2	Dalgacık ölçek seviyesi ve gün olarak değeri	42
Tablo 4.1	Kendall ölçüm serisi ile Syracuse bileşenleri ve Kendall ölçüm serisi ile Kendall bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	119
Tablo 4.2	Oluşturulan 9 model için OKH, TMH ve korelasyon katsayıları.....	122
Tablo 4.3	Oluşturulan 9 modelin. tahmin dağılımlarının Ki-kare istatistikleri	125
Tablo 4.4	Oluşturulan 10 model için RH ve TMH değerleri.....	134
Tablo 4.5	SDD görüntüsünün düşey eksenine ait ölçek ve aldığı periyot değerleri.....	143
Tablo 4.6	Model türleri ve AIC değerleri.....	146
Tablo 4.7	Akım serisi modellerinin enerjileri ve hata değerleri.....	148
Tablo 4.8	Akım serisi modellerinin enerjileri ve hata değerleri.....	157
Tablo 4.9	Fourier katsayıları ile oluşturulmuş modeller, enerjileri ve hata değerleri.....	163

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 1.1	: Sistemin yapısı	2
Şekil 1.2	: Model şeması	3
Şekil 2.1	: 1871-1996 su yüzeyi sıcaklık değerleri anomali serisi.....	16
Şekil 2.2	: Su düzeyi sıcaklık verilerinin Morlet dalgacığı kullanılarak elde edilen dönüşümleri.....	15
Şekil 2.3	: El Nino deniz suyu yüzeyi sıcaklığı, Güney Atlantik salınımı indeksi için elde edilen dalgacık dönüşümleri ve bu iki dönüşümün çapraz çarpımı..	16
Şekil 2.4	: Artık su seviyesi zaman serisi ve zaman-ölçek ortamında çizilen dalgacık dönüşümü katsayıları...	18
Şekil 2.5	: Çapraz korelasyon grafiği sonuçlarının mevsimlere göre karşılaştırılması.....	19
Şekil 2.6	: İki ayrı parametre için elde edilen 8 adet detay bileşenin, benzer seviyelerde karşılaştırılmaları.....	20
Şekil 2.7	: Her iki parametrenin detay bileşenleri arasındaki saçılma diyagramları.....	21
Şekil 2.8	: 5., 6. ve 7. seviye detay bileşenlerinin üst üste gösterilerek karşılaştırılmaları.....	22
Şekil 2.9	:Rüzgar gerilmesi, deniz yüzü sıcaklığı ve deniz seviyesi değerlerine ait Morlet dalgacığı kullanılarak oluşturulmuş dalgacık dönüşümü spektrumları.....	25
Şekil 2.10	: 1975, 1980 ve 1989 yıllarına ait her üç parametre için bir yıllık dalgacık spektrumları.....	26
Şekil 2.11	: Her üç parametreye ait 30-45-70 günlük ölçeklere deki dalgacık spektrumu serileri.....	27
Şekil 2.12	: Lafreniere ve Sharp (2003)'ın çalışma bölgesi çalışma bölgesi..	29
Şekil 2.13	: 1997-2000 yıllarındaki yaz aylarına ait her üç parametreye ait zaman serileri ve yersel dalgacık spektrumları.....	30
Şekil 2.14	: 1999-2000 yıllarındaki saatlik yağış verileri, bunlara ait yersel dalgacık spektrumları ve yersel yağış-akış çapraz dalgacık spektrumlar ile 24 saatlik ölçekteki dalgacık spektrumu zaman seriler.....	32
Şekil 2.15	: (a) Dalgacık fonksiyonu -ölçek ilişkisi, (b) zaman serisine ait yersel dalgacık spektrumu, (c) havzaya ait zaman serisi.....	34
Şekil 2.16	: İncelenen bölgedeki havzalara ait standartlaştırılmış akım değerleri ve onlara ait yersel dalgacık spektrumları.....	36
Şekil 2.17	: Ortalama akım değerleri için alınmış Fourier spektrumu ve otokorelasyon grafiği.....	36
Şekil 2.18	: (a) Ammonoosuc nehrine ait yedi yıllık günlük akım değerleri, (b) 2-4-8-16-32-64-128 ve 256 günlük özellik ölçeklerindeki dalgacık dönüşümü serileri, (c) seriye ait yersel spektrum.....	38
Şekil 2.19	: (a) Günlük buzul akımları serisi, (b) 2-4-8-16-32-64-128 ve	

256 günlük özellik ölçeklerindeki dalgacık dönüşümü serileri, (c) seriye ait yersel spektrum 40
Şekil 2.20 : 5 ayrı bölgeye ait birer adet örnek günlük nehir akımı serisi (ortada) ve buna ait Fourier spektrumu (sağda) ve global dalgacık spektrumları (sağda) görülmektedir 41
Şekil 2.21 : Zaman serisi ve 10 seviyede bileşenleri ile bileşenlere ait enerji yüzdeleri 44
Şekil 2.22 : 50 yıllık periyot için bütün bölgelerin global spektrumlarından elde edilen 3 ana mod (a, c, e) ve modların standartlaştırılmış gösterimleri (b, d, f) 45
Şekil 2.23 : 50 yıllık süre için modlara göre yapılan bölgesel sınıflandırma.. 46
Şekil 2.24 : (a) Esperelle kaynağı ile (sol taraftaki a, b,...f şekilleri) ve Cernon kaynağına (sağ taraftaki a, b,...f şekilleri) ait saatlik akış (run-off) verileri, (b) gürültüsü giderilmiş akış verileri, (c) (a)'ya ait yersel dalgacık spektrumu, (d) (a)'ya ait frekans spektrumu, (e)bakış sersinden ayrılmış artık gürültü serisi ve (f)buna ait frekans spektrumu 48
Şekil 2.25 : 02/07/1970 ile 25/02/1997 arasındaki haftalık yağış ve akış zaman serileri ve bunlara ait yersel dalgacık spektrumları 49
Şekil 2.26 : Alio ve Fontestorbes kaynaklarına ait günlük yağış ve akış için yapılan çapraz dalgacık spektrum 50
Şekil 2.27 : Alio kaynağına ait (a) orta büyüklükteki ve (b) büyük bir taşkın için hidrograflar ve filtrelenmiş hidrograflar 51
Şekil 2.28 : Luettich ve arkadaşlarının (2002) çalışma alanı 53
Şekil 2.29 : Kış ve yaz mevsimleri için su seviyesi ve akıntı hızı Fourier güç spektrumu değerleri aşağıdaki grafikleri 54
Şekil 2.30 : Yaz ve kış mevsimleri için su seviyesi ve kanal boyunca akıntı hızı ölçüm değerlerinin faz uyumu (coherence) ve faz diyagramları 55
Şekil 2.31 : Kış ve yaz mevsimleri için 7 ayrı bileşenin (O1, K1, N2, M2, S2, M4, M6) faz ve genliklerinden elde edilen yeniden oluşturulmuş seri, 30 saatlik yüksek geçirir filtreden geçirilmiş işaret ve ölçüm serileri grafikleri 55
Şekil 2.32 : Kış ve yaz dönemlerine ait akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumları 56
Şekil 2.33 : Şekil 2.33 için elde edilmiş global dalgacık spektrumları 57
Şekil 2.34 : Nümerik model ızgarası 57
Şekil 2.35 : Nümerik çözümün çalıştırılması ile elde edilen salınımların sönümleme-zaman grafikleri ile bu grafiğe ait global dalgacık spektrumu 58
Şekil 2.36 : İki ayrı döneme ait rüzgar hızı serisi, modelden elde edilen ve gözlenmiş akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumları ve 30 saatlik filtreden geçirilen akıntı hızları 59
Şekil 2.37 : Valley ve Aberport ölçüm istasyonlarına ait 06/05/1995 tarihinden itibaren 21 günlük saatlik rüzgar hızı kayıtları 61
Şekil 2.38 : Paket bileşenlerinin eldesinde kullanılan Haar dalgacığına ait taban fonksiyonları 63
Şekil 3.1 :Nil nehrine ait yıllık minimum su seviyesi kayıtları 66
Şekil 3.2 :Zaman içerisinde değişmeyen spektral bileşenlere sahip Durağan zaman serisi 67

Şekil 3.3 :Zaman içerisinde farklı aralıklarda ortaya çıkan spektral bileşenlere sahip Durağan olmayan zaman serisi..... 68
Şekil 3.4 :İşaret işleme tekniklerinin sınıflandırılması..... 70
Şekil 3.5 :Bir *f* fonksiyonunun dönüşümü ve yeniden eldesi..... 71
Şekil 3.6 :Uzayı geren vektörler ve alt uzay..... 76
Şekil 3.7 :**u** ve **v** vektörleri arasındaki mesafenin hesabı..... 78
Şekil 3.8 :Bir **u** vektörünün iki dik vektörün toplamı şeklinde ifade edilmesi..... 80
Şekil 3.9 :Ortogonal izdüşümler yardımıyla bir vektörün bileşenlere ayrılması..... 81
Şekil 3.10 :Periyodik bir işaretin Fourier dönüşümü ve elde edilen sinüs bileşenleri..... 85
Şekil 3.11 :Örnek işaret ile farklı frekanslardaki sinüslerin karşılaştırmaları. 86
Şekil 3.12 :5, 25 ve 50 Hz'lik işaretler ve ait karşı geldikleri frekans değerleri..... 87
Şekil 3.13 :(a) 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerin toplamı ve (b) toplam işaretine karşı gelen frekans değerleri..... 88
Şekil 3.14 :(a) 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerden oluşan durağan olmayan işaret ve (b) frekans değerleri..... 89
Şekil 3.15 : 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerden oluşan durağan olmayan işaretin KSFD sonuçları..... 90
Şekil 3.16 : (a) Durağan olmayan EKG işareti, (b) FD spektrumu ve (c) KSFD spektrumu..... 91
Şekil 3.17 : (a) Dalgacık olan ve (b) olmayan sinyaller..... 93
Şekil 3.18 : Farklı türden bazı dalgacık fonksiyonları..... 94
Şekil 3.19 : Farklı dönüşümlerde kullanılan işaret uzayları..... 95
Şekil 3.20 :Dalgacık fonksiyonunun zamanla ötelenerek işaretle çarpımı..... 96
Şekil 3.21 :Dalgacık fonksiyonunun farklı ölçeklerde işaretle çarpımı..... 97
Şekil 3.22 :Durağan olmayan bir x(t) işaretinin zaman alanındaki genliği ve SDD'si..... 97
Şekil 3.23 :İşaretin bileşenlere ayrılması..... 102
Şekil 3.24 :Ardışık ayrışma..... 102
Şekil 3.25 :Ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılan dalgacık ve ölçek fonksiyonları..... 103
Şekil 3.26 :Zaman-frekans domeninin dalgacık fonksiyonlarıyla kaplanması 104
Şekil 4.1 :Ölçüm istasyonlarının coğrafi konumları..... 114
Şekil 4.2 :Morlet fonksiyonu ve Fourier dönüşümü..... 115
Şekil 4.3 : (a) Kendall istasyonuna ait akım serisinin çok çözünürlüklü analiz sonucu elde edilen bileşenleri, (b) Syracuse istasyonuna ait bileşenler..... 116
Şekil 4.4 : (a) Syracuse ölçüm serisi ile AD1 bileşeninin, (b) AD4 bileşeninin, (c) AD6 bileşeninin ve (d) yaklaşıklık bileşeninin, karşılaştırılması..... 118
Şekil 4.5 :Kendall ve Syracuse ölçüm serilerine ait detay bileşenlerin enerji değerleri..... 120
Şekil 4.6 : Modellerin OKH değerleri ile toplam enerji değerlerinin ölçek seviyesi ile değişimi..... 123
Şekil 4.7 :Modellerin OKH değerleri ile korelasyon katsayılarının çlçek seviyesi ile değişimi..... 124
Şekil 4.8 : (a) Ölçüm serisi, (b) Model 6 tahminlerine, (c) Model 0

tahminlerine ait sıklık diyagramları..... 125
Şekil 4.9 : Model 0, Model 1, Model 2, Model 6, Model 7 ve Model 8 sonucunda tahmin edilen değerler ile ölçüm serisinin karşılaştırıldığı saçılma diyagramları ve regresyon doğruları..... 126
Şekil 4.10 :Çeşitli dönüşümler kullanılarak oluşturulan modeller ve OKH değerleri..... 129
Şekil 4.11 :Ölçüm istasyonlarının coğrafi konumları..... 131
Şekil 4.12 :North Prong ve Middle Prong ölçüm serilerine ait detay bileşenlerin enerji değerleri..... 132
Şekil 4.13 :Arkansas ve St. Marys nehirlerine ait ölçümlerin detay bileşenlerinden kurulan modellerin ürettikleri hata değerleri. a) Arizona nehrine ait Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Toplam Mutlak Hata (TMH) değerleri, b) St. Marys nehrine ait Rölatif Hata (OKH) ve Toplam Mutlak Hata (TMH) değerleri..... 135
Şekil 4.14 : Ölçüm istasyonunun coğrafi konumu..... 138
Şekil 4.15 : Ölçüm serisi..... 138
Şekil 4.16 : Buffalo akımlarına ait Fourier güç spektrumu..... 139
Şekil 4.17 : Buffalo akımlarına ait KSFD spektrumu..... 140
Şekil 4.18 : Zaman serisine ait sürekli dalgacık dönüşümü..... 142
Şekil 4.19 : Zaman serisine ait sürekli dalgacık spektrumu ve üzerine çizilmiş global spektrum..... 145
Şekil 4.20 : Model 1, 23, 27, 21, 10, 2, 5 ve Model 0'a ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serileri..... 152
Şekil 4.21 : 15 dakika arayla ölçülmüş 2048 adet akım serisi..... 153
Şekil 4.22 : Zaman serisine ait sürekli dalgacık spektrumu ve üzerine çizilmiş global spektrum..... 154
Şekil 4.23 : Model 1, 5, 11, 16, 18, 19, 23 ve Model 0'a ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serileri..... 161
Şekil 4.24 : Fourier katsayılarının varyanslarının ardışık toplamı..... 164

SEMBOL LİSTESİ

Y	: Tahmin edilen değişken, zaman serisi
X	: Tahmin ettirici değişken, zaman serisi
A ve B	: Model parametreleri
X(t)	: Zaman serisi,) zamana bağlı fonksiyon
$\mathbf{B_i}$	: Belirsiz kısım
$\mathbf{P_i}$	: Periyodik veya spektral bileşen
$\mathbf{T_i}$	: Artış veya azalış şeklinde trend
$\mathbf{S_i}$	: Sıçrama bileşeni
T	: Dönüşüm, operatör
$\mathbf{F_i}$	: Ağırlık denilen sabitler
$\mathbf{K_{ij}}$	: Taban fonksiyonları
ω	: Katsayıları ifade eden fonksiyonun parametresi
A	: Kare matris
x	: Öz vektör
λ	: Öz değer
P	: Öz vektörler tarafından oluşturulmuş matris
K	: Öz değerlerin diagonal olarak sıralandığı matris
V	: Karmaşık (gerçek) vektör uzayı
α	: Sabit
W	: V vektör uzayının alt kümesi
$\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2} \ldots \mathbf{v_n}$	: Vektörler
S	: Vektörler kümesi
B	: V vektör uzayı için bir taban
$\|\mathbf{v}\|,$	: V vektör uzayındaki norm
δ	: Dürtü fonksiyonunu (impulse function)
$\mathbf{P_w u}$	: W uzayındaki ortogonal izdüşüm
R	: Reel sayılar kümesi
$f(t)$	: Zamana bağlı bir fonksiyon
μ_k	: Ağırlık denilen sabit sayı
ϕ_k	: Taban fonksiyon
a ve b	: Fonksiyonun zaman aralığı
*	: Karmaşık eşlenik
k ve l	: Taban fonksiyonlarının sıra değerleri
f	: Frekans
$e^{2\pi ift}$	: Karmaşık ve periyodik üstel fonksiyon
$X(f)$	: İşaretinin Fourier dönüşümü katsayıları
$KSFD(\tau, f)$	: Kısa süreli Fourier dönüşümü katsayıları
$w(t)$	: Pencere fonksiyonu
$SDD_x^{\psi}(\tau, s)$	: Sürekli dalgacık dönüşümü katsayıları
τ	: Zamanda öteleme parametresi
K	: Moment

s : Ölçek parametresi
$\psi(t)$: Dönüşüm fonksiyonudur veya ana dalgacık fonksiyonu
C : Dalgacık dönüşümü ilişki katsayıları
m ve n : Tamsayı olarak ölçek ve zaman eksenindeki ötelenme parametreleridir
s_0 : Sabit bir ötelenme adımı
τ_0 : Zaman eksenindeki ötelenme aralığı
$W_{m,n}$: $\tau = 2^m n$ zaman değerlerine sahip dalgacık dönüşümü katsayıları
x_i : $i=0, 1, 2 ....N$-1 sonlu değerlere sahip bir zaman serisi
N : Değeri 2^M'*e eşit* ikinin katı bir tamsayıdır
M : En geniş ölçek
$x(q)$: Orijinal işaret
q : Tam sayı şeklinde t zaman
$g(q)$: Yüksek geçiren filtre
$h(q)$: Alçak geçiren filtre
p : En yüksek frekans
$y_{yüksek}(k)$: Yüksek geçiren filtre çıkışı
$y_{alçak}(k)$: Alçak geçiren filtre çıkışı
k : Filtre seviyesi
L : Filtre uzunluğu, çift sayı
W_n : Dalgacık spektrumu
n_1 ve n_2 : Zamanda rasgele şekilde atanmış değerler
n_a : Ortalanmış noktaların sayısı
$W_n^{XY^*}(s)$: X ve Y şeklindeki iki zaman serisinin çapraz dalgacık spektrumu
β_0 ve β_1 : Regresyon katsayılarıdır
ε_i : Kalıntı terimi
b_o ve b_1 : β_0 ve β_1 katsayılarının eldeki örnekten hesaplanmış değerleridir
r : X ve Y değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısıdır
$\hat{y}_i$: X=x_i için Y değişkeninin y_i en iyi tahmini
$X_t(AD_m)$: Girdi akımlarının m seviyeden ayrık dalgacık dönüşümü bileşenlerini
$Y_t(AD_m)$: Çıktı akımlarının m seviyeden ayrık dalgacık dönüşümü bileşenlerini
$Y_{i(ölçüm)}$: Gerçek ölçüm değerleri
$Y_{i(model)}$: Tahmin edilen değerler
$\hat{\psi}_0(\omega)$: Fourier dönüşümü alınmış Morlet dalgacık fonksiyonu
ω_0 : Temel frekans
E_m : Bileşenin m ölçek seviyesindeki enerjisi
X^2 : Sıklık diyagramı sınama istatistiği (Ki-kare)
y_i : Sıklık diyagramındaki örneğin normal dağılım alına düşme yüzdesi
z : Normal dağılımın bölünen alt aralık sayısı
Var_i : Fourier katsayılarının varyansı
A_i, B_i : i. Fourier katsayıları
h : harmonik sayısı

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TEKNİĞİ KULLANILARAK AKIM SERİLERİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Tabii bilimlerin araştırma sahasına giren olayların durağan olamayan karaktere sahip olduğu düşünülmesine rağmen, aslında içlerinde farklı zamanlarda oluşan bir çok periyodik olaylar barındırmaktadır. Genel olarak su kaynaklarında veri analizinin ve modellemelerin amacı durağan olmayan yapıya sahip kayıp olan veya gelecek verilerin tahminidir. Doğal bir olay olarak akım serilerinin tahmini bir çok çevresel ve mühendislik sorununun çözümünde özel öneme sahiptir. Su kaynaklarının planlama, tasarım ve işletmesinde akarsu akımlarının ölçülmesi ve analizi, önemlidir. Analiz edilen veriler geçmişteki akımların davranışları hakkında bilgi verdiği gibi gelecekte muhtemel olabilecek akımlar konusunda da bize önemli ipuçları sağlar. Bu amaçla hem bilim adamları hem de mühendisler gelecekte oluşabilecek akım serilerinin tahmininin yanında eksik olanlarının hesaplanması ile de ilgilenirler.

Kararlı olmayan işaretlerin analizinin bir çok bilim alanında zor olması nedeniyle, işaret işleme sahasında önceki tekniklere göre iyi sonuçlar veren dalgacık dönüşümü tekniği son yirmi yılda sıklıkla kullanılmaktadır. Su kaynakları sahasında işaret işleme yöntemlerinin kullanımı ise son yıllarda daha yaygın bir şekilde uygulanmaya başlamıştır.

Bu çalışmada ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak akım serilerinin modellenmesinde tahmin performansının arttırılması ve fiziksel bir anlamlılık sağlamak için yeni bir modelleme tekniği sunulmuştur. Bir akım serisinde farklı periyodik bileşenler dalgacık dönüşümünün özel bir tipi olan ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilebilir. Yapılan çalışmada farklı olarak ayrık dalgacık dönüşümü, akım serilerine uygulanan bir modelleme tekniği olarak ilk defa sunulmuştur.

Bir regresyon modeli daha fazla veri elde edilebilen bir değişkenin bilgisine dayanarak diğer bir değişkenin tahmini işlemidir. Bu çalışmada regresyon modelindeki açıklayıcı ve tahmin edilen değişkenler yerine bu değişkenlerin ayrık dalgacık dönüşümü bileşenleri kullanılmıştır. Tekniğin regresyon modellerine uygulanmasının nedeni bu modellerin pratik ve yaygın olarak kullanılmasıdır. Ayrıca bu yaklaşım başka bir modelle de uygulanabilir. Buna ilaveten ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen bileşeler tarihi verilerin modellenmesinde de kullanılabilir.

Belirtilen amaç doğrultusunda ilk olarak, iki istasyona ait nehir akım serileri ayrık dalgacık dönüşümü uygulanarak bileşenlerine ayrılmıştır. Daha sonra bileşenlerin enerji spektrumları ve korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Modelleme sırasında ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla elde edilen bu bileşenler kullanılmıştır. Modelleme sonuçlarında yüksek enerjili ve bölgenin iklim karakteristiğine uygun bileşenler arasında oluşturulan modellerin diğer modellere göre bir çok hata kriteri bakımından daha başarılı olduğu görülmüştür.

Elde edilen model sonuçları farklı hata ve karşılaştırma kriterler ile değerlendirilmiştir. Ayrıca iki istasyona ait ölçüm serileri arasında da model oluşturulmuştur. Analiz sonucunda bölgenin iklimsel karakteristiği ile uyum gösteren bileşenlerin oluşturduğu modeller hesaplamalar sonucunda daha az hata üretmişlerdir. Bölgenin karakterine en uygun bileşen ise enerji değişimi ve seri ile bileşenler arasındaki korelasyon katsayılarının hesap edilmesi yardımı ile tespit edilmiştir. Her bir bileşen için hesaplanan enerji değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu dağılım yapılacak modelleme öncesinde bölgenin iklim karakterini anlamada da yardımcı olmuştur.

Sunulan teknik bölgesel farklılıklardan doğabilecek değişimleri incelemek için iki farklı coğrafyada bulunan nehir akımı serilerine uygulanmıştır. Böylece tekniğin farklı bölgelerde uygulanışları karşılaştırılabilmiştir.

Sunulan çalışmada kullanılan ayrık dalgacık dönüşümü modelleme metodolojisi kararsız olan zaman serileri içinde kullanılabilir. Tez çalışmasında ortaya konan diğer çalışma, akım serilerinin modellenmesi ile ilgilidir. Bu çalışmada da ilk önce zaman serileri analiz edilerek iklimsel karakteristikleri ortaya konulmuştur. Akım serileri öncelikle Fourier ve kısa süreli Fourier teknikleri ile analiz edilmiştir. Sürekli dalgacık dönüşümü yapılan zaman serisinin global spektrumu da çizilmiştir. Böylece akım serisinin fiziki karakteri ortaya konmuştur. Sonuçlar her kombinasyonun toplam enerjisi ve üç farklı hata kriterine göre değerlendirilmiştir.

Akım serilerinin modellenmesi ile ilgili bir başka incelemede kısa süreli akım serilerinin modellenmesi ile ilgilidir. İncelemede kullanılan veriler önceki çalışmada kullanılan aynı ölçüm istasyonuna ait 15'er dakika aralıkla ölçülmüş akım serisi verileridir. Bu seri için de öncelikle sürekli dalgacık dönüşümü hesaplanmıştır. Ardından çizilen global spektrumla serinin periyodik karakteri ortaya konulmuştur. Daha sonra ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak seri bileşenlerine ayrılmıştır. Ayrılan bileşenler 27 ayrı kombinasyonla tekrar toplanmıştır. Bu kombinasyonların her birisi için oluşturulan modellerin toplam enerjileri ve değişik hata kriterlerine göre tahmin hatalar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca ölçüm serisinin kendisi için de bir model oluşturularak diğer modeller ile bu model de karşılaştırılmıştır. Sonuçta, analiz sonucunda da ortaya konan serinin karakteristik özelliklerini ifade eden bileşenleri içeren kombinasyonlar ile oluşturulan modellerin daha yüksek başarım gösterdiği hesaplanmıştır.

Çalışma bir giriş bölümü ile başlamaktadır. İkinci bölümde hidroklimatoloji, su kaynakları, hidrolik ve modelleme konuları üzerinde dalgacık dönüşümü ile yapılan çalışmaların bir çoğu genişçe verilmiştir. 3. bölümde dalgacık dönüşümünün matematiği verilmiştir. Ayrıca ayrık dalgacık dönüşümü ve işlem sırası açıklanmıştır. 4. bölümde ise kullanılan metot, veriler anlatılmıştır. Kullanılan metot ayrıntılı bir şekilde anlatılarak ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan modelleme üzerinde durulmuştur. Son bölüm analiz ve sonuçları içermektedir.

Sonuç olarak ilk defa bu çalışmada dalgacık dönüşümü tekniği, akarsu akım modellemelerinde kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tekniğin analiz gücü ve çok çözünürlüklü analiz yardımıyla serinin değişik periyottaki bileşenlerinin elde edilmesi, modellemede yüksek bir başarım elde edilebilmesini sağlamıştır. Teknik regresyon ve zaman serileri modellerinde denenmesine rağmen istenildiğinde diğer modelleme yöntemlerinde de pratik olarak kullanılabilir. Su kaynakları alanında, dalgacık dönüşümü tekniği kullanımının çok daha yararlı olabileceği yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur.

MODELING OF STREAMFLOW SERIES USING WAVELET TRANSFORM TECHNIQUE

SUMMARY

Even though earth science phenomena have nonstationary characteristics, they actually include many different secret periodic events occurred in different time periods. Generally, goal of modeling and analyzing studies in water resources is to predict missed and future values of nonstationary measurements. As a natural phenomenon, estimates of streamflow are required as a prerequisite for solving a number of engineering and environmental problems. Using appropriate techniques, analyzing of streamflow records can give significant idea on both past and future characteristics of streamflow to predict missed and future values of measurements. For this purpose, both engineers and scientists are interested in reconstructing streamflow data as well as future data of streamflow series.

Since analysis of nonstationary series is difficult issue in various research areas, wavelet transform technique, which gives better result than former techniques and an ideal tool for analyzing of nonstationary series in signal processing research area has been widely used in the last two decades. It has also an explosion interest for a few years in water resources.

In this study, a new modeling technique using discrete wavelet transform is presented to increase prediction performance of streamflow time series modeling and to provide physical interpretation. Different periodic components of a streamflow series are always obtained using discrete wavelet transform which is a special type of wavelet transform. The present study differs in that discrete wavelet transform is firstly presented as a modeling technique with application on streamflow process.

A regression model is performed to estimate or predict values of one variable based on knowledge of another variable, for which more data are available. Instead of response and explanatory series in a regression model, discrete wavelet components of response and explanatory series are used in presented study. The technique is applied to regression models, since regression models are also widely using in practical applications; and application of regression models is simple. In addition, this approach is highly interpretable for prediction of historical data. Using periodic components of discrete wavelet transform can perform on studies of historical data modeling.. However, one can apply to any other modeling technique.

For this purpose, discrete wavelet components of response and explanatory streamflow series are obtained by using discrete wavelet transform, firstly. Secondly, the wavelet components of both time series are analyzed by energy variation and correlation coefficients. Thirdly, linear regression models between discrete wavelet components of response streamflow series and discrete wavelets components of explanatory streamflow series are set up in the present study. If appropriate components obtained by discrete wavelet transform are used, the performance of streamflow models can be increased.

Results are compared with energy variation, correlation coefficients and root mean square error and total absolute error values of the constituted models. In the proposed technique, the best model established between the DWT components can be constituted by selecting important components of streamflow series. Important components defines that best appropriate components with measured series. Examining of energy variation of components or correlation coefficients between detail components and measured series, one can define these important components. Energy distribution of the signal at each level can be computed in order to compare energy variation between each component. Energy distribution spectrum can also help to understand energy variation at each component and to clarify climatic characteristics of a region, before performing modeling.

In order to investigate the effects of geographical locations, two geographical locations of different climate are investigated using this technique. Thus, one can compare the proposed technique in the study with two different geographical locations.

The discrete wavelet transform modeling methodology, which is used in the present study, can be used with adjustably since both time series are non-stationary. The new technique was also applied to streamflow time series modeling. Time series are firstly analyzed by using Fourier transform, short time Fourier transform, continuous wavelet transform, and global wavelet spectrums. Numerous models were constructed by discrete wavelet components of time series. Results were compared by error values of models. The new technique was also compared by results of Fourier filtered technique.

In addition, short time measured streamflow series are also examined by using the new technique. Streamflow series which is measured with 15 minutes interval are used for this new technique. In the same way, continuous wavelet transform are applied on the streamflow series, firstly. Global wavelet spectrum is calculated. Then, components of the streamflow series are obtained by discrete wavelet transform. Using these components, 27 model combinations are constituted. Total energy, error values of the models are compared each other. If the components, which are appropriate with climatic characteristics of the region, are used for any model, performance of the model will increase. Using this technique, numerous models have lower error values than the model, which is constituted by measured series.

The study starts with an introduction as Section 1. In section 2, some recent literatures are widely explained such as hydro-climatologic applications, water resources applications, hydraulics applications and modeling study applications of wavelet transform. Section 3 presents the mathematics of the wavelet and discrete wavelet transforms, and a description of the analysis procedures. Section 4 describes observations of streamflow series. In this section decomposition processes by using discrete wavelet transform and the modeling of the streamflow components were derived; and Section 5 contains discussion and results of the models and analyses.

As a result, the new technique offered for streamflow modeling has good advantage with physical interpretation than former techniques. Prediction performance and physically interpretation of predictions are the advantage of the present technique. Although the technique is applied to regression model and time series model, one can easily extent and generate to other techniques. Technique is easily applied to modeling studies of the water resources research area.

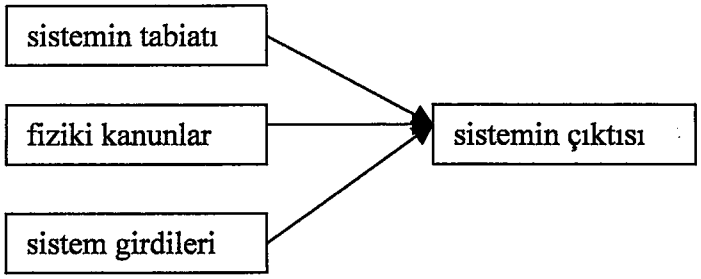
1. GİRİŞ

Tabi bilimlerin dünya ve yaşadığımız çevreyi anlamadaki rolünü açıklayan iki önemli görüş vardır. Bunlardan ilki, tabi bilimlerin tabiatla ilgili fiziksel ilkelerin uygulamalarında kullanılabilen yararlı bir kaynak olarak görülebileceğidir. Bu kullanımın sistematik hale dönüştürülmesi, süreklilik ilkesine ve mekaniğe girişte bir temel teşkil eder. Bu görüşe göre, fiziksel prensiplerin uygulanması ile yapılan örneklemeler, dünya ve yaşadığımız çevreyi anlamada yardımcı olur. Diğer görüş ise, mekanik biliminin bir çok doğal ve fiziksel olayın açıklanmasını sağladığı ve olayların bir yerden diğer bir yere göre de genelleştirilmesine yarayan bir araç oluşudur. Böylece mekanik bilimi kullanılarak dünya yüzeyinin nasıl oluştuğu açıklanabilir.

Aslında verilen örneklemeler fiziki olayların açıklanması için yararlı olsa bile temel de cereyan eden olayların tüm yönleri ile açıklanması mümkün değildir (Middleton, 1994). Bir çok düşünürde buradan hareket ederek yola çıkmış ve tabiattaki olayların açıklanmasında yardımcı olan model kavramını ortaya atmıştır.

1.1 Model kavramı

Model, gerçek bir olayın yaklaşık bir gösterimi şeklinde düşünülebilir. Model kavramını açıklarken sistemden de söz etmek gerekir. Sistem, belirli bir zaman diliminde giriş ve çıkış verileri arasındaki bağıntıyı gösteren bir yapı, şema veya işlem olarak tanımlanabilir. Birbirleri ile irtibatlı unsurların oluşturduğu, bir veya birden fazla girdiyi bir yada birden fazla çıktıya dönüştüren bir bütündür. Sistem girdilerden çıktı üreten bir yapıdır, ana görevi giriş ve çıkış verileri arasında bağıntı oluşturmaktır. Gerçek bir olayın analitik olarak soyutlanmasıdır. Sistemi analiz etmekten maksat da sistemin çıktısını tayin edebilmektir. Bu durum şematik olarak Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Sistemin yapısı

Klasik sistem yaklaşımında çıktısı aranacak sistemde etkili olan kanunların ve sistemin yapısı belirlenir. Bu kanunları temsil eden bir model kurulur. Modeldeki parametrelerin yerine sistemdeki değerler konulur yani model sisteme uygulanır veya model kurulmuş olur. Daha sonra modele girdiler katılarak çıktılar hesaplanır. Bu işlemler sırasında bazen kolaylık olması açısından bazen de mecburiyetten bazı kabuller yapılır.

Model seçilirken yapılacak iş sıralaması; kullanılacak modelin hangisi olduğuna karar vermek, modeli kurmak, modeli gerçek değere yaklaştırmak için güvenilirliğin denenmesidir.

1.1.1 Matematik Model

Matematik model, kısaca gözlenen analiz edilen veya tahmin edilen bir olayın bağıntılarla ifade edilmesidir. Aslında hiçbir oluş tamamen gözlenemediğinden içinde birtakım belirsizlikler her zaman ihtiva edecektir. Bu anlamda modelin güvenilirliği de modelin bağlı bulunduğu büyüklüklerin gerçekteki değerlerine yakınlığı ile ölçülecektir. En çok kullanılan matematiksel model tipleri şunlardır.

1- Analitik model: Fiziki olayın denklemelerinin matematiksel çözüm yöntemleri ile çözülmesidir.

2- Nümerik model: Denklemlerin sayısal formda iterasyonlarla çözülebilecek hale getirilip çözümlenmesidir.

3- Deterministlik model: Olayın fiziğini açıklayan temel bağıntıların çıkarılması ve çözümlenmesine dayanır.

4- Amprik model

5- İstatistiki model

6- Simülasyon modeli

Matematik modellerin bilimsel ve pratik çalışmalarda bir çok yararları vardır. Bunlardan en başta geleni, zaman ve para sıkıntısı çekilen araştırmalarda kısa sürede, çok uygun maliyetlerde gözlenen fiziki olayların anlaşılmasına yardımcı olmasıdır. Yüksek hızlı bilgisayarların gelişmesi ile uzun ve zahmetli gözlemler yerine kurulan matematik modeller yardımı ile bilgisayarlardan elde edilen simülasyonlar, bize doyurucu bilgiler üretmektedir. Şekil 1.2'de fiziki bir olayın matematiksel modelinin nasıl tasarlanacağı gösterilmiştir.

Matematik modelin oluşturulmasında anlaşılması gerekli olan terimler şunlardır.

Değişken, Parametre: Değeri sabit olmayan büyüklüklere değişken denilir. Uygulama durumuna göre değeri değişen sabit sayıya ise parametre denilir.

Lineer ve Non-lineer sistemler: Sistemin girdi yada girdileri, sistemin çıktı yada çıktıları ile orantılı ise sistem lineer, değilse nonlineerdir. Lineer sistemler matematiksel olarak lineer diferansiyel denklemlerle temsil edilirler. Herhangi bir girdi değerinin çıktısına katkısı doğrudan doğruya o girdi değeri ile orantılı ve çıktısının değeri de etkin girdilerinin katkıları toplamına eşit olan bir sistem lineerdir. Lineer olmayan diferansiyel denklemlerle temsil edilen, davranışı sistemin kendisine ve giriş verilerinin şiddetine bağlı olan sistemlerse nonlineerdirler. Nonlineer sistemlerde girdi elemanının çıktıya katkısı kendi değeri ile orantılı kalmayıp, karesi, küpü ve daha yüksek kuvvetleri ile de orantılı katkılar yapar.

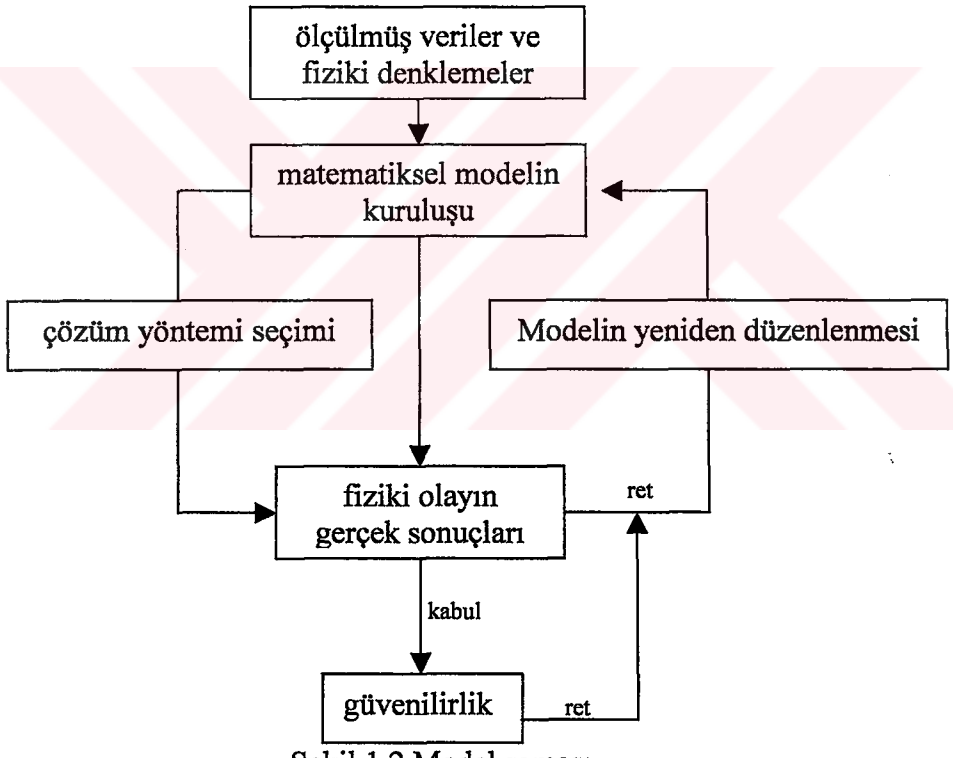
Zamanla Değişmezlik, Durağanlık (Stasyonerlik): Giriş ve çıkış bağıntılarının zamana bağlı olmadığı sitemlere denilir. İstisnasız bütün tabii sistemler zamanla değişirler fakat değişimin tanımlanıp modele uyarlanması zor olduğundan sistem analizinde genelde zamanla değişmezlik kabulü yapılır ki genelde bu sistemin gerçekliliğinden uzaklaşmak demektir.

Açık ve Kapalı Sistemler: Açık sistemlerde sürekli bir enerji ve madde girişi olur ve sistem bu değişimlere karşı uygun hale getirir. Kapalı sistemlerde ise madde veya enerji girişi söz konusu değildir.

Deterministik ve Propabilistik sistemler: Aynı girdiden devamlı aynı çıktıyı elde eden sistemler deterministik sistemlerdir. İncelenecek sistemde girdiye karşı gelecek çıktı bir rasgele bilinmeyenlik ihtiva ediyorsa böyle sistemler propabilistik (stokastik) sistemlerdir.

Sürekli ve Ayrık sistemler: Sistemin işlevi süreklilik gösteriyorsa sistem süreklidir. Bu aynı zamanda sistemin girdi ve çıktılarının devamlı şekilde biliniyor ve kaydediliyor olması anlamına gelmektedir. Eğer bu veriler belirli zaman aralıklarında değişiyor ve diğer zaman aralıklarında sabit alınıyorsa ayrık sistem olarak nitelendirilir.

Konuma Bağlı Olma ve Olmama Durumu: Bazı parametreler veya değişkenler vardır ki çözüm alanında herhangi bir konuma bağlı olmaksızın aynı değeri ifade ederler. Mesela bir akış kesitindeki ortalama hız, bir havzadaki ortalama yağış gibi. Bu durumda olan değişken veya parametreye konuma bağlı olmayan (lumped) adı verilir. Bu tür sistemler zamanı bağımsız değişken alan adi diferansiyel denklemler ile ifade edilir. Konumdan konuma değişen parametre veya değişkenler ise konuma bağlı (distributed) adı verilir.



Şekil 1.2 Model şeması

Model benzeşimi, fiziksel bir olayın laboratuvarda yapılan benzerine o olayın *fiziksel modeli* denir (Yüksel, 1999).

Geometrik benzeşim , model ve prototipte birbirine karşı gelen uzunluklar arasında sabit bir oran olmasıdır.

Kinematik benzeşim, model ve prototipte birbirine karşı gelen noktalardaki kinematik büyüklükler (hızlar, ivme,zaman,..) arasında sabit bir oran olmasıdır.

Dinamik benzeşim, model ve prototipte birbirine karşı gelen noktalardaki dinamik büyüklükler (kuvvet,..) arasında sabit bir oran olmasıdır.

1.2 Akım modelleri

Tabiattaki akım olayları üç tür matematik model ile incelenebilirler.

1- Kapalı kutu modeli: Sistemin girdi ve çıktı verilerine dayanarak sistemin belirlenmesine dayanan modeldir.

2- Kavramsal Model: Parametrik modellerdir. Bir takım parametreler ile temsil edilirler.

3- Deterministik Modeller: Olayın fiziğini açıklayan temel bağıntıların çıkarılıp çözülmesi esasına dayanır.

Serbest yüzeyli akımlarda kullanılan denklemlerin çözümünde ise başlıca üç yöntem kullanılır. Bunlardan biri analitik yöntemidir. Analitik yöntem, genelde karmaşık ve lineer olmayan denklem takımlarının belirli sadeleştirmeler ile lineer hale getirilmesi durumunda uygulanan matematiksel çözüm yöntemidir. Diğer yöntem ise nümerik çözümdür. Nümerik çözüm yöntemi, içinde kuvvet serileri, sınır elemanlar, sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi bir çok değişik yöntem barındırır. Denklem takımları, sınır şartları da göz önüne alınarak çeşitli şemalar yardımıyla ayrıklaştırıp çözülebilecek formlar haline sokulur. Çeşitli iterasyonlarla şemadaki diğer kısımlar sayısal olarak hesaplanır. İşlemler sonunda seçilen şemaya ve problemin yapısına göre gerçek çözüme göre oluşan hatanın minimum olması arzu edilir. Bir başka yol ise kapalı kutu modeller olarak bilinen ve yakın istasyonların akımları kullanılarak istenilen yerdeki akımların tahmin edilmesidir. Bunun için en sık kullanılan yöntemlerden biri de regresyon tekniğidir. Ayrıca diğer bir kapalı kutu model yaklaşımı da aynı istasyona ait akım ölçümlerini bir zaman serisi olarak kabul edip önceki ölçümlere dayanılarak akımları tahmin etmektedir.

1.2.1. İstasyonlar arası modeller

Bu modellemede çok sık kullanılır bir tekniktir. Teknik seriler arasında korelasyon ilişkisine dayanan, lineer bir ilişkiyi belirlemekte kullanılır. İki ayrı istasyona ait akım serilerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılır (Bayazıt 1996; 1998). Hidro-meteorolojide, aralarında ilişki kurulan değişkenlerden bir tanesi bağımsız

değişken diğeri bağımlı değişken olarak göz önüne alınır. Bağımlı değişkene hidro-meteorolojide tahmin edilen, diğerine ise tahmin ettirirci adı verilir. İkili çözümlemeler öncesinde, hangi hidro-meteorolojik değişkenlerin tahmin ettirici ve tahmin edici olduğuna sorunun fiziksel anlamına göre karar verilir. Örneğin, buharlaşmanın sıcaklıklardan tahmin edilmesi durumunda buharlaşma tahmin edilen, sıcaklık ise tahmin ettiren meteorolojik değişken olur. İkili bağıntılar matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Y = f(X) \tag{1.1}$$

burada Y tahmin edilen, X ise tahmin ettirici değişken konumundadır. Bu ifade bize iki değişken arasında bir bağıntının bulunduğunu ifade eder. Ama bu bağıntının açık ifadesini belirtilmez. Bağıntının açık ifadesi değişik fonksiyonlar şeklinde verilebilir. Bu fonksiyonların hangisinin eldeki ilişkiyi en iyi şekilde açıklayacağı önem arz eder. Doğadaki bir çok ilişki incelendiğinde aradaki ilişkiyi böyle hatasız olarak ifade etmek mümkün değildir. Ayrıca bu ilişkinin yalnızca iki değişkene bağlı olduğu da düşünülemez. İki değişken arasındaki ilişkinin tam olarak, hatasız bir ilişkiyle ifade edilememesinin nedenleri arsında şunları gösterebiliriz.

1-Yapılan ölçümlerin hata içermesi,

2- Olayın kendi yapısı içerisinde belirsizlikler bulunması,

3- Bir değişkene yalnızca bir başka değişkenin değil bir çok değişkenin tesir etmesi.

Bu nedenle ikili bağıntılar araştırılırken en iyi ilişkiyi gösteren fonksiyon şekilleri belirlenmesi ve tahminde yapılan hatanın en küçük olması arzu edilir (Şen, 2002).

Tanım olarak X bağımsız değişkenindeki birim artmaya karşı gelen Y bağımlı değişkeninde ortaya çıkacak değişme ikili ilişkiler ile verilir. Tez çalışmasında basitliği ve yaygınlığı göz önüne alınarak bu tip modeller kullanılmıştır.

Oluşturulan modeller aşağıda belirtilen bağıntı ile ifade edilebilir:

$$Y_t(AD_m) \approx A \cdot X_t(AD_m) + B \tag{1.2}$$

Eşitlikteki $Y_t(AD_m)$, $X_t(AD_m)$ terimleri girdi ve çıktı akımlarının m. seviyeden ayrık dalgacık dönüşümü bileşenlerini ifade eder. A ve B ise model parametreleridir.

Burada parametre değerleri matematiksel olarak hesap edilir. Parametreler belirlenirken hataların en küçük yapılması göz önünde bulundurulması gerekir.Genel olarak, Y eksenine paralel düşey sapmalar esas alındığında en küçüklenmesi gerekli miktar n tane ölçümün bulunması durumunda

$$Enküçükle\left[\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y)^2\right] \tag{1.3}$$

bağıntısı ile ifade edilebilir (Şen, 2002).

1.2.2. Akım serileri modelleri

Akarsu havzalarının depolama özellikleri nedeniyle akım serilerinin ardışık değerleri arasında bir iç bağımlılığın bulunmasına neden olur. Ardışık değerler arasındaki zaman aralığı kısaldıkça iç bağımlılık kuvvetlenir. Zaman serilerinin ardışık değerleri arasında model oluşturma şu adımlar yardımıyla gerçekleşebilir.

1- Kullanılacak model için uygun bir model tipi seçilir,

2- Ölçüm serisi kullanılarak modelin parametreleri hesap edilir,

3- Ölçüm serisi kullanılarak modelin uygunluğu kontrol edilir,

4- Uygun olduğu sonucuna varıldığında model yardımıyla sentetik seriler türetilebilir. Bu seriler simülasyon çalışmasında kullanılarak sistemin davranışı belirlenebilir. Ayrıca yakın gelecekte olabilecek akımların tahmini bu model yardımıyla belirlenebilir.

Yıllık akımlar için en çok kullanılan modeller "Autoregressive-Moving Avarage" (ARMA) tipi modellerdir. Markov modelleri olarak da bilinen bu tür modeller Autoregressive (AR), Moving Avarage (MA) veya her ikisinin de kullanıldığı Autoregressive-Moving Avarage (ARMA) şeklinde kullanılabilir (Bayazıt, 1996).

Akım serileri incelendiğinde trend yada sıçrama durumu olmaksızın yıllık akımların kararlı (stasyoner) oldukları düşünülebilir. İncelenen zaman aralığı daha kısaltılırsa akım serisinin mevsimlik, aylık, haftalık ve günlük bileşenlere sahip olacağından bu gibi serilerin kararlı olması mümkün gözükmemektedir. Kararlı olmayan serilerin incelenmesinde zorluklar yaşadığından sık kullanılır bir yöntem olarak kararlı olmayan seriler boyutsuzlaştırma işlemi yardımıyla kararlı hale getirilirler. Boyutsuzlaştırma işlemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$X_i' = \frac{X_i - \overline{X}}{S_x} \tag{1.4}$$

Burada $\overline{X}$; boyutsuz hale getirilen X_i değişkeninin ortalaması, S_x standart sapması, X_i' ise boyutsuzlaştırılmış yeni değişkendir. Bu dönüşüm sonucunda elde edilen yeni değişkenin ortalaması 0, standart sapması ise 1'e eşit olur. Boyutsuz değerlerle kurulan model sonucunda hesaplanan değerlerden ters dönüşümle X_i değişkeni elde edilebilir.

1. 3 Yapılacak çalışmanın önemi, amacı ve kapsamı

Verilerin tahmini veya eksik verilerin tamamlanması su kaynakları sahasındaki çalışmalar için önem arz eder. Akım ölçümlerinde kullanılan malzemelerin arazi koşullarına yeteri kadar uyum gösterememesinden kaynaklanan arızaların yanında teçhizat noksanlığı veya istasyon kurulamayacak şartlara sahip olunması durumunda nehir akımlarının belirlenmesinde değişik teknikler kullanılmış hidrolojik modeller ortaya atılmıştır. Genel olarak akım tahminleri için yağış akış ilişkileri kullanılmış veya yakın istasyonların akımları kullanılarak istenilen yerdeki akımların tahmin edilmesine çalışılmıştır. Gerek dünyada gerekse yurdumuzda imkanların el vermediği bölgelerde yapılacak çalışmalara yardımcı olması maksadı ile, akım tahminlerinde kurulan modellerin başarımının arttırılması ve daha iyi tahminler elde edilmesi, hem ekonomik olarak bir kazanım sağlayacak hem de kullanım açısından pratiklik getirecektir.

Akarsu akım serilerinde ise gerek arazi şartları gerekse ölçüm araçlarında olan problemlerden kaynaklanan ölçüm eksikleri oluşmaktadır. Bunların tahmini ve tamamlanmasında en sık kullanılır yöntem zaman serisi modelleridir. Zaman serisi modelleri yalnızca veri tamamlamada kullanılmaz ileriye yönelik tahminlerde ve sentetik seri türetilmesinde de zaman serileri modelleri kullanılır. Modellerin tahmin gücünde elde edilebilecek bir iyileşme bu sık kullanılır modellerin uygulamalarında ekonomik açıdan büyük kazanımlar sağlayabilir.

Su kaynakları sahasında kullanılan verilerin kararsız oluşu, verilerin yeteri kadar iyi analiz edilememesine neden olmaktadır. Verilerin kararlı olmayışı bu nedenle de zor analiz edilişi modellerin başarımını azaltmakta ve modellerin fiziksel olarak bölgenin

karakterini içermemesine neden olmaktadır. Bu tür kararsız serilerin analizinin daha iyi yapılabilmesi modellemede de büyük kolaylık ve yararlar sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada dalgacık dönüşümleri, veri analizlerinin çok önemli olduğu ve kararlı olmayan verilerin sıklıkla kullanıldığı bir saha olan nehir akımları olaylarının incelenmesinde kullanılmıştır. İlk defa nehir akımlarının modellenmesinde kullanılan dalgacık dönüşümü teknikleri, bu çalışmada iki ayrı bölüm halinde uygulanmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak istasyonlar arası akım tahminlerinde ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenleri kullanan yüksek başarımlı bir teknik ortaya konulmuştur. İkinci olarak akım serilerinin modellenmesi ve tahmininde yine ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerden uygun olanları kullanılarak zaman serisi modellemesi yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Modelleme öncesinde, çalışmada öncelikle yapılan işlem kararlı olmayan akımların karakterlerini analiz ederek ortaya koymaktır. Akım serilerinin karakterlerini ortaya koymak, modelleme yapmadan önce olayın fiziksel değişimini anlamak açısından önem arz eder. Akarsu akım ölçümleri öncelikle Fourier, kısa süreli Fourier yöntemleri ile analiz edilmiştir. Dalgacık dönüşümü tekniği hem zaman hem de frekans ortamında kararsız serilerin incelenmesinde yüksek bir başarım sergiler. Bu nedenle seri içerisindeki kararsız yapıların ortaya konulabilmesi için seriler sürekli ve ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla da analiz edilmişlerdir. Analizler sırasında değişik nehir akım serilerine sürekli dalgacık dönüşümü uygulanmış ve global dalgacık spektrumları hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen bilgiler kullanılarak akım serileri modellenmiştir.

İlk olarak iki istasyon arasındaki akım serileri ayrık dalgacık dönüşümü uygulanarak bileşenlerine ayrılmıştır. Bu ayrıştırma işlemi ayrık dalgacık dönüşümünü kullanan çok çözünürlüklü analiz metodu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bileşenlerin enerji spektrumları hesaplanmıştır. Modellemede sırasında ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla elde edilen bu bileşenler kullanılmıştır. Bileşenlere ayrılan iki istasyon ait akım serilerinin aynı seviyedeki bileşenler arasında modeller oluşturulmuştur. Elde edilen model sonuçları farklı hata ve karşılaştırma kriterler ile değerlendirilmiştir. Modelleme sonuçlarında yüksek enerjili ve bölgenin iklim karakteristiğine uygun bileşenler arasında kurulan modellerin diğer modellere göre bir çok hata kriteri bakımından daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca iki istasyona ait ölçüm serileri arasında da model oluşturulmuştur. Sonuçlar bu modelle

de karşılaştırılmıştır. Model sonucunda elde edilen tahmin serilerinin dağılımları incelenmiş ve ölçüm serisi dağılımı ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Modelleme sonuçları analiz sonuçları ile de uyum göstermiştir. Analiz sonucunda bölgenin iklimsel karakteristiği ile uyum gösteren bileşenlerin oluşturduğu modeller hesaplamalar sonucunda az hata üretmişlerdir. Teknik coğrafi bir karşılaştırma olması amacı ile iklim karakteristikleri faklı olan bir başka bölgede de uygulanmıştır. Bu bölgede seçilen istasyonların aynı kol üzerinde olmaması ve bir çok kararsız periyodik davranışlara sahip olması modellemeyi güçleştirici etkenlerden olmuştur. Bu uygulamada da öncekinde takip edilen yol izlenmiş ve akım serileri bileşenleri enerji spektrumları yardımıyla analiz edilmiştir. Daha sonra her bileşen ile kendi seviyesindeki diğer istasyona ait akım serisi bileşeni arasında model oluşturulmuştur. Modelleme sonucunda bazı bileşenler arasında oluşturulan modellerin çok daha iyi tahminlerde bulunduğunu hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ölçüm serileri arasında kurulan modelle karşılaştırılmıştır. Bir çok modelin ölçüm serisi modelinden daha iyi tahminde bulunduğu görülmüştür. Sonuçlar, analiz sonuçları ile de uyum sağlamıştır.

Tez çalışmasında ortaya konan diğer çalışma, akım serilerinin modellenmesi ile ilgilidir. Bu çalışmada da ilk önce zaman serileri analiz edilerek iklimsel karakteristikleri ortaya konulmuştur. Akım serileri öncelikle Fourier ve kısa süreli Fourier teknikleri ile analiz edilmiştir. Daha sonra kararsız yapının ortaya çıkarılması için sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla incelenmiştir. Sürekli dalgacık dönüşümü yapılan zaman serisinin global spektrumu da çizilmiştir. Böylece akım serisinin fiziki karakteri ortaya konmuştur. Ardından akım serisi için uygun otoregresif model araştırılmıştır. Değişik modeller denenerek en uygun model Akaike kriterine göre ve pratik uygulanılabilirlik açısından değerlendirilerek seçilmiştir. Daha sonra ayrık dalgacık dönüşümünü kullanan çok çözünürlüklü analiz yardımıyla akım serisi bileşenlerine ayrılmıştır. Ayrılan bileşenler kendi aralarında 28 farklı kombinasyonla tekrar toplanarak 28 farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller önceden belirlenmiş otoregresif model türüne uygun olarak modellenmiştir. Sonuçlar her kombinasyonun toplam enerjisi ve üç farklı hata kriterine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçüm serisinin kendisi için de bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model önceden belirlenen model türüne uygun olarak yapılmıştır. Oluşturulan bu modelle diğer 28 model karşılaştırılmıştır. Sonuçta değişik kombinasyona sahip bir çok model, ölçüm serisi modelinden daha az hata veren tahminlerde bulunmuştur. Daha

az hata veren modeller incelendiğinde bu modellerin, analizlerle ortaya konan ve bölgenin iklimsel davranışları ile uyum gösteren bileşenlerin bulunduğu modeller olduğu görülmüştür.

Akım serilerinin modellenmesi ile ilgili bir başka incelemede kısa süreli akım serilerinin modellenmesi ile ilgilidir. İncelemede kullanılan veriler önceki çalışmada kullanılan aynı ölçüm istasyonuna ait 15'er dakika aralıkla ölçülmüş akım serisi verileridir. Bu seri için de öncelikle sürekli dalgacık dönüşümü hesaplanmıştır. Ardından çizilen global spektrumla serinin periyodik karakteri ortaya konulmuştur. Daha sonra ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak seri bileşenlerine ayrılmıştır. Ayrılan bileşenler 27 ayrı kombinasyonla tekrar toplanmıştır. Bu kombinasyonların her birisi için oluşturulan modellerin toplam enerjileri ve değişik hata kriterlerine göre tahmin hataları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca ölçüm serisinin kendisi için de bir model oluşturularak diğer modeller ile bu model de karşılaştırılmıştır. Sonuçta analiz sonucunda da ortaya konan serinin karakteristik özelliklerini ifade eden bileşenleri içeren kombinasyonlar ile oluşturulan modellerin daha yüksek başarım gösterdiği hesaplanmıştır. Ayrıca diğer uygulamalarda görüldüğü gibi oluşturulan bir çok model ölçüm serisi modelinden değişik hata kriterlerine göre daha başarılı olmuştur.

Dalgacık dönüşümünün hidrometeorolojik ve hidroklimatolojik sahalarda uygulanışları son derece yenidir. Dalgacık dönüşümü tekniği ilk defa bu doktora çalışması ile akım modellemesinde kullanılmıştır. Literatürde 10 yılı geçmiş çalışmalara sık rastlanamamıştır. Elde edilen ilk çalışmalar 1993 yılına ait yağış verilerinin analizi üzerinedir (Kumar ve Foufoula-Georgiou, 1993). Konunun uygulanışının çok yeni olması ve ilerde yapılacak çalışmalara ışık tutması amacı ile literatürdeki çalışmalar genişçe özetlenmiştir. Bu sayede yapılan çalışmada kullanılan tekniğin uygulamalar ile daha iyi anlaşılması istenmiştir. Ayrıca bu bölümün ileride yapılabilecek çalışmalar içinde bir kaynak olması düşünülmüştür. Bu nedenle çalışmanın 2. bölümünde ayrı bir başlık olarak önceki çalışmalar verilmiştir. 3. Bölümde dalgacık analizinin temelleri, vektör cebrinden itibaren ele alınarak anlatılmıştır. İlk önce zaman serileri ve işaret işleme tekniklerinden söz edilmiştir. Ardından dönüşümler ele alınmıştır. Sırası ile Fourier ve kısa süreli Fourier dönüşümleri ve hesap prensipleri izah edilmiştir. Dalgacık analizi sürekli dalgacık dönüşümü, ayrık dalgacık dönüşümü ve çok çözünürlüklü analiz konuları 3.

temel olarak anlatılmış ve çalışmada kullanılan teknikler açıklanmıştır. 3. bölümde son olarak global dalgacık spektrumu ve çapraz korelasyon hesaplamalarına değinilmiştir. Çalışmanın 4. bölümü modelleme çalışmalarından oluşmaktadır. Bu kısımda ele alınan akım verilerinin bileşenlere ayrılması hesapları yapılmıştır. Ayrıca bileşenlerin ölçüm serileri ile ilişkileri analiz edilmiştir. Bileşenlerin enerji spektrumlarındaki aldığı değerler hesaplanarak grafik halinde gösterilmiştir. Enerji değerleri analiz edilerek bölgenin iklimsel yapısı ile karşılaştırılmıştır. Bölgenin iklim yapısından kaynaklanan özellikleri ile enerji spektrumu arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Son olarak bileşenler arası modeller oluşturulmuştur. Bu bölümde oluşturulan modeller çeşitli hata kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar bileşenlerin enerji spektrumlarına bakılarak değerlendirilmiştir. İstasyonlar arası modellerin coğrafya üzerindeki etkisi de bu bölümde incelenmiştir. İki bölge arasında modelleme sonucunda ortaya çıkan farklılıklar bölgesel karakteristikler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Dalgacık dönüşümünün akım serilerinin modellenmesinde kullanılması ile ilgili çalışmalarda bu bölümde yer almaktadır. 4. bölümde günlük ölçüm değerlerine sahip bir akım serisinin öncelikle sürekli dalgacık dönüşümü analizi ile karakteristik özellikleri ortaya konulmuştur. Sürekli dalgacık dönüşümü sonuçları global dalgacık spektrumu ile yorumlanmıştır. Bileşenlere ayrılan akım serisi, bileşenlerin kendi aralarında farklı kombinasyonlar ile tekrar toplanarak elde edilen yeni zaman serileri uygunluğu Akaike Informasyon Kriteri (AIK) tarafından belirlenen bir model ile modellenmiştir. Sonuçlar değişik hata kriterlerine göre test edilmiştir. 5. bölümde yapılan analizler ve modelleme sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Modellemede uygulanılan bu tekniğin yararlı sonuçları üzerine değinilmiştir.

Sonuç olarak ilk defa bu çalışmada dalgacık dönüşümü tekniği, akarsu akım modellemelerinde kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tekniğin analiz gücü ve çok çözünürlüklü analiz yardımıyla serinin değişik periyottaki bileşenlerinin elde edilmesi, modellemede yüksek bir başarım elde edilebilmesini sağlamıştır. Su kaynakları alanında, dalgacık dönüşümü tekniği kullanımının çok daha yararlı olabileceği yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dalgacık dönüşümünün hidrometeorolojik ve hidroklimatolojik sahalarda uygulanışları son derece yenidir. Literatürde 10 yılı geçmiş çalışmalara sık rastlanamamıştır. Elde edilen ilk çalışmalar 1993 yılına ait yağış verilerinin analizini içermektedir (Kumar ve Foufoula-Georgiou, 1993). Konunun uygulanışının çok yeni olması ve ilerde yapılacak çalışmalara ışık tutması amacı ile literatürdeki çalışmalar genişçe özetlenmiştir. Bu sayede yapılan çalışmada kullanılan tekniğin uygulamalar ile daha iyi anlaşılması istenmiştir. Ayrıca literatür olarak da bir kaynak olması düşünülmüştür. Bu bölümde önceki çalışmaların bir kısmı daha ayrıntılı açıklanarak işlemlerin kronolojik gelişimi ortaya konulacaktır.

Su kaynakları sahası ile hidrometeorolojik ve hidroklimatolojik çalışmaların birbirleri ile olan ilişkileri özellikle son on yılda yapılan çalışmalar ile çok daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmuş ve neredeyse birbiri ile olan ilişkilere değinmeyi zorunlu kılmıştır. Bu sahaların birbiri içine geçmiş doğası göz önünde bulundurularak bir ayrım yapmak her ne kadar güç olsa da, yapılan çalışmaları dört ana başlıkta toplanarak verilecektir. Bunlardan ilki daha çok meteorolojik verilerin işlenmesi ve yorumlanması kapsamaktadır ve **hidrometeoroloji** ile ilgili çalışmalar başlığı ile verilecektir. İkincisi su kaynakları sahasını daha yakından ilgilendirebileceği düşünülen, verilerin işlenip yorumlandığı çalışmaları içeren **su kaynakları** ile ilgili çalışmaları başlığında toplanan çalışmalardır. Üçüncü kısımda hidrometeorolojik sahaya kısmen uzak sayılsa bile kıyı bilimleri ve akışkanlar mekaniği sahalarında da özellik çıkarımı şeklinde adlandırılabilecek değişik çalışmaları içeren **hidrodinamik** uygulamaları ile çalışmalar başlığı ile incelenecek literatür kısmıdır. Dalgacık dönüşümü teknikleri son zamanlarda modellemede de kullanılmaktadır. Bu bakımdan çalışmada, son olarak birkaç adet olan ve su kaynaklarından farklı sahalarda yapılmış modelleme çalışmalarının incelendiği **modelleme** ile ilgili çalışmaları başlığı ile verilen çalışmaları içermektedir.

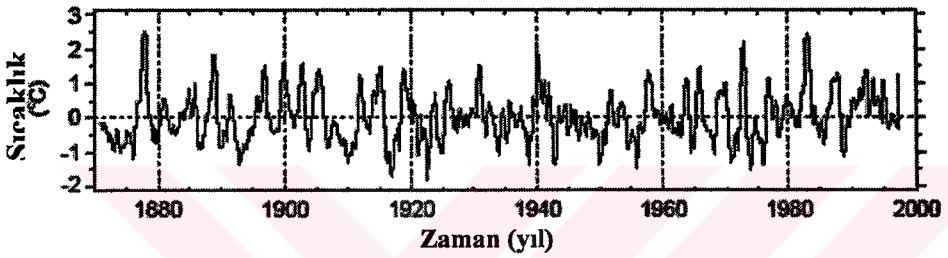
2. 1 Hidrometeoroloji ile ilgili çalışmalar

Meteoroloji alanında dalgacık dönüşümü tekniğinin ilk kullanıldığı çalışmalardan biri Kumar ve Foufoula-Georgiou tarafından yapılmıştır (Kumar ve Foufoula-Georgiou, 1993). Çalışmada yağış verileri çok çözünürlüklü analiz ile bileşenlerine ayrılmış ve ayrılan her bileşen analiz edilmiştir. Daha sonra uydu görüntülerinden bu yöntem yardımıyla yağış için analizler yapılmıştır.

1996 yılında yapılan bir diğer çalışmada saatlik yağış şiddeti ölçümlerinin enerji bileşenleri ve şiddetli yağışların zaman-frekans ortamındaki analizleri yapılmıştır (Venugopal ve Foufoula-Georgiou 1996). Çalışmada dalgacık paketleri ve sürekli dalgacık dönüşümü açıklanmıştır. Dalgacık dönüşümlerinde kullanılan fonksiyonların en iyilenmesi konusunda literatür bilgileri verilmiştir. Uygulamalar iki yıl içinde gerçekleşen 7 tane şiddetli yağış üzerinde yapılmıştır. Yağışların toplam süreleri 2,9 ila 26,9 saat arasında değişmektedir. Yağış ölçüm sıklığı ise en uzun yağış süresinde 10 saniye aralıkla diğerlerinde ise 5'er saniye aralıkladır. Tüm yağışlar, Daubechies 20 dalgacığı kullanılarak elde edilen zaman-frekans enerji görüntüleri yardımıyla analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler genelde kısaltılarak 2'nin katı olacak sayıya indirgenmiş ve analizler bu sayıdaki veriler için yapılmıştır. Bunun nedeni analiz sırasında 3. bölümde açıklanacak olan Nyquistic kriterine uyulması gerekliliğidir. Zaman-frekans-enerji ortamında yapılan analizlerle yağış olayının karmaşık yapısı incelenmeye çalışılmıştır. İncelemeler normalize edilmiş frekans spektrumları ve en iyi taban fonksiyonlarının frekans spektrumları ile eş güdümlü olarak yürütülmüştür. Frekans–enerji grafiklerinde elde edilen pik değerler zaman-frekans-enerji görüntülerindeki değişimler ile karşılaştırılarak yağış olayları arasındaki farklılıklar incelenmeye çalışılmıştır. Öte yandan aynı çalışmada yağış verilerinin sıkıştırılması ile ilgili bir irdeleme de yapılmıştır. Yapılan dalgacık paket dönüşümü yardımıyla elde edilen katsayılardan değişik sayılarda kullanılarak yağış zaman serileri yeniden elde edilmiştir. Sonuçlar geri dönüşüm yapılan yağış serisinin içerdiği toplam enerji ile orijinal serinin enerjisi karşılaştırılarak test edilmiştir. Mesela 8192 örneğe sahip 10 saniye kayıt aralığına sahip birinci yağışın en yüksek 50 dalgacık dönüşüm katsayısı kullanılarak yapılan geri dönüşümde elde edilen yeni serinin enerjisi orijinal serinin enerjisinin % 81'i kadardır. Geri dönüşümde kullanılan katsayılar 1500'e kadar çıkarıldığında enerji yakalama yüzdesi 99'a çıkmaktadır. Bu ise 8192 elemanlı bir matrisin 1500 eleman ile %99 doğrulukla

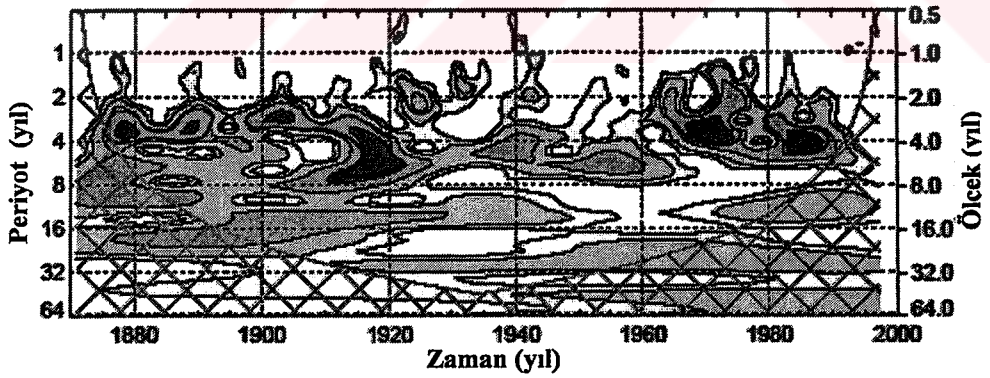
temsil edilebileceğini, yani kısaca serinin sıkıştırılabileceğini göstermektedir. Bu sonuç veri depolamadan veri türetmeye kadar bir çok alanda önemli bir kapı açmaktadır.

Torrence ve Compo, dalgacık analizi için pratik bir rehber şeklinde oluşturdukları çalışmalarında atmosfer olaylarının analizinde bu teknikten yararlanmışlardır (Torrence ve Compo, 1997). Çalışmada El Nino güney atlantik salınımı (El Nino-Southern Oscillation, ENSO), deniz suyu yüzeyi sıcaklık değerleri (SST) ele alınmıştır. Ölçüm periyodu 1871 ile 1996 yılları arasındadır. Ölçüm değerlerinden mevsimlik ortalamalar çıkarılarak anomaliler elde edilmiştir. Bu anomali serisi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 1871-1996 yılları arasında su yüzeyi sıcaklık değerleri anomali serisi.

Deniz su yüzeyi sıcaklığı verileri için Morlet dalgacığı kullanılarak dalgacık dönüşümü yapılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Su düzeyi sıcaklık verilerinin Morlet dalgacığı kullanılarak elde edilen dönüşümleri

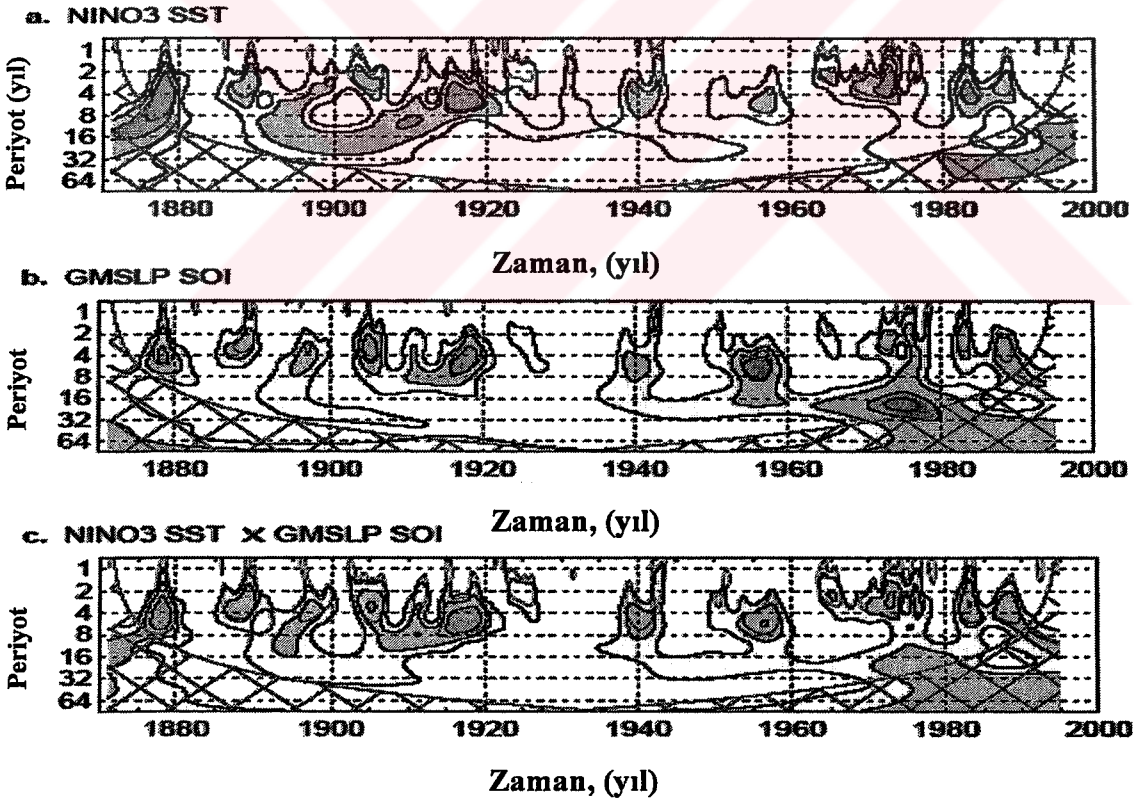
Ayrıca uzun dönemli kayıt olarak Ocak 1871 ile Aralık 1994 yılları arasındaki deniz seviyesi basınç değerleri incelenmiştir. Anomali serisi ilk üç harmonik olan 365,25-182,65-121,75 günlük dönüş periyotların en küçük kareler yöntemi kullanılarak kaldırılması ile oluşturulmuştur.

Çalışmada global dalgacık spektrumu ve Fourier güç spektrumu arasındaki ilişkiler 1 gecikmeli Markov modeli ile (AR1) türetilen 100,000 adet kırmızı gürültü sinyali ve beyaz gürültü sinyali kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmada diğer bir dikkati çeken konu ise iki farklı değişken için dalgacık dönüşümlerinin sonucunda elde edilen katsayılarının çarpılarak ortak etkilerinin açığa çıkarılması işlemidir. Bu işlem sonucunda elde edilen spektruma çapraz dalgacık spektrumu (Cross-wavelet spectrum) adı verilir. Çapraz spektrum işlemi iki ayrı dönüşümün bir iç çarpımı işleminden geçirilmesidir.

Şekil 2.3-a' da El Nino deniz suyu yüzeyi sıcaklığı (Nino3 SST) ve Şekil 2.3-b' de Güney Atlantik Salınımı İndeksi (Southern Oscillation Index , SOI) değerlerinin dalgacık dönüşümleri görülmektedir. Şekil 2.3-c' de ise bu iki dönüşümün çapraz çarpımı sonucu elde edilen değerler görülmektedir.

Genel karakter olarak her iki serinin dönüşümlerinden elde edilen şekillerde 2 ile 8 yıl ölçekleri arasında yoğun değerler oluştuğu gözlemlenmektedir. Çapraz güç spektrumunda da bu bölgede yoğunlaşma olduğu görülmektedir.



Şekil 2.3 El Nino deniz suyu yüzeyi sıcaklığı, Güney Atlantik Salınımı İndeksi için elde edilen dalgacık dönüşümleri ve bu iki dönüşümün çapraz çarpımı.

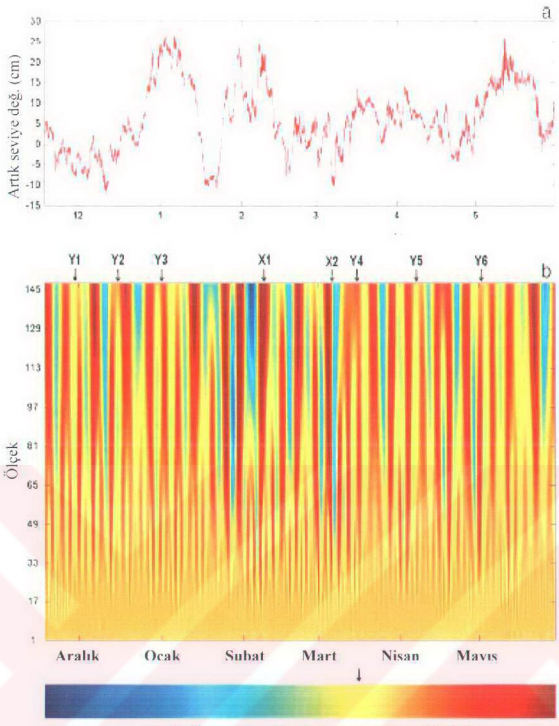
Çalışma sonucunda uzun dönemli deniz yüzeyi sıcaklık değerleri (SST), deniz seviyesi basınç (SLP) değerleri, Güney Atlantik Salınımlarının (SOI) incelenmesi on

yıllar arasındaki değişimde 1920 ile 1960 yılları arasında düşük varyansa sahip bir değişim tespit edilmiştir. Filtrelenmiş 2-8 yıllık varyans ve çapraz dalgacık güç spektrumu kullanılması ile SST'deki varyansın değişimi ile SOI'deki varyansın değişiminin uygunluğu görülebilmektedir.

Hidrometeorolojik olayların incelenmesi ve birbirleri ile olan ilişkilerinin ortaya konması özellikle bu alanda yapılacak modelleme çalışmaları için önem arz eder. Drago ve Boxall yaptıkları çalışmada deniz seviyesi değişimleri ve hava basıncı ölçümlerini iki periyot halinde dalgacık dönüşümü (DD) yardımıyla analiz etmişlerdir (Drago ve Boxall, 2002). Çalışmada hem sürekli dalgacık dönüşümü hem de ayrık dalgacık dönüşümü yöntemleri artık deniz seviyesi değişimi (residual sea level) ve ters dönüştürülmüş hava basıncı (inverted air pressure) değerlerini analiz etmede kullanılmıştır. Çalışmada seviye değişimi verileri içindeki gel-git olmayan artık seviye değişimlerini izole etmek için gel-gitler en küçük kareler yöntemini kullanan bir harmonik analiz programı kullanılarak hesaplanmış ve orijinal seriden çıkarılmıştır. Her iki çalışmada bir arada yapıldığından iki yöntemde de kullanılabilecek bir ortogonal dalgacık türü olan "Symlet" dalgacığı kullanılmıştır. İlk yapılan analiz 18/11/95 ile 18/05/96 tarihleri arasından ölçülmüş saatlik ortalama artık su seviyesi değişimi verileri içindir. Artık su seviyesi zaman serisi ve zaman-ölçek ortamında çizilen dalgacık dönüşümü katsayıları Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Şekil 2.4-a'da ki şekil artık seviye değişimi zaman serisini göstermektedir. Şekil 2.4-b'de ise bu zaman serisine ait dalgacık dönüşümü verilmiştir. Şekilde yatay ekseni zamanı, düşey ekseni ise ölçek değerlerini göstermektedir. Dalgacık katsayılarının büyüklüğü en altta görülen bir renk ölçeği yardımıyla tespit edilmiştir. Şekilde koyu mavi renkli bölgeler en düşük eksi değerleri gösterirken koyu kırmızı bölgeler is en büyük artı değerleri göstermektedir.

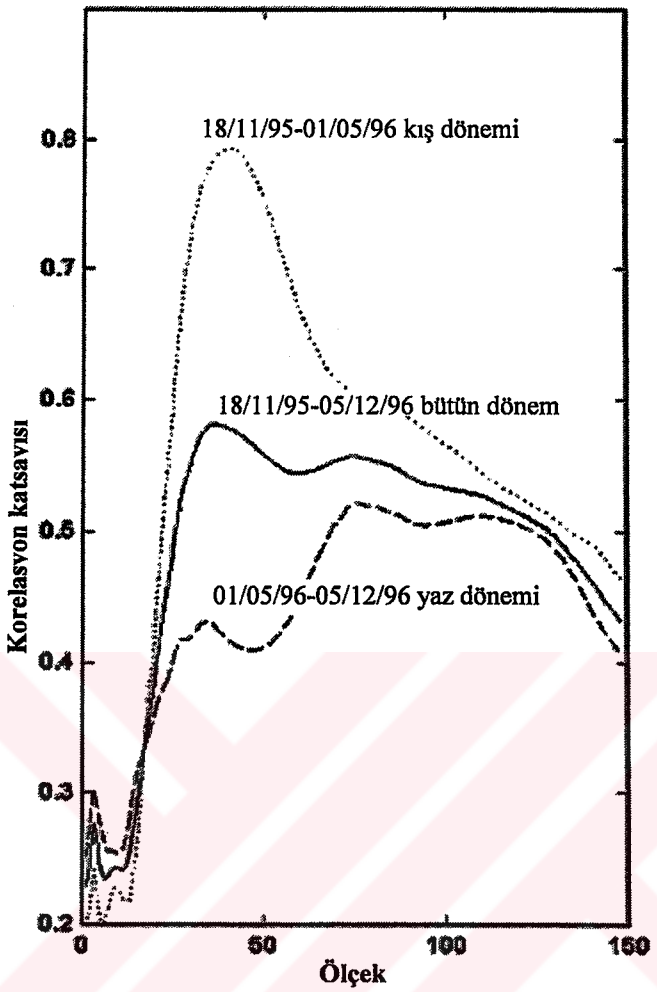
Sürekli dalgacık dönüşümü ilginç sonuçlar açığa çıkarmaktadır. Mesela Şubatın ilk ve üçüncü çeyreğinde (X_1) ve Martın başlangıcındaki (X_2) gibi nadir görülen yoğun değişimlerin iç içe yaşandığı ve ani değişimler sergileyen olaylar dalgacık dönüşümü yardımıyla görülebilmektedir. Bir başka ilginç sonuç bazı değişimlerin yaşandığı bölgelerin sınırlı bir ölçek aralığında kalmasıdır. Bu tür olaylar Y_1-Y_6 noktaları şeklinde işaretlenmiştir. Fark edilebilir bir diğer durum ise çok küçük denilebilecek olayların (ripple) daha çok belirli, 20, ölçek değerinin altında görülmesidir.



Şekil 2.4 Artık su seviyesi zaman serisi ve zaman-ölçek ortamında çizilen dalgacık dönüşümü katsayıları

Çalışmada, artık su seviyesi değişimi ve ters dönmüş atmosfer basıncı parametrelerinin ayrı ayrı yapılan sürekli dalgacık dönüşümleri sonucunda elde edilen katsayıların korelasyonları incelenmiştir. Çapraz korelasyon grafiği sonuçları mevsimlere göre incelendiğinde iki parametre arasındaki ilişki Şekil 2.5'de gösterilmiştir.

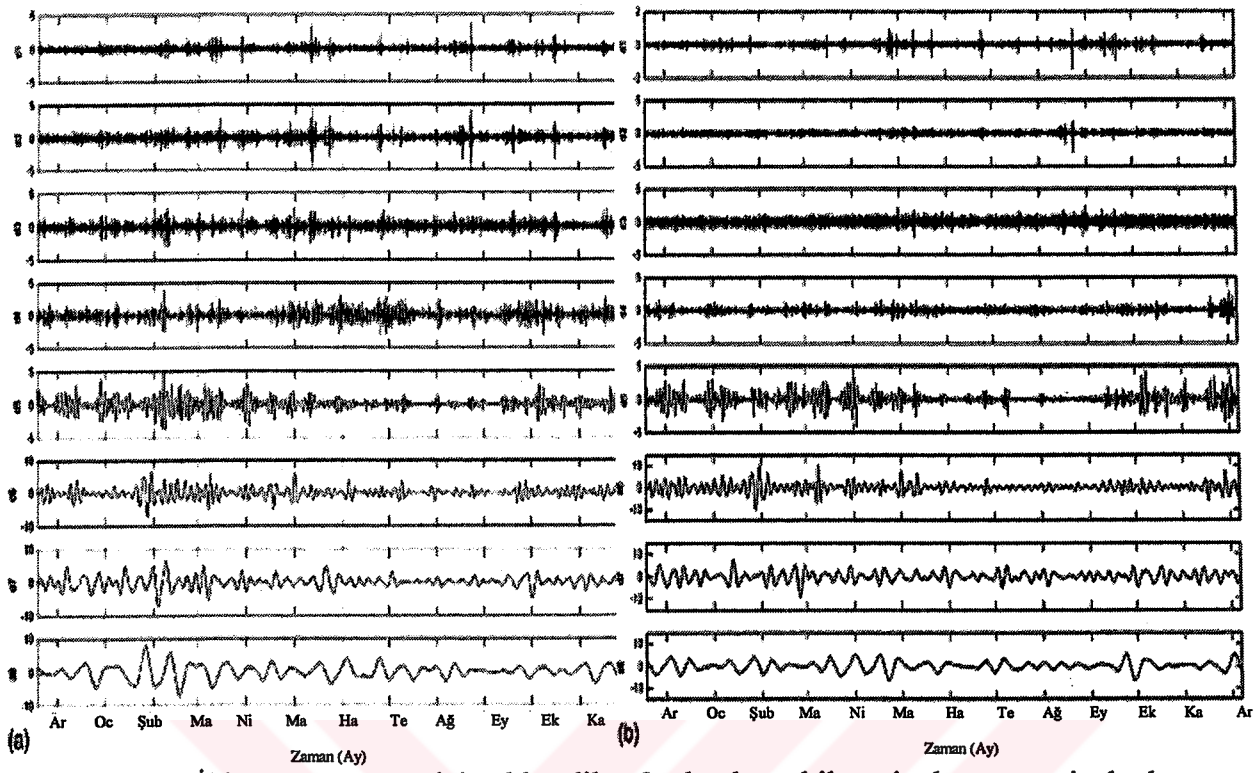
Şekil 2.5'de görüleceği üzere iki parametre arasındaki ilişki düşük ölçeklerde önemsiz iken yüksek ölçeklerde daha anlamlıdır. Özellikle 40 ölçek değerin yakınında iki parametre en yüksek ilişkiyi ortaya koymaktadır. İlişkiyi mevsimlik olarak incelediğimizde kuzey yarım kürede kış mevsiminde ilişkinin anlamlılığı artarken yaz mevsiminde daha farklı ölçeklerde daha anlamlı ilişkiler belirmektedir.



Şekil 2.5 Çapraz korelasyon grafiği sonuçlarının mevsimlere göre karşılaştırılması

Çalışmada irdelenen bir başka inceleme ise ayrık dalgacık dönüşümü yardımı ile yapılmıştır. Çalışmada iki ayrı parametre 8 seviyede bileşenlerine ayrılmıştır. İki ayrı parametre için elde edilen 8 adet detay bileşeni birbirleri ile benzer seviyelerde karşılaştırılmıştır (Şekil 2.6). Şekillerdeki yatay eksen zamanı, düşey eksen ise o bileşene karşı gelen genlik değerini ifade etmektedir.

Şekil 2.6-a'da su seviyesi değişimine ait 8 ayrı detay bileşeni görülmektedir. Şekil 2.6-b'de ise hava basıncı değerlerine ait 8 adet detay bileşeni görülmektedir. Detay bileşenlerinden birincisi (d1) 9 devir/gün frekansına sahip bileşenleri ifade ederken, sonuncusu (d8) 0,07 devir/gün frekansa sahip bileşenleri ifade etmektedir. Şekilde her iki parametreye ait ilk dört bileşenin mevsimlik olarak değişmediği görülebilmektedir. Daha yüksek seviyelerdeki bileşenler ise mevsimlere göre değişik yoğunlukta salınımlar göstermektedir.



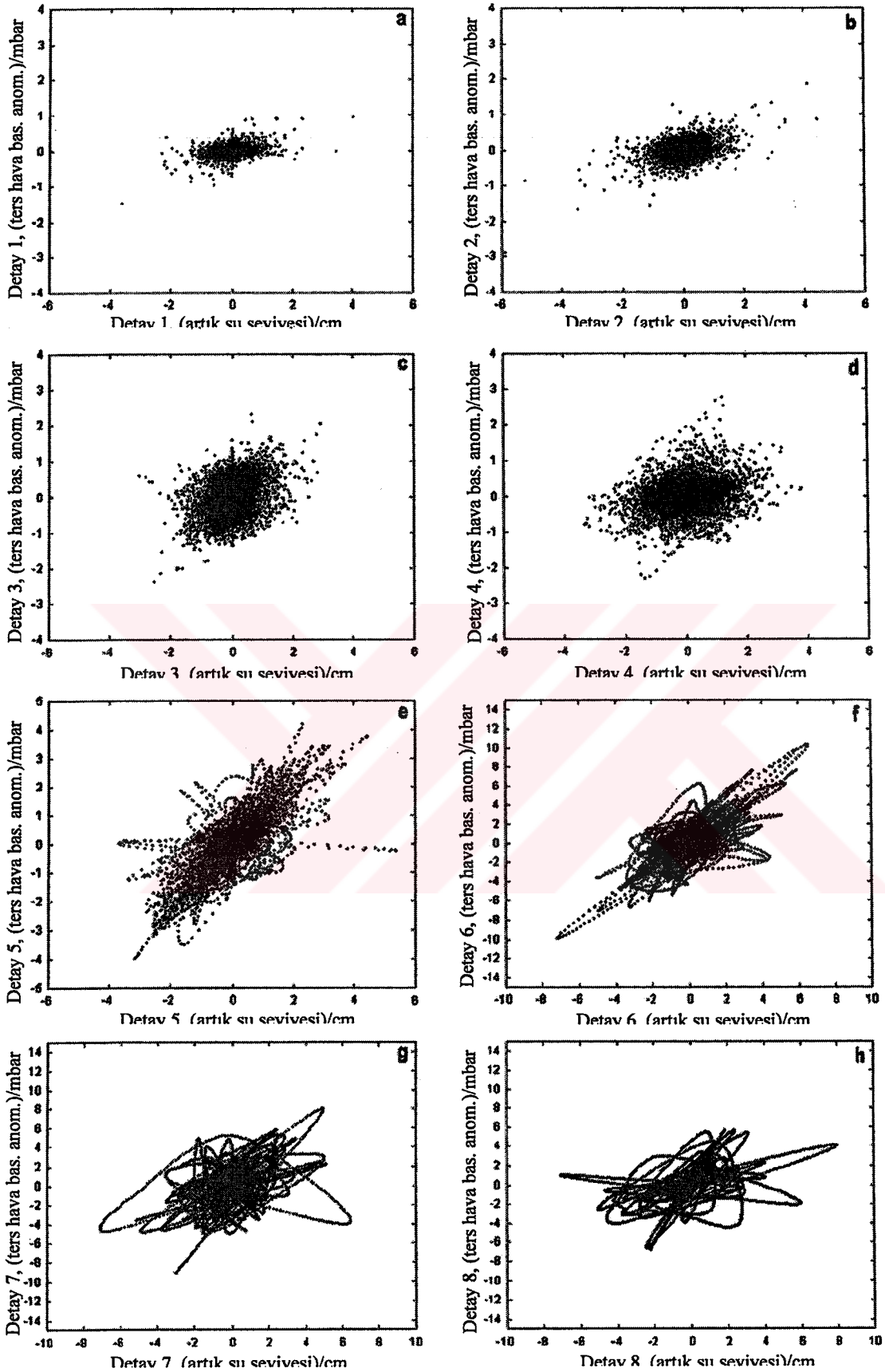
Şekil 2.6 İki ayrı parametre için elde edilen 8 adet detay bileşenin, benzer seviyelerde karşılaştırılmaları.

İki parametrenin detay bileşenleri arasındaki karşılaştırmalardan ilki benzer seviyelerdeki bileşenlerin saçılma diyagramlarına bakılarak korelasyon katsayılarının belirlenmesi şeklinde olmuştur. Şekil 2.7'de 8 ayrı seviyedeki her iki parametreye ait detay bileşenlerin saçılma diyagramları görülmektedir. Saçılma diyagramı analizinden iki parametre arasındaki en fazla uyumun beşinci ve altıncı detay bileşenleri arasında olduğu görülmektedir. Bu iki bileşen için elde edilen korelasyon katsayıları sırası ile 0,73 ve 0,72 dir.

Diğer detay bileşenleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları ise nispeten daha düşük kalmıştır. Her iki parametrenin detay bileşenler arasındaki korelasyon katsayıları Tablo 2.1'de verilmiştir.

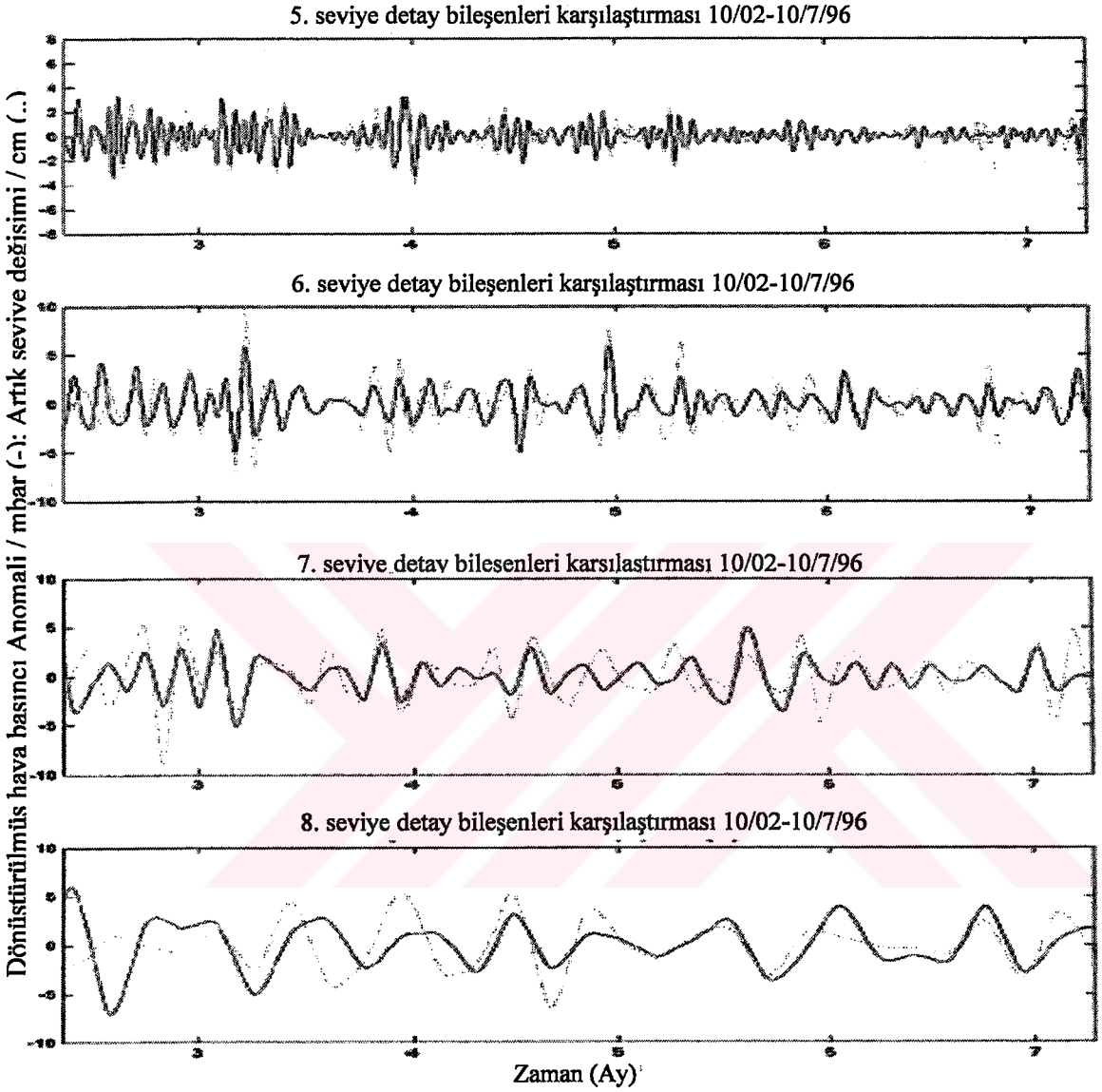
Tablo 2.1 Detay bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları

Detay seviyesi	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
Korelasyon katsayısı	0,300	0,359	0,356	0,215	0,726	0,718	0,400	0,471



Şekil 2.7 Her iki parametrenin detay bileşenleri arasındaki saçılma diyagramları

Bu iki parametreye ait detay bileşenleri arasındaki uyum detay bileşenlerinin üst üste gösterimine bakılarak da anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu iş için korelasyon değerleri en yüksek olan bileşenler üst üste çizilerek gösterilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 5., 6. ve 7. seviye detay bileşenlerinin üst üste gösterilerek karşılaştırılmaları

Şekilde hava basıncı ve su seviyesi değişimi parametrelerinin altıncı ve yedinci seviye detay bileşenleri uzunca bir süre boyunca uyumlu görülmektedirler. Mesela nisan ve mayıs ayı boyunca bu iki parametre uyumlu bir gidiş sergilemektedir. Beşinci seviye detay bileşenindeki izostatik hava basıncına yakınlık, artık su seviyesi detayları ile uyumlu gidişini düzenli şekilde etkileyen güçlü hava değişimlerine kısmen bir delildir. Altıncı detay bileşeninde su seviyesi değişimine, hava basıncı anomalileri üzerindeki küçük bir değişimlerden daha güçlü bir yanıt verdiğinde

(Şubatın sonu ile Temmuzun ilk günü gibi bazı periyotlar olmasına rağmen), tepki genelde izostatik altındadır. Sonuçlar dalgacık dönüşümünün bir veya birden çok işaretin geçici bir çok detayının eldesinde, dalgacık dönüşümü kullanımının çok etkili olacağına açık bir örnektir.

Okyanus kıyısında olan bölgelerdeki deniz yüzey sıcaklığı, rüzgar hızı ve deniz seviyesi gibi parametrelere bağlı mevsimlere ve yıllara göre değişimlerin incelenmesi, bölgenin iklimsel karakteristiği açısından önemlidir. Özellikle yukarıda sayılan parametrelerin zamana bağlı incelenmesi bu sahayla ilgilenen bilim adamları için zorlu bir iştir. Mevsimlik değişimlerin yanında yıllara bağlı görülen El-nino ve La-nino gibi olaylarla parametrelerin incelenmesi içinden çıkılmaz hale dönüşebilmektedir. Parametrelerin zaman içerisindeki değişimlerinin incelenmesi sırasında kendi aralarındaki ilişkilerin incelenmesi de önem arz eder. Bu ilişkinin anlamlandırılması parametrelerin davranışlarının kavranmasında çok önemli ip uçları verir. Bu nedenle parametreler hem zamana bağlı hem de diğer parametrelere bağlı olarak incelenmelidir. Dalgacık dönüşümleri kararlı olmayan bu gibi işaretlerin incelenmesinde zaman içerisindeki yersenimleri (localization) başarı ile ortaya koyması bakımından analizler sırasında kullanılmıştır.

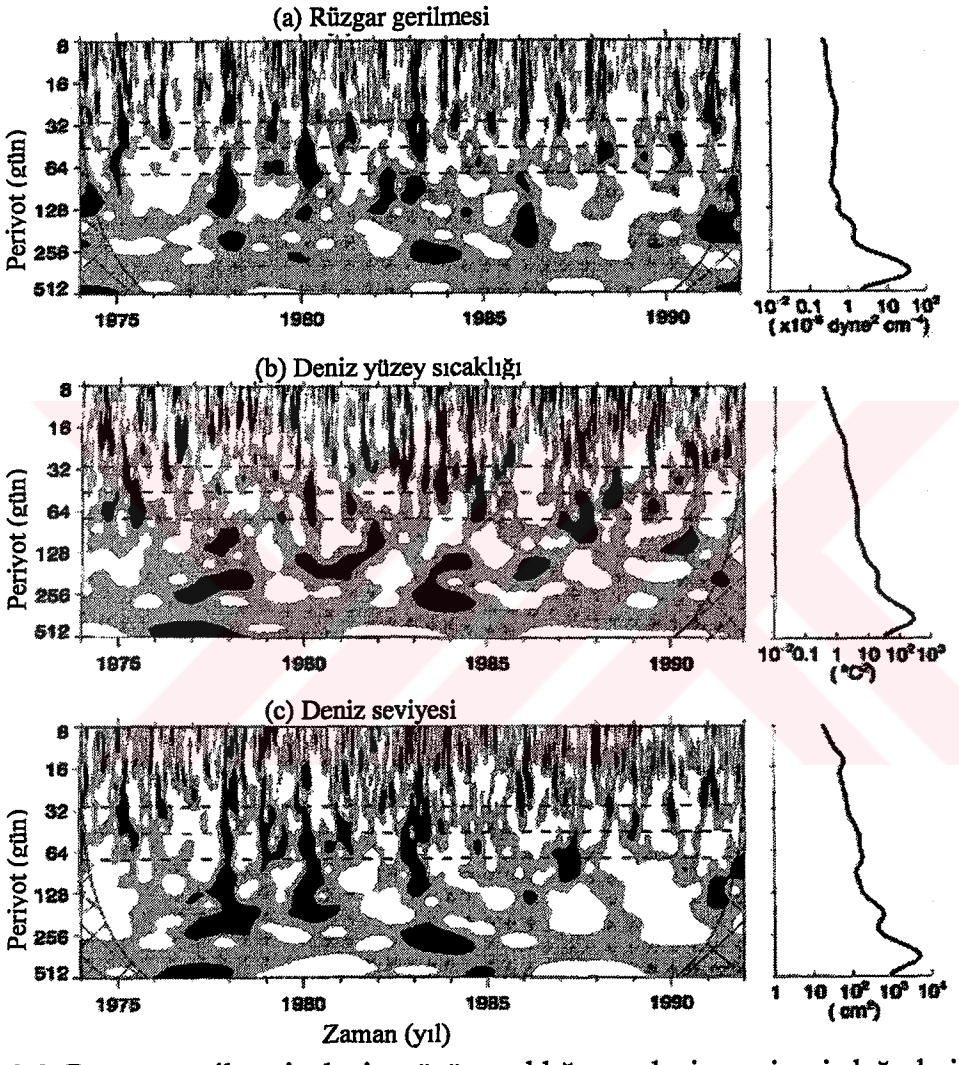
Breaker ve diğerleri Kaliforniya kıyısında 18 yıllık, günlük olarak ölçülmüş rüzgar yüzey basıncı, deniz yüzey sıcaklığı ve deniz seviyesi değişimi verileri yardımıyla mevsimsel değişimleri ve parametrelerin birbirleri arasındaki ilişkiyi dalgacık dönüşümü yardımıyla incelemiştir (Breaker ve diğ., 2001). Breaker ve arkadaşlarından önce yapılan bir çalışmada 40-50 gün civarındaki periyoda sahip bölgesel rüzgarlardaki çeyrek periyotlu (quasi-periodic) salınımlar, tropik Pasifik bölgelerindeki alçak trofosfer'de ilk defa gözlemlenmiştir. Bu salınımlar genellikle tropik Hint ve tropik batı Pasifik okyanusundaki konvektif karışımlardan meydana gelen Kelwin dalgalarını arttırmaktadırlar. Bu salınımlar yeryüzü etrafında batıya doğru 5-15 m/s hızla yayılırlar ve genellikle ekvator çevresinde ±20° ile sınırlıdırlar. Çalışmada ise bu tropikal salınımların atmosferin nispi açısal momentumundaki 50 günlük bir salınımla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bir gün boyunca olan gözlemlerin spektral analizleri de 50 gün civarındaki bir değişimi göstermiştir. Bir başka çalışmada bu çeyrek periyotlu salınımların frekanslarının 0,1-0,2 rad/gün, periyotlarının 63-31 gün olduğu da tespit edilmiştir. 40-50 günlük salınımların genliği mevsimlik olarak değişmektedir. Mesela Aralık ve Şubat ayları arasında en

büyük genlikler oluşurken, Haziran ve Ağustos ayları arasında en küçük değerleri oluşur. Genlik değerleri Tropikal Yakınsama Bölgesi (Intertropikal Convergence Zone) ile birleşen ısı yayılımının (konveksiyonun) mevsimlik yer değiştirmesi ile artmaktadır. Çalışmada ilgilenilen dönemler arası oluşan değişim yalnızca çok iyi bilinen 40-50 günlük oluşum nedeniyle değil sinoptik ve mevsimler arasında uzanan bir zaman ölçeği oluşması nedeniyledir ve bu durumda atmosferin mi okyanusu sürüklediği yoksa tersinin mi olduğu yeteri kadar açık değildir. Breaker ve diğerleri yaptıkları çalışma ile, hem dönemler arası salınımı hem de değişkenler arasındaki ilişkiyi incelemek için sürekli dalgacık dönüşümünü kullanmışlardır.

Çalışmada rüzgar gerilmesi, deniz yüzü sıcaklığı ve deniz seviyesi ölçüm değerlerine Morlet dalgacığı kullanılarak dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Her üç değişkene ait dalgacık dönüşümü spektrumları Şekil 2.9'da görülmektedir. Şekilde yatay eksen zamanı, düşey eksen ise dalgacık dönüşümü ölçeğine uygun Fourier periyodunu ifade etmektedir. Her resmin sağ tarafında oluşturulan grafik ise dalgacık dönüşümü spektrumunun günlere göre normalize edilmiş global dalgacık spektrumunu göstermektedir (Global wavelet spectrum). Global spektrum tüm kayıt uzunluğu boyunca geçici değişimlerin bir ortalama değerini yansıtmaktadır. Çalışmadaki hedeflerden birisi 30-70 günlük periyotlara sahip mevsimler arası bir periyodun belirlenmesidir. Global spektrumunda yıllık periyoda karşı gelen bir belirginlik açıkça görülmektedir. Buradan sonra açıkça görülebilen ikinci belirgin pik ise yıllık dönüşün birinci harmonik değerine karşı gelen 182 günlük bir dönüşeme yakın değerlerde oluşmaktadır. İncelenecek dönemler arası periyoda ait değerlerde belirgin olmayan bir yoğunlaşma görülebilmektedir. Dalgacık spektrumunda kesikli çizgi ile gösterilen ölçek değerleri arasında piklerin oluş periyodu kabaca 18 ay şeklinde ifade edilebilir ama genelde düzensizlik göstermektedir. Mesela 1977 ile 1980 yılları arsında deniz seviyesi değerleri için çizilen dalgacık spektrumunda bu piklerden iki adet görülebilmektedir ve 200 günlük ölçek değerine kadar genişlemektedirler. Rüzgar gerilmesi spektrumundaki en büyük değer ise 1980 ve 1983 yıllarında oluşmaktadır.

Dönemler arası salınımların daha ayrıntılı gösterilebilmesi için 18 yıllık ölçüm değerleri yıllık olarak ayrı ayrı alınarak incelenmiştir. Dalgacık spektrumu periyot değerleri bu inceleme sırasında 20 ile 100 gün arasında olacak şekilde sabit tutulmuştur. 1975, 1980 ve 1989 yıllarına ait her üç parametre için yıllık dalgacık

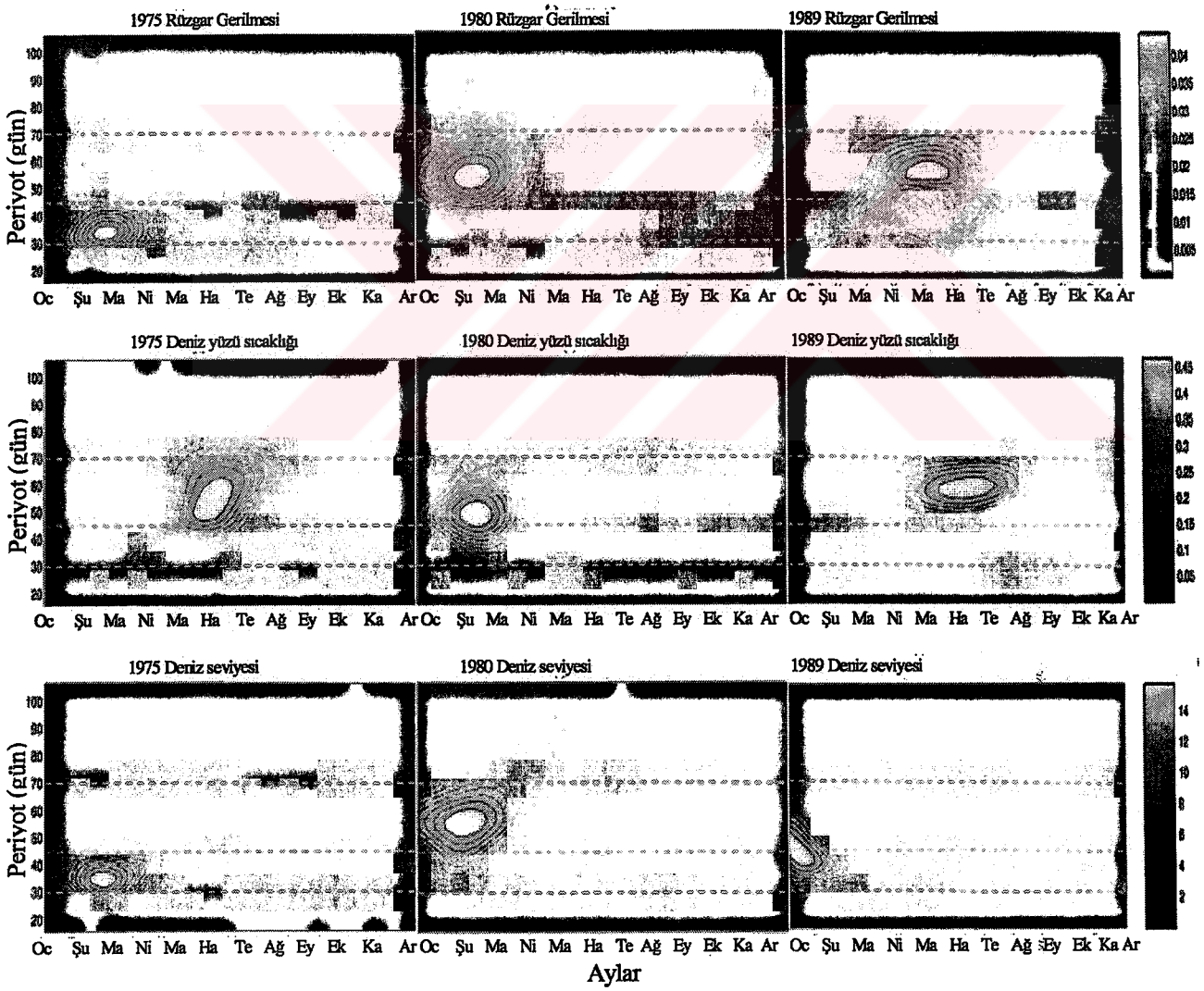
spektrumları Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekilde her sütün sırası ile 1975, 1980 ve 1989 yıllarına ait rüzgar gerilmesi, deniz yüzü sıcaklığı ve deniz seviyesi değerlerine ait dalgacık spektrumlarını göstermektedir. Şekillerin yatay ekseni zamanı, düşey ekseni ise olayların periyodunu gösteren eden ölçek değerini ifade etmektedir. Şekillerdeki parlaklık derecesi dalgacık katsayılarının yüksek değerli oluşu ile ilişkilidir.



Şekil 2.9 Rüzgar gerilmesi, deniz yüzü sıcaklığı ve deniz seviyesi değerlerine ait Morlet dalgacığı kullanılarak oluşturulmuş dalgacık dönüşümü spektrumları.

Şekilde 2.10'da 1975 yılına ait sütunda rüzgar gerilmesi ve deniz seviye spektrumlarındaki pik değerlerin Şubat ve Mart aylarında oluştuğu buna karşılık deniz yüzü sıcaklık değerlerinde ise bu zaman aralığında zayıf bir pikin meydana geldiği ve asıl kuvvetli pikin Haziran-Temmuz aylarında oluştuğu görülmektedir. 1975 yılına ait bir El-nino olayı yoktur. 1980 yılına ait dalgacık spektrumlarında her üç değişken de Şubat ve Mart dönemlerinde pik değerlere sahiptir. Bu durum 18

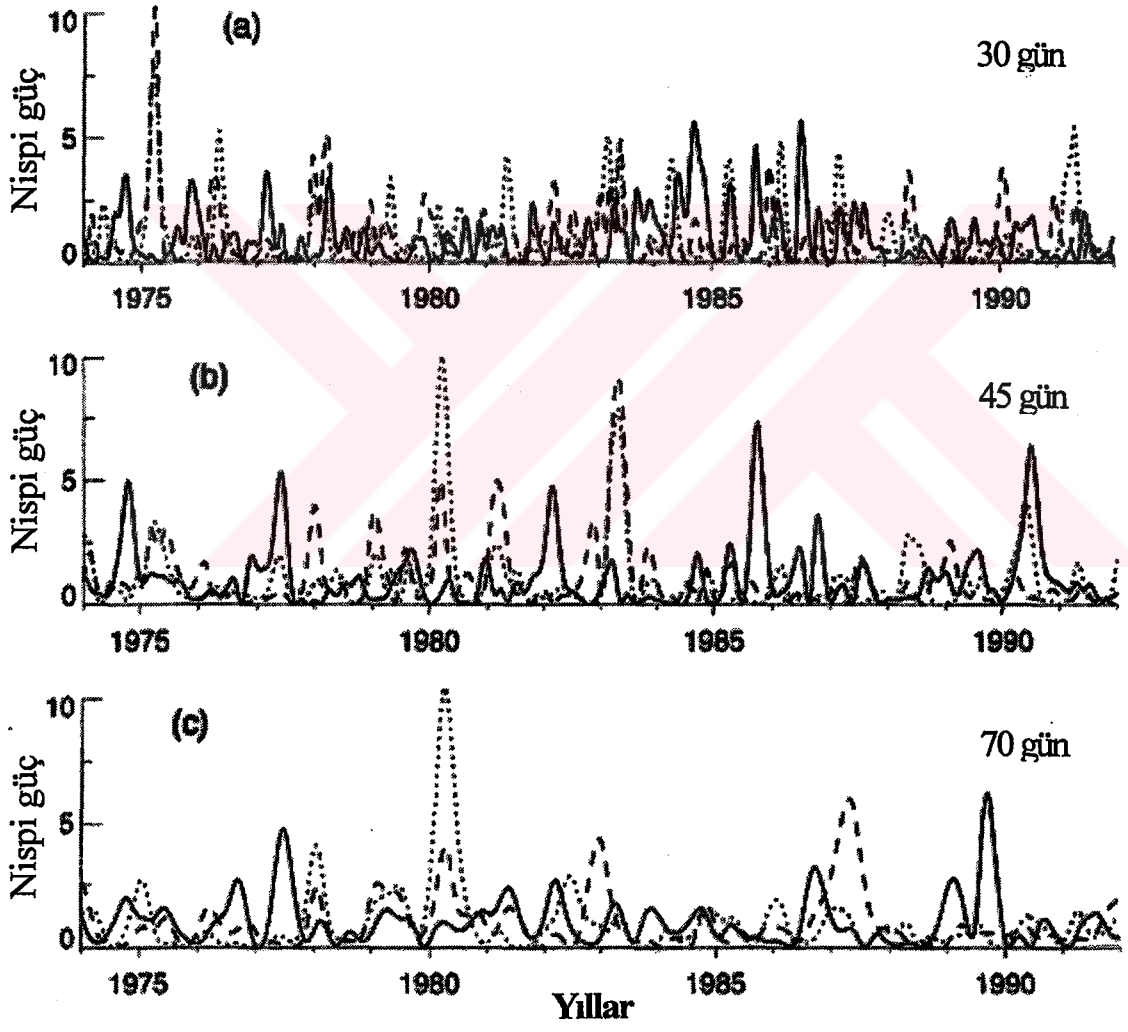
yıllık gözlem süresi boyunca nadiren görülmüştür (ayrıca 1983 ve 1985 yıllarında). 1989 yılına ait spektrumda ise rüzgar gerilmesi ve sıcaklık değerleri Mayıs ve Haziran aylarında en yüksek değerlere sahiptirler. Deniz seviyesi ile bu değişkenler arasında ise 3-4 aylık bir faz farkı mevcuttur. 1988 veya 1989 yılları arasında bir tropik El-nino olayi gözlemlenmemiştir. Başka yıllarla karşılaştırıldığında bazı yıllar pik oluşumu gözlemlenmesine rağmen bazı yıllarda oluşan pikler arasında bir ilişki tam anlamı ile ortaya konulamamaktadır. 18 yıla ait bir yıllık ortalama dalgacık spektrumu üzerinde yapılan çalışmalarda da mevsimler arası salınım (Interseasonal Oscillation) olaylarının 2-5 ay aralığında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Dalgacık spektrumu yardımıyla bu olayların ne zaman başlayıp ne zaman bittiği ve hangi ölçek değerinde oluştuğu rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.



Şekil 2.10 1975, 1980 ve 1989 yıllarına ait her üç parametre için bir yıllık dalgacık spektrumları

Dalgacık spektrumunun belirli bir zaman dilimi alınarak incelenmesi de mümkündür. Mesela çalışmada önemli olarak kabul edilen 30-45-70 günlük ölçeklere ait dalgacık spektrumlarının ayrı ayrı incelenmesi yapılmıştır. Şekil 2.11'de bu üç ölçek değerlerine a it dalgacık güç spektrumu zaman serileri görülmektedir.

Şekilde noktalı çizgi rüzgar gerilmesini, sürekli çizgi deniz yüzü sıcaklığını ve kesikli çizgi ise deniz seviyesini gösteren dalgacık spektrumlarına ait 30-45-70 günlük dilimlerin oluşturduğu zaman serilerini göstermektedir. Grafiklerden üç değişkenden en az ikisinde bir uyum olduğu görülmektedir. Örnek verilecek olursa 1975'in başından 1977 ve 1978'e kadar ve 1985 yılında bu uyum görülebilmektedir.



Şekil 2.11 Her üç parametreye ait 30-45-70 günlük ölçeklere deki dalgacık spektrumu serileri

Karşıt bir durum olarak, her üç değişkene ait 1980 yılında oluşan ve 45-70 günlük frekansa ait zaman serilerinde görülen uyum 30 günlükte görülememektedir. 45 günlük frekansa ait seride 1983 ve 1990 yıllarında görülen her üç değişkendeki pikler

diğer iki frekans değerinde görülmemektedir. Bu son durum bize 45 günlük frekans değerinde oluşan piklerin diğer iki frekans bandında oluşan piklerin değerlerinden daha yüksek olduğunu gösterir. Bu da dönemler arası salınımda 40-50 günlük aralıkta bir sınırlı aralığın varlığını gösterir.

2.2 Su kaynakları ile ilgili çalışmalar

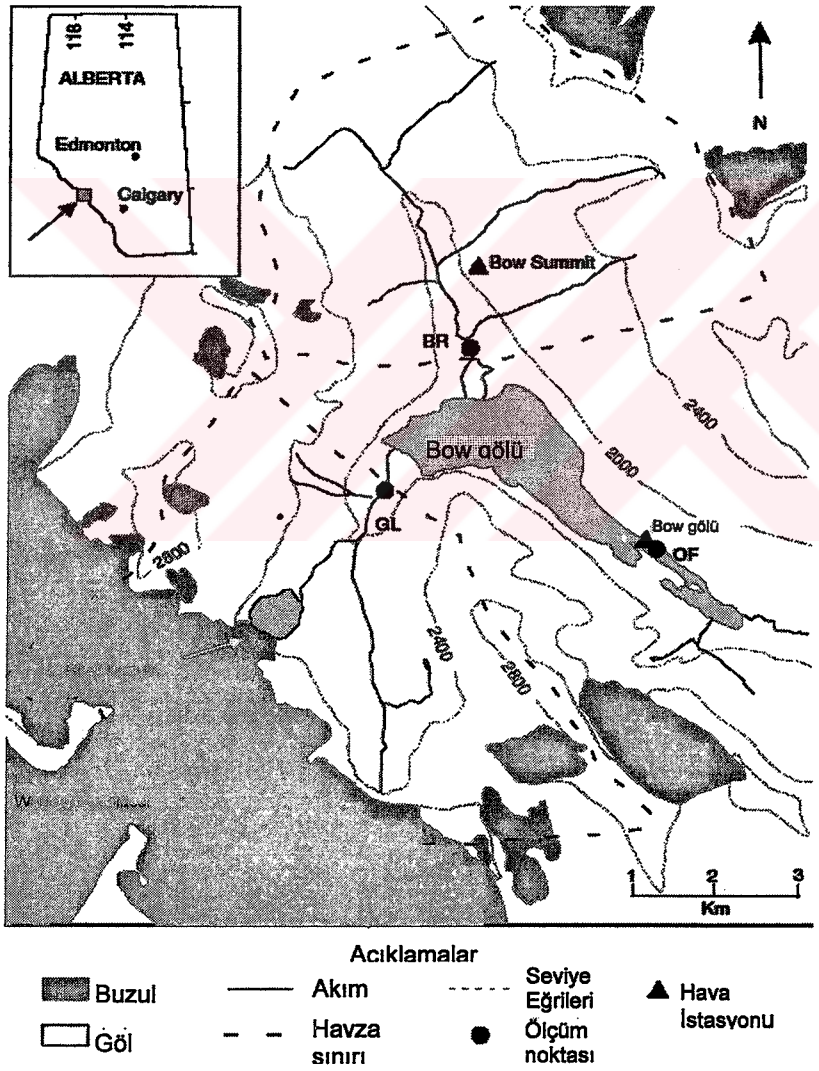
Geçmiş çalışmalarda su kaynakları verilerinin en uyumlu kullanıldığı çalışmalardan birisi Lafreniere ve Sharp tarafından yapışmıştır (Lafreniere ve Sharp, 2003). Çalışmada Kanada'nın Alberta bölgesindeki Banff ulusal parkında bulunan bir gölü besleyen iki ayrı kaynak incelenmiştir. Bunlardan birisi Wapta bölgesindeki bir buzul alanında oluşan buzul akım, diğeri ise kar erimesi sonucu Bow nehrinin taşıdığı akımdır. Çalışmada bu iki akımın saatlik zaman serilerinin yanında, hava sıcaklığı ve yağış verileri kullanılmıştır. Kullanılan saatlik veriler yardımıyla göle olan beslemenin yıldan yıla ve dönemsel olarak nasıl değiştiği incelenmeye çalışılmıştır. Karşılaştırmalarda bu değişkenlerin dalgacık dönüşümleri kullanılmıştır. Kullanılan veriler 1997-2000 yılları arasındaki dört adet yaz dönemine ait (Haziran-Eylül) hava sıcaklığı ve akım verileri ve 1999-2000 yazlarına ait yağış ve akım verileridir. Verilerin elde edildiği dönem içinde, 1998 yılına denk gelen El-nino olayı da inceleme sırasında dikkate alınmıştır.

Akım serilerinin 24 saatlik statik bir çevriminin olmayışı ve sıcaklık-akım ilişkisinin doğasının dinamik oluşu standart zaman serisi tekniklerinin kullanımını zorlaştırır. Mesela regresyon ve çapraz korelasyon teknikleri bir çok dönüşümleri de içeren veri hazırlama adımına ihtiyaç duyar ve zaman serisi içerisindeki dönemsel değişimleri inceleyebilmek için benzer davranış gösteren periyotlarda alt zaman serisi bölümlerine ihtiyaç duyulur. Dalgacık dönüşümü zaman-ölçek gösterimi ile bu tür problemlerin çözümünde başarı ile kullanılabilir. Çalışmaya konu olan bölge Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Şekilde GL şeklinde işaretlenen nokta buzul erimelerinden kaynaklanan akım için ölçüm noktasını, BR şeklinde işaretlenen nokta ise Bow Nehri akım ölçüm noktasını göstermektedir. Hava sıcaklığı değerlerinin okunduğu meteoroloji istasyonu ise Bow nehri çıkışındaki ölçüm istasyonuna (OF) yakındır.

Bölgeye ait hava sıcaklığı ve akım ölçümlerinin 4 yıllık (1997-2000) zaman serileri, normalize edilmiş seriler ve yersel (lokal) dalgacık spektrumları Şekil 2.13'de

gösterilmişlerdir. Şekil 2.13- a'da ki her sütün sırası ile 1997-2000 yıllarındaki yaz aylarına ait zaman serilerini ifade etmektedirler.

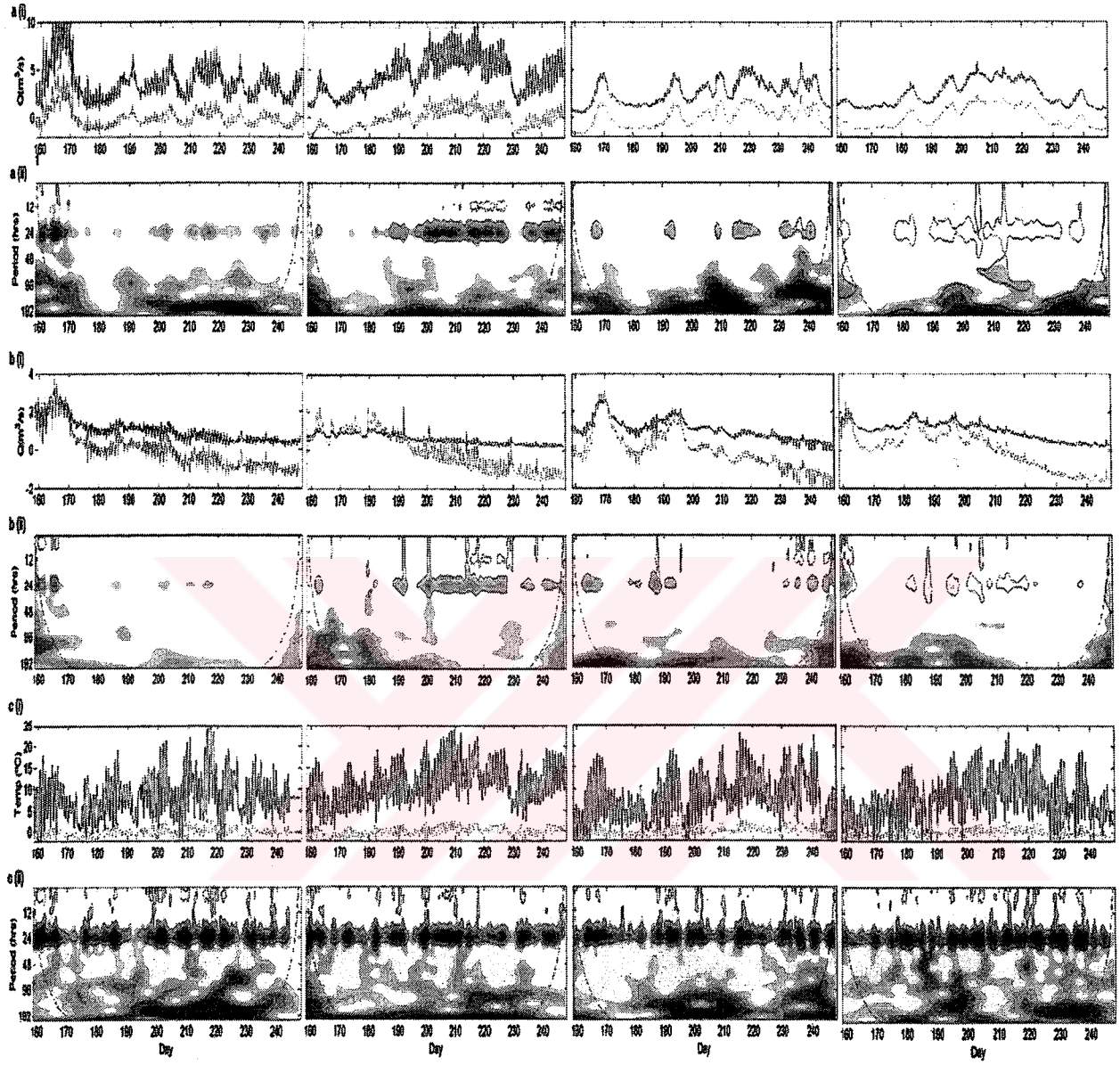
Şekillerdeki yatay eksen senenin günlerini ifade etmektedir. Şekillerdeki birinci satırdaki grafikler (a(i)) buzul erimesinden kaynaklanan akım değerlerini, ikinci satır ise (Şekil 2.13-a (ii)) buna ait yersel dalgacık spektrumunu göstermektedir. Şekil 2.1-a (i)'deki koyu çizgi ölçüm verisini göstermekte iken, gri çizgi ortalama merkezli normalize edilmiş zaman serisini göstermektedir. Şekil 2.13'de b(i) ve b(ii) sırası ile Bow nehri akım serisi ve yersel dalgacık spektrumunu göstermektedir. Şekil 2.13'deki c(i) ve c(ii) satırları ise hava sıcaklığına ait zaman serisi ve yersel dalgacık spektrumudur.



Şekil 2.12 Lafreniere ve Sharp (2003)'ın çalışma bölgesi

Bazı spektrumlarda günlükten daha az, bazılarında ise çok daha büyük ölçeklerde varyans yoğunlukları görülmesine karşın, spektrumların çoğunda global

spektrumlarında görüldüğü gibi (burada gösterilmemiştir) varyans 24 saatlik ölçek değerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 2.13 1997-2000 yıllarındaki yaz aylarına ait her üç parametreye ait zaman serileri ve yersel dalgacık spektrumları.

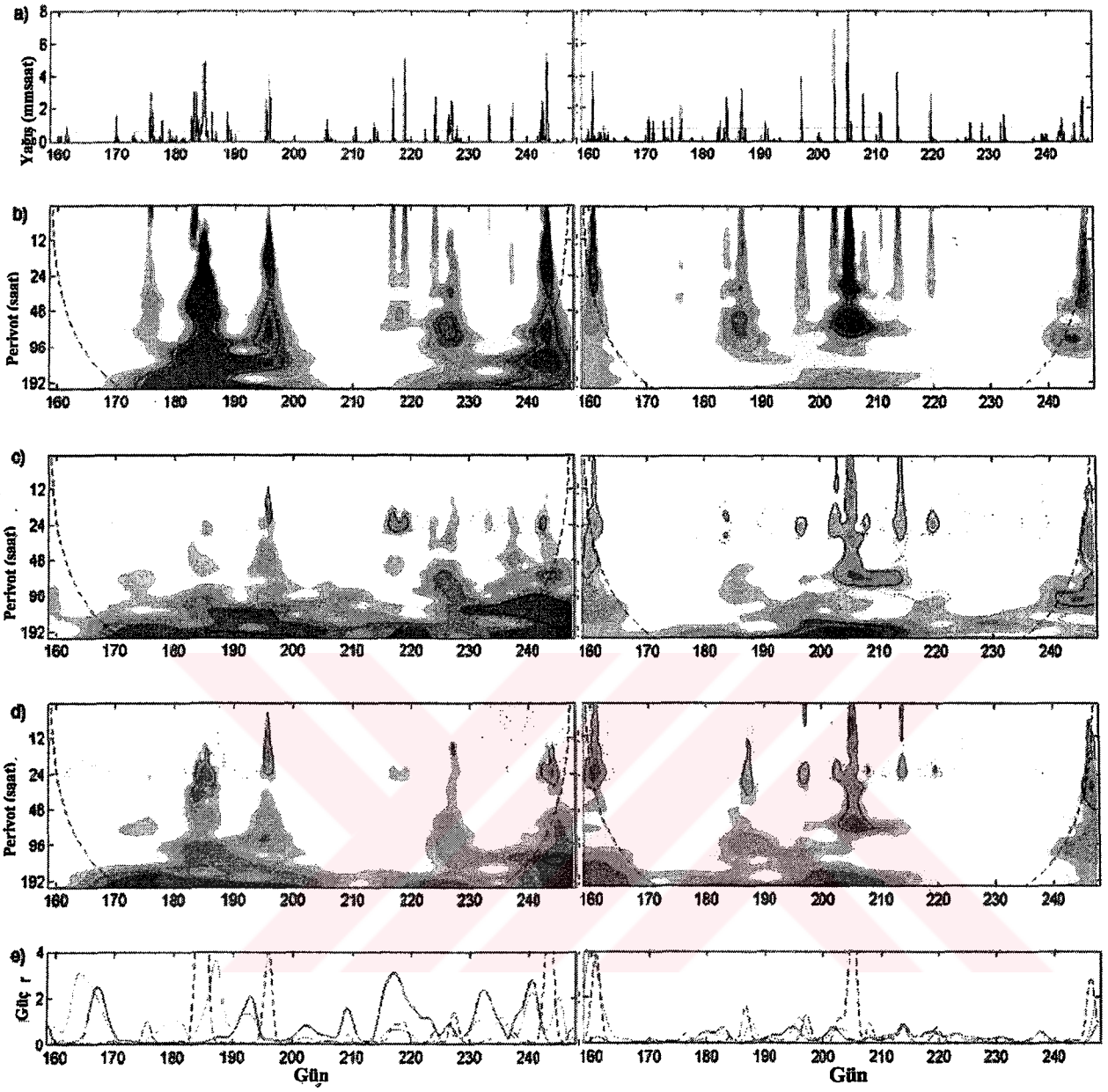
Şekillerden buzul erimesi akım değerlerini oluşturduğu yersel dalgacık spektrumu düşük frekanslı ve 96 saatten yüksek ölçek değerleri Temmuz ve Ağustos (190-250. günler) aylarında görülmektedir. Bow Nehri akımlarında ise düşük frekanslı yüksek ölçek değerli akımlar Haziran ve Temmuz başında (160-200. günler) yüksek ama istatistiksel olarak önemli olmayan değerler almaktadırlar. Bu değerler daima buzul akımlarından düşüktürler. Hava sıcaklığı için oluşturulmuş yersel dalgacık spektrumundaki günlük bileşenler çok daha kararlıdır. Bow nehri akımlarındaki

günlük spektral değerler hava sıcaklığınınkinden çok daha zayıftır. 24 saatlik akım ölçeğindeki olayın dağılımında mevsimler ve yıllara göre büyük değişimler gösterir.

Akım spektrumların verdiği 1997 yılında, her iki akım kaynağına ait yersel dalgacık spektrumu (Şekil 2.13 a (ii) ve b (ii)) Haziran başlarında 24 ve 6-12 saatlik ölçekler arasında yüksek değerler alırlar. Bu yüksek değerler, Temmuz sonu ve Ağustos sonu arasında her iki akım için bir miktar yükselir. 1998'de her iki akım kaynağında 24 saatlik değerler Temmuz ve Ağustos ortasında belirmektedir. Bu değerlere ilaveten özellikle Ağustos ayında 6-12 saatlik frekansa sahip olaylar görülmektedir. Her iki akim kaynağına ait yersel spektrumulardaki değerleri için daima buzul erimesinden kaynaklanan akım değeri Bow Nehrinden kaynaklanandan büyük olmaktadır. 1999 ve 2000 yıllarında, buzul erimesi akımlarındaki günlük değişim 1997 ve 1998 yıllarına ait olandan daha zayıftır ama özellikle Temmuz-Ağustos aylarında (1999'da 210-240. günlerde ve 2000'de 190-220. günlerde) varyans değeri istatistiksel olarak hala yüksektir. 1999'da Bow Nehrindeki 24 saatlik frekansa sahip olayın dalgacık spektrumu değeri Haziranda ve Ağustosun sonunda yüksektir. 2000 yılında, Haziran başında, kısmen de Temmuzda en yüksek değere ulaşır.

Akım serilerine ait faz diyagramlarındaki (burada gösterilmemiştir) ani bozulmalar, yağış-akış ilişkisinin incelenmesine yol açmıştır. Bu amaçla 1999-2000 yıllarındaki saatlik yağış verileri dalgacık analizi için kullanılmıştır. Yağış için hesaplanan yersel dalgacık spektrumu ve yersel yağış-akış çapraz dalgacık spektrumları Şekil 2.14'de gösterilmiştir.

Şekilde sol taraftaki sütün 1999 yılına ait, sağ taraftaki sütün ise 2000 yılına aittir. Birinci satır (a) saatlik yağış zaman serisini göstermektedir. İkinci satır ise (b) saatlik yağış verilerine ait yersel dalgacık spektrumudur. Üçüncü (c) ve dördüncü (d) satırlardaki grafikler ise sırası ile buzul erimesinden dolayı oluşan akım ile Bow nehri akımları kullanılarak yağış değerleri ile elde edilen çapraz korelasyon grafikleridir. Çapraz korelasyon grafiklerinin oluşturulma nedeni akım değerlerinin varyansının nerelerde önemli olduğunu belirleyebilmektir. Çapraz korelasyon ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 3'de verilecektir. Son satırda bulunan (Şekil 2.14-e) şekil ise, yersel dalgacık spektrumlarına, ait dalgacık spektrumunda gözlenen 24 saatlik ölçekteki yağış (kesikli çizgi), 24 saatlik ölçekteki buzul erimesi akımları (koyu çizgi) ve 24 saatlik ölçekteki Bow Nehri akımlarının (gri çizgi) dalgacık spektrumlarının karşılaştırılmasın göstermektedir.



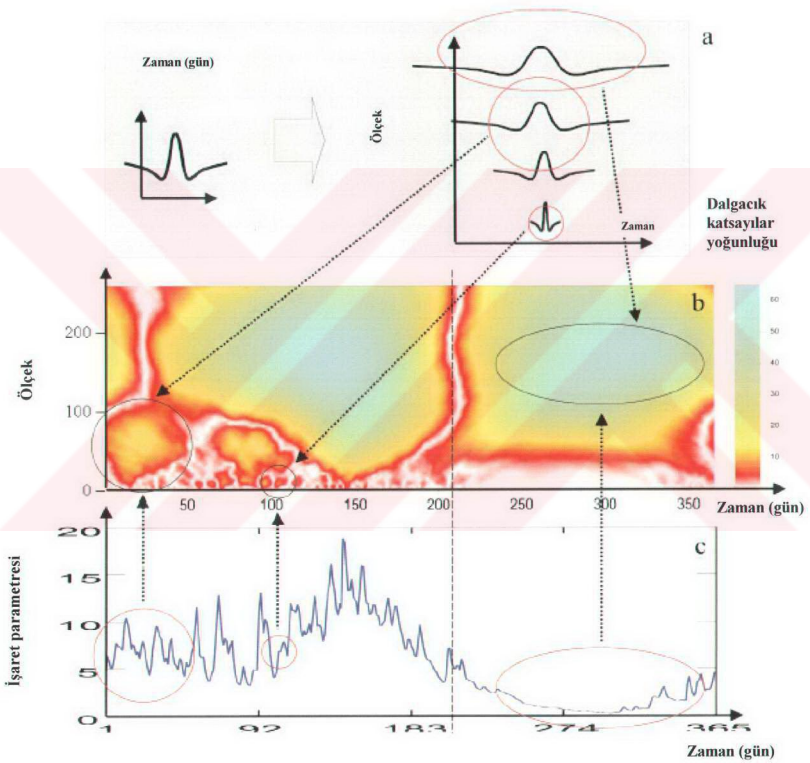
Şekil 2.14 1999-2000 yıllarındaki saatlik yağış verileri, bunlara ait yersel dalgacık spektrumları ve yersel yağış-akış çapraz dalgacık spektrumlar ile 24 saatlik ölçekteki dalgacık spektrumu zaman serileri.

24 saatlik ölçek değerinde yoğunlaşan yersel akım ve sıcaklık spektrumlarının aksine, yağış spektrumlarında yoğunlaşma olayın süresine bağlı olarak 6-192 saatlik ölçek değerleri arasında yayılmıştır. 1999 ve 2000 yıllarında bir çok büyük yağış olmuştur. Bow Nehri için oluşturulan çapraz korelasyon şekline bakıldığında buzul erimesi için oluşturulan çapraz korelasyon grafiği çok daha küçük ve zayıf kovaryans değerleri göstermektedir. Bir başka nokta ise Bow Nehri akımlarının yağış olaylarına olan tepkisinin Haziran ve Temmuz başlarında birkaç gün gecikmeli olmasıdır. Örnek olarak 1999 yılına ait sütundaki d satırında olan 183-188 günler ve 2000 yılına

ait sütundaki d satırında bulunan 160-165 ve 185-188 günler verilebilir. Fakat bu durum yazın sonlarında görülmemektedir. Bu farklılık bölge şartlarının fiziki yapısına göre değişik yollardan izah edilebilir

Bir çok çalışmada yağış verilerinin ölçek davranışları üzerinde durulmuştur. Bu gibi çalışmalarda temel sınırlama belirli bir olayın zamansal yersenim bilgilerinin yetersizliğidir. Bu durumda sürekli dalgacık dönüşümünün kullanılması yıllık veya mevsimsel olayların belirlenmesinde önem kazanır. Gaucherel genellikle 200 m' den düşük rakıma sahip ve neredeyse tamamı yağmur ormanları ile kaplı düz bir bölge olan Fransız Guyana'sındaki havzalar üzerinde çalışmıştır (Gaucherel, 2002). Bu çalışmada yılın belirli bir dönemine ait akım değişimlerinin gözlenmesinde dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Güney Amerika gibi geniş ve uzak bölgelerde veri toplama genellikle yetersizdir. Bu durumda havza çıkışı gibi uygun seçilmiş yerlerden veri toplama daha uygun ve ekonomik bir yoldur. Akım verilerinin havza ölçeğinde iklimsel değişimleri ve özel değişimleri ihtiva ettiği göz önünde bulundurularak, çalışmada 11 ayrı havzanın akım verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada havzaların birbirlerine göre periyodik farklılıklarının bulunup bulunmadığı test edilmeye çalışılmıştır. Fourier spektrumu ve otokorelasyon eğrileri kullanılarak periyodik olan ve olmayan davranışlar incelenmiştir. Fakat 11 havza içinde birbirine göre belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Yıllık periyot haricinde yalnızca bir periyot o da ara sıra belirgin olarak gözlemlenebilmiştir. Ayrıca havzaya bağlı olarak değişen 21-28 günlük periyotlar bulunmuştur. Bu periyot ayın yeryüzüne etkisi veya gelgit kuvvet etkisi ile oluşmuş olabilir. Atmosferik synoptic maksimum periyot olan 16 gün ile belirgin bir derecede ilişki kurulamamıştır. Bu nedenlerden dolayı zaman-ölçek eksenlerinde yılın belirli bir zamanında yağıştan dolayı oluşan tepkinin gözlemlenmesi için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Şekilde incelenecek bölgedeki 9 havzadan birine ait yıllık akım serisinin (Şekil 2.15-c) dalgacık dönüşümü spektrumu görülmektedir (Şekil 2.15-b). Şekli oluşturmak için kullanılan dalgacık fonksiyonları ise şeklin üst kısmında (Şekil 2.15-a) verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere farklı ölçeklerde kullanılan dalgacıklar zaman serisi üzerinde farklı olarak yerselleşmiş bilgileri açığa çıkarmaya yarar. Ele alınan bölgenin tipik karakteristiği gereği, Aralık ile Ocak ayları arasında hidrografta bir su seviyesi artışı görülür. Bu artış genellikle Kısa Mart yazı olarak adlandırılan ve bir yağış azalmasının neden olduğu bir kısım ile ayrılır. Bu kısım, genellikle bilimsel olarak

tam izah edilememiştir ve bölgedeki 11 akım istasyonuna ait yıllık ortalanmış değerlerinden açıkça gözlemlenememiştir. Tipik bir başka karakter Temmuz ve Kasım ayları arasında oluşan bir kurak dönemdir. Şekil 2.15-b'de oluşan 0-100 gün ölçekleri arasındaki iki sarı bölge bu kısa mart yazı dönemini belirtmektedir. Bunların altında kalan küçük sarı bölgeler belirli bir döneme kadar devam eden mevsimsel anlık değişimleri ifade ederler. Beyaz çizgi ise iki ayrı sezonun geçiş yaptığı yeri belirtir. Bu kısım aynı zamanda kesikli çizgilerle de gösterilmiştir.



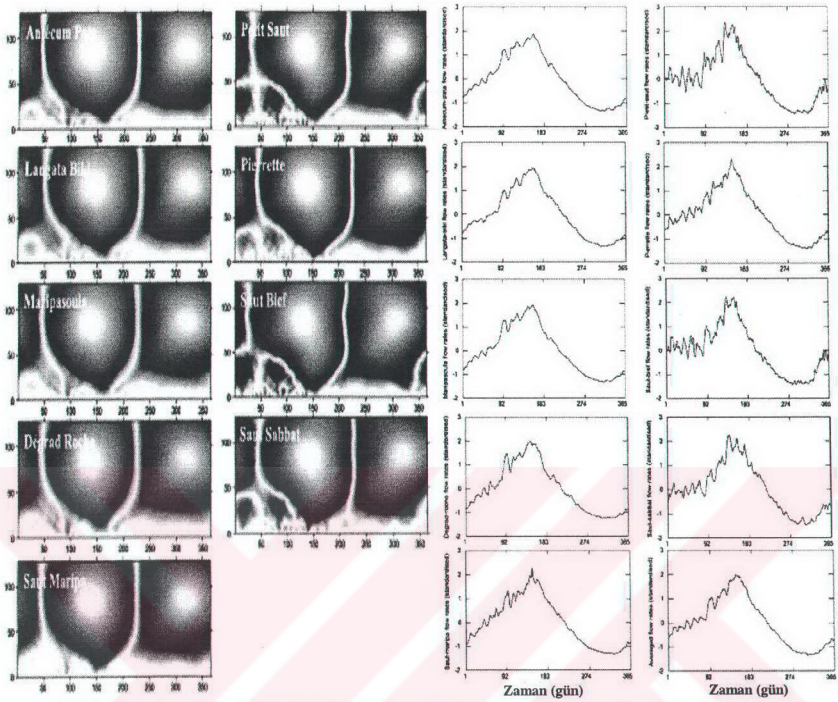
Şekil 2.15 (a) Dalgacık fonksiyonu -ölçek ilişkisi, (b) zaman serisine ait yersel dalgacık spektrumu, (c) havzaya ait zaman serisi

Fransız Guyanasına ait 9 ayrı havza için yapılan incelemelerde dalgacık dönüşümün yanında istatistiki parametreler de kullanılarak aslında homojen davranış sergiliyor olarak bilinen havzaları, farklı davranışları ile sınıflandırmaya çalışılmıştır. Böyle bir farklılığın araştırılmasında elde bulunan 23'er yıllık akım serilerinin yerine havzanın tipik davranışını karakterize edecek 23 yıl üzerinden ortanmış bir yıllık süredeki günlük akım verilerinin kullanılması daha yararlı görülmüştür.

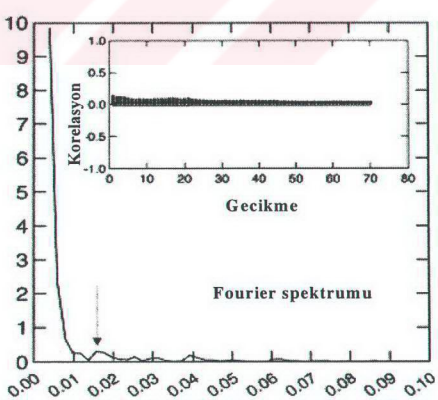
Yapılan sürekli dalgacık dönüşümleri neticesinde özellikle kısa mart yazı olayını gösteren havzalar sürekli dalgacık dönüşümünün yersel olayları çok iyi ortaya çıkarabilen özelliği sayesinde tespit edilebilmiştir. Şekil 2.16'da sol tarafta gri rengin tonları ile oluşturulmuş şekiller 9 havzanın dalgacık dönüşümleri ve bazı havzalarda belirginleşen kısa mart yazı olaylarını göstermektedir. Grafikler her havzaya ait havza çıkışlarında ölçülmüş yaklaşık 23'er yıllık günlük akım değerlerinin bir yıllık değer olarak gösterimleridir. Dolayısıyla yatay ekseni 365 günü gösteren zaman ekseni, düşey ekseni ise standartlaştırılmış akım değerlerini ifade eder. Sağ taraftaki 10 grafik ise 9 ayrı havzaya ait yine bir yıllık olarak gösterilmiş ortalama akım değerlerini ifade eder. Son grafik ise tüm havzaya ait bir ortalamayı gösterir.

Ortalama değerler için oluşturulmuş bir Fourier spektrumu ve otokorelasyon grafiği yardımıyla aynı özelliklerin elde edilmesine çalışılmıştır. Şekil 2.17'de ortalama akım değerleri için alınmış Fourier spektrumu ve otokorelasyon grafiği görülmektedir. Fourier spektrumundan da görüleceği üzere daha küçük periyoda sahip olaylar için anlamlı derecede büyük bir pik elde edilememiştir. Sadece ilk büyük pikten sonra bir miktar belirgin kabul edilebilecek yaklaşık 0,016 değerine tekabül eden okla gösterilmiş bir pikten söz etmek mümkündür ki bu da yaklaşık 55 güne denk gelir, yani 28 günlük periyodikliği ifade eder.

Bunun yanında çalışmada akım değerleri, birinci ve ikinci türevler, rölatif türevler, ve dalgacık katsayılarının dağılımına ve bunların istatistiksel momentleri ve değişim katsayılarının almış oldukları değerler kullanılarak bu 9 havza sınıflanmaya çalışılmıştır. Asal bileşen analizi kullanılarak faktör uzayında bileşenler incelenmiştir. Sonuçta 3 ayrı grup olarak 9 havza sınıflanabilmiştir. Klasik yöntemlerle aslında birbirlerinden farkları oldukça zor ayırt edilebilen bu havzalar genelde homojen karakter göstermektedirler. Dalgacık dönüşümü bu tür havzalarda ayırt edici özelliklerin ortaya çıkarılmasında kullanılabilen yararlı bir araçtır.



Şekil 2.16 İncelenen bölgedeki havzalara ait standartlaştırılmış akım değerleri ve onlara ait yersel dalgacık spektrumları.



Şekil 2.17 Ortalama akım değerleri için alınmış Fourier spektrumu ve otokorelasyon grafiği

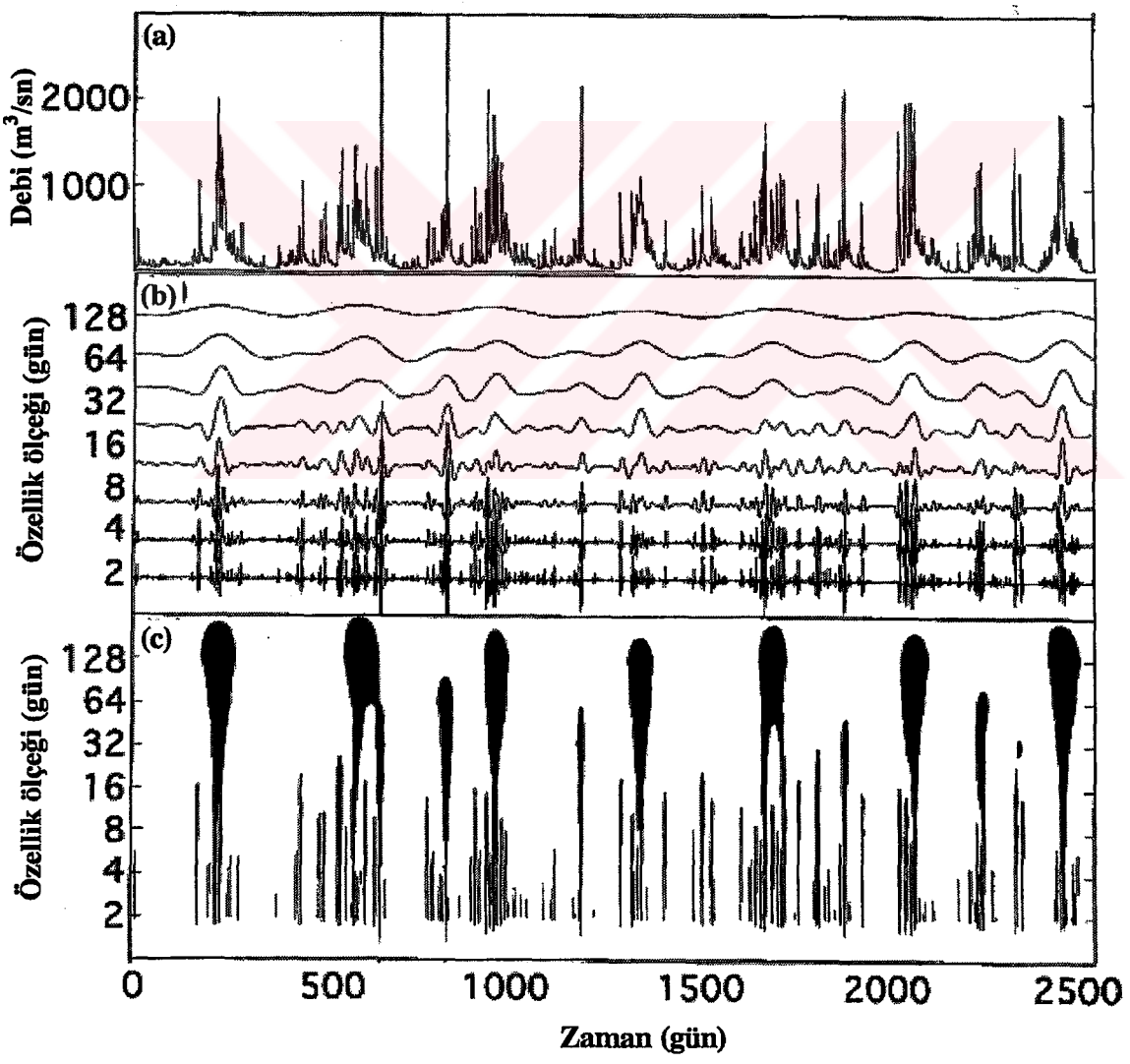
Dalgacık dönüşümü genellikle arazi ölçümlerinden elde edilmiş ham verilerin içinde ihtiva ettiği yapıları ortaya çıkarmakta kullanılır. Dönüşümle elde edilen vektörlerin değerlerinin zaman ekseni boyunca toplanması sonucunda global dalgacık spektrumu elde edilir. Elde edilen global spektrum hidro-klimatik davranışın etkisiyle ortaya çıkan bir nehir akımının zaman-ölçek karakterini yansıtır. Örnek verilecek olursa Colorado'da ki (A B D) kar erimeleri nedeniyle oluşan nehir akımlarında global dalgacık spektrumunda en yüksek enerji 4 aylık zaman ölçeğinde görülmektedir. Bunun nedeni süreklilik arz eden yaz akımlarıdır. Hawai'deki nehir akımlarında ise global spektrumda en yüksek enerjinin okunduğu değerler 3-4 günlük değerlerdir. Bunun nedeni ise kısa süreli şiddetli yağmurların bölgede çok etkin oluşudur.

Nehir akımları ile ilgili yapılan çalışmada Smith ve diğerleri ABD ve tropik adalardaki toplam 91 nehir akım ölçümünü dalgacık spektrumu analizi yardımıyla serilerin karakterlerini ortaya koyup sınıflandırılmaya çalışmışlardır (Smith ve diğ., 1998). Global spektrumun şekli olayların zamanlamasını, değişkenliğini ve akarsuya su gelimi mekanizmasını ortaya çıkaran zaman-ölçek eksenlerindeki dağılım yardımıyla belirlenebilmektedir. Yapılan çalışma ile ele alınan nehir akımlarının global spektrumdan elde edilen dönemsel azalış veya artışlar dikkate alınarak 5 ayrı ları büyüktür (ölge tanımlanmıştır. Bunlar a) batı kar erime bölgesi (western snowmelt), b) kuzey-doğu kar erime bölgesi (north-eastern snowmelt), c) orta-merkezi nem bölgesi (mid-central humid), d) güney-batı kurak bölgesi (south-western arid) ve e)yağmur adaları (rainstorm island) dir.

ABD'de kuzey-doğu kar erimesi bölgesindeki nehirler kışın depolanan karların erimesi nedeniyle her bahar önemli bir akım artışı içine girerler. Yalnız bu artış genellikle yıl boyu devam eden şiddetli yağışların etkisinden dolayı kolaylıkla ayırt edilemez. Şekil 2.18-a'da, Ammonoosuc nehrine ait yedi yıllık günlük akım değerleri görülmektedir.

Ele alınan günlük nehir akımı serisine ait 2-4-8-16-32-64-128 ve 256 günlük özellik ölçeklerindeki (olayların oluş süresini ifade eden periyot) dalgacık dönüşümleri serileri Şekil 2.18-b'de görülmektedir. Burada ifade edilen özellik ölçeği terimi Bölüm 3'te ele alınacaktır fakat genel bir bilgilendirme açısından şu şekilde izah edilebilir. Dalgacık dönüşümü sırasında kullanılan fonksiyonun ortogonal olup olmamasına bağlı olarak çarpım esnasında dalgacık fonksiyonunun sahip olduğu ölçek değeri fonksiyonun taban uzunluğunun yarısı veya tamamı kadardır. Ortogonal

olmayan Meksika şapkası, Morlet gibi fonksiyonların pozitif kısmı bulunan ölçek seviyesinin iki katına denk gelir. Dolayısıyla çarpım sırasında kullanılan ortogonal olmayan bir fonksiyonun kullandığı ölçek uzunluğu bulunduğu ölçek değerinin iki katıdır ve fonksiyonun çarpımı sonucunda ortaya çıkan zaman serisindeki özelliğin süresi de bulunulan ölçek seviyesinin iki katı olur. Yani ortogonal olmayan bir dalgacık 2 günlük ölçek seviyesinde zaman serisi ile çarpılırsa zaman serisindeki 4 günlük özelliği açığa çıkarır. Şekilde yatay eksen zaman serisinin zaman parametresini gösterirken düşey eksen özellik uzayı değerini yani fonksiyonun sahip olduğu özelliğin uzunluğunu ifade eder. Böylece bir zaman serisinde hangi zamanda, hangi süreye sahip bir olayın gerçekleştiği zaman-ölçek spektrumundan (yersel dalgacık spektrumundan) anlaşılmış olur.

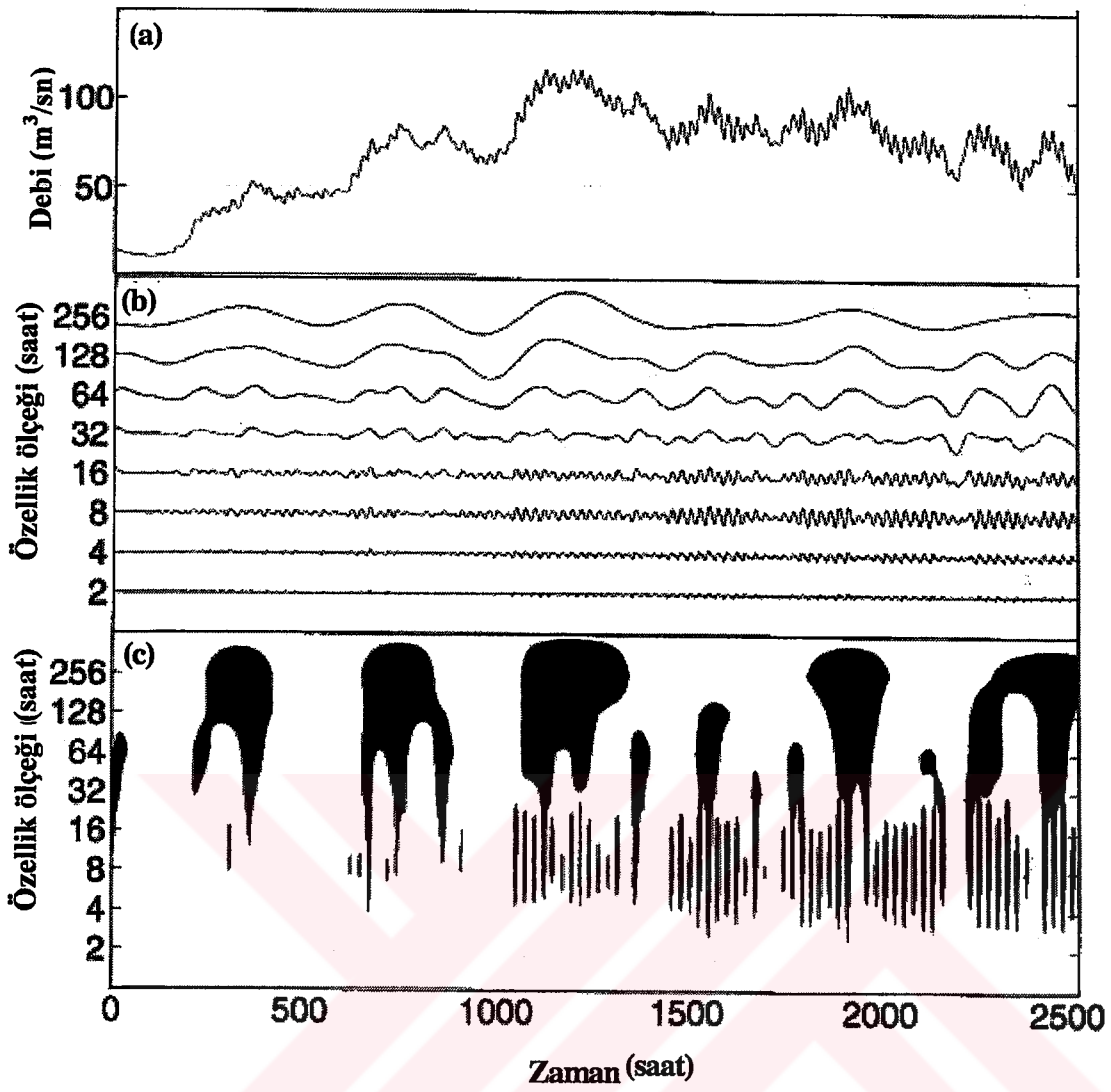


Şekil 2.18 (a) Ammonoosuc nehrine ait yedi yıllık günlük akım değerleri, (b) 2-4-8-16-32-64-128 ve 256 günlük özellik ölçeklerindeki dalgacık dönüşümü serileri, (c) seriye ait yersel spektrum

Yersel dalgacık spektrumunda ise 64-128 günlük özellik ölçeği değerine sahip 7 adet yapı görülmektedir (Şekil 2.18-c). Smith ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, ele alınan 7 yıllık akım ölçümlerinin yersel dalgacık dönüşümü spektrumunda görülen yapılar şiddetli yağıştan (rainstorm) daha uzun süre devam eden yedi adet bahar kar erimesi olayını ifade eder. Bu yapılar ayrıca ölçüm süresi boyunca ortaya çıkan yedi adet kar erimesinin şiddetini ve oluş süresini ifade eder. Şekilde yatay eksen zamanı, düşey eksen özellik ölçeğinin değerini ve sayfa düzlemine dik yoğunluk ekseni ise dönüşüm sonucunda elde edilen katsayıların büyüklüğünü (burada kontörler halinde gösterilmiştir) göstermektedir.

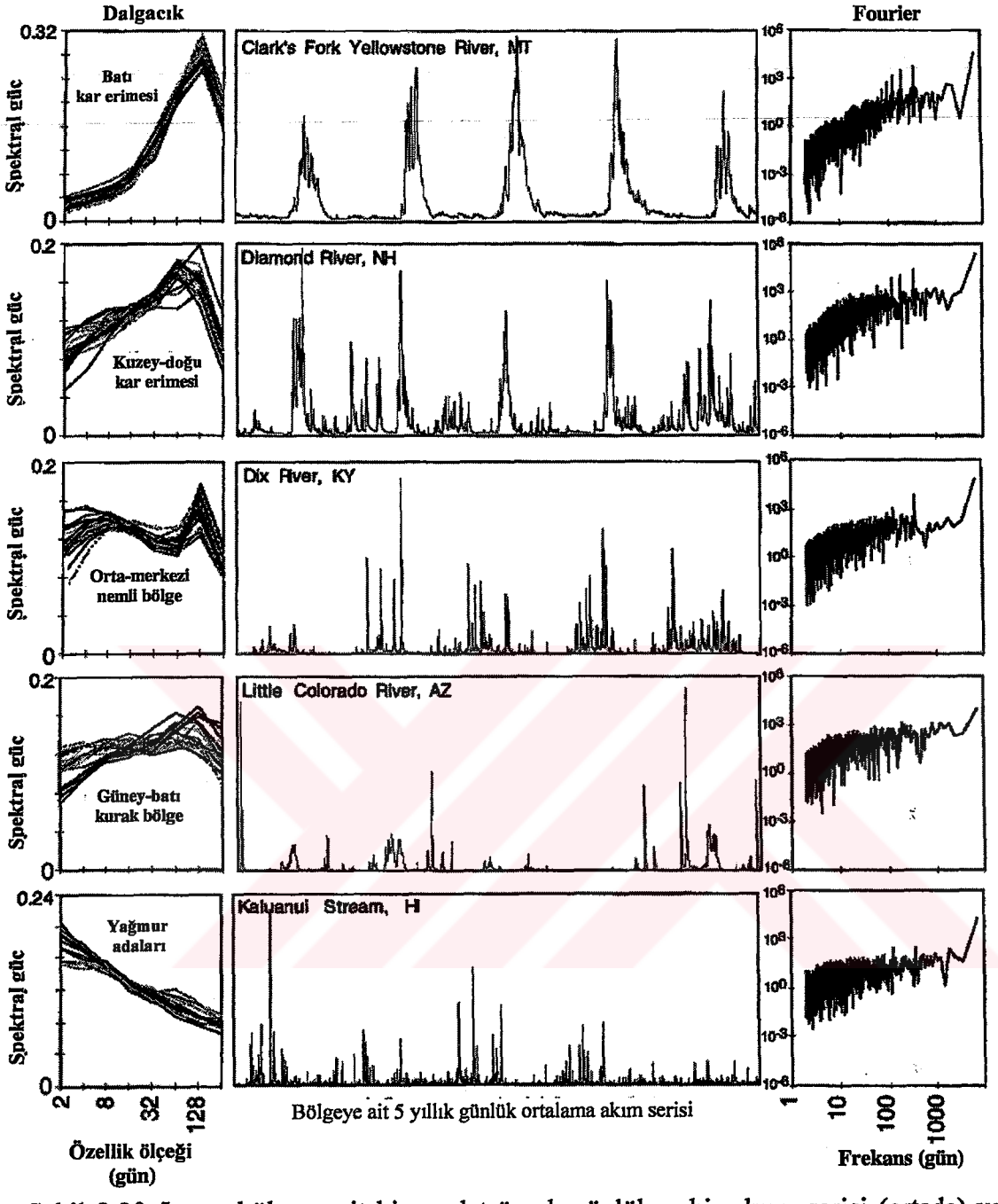
Smith ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada bir başka uygulama ise bir buzul akımının (glacial stream) günlük değişkenliğinin ortaya çıkarılmasını konu edinir. Çalışmada Forrest Kerr Creek bölgesindeki Mayıs-Ağustos 1992 dönemine ait 100 günlük saatlik buzul akımları kayıtları kullanılmıştır (Şekil 2.19-a). Bir buzul akımında genliğin günlük ritminin çıplak buzla kaplı alanının ve erime dönemi boyunca içsel drenajın gelişiminin bir fonksiyonu olduğuna inanılır. Çalışmada ele alınan saatlik verilere yapılan dalgacık dönüşümü sonucu elde edilen şekillerden (Şekil 2.19-b ve c) 8-16 saatlik özellik ölçeğinde dönüşüm vektörleri büyüklüğündeki bir artış trendi bu değerlendirmeyi desteklemektedir.

Smith ve diğerleri çalışmalarında ABD'nin değişik bölgelerinden ve yağmur adalarından alınmış 91 adet günlük nehir akımı ölçümlerine dalgacık dönüşümü uygulamışlardır. Ele alınan akımlar 5 ayrı coğrafi bölgeden ve rasgele seçilmiş nehirlere ait 20 yıllık günlük akım ölçümleri serileridir. Bu serilere ait normalize edilmiş global dalgacık spektrumlarını Şekil 2.20'de (sol taraf) üst üste çizilerek gösterilmiştir. Şekilde her bir satır ayrı bir bölgeyi göstermektedir. Şekilde seçilen bölgeye ait bir adet örnek günlük nehir akımı serisi (ortada) ve buna ait Fourier spektrumu (sağda) görülmektedir.



Şekil 2.19 (a) Günlük buzul akımları serisi, (b) 2-4-8-16-32-64-128 ve 256 saatlik özellik ölçeklerindeki dalgacık dönüşümü serileri, (c) seriye ait yersel spektrum

Şekilde 5 ayrı bölgeye ait farklı akım karakteristikleri global spektrum ile tespit edilebilmektedir. Fourier spektrumunda ise bu bölgesel farklılıklar oldukça zor ayırt edilebilmektedir. Fourier spektrumundaki en fark edilir durum batı kar erimesi bölgesi ile yağmur adaları bölgeleri arasında görülmektedir. Fourier spektrumun dikliği bir öncekinden daha fazladır. Global dalgacık spektrumları ise bu iki bölge arasındaki farkı açıkça ortaya koyabilmektedir.



Şekil 2.20 5 ayrı bölgeye ait birer adet örnek günlük nehir akımı serisi (ortada) ve buna ait Fourier spektrumu (sağda) ve global dalgacık spektrumları (solda) görülmektedir.

Bunun yanında kuzeydoğu kar erimesi ve güney-batı kurak bölgeleri global spektrumları birbirlerine oldukça benzemektedirler. Ancak kuzeydoğu kar erimesi hidrografına ait yukarıda sözü edilen geçici yapılar (Şekil 2.20) global spektrumda kendini gösterememektedir. Bu gibi değişimleri açığa çıkarabilmek için yersel spektrum daha etkili olmaktadır.

Global spektrumlardan hangi bölgelerde akım serilerine ait hangi özellik ölçeklerinin daha önemli olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Fourier spektrumunda ise bunları ayırt etmek oldukça güçtür.

Bu çalışmadan sonra yapılan ve Smith ve arkadaşlarının da referans gösterildiği diğer bir çalışmada Saco ve Kumar, Amerika Birleşik Devletleri genelindeki 197 adet akarsuya ait günlük akım verisini analiz etmiş ve bileşenlerinin enerji seviyelerine göre 29 değişik havzada iklimsel sınıflama yapmaya çalışmışlardır (Saco ve Kumar, 2000). Çalışmada, nehir akımlarının zamana bağlı ölçeksel değişimlerinin dağılımlarında, tutarlı özel karakterleri belirlemek hedeflenmiştir. Böylece zamana bağlı ölçeksel dağılımları benzerlik gösteren bölgeler birlikte bir grup teşkil edebilmektedir. Çalışma sonucunda çok ölçekli değişimlerde tutarlı 3 adet farklı mod tespit edilmiştir. Bu bize benzer ölçek salınımlarına sahip, birbirinden farklı coğrafyalarda bölgelerin olabileceği gibi birbirine yakın coğrafyalarda farklı ölçek salınımlarına sahip bölgelerin de olabileceğini göstermektedir.

ABD'yi sınır olarak çevreleyen toplam 43 havzadan 29'una ait 1939-1988 yıllarına ait günlük akım değerleri çalışma verisi olarak kullanılmıştır. Ele alınan veriler 1939-1955 (periyot 1), 1956-1972 (periyot 2), 1973-1988 (periyot 3) şeklinde 3 ayrı periyotta incelenmiştir. 3 günlük ortalanmış (aggregation) değerler çalışmada kullanılmıştır. Bu değerlerin dalgacık ölçek seviyesi ve karşı geldiği zaman ölçeği Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

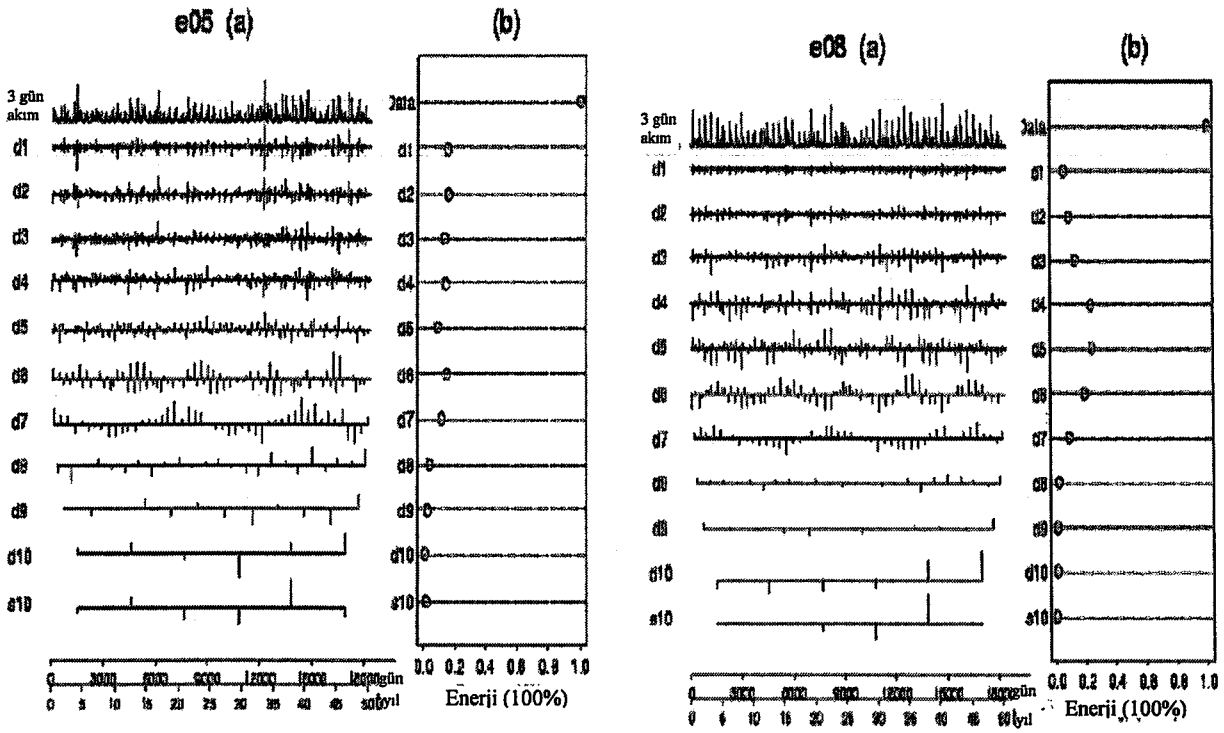
Tablo 2.2 Dalgacık ölçek seviyesi ve gün olarak değeri

Ölçek seviyesi	Ölçeğin zaman değeri
0	3 gün
1	6 gün ≈1 hafta
2	12 gün ≈2 hafta
3	24 gün ≈1 ay
4	48 gün ≈1,5 ay
5	96 gün ≈3 ay
6	192 gün ≈6 ay
7	384 gün ≈1 yıl
8	768 gün ≈2 yıl
9	1536 gün ≈4,2 yıl
10	3072 gün ≈8,4 yıl

Çalışmada normalize edilmiş global dalgacık spektrumu kullanılmıştır. Spektrum 3 gün ile 8,4 yıl arasındaki zaman ölçeği ile uyumlu serilerdeki değişimi ifade etmektedir. Bir ölçek değerindeki enerji, ele alınan ölçek değerinden daha kısa bir süredeki akım serisinde bulunan olayların özelliğini ifade eder. Örnek verilecek olursa 4-6 ay süresince oluşan sürekli yüksek akım, 1 yıllık zaman ölçeğinde yüksek değişkenlik ifade eder. 3 aylık süre boyunca akımın yüksek değerler alması, 6 aylık ölçek boyunca yüksek değişim oluşturur. Ancak verilen bir periyottaki yüksek akım değerleri (mesela 1-2 aylık süre) periyodik olarak mesela her bahar oluşuyorsa, bu yüksek akım değerleri dalgacık spektrumunda 3 aylık zaman ölçeği seviyesinde, 1 yıllık ölçek seviyesinde oluşanlardan daha yüksek enerji değerlerine sahip olur.

Olayların periyodikliği verilen bir ölçek seviyesindeki enerjiyi arttıracak şekilde etkiler; fakat bu periyot, dalgacık spektrumu tarafından elde edilen enerji dağılımı ile olayın süresi (zaman ölçeğidir) daha doğrudan ilişkilidir. Çalışmada incelenen 29 bölgeye ait dalgacık spektrumları hesaplanarak ayrı ayrı şekil üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.21'de e05 ve e08 olarak adlandırılan iki ayrı bölgedeki 50 yıllık akım serilerine ait global dalgacık spektrumlarının eldesi görülmektedir. Şekilde 50 yıllık zaman serisi 10 seviyede bileşenlerine ayrılmıştır. Şekil 2.21-a'da zaman serisi ve her seviyeye ait detay bileşenleri d1, d2, d3,..... d9, d10 ve s10 yaklaşıklık bileşenleri görülmektedir. Şekil 2.21-b'de ise her seviyedeki bileşene ait oransal enerji yüzdesi (normalize edilmiş) görülmektedir. Bu kısımda seriye ait bileşenlerin toplam enerji içerisinde sahip oldukları yüzdeyi ifade eder.

Şekillerden şu genellemeler yapılabilir. Baskın ölçek karakteri veya dağılımı, incelenen havzadan havzaya önemli ölçüde değişiklikler arz eder. Örnek olarak e08 bölgesinde en yüksek enerji ve değişkenlik (variability) 1,5-3 ay ölçek aralığında oluşurken, e05 bölgesinde 12 gün ve 6 ay gibi iki ayrı ölçek değerinde enerji en yüksek olmaktadır. e05 ve e08 bölgelerine ait global dalgacık dönüşümü sonucu elde edilen normalize edilmiş enerji değerleri için verilen ölçeklerin gün olarak karşı geldikleri değerler Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

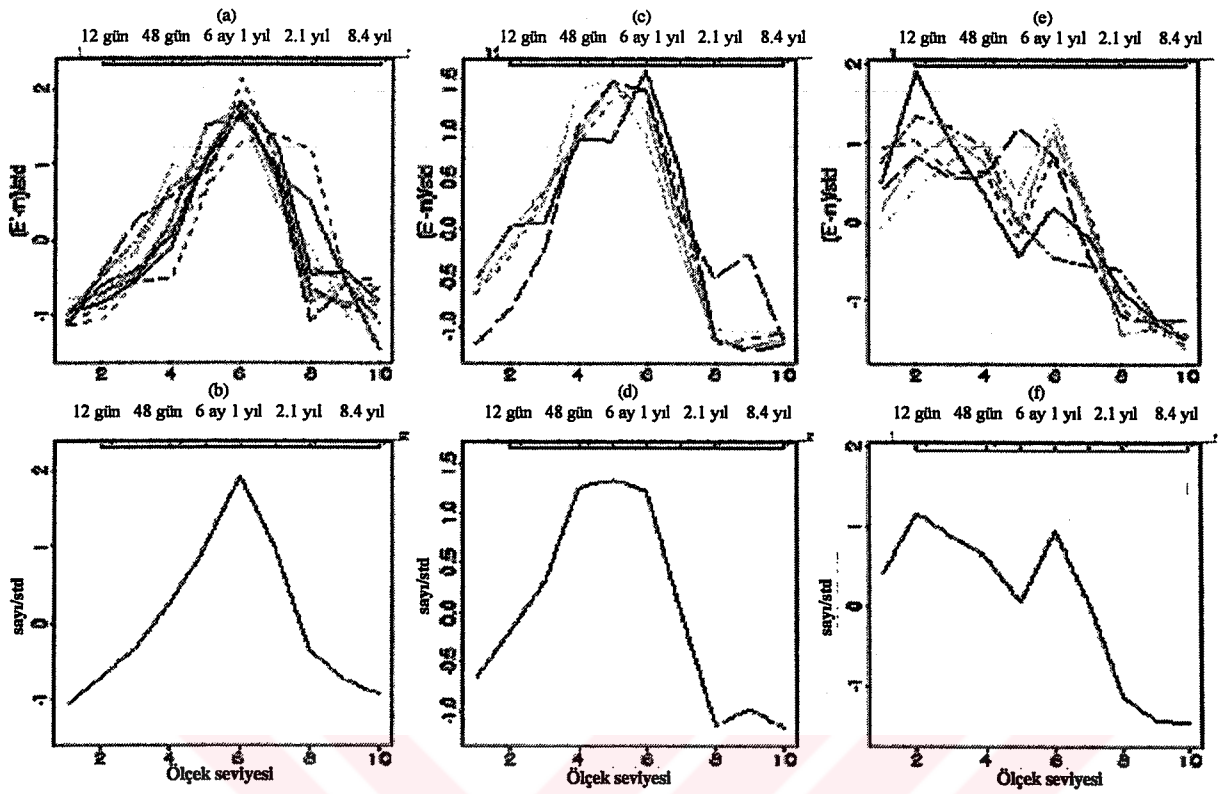


Şekil 2.21 Zaman serisi ve 10 seviyede bileşenleri ile bileşenlere ait enerji yüzdeleri.

29 bölgenin kendi aralarında sınıflandırılabilmesi için temel bileşen analizi (principal component analysis) yöntemi kullanılmıştır. 29 spektrum 3 farklı zaman dilimi için 6'şar adet temel bileşene ayrılmıştır. Bu bileşenlerin varyans yüzdeleri bakımından 3 tanesinin anlamlı olduğuna karar verilmiştir. Temel olarak bu üç bileşen 29 bölgeyi varyans olarak en yüksek temsil ettiklerinden dolayı bölgeler 3 ayrı mod olarak sınıflandırılmıştır. 50 yıllık periyot için akım serilerinden hesaplanan bu modlara ait elde edilen global spektrumlar üst üste çizilmiş halde Şekil 2.22'de gösterilmiştir (Şekil2.22-a,c,e). Şekildeki ikinci satırda, (b, d, f), aynı modlara ait ortalanmış global spektrumlar görülmektedir.

Çalışmada elde edilen modlar şu şekilde tasnif edilmiştir.

Uzun dönem modu (Long seasonal mode): Çok ölçekli değişimin bu modu akımların dönemsel bir dönüşüme sahip olduklarını gösterir. Bu devir esnasında birkaç ay boyunca ortalama akım koşullarının üzerinde bir debi gözlemlenir. Bu şartlar altında dalgacık spektrumu 3 aylık ve 1 yıllık ölçeklerde yüksek değerler alır.



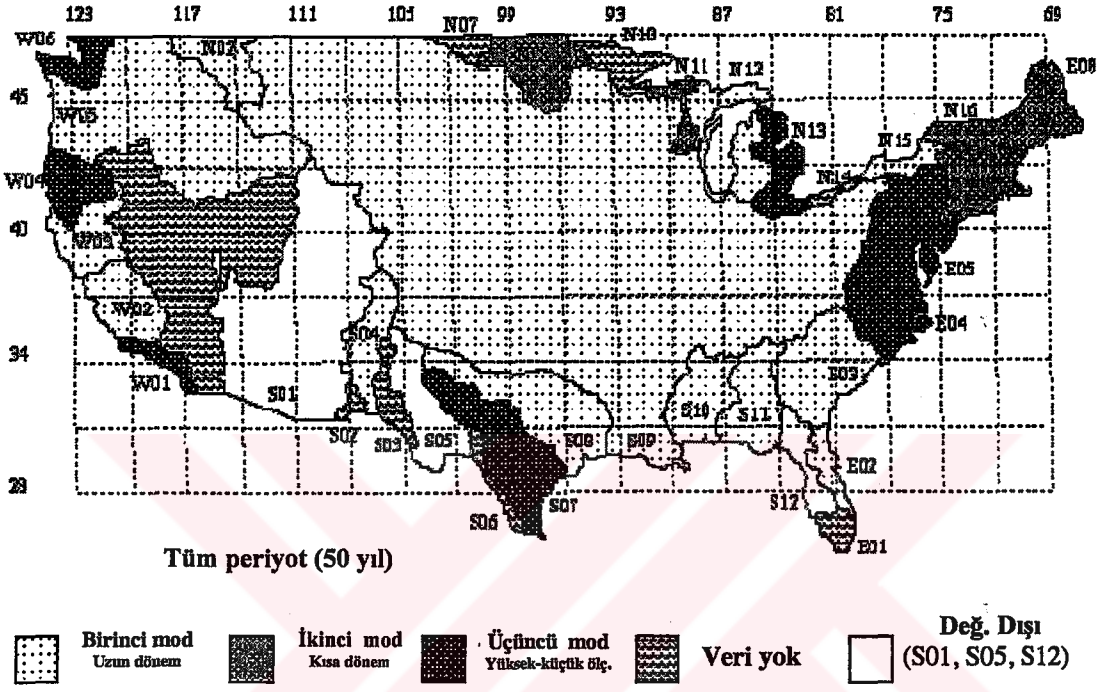
Şekil 2.22 50 yıllık periyot için bütün bölgelerin global spektrumlarından elde edilen 3 ana mod (a, c, e) ve modların standartlaştırılmış gösterimleri (b, d, f)

Kısa dönem modu (Short seasonal mode): Bu modda baskın dönemsel değişimler ile uyum içerisindedir; fakat normal akım koşullarının üzerinde olan akımlar 2-3 civarında sürer. Yine bu dönemde yüksek pikli ve kısa süreli akımlar gözlemlenebilir. Küçük ölçeklerdeki enerji değerleri uzun dönem modunda oluşanlardan daha fazladır. Enerjinin en yüksek olduğu ölçek seviyeleri 1,5 ve 6 ay seviyeleridir. 6 ay ile 1 yıl ölçek değerleri arasındaki enerji uzun dönem modunda oluşandan daha küçük değerler alır. Bu mod için 3 periyotta yapılan analizler ilk iki periyot için yapılanlardan biraz faklılık gösterir. Bu periyotta nispeten 6 aylık ölçek seviyesinde bazı enerji pikleri görülür.

Yüksek küçük-ölçek modu (High small-scale mode): Bu mod çok yüksek değişkenliğe sahip 6 gün –1 ay gibi küçük ölçeklerle uyum içerisindedir. Bir ikinci pik olarak mevsimsel çevrime uygun olan 6 aylık zaman ölçeğinde görülmektedir.

Toplam periyot için her üç moda ait bölgesel dağılım haritası Şekil 2.23'de verilmiştir. Şekilde 1939-1988 dönemine ait analizlerden elde edilen 29 bölge için elde edilmiş modlar görülmektedir. Şekilde orta kısımda görülen taralı kısımda veri sayısının yetersizliği nedeniyle çalışmada bu bölge kullanılmamış yukarıda söz

edildiği gibi yalnızca sınır bölgeler ele alınmıştır. Sınır bölgelerindeki 3 ayrı bölge de (S01, S05 ve S12) sıradan olmayan global spektrumlar elde edildiğinden bu bölgeler değerlendirme dışı bırakılmıştır. 50 yıllık süre yanında yukarıda belirtilen 3 ayrı periyot için de aynı haritalar elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta dönem dönem bazı bölgelerin modlarının farklılık gösterdiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.23 50 yıllık süre için modlara göre yapılan bölgesel sınıflandırma

Çalışma sırasında yukarıda açıklanan modların hangi bölgelerde nasıl uyum gösterdikleri bölgenin fiziksel karakteristikleri yardımıyla açıklanarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada dalgacık dönüşümünün bir çok çalışma ile elde edilemeyecek geçici yapıların elde edilebileceği ve bu sayede bölgenin iklimsel karakteristiği hakkında çok daha anlamlı bilgilere varılacağı vurgulanmıştır.

Su kaynakları sahası içine girebilecek bir başka çalışma da Labat ve diğ. tarafından karstik yapıya sahip bölgelerdeki yağış ve akış ilişkisinin ortaya çıkarılmasında kullanılmıştır (Labat ve diğ., 2000). Çalışmada Morlet dalgacığının kullanıldığı sürekli dalgacık dönüşümü ve çok çözünürlüklü analiz teknikleri uygulanmıştır. Çalışmada Fransa'daki iki ayrı bölgedeki (Pyrenees dağları, Ariege ve Larzac, Averyon) saatlik ve günlük yağış ve akım serileri kullanılmıştır.

İlk uygulama iki ayrı karstik kaynak olan Esperelle ve Cernon kaynaklarındaki ölçümlere uygulanmıştır. Esperelle sisteminin çıkışında doğal bir taşkın grafiğinin üzerine ilave edilen periyodik bir pompalama gözlemlenebilmiştir. Gözlem süresi 27/03/1995 ile 16/051995 arası saatlik akış değerleridir. İkinci karstik kaynak Cernon'un çıkışında ise ilave edilen kısa zaman ölçekli kesikli bir akım gözlemlenebilmiştir. Ölçüm periyodu ise 03/04/1995 ile 16/05/1995 arasındaki saatlik akış değerleridir.

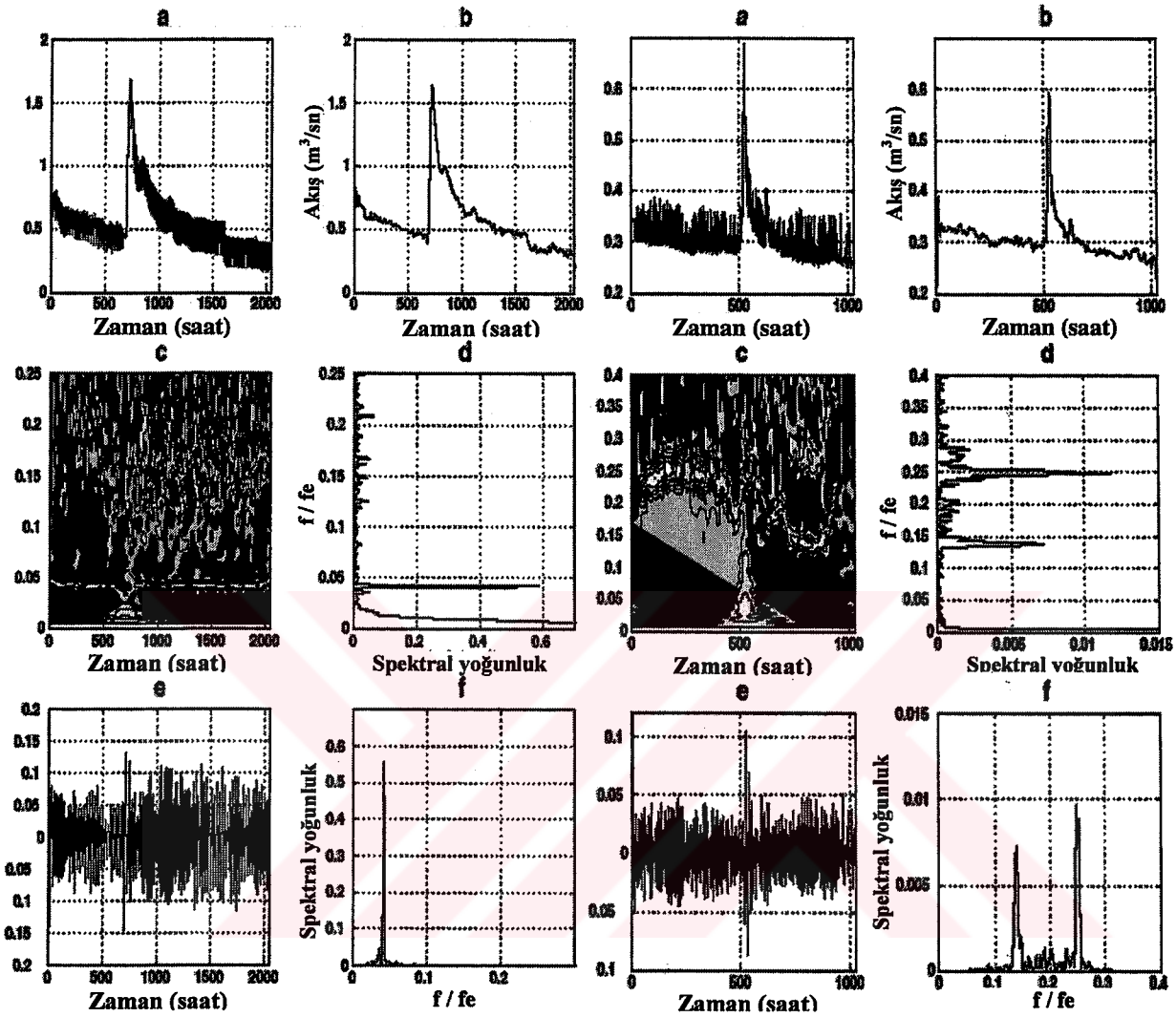
Her iki kaynağa ait saatlik akım değerleri (Şekil 2.24-a), gürültülerinden ayıklanmış (filtrelenmiş) akım değerleri (Şekil 2.24-b), yersel dalgacık spektrumları (Şekil 2.24-c) ve onlara ait spektral yoğunluk fonksiyonları (Şekil 2.24-d), filtrelenmiş akım serisinden arta kalan seri (Şekil 2.24-e) ve bu seriye ait spektral yoğunluk fonksiyonuda (Şekil 2.24-f) şekil üzerinde gösterilmiştir. Şeklin sol tarafı Esperelle kaynağına ait sol tarafı ise Cernon kaynağına ait grafikleri göstermektedir.

Şeklin sol tarafında Esperelle kaynağı için sonradan sabit frekanstaki bir pompalama frekansı eklenmiştir (beyaz gürültü). Eklenen bu bileşen Morlet dalgacık dönüşümü ile açıkça görülebilmektedir (Şekil 2.24-e ve f). Burada pompalama zamana göre değişmeyen bir karakter sergilediğinden Fourier spektrumu ile de uyumluluk sergilemektedir. İkinci kaynakta, taşkın pikinden önce ve sonra ise iki ayrı frekansa sahip periyodik bileşen söz konusudur. Sepektral yoğunluk fonksiyonu bu iki frakansı tespit etmesine rağmen yerleri hakkında bir bilgi verememektedir. Şekil 2.24-c'de taşkın pikinden önce ve sonra frekans değerlerindeki zaman içerisindeki değişim açıkça tespit edilebilmektedir. İki ayrı yüksek frekans akış hidrografından giderildikten sonra (Şekil 2.24-b) elde edilecek artık yüksek frekans bileşenleri (Şekil 2.24-e) iki ayrı spektral bileşeni içerisinde ihtiva etmektedir ki bu artık bileşenlere ait spektral yoğunluk fonksiyonu göstermektedir.

Çalışmada ikinci uygulama 3 ayrı havzanın bulunduğu Pyrenes karstik bölgesinde yapılmıştır. 3 havzadan ikisi olan Alio ve Baget karstik kaynaklarına ait havzalar 13 km^2'lik alanlara sahiptir. Diğer karstik kaynak olan Fontestorbes ise 80 km^2'lik alana sahiptir.

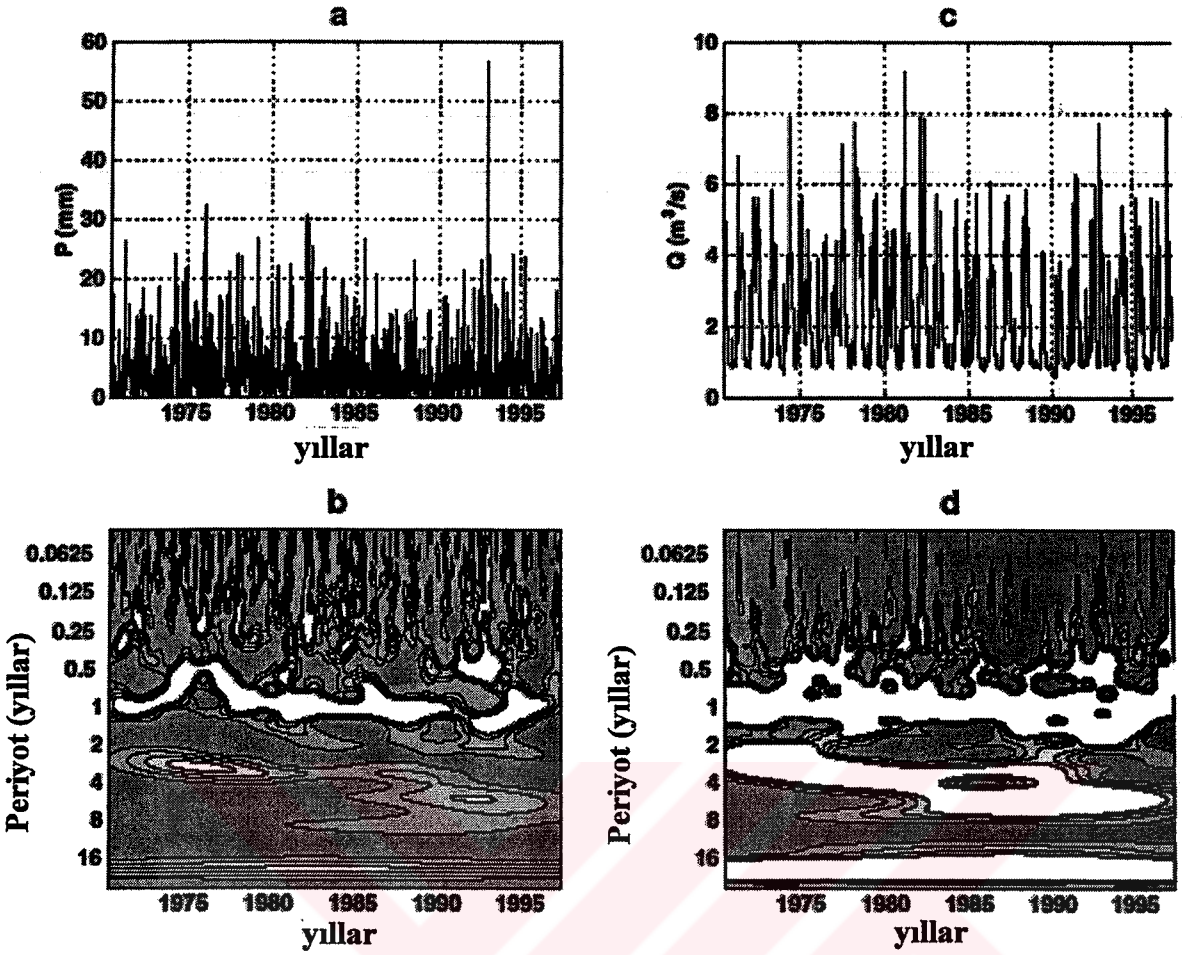
Her üç havzaya ait 30 dk aralıklı 30 yıllık kayıt bulunmaktadır. 3 havza içinde aynı yağış değerleri karstik akım için giriş olarak kullanılmıştır. Fontestorbes havzasına ait günlük verilerin ortalanmasından (aggregation) elde edilen 02/07/1970 ile

25/02/1997 arasındaki haftalık yağış ve akış zaman serileri ve bunlara ait yersel dalgacık spektrumları Şekil 2.25'de verilmiştir.



Şekil 2.24 (a) Esperelle kaynağı ile (sol taraftaki a, b,...f şekilleri) ve Cernon kaynağına (sağ taraftaki a, b,...f şekilleri) ait saatlik akış (run-off) verileri, (b) gürültüsü giderilmiş akış verileri, (c) (a)'ya ait yersel dalgacık spektrumu, (d) (a)'ya ait frekans spektrumu, (e)bakış sersinden ayrılmış artık gürültü serisi ve (f)buna ait frekans spektrumu

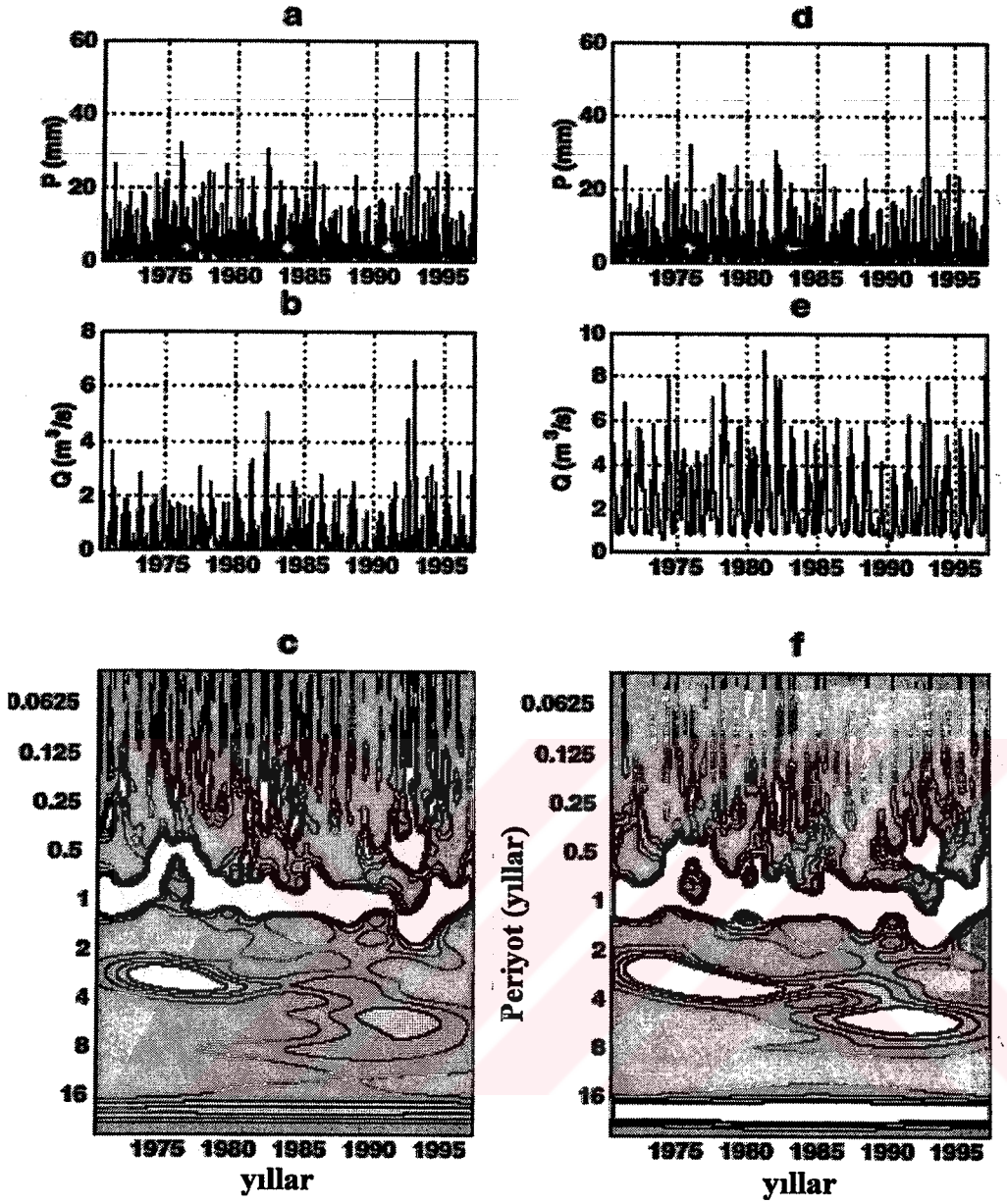
Şekil 2.25-a ve b'de haftalık yağış değerleri ve bunlara ait dalgacık spektrumu, Şekil 2.25-c ve d'de haftalık akış değerleri ve bunlara ait dalgacık spektrumu şekilleri görülmektedir. Her iki şekilde de bir yıllık ölçek değerinde yüksek enerji seviyesi görülmektedir. Yine her iki grafikte de 1976-77 ve 1992 yıllarında altı aylık bileşenler ile yıllık bileşenin yer değiştirdiği görülmektedir. Yine her iki grafikte ilk 10 yıllık kısımda 3 yıllık ölçekte bir bileşen ve son on yıllık dönemde 7 yıllık bir bileşen görülebilmektedir.



Şekil 2.25 02/07/1970 ile 25/02/1997 arasındaki haftalık yağış ve akış zaman serileri ve bunlara ait yersel dalgacık spektrumları

Alio ve Fontestorbes kaynaklarına ait günlük yağış ve akış için yapılan çapraz dalgacık spektrum grafikleri Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Şekilde her iki kaynağa ait yağış-akış çapraz dalgacık spektrumları grafikleri görülmektedir. Şekilde sol taraf Alio kaynağına ait sağ taraf ise Fontestorbes kaynağına ait yağış (Şekil 2.26-a ve d), akış (Şekil 2.26-b ve e) ve çapraz spektrum grafikleri (Şekil 2.26-c ve f) görülmektedir. Şekil 2.26-c ve f karşılaştırıldığında Alio kaynağına ait çapraz spektrumda küçük ölçeklerdeki enerji değişimleri daha sıklıkla görülmektedir.

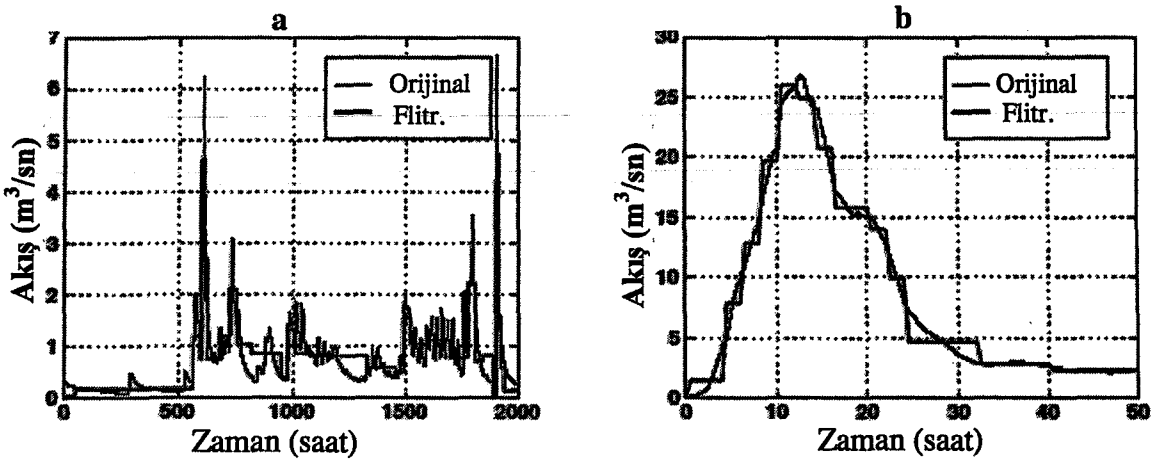
Bu küçük ölçekli değişimlerin çokluğu iki kaynak arasındaki karstik yapının derecesini göstermektedir. Yıllık bileşenler arsındaki fark ise çok azdır. Bu havzanın yıllar arası su rezervi davranışının karstik yapıdan daha bağımsız olabileceğini göstermektedir. Bir başka önemli fark ise iki havzaya ait 7 yıllık bileşenin aldığı değerlerin farklılığıdır. Bu durum yağış girdisinin aynı olmasına karşın içsel rezervlerin önemi ile ilgili bir durum ortaya koyar.



Şekil 2.26 Alio ve Fontestorbes kaynaklarına ait günlük yağış ve akış için yapılan çapraz dalgacık spektrum

Çalışmada yapılan bir başka yenilik ise akım verilerinin filtrelenmesi ile elde edilen yeni serinin bazı değişimleri daha belirgin olarak ifade edebilmesidir. Şekil 2.27'de Alio kaynağına ait orta büyüklükteki bir taşkın periyodu boyunca (Şekil 2.27-a) ve büyük bir taşkın periyodu boyunca (Şekil 2.27-b) filitrelenmiş taşkın hidrografları görülmektedir.

Filtreleme (de-noising) işlemi sayesinde taşkın pikleri korunurken küçük ölçekli yüksek frekanslı bileşenler kaldırılmış olur. Bu işlem sonucunda ana taşkın pikinin enerji yoğunlunun %95'i korunur.



Şekil 2.27 Alio kaynağına ait (a) orta büyüklükteki ve (b) büyük bir taşkın için hidrograflar ve filtrelenmiş hidrograflar

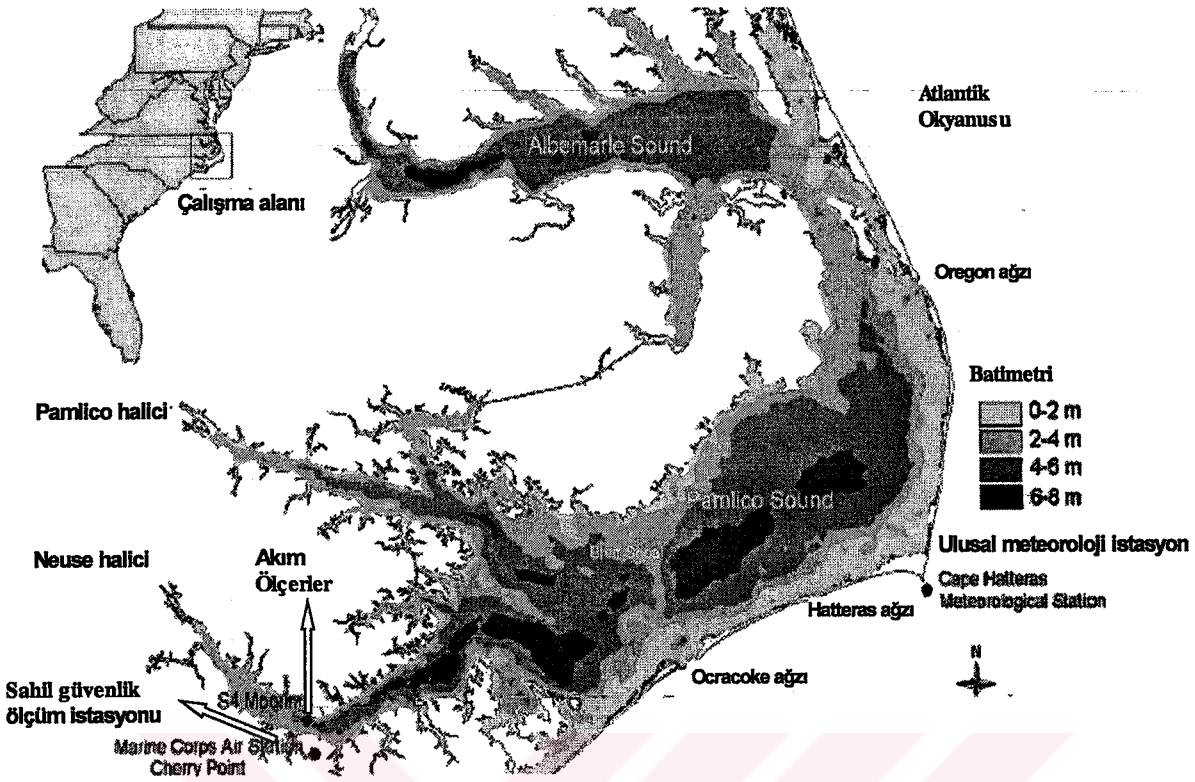
2.3 Hidrodinamik uygulamaları ile ilgili çalışmalar

Hidrolojik verileri üzerinde değişik parametrelerin ilişkisinin zaman ortamının yanında frekans ortamında veya her iki ortamda aynı anda ortaya konularak karşılaştırılması yararlı olmaktadır. Bir deney kanalındaki su seviyesi değişimlerinin analizi sırasında durağan olmayan dalgalar için zaman-frekans ortamında dalga enerjisinin dağılımı dalgacık dönüşümü tekniği yardımı ile uygun bir şekilde belirlenebilmiştir(Panizzo vd., 2002). Çalışmada dalga enerjisinin yayıldığı durumdaki dalga tepesinin konumu ile üzerinden su aşan bir yapının yansıma katsayısı etkin bir şekilde belirlenmiştir. Çalışılan kanalın daraltılmış olması ve dalgaların büyük miktarda üst üste binmelerine rağmen güvenilirlik üst düzeyde gerçekleşmiştir. Uncles (2002) körfez fiziği ile ilgili yapılan son çalışmaları özetlediği makalesinde, gelgit akımlarındaki teorik gelişmeler başlığı ile durağan olmayan veya periyodik olan nehir gelgitlerinden elde edilen zaman serilerinin analizinde dalgacık dönüşümü tekniği kullanıldığını belirtmiştir. Hidrodinamik parametrelerle ilgili bir diğer çalışmada okyanus yüzeyi dalga kayıtlarının dalgacık dönüşümü yardımı ile analiz edilmesidir (Massel, 2001). Çalışmada durağan olmayan derin su dalgalarının zaman serileri, tropik mercan kayalıklarındaki dalga kırılmalarının zaman serileri ve dalga kanalında mekanik olarak üretilen dalgaların zaman serileri karmaşık değişimlerine rağmen dalgacık dönüşüm tekniği yardımıyla analiz edilebilmiştir. Durağan olmayan ve kesikli yapısı nedeniyle açık kanallardaki değişken akımların analizinde de dalgacık dönüşümü tekniği kullanılmıştır (Addison vd., 2001). Çalışmada akımın belirgin olduğu kısımlar için sürekli dalgacık

dönüşümü kullanılmıştır. Akımın türbülanlı kısmının istatistiksel analizinden başka türbülans bileşenlerinin eşiklerle filitrelenmesi ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Liu (2000), büyük göllerdeki kıyı yakınlarındaki dalga grup karakteristiklerini dalgacık dönüşümü yardımıyla inceleniş ve sonuçları test etmiştir. Bir diğer çalışmada ise Wickerhauser ve arkadaşları (1994) iki boyutlu türbülans akımını dalgacık paketleri ile incelemiş ve sonuçları cosinus dönüşümü ile karşılaştırılmıştır. Dalgacık dönüşümünün çözünürlük üstünlüğü ve zaman ve frekans alanını aynı anda kullanması nedeniyle türbülans olayında çok iyi neticeler vermiştir. Cao ve diğ., (1995), kaotik zaman serilerinin tahmininde dalgacık dönüşümü ile yapay sinir ağları modeli oluşturmuşlardır.

Luettich ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada doğu Amerikada Atlantik kıyılarındaki Albemarle-Pamlico körfez sisteminin bir parçası olan Neuse Nehir Halici (NRE) üzerinde yapılan akıntı hızı ölçümlerinde elde edilen yaklaşık yarım günlük frekans olayını incelemeye çalışmışlardır. Gözlenen yarım günlük frekansın gel-git olayından çok tuz-kaması ve dispersiyon tabakasının kalınlığı gibi dispersiyona ait karakterlerin etkili rol oynayabileceği düşünülmüştür. Kapalı sistem gereğince Atlantik okyanusunun gelgitlerinden etkilenmediği düşünülen bölgede bu yarım günlük frekans üzerinde yaz ve kış aylarında ölçülmüş akım hızlarının yanında, su seviyesi değişiminin ve rüzgar hızının da etkileri araştırılmıştır. Çalışma alanı Şekil.2.28'de görülmektedir.

Bu çalışmada amaç bu yarım günlük tepkinin belirlenmesi ve tahmin edilebilirliğidir. Başlangıçta zaman serisi üzerinde yapılan incelemelerde kararlı bir davranış gözlemlenmiştir. Güç spektrumu ve faz uyumu (Coherence) analizleri gibi Fourier analizleri kullanılmıştır: Öte yandan olayı kararlı bir zaman serisi olarak ele alıp her bir bileşenin genlik (amplitude) ve faz (phase) bileşenleri oluşturularak en küçük kareler harmonik analizi zaman serilerine uygulanmıştır. Ölçüm verileri olarak MODMON (Modeling and Monitoring of the NRE) programı çerçevesinde akıntı hızı, doğrultusu, iletkenlik, sıcaklık ve basınç değerleri ölçülmüştür. Ölçüm S4 elektromanyetik akım ölçerler ile Ağustos 1997 ve Kasım 1998 tarihleri arasında yapılmıştır. Ölçüm aletlerinden birisi tabana yakın 75 cm yüksekliğindeki bir düzleme yerleştirilmiştir. Diğeri ise toplam yaklaşık 4m derinliğe sahip nehrin yüzeyden 75-125 cm aşağısında duracak şekilde demirlenmiştir.

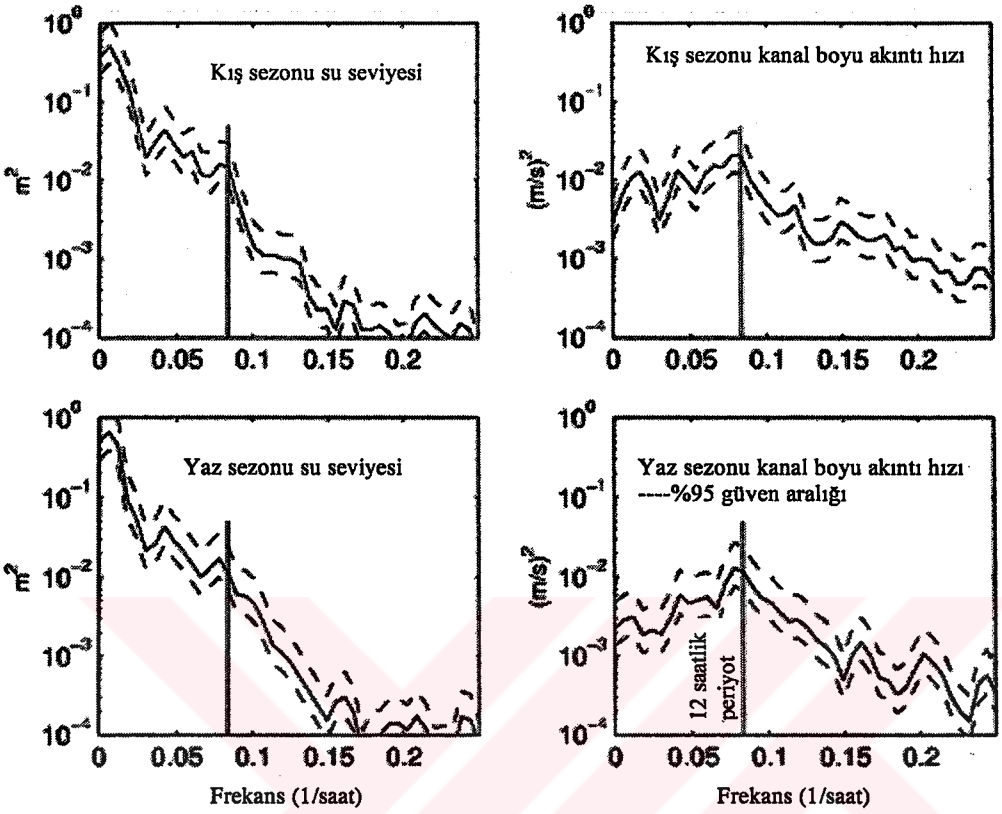


Şekil 2.28 Luettich ve arkadaşlarının (2002) çalışma alanı

Meterolojik veriler ise Sahil Güvenlik Hava İstasyonu (Marine Corps Air Statition in Cherry Point) ve Ulusal Meteoroloji İstasyonundan alınmıştır (National Weather Facility at Cape Hattreras). Çalışmada 02/07/98 ile 15/09/98 tarihleri arasındaki 10 hafta yaz mevsimi ve 17/12/97 ile 04/03/98 tarihleri arasındaki 10 haftada kış mevsimi olarak göz önünde bulundurulmuştur. Akıntı hızlarındaki taban ve yüzeye yakın yerlerdeki ölçümler ise ortalanarak analiz edilmişlerdir. Kış ve yaz mevsimleri için su seviyesi ve akıntı hızı Fourier güç spektrumları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.29).

Şekilde sol tarafta bulunan yaz ve kış su seviyesi değişimleri güç spektrumlarında 2-7 günlük frekansların yüksek uyumlu olduğu gözlenmiştir. Daha sık değişen frekanslarda spektrumda hızlı bir azalmaya mukabil yaklaşık 12 saatlik periyoda denk gelen kısımda küçük de olsa bir artış görülmektedir. Akıntı hızları için oluşturulan spektrumlarda ise gerek yaz gerekse kış spektrumlarında belirgin şekilde yarı günlük bir pik ortaya çıkmaktadır. Spektumların ardışık eklenik grafiklerinden ise kışın %55 yazın ise %62 oranında bir varyansın 6 saat ile 18 saatlik değerler arasında olduğu görülmüştür. Yaz ve kış mevsimleri için su seviyesi ve kanal

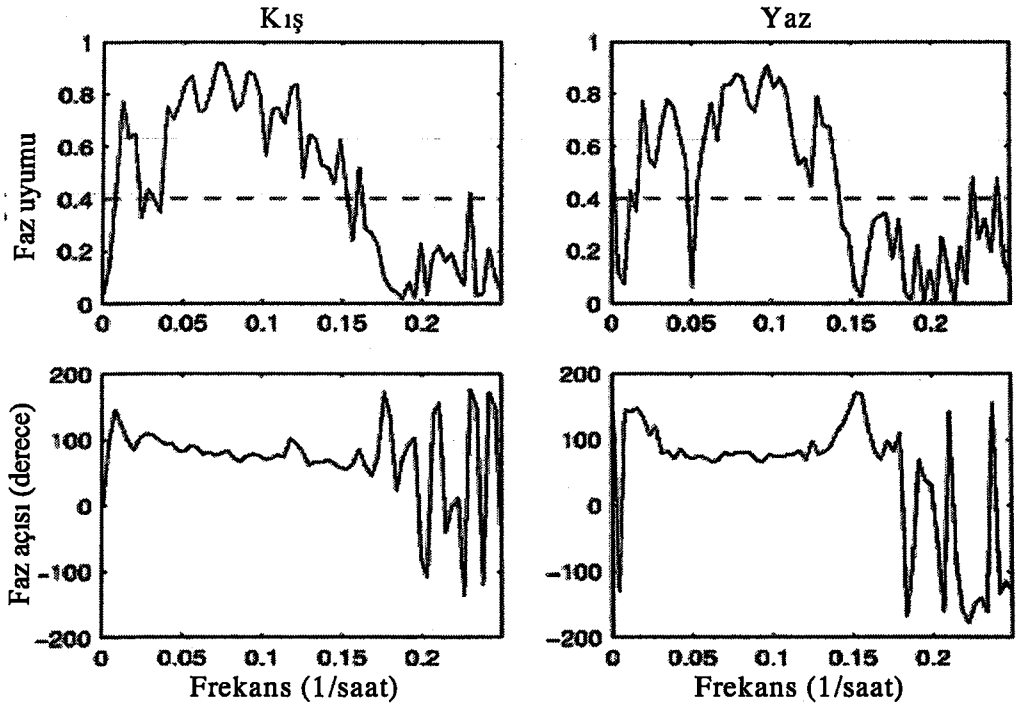
boyunca akıntı hızı ölçüm değerlerinin faz uyumu (coherence) ve faz diyagramları da çizilerek karşılaştırmalar yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 2.30).



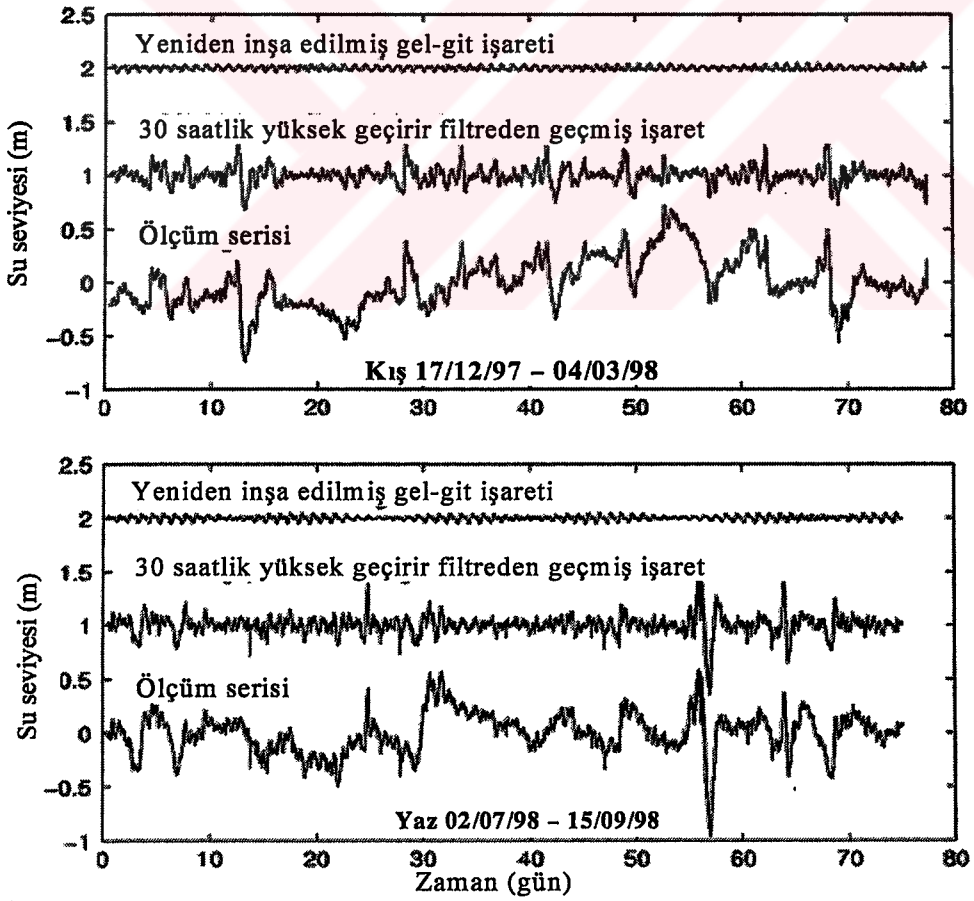
Şekil 2.29 Kış ve yaz mevsimleri için su seviyesi ve akıntı hızı Fourier güç spektrumu değerleri

Faz uyumu açısından iki değişkenin de hayli uyumlu olduğu söylenebilir. Buradaki yatay çizgi ise %95 güven düzeyini ifade etmektedir. Faz açısı bakımından ise genelde 90 derecenin üzerinde oluşan faz açısı bu derecenin üzeri frekans aralığı için hareketin barotropik duran dalga şeklinde olduğunu ifade eder.

En küçük kareler yöntemi kullanılarak su seviyesi verilerine harmonik analiz yapılmıştır. Şekil 2.31'de yaz ve kış mevsimi için 7 ayrı bileşenin (O1, K1, N2, M2, S2, M4, M6) faz ve genliklerinden elde edilen yeniden oluşturulmuş seri, 30 saatlik yüksek geçirgen filtreden geçirilmiş yeni seri ve ölçüm serisi görülmektedir. Yeniden oluşturulmuş gel-git serisi, ölçüm serisinin varyansının % 1'ini karşılarken, 30 saatlik yüksek geçirir filtreden geçirilen seri ise varyansın ancak % 6'sı kadardır. Kanal boyunca akıntı hızları içinde yapılan harmonik analizde aynı değerler elde edilmiştir.

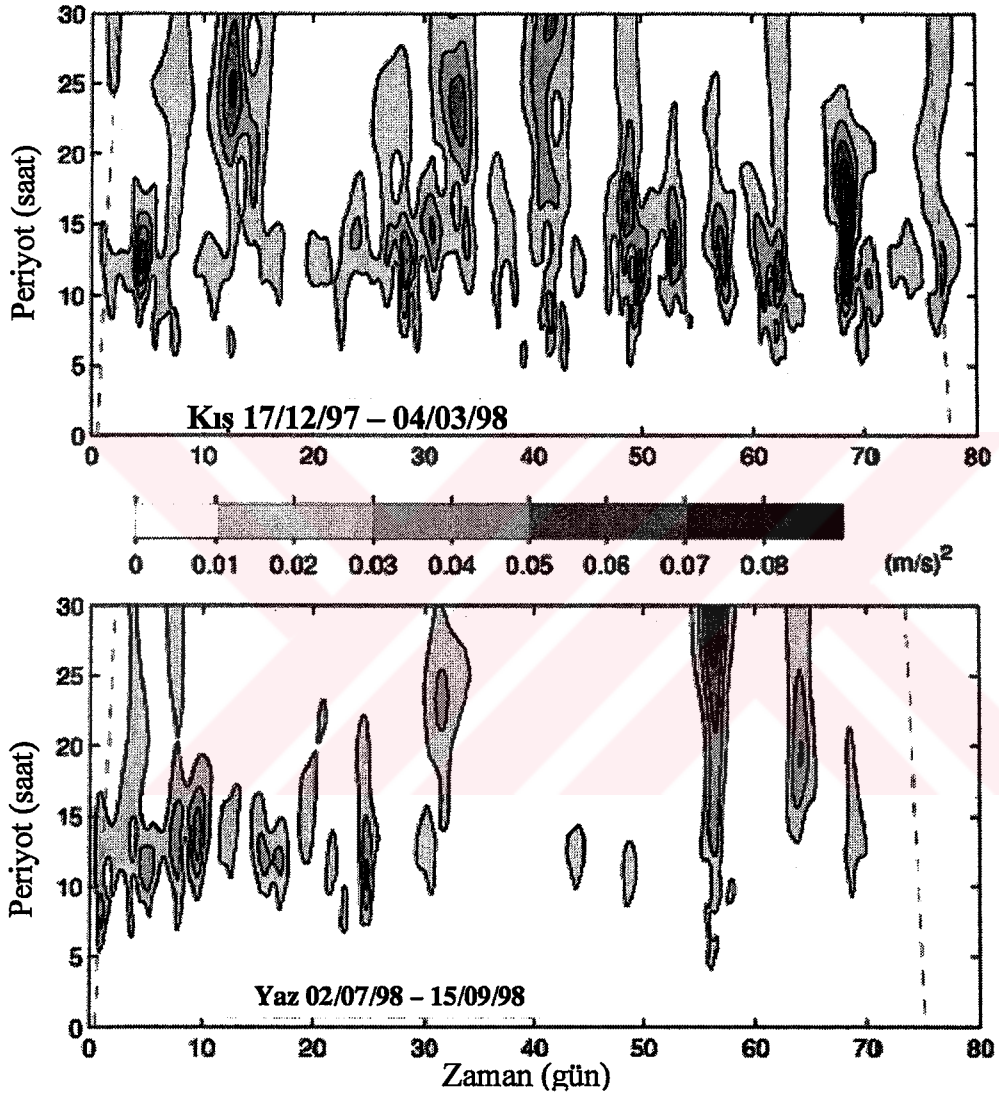


Şekil 2.30 Yaz ve kış mevsimleri için su seviyesi ve kanal boyunca akıntı hızı ölçüm değerlerinin faz uyumu (coherence) ve faz diyagramları



Şekil 2.31 Kış ve yaz mevsimleri için 7 ayrı bileşenin (O1, K1, N2, M2, S2, M4, M6) faz ve genliklerinden elde edilen yeniden oluşturulmuş seri, 30 saatlik yüksek geçirir filtreden geçirilmiş işaret ve ölçüm serileri grafikleri

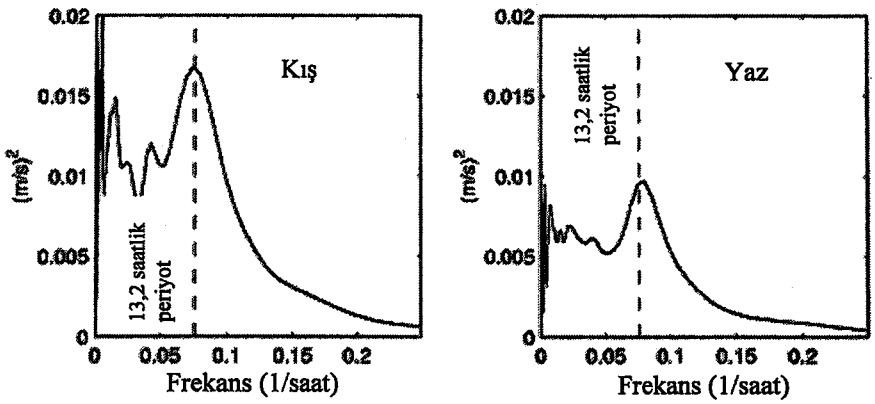
Kullanılan bu metotların yanında zaman-frekans gösteriminin uygunluğu ve kararlı olmayan davranışa sahip işaretlerden periyodik işaretlerin çıkarılması için çok uygun olan dalgacık dönüşümü kanal boyu akıntı hızı verilerine uygulanmıştır. Şekil 2.32'de kış ve yaz dönemlerine ait akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumları görülmektedir.



Şekil 2.32 Kış ve yaz dönemlerine ait akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumları

Her iki mevsim için çizilen dalgacık dönüşümü spektrumlarında 10-15 saatlik periyot ölçeğinde bir enerji veya varyans yoğunluğu görülmektedir. Özellikle kış mevsiminde bu enerji yaza nispeten daha yoğundur. Ele alınan kış mevsimi boyunca ve bir miktar yaz başı döneminde 10-15 saatlik periyodun 2 yada 5 günlük aralıklarla tekrar ettiği görülmektedir.

Eğer dalgacık dönüşümü spektrumu yersel görünüm yerine global olarak görülmesi istenilirse zaman boyunca ortalanmış bir spektrumla bakılabilir (Şekil 2.33). Şekilde kış ve yaz dönemlerine ait her iki global dalgacık spektrumunda 13,2 saatlik bir periyot açıkça görülmektedir



Şekil 2.33 Şekil 2.32 için elde edilmiş global dalgacık spektrumları

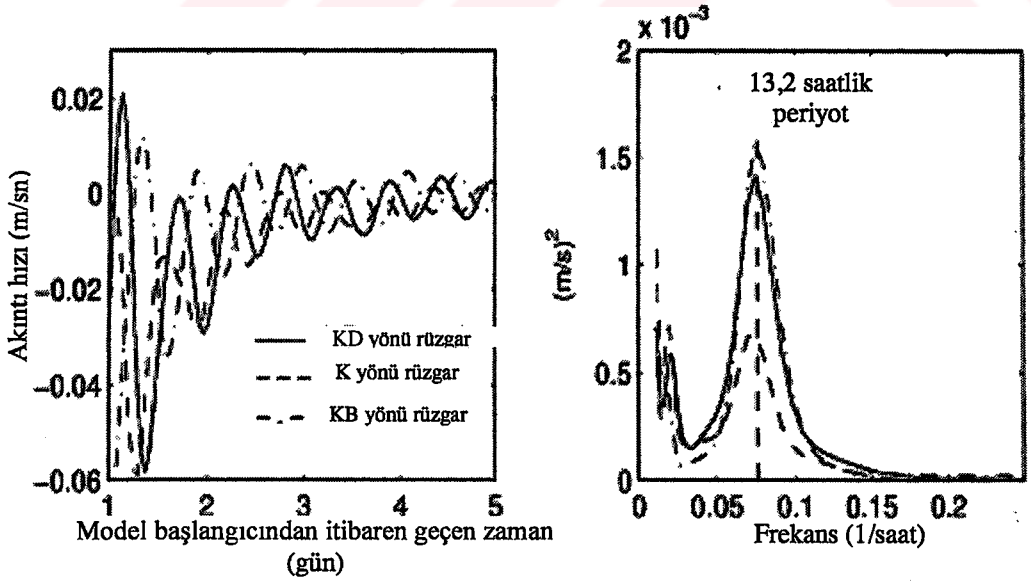
Çalışmada barotropik özelliğe sahip düşey olarak toplanan bir sonlu elemenlar çevrinti modeli (ADCIRC-2DDI) de kullanılmıştır. Model hız serisinin analizlerinden gözlemlenen periyodun incelenen kapalı haliçler sistemindeki (Şekil 2.28) salınımları (seiche) etkileyip etkilemediğini ortaya koymaktır. Oluşturulan modelin ızgarası, sistemi etkileyen temel geometri ve batimetri değerlerini içermektedir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 Nümerik model ızgarası

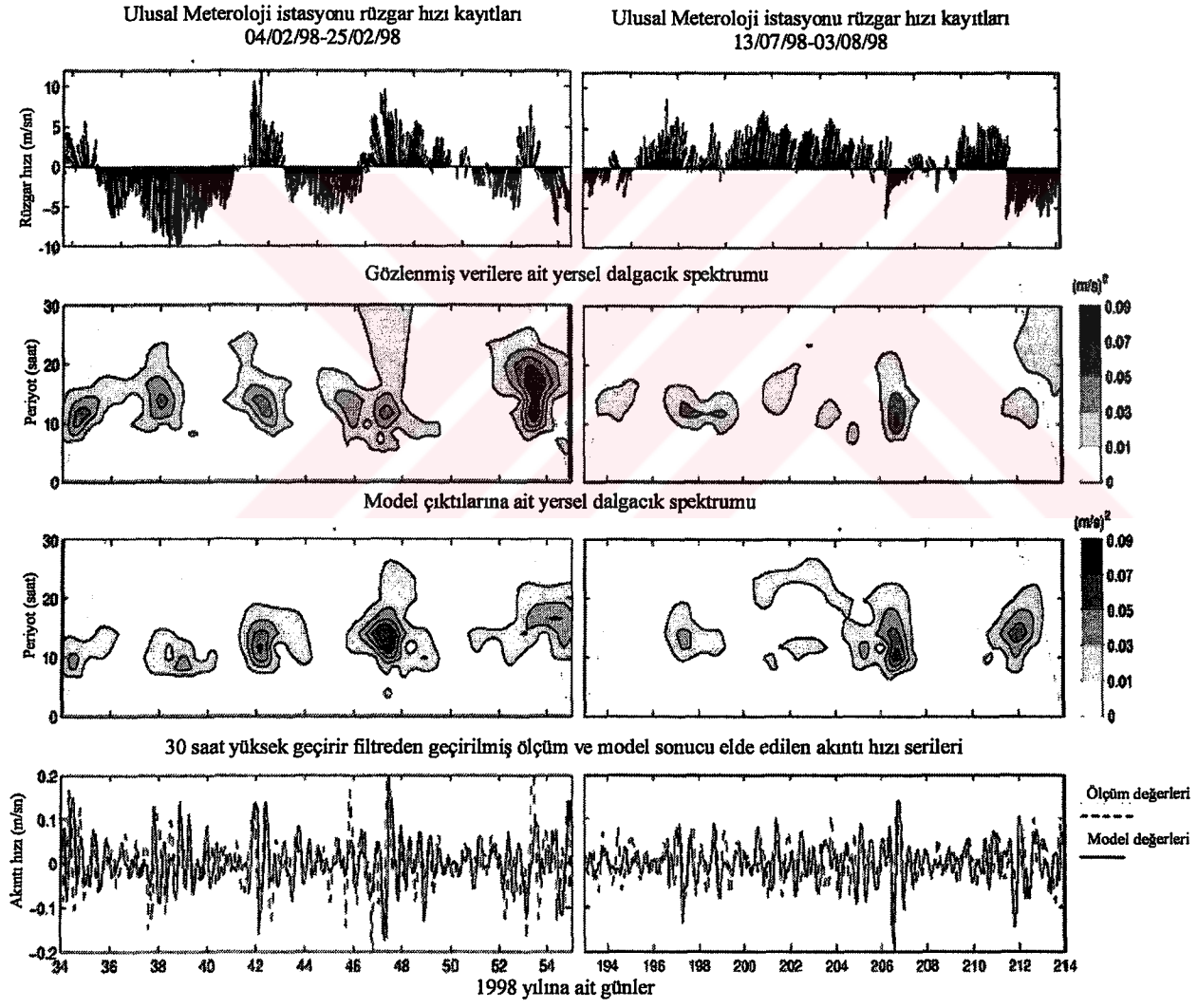
Haliç sistemi eğer küçük açıklıklar ihmal edilirse okyanus kıyısından tecrit edildiği varsayılabilir. Bu nedenle sistemdeki salınım barotropik kaynaklı olup aşağıdaki

nedenlerden oluştuğu varsayılmıştır. Düşey yoğunluk tabakalaşması ve haliç çevrimi (memba tarafı tabanında ve mansap tarafı yüzeyinde) sıkça oluşmasına rağmen, tabana yakın ve yüzeye yakın olarak yerleştirilen akım ölçerler bir salınım frekans bandı tespit etmemiştir. Salınım frekans bandında su seviyesi ve akıntı hızı için bir barotropik duran dalgayı ifade eden 90 derecenin üzerinde faz tespit edilmiştir. Bu alanı karakterize edebilecek geniş yüzey alanlı ve sığ bölgelerde su kolonunun karışmasında rüzgarın oldukça etkisi olduğu söylenebilir. Bu değerlendirilmelerden sonra oluşturulan model ilk olarak sistemin rezonans karakterini tespit etmede kullanılmıştır. 20 m/s 'lik bir hızda ve 10 saat esecek sabit doğrultudaki rüzgar modele etki ettirilmiştir. Bu rüzgar sistemde kararlı bir durum oluşturulması için yeterlidir. Daha sonra rüzgar sistem sakin konuma geçinceye kadar durdurulmuştur. Sonuçlar Palmico Boğazında (Şekil 2.28) kuvvetli bir sönümlenme ve periyodu rüzgar doğrultusundan bağımsız serbest bir salınım oluşturmuştur. Bu salınım ölçüm verilerinde olduğu gibi global dalgacık dönüşümü spektrumu ile incelenmiştir. Nümerik çözümün çalıştırılması ile elde edilen salınımların sönümleme-zaman grafikleri Şekil 2.35'de sol tarafta gösterilmiştir. Bu grafikte çeşitli doğrultularda olan salınımınlar ve sönümlenme süreleri görülmektedir. Sağ tarafta ise bu salınımlara ait global dalgacık dönüşümü spektrumu yer almaktadır. Spektrum açıkça önceden ifade edilen ölçüm verileri için elde edilmiş 13,2 saatlik periyodu belirtmektedir. Bu durum model ile ölçüm değerlerinin uyumunu göstermektedir.



Şekil 2.35 Nümerik çözümün çalıştırılması ile elde edilen salınımların sönümleme-zaman grafikleri ile bu grafiğe ait global dalgacık spektrumu.

Son olarak da yarım günlük salınımın kaynağının anlaşılması için oluşturulan modeli (ADCIRC-2DDI) çalıştırmak için akıntı ölçüm istasyonuna çok yakın olan sahil güvenlik hava ölçüm istasyonunda kayıt edilen 21 günlük rüzgar hızı verilere girdi olarak sokulmuştur. Bu istasyona ait verilerden sonra ulusal meteoroloji istasyonuna ait rüzgar kayıtları da modele girilmiştir. Fakat meteoroloji istasyonu verileri ile çalıştırılan model ölçüm verileri ile daha uyumlu sonuçlar vermiştir. Şekil 2.36'da iki ayrı döneme ait (04/02/98-25/02/98 ve 13/07/98-03/08/98)21 günlük rüzgar hızı serisi ve bu rüzgar hızı ile çalıştırılan modelden elde edilen akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumu ve aynı döneme ait ölçülmüş akıntı hızı verileri görülmektedir.



Şekil 2.36 İki ayrı döneme ait rüzgar hızı serisi, modelden elde edilen ve gözlenmiş akıntı hızlarının yersel dalgacık dönüşümü spektrumları ve 30 saatlik filtreden geçirilen akıntı hızları.

En son satırda bulunan grafik ise, 30 saatlik yüksek geçirgen bir filtreden geçirilen model sonucu oluşan akıntı hızları ile ölçülmüş akıntı hızları zaman serilerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu filtre sayesinde 30 saatten yüksek periyoda sahip bileşenler atılarak kanal boyunca tipik bir şekilde gözlemlenen 10 cm/s akıntı hızı ile nadiren kışın görülen 20 cm/s'lik akıntı hızlarının modelde ve ölçüm serisinde karşılaştırılmalarına imkan veriri. Şeklin sol tarafı kış dönemine rüzgar verilerini ve analiz sonuçlarını sağ tarafı ise yaz dönemine ait verileri ve analiz sonuçlarını göstermektedir.

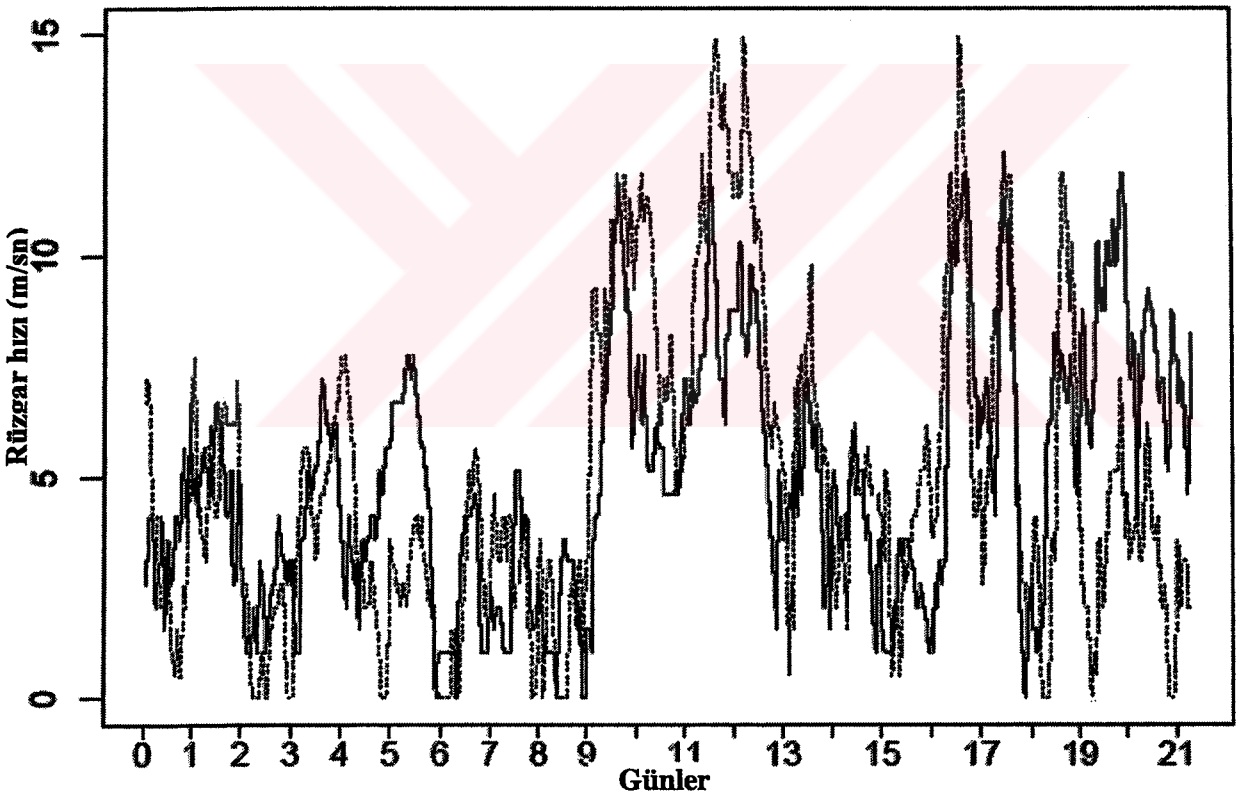
Şekilden çıkarılacak ilginç sonuçlardan biri rüzgar hızının yön değiştirdiği durumlara oluşan değişimden kaynaklana bir salınım dalgacık dönüşümü spektrumunda oluşmuş olmasıdır. Rüzgar hızındaki bu değişim çalışma sahasında bir salınıma (seiches) yol açmaktadır. Dalgacık dönüşümü spektrumunda yer alan yoğun enerji bölgelerinin aralıkları yazın ve kışın çok az değişen kuvvetli bir olayı işaret ederken zaman serisi çizimleri de bir yarı günlük olayın sistemde sürekli devam ettiğini göstermektedir. Bu durumdan da görülen bu salınımların kapalı havzadaki bir salınım olduğuna ve atmosferik bir gelgit olmayacağı kanaati kuvvetlenmektedir.

Luettich ve diğ. (2002) yaptığı bu çalışma kararlı olmayan (nonstasyoner) ve içerisinde değişik periyodik bileşenler barındıran bu tip hidrodinamik olaylarda dalgacık dönüşümünün ne derece güçlü bir şekilde kullanılabilen bir yöntem olduğunu göstermektedir.

2.4 Modelleme ile ilgili çalışmalar

Dalgacık dönüşümünün modelleme uygulamaları ile ilgili çalışmalar literatürde nadir rastlanılmaktadır. Literatürde su kaynaklarından farklı alanlarda örneklerine rastlanmıştır. Bunlardan en önemli olarak sayılabilecek olanı Nason ve Sapatinas tarafından rüzgar hızı modellemesi çalışmasıdır (Nason ve Sapatinas, 2002). Çalışma bir açıklayıcı zaman serisi $\{X_t\}_{t\in Z}$ ile bir cevap zaman seris $\{Y_t\}_{t\in Z}$ arasındaki ilişkiyi modelleme üzerinedir. Bir X_t zaman serisinin farklı ölçek ve frekans değerlerinde analiz edilmesi sonucu elde edilen dalgacık paket bileşenleri yardımıyla Yt serisi ilişkisi kullanılarak modelleme yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler Welsh Meteroloji idaresine ait Valley ve Aberport ölçüm istasyonlarındaki saatlik rüzgar hızı verileridir. Şekilde her iki istasyona ait 06/05/1995 tarihinden itibaren 21 günlük saatlik rüzgar hızı kayıtları görülmektedir (Şekil 2.37).

Şekilde 3.37'de kesikli çizgi Aberporth, düz çizgi ise Valley istasyonlarına ait zaman serileridir. Valley istasyonu Aberporth istasyonunun 120 km kuzeyinde ve Cardigan körfezine yakın bir yerde bulunmaktadır. Çalışmada amaç Valley istasyonuna ait rüzgar hızı değerlerini $\{Y_t\}_{t\in Z}$ Aberporth verileri $\{X_t\}_{t\in Z}$ yardımıyla modellemektir. Çalışmada, kurulacak modelin Valley'deki rüzgar rejiminin Aberpoth verileri ile tahmini ve bir metod geliştirilmesi anlatılmıştır. Modelin bir diğer önemli tarafı ise mevcut modellere göre fiziksel olarak anlamlı oluşudur. Metot Aberporth'daki rüzgar aktivitelerinden hangisinin Valleydeki rüzgar hızı tahmminlerinde etkili olduğunu ortaya koyabilmektedir. Bu sayede metot, *Xt* ve *Yt* gibi iki durağan olmayan yapıya sahip zaman serisine durağan olmayan yapıları dikkate alınmadan klasik metotların uygulanması yerine olayın fiziksel karakterini dikkate alarak uygulanmasını önerir.



Şekil 2.37 Valley ve Aberport ölçüm istasyonlarına ait 06/05/1995 tarihinden itibaren 21 günlük saatlik rüzgar hızı kayıtları

Çalışmada önerilen metot her iki zaman serisi arasında doğrudan bir modelleme yerine *Xt* zaman serisine ait örnek seyreltmeyen yani veri sayısını azaltmayan dalgacık paket dönüşümü (Nondecimated Wavelet Packet Transform, NWPT) bileşenleri kullanılarak modellemeye gidilmesidir. Kullanılan dönüşüm yardımıyla

Xt zaman serisi *K=2T-2* adet bileşene ayrılır. Burada *T* veri sayısını ifade eder. Her bir bileşen Xt'ye ait varyansın bir kısmını içerir. Böylece her bir bileşen bir *t* anında Xt'nin ne kadarını ifade ettiğini gösterir. Xt serisi bu şekilde paketlere ayrıldıkdan sonra hangi paket bileşeninin Yt ile modelleme sırasında etkili olduğu belirlenerek o bileşenler ile Yt arasında bir model ortaya konulur. Çalışmada 512 veriye sahip Xt zaman serisi NWPT kullanılarak 512 veri sayısına sahip 1022 ayrı seriye ayrılmıştır. Yt ile korelasyonu en yüksek olan 51 seri rasgele seçilmiş ve S1....S51 şeklinde sıralanmışlardır. Daha sanra genelleştirilmiş lineer model kullanılarak en uygun bileşenler seçilmiştir. Paket bileşenlerin seçiminde farklı yolların izlenebileceği yazarlar tarafından vurgulanmaktadır. Bu seçim sırasında Yt verileri Gamma dağılımına uydurularak geriye doğru değişken seçimi algoritması ile değişken sayısı azaltılmıştır. Çalışmada modelin kuvvetliliğini arttırmak için ilave olarak yön parametresi konulmuştur. Sonuçta elde edilen model aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\log(Y_t) \approx \mu + S2 + S20 + S35 + S39 + DIR \qquad (2.1)$$

Burada μ ortalama, S2, S20, S35, S39, seçilen dalgacık paketi bileşenleri ve *DIR*, yön katsayısıdır. Paket bileşenlerinin eldesinde kullanılan Haar dalgacığına ait taban fonksiyonları Şekil 2.38'de gösterilmiştir. Taban fonksiyonların açığa çıkardığı bileşenlerin fiziksel olarak anlamları şu şekilde izah edilebilir.

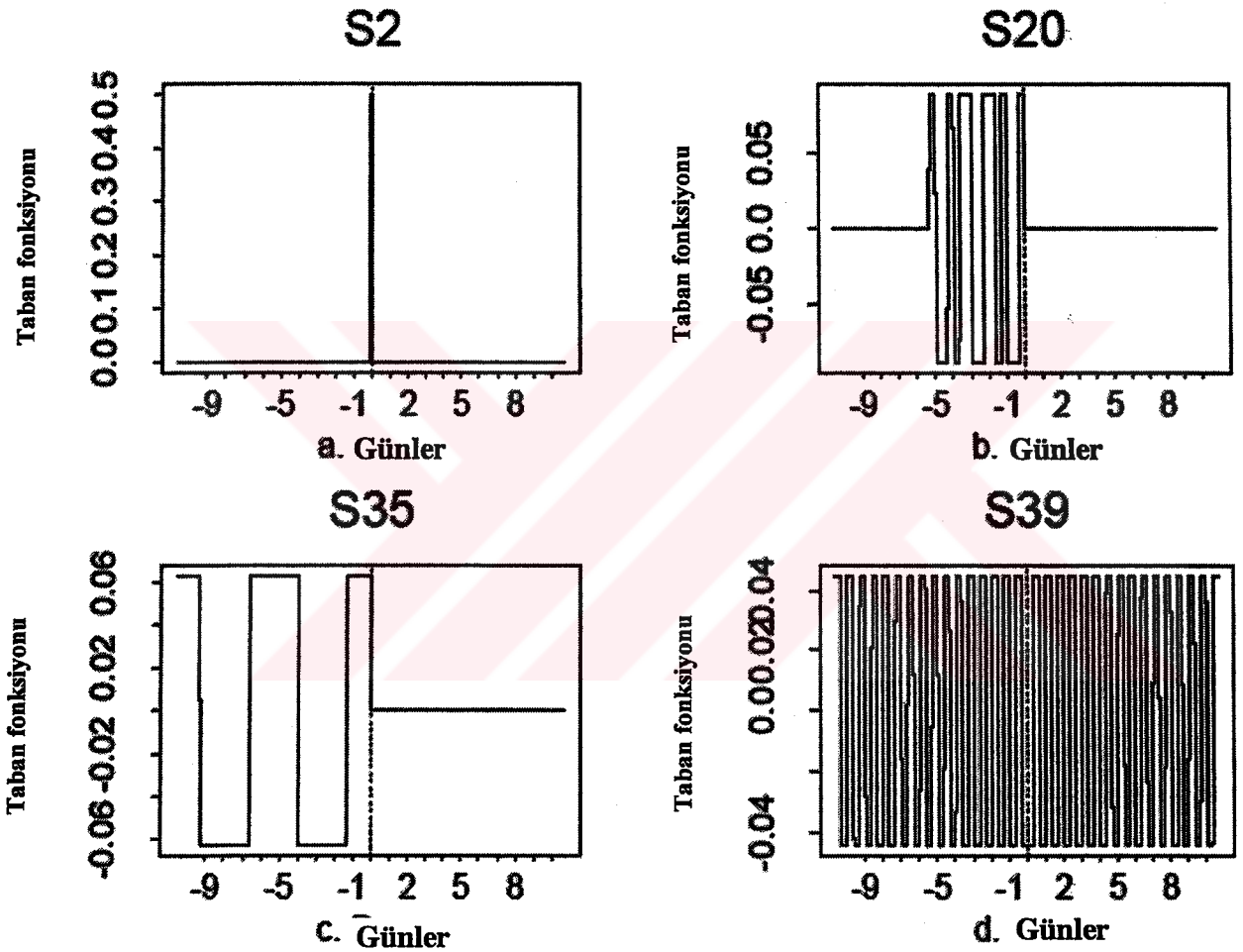
S2: 7. ölçek seviyesindeki bir Haar dalgacık paketidir ve gerçekte "baba dalgacık" olarak bilinir. Bu ölçek bilgileri önceki 4 saatlik ortalamadır. Bu paket bileşeninin modele dahil edilmesi ile *Xt+Xt-1+Xt-2+Xt-3* serilerinin tahmin için önemli olduğunu ortaya koyar.

S20: 23 saatlik ortalama salınım frekansına sahip bir dalgacık paketidir. Bu paket yardımıyla rüzgar hızındaki günlük değişimlerin yakalandığı varsayılabilir. Bu durum tahmin için günlük bileşenin önemli olduğunu gösterir. Ancak bu durum salınım yalnızca geçmiş 5 gün içerisinde olmuşsa geçerlidir.

S35: 4,7 günlük ortalama frekansa sahip dalgacık paketidir. Bu salınım rüzgar hızı salınımı için çok bilinen bir frekansdır. Aslında bu salınım makro meteorolojik piklerin ortasına düşer ve üsten geçen geniş ölçekli basınç sistemleri ile birleşir.

S39: Tüm seri boyunca 16 saatlik bir frekansa sahip en fazla görülen salınımdır. Fakat şekilde görüldüğü gibi bir t=0 anından hemen önceki veya hemen sonraki 8

saat boyuca ortalanmış bir salınımı hariç tutmak lazım. Rüzgar hızını ortalama 4-5 m/s kabul edilirse rüzgarın Aberport ile Valley istasyonları arasını 8 saatte almasına rağmen, bu paketi doğrudan bir meteorolojik tahminin içine koymak oldukça zordur. Çünkü S39 paketi çizginin her iki yönünden yani geçmişten olduğu kadar gelecekten de eşit bir şekilde veriler alır. Bu durumu matematiksel olarak mantıklı ise de gerçek zamanlı tahminler için problem teşkil eder. Çalışmadaki örnek için bu paketteki geçmiş verilerin alınması, gelecek verilerin (sağ taraf) kullanılmaması uygun olur.



Şekil 2.38 Paket bileşenlerinin eldesinde kullanılan Haar dalgacığına ait taban fonksiyonları

Çalışma sonucunda oluşturulan model ortalama karesel hata (Mean Residual Sums of Squares) terimi yardımıyla değerlendirilmiştir. 21 günlük verilerin kullanıldığı tahminlerde önerilen metot 0,088 hata klasik metot ise 0,094 hata oranı vermiştir. 10 günlük verilerin kullanıldığı tahminlerde önerilen metot 0,12 klasik metot 0,14 hata vermiştir. 5 günlük verilerin kullanıldığı tahminlerde ise önerilen metot 0,19 klasik metot 0,23 hata oranı vermiştir. Metot yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağlamasının

yanında bu değerlerin rüzgar gücü hesaplarında küplerinin kullanılıyor olmasından dolayı iyileşme aslında sanıldığından da daha önemlidir.

Tez çalışmasında ki modellemede ele alınan akım serilerin komşu ölçüm istasyonlarına ait olması açısından bu çalışma ile tez çalışmasının benzerliği yüksektir. Dikkat edilecek olursa çalışmada iki istasyonun bulunduğu bölgelere göre dalgacık paketlerinden elde edilen bileşenlerin fiziksel anlamlılığı araştırılmıştır. Burada fiziksel anlamı yüksek bileşenlerin seçilmesi için genelleştirilmiş lineer model ve geriye doğru değişken azaltma teknikleri kullanılmıştır. Tez çalışmasında ise her iki istasyon için bileşenler çok çözünürlüklü analiz yardımıyla filtrelerden geçirilerek elde edilmiş ve aynı ölçek seviyesinde bileşenlerin modellenmesi yoluna gidilmiştir. Bileşenlerin fiziksel anlamı literatürde bölgesel karakter çıkarımda sıkça kullanılan enerji spektrumları kullanılarak elde edilmiş ve modellerin güvenilirlikleri bir çok hata kriteri ile test edilmiştir.

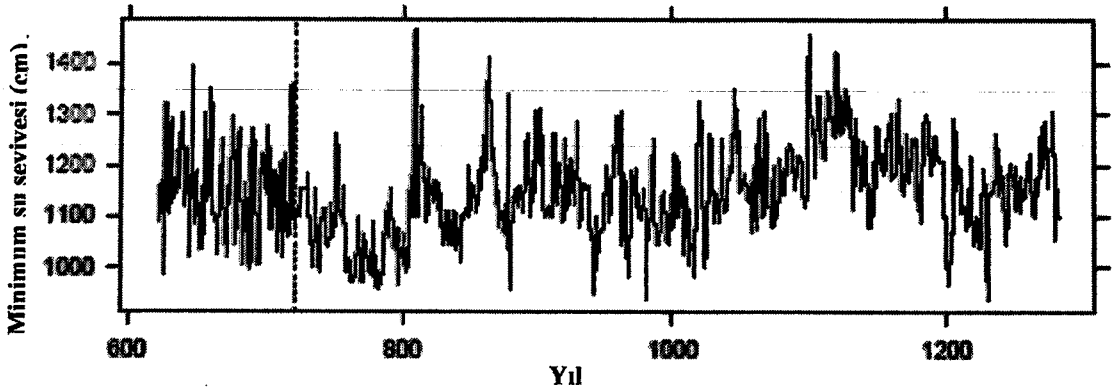
3. DALGACIK DÖNÜŞÜMLERİ

3.1 Zaman serileri

Zaman serileri; zamana bağlı bir ya da bir çok değişkenin kayıt edilmesi sonucu ortaya çıkan fonksiyonlardır. Bildik en uzun süreli zaman serisi kaydı Nil nehri su seviyesine aittir. Toussoun tarafından 1925 yılında toplanan Nil nehri kayıtlarında, en yüksek ve düşük su seviyeleri ölçümleri mevcuttur. Bu zaman serisi milattan sonra 622 yılından 1922 yılına kadarki kayıtları içermektedir. Bu aralıktaki ilk eksik veri 1285 yılına ait yıllık minimum değerdir. Bu haliyle seri 663 yıl uzunluğunda sürekli bir kaydın incelenmesini imkan sağlar. Kayıtlarla ilgili C. S. Jarvis 'Nil nehri taşkın seviye kayıtları' (Flood-stage records of the river Nile) adlı çalışmasında (1936) kayıtlarla ilgili şu tespitleri yapmıştır:

"Nil nehri kayıtları ile ilgili göz önünde bulundurulması gereken bütün değişim, belirsizlik ve yanlış inanışlara rağmen, bu kayıtların bazı önemli bilgiler sakladığına inanılır ve çok sayıda öğrenci için daha ileri çalışmalar ve daha fazla bilgi üretebileceği ile ilgili kuvvetli bir önyargı vardır."

Jarvis'in bu sözleri çok isabetlidir, çünkü Nil nehrinden toplanan kayıtlar, çok küçük Brownian hareketlerii ve (fractional Brownian motion) çok küçük Gausian gürültüleri modellerinin de (fractional Gaussian noise) konu edildiği matematiğin bir kısmında ve uzun dönemli zaman serileri davranışlarının incelendiği istatistik sahalarının gelişiminde önemli bir itici güç oluşturmuştur. En uzun süreli zaman serisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Whitcher ve diğ., 2002).



Şekil 3.1 Nil nehrine ait yıllık minimum su seviyesi kayıtları

Zaman serileri analizleri, bir çok bilim dalında çok önemli yer tutar. Zaman serisinin X(t) uzunluğu, kesintisiz oluşu gibi etkenler analizler için önemlidir. Bir zaman serisini oluşturan bileşenler incelendiğinde zaman serisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$X(t) = B_i + P_i + T_i + S_i \tag{3.1}$$

Burada B_i; belirsiz kısım, P_i; periyodik veya spektral bileşen, T_i; artış veya azalış şeklinde trend, S_i; sıçrama bileşenini ifade eder.

Zaman serileri kayıtları sahip oldukları spektral bileşenlerin zaman içerisinde değişip değişmemesine göre iki ana sınıfa ayrılırlar. Bunlardan birisi zaman içerisinde durağan veya kararlı olan seriler, diğeri ise zaman içerisinde kararlı veya durağan olmayan zaman serileridir.

3.1.1 Zamanla değişmez, durağan işaretler (Stasyonerlik)

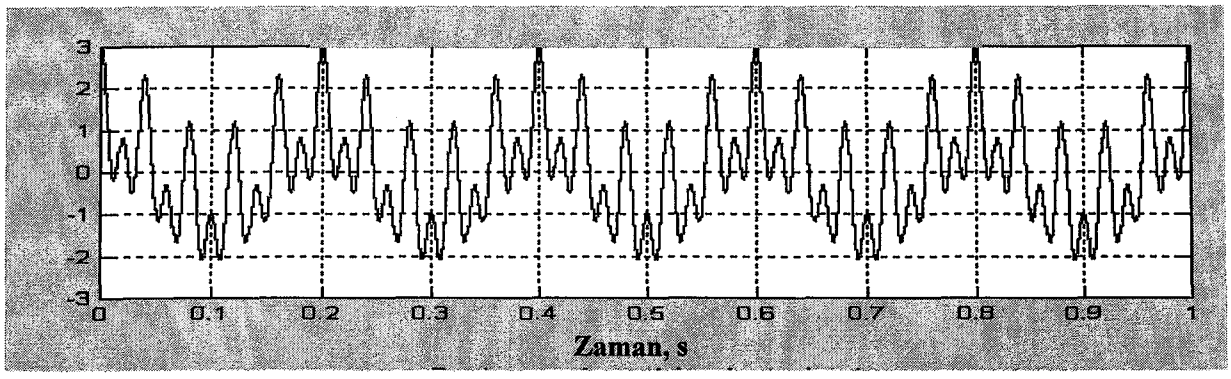
Giriş ve çıkış bağıntılarının zamana bağlı olmadığı sistemler kararlıdır. İstisnasız bütün tabii sistemler zamanla değişirler fakat değişimin tanımlanıp modele uyarlanması zor olduğundan sistem analizinde genelde zamanla değişmezlik kabulü yapılır ki genelde bu sistemin gerçekliliğinden uzaklaşmak demektir.

Durağan işaretler zaman içerisinde değişmeyen spektral bileşenlerden oluşur. Yani tüm spektral bileşenler tüm zaman boyunca mevcutturlar, dolayısıyla herhangi bir zaman bilgisini bilmeye gerek yoktur. Şekil 3.2'de zaman içerisinde veya zaman boyunca spektral bileşenlerin sürekli olarak aynı kaldığı bir seri görülmektedir. Şekilde yatay eksen zamanı düşey eksen ise fonksiyonun değerini ifade eder.

Şekil 3.2'deki zaman serisine ait fonksiyon bağıntı (3.2)'de verilmiştir.

$$x(t) = \cos(2\pi.5t) + \cos(2\pi.25t) + \cos(2\pi.50t) \quad (3.2)$$

Burada x(t) zamana bağlı fonksiyon ve t ise zamanı ifade etmektedir. Bu zaman serisi 5, 25 ve 50 Hz'lik üç frekans bileşenine sahiptir.



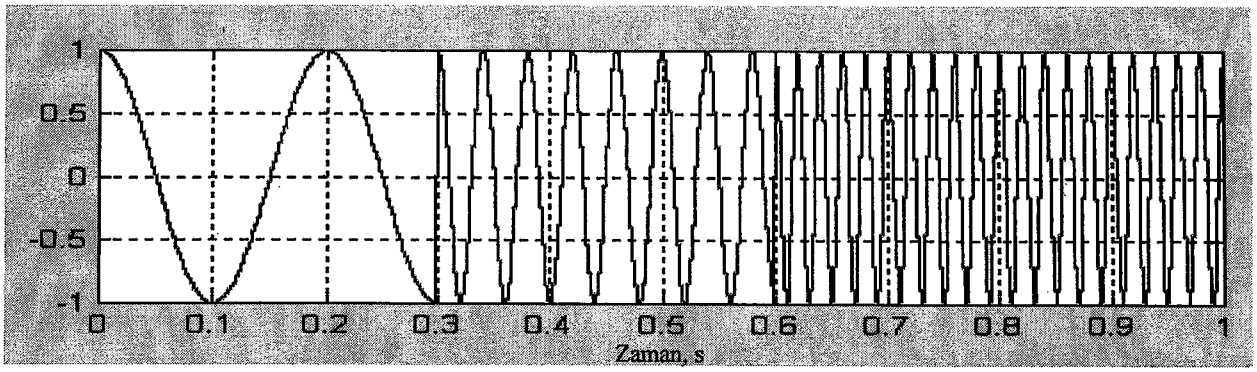
Şekil 3.2 Zaman içerisinde değişmeyen spektral bileşenlere sahip durağan zaman serisi

Şekle dikkatli bakıldığında 5, 25 ve 50 Hz'lik spektral bileşenlerin tüm zaman boyunca tekrar ettiği ve zamanın her hangi bir kısmında bu spektral bileşenlerde bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu tür serilerin analizinde genelde daha basit spektral analizler yeterli olabilmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık değerleri, yıllık akım veya yağış değerleri bu türden sayılabilecek zaman serileridir. Fakat bu genel bir kabuldür ve her ne kadar yıllık bileşenler durağan olarak kabul edilse de yukarıda açıklanan Nil nehri kayıtlarında zaman içerisinde ortaya çıkıp kaybolan bir çok değişik spektral bileşenler söz konusudur. Bu nedenle özellikle doğal olayların spektral olarak incelenmesi çok zor ve karmaşıktır. İnceleme sırasında uygun yöntemler kullanılmaz ise hangi olayın ne zaman başlayıp ne zaman bittiği konusunda bir fikir edinilmesi zordur (Georgiou ve Kumar, 1994).

3.1.2 Zamanla değişen, durağan olmayan işaretler (Non Stasyonerlik)

Durağan olmayan işaretler zaman içerisinde değişen spektral bileşenlere sahiptirler. Bu tür zaman serilerine tabiatta sıkça rastlanmaktadır. Aslında su kaynakları kayıtları da dahil olmak üzere tüm doğal kayıtların yapısını anlamak, yorumlamak oldukça zor ve zahmetli işlerdir. Özellikle zaman içerisinde ortaya çıkıp kaybolan olayların tespit edilmesi veya bir olayın başlangıcının ne zaman olduğunun tayin edilmesi doğal olayların incelenmesinde son derece önemlidir. Bu nedenle hangi bileşenin ne zaman görüldüğünün bilinmesi gerekir. Bu tür analizlerin ışığında, tabiatta meydana gelen olayların anlaşılması bir parça olsun kolaylaşır. Şekil 3.3'de, Şekil 3.2'de

verilen durağan serinin sahip olduğu spektral bileşenlerle aynı spektral bileşenlere sahip olan bir zaman serisi görülmektedir. Bu serinin öncekinden farkı spektral bileşenlerinin zamanın belirli kısımlarında ortay çıkıp kaybolmasıdır. Şekli ifade eden fonksiyon bağıntı (3.3)'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Zaman içerisinde farklı aralıklarda ortaya çıkan spektral bileşenlere sahip durağan olmayan zaman serisi

$$x(t) = \cos(2\pi.5t) \oplus \cos(2\pi.10t) \oplus \cos(2\pi.20t) \oplus \cos(2\pi.50t) \qquad (3.3)$$

Bu seride durağan olmayan, 5, 25 ve 50 Hz'lik üç frekans bileşeninden oluşan yapay bir işaret şekilde gösterilmiştir.

Burada $\oplus$ işareti peşpeşiliği (Concatenation) ifade etmektedir. Şekil 3.3'den görüleceği üzere fonksiyonun 5Hz'lik bileşeni 0,3 zaman adımına kadar meydana gelirken 25Hz'lik bileşen 0,3-0,6 arası ve 50Hz'lik bileşen 0,6-1,0 arası arası meydana gelmektedir. Üretilen bu suni işaretin spektral bileşenleri farklı zaman aralıklarında farklı değerler almış olur. Dolayısıyla bu işaret zaman içerisinde kararlı tavır göstermez yani durağan olmayan bir işarettir.

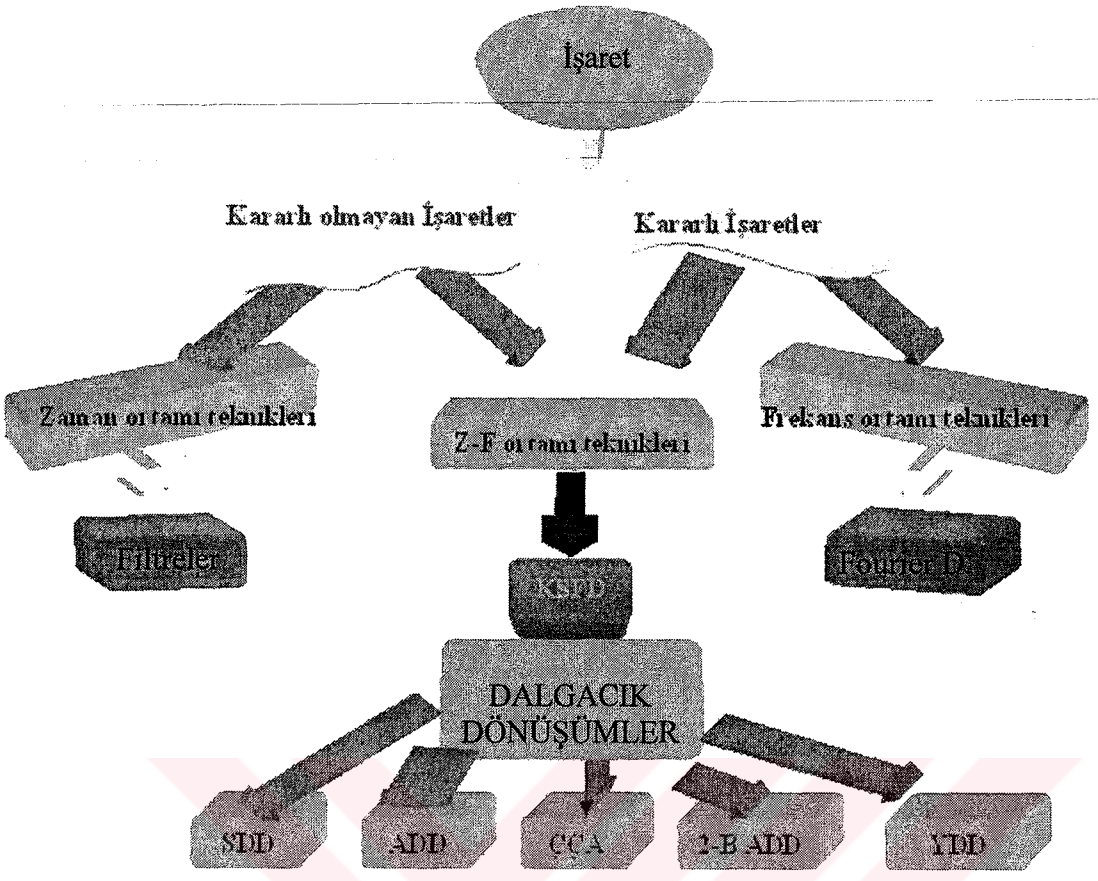
3.2 İşaret işleme teknikleri

Bir çok bilimsel alanda yapılan çalışmalarda ölçümleri ve bunlardan elde edilen sonuçları analiz edip yorumlamak çok büyük önem arz eder. Su kaynaklarının planlama, tasarım ve işletmesinde akarsu akımlarının ölçülmesi ve analizi önemlidir. Analiz edilen veriler geçmişteki akımların davranışları hakkında bilgi verdiği gibi gelecekte muhtemel olabilecek akımlar konusunda da önemli ipuçları sağlarlar. Elde edilen ölçüm değerleri bazen bir işaret bazen de bir zaman serisi fonksiyonu olarak adlandırılsalar da onların işlenmesi ve yorumlanmasında kullanılan tekniklerin bir çoğu ortaktır.

İşaret işleme tekniklerini genelde üç ana başlık halinde toplamak mümkündür. Bunlar sırası ile zaman ortamında işaret analizleri, frekans ortamındaki işaret analizleri ve hem zaman hem de frekans ortamında aynı anda analiz teknikleridir. Bu tekniklerden zaman ortamındaki teknikler genelde filtreleme işlemleri olarak bilinir. Genelde kararlı olmayan işaretlerin analizinde bu teknik sıkça kullanılır. Frekans ortamındaki tekniklerde ise esasen Fourier dönüşümleri (FD) kullanılır. Fourier dönüşümleri tek başlarına daha çok kararlı işaretlerin analizinde başvurulan bir yöntemdir. Hem zaman hem de frekans ortamındaki analizleri, kararlı olsun veya olmasınlar işaretlerin analizinde çok sık kullanılır tekniklerdir. Zaman-frekans ortamındaki analizlerde en bilinir ve en ilk kullanılır teknik kısa süreli Fourier (KSFD) dönüşümleridir. Bu dönüşüm zamanla geliştirilerek dalgacık dönüşümleri ortaya atılmıştır. Dalgacık dönüşümleri hem zaman hem de frekans ortamında işaretin incelenmesine imkan tanıyan bir yöntem olması yanında, kararlı olsun veya olmasın, işaretin değişik ölçekteki bileşenlerinin de belirlenmesinde sıkça kullanılır. Dalgacık dönüşümlerinin, sürekli dalgacık dönüşümü (SD), ayrık dalgacık dönüşümü (ADD), çok çözünürlüklü analiz (ÇÇA), 2 boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü (2B-AD), yarı dalgacık dönüşümü (YDD) şeklinde türleri mevcuttur. İşaret işleme tekniklerinin sınıflandırılması ile ilgili bir şema Şekil 3.4'de verilmiştir.

Dalgacık dönüşümü tekniği çok geniş bir sahada kullanılmaktadır. Örnek verecek olursak haberleşme sahasında gürültü ayrıştırma, veri sıkıştırma, işaret analizi, süreksizlik tespiti, görüntü işleme, trend analizi gibi bir çok işlemde kullanılır. Dalgacık dönüşümleri ortaya atılalı henüz 20 yıl olmamasına karşın yalnız haberleşme sahasında değil biyoloji, finans, tıp, istatistik, yer bilimleri ve mühendislik gibi bir çok sahada kendine kullanım alanları bulmuştur.

Fourier ve dalgacık dönüşümleri açıklanmadan dönüşümlerle ilgili bazı temel bilgiler vermekte yarar vardır. Dönüşüm işlemlerine neden ihtiyaç duyulduğu ve temelde bu işlemlerin nasıl yapıldığı aşağıda verilmiştir. Dönüşüm işlemleri temelde vektörler arasında gerçekleşen işlemler olarak izah edilecektir fakat çalışmada fonksiyonlar arası dönüşüm söz konusu olduğundan her iki konu hakkında temel bilgiler aşağıda şekilde izah edilecektir.



Şekil 3.4 İşaret işleme tekniklerinin sınıflandırılması

3.3 Dönüşüm nedir, dönüşüme neden ihtiyaç duyulur?

Dönüşüm, diziler veya fonksiyonlar arasında birinin diğerine haritalanmasını sağlayan matematiksel işlemdir. Dönüşümler yararlıdır çünkü bir fonksiyonun dönüşümü orjinal fonksiyon hakkında başka türlü elde edilemeyen ilave ve gizli bilgileri verebilir. Bir denklemin dönüşümünü çözmek orjinal denklemi çözmekten daha kolay olabilir (Diferansiyel denklemlerin Laplace dönüşümü yardımıyla çözümü). Bir fonksiyonun veya dizinin dönüşümü daha az yer tutabilir böylece veri sıkıştırma veya azaltma sağlanmış olur. Bir fonksiyonun orijinalinden ziyade dönüştürülmüş haliyle işlem yapmak daha kolay olabilir.

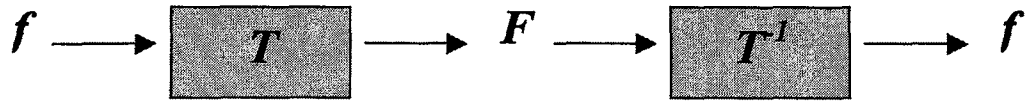
3.3.1 Dönüşümlerin özellikleri-dönüşümlerin türleri

Dönüşümlerin doğrusallık özellikleri vardır. Dönüşümler sonucunda sabitler elde edilebilir ve üst üste toplanabilirler (superposition). Bu durum aşağıdaki bağıntıda ifade dilmiştir.

$$T(\alpha f + \beta g) = \alpha T(f) + \beta T(g) \tag{3.4}$$

Farklı fonksiyonlar farklı dönüşümlere sahiptirler ve dönüşümler bire-birdirler. Ayrıca her T dönüşümü için, yeniden orijinal fonksiyonu elde etmede kullanılan bir T^{-1} ters dönüşümü mevcuttur. Şekil 3.5'te f bir fonksiyonu T ise dönüşümü ifade eder. Dönüşüm sonucunda F fonksiyonu elde edilir. Ters dönüşüm T^{-1} kullanılarak F fonksiyonundan yeniden f fonksiyonun eldesi mümkündür. Bu olay Şekil 3.5'de şematize edilmiştir.

Başlıca üç tür dönüşüm vardır. Bunlardan sürekli dönüşüm; fonksiyonlardan fonksiyonlara haritalama şeklinde tanımlanabilir. Ayrık dönüşüm ise dizilerden dizilere haritalamadır. Yarı-ayrık dönüşüm, fonksiyonlar ve diziler arasında bir ilişki ifade eder.



Şekil 3.5 Bir f fonksiyonunun dönüşümü ve yeniden eldesi

3.3.1.1 Dönüşüm işlemi nasıl yapılır?

Dönüşüm işleminde asıl amaç karmaşık fonksiyonların basit yapı taşları ile temsil edilmeleridir. Bu durum aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir.

$$Karmaşık\ Fonksiyon = \sum_i (ağırlık)_i \bullet (Taban\ Fonksiyon)_i \qquad (3.5)$$

Buradaki ağırlıklar sabit değerlerdir. Taban fonksiyonları olarak değişik dönüşümler farklı fonksiyon türlerini dikkate alır. Fourier dönüşümlerinde taban fonksiyonları olarak sinüsler alınır.

Bu durumda ayrık bir f fonksiyonu aşağıdaki gibi yapı taşlarına ayrılır.

$$f_j = \sum_i F_i K_{ij} \qquad (3.6)$$

$$F_i = \sum_j K_{ij} f_j \qquad (3.7)$$

Burada Fi ağırlık denilen sabitler, K_{ij} ise taban fonksiyonlarıdır. Bağıntı (3.7)'de ise ağırlıkların eldesi için bir ters dönüşüm görülmektedir.

Sürekli fonksiyonlar için sürekli dönüşüm ve ters dönüşüm aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(x,\omega)F(\omega)d\omega \tag{3.8}$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(x,\omega)f(x)dx \tag{3.9}$$

Burada x sürekli fonksiyonun değişkeni iken ω ise katsayıları ifade eden fonksiyonun parametresidir. Bu parametre aynı zamanda fonksiyonun frekans parametresi anlamına gelir. Fonksiyonlar eğer kendilerini oluşturan yapı taşlarından yani taban fonksiyonları veya kernellerden bir kaçı ile gösterilirse bu durumda fonksiyon sıkıştırılarak temsil edilmiş olur.

3.3.1.2 Bazı dönüşümler

Aşağıda bazı dönüşüm ve ters dönüşümlerden örnekler verilmiştir.

Fourier serileri

$$F[k] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j2\pi kt/N}dt \qquad f(t) = \frac{1}{2\pi}\sum_{i=0}^{N-1} F[k]e^{j2\pi kt/N} \tag{3.10}$$

Sürekli Fourier dönüşümü

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t}dt \qquad f(t) = \frac{1}{2\pi}\int F(\omega)e^{j\omega t}d\omega \tag{3.11}$$

Ayrık Fourier dönüşümü

$$\mathrm{F[k]} = \sum_{\mathrm{n=0}}^{\mathrm{N-1}} \mathrm{f[n]e^{-j2\pi k/N}} \qquad \mathrm{f[n]} = \frac{1}{2\pi}\sum_{\mathrm{k=0}}^{\mathrm{N-1}} \mathrm{F[k]e^{j2\pi k/N}} \tag{3.12}$$

Laplace dönüşümü

$$F(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-st}dt \qquad f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(s)e^{st}ds \tag{3.13}$$

Z-dönüşümü

$$\mathrm{F[z]} = \sum_{\mathrm{n=0}}^{\mathrm{N-1}} \mathrm{f[n]e^{-zn}} \qquad \mathrm{f[n]} = \frac{1}{2\pi}\sum_{\mathrm{z=0}}^{\mathrm{N-1}} \mathrm{F[z]e^{zn}} \tag{3.14}$$

3.3.2 Doğrusal (Lineer) dönüşümler

Bir doğrusal T dönüşümü, bir V matrisindeki **x** vektörünün çeşitli ölçekleme, çevrim ve dönüşüm işlemleri yardımıyla başka bir W matrisindeki **y** vektörüne eşleme işlemidir. Eğer bu dönüşümde V=W durumu söz konusu ise bu tür bir dönüşüm "doğrusal (lineer) dönüşüm" ve T operatörüne de doğrusal (lineer) operatör adı verilir. Doğrusal dönüşümlerin aşağıdaki şartları sağlamaları gerekir.

$$T(x+y)=T(x)+T(y) \tag{3.15}$$

$$T(cx)=cT(x) \tag{3.16}$$

Burada c sabit bir katsayıdır. Görüldüğü gibi bu tür dönüşüm işlemlerinin değişme özelliği vardır

Doğrusal dönüşümler $y=Ax$ şeklinde matris çarpımları yardımıyla ifade edilebilirler.

Dönüşümlerden söz ederken öz değer ve öz vektör kavramları dönüşüm sırasında kullanılan katsayıların bilinmesi açısından aşağıda açıklanmıştır.

3.3.2.1 Özdeğer ve özvektör kavramları

Bir kare matris olan *A*'nın 0 olmayan herhangi bir vektörü olan **x**'i düşünelim. Bu vektör sabit bir λ sayısı ile çarpıldığında aşağıdaki (3.17) bağıntısını sağlıyorsa, buradaki **x**'e "öz vektör" ve λ ya da "öz değer" adı verilir.

$$\mathbf{Ax} = \lambda\mathbf{x} \tag{3.17}$$

Buradaki λ öz değeri karakteristik eşitlik şeklinde tanımlanan (3.18) bağıntısından elde edilebilir.

$$\det(A-\lambda I)=0 \tag{3.18}$$

Özdeğer ve özvektörlerle ilgili aşağıdaki tanımlamalar önemlidir.
Bir kare matris olan *A* eğer $\lambda=0$ için bir öz değer değilse yalnızca dönüştürülebilir. Eğer $A_{[nXn]}$ matrisi *n* tane bağımsız özvektöre sahipse, o zaman (3.19) eşitliğindeki dönüşümden söz etmek mümkün olur.

$$P^{-1}AP=D \tag{3.19}$$

Burada P öz vektörler tarafından oluşturulmuş matris, P^{-1}, P matrisinin tersi ve D ise öz değerlerin diagonal olarak sıralandığı matrisi ifade eder. Eğer buradaki A matrisi simetrik ise, P matrisi bir orthogonal matristir ve aşağıdaki tanıma uygunluk gösterir.

$$PP^T = P^TP = I \tag{3.20}$$

Burada P^T, P matrisinin devriği (transpose) dir. A'nın öz değerlerinin çarpımı ise A'nın determinantını (det (A)) verir.

Dönüşüm işlemi temelde vektörler arasında gerçekleşen işlemlerdir. Dönüşüm işleminin yapısını anlamak için vektör uzaylarını ve bu uzaylardaki taban vektörlerinin açıklanmasında yarar vardır.

3.3.2.2 Vektör Uzayları

Bir karmaşık vektör uzayı V vektör olarak ifade edilen **u** ve **v** gibi eleman kümelerinden meydana gelmişlerdir. Bu elemanlar üzerinde aşağıdaki işlemler tanımlanabilirler.

Toplama işlemi; $u+v \in V, eğer\ u, v \in V$ şeklinde ifade edilir.

Sayısal (skalar) çarpım işlemi ise α sabit olmak üzere $\alpha \cdot \mathrm{u} \in \mathrm{V}, \text{eğer}\ \alpha \in \Re$ ve $\mathrm{u} \in \mathrm{V}$ ifade edilir.

Vektör uzayları aşağıdaki özellikleri taşırlar:

- Ardışıklık
- İlişkililik
- Dağılımlılık
- Sıfır vektör
- Eksi vektör

3.3.2.3 Vektör alt uzayları

Bir V vektör uzayının W alt kümesine V'nin alt uzayı adı verilir. Ayrıca W'nin kendisi de V üzerinde tanımlanmış toplama ve sayısal çarpım işlemlerine sahip bir vektör uzayıdır. Burada ayrıca her sıfırdan farklı vektör uzayının en az iki tane alt uzayı olduğunu söylemekte yarar vardır.

Yalnızca toplama ve sayısal çarpım işlemlerinin tanımları vektörlerin veya operatörlerin doğasını belirtmezler, bunların yanında özellikleri sağladığı sürece herhangi bir şey vektör olarak tanımlanabilir ve herhangi bir operatörde toplama ve

sayısal çarpma işlemlerinin yerine geçebilir. Örnek verilecek olursa; bahar mevsiminde ortaya çıkan çiçekleri vektörler olarak kabul edersek, çiçeklerin çoğalıp tüm tabiatı kaplama işlemi bir toplama operatörü olabilir.

3.3.2.4 Doğrusal Kombinasyon

Eğer $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \ldots \mathbf{v}_n$ vektörleri bir V vektör uzayını teşkil ediyorlarsa o zaman; $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \ldots \mathbf{v}_n$ vektörlerinin mümkün olan tüm alt kümelerinden elde edilen W kümesi V vektör uzayının bir alt kümesi olmuş olur. Ayrıca eğer W kümesi V'nin en küçük alt kümesi ise diğer tüm alt uzaylar W kümesini kapsarlar.

Vektörlerin bir doğrusal kombinasyonu bir başka vektör olarak tanımlanabilir.

$$\mathbf{v} = \alpha_1 \mathbf{u}_1 + \alpha_2 \mathbf{u}_2 + \cdots \alpha_n \mathbf{u}_n \qquad (3.21)$$

$$\mathbf{v} = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j \mathbf{u}_j \qquad (3.22)$$

Burada α_1, α_2, ... α_n skaler katsayılardır.

Herhangi $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \ldots \mathbf{v}_n$ vektörlerinin birbirleri ile doğrusal bağımlı (linearly dependent) olabilmeleri için, bu vektörlerden herhangi birinin en az bir tane 0'dan farklı sayı ile diğerlerinin bir doğrusal kombinasyonu şeklinde yazılabilmesi gerekir. Eğer bu şekilde olamazsa bu vektörler birbirleri ile doğrusal bağımsızdır.

Örnek olarak R^3 uzayından alınmış üç tane vektör aşağıdaki gibi verilsin:

$U=(1,2,-1)$,

$V=(6,4,2)$,

$W=(9,2,7)$.

Bu vektörler için $W=-3U+2V$ eşitliği gerçekleşebildiğinden doğrusal bağımsız değillerdir. Aşağıdaki işlem bunun nasıl gerçekleştiğini ifade eder:

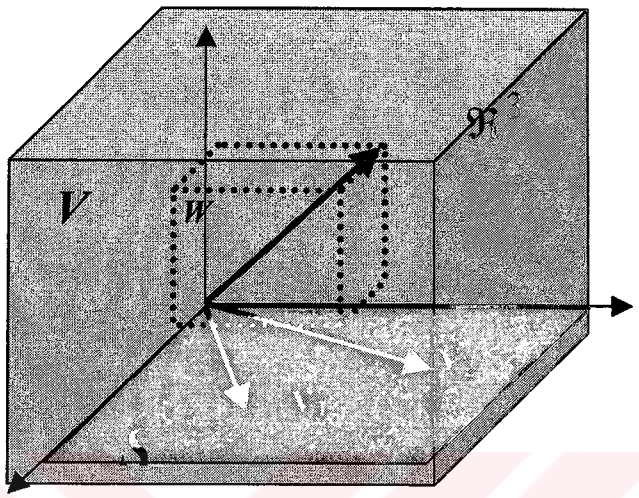
$W=(9,2,7)=U+V$ olması için

$W=(k_1+6k_2,\ 2k_1+4k_2,\ -k_1+2k_2) \rightarrow k_1=-3,\ k_2=2$'dir.

Burada k_1 ve k_2 sırasıyla birinci ve ikinci vektörlerin skaler katsayılarıdır. Dolayısıyla vektörlerden en az biri 0'dan farklı olduğu için doğrusal bağımlıdır denilir.

3.3.2.5 Uzayın gerilmesi (Span)

Eğer bir V vektör uzayında S={v1,v2,...,vn}, bir vektörler kümesi ise, o zaman S içindeki bu vektörlerin tüm doğrusal kombinasyonlarından oluşmuş W alt uzayı S={v1,v2,...,vn} kümesi tarafından gerilmiş uzay olarak adlandırılır veya v1,v2,...,vn vektörleri W uzayını gerer denilir.



Şekil 3.6 Uzayı geren vektörler ve alt uzay

3.3.2.6 Taban vektörleri

Taban vektörleri vektörler arası yapılacak işlemlerin açıklanmasında önemlidir. Daha sonra izah edileceği gibi bir vektörün taban vektörü olabildiği gibi matematiksel işlemler sırasında bir fonksiyonun da taban fonksiyonlarından söz etmek mümkündür.

V'nin herhangi bir tabanı, *V* vektör uzayı içindeki herhangi bir **v** vektörü, taban vektörlerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak yazılabilen doğrusal bağımsız vektörlerin bir grubudur. Mesela eğer $B=\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2,\ldots, \mathbf{u}_n\}$ *V* vektör uzayı için bir taban ise, *V* vektör uzayı içindeki herhangi bir v vektörü şu şekilde yazılabilir;

$$\mathbf{v} = \alpha_1\mathbf{u}_1 + \alpha_2\mathbf{u}_2 + \cdots \alpha_n\mathbf{u}_n \qquad (3.23)$$

Burada αi katsayıları her v vektörü için tekdir. Ayrıca taban vektörlerinin V vektör uzayını gerdiği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bir tabandaki vektörlerin sayısı aynı zamanda V vektör uzayının boyutunu da belirler. Ayrıca taban vektörleri her uzay için tek değillerdir.

3.3.2.7 Vektör normları

Bir V vektör uzayındaki norm $\|v\|$, her bir v vektörüne aşağıdaki özellikleri de göz önünde bulundurarak bir uzunluk (norm) $\|v\|$ atama işlemidir. Bu işlem sırasında;

i. $\|v\|$ pozitif ve gerçek bir sayıdır. $\|v\| > 0$,

ii. yalnızca $v = 0$ olduğunda $\|v\| = 0$ olur,

iii. $\|\alpha v\| = |\alpha| \cdot \|v\|, \alpha \in \Re$,

iv. $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$ dir.

Ayrık bir seri için |p normu şu şekilde tanımlanabilir:

$$\|v\|_p = \left\{ \sum_j |v_j|^p \right\}^{1/p} \tag{3.24}$$

Sürekli fonksiyonlar için Lp normu;

$$\|f\|_p = \left\{ \int_a^b |f(x)|^p dx \right\}^{\frac{1}{p}} \tag{3.25}$$

şeklindedir.

3.3.2.8 İç çarpım

Bir vektör uzayındaki iç çarpım işlemi <v, w> karmaşık veya gerçek sayıları arasında V vektör uzayında şu işlemleri atar.

$< av + bw,\ z >= a < v,\ z > + b < w,\ z >$

$< v, aw + bz >= a^* < v,\ w > + b^* < v,\ z >$

$< v,\ w >=< w,\ v >^*$

$< v,\ v > \geq 0,\ \forall\ v \in V$

$< v,\ v >= 0 \Leftrightarrow v = 0$

3.3.2.9 Norm ve mesafe

Her iç çarpım aşağıdaki şekilde tanımlanan bir uzunluğu ifade eder:

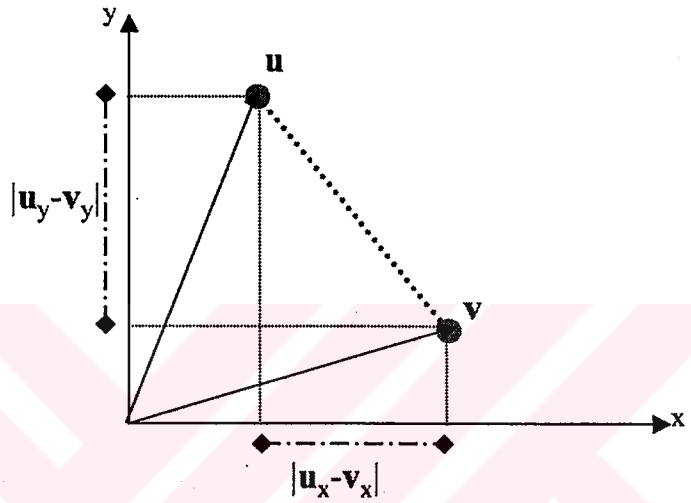
$$\|v\| = \sqrt{< v, v >} \tag{3.26}$$

İki nokta veya **u** ve **v** vektör arasındaki mesafe ise $d(u, v)$ şeklinde simgelendirilir ve aşağıdaki şekilde hesap edilir.

$$d(u,v) = \|u - v\| \tag{3.27}$$

$$d(u,v) = \sqrt{(u_1 - v_1)^2 + \cdots + (u_n - v_n)^2} \tag{3.28}$$

u ve **v** vektörleri arasındaki mesafe grafiksel olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 **u** ve **v** vektörleri arasındaki mesafenin hesabı

3.3.2.10 Standart normlar için iç çarpımı

İki vektör arasındaki mesafe bir norm kullanılarak belirlenebilir. |p normu üzerindeki ayrık bir seri için bir Öklit iç çarpımı şu şekilde tanımlanabilir:

$$< v,\ w >= \sum_j v_j w_j * = w^T v \tag{3.29}$$

Lp normu üzerindeki sürekli fonksiyonlar için iç çarpımı aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$< f,g >= \int_a^b f(x)g(x)^* dx \tag{3.30}$$

3.3.2.11 Ortogonallik (dikgenlik)

Vektörler ve fonksiyonların birbirleri ile çarpımları sırasında birbirlerine benzerliklerinin en önemli ölçütü birbirlerine paralel veya dik oluşlarıdır.

Eğer iki vektörün iç çarpımları 0'a eşitse $< v, w >= 0$ bu iki vektör birbirine diktir (ortogonaldir) denilir. Buna ilaveten eğer bu iki vektörün uzunlukları "1" ise yani birim vektörler iseler bu iki vektör birbirlerine göre ortonormal (birim dikgen) dir. **v** ve **w** vektörleri aşağıdaki eşitliği ağlıyorlarsa bu iki vektör ortonormal dir.

$$\|v\|_2 = \|w\|_2 = 1 \tag{3.31}$$

$\{v_1, v_2, v_3, \ldots, v_n\}$ vektörlerinden oluşmuş bir küme çiftler halinde birbirleriyle ortogonal ise ve tümünün uzunlukları "1" ise bu küme ortonormaldir (birim dikgen) denilir. Bu durum aşağıdaki şekilde ifade dilebilir.

$$< v_i, w_j >= \delta_{ij} \tag{3.32}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & Eğer\ i = j \\ 0, & Eğer\ i \neq j \end{cases} \tag{3.33}$$

burada δ delta fonksiyonunu (Kronecker delta) yani dürtü fonksiyonunu (impulse function) gösterir.

3.3.2.12 Ortonormal (birim dikgen) tabanlar

Eğer $\{v_1, v_2, v_3, \ldots, v_n\}$ vektörleri V vektör uzayı için bir taban oluştururlarsa o zaman V uzayındaki herhangi bir vektör ya da fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$w = \sum_j \alpha_j v_j \tag{3.34}$$

Ancak buradaki α_j 'nin hesabında güçlükler yaşanabilir. Bu taktirde eğer $\{v_j\}$ bir ortonormal taban şeklinde olursa bu güçlükler aşılabilir. Yani bu durumda

$$\alpha_j = < w,\ v_j > \tag{3.35}$$

olur. Böylece, eğer $\{v_j\}$ V uzayında bir ortonormal küme olursa, o zaman V uzayındaki herhangi bir w vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$w = \sum_j < w,\ v_j > v_j \tag{3.36}$$

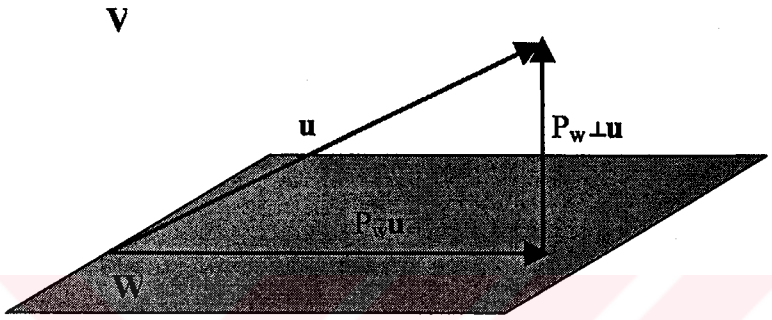
$$w = < w,\ v_1 > v_1 + < w,\ v_2 > v_2 + \cdots + < w,\ v_n > v_n \tag{3.37}$$

3.3.2.13 Ortogonal izdüşümler

Eğer *W* sonlu boyutta ve *V* uzayının bir alt uzayı ise, *V* uzayındaki her **u** vektörü iki dik vektörün toplamı şeklinde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\mathbf{u} = \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2 \tag{3.38}$$

burada $\mathbf{w}_1$ vektörü **u** vektörünün *W* uzayı içindeki bileşenidir, $\mathbf{w}_2$ vektörü ise **u** vektörünün *W* uzayına dik bileşenidir. Bu durum aşağıda Şekil 3.8'de ifade edilmiştir.



Şekil 3.8 Bir **u** vektörünün iki dik vektörün toplamı şeklinde ifade edilmesi

Yukarıdaki tanıma göre $\mathbf{w}_1$ vektörüne **u** vektörünün *W* uzayındaki ortogonal izdüşümü denir ve $P_w u$ şeklinde gösterilir. **u** vektörünün bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{u} = P_w\mathbf{u} + P_w \perp \mathbf{u} \tag{3.39}$$

Şimdi *W* uzayını sonlu boyutta ve *V* vektör uzayının bir alt uzayı olarak Öklit iç çarpımına sahip olduğu varsayılırsa aşağıdaki koşullar geçerlidir:

Eğer $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, ..., \mathbf{v}_n\}$ vektörleri *W* uzayında bir ortonormal taban teşkil ediyorlarsa ve **u** vektörü de V uzayının içinde ise;

$$P_w\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{m} < \mathbf{u}, \mathbf{v}_j > \mathbf{v}_j \tag{3.40}$$

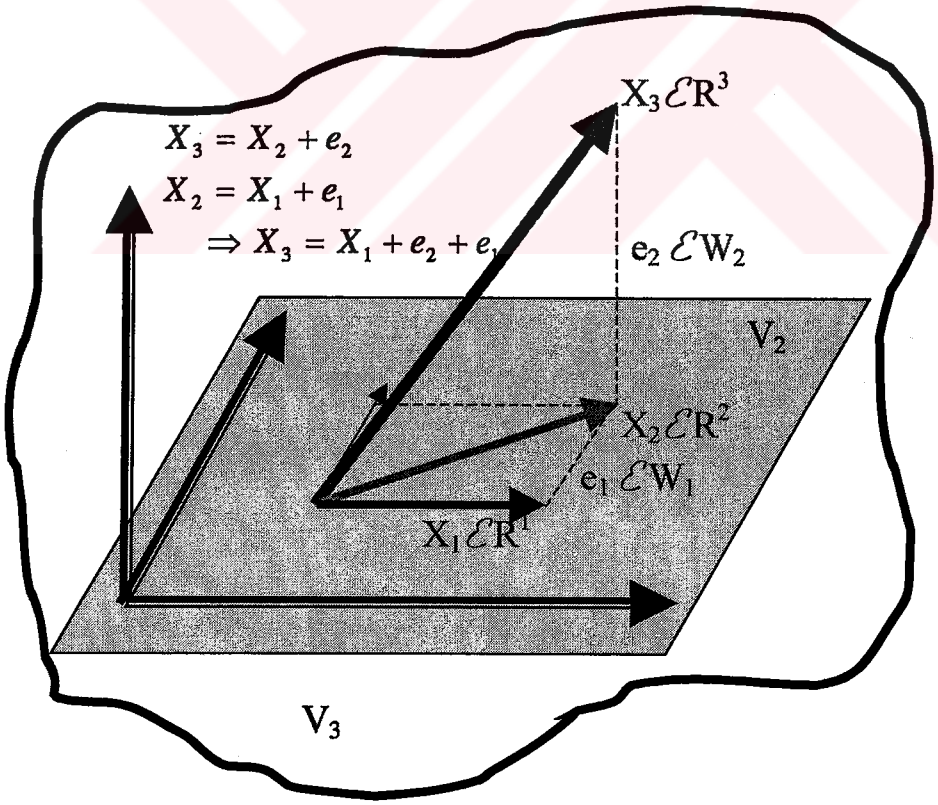
Eğer $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, ..., \mathbf{v}_n\}$ vektörleri *W* uzayında bir ortogonal taban teşkil ediyorlarsa ve **u** vektörü de *V* uzayının içinde ise;

$$P_w\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{m} \frac{< \mathbf{u}, \mathbf{v}_j > \mathbf{v}_j}{\|\mathbf{v}_j\|^2} \tag{3.41}$$

şeklinde ifade edilir.

Bir diğer ifade ile $P_w\mathbf{u}$ $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, ..., \mathbf{v}_n\}$ vektörleri tarafından gerilmiş bir W alt uzayındaki $\mathbf{u}$ vektörünün ortogonal izdüşümüdür.

$\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, ..., \mathbf{v}_n$ Ortagonal izdüşümler yardımıyla ileride anlatılacak olan ayrık dalgacık dönüşümleri ve çok çözünürlüklü analiz işlemleri gerçekleştirilecektir. Vektörel olarak yukarıda ifade edilen durum aşağıda Şekil 3.9'da gösterilmiştir (Polikar, 1996). Şekilde X_3 R_3 kümesinde tanımlanmış bir vektör olarak tanımlanmıştır. X_2 ise R_2 kümesinde tanımlanmıştır ve X_3 vektörünün bileşenlerinden biridir. X_3 vektörünün eldesi için R_2 kümesinde tanımlanmış X_2 vektörü ile V_2'nin bir alt uzayı olan W_2 uzayında hesaplanan $\mathbf{e}_2$ birim vektörü ile toplanması gerekir. Aynı durum X_2 vektörü içinde geçerlidir. R_2 uzayındaki X_2 vektörü R_1 uzayındaki X_1 bileşeni ve W_1 uzayında tanımlanmış $\mathbf{e}_1$ birim vektörünün toplanması ile elde edilebilir. Buradan hareketle X_3 vektörünün eldesi için R_1 uzayında tanımlanan X_1 vektörü ile $\mathbf{e}_2$ ve $\mathbf{e}_1$ birim vektörlerinin toplanması gerekir. Bu durum Şekil 3.9 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Ortogonal izdüşümler yardımıyla bir vektörün bileşenlere ayrılması

3.3.2.14 Biortogonal (çiftdikgen) tabanlar

Bazen ortogonal tabanlar kolaylıkla elde edilemeyebilir. Bir genelleştirme ile delta (impulse) fonksiyonu gerçekte bir çift taban vektör olan biortogonal taban kavramına karşı gelir.

Eğer $\{\mathbf{v}_j\}$ ve$\{\mathbf{w}_j\}$ taban vektörlerinin her ikisi de V uzayı için aşağıdaki koşulu sağlıyorsa

$$< \mathbf{v}_i, \mathbf{w}_j >= \delta_{ij} \tag{3.42}$$

V uzayındaki herhangi $\mathbf{u}$ vektörü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{n} < \mathbf{u}, \mathbf{v}_j > \mathbf{w}_j \tag{3.43}$$

Biortogonal tabanlar sayısal olarak çalışmanın kolay olduğu ortonormal tabanlar kadar kararlı değillerdir.

3.3.2.15 Çerçeveler

Bazen ortogonal ve biortogonal tabanların her ikisi de elde edilemeyebilir. Bu durumda vektörler arasında doğrusal bağımsızlık olsa bile, vektörler diğer vektör ya da fonksiyonların doğrusal bir kombinasyonu şeklinde V uzayındaki herhangi bir vektörle temsil edilebilirler. Bu durum aşağıda ifade edilmiştir.

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{n} < \mathbf{u}, \mathbf{v}_j > \mathbf{w}_j = \sum_{j=1}^{n} < \mathbf{u}, \mathbf{w}_j > \mathbf{v}_j \tag{3.44}$$

Eğer V uzayındaki herhangi bir $\mathbf{u}$ vektörü aşağıdaki koşulu sağlıyorsa, $\{\mathbf{v}_j\}$ şeklinde tanımlanmış bir dizi sınırları A ve B'den oluşmuş bir "çerçeve" olarak adlandırılır.

$$A\|\mathbf{u}\|_2^2 \le \sum_j |< \mathbf{u}, \mathbf{v}_j >|^2 \le B\|\mathbf{u}\|_2^2 \tag{3.45}$$

Eğer $A=B$ ise, çerçeveye "sıkıştırılmış" (tight) denilir Eğer çerçeveden bir elemanın kaldırılması daha uzun bir çerçeve oluşturmayacaksa, o zaman orijinal çerçeveye "tam" (exact) olmuş denilir. O zaman herhangi bir $\mathbf{u}$ vektörü çerçeve vektörlerin doğrusal bir kombinasyonu şeklinde yazılabilir.

3.3.2.16 Fonksiyonlarla ilgili tanımlar ve işlemler

Vektörler üzerinde tabanlar yardımıyla gerçekleştirilen çarpım işlemleri fonksiyonlar için de geçerlidir. Ortogonal veya ortonormallik şartı vektörlerin yanında fonksiyonlar için de aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir.

Bir fonksiyonun taban fonksiyonlar cinsinden yazılması aşağıdaki gibi olur:

$$f(t) = \sum_k \mu_k \phi_k(t) \tag{3.46}$$

Burada $f(t)$ taban fonksiyonlar cinsinden yazılan zamana bağlı bir fonksiyon, μk ağırlık denilen sabit sayı, ϕk ise taban fonksiyondur. Burada k indisi $f(t)$ fonksiyonunu ifade eden taban fonksiyonu sayısını belirtir. t ise zamandır. İki fonksiyonun iç çarpımı daha önceden de belirtildiği üzere aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$< f(t), g(t) >= \int_a^b f(t) \cdot g^*(t) dt \tag{3.47}$$

Burada a ve b fonksiyonun zaman aralığını ifade eden değerler, * ise karmaşık eşlenik gösterimidir. Buradan iki fonksiyon için ortogonallik şartı (dikgenlik) aşağıdaki gibi olur:

$$< f(t), g(t) >= \int_a^b f(t) \cdot g^*(t) dt = 0 \tag{3.48}$$

Ortogonallik taban fonksiyonları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\int_a^b \phi_k(t) \cdot \phi_l^*(t) dt = 0 \quad k \neq l \tag{3.49}$$

Burada k ve l taban fonksiyonlarının sıra değerleridir. Bu çarpım bağıntı (3.43)'dekine benzerdir. Farklı olarak vektörler arasında değil fonksiyonlar arsında olmasıdır. İki fonksiyon için ortonormallik (birim dikgenlik) tanımı ise taban fonksiyonları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\int_a^b \phi_k(t) \cdot \phi_l^*(t) dt = \delta_{kl} \tag{3.50-a}$$

ve δ_{kl} delta (impuls) fonksiyonu aşağıdaki şartları sağlaması gerekir.

Buradan $k=l$ durumu için;

$$\int_a^b \{|\phi_k(t)|\}^2 dx = 1 \qquad (3.51)$$

olur. Bir fonksiyonun taban fonksiyonunun eldesi için kullanılan μ_k katsayıları ortonormallik şartından, fonksiyon ve taban fonksiyonunun iç çarpımı sonucunda yeniden elde edilebilir:

$$\mu_k = < f, \phi_k > \int f(t)\phi_k^*(t)dt \qquad (3.52)$$

Bu dönüşümün tersi de mevcuttur. Katsayılar kullanılarak fonksiyon aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$f(t) = \sum_k \mu_k \phi_k(t) \qquad (3.53)$$

$$f(t) = \sum_k < f, \phi_k > \phi_k(t) \qquad (3.54)$$

3.3.3 Fourier dönüşümleri (FD)

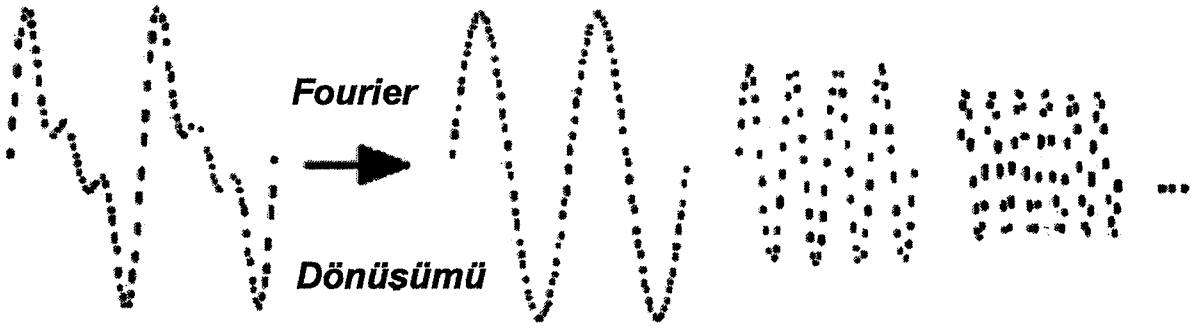
Bir fonksiyon kendisini oluşturduğu düşünülen sinüs veya kosinüs gibi periyodik fonksiyonların toplamını ifade edilebilmektedir. Bir fonksiyonun kendisini oluşturan çok sayıda alt fonksiyonlarla ifade edilebilmesi matematiksel olarak fonksiyonların kullanılabilirliğini arttırmıştır.

19. yüzyılda Fransız matematikçi J.B.J. Fourier herhangi bir periyodik fonksiyonun sınırsız sayıda karmaşık üstel periyodik fonksiyonun toplamı şeklinde ifade edilebileceğini göstermiştir.

21 Aralık 1807'de "Keyfi değişen bir şekil yardımıyla sonlu bir aralıkta tanımlanmış sürekli ya da süreksiz keyfi bir fonksiyon sinüslerin bir toplamı şeklinde ifade edilebilir" şeklindeki sözleri ile fonksiyonlar üzerinde trigonometrik bir yaklaşım göstermiştir. Fakat bu değerlendirmesi Lagrange, Legendre ve Laplace tarafından ret edilmiştir. Çalışması ancak 1822 yılında yayınlanabilmiştir. Şekil 3.10'da periyodik bir işaretin frekans dönüşümü ile elde edilen sinüs bileşenleri gösterilmiştir.

Şekil 3.10'da herhangi bir işareti *x(t)* şeklinde zamana bağlı bir fonksiyon olarak gösterilmiştir. Bu fonksiyonu karmaşık üstel fonksiyonlar şeklinde göstermek için

fonksiyonun, karmaşık üstel bir başka fonksiyon ile skaler olarak çarpılıp zaman ekseni boyunca toplanması gerekir. Bağıntı (3.52) ve (3.53) dikkate alındığında aşağıdaki bağıntılar sırasıyla Fourier ve ters Fourier dönüşümlerini ifade eder (Ohsaki, 1991; Polikar, 1996).



Şekil 3.10 Periyodik bir işaretin Fourier dönüşümü ve elde edilen sinüs bileşenleri

$$X(f)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cdot e^{-2j\pi ft}\,dt \tag{3.55}$$

$$x(t)=\int_{-\infty}^{\infty} X(f)\cdot e^{2j\pi ft}\,df \tag{3.56}$$

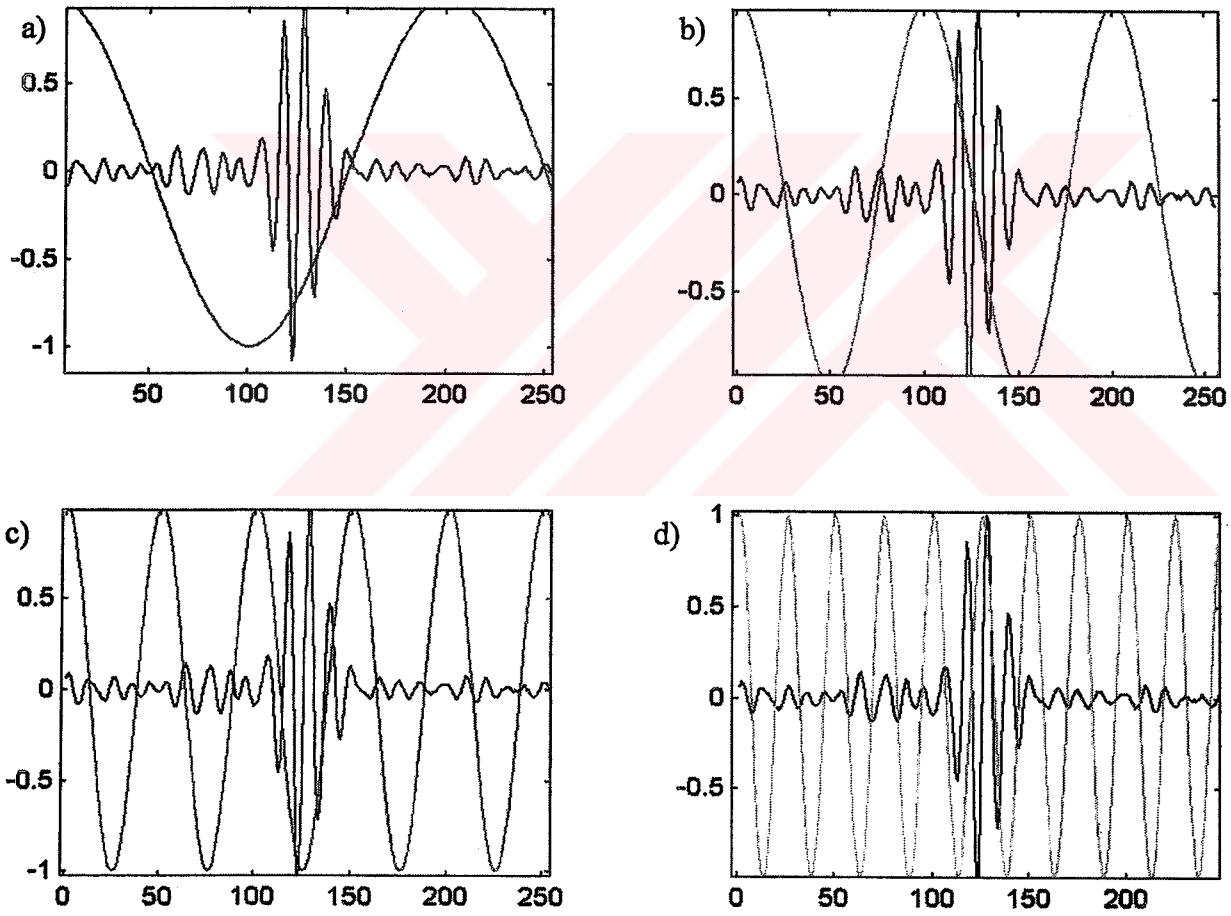
Bağıntılardaki t, zamanı, f ise frekansı ifade etmektedir. Buradaki $e^{2\pi jft}$ karmaşık ve periyodik üstel fonksiyonu ifade eder. $X(f)$ ise $x(t)$ işaretinin Fourier dönüşümü katsayılarıdır. İşaretin zaman ortamında yeniden elde edilmesi için frekans ortamına dönüştürülmüş fonksiyonun $X(f)$'katsayılarının, karmaşık üstel fonksiyonun eşleniği ile çarpılıp frekans aralığı boyunca toplanması gerekir. Böylece farklı frekanslardaki periyodik fonksiyonlar toplanarak işareti yeniden oluşturur. (3.55) bağıntısı Fourier dönüşümü (FD) olarak adlandırılırken, (3.56) bağıntısı, ters Fourier dönüşümü olarak adlandırılır. Bağıntılardaki karmaşık üstel fonksiyonlar aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$e^{2j\pi ft}=Cos(2\pi ft)+jSin(2\pi ft) \tag{3.57}$$

(3.57) ifadesi gerçek ve sanal olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Gerçek kısım f frekansına sahip bir kosinüs dalgası ile, sanal kısım ise f frekansına sahip sinüs fonksiyonu ile temsil edilmektedir. Dolayısıyla Şekil 3.10'da gösterildiği gibi ele

alınan zamana bağlı işaret, sinüs ve kosinüs bileşenlerine ayrılmış olur (Ohsaki, 1991).

FD karmaşık (kompleks) üstel fonksiyonlarını (sinüsleri) yapı taşları olarak kullanırlar. Karmaşık üstel fonksiyonların her biri için sahip oldukları frekanslar işaretin o andaki frekansı ile karşılaştırırlar. Eğer işarette sinüsün sahip olduğu frekans varsa korelasyon yüksek ve FD katsayıları büyüktür (bağıntı (3.55)). Şekil 3.11'de örnek bir işaretin farklı sinüslerle karşılaştırılmaları görülmektedir. Şekil 3.11-a'da işaret en yüksek düşük frekansa sahip sinüs dalgası ile çarpılır ve elde edilen katsayı frekans grafiğindeki yerine işaretlenir. Şelil 3.11-b,c ve d'de çarpım işareti olan sinüsün frekansı adım adım arttırılır. Her bir çarpım sonucu frekans grafiğinde işaretlenir.



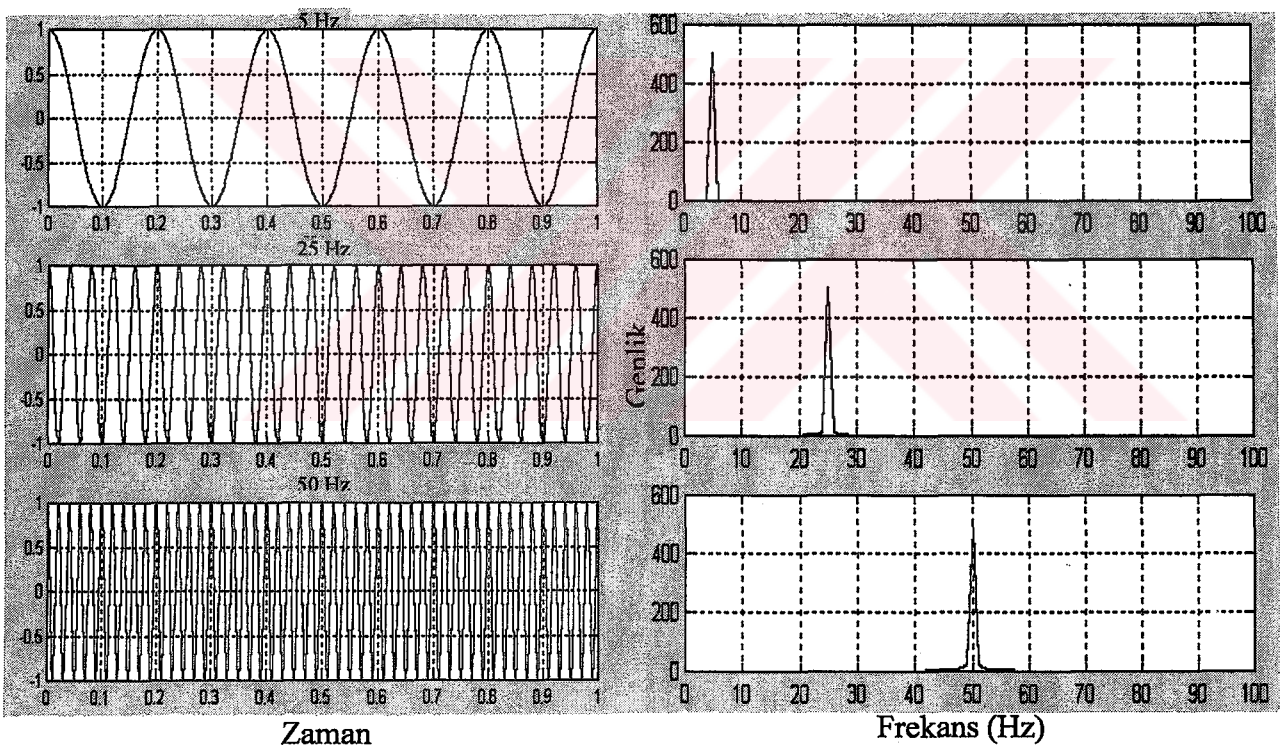
Şekil 3.11 Örnek işaret ile farklı frekanslardaki sinüslerin karşılaştırılmaları

Eğer işaret bir frekans için herhangi bir spektral bileşene sahip değilse, bu frekanstaki korelasyon ve FD katsayıları sıfır veya küçüktür. Şekil 3.12'de 3 ayrı yapay sinyalle oluşturulmuş işaretler ve normalize edilmiş Fourier katsayıları gösterilmiştir. Elde edilen en büyük katsayı veya katsayılar işaretle o frekanstaki

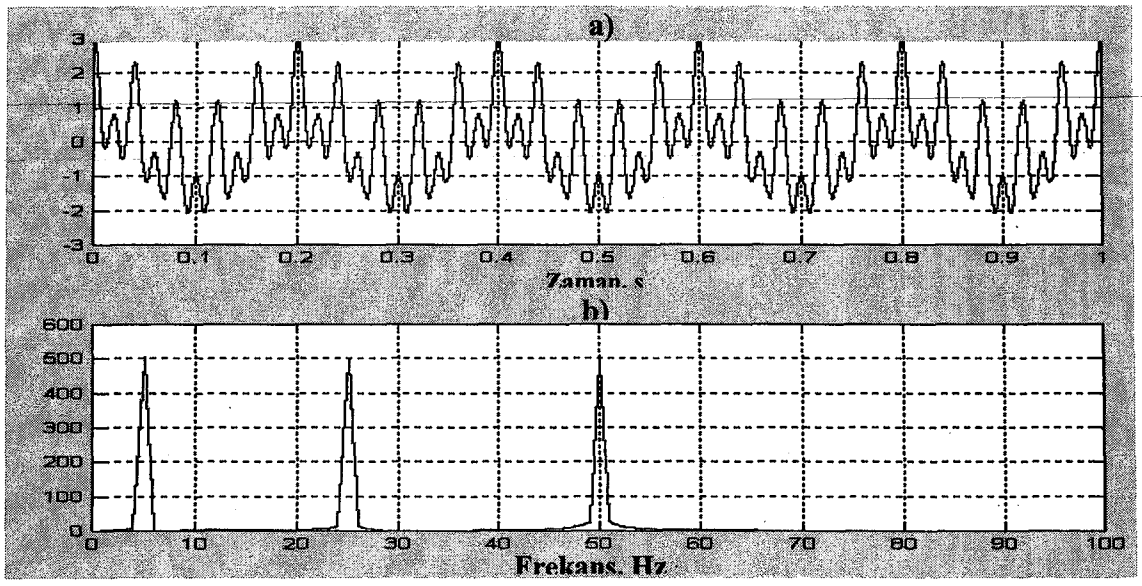
sinüsün uyumunun yüksek olduğunu gösterir. Diğer bir ifade ilen işarette o frekanstaki bir bileşenin bulunduğu anlaşılır.

Şekil 3.12'de sol tarafta sırası ile 5 Hz, 25 Hz ve 50 Hz'lik üç adet yapay sinyal ve sağ tarafta bu yapay sinyallere ait Fourier güç spektrumları görülmektedir. Şeklin sol tarafında yatay ekseni zamanı, düşey ekseni ise işaretin genliğini ifade ederken, sağ taraftaki şekillerin yatay ekseni Hz cinsinden frekansı, düşey ekseni ise işaretin frekansa karşı gelen genliğini ifade etmektedir.

Şekil 3.12'deki üç sinyalin de karakteri durağandır. Bu nedenle Fourier dönüşümü yardımı ile üçündeki spektral bileşenler rahatlıkla tespit edilebilmiştir. Bu üç işaretin tüm zaman boyunca üst üste toplanması sonucunda elde edilecek işaret de durağandır (Şekil 3.13-a) ve Fourier dönüşümü bu işaretteki spektral bileşenleri de rahatlıkla tespit edebilmektedir (Şekil 3.13-b).



Şekil 3.12 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretler ve ait karşı geldikleri frekans değerleri



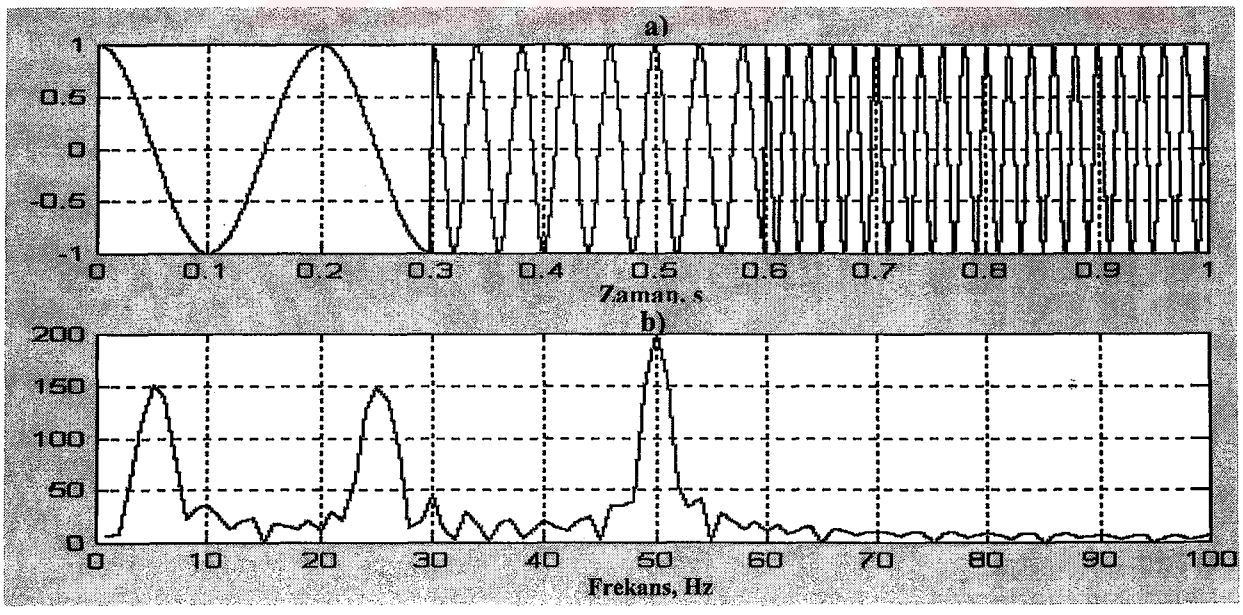
Şekil 3.13 a) 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerin toplamı ve b) karşı gelen frekans değerleri

Durağan işaretler zaman içerisinde değişmeyen spektral bileşenlerden oluşur. Yani FD durağan işaretler için rahatlıkla kullanılabilir; ancak durağan olmayan işaretler zaman içerisinde değişen spektral bileşenlere sahiptirler. FD bu tür işaretlerin tüm spektral bileşenlerini de ifade edebilir ama bu bileşenlerin zaman içerisindeki değişimleri hakkında bir bilgi sağlamaz. FD yalnızca spektral bileşenin ne olduğu sorusuna cavap verebilir, zaman ekseninde nerede olduğu sorusuna cevap veremez. Bu nedenle spektral bileşenlerin zaman içerisindeki değişimlerini belirlemekte farklı yollar kullanılmalıdır.

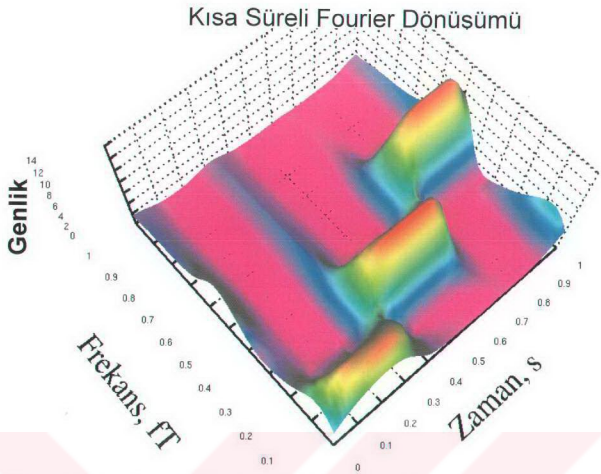
Daha sonraları Fourier'in fikirleri genelleştirilerek periyodik olmayan fonksiyonların da bu şekilde ifade edilebileceği bulunmuştur. 140 yıl sonra haberleşme alanında çalışan Dr. Gabor tarafından ortaya atılan Gabor Dönüşümü ile, pencere fonksiyonu olarak tanımlanan ve zamanda ötelenerek işaretin tümünün Fourier Dönüşümünü alan bir sabit fonksiyonun kullanılması önerilmiştir. Bu sayede işaret durağan kabul edilen pencere bölgelerine ayrılmış ve frekans analizinin işaret üzerinde ayrılan bölgeler boyunca yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu durumda, pencerelenmiş işaretin Fourier Dönüşümü, işaretin frekans bileşenlerinin yanında zaman bilgisini de içermektedir. Dönüşümde kullanılan pencere fonksiyonu, zaman ve frekans ortamında sınırlı olan Gauss fonksiyonudur. 1965'de ortaya atılan yeni bir algoritmayla Gabor Dönüşümü, değişik pencere fonksiyonlarının kullanıldığı Kısa Süreli Fourier dönüşümü (KSFD) olarak genişletilmiştir. Bu dönüşüm şekli özellikle bilgisayar uygulamaları için çok yararlı bir çözüm oluşturmuştur.

3.3.4 Kısa süreli Fourier dönüşümü (KSFD)

Kısa süreli Fourier dönüşümü, pencerelenmiş Fourier dönüşümü olarak da isimlendirilebilir. İşarete, zaman ortamında tanımlanmış bir pencereden geçirildikten sonra Fourier dönüşümü uygulanır. Pencere fonksiyonu, tüm işareti kapsayacak şekilde zaman ekseninde ötelenerek, işaretin pencere fonksiyonu genişliğindeki zaman aralıklarında frekans cevapları (frekans spektrumları) elde edilir. Pencerenlenmiş işaretin Fourier dönüşümü, işaretin frekans bileşenlerinin yanında zaman bilgisini de içermektedir. Pencere fonksiyonunun zamanda ötelenmesiyle taranan işaretin Fourier dönüşümüyle (FD), bölgesel frekans analizi yapılmasına olanak sağlanır. Bu şekilde, sanki, işaretin frekans cevabının zamanla değişimi elde edilmiş olur. Şekil 3.14-a'da durağan olmayan 5, 25 ve 50 Hz'lik spektral bileşenlere sahip yapay bir işaret görülmektedir. İşarete ait Fourier dönüşümü Şekil 3.14-b'de verilmiştir. Şekil 3.14 dikkatlice incelendiğinde Şekil 3.13'de ki yapay sinyal ile aynı spektal bileşenlere sahip olduğu ve her iki işaretin Fourier dönüşümü sonucunda (frekans cevabı) elde edilen frekans bileşenlerinin yaklaşık aynı oluğu görülmektedir. Şekil 3.14'de oluşturulan yapay sinyale KSFD uygulandığında ise işaretteki spektral bileşenlerin hangi zaman aralıklarında olduğunu diğer bir deyişle ne zaman başlayıp ne zaman sona erdiğini tespit edebilmek mümkündür. Şekil 3.15'de Şekil 3.14'deki yapay işarete ait KSFD uygulanması ile elde edilen katsayıların grafiği görülmektedir.



Şekil 3.14 a) 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerden oluşan durağan olmayan işaret ve b) frekans değerleri



Şekil 3.15 5, 25 ve 50 Hz'lik işaretlerden oluşan durağan olmayan işaretin KSFD sonuçları

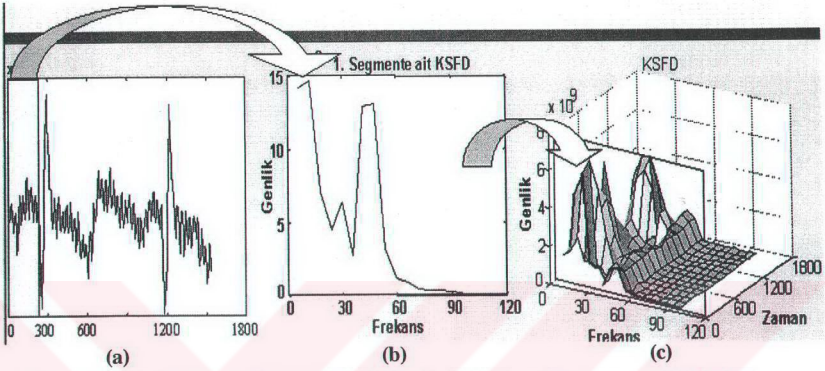
KSFD dönüşümünü sağlayan bağıntı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$KSFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[x(t).w^*(t-\tau)\right] e^{-j2\pi ft} dt \tag{3.58}$$

Burada; x(t) esas işaret, w(t) pencere fonksiyonu, * karmaşık eşlenik notasyonu, f frekans, τ zamanda ötelemedir (Polikar, 1999). Dönüşümde kullanılan pencere fonksiyonu, zaman ve frekans uzaylarında sınırlı olan Gausian fonksiyonudur. KSFD sırasında yapılan pencereleme işlemlerini açıklamak için Şekil 3.16'da zaman ve genliğe bağlı Elektro Kardiyo Grafik (EKG) işareti gösterilmiştir (Şekil 3.16-a). İşaretin seçilen pencere genişliği kadarki kısmı için Fourier cevabı Şekil 3.16-b'de ve işaretin tümünün pencerelerden geçirilerek elde edilen zaman-frekans-genlik eksenlerindeki üç boyutlu olarak gösterimi ise Şekil 3.16-c'de görülmektedir.

KSFD analizinin asıl yararlı olduğu yer stasyoner olmayan işaretlerin analizidir (Küçük ve Ağıralioğlu, 2003; Küçük ve Ağıralioğlu,2004c). Bu dönüşüm yardımıyla işaretin frekans bileşenlerinin zaman içinde nasıl değiştiği hakkında bilgi sahibi olunabilir. Durağan verilerde ise yapılan FD ile KSFD dönüşümü bize zaman içerisinde işaretin frekans bileşenlerinin değişmediğini ya da çok az değiştiğini gösterecektir (Şen, 2002). Çalışmada KSFD su kaynakları sahasında sıkça

karşılaşılan akım verilerinin spektral bileşenlerinin tespitinde kullanılmıştır. Ayrıca işaretin Fourier spektrumlarına bakılarak işaretin durağan olup olmama durumu araştırılmıştır. KSFD, dalgacık dönüşümlerinin sonuçlarının karşılaştırılması ve yorumlanmasında da yararlı olmuştur



Şekil 3.16 (a) Durağan olmayan EKG işareti, (b) FD spektrumu ve (c) KSFD spektrumu

3.3.5 Dalgacık dönüşümü (DD)

Bu alanda adı sıkça geçen Princeton Üniversitesinden I. Daubechies dalgacık dönüşümlerini şu şekilde tariflemiştir; "Dalgacık dönüşümü, verileri fonksiyonları veya operatörleri farklı frekanstaki bilişenlere ayıran bir araçtır ve böylece her bir bileşen ile kendi ölçek değerine uygun bir çözünürlükte çalışılabilir". Dalgacık dönüşümlerinin su kaynakları sahasında işaret işleme yöntemlerinin kullanımı son derece yenidir. Bölüm 2'de konuyla ilgili literatürde geçen çalışmaların büyük bir bölümü açıklanarak ne tür uygulamalar yapıldığı belirtilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada dalgacık dönüşümlerinin hem sürekli hem de ayrık dönüşümlerinden yararlanılarak akım serileri incelenmiş ve bu inceleme sonucunda elde edilen fiziki anlam sayesinde kurulan modelin sık kullanılan modellere göre çok daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur .

Kısa süreli Fourier dönüşümünde kullanılan pencere fonksiyonunun, tarama sırasında sabit genişlikte olması, işaretin hızlı değişen yüksek frekanslı değişimlerin zaman uzayında tam olarak bölgelendirilememesine neden olur. Bu soruna çözüm olarak, sabit genişlikteki pencereler yerine, işaretteki yavaş değişimleri yakalamak üzere

geniş pencere fonksiyonları ve hızlı değişimlerin olduğu yerlerde ise dar pencere fonksiyonlarının kullanımı düşünülmüş ve sonuçta, dalgacık dönüşümü konusu ortaya çıkmıştır.

Dalgacık fonksiyonları ve dönüşümü, ilk olarak, kuvantum mekaniği ve istatistiksel mekanik alanlarında kullanılmıştır. Dalgacık analizinin uygulamalı matematik alanında kullanımı 1980'li senelerde başlamıştır. Grossman ve Morlet (1984), sismik işaretleri, dalgacık "wavelet" adı verilen sonlu süreli ve titreşimli bir işaretin çeşitli zamanlardaki uygun şekilleriyle birleştirerek modellemeye çalışmışlar ve sürekli dalgacık dönüşümünü (SDD) uygulama alanına geçirmiş oldular. Dalgacık dönüşümünün ilk uygulama alanları, fonksiyonel gösterimler, kuvantum mekaniği ve işaret işlemede olmuştur. Dönüşümünün işaret işleme alanında uygulamaları, I. Daubechies ve S. Mallat ile başlamıştır (1988). Araştırmacılar, dalgacık ayrıştırması konusunda bir çok teoriler geliştirerek ayrık dalgacık dönüşümünün ("Discrete Wavelet Transform, DWT") temelini attılar. Dönüşümün işaret işleme alanında uygulamaları, Daubechies (1990; 1996) ile başlamıştır. Araştırmacı, dalgacık ayrıştırması konusunda bir çok teori geliştirerek ayrık dalgacık dönüşümünün temelini atmıştır. Sonraki yıllarda, dalgacık dönüşümünde büyük gelişmeler olmuştur.

a) Bayan Matematikçi I. Daubechies, Daubechies fonksiyonları (tabanları) olarak bilinen, düzgün, yoğun olarak destekli ve ortonormal dalgacık tabanlarını geliştirdi.

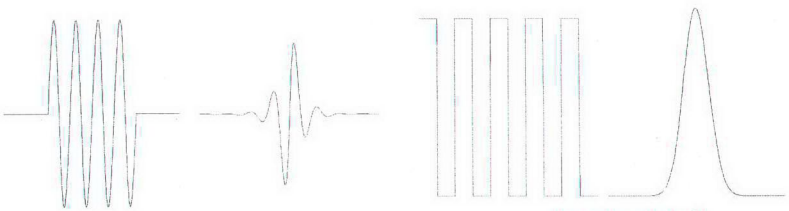
b) Fransız işaret analizcilerinden Mallat (1989) ve Meyer (1993), dalgacık tabanlı genel bir metot önerdiler. Çok çözünürlüklü analiz ("Multiresolution Analysis, MRA") olarak bilinen metot, işaret analizinde, yan bant kodlaması ("Sub-band Coding") olarak uygulanmaktadır.

Sonuç olarak, yeni bir zaman-frekans analizi ("time-frequency analysis") metodu yapılandırılmış oldu. Bu yolla işaret, öz uyumlu olarak, aynı anda, hem zaman ve hem de frekans uzaylarında incelenebilir oldu.

Örüntü tanıma ("Pattern Recognition") alanında uygulaması fazla yaygın olmamakla birlikte, dalgacık teorisi işaret işleme (örneğin, veri sıkıştırma), görüntü analizi (örneğin, kenar bulunması), haberleşme sistemleri, biyomedikal görüntüleme, radar, akustik, teorik matematik ve kontrol sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.

3.3.5.1 Dalgacık nedir? sürekli dalgacık dönüşümü (SDD)

Dalgacık ("Wavelet"), dalganın küçük bir parçası olarak tanımlanabilir. Bu anlamda dalgacık, süresi sınırlı bir titreşim işaretidir ve bu nedenle zamanda bölgeleşmeye (yerselleşmeye) sahiptir (Şekil 3.17) (Daubechies, 1996).

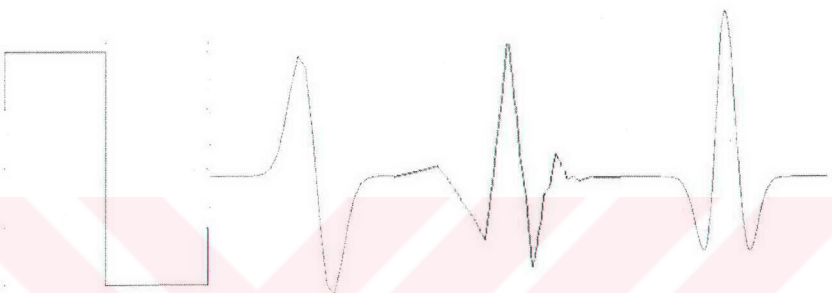


a) Dalgacık b) Dalgacık değil

Şekil 3.17 a) Dalgacık olan ve b) olmayan işaretler

Dalgacık dönüşümlerinde kullanılan ana dalgacıklar simetrik, ortonormal, ortogonal olan ve olmayan veya biortogonal özelliklere sahip olabilirler (Misiti ve diğ., 1997). En yaygın dalgacık türü Haar tipindedir. Bu fonksiyon bir basamak şeklinde olup süreksizdir ve ortogonal özelliğindedir. Bir diğer dalgacık türü ise Daubechies tarafından geliştirilen dalgacık ailesidir (*Daubechies-M, M=1,2,....*) ve bu dalgacıklar ortonormaldir. Dalgacıkların ortonormal özelliğe sahip oluşu orijinal işarete geri dönülebilmesini (sıkıştırma tekniklerinde) sağlamaktadır. Daubechies'nin önerdiği dalgacık fonksiyonları ayrık dalgacık dönüşümlerini pratik hale getirmiştir. Biortogonal dalgacık ailesi ise doğrusal faz özelliğine sahiptirler. Bu özellik işaret ve görüntü işlemede kullanılan işaretin yeniden kazınımı için önemlidir. Bu sayade işaret bileşenlere ayrılırken bir dalgacık, işaret yeniden elde edilirken de başka bir dalgacık kullanılır. Coiflets dalgacıkları da R. Coifman'in önerisi ile Daubechies tarafından ortaya atılmıştır. Yüksek geçirir filtreler için kullanılan ana dalgacık fonksiyonu 0'a eşit *2K* sayıda momente sahiptir ve alçak geçirir filtrelerde kullanılan dalgacık fonksiyonu olan ölçek fonksiyonu da 0'a eşit ve *2K-1* adet momente sahiptir. Burada *K* dalgacığın derecesini belirten katsayıdır. Her iki dalgacıkta *6K-1* uzunluğunda tabanlara sahiptirler. Bir başka fonksiyon türü ise Morlet dalgacığıdır. Morlet dalgacığı ortogonal olmayan gerçek ve sanal kısımlara sahip karmaşık bir fonksiyondur. Ölçek fonksiyonuna sahip değildir. Bir diğer dalgacık fonksiyonu ise Meksika şapkası fonksiyonudur. Bu dalgacık da ölçek fonksiyonuna sahip değildir. Gaus olasılık yoğunluk fonksiyonunun ikinci türevinin bir kısmından elde edilir.

Meyer dalgacığı ise ölçek fonksiyonuna sahiptir ve frekans ortamında ifade edilebilir. Diğer bir dalgacık türü ise Symlet dalgacık fonksiyonudur. Bu dalgacık simetriğe yakın bir şekildedir. Daubechies dalgacık ailesininkine benzer özellikler gösterir ve simetrik oluşu nedeniyle hem sürekli dalgacık dönüşümünde hem de ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılabilir (Drago ve Boxall, 2002). Şekil 3.18'de farklı türden bazı dalgacık fonksiyonlarına örnekler verilmiştir.



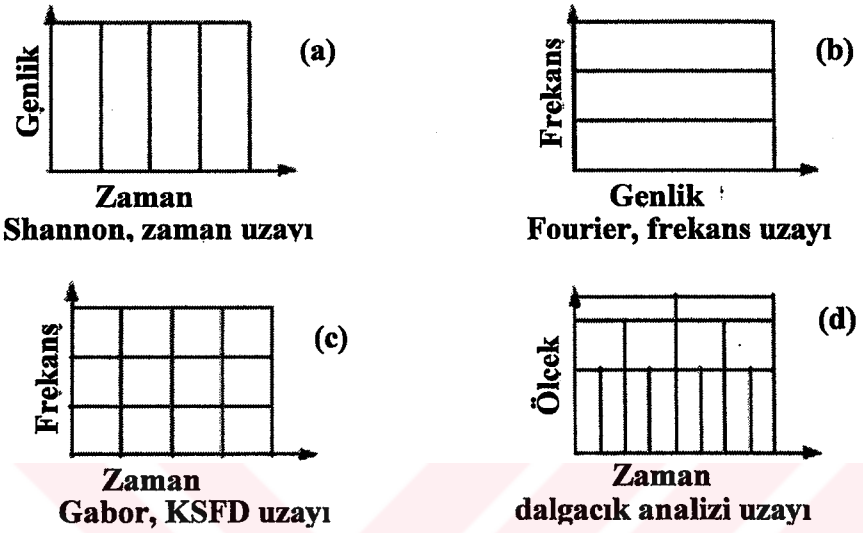
a) Haar **b) Gauss** **c) Daubechies 4** **d) Meksika Şapkası**

Şekil 3.18 Farklı türden bazı dalgacık fonksiyonları

Bir zaman serisi zaman uzayında genliğe bağlı olarak Şekil 3.19-a'da ki gibi gösterilebilir. Fourier analizinde ise sinyal süre sınırı olmayan sinus bileşenlerine ayrılır ve frekans uzayında Şekil 3. 19-b'de ki gibi gösterilebilir. KSFD dönüşümü sonucunda ise Şekil 3. 19-c'de ki gibi zaman-frekans uzayında gösterilebilir. Benzer şekilde dalgacık analizinde sinyal süresi sınırlı, ortalaması sıfır, düzensiz ve simetrik olmayan dalgacıklara ayrılmış olur. Böylece sinyal zaman-ölçek uzayında gösterilebilir (Şekil 3. 19-d).

Dalgacık analizi özelde değişken ebatta bölgelere ayrıştırma yapabilen bir pencereleme tekniğidir. Dalgacık dönüşümünde, pencere fonksiyonları, ana dalgacık fonksiyonunun ötelenmesi yanında sıkıştırılmasıyla (veya genişletilmesiyle) da oluşturulurlar. İşaret, KSFD'nde sabit genişlikteki bir pencere fonksiyonuyla çarpılırken, dalgacık dönüşümünde (DD) dalgacık adı verilen zamanda ötelenebilen, genişliği değiştirilebilen bir fonksiyonla çarpılır. Analiz sinyal boyunca adım adım ötelenmeyi sağlar ve her adımda her adımdaki dalgacık ile sinyal arasındaki korelasyonu ifade eden katsayılar elde edilir. İşaretin tamamı geçilip sonuna ulaşıldığında zamanda aynı kararlılığa sahip dalgacık katsayılarından bir küme elde

edilmiş olur (Şekil 3.20). Katsayıların değişimi zaman ekseni boyunca sinyal ile dalgacık arasındaki benzerliğin değişimini ifade eder. Yapılan işlemler ölçeği değiştirilmiş yeni dalgacıkla tekrar edilir. Böylece başka bir ölçekte de dalgacık katsayıları kümesi elde edilmiş olur. Her ölçek değeri için dalgacık katsayıları zamanın bir fonksiyonu şeklinde ayrı ayrı elde edilir.



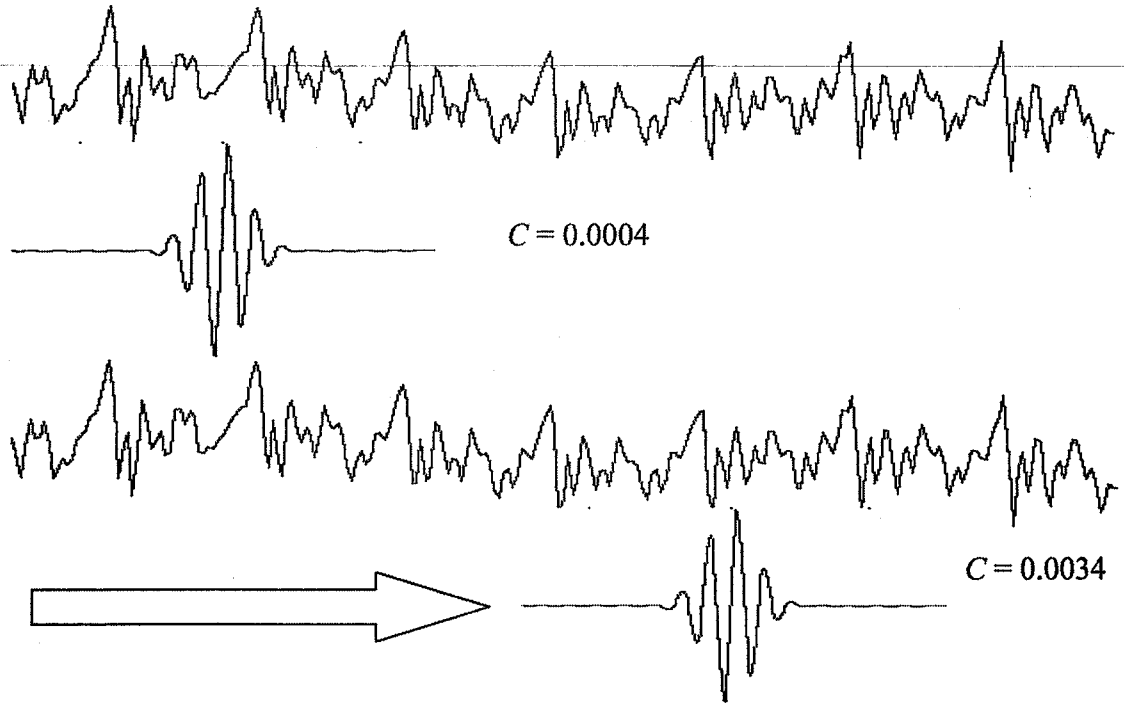
Şekil 3.19 Farklı dönüşümlerde kullanılan işaret uzayları

Sürekli dalgacık dönüşümü işlemi (SDD), aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$SDD_x^{\psi}(\tau,s) = \psi_x^{\psi}(\tau,s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^*(\frac{t-\tau}{s})dt \tag{3.59}$$

$$\psi_{\tau,s} = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \tag{3.60}$$

Burada SDD, τ (öteleme) ve s (ölçek) parametrelerinin bir fonksiyonudur. $\psi(t)$, dönüşüm fonksiyonudur ve ana dalgacık fonksiyonu olarak adlandırılır. $x(t)$ ise analiz edilecek işarettir. Dönüşümde kullanılan farklı genişliğe sahip alt pencere fonksiyonları da ana dalgacıktan ölçekleme yoluyla türetilir. Öteleme terimi, KSFD'nde kullanılan pencerenin zamandaki yerini ifade etmektedir. Pencere, işaret üzerinde gezdirilir. Zaman bilgisi, dönüşümden ötelemeyle sağlanır. Dalgacık fonksiyonunun işaretle ötelenerek çarpım işlemi sırası Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



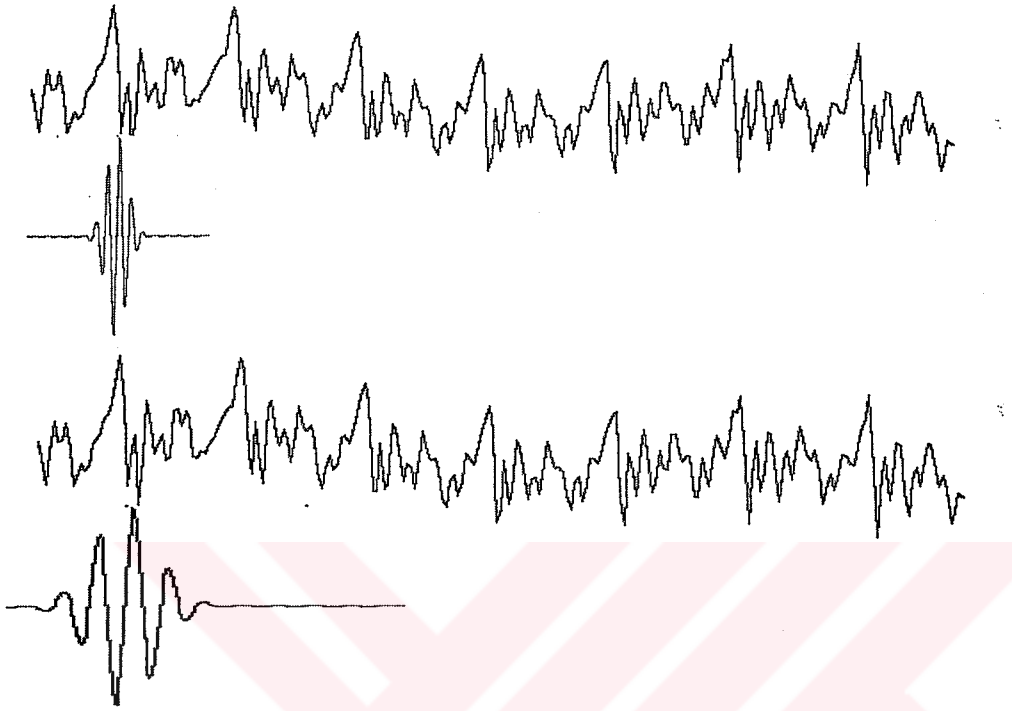
Şekil 3.20 Dalgacık fonksiyonunun zamanla ötelenerek işaretle çarpımı

Şekil 3.20'de *C* katsayıları dalgacık fonksiyonu ile işaret arasındaki benzerliği ortaya koyan dalgacık dönüşümü katsayılarıdır. Eğer bu ilişki yüksek ise katsayı yüksek değer alır. Bu durumda dalgacık fonksiyonunun içerdiği frekans bilgisinin işarette bulunduğu anlamına gelir. Bu da işarette o frekans değerine ait spektral bileşenini ortaya çıkarır.

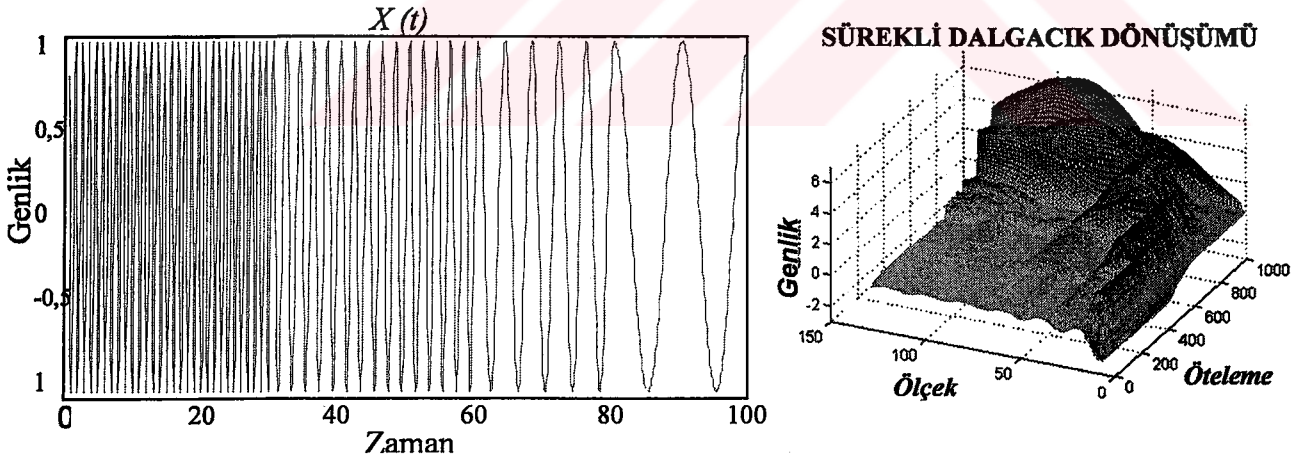
Bu yöntemde KSFD'deki gibi bir frekans parametresi yoktur; bunun yerini *1/frekans* olarak tanımlanan ölçek parametresi (*s*) almıştır. Ölçek değeri büyük ise (düşük frekanslar) işaret hakkında global bir bilgi elde edilir. Ölçek değeri küçük ise (yüksek frekanslar) işaretteki detaylar (kısa süren değişimler) yakalanır. Farklı ölçeklerdeki dalgacık fonksiyonları Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

Şekil 3.21'de dalgacık fonksiyonu farklı ölçekler kullanılarak işaret üzerinde tüm zaman boyunca çarpılır. Böylece işarette tüm zaman boyunca farklı ölçeklerdeki spektral bileşenler aranır. Farklı ölçeklerdeki dalgacık fonksiyonlarının tüm zaman boyunca işaretle çarpımı sonucunda elde edilen katsayılar, boyutu "zaman X ölçek" kadar olan bir matris oluşturur. Bu matris ise zaman-ölçek eksenlerinde bir görüntü oluşturur. Oluşan görüntü işaretteki farklı ölçek değerlerindeki spektral bileşenlerin ne zaman başlayıp ne zaman bittiği bilgisinin yanında spektral bileşenin işaret ile olan ilişkisinin kuvvetini de verir. Dolayısıyla bu görüntü ölçek-zaman-genlik

eksenlerinden oluşmuş 3 boyutlu bir görünümdür. Sürekli dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bu görüntüye "Yersel Dalgacık Spektrumu" adı verilir. Şekil 3.22'de durağan olmayan bir işaretin SDD'si verilmiştir.



Şekil 3.21 Dalgacık fonksiyonunun farklı ölçeklerde işaretle çarpımı



Şekil 3.22 Durağan olmayan bir x(t) işaretinin zaman alanındaki genliği ve SDD'si

Sonuç olarak dalgacık analizi yardımı ile işaretin dalgacık fonksiyon dizileri üzerine alınmış izdüşümleriyle, frekans bantlarına ayrılması (ayrıştırılması) işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu analiz sonucunda, ister durağan isterse durağan olmayan bir işaretin zaman-ölçek görünümü elde edilir ve eğer işaret doğal olayları ifade eden bir zaman serisi ise bu analiz yardımıyla çok basit parçalar kullanılarak zaman serisindeki spektral bileşenler zaman ve ölçek ortamında ifade edilebilir. Bu da doğal

olayların değişik ölçeklerde incelenerek fiziki olarak daha anlamlı sonuçların elde edilmesine imkan sağlar.

3.3.5.2 Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD)

Dalgacık katsayılarının ölçek değerlerinde hesaplanması çok miktarda katsayının oluşmasına ve işlem yüküne neden olduğundan dolayı, katsayılar yalnızca seçilen ölçekler ve zaman dilimleri için hesaplanması bir çok avantajlar sağlar. En çok kullanılan ölçek adımı ikilik ölçek ve zaman adımıdır. Seçilmiş yeni ölçek değerleri ile yeniden ifade edilen ve ayrık dalgacık dönüşümü için kullanılan dalgacık fonksiyonu, aşağıdaki bağıntıda verilmiştir.

$$\psi_{m,n}\left(\frac{t-\tau}{s}\right)=s_0^{-m/2}\psi\left(\frac{t-n\tau_0 s_0^m}{s_0^m}\right) \tag{3.61}$$

Burada m ve n tamsayı olarak dalgacığın sırası ile ölçek ve zaman eksenindeki ötelenme parametreleridir. s_0, sabit bir ötelenme adımını ifade eder ve değeri 1'den büyüktür, τ_0 zaman eksenindeki ötelenme aralığı değeridir. Yukarıdaki denklemde zaman eksenindeki ötelenme adımının s_0^m değerine bağlı olarak $n\tau_0 s_0^m$ şeklinde ifade edilebilir. En sık kullanılan s_0 ve τ_0 değerleri 2 ve 1 dir. Bu değerlerle oluşturulan ve 2'nin katları kullanılan logaritmik ızgaraya bir çok durumda basit ve etkili olarak kullanılabilir (Mallat, 1989). İkinin katları kullanılarak oluşturulan dalgacık fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\psi_{m,n}(t)=2^{-m/2}\psi(2^{-m}t-n) \tag{3.62}$$

İkili (dyadic) dalgacık fonksiyonu genel olarak ortonormal seçilir ve aşağıdaki özelliklere sahiptir.

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi_{m,n}(t)\psi_{m',n'}(t)dt=\delta_{m,m'}\delta_{n,n'} \tag{3.63}$$

Burada eğer $i=j$ olursa, $\delta_{i,j}=1$ olacak; aksi durumda $\delta_{i,j}=0$ değerini alacaktır. Diğer bir deyişle, dalgacıkları eğer aynı ikilik düzeyde ise birbirleri ile çarpımları sonucu sıfır olacaktır. Bu bize ayrık dalgacık ile dönüştürülmüş bir sinyalin yeniden

eldesine imkan verir. Bu durum hızlı bilgisayar uygulamaları için çok elverişlidir (Addison ve diğ., 2001).

Bir i ayrık zaman adımına sahip $x(t)$ zaman serisi için, ayrık dalgacık dönüşümü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$W_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \psi(2^{-m} i - n) \tag{3.64}$$

Burada $W_{m,n}$, $s = 2^m$ ölçek ve $\tau = 2^m n$ zaman değerlerine sahip dalgacık dönüşümü katsayılarıdır. Denklem (3.64)'de x_i, $i = 0, 1, 2 \ldots N-1$; sonlu değerlere sahip bir zaman serisi ve N'de $N=2^M$ şeklinde ifade edilen ikinin katı bir tamsayıdır. Bu durum bize m'nin $1 < m < M$ olduğu ve n'nin de $0 < n < (2^{M-m})-1$ arasında değiştiği bir aralık verir. Bu durumda $2m$ ölçeğinde $m=M$ olduğu en geniş ölçekte, tüm zaman serisini kaplayacak yalnızca bir tane dalgacık gerekir. Bir sonraki ölçekte ise (2^{M-1}), iki adet dalgacık tüm zaman aralığını kapsar ve iki adet katsayı üretilmiş olur. İşleme $m=1$'e kadar devam edilir. $m=1$ değerinde ölçek parametresi s, 2^1 değerinin alır ve $2^M/2^1 = 2^{M-1}$ adet veya $N/2$ adet katsayı tüm sinyali ifade etmek için gerekir. Buna Nyquist kriteri adı verilir. Veri sayısı N ve ölçek s ile gösterilecek olursa Nyquist kriteri veri sayısının yarısına karşı gelen frekansı ifade eder. Bu kritere göre alınacak ölçeğin üst sınırı da $m=1$ için $N/2$ olmuş olur (Venugopal ve Foufoula-Georgiou, 1996; Erlebacher ve diğ., 1996). Bu işlemlerden sonra boyutu $N=2^M$ olan bir ayrık zaman serisini ifade edecek toplam katsayı sayısı $1 + 2 + 4 + 8 + \ldots + 2^{M-1}$ adettir. Bu durum aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\sum_{m-1}^{M-1} 2^m = 2^M - 1 = N - 1 \tag{3.65}$$

Böylece ayrık dalgacık dönüşümü bize farklı zaman ve ölçeklerdeki bir zaman serisinin değişimi hakkında bilgi sağlar.

Elde edilen katsayıların hesabı için sayısal bir örnek verecek olursak; $N=16$ veya 24 veriye sahip bir $x(t)$ zaman serisinin $m=3$ seviyesindeki vektör bileşeninde 8 adet katsayı mevcuttur ve en yüksek frekans bileşeninde katsayıları oluşturabilmesi için dalgacığın 8 adet ötelenmesi gerekir. $m=2$, 1 ve 0 seviyelerindeki vektör bileşenlerinde sırasıyla 4, 2, ve 1 adet katsayı bulunur ve bu katsayıların eldesi içinde dalgacıkların aynı sayıda ötelenmesi gerekir (Nason ve Silverman, 1994).

3.3.5.3 Çok çözünürlüklü analiz (ÇÇA)

KSFD'nde, pencere genişliğiyle ilgili bir problem bulunmaktadır. Pencere genişliği, durağanlık varsayımını geçerli kılacak kadar dar olmalıdır. Dar bir pencere seçilmesi durumunda, hem durağanlık geçerliliğini koruyacak hem de FD'nde sağlanamayan zamanda çözünürlük (seçicilik) artacaktır. Fakat, dar bir pencere seçilmesi, frekans seçiciliğini azaltacaktır.

Burada çözünürlük kavramı üzerinde de durmak gerekir. İki temel çözünürlük kavramı şu şekilde ifade edilebilir.

Zaman Çözünürlüğü: Zaman ortamındaki iki pik değer, dönüşüm ortamında nasıl birbirinden iyi bir şekilde ayırt edilir sorusuna verilen cevap zamanda çözünürlüğün miktarını belirler.

Frekans Çözünürlüğü: İki spektral bileşen dönüşüm ortamında birbirinden nasıl iyi bir şekilde ayrıt edilir sorusuna verilen cevap ise frekans çözünürlüğün miktarını belirler.

Hem zaman hem de frekans çözünürlüğü rasgele bir şekilde yüksek olamaz. Pencere genişledikçe frekans çözünürlüğü artar (düşük frekanslarla birlikte ara frekans değerleri de seçilmeye başlar); ancak, bu sefer de zamanda çözünürlük azalır. Sonuçta işarete KSFD'nü uygulamadan önce, durağanlık testi dışında, bir ikilemle karşılaşılır; zamanda ya da frekansta çözünürlüğün sağlanması.

Çok Çözünürlüklü Analiz (ÇÇA, "Multiresolution Analysis, MRA"), bu probleme çözüm getirmekte ve işareti çeşitli çözünürlüklere sahip farklı frekans bantlarında analiz etmektedir (Mallat, 1989).

ÇÇA, bu anlamda; yüksek frekanslarda düşük frekans çözünürlüğü ve yüksek zaman çözünürlüğü, alçak frekanslarda ise düşük zaman çözünürlüğü ve yüksek frekans çözünürlüğü sağlayacak şekilde tasarlanır. Bu yaklaşım, özellikle, kısa süren yüksek frekanslı işaret parçaları ve uzun süren düşük frekanslı işaret parçalarının bulunması durumunda bir anlam taşır. Pratikte karşılaşılan işaretlerin çoğunun da bu özelliği taşıması, bu yaklaşımın kullanılmasına olanak sağlar.

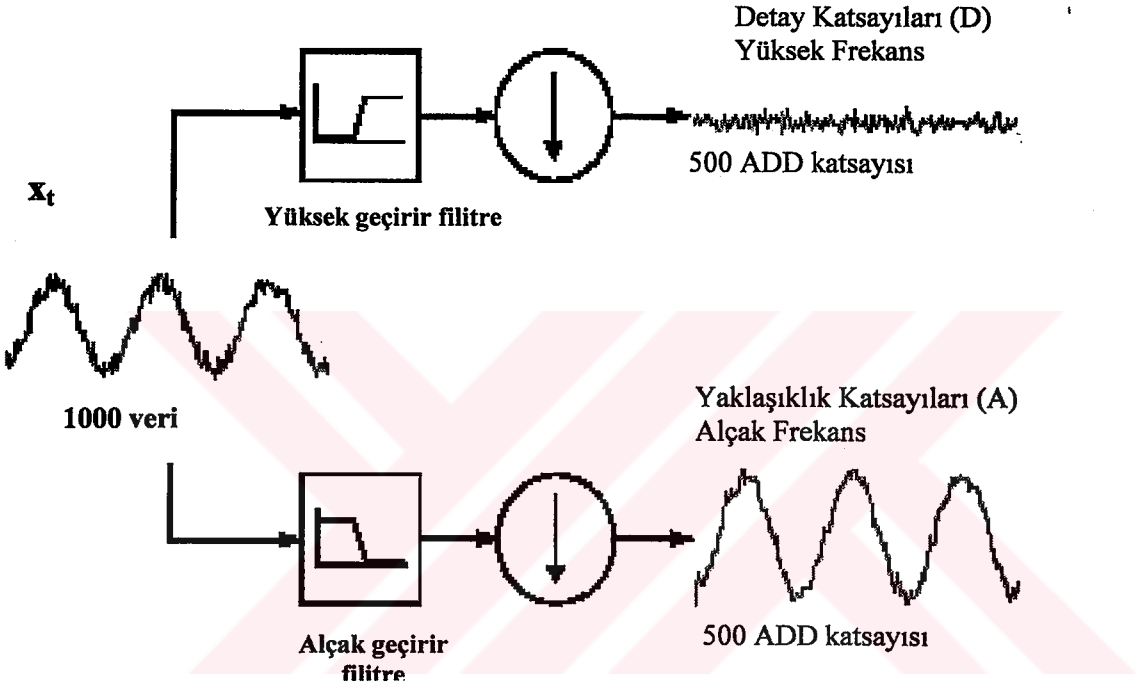
Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD), sürekli dalgacık dönüşümünden farklı olarak dönüşüm katsayılarını önceden belirlenmiş bir ölçek ve konum kümesini temel alarak hesaplar. Bu küme genellikle ikilik tabanda belirlenmiştir. Mallat (1989)

çalışmasında bu tür kümelerin tespitinde filtreler kullanarak etkili bir yol önermiştir. Mallat'ın önerdiği algoritma yardımıyla orijinal sinyal $x(t)$ yaklaşık ve detay olarak adlandırılabilecek iki ayrı seriye ayrılmış olur. Bu işlem bir sinyal için ardışık bir çok filtre yardımıyla çoğaltılabilir. İşaret öncelikle yaklaşıklık ve onunla aynı seviyeden bir detay serisine bölünür. Ardından işlem yaklaşıklık serisinin diğer filtreden geçirilmesi ile devam eder. Yarım bantlı alçak geçiren filtre işaretteki en yüksek frekansın yarısından büyük olan tüm frekansları yok eder. Örneğin bir işaret en fazla 1000 Hz'lik bileşene sahipse, yarım bantlı alçak geçiren filtreleme ile 500 Hz'in üzerindeki tüm frekanslar yok edilir. Böylece örnek sayısı yarıya düşmüş olur. Sonuçta işaret bir çok alt çözünürlük seviyesinde bileşenlerine ayrılmış olur. Bu olaya çok çözünürlüklü analiz denilir. Burada yaklaşıklık serisi işaretin yüksek ölçekli veya düşük frekanslı bileşenini, detay serisi ise düşük ölçek ve yüksek frekanslı bileşenini temsil eder. Düşük ölçekler, sıkıştırılmış bir dalgacık yardımıyla elde edilir ve işaretteki hızlı değişimlere sahip yüksek frekanslı bileşenleri gösterir. Yüksek ölçekler ise genişletilmiş bir dalgacık fonksiyonu yardımıyla elde edilir ve işaretteki yavaş değişimleri, trend veya düşük frekanslı mevsimsel değişimleri belirtir. İşaretin ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla bileşenlerine ayrılması Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Şekilde ki oklar örnek sayısını yarıya düşüren filtreleri ifade eder.

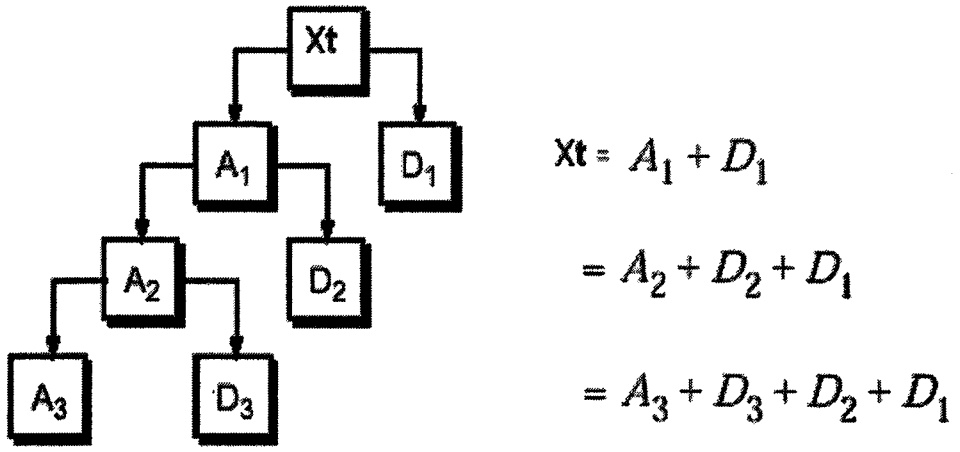
Orijinal işaret, x_t, iki tamamlayıcı filtreden geçirilerek iki ayrı işarete ayrılır. Bileşenlere ayırma işlemi ardışık tekrar ederek sinyali istenilen çözünürlük seviyesinde bileşenlere ayırmak mümkün olmaktadır (Misiti ve diğ., 1997). Ardışık tekrarlama işlemi Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

Hatırlanacağı üzere çok çözünürlüklü analiz için detaylı açıklama yukarıda Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.9'da vektörler için izah edilen ortogonal izdüşümler burada fonksiyon üzerinde gerçekleştirilmiştir. ÇÇA ortonormal tabanlı Daubechies dalgacıkları sıkça kullanılmaktadır (Daubechies, 1990) .

Bir çok işaret için en önemli kısım düşük frekanslı bileşenlerdir. Bu kısım işaretin kimliğini nasıl bir gidişe sahip olduğunu belirlemede önem taşır. Bu su kaynakları alanında mevsimsel değişimler veya bölgenin iklimsel karakterini ortaya koyan dönemsel değişimleri ifade eder. Öte yandan bir çok yüksek frekanslı bileşen ise genelde ince ayrıntılardır. İncelenecek işaretin türüne göre bu ince ayrıntılar bazen değişik seviyelerde çok önemli bilgiler taşıyabilirler. Bu tez çalışmasında da akım serileri için düşük ölçekli bileşen ani ortaya çıkan taşkın gibi olayları ifade eden bilgiler taşır.



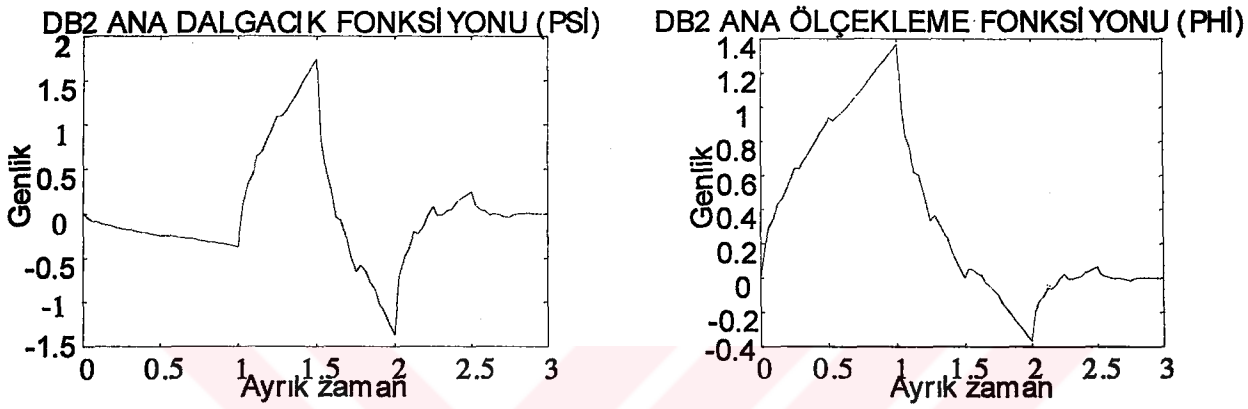
Şekil 3.23 İşaretin bileşenlere ayrılması



Şekil 3.24 Ardışık ayrışma

ÇÇA'in nasıl hesaplandığı incelersek; ADD yardımıyla işaret kaba bir yaklaşık ("approximate") işarete ve ayrıntı ("detail", detay) işaretine ayrıştırarak işareti farklı frekans bantlarında farklı çözünürlüklerde analiz edilir. ÇÇA iki fonksiyon kümesi kullanır: sırasıyla alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrelere karşılık gelen ölçek fonksiyonu ve dalgacık fonksiyonu.

Şekil 3.25'de, yüksek geçiren filtre (YGF) ile ilişkili ana dalgacık fonksiyonuyla alçak geçiren filtre (AGF) ile ilişkili ölçek fonksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılan dalgacık ve ölçek fonksiyonları

İşareti farklı frekans aralıklarına ayrıştırmak, zamandaki işaretin ard arda yüksek ve alçak geçiren filtrelerden geçirerek sağlanır. Orijinal $x(q)$ işareti önce yarım bantlı yüksek geçiren $g(q)$ filtresinden ve alçak geçiren $h(q)$ filtresinden geçirilir. Burada zaman (t) tam sayı şeklinde alınır ve q şeklinde ifade edilir. Filtrelemeden sonra işaretteki en yüksek frekans p yerine $p/2$ olduğundan, Nyquist kriterine göre işaretteki örneklerin yarısı elenebilir. Böylece işaret 2 ile alt-örneklenmiş olur. Bu bir seviyeli bir ayrıştırma işlemidir ve matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

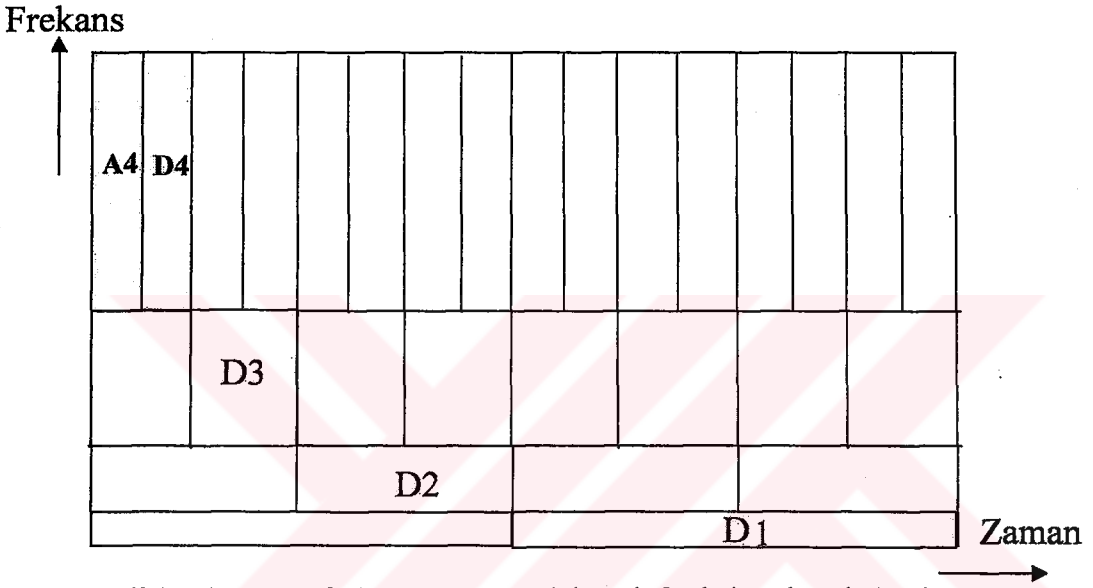
$$y_{yüksek}(k) = \sum_{n} x(q).g(2k-q) \tag{3.66}$$

$$y_{alçak}(k) = \sum_{n} x(q).h(2k-q) \tag{3.67}$$

Burada $yyüksek(k)$ ve $yalçak(k)$, 2 ile alt-örneklemenin sonucunda elde edilen yüksek geçirir ve alçak geçirir filtre çıkışlarıdır. k ise filtre seviyesidir.

Bir seviyeli ayrıştırma işlemi sonrasında, tüm işaret yarı sayıda örnek ile temsil edildiğinden zamanda çözünürlük de yarıya iner. Buna rağmen frekansta çözünürlük

artar, çünkü elde edilen işaretin kapsadığı frekans bandı bir üst seviyedeki işaretin frekans bandının yarısıdır. Böylece frekanstaki belirsizlik yarı yarıya azalmış olur. Yüksek frekanslarda iyi zaman çözünürlüğü, alçak frekanslarda ise iyi bir frekans çözünürlüğü elde edilir. Alt bant kodlama olarak da bilinen bu işlemler arzu edildiğinde işarete ard arda uygulanabilir. Ayrık dalgacık dönüşümündeki zaman-frekans uzayının dalgacık fonksiyonlarıyla kaplanması Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Buna göre frekans filtre genişlikleri her adımda yarıya düşürülmekte, buna karşılık zaman genişlikleri iki katına çıkmaktadır.



Şekil 3.26 Zaman-frekans uzuyının dalgacık fonksiyonlarıyla kaplanması

Aynı ayrıştırma seviyesindeki iki filtre çıkışı üst-örneklenip sentez filtrelerden geçirildikten sonra toplanırsa orijinal *x(q)* işareti yeniden elde edilir. Yani, dalgacık dönüşümü uygulanan işaret dalgacık katsayılarından tekrar oluşturabilmektedir (geri çatma mümkündür).

Ayrık dalgacık dönüşümünün önemli bir özelliği de yüksek geçiren ve alçak geçiren filtrelerin darbe cevapları arasındaki ilişkidir. Yüksek ve alçak geçiren filtreler birbirlerinden bağımsız olmayıp aralarında aşağıdaki gibi bir ilişki söz konusudur:

$$g(L-1-q)=(-1)^q.h(q) \tag{3.68}$$

Burada L filtre uzunluğudur ve çift sayı olmalıdır.

3.3.5.4 Global dalgacık spektrumu

Dönüşümle elde edilen vektörlerin değerlerinin zaman ekseni boyunca toplanması sonucunda global dalgacık spektrumu elde edilir. Dalgacık dönüşümü çizimi boyunca, eğer dikey bir dilim bir yerel spektrum değeri olarak tanımlanırsa belirli bir periyot için zamansal olarak ortalanmış dalgacık spektrumu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\overline{W_n^2}(s) = \frac{1}{n_a} \sum_{n=n_1}^{n_2} |W_n(s)|^2 \tag{3.69}$$

Burada W_n dalgacık dönüşümünü ifade eder, s ise ölçek değeridir, indeks sayısı olan n ise rasgele şekilde atanmış n_1 ve n_2 noktalarının ortasıdır, n_a ise n_2 ile n_1 arasında ortalanmış noktaların sayısıdır. $n_a = n_2 - n_1 + 1$. Böylece tüm zaman aralıkları boyunca aynı işlem tekrar edildiğinde belirli bir pencere uzunluğuna bağlı olarak düzleştirilmiş dalgacık çizimi elde edilmiş olur. Eğer tüm zaman ekseni boyunca elde edilen spektrumların ortalamaları alınırsa sonuçta global dalgacık spektrumu elde edilmiş olur. Global spektrum aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\overline{W^2}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \tag{3.70}$$

3.3.5.5 Çapraz spektrum

Çapraz spektrum iki farklı değişken için dalgacık dönüşümlerinin sonucunda elde edilen katsayılarının çarpılarak ortak etkilerinin açığa çıkarılması işlemidir. Bu işlem sonucunda elde edilen spektruma çapraz dalgacık spektrumu (Cross-wavelet spectrum) adı verilir. Çapraz spektrum işlemi iki ayrı dönüşümün bir iç çarpımı işleminden geçirilmesidir.

X ve Y şeklinde tanımlanan iki ayrı zaman serisi için dalgacık dönüşümleri sırası ile $W_n^X(s)$ ve $W_n^Y(s)$ şeklinde verilsin. Çapraz dalgacık spektrumu ise;

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y^*}(s) \tag{3.71}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $W_n^{Y^*}(s)$, $W_n^Y(s)$ dönüşümünün karmaşık eşleniğidir.

4. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ KULLANILARAK MODELLEME

Bu tez çalışmasında dalgacık dönüşümü yardımıyla hem bir istasyondaki akım ölçümlerinden diğer istasyondaki akımların tahmini, hem de akım zaman serilerinin modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

Dalgacık dönüşümü kullanılarak hidrometeorolojik sahada yapılan bir modelleme çalışması olarak Nason ve Sapatinas tarafından yapılan rüzgar hızı modellemesi çalışmasının (Nason ve Sapatinas, 2002) önemli tarafı mevcut modellere göre fiziksel olarak anlamlı oluşudur. Metot, bir rüzgar istasyonundaki rüzgar aktivitelerinden hangisinin diğer istasyon rüzgar hızı tahminlerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada kullanılan zaman serileri örnek seyreltmeyen dalgacık paket dönüşümü sonucunda elde edilen (Nondecimated Wavelet Packet Transform, NWPT) bileşenleri kullanılarak modellemeye gidilmiştir.

Bu çalışmada dalgacık dönüşümleri veri analizlerinin çok önemli olduğu ve kararlı olmayan verilerin sıklıkla kullanıldığı bir saha olan akarsu akımlarının incelenmesinde kullanılmıştır. İlk defa bu çalışma ile akarsu akım modellenmesinde kullanılan dalgacık dönüşümü teknikleri, çalışmada iki ayrı bölüm halinde uygulanmıştır. Tez çalışmasında istasyonlar arası akım tahminleri için ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenleri kullanan yüksek başarıya sahip bir teknik ortaya geliştirilmiştir. Akım serilerinin modellenmesi ve tahmininde de yine ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerden uygun olanları kullanılarak zaman serisi modellemesi yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tez çalışmasında ilk olarak iki ölçüm istasyonuna ait akım serilerinin birbirleri ile olan ilişkileri enerji seviyelerine göre incelenmiş ve fiziki karakterleri ortaya konduktan sonra ayrık dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak yapılan çok çözünürlüklü analiz yardımıyla her iki akım istasyonunun ölçüm verileri bileşenlerine ayrılmıştır. Her bir istasyona ait ölçüm serisi için elde edilen bileşenler aynı ölçek seviyesinde birbirleri arasında regresyon tipi bir model kullanılarak modellenmiştir. Fiziksel olarak bölgenin hakim karakterini yansıtan bileşen veya

bileşenler arasındaki model diğer modellere göre daha çok ilişkili ve anlamlı olmuştur. Geçici karaktere sahip bileşenler arasındaki modeller ise daha az ilişki ve anlam ortaya koymuşlardır.

Tez çalışmasında yapılan bir başka modelleme de akım serileri içindir. Akım serileri modellenmeden öncede dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak analizleri yapılmıştır. Akım serileri öncelikle Fourier ve kısa süreli Fourier spektrumları ile incelenmiştir. Ardından sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla incelenerek fiziki karakterleri ortaya konulmuştur. Sürekli dalgacık dönüşümünün yanında global dalgacık spektrumları hesaplanarak ölçüm verilerinin içindeki hakim periyotlu bileşenlerin daha iyi görülmesi sağlanmıştır. En sonunda akım serisi ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak bileşenlere ayrılmıştır. Ayrılan bileşenler farklı kombinasyonlar ile tekrar birleştirilerek yeni zaman serileri elde edilmiştir. Böylece ölçüm serisinden değişik ölçekteki bileşenler dışlanmıştır. Ölçüm serisi için uygun bir otoregresif model türü seçilmiş ve yeni elde edilen değişik kombinasyonlardaki bu zaman serileri, seçilen model kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak dalgacık dönüşümü kullanılması ile elde edilen bileşenlerden bölge fiziki karakterine uyum gösteren bileşenlerin kullanılması ile diğer modellere göre daha az hata üreten modellerin oluşturulması başarılmıştır. Bu sayede ilk defa su kaynakları sahasında dalgacık dönüşümü kullanılarak akım serileri modellenmiştir.

4.1 Regresyon modelleri ve belirsizlik

Bir *Xi* hidro meterolojik değişkeni aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

$$X_i = B_i + D_i \tag{4.1}$$

Burada *Di* düzgün kısmı teşkil eden bileşenleri, B_i ise belirsiz kısmı ifade etmektedir. *Di* kısmındaki bileşenler ise P_i, T_i, S_i bileşenlerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Burada P_i periyodik bileşen, T_i artış veya azalış şeklinde trend ve S_i sıçrama bileşenidir.

B_i belirsiz kısmın en önemli özelliği rastgele olması ve bu rastgele miktarın belirgin yani düzgün kısmın altında ve üstünde bulunacak şekilde + ve – sapmalara karşı gelmesidir. *Bi* bileşeni aşağıdaki şekilde yazılırsa, *Bi*'ler düzgün kısımlardan olan sapmalara karşı gelir.

$B_i = X_i - D_i$ (4.2)

Sapmalar için en istenilen durum sapmaların toplamının sıfır değerine karşı gelmesidir. Böylece $\sum B_i = 0$ veya aritmetik ortalama $\overline{B} = 0$ olur. Yukarıdaki (4.2) denkleminin her iki tarafının aritmetik ortalamasının alırsak yeni denklem aşağıdaki gibi oluşur

$$\overline{X} = \overline{D} \tag{4.3}$$

Buradan belirsiz kısımın aritmetik ortalama alınarak giderilmiş olduğu görülecektir.

X bağımsız ve *Y* bağımlı bir değişken şeklinde tanımlanmış iki değişken arsında ki bir basit doğrusal regresyon denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \tag{4.4}$$

Burada β_0 ve β_1 regresyon katsayılarıdır, ε_i ise kalıntı terimidir. *X* değişkeninin verilen bir x_0 değeri için, *Y*'nin beklenen değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E[Y|X = x_0] = \beta_0 + \beta_1 x_i \tag{4.5}$$

ve ε_i'nin beklenen değeri 0 dır. Buna göre *Y*'nin *X*'e göre regresyon denklemi

$$y = b_0 + b_1 x \tag{4.6}$$

olur.

Burada b_o ve b_1 sırası ile β_0 ve β_1 regresyon katsayılarının eldeki örnekten hesaplanmış değerleridir. $X=x_i$ için *Y* değişkeninin y_i en iyi tahmini aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \tag{4.7}$$

Y'nin *X*'e göre regresyon doğrusunun denklemindeki b_o ve b_1 regresyon katsayıları gözlenen y_i değeri ile tahmin edilen $\hat{y}_i$ değerlerinin farklarının $e_i = y_i - \hat{y}_i$ karelerinin toplamını en küçük yapacak şekilde hesaplanır. b_o ve b_1 regresyon katsayılarının hesabı için aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır.

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \tag{4.8}$$

$$b_1 = \frac{S_{xy}}{SS_x} = r\sqrt{\frac{SS_y}{SS_x}} \tag{4.9}$$

Burada r, X ve Y değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısıdır, $\bar{y}$ ve $\bar{x}$ değişkenlerin ortalamalarıdır. Diğer terimlerin hesabı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right) \tag{4.10}$$

$$SS_x = \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)^2 \tag{4.11}$$

$$SS_y = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \bar{y}\right)^2 \tag{4.12}$$

Burada n eldeki örnekte yer alan gözlem çifti sayısıdır. Denklemdeki ε_i kalıntı teriminim varyansı aşağıdaki şekilde hesap edilir.

$$Var[Y|X = x_0] = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}{n-2} = \frac{SS_y - b_1 S_{xy}}{n-2} \tag{4.13}$$

Kalıntı teriminin varyansının güven aralığı sınırları da aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

$$\frac{(n-2)\sigma^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}}, \frac{(n-2)\sigma^2}{\chi^2_{\alpha/2}} \tag{4.14}$$

$\hat{y}_i$ tahminlerinin güven aralığı belirlenirken ε_i'nin normal dağılmış ve bütün x_i değerleri için varyanslarının eşit oldukları kabul edilir. Bu kabullerin doğru olmaması halinde değişkenlere bir dönüşüm uygulayarak kabullere uyan kalıntılara geçilmeye çalışılır.

Doğrusal regresyon çözümlemesinin geçerliliği için Gaussian (normal) dağılıma uyması gerekir Değişkenlerin dağılımına bakılmadığı taktirde mutlaka artık

terimlerin normal dağılıma uyması gerekir. Artık terimlerin normal dağılımı X ve Y değişkenlerinin de normal olmasına işarettir.

Verilerin her x_i değeri için hesaplanan artık terimlerin (hataların) aritmetik ortalaması sıfıra eşit olmalıdır. Aksi taktirde regresyon katsayılarının taraflı olduğu anlaşılır.

4.2 Modellerin güvenilirlikleri

Tez çalışmasında oluşturulan modellerin güvenilirlikleri ve tahmin kapasiteleri çeşitli hata kriterleri yardımıyla belirlenmiştir. Model oluşturulurken kullanılmayan veriler, modelin test aşamasında kullanılmış ve çeşitli hata kriterleri ile modeller test edilmiştir. Çalışmada kullanılan dalgacık dönüşümü tekniğinin tahmindeki başarısını ölçmek için ortalama karesel hata (OKH) ve toplam mutlak hata (TMH) ve rölatif hata (RH) kriterleri kullanılmıştır.

Bunun yanında tahminlerin dağılımlarının ölçüm serisi ile uyumları Ki-kare (X^2) dağılımı ile test edilmiştir. Dağılımların uygunluğunun anlaşılması için ayrıca saçılma diyagramlarından da yararlanılmıştır.

4.2.1 Ortalama karesel hata (OKH)

Hata kriterlerinden birisi ortalama karesel hata (OKH) dır. Ortalama karesel hatanın ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$OKH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Y_{i(\text{ölçüm})} - Y_{i(\text{model})}\right)^2 \qquad (4.15)$$

Burada $Y_{i(\text{ölçüm})}$ gerçek ölçüm değerlerini, $Y_{i(\text{model})}$ model yardımıyla tahmin edilen değerleri ifade eder. N ise ölçüm sayısını belirtir. Ortalama karesel hata kriterinin değeri modelin hatalarına karşın karesel olarak artış göstermektedir. Her ne kadar oluşan toplam hata örnek sayısına bölünse de pik değerlerde hata değeri üstsel olarak artmaktadır. Düşük değerlerde ise üstsel olarak azalmaktadır. Bu nedenle yalnızca ortalama karesel hatayı kriter olarak seçmek yeterli olmaz. Başka hata kriterlerinin de göz önünde bulundurulması gerekir.

4.2.2 Mutlak hata (TMH)

OKH kriteri örnek başına düşecek mutlak hatayı ifade edemez. Bir başka hata kriteri olarak toplam mutlak hata (TMH) kriteri test aşamasında kullanılmıştır. TMH test

aşamasında kullanılan veriler ile model sonucunda oluşan tahminler arasında oluşan farkın mutlak değerce toplamının örnek sayısına bölümü şeklinde ifade edilebilir. TMH aşağıdaki bağıntı ile belirtilmiştir:

$$TMH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|Y_{i(\text{model})} - Y_{i(\text{ölçüm})}\right| \tag{4.16}$$

4.2.3. Rölatif hata (RH)

OKH ve TMH kriterlerine ilave olarak rölatif hata (RH) kriteri yardımıyla da oluşturulan modellerin hataları oran olarak belirlenmiştir. Bu kriter tahmin edilen akımlarla ölçülen akımlar arasındaki hatanın rölatif olarak miktarını ortaya koyar. Bu kriterin zayıf yanı hatanın rölatif değerler içermesidir. Bu nedenle küçük akım değerlerinde bile hatanın miktarına göre çok büyük hata değerleri vermeleri mümkündür. Ancak çalışmada bu hata kriteri, uygun olabilecek bölgelerde kullanılmıştır. Rölatif hata aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$RH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\left|Y_{i(\text{ölçüm})} - Y_{i(\text{model})}\right|}{Y_{i(\text{ölçüm})}}\right) \tag{4.17}$$

4.2.4 Ki-kare testi

Normal dağılım olan bir toplumdan örnek uzunluğu n olan değişken seçilir ve daha sonra bu normal dağılımın aritmetik ortalama ve standart sapması ile standartlaştırılır ve bunların kareleri alınıp toplanırsa elde edilen ifade bir örnek istatistiği teşkil ettiğinden dolayı örnekten örneğe değişiklik gösterir. Bu istatistiğin bağıl sıklık diyagramı büyük değerler için çok büyüdüğünden sağa doğru çarpıklık gösterir ve ayrıca eksi değer almaz. Bu dağılım elde edilen bir sıklık diyagramının uygun olduğu düşünülen bir sıklık diyagramına uyum sağlayıp sağlamamasını sınamak için kullanılabilir. Örneğin dağılımının standart normal dağılıma uygunluğunun sınanması için normal dağılımın altındaki alan z tane eşit aralığa bölünür. Göz önüne alınan örnekteki bir verinin bölünen alt aralıklardan birine düşme ihtimali bu alt aralığın üzerindeki eğrinin altında kalan alana eşittir. Böylece o aralığa n tane veriden kaç tanesinin düşebileceği hesaplanabilir. Alt aralığa düşme yüzdesi y_i ise n veriden bu alt aralığa düşme yüzdesi ny_i olur. Sonuçta aşağıdaki gibi bir X^2 sınama istatistiği elde edilir (Şen, 2002).

$$X^2 = \sum_{i=1}^{z} \frac{(n_i - y_i n)^2}{y_i n} \tag{4.18}$$

Göz önüne alınan verinin dağılımının yalnızca normal bir dağılıma uygun olup olmadığı test edilmez. İstenilirse bir başka örneğin dağılımına uygunluğu da test edilebilir. Mesela bir tahmin serisinin sıklık dağılımının, ölçüm serisinin sıklık dağılımına uygunluğu da ki-kare testi yardımı ile araştırılabilir. Sonuçta elde edilecek istatistik değerinin küçük olması istenilen dağılıma uygunluğunun fazla olduğunu ifade eder.

4.3 İstasyonlar arası akım modellenmesi

Hidrolojik çalışmalarda akım gözlemlerinin eksikliği ve uygun modellerle tahmin edilmesi çokça araştırılan bir konudur. Modellemede bitişik istasyonlar arasındaki çalışmalarda regresyon modelleri pratik ve yararlı sonuçlar vermektedir (Bayazıt, 1996; 1998). Bu çalışmada dalgacık dönüşümü kullanılarak istasyonlar arası akım tahminlerinde yeni bir modelleme tekniği uygulanmıştır. Çalışmada ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) kullanılmıştır. ADD kullanılarak yapılan çok çözünürlüklü analiz ile akım serileri farklı ölçeklerdeki bileşenlerine ayrılmıştır. Zaman serisi ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla bileşenlerine ayrıldıktan sonra, her bir bileşen için birer tane model oluşturulmuştur. Ayrıca ölçüm serileri arasında da bir model oluşturuldu. Modellerde girdi olarak bir ölçüm istasyonuna ait akım serilerinin ayrık dalgacık dönüşümü bileşenleri, çıktı olarak bir başka ölçüm istasyonunun akım serilerinin ayrık dalgacık dönüşümü bileşenlerini kullanıldı. Modelleme bu iki ölçüm serisi bileşenleri arasında yapıldı. Model oluşturulup iki istasyon arasındaki ilişki fonksiyonel olarak belirlendikten sonra, model oluşturulması sırasında kullanılmayan akım serileri kullanılarak modeller test edilmiştir. Sonuçta oluşturulan modeller farklı hata kriterleri yardımıyla birbirileri ile ve gözlenen akım serileri arasında oluşturulan modelle karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan modeller aşağıda belirtilen bağıntı ile ifade edilebilir:

$$Y_t(AD_m) \approx A \cdot X_t(AD_m) + B \tag{4.19}$$

Eşitlikteki $Y_t(AD_m)$, $X_t(AD_m)$ terimleri girdi ve çıktı akımlarının m. seviyeden ayrık dalgacık dönüşümü bileşenlerini ifade eder. A ve B ise model parametreleridir.

4.3.1 Bölge ve veriler

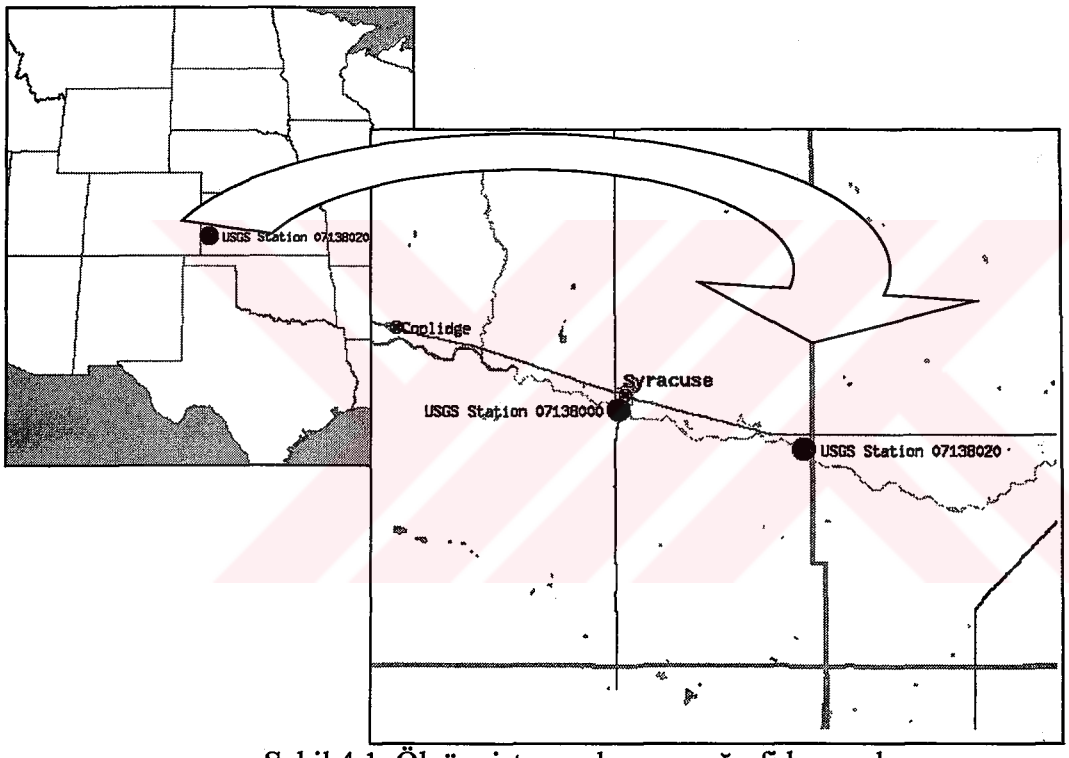
İlk uygulama aynı hidrolojik bölgede bulunan ve aynı akarsu üzerinde ölçüm yapılan Arkansas nehri üzerindeki Kendall ve Syracus istasyonları akım ölçümleri kullanılarak yapılmıştır. Bölgenin iklimi Kilsby ve diğerleri (1998) tarafından yapılan çalışmada kurak olarak bildirilmiştir. Batı kesimlerinde yıllık yağış miktarı 1500 mm dir ve bu değer Mexico körfezinden gelen nemli havayla birlikte yağışlı bir iklim oluşturur. Yıllık yağış miktarı batıya doğru gidildikçe azalır. Havzanın doğu kesimindeki yarı kurak Büyük düzlükler (Great Plains) havzası akımları Mississippi nehrine boşalır. Bu bölgeye yıllık 400 mm'ye kadar yağış düşer. Bölgedeki yağışın % 60-80'lik bir kısmı çoğunlukla Nisan ve Eylül ayları arasında düşmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık havzanın doğu kesimlerinde 18 °C iken Rocky dağlarındaki Plains ovasında 10 °C civarındadır. Yazın dağlardaki sıcaklık mevcut karı eritmek için yeteri kadar yüksektir. Büyük düzlükler'de yazın oluşan açık hava, düşük nem ve yüksek sıcaklık çok miktarda buharlaşmaya neden olmaktadır. Buharlaşma potansiyeli genellikle havzanın batı kesimlerinde yıllık ortalama yağış miktarını aşmaktadır. Bu nedenle yüzeysel akış sınırlıdır ve akiferlerin dolması yalnızca kış aylarında meydana gelen yağışlarla olmaktadır. Fazla miktarda yağış akarsulara olan yüzeysel akış ve akiferlerin dolmasını neden olmasına rağmen buharlaşma miktarı doğu bölgesinde yüksektir. Rocky sıra dağlarında dik yamaçlar orografik olarak yağışın yükselmesine neden olur ve akarsuyun taşıdığı ince siltli malzeme Büyük Düzlükler ovasında olan yüzeysel akıştan daha büyük bir değere sahip olur. Yıllık yağış batıya gidildikçe azalmaktadır. Yaklaşık 400 mm'nin altına düşmektedir.

Bölgenin ve ölçüm istasyonunun çoğrafi yeri Şekil 4.1'deki haritada görülmektedir. Havzanın drenaj alanı 67,41 km^2 dir. Ölçüm istasyonu cihaz kotu 954 m'dir. Arkansas nehrinin Syracuse ölçüm istasyonunda ölçülen günlük akım verileri model için girdi (X_t) olarak kullanılmıştır. Bu istasyon 37°57'58" enlem, 101°45'23" boylamında bulunmaktadır. Bulunduğu bölge Amerika Birleşik Devletlerindeki Kansas eyaletidir. İstasyon numarası USGS 07138000'dir. Arkansas nehrinin Kendall, ölçüm istasyonunda ölçülen günlük akım verileri model için çıktı (Y_t) olarak kullanılmıştır. Bu istasyon 37°55'48" enlem, 101°32'56" boylamında bulunmaktadır. İstasyon numarası USGS 07138020'dir.

11 Eylül 2001 ve 10 Eylül 2003 tarihleri arsındaki 730 günlük akım serisi modelleme için kullanılmıştır. Model oluşturulurken 512 günlük akım verisi işleme konmuştur.

217 günlük akım model oluşturulduktan sonra test için kullanılmıştır. Test serisinin ortalama debisi 0.795 m^3/s, çarpıklık katsayısı 0,54, standart sapması 1.07 m^3/s dır. Öncelikle iki ölçüm istasyonundan elde edilen günlük akım serileri ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak 7 adet detay, 1 adet yaklaşıklık bileşenine ayrılmıştır. Bileşen sayısının tespiti Nyquistic kriterine göre veri sayısının yarısı kadar örneği ifade eden 2'nin üst değerine eşittir.

Bileşenlere ayırma işlemi sırasında orthonormal Daubechies 8, sürekli dönüşüm sırasında ise ortogonal olmayan ve karmaşık Morlet dalgacık fonksiyonu kullanılmıştır. Morlet dalgacık fonksiyonunun ifadesi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. Ölçüm istasyonlarının coğrafi konumları

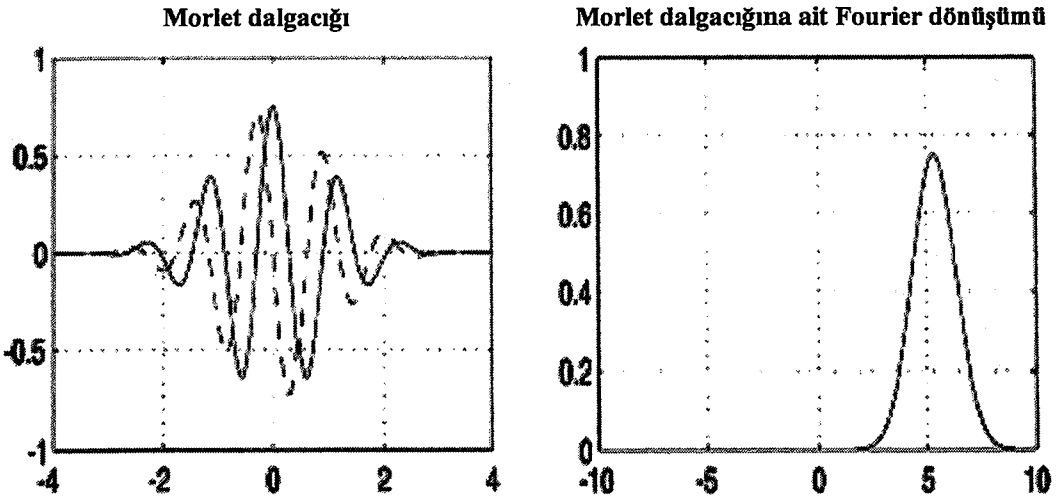
$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4}\left(e^{-iat} - e^{-a^2/2}\right)e^{-t^2/2} \tag{4.20}$$

Morlet dalgacık fonksiyonu ve fonksiyona ait Fourier dönüşümü Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Fourier dönüşümü alınmış fonksiyon ($\hat{\psi}_0(\omega)$), Bağıntı (4.21)' de gösterilmiştir.

$$\hat{\psi}_0(\omega) = \pi^{-1/4}\left(e^{-(\omega-a)^2/2} - e^{-\left(-m^2+\omega^2\right)}\right) \tag{4.21}$$

Burada $a = \pi\sqrt{(2/\ln 2)}$ en temel frekans olan ω_0' a eşittir. Eğer a, 5'den büyük seçilirse son eşitlikdeki ikinci terim ihmal edilebilir (Liu, 2000; Panizzo et al., 2002).

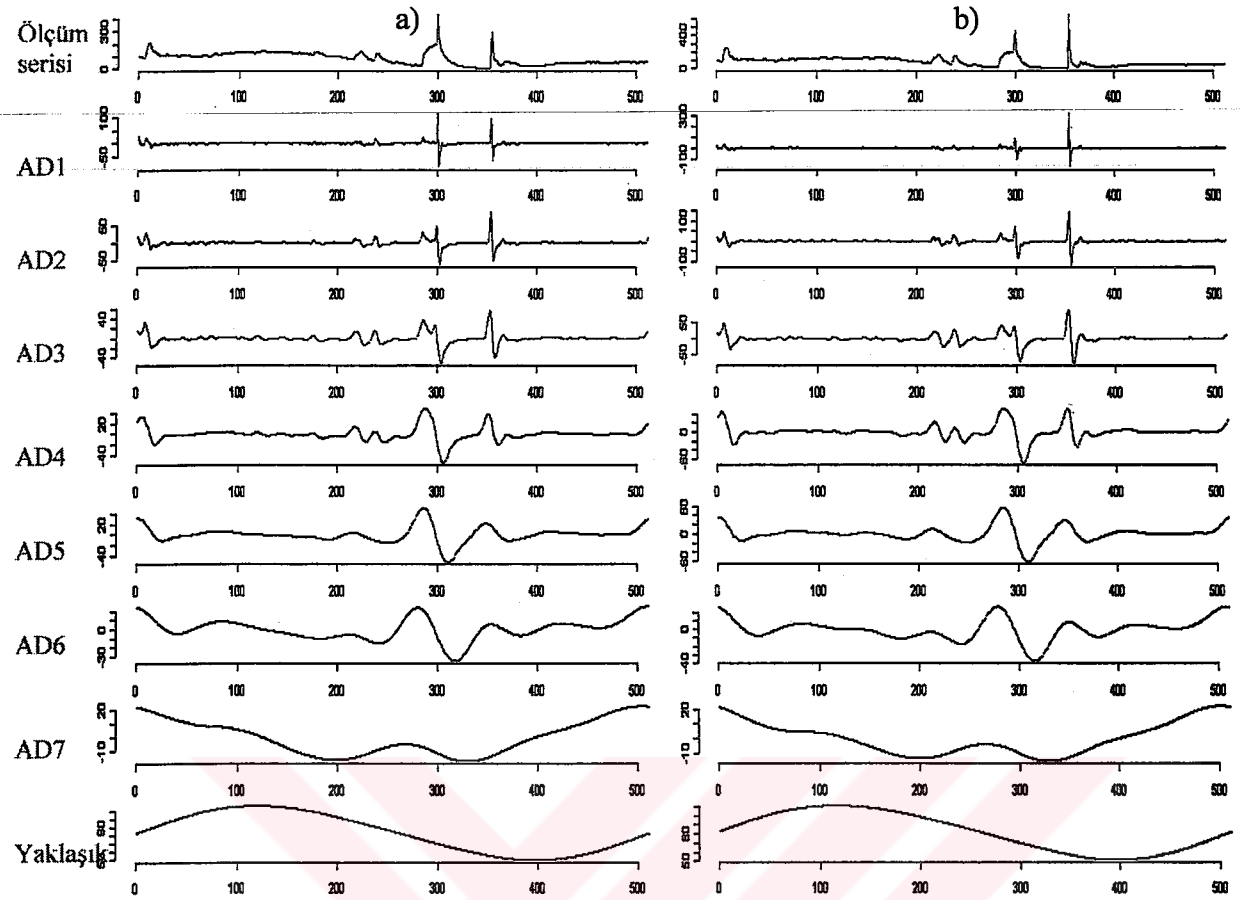


Şekil 4.2 Morlet fonksiyonu ve Fourier dönüşümü

4.3.2 Bileşenlerin eldesi

Ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen bileşenlerin analizi ve özellik çıkarım ile ilgili daha önce değişik sahalarda bir çok çalışma yapılmıştır (Drago ve Boxall, 2002; Şeker ve Ayaz, 2003). Ayrık dalgacık dönüşümünde katsayılarını önceden belirlenmiş bir ölçek ve konum kümesini temel alarak hesaplanır. Bu küme genellikle ikilik tabanda belirlenmiştir. Mallat (1989) çalışmasında bu tür kümelerin tespitinde filtreler kullanarak etkili bir yol önermiştir. Mallat'ın önerdiği algoritma yardımıyla orijinal sinyal *x(t)* yaklaşık ve detay olarak adlandırılabilecek iki ayrı seriye ayrılmış olur. Elde edilen bileşenlerin üst üste toplanması ile ölçüm serisinin yeniden elde edilmesi mümkündür.

Ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda oluşan akım serisinin bileşenleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekildeki en üst sırada yer alan seriler iki istasyona ait ölçülmüş akım serilerini ifade eder. Daha sonra sırasıyla 1. seviyedeki detay bileşeninden (AD1) başlayarak 7. seviyedeki detay bileşenine (AD7) kadar her iki istasyonun akım serisi bileşenleri gösterilmiştir. En altta ise, 7. seviyedeki yaklaşıklık bileşeni serisi gösterilmektedir.



Şekil 4.3. (a) Kendall istasyonuna ait bileşenler, (b) Syracuse istasyonuna ait bileşenler

Şekil 4.3'e dikkat edilirse en düşük frekansa sahip bileşenler en alttaki yaklaşık serileridir. Bu seriler ayrıca iki istasyon ölçüm serilerinin en temel bileşenlerini ifade eder. Diğer bileşenler ise sırasıyla 2, 4, 8, 16, 32, 64 ve 128 günlük ölçeklere sahip bileşenleri ifade eder. Çok çözünürlüklü analiz yardımıyla belirtilen ölçeklerdeki frekanslara sahip zaman serileri ayrı ayrı birer zaman serisi olarak ele alınabilmektedir. Bu bize kararlı davranış sergilemeyen günlük akımlar gibi zaman serilerinin analizinde çok yararlı imkanlar verir. Bu analiz yardımıyla değişimini incelemeyi düşündüğümüz bir ölçek seviyesindeki bileşeni zamana bağlı olarak inceleyebiliriz. O ölçek seviyesindeki değişimlerin zaman içerisindeki seyri bize bölgesel anlamda da önemli bilgiler verir. Mesela ele alınan ölçek seviyesinin küçük veya büyük oluşuna bağlı olarak bölgenin iklimsel karakterinde hangi periyotların hakim olduğu konusunda karar vermeye yardımcı olacak önemli bilgiler elde edilir (Smith ve diğ., 1998; Saco ve Kumar, 2000). Düşük frekansa sahip bileşenlerdeki varyansın yüksekliği mevsimsel salınımlardan fazlaca etkilenmeyen daha kurak iklimlere sahip bölge davranışları ile uyum sağlarken, yüksek frekansa sahip

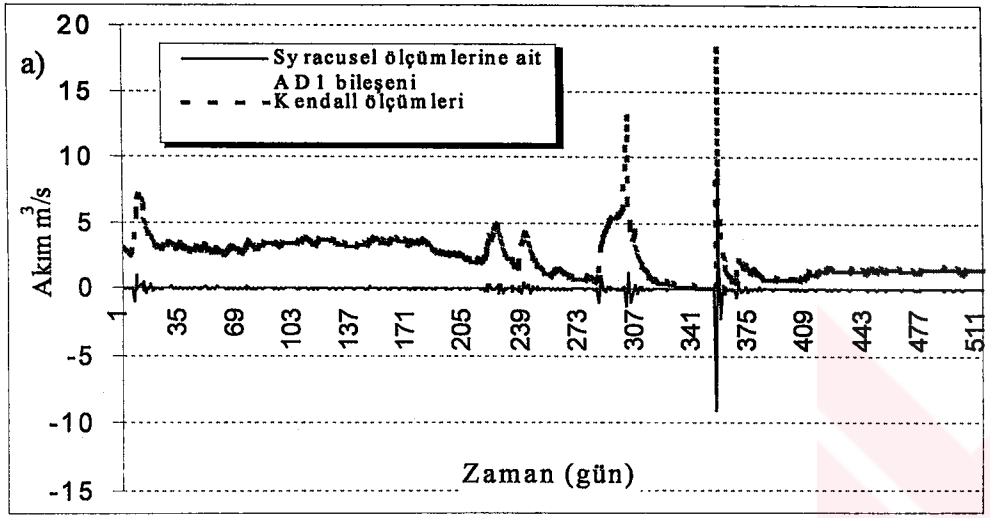
bileşenlerin varyansındaki yükseklik daha değişken ve yağışlı bölge karakteri ortaya koyar.

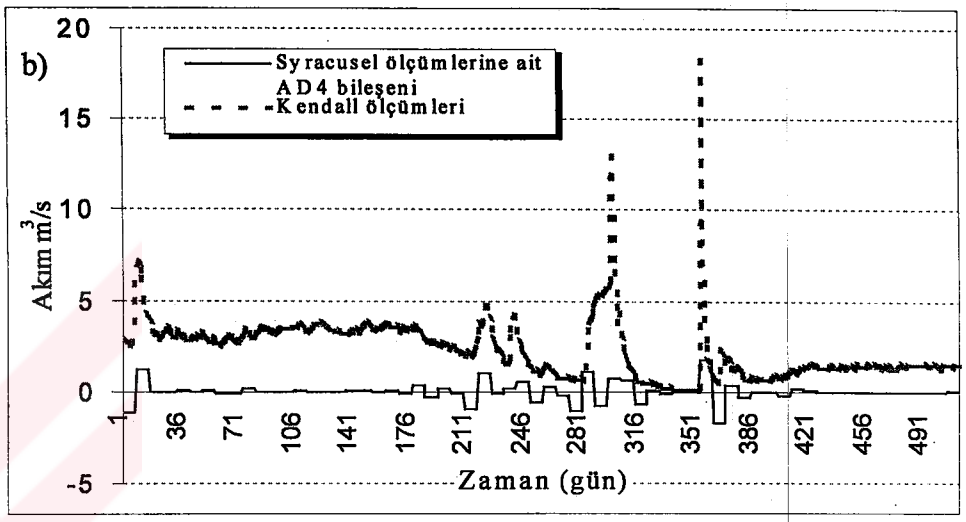
Şekil 4.3'den ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Syracuse ölçüm değerleri Kendall ölçümlerinden yüksek olmasına karşın, her iki ölçüm serisinin ADD bileşenleri bütün seviyelerde birbirlerine benzerlik göstermiştir. Örnek olarak, Kendall istasyonuna ait ölçümlerin 1. seviyedeki detay bileşeni -50 ve 100 arasında değerler almaktadır (Şekil 4.3-a). Öte yandan Syracuse istasyonuna ait ölçümlerin 1. seviyedeki detay bileşeni -100 ile 300 arasında değerler almaktadır. Her iki bileşende farklı aralıkta değer almasına karşın bileşenler bir birlerine benzer şekil almaktadır. Bu durumu bütün seviyelerdeki bileşenler için genelleyebiliriz. Bir başka deyişle şekil olarak benzerlik bölgesel benzerliği de ifade etmektedir. Bu benzerlik çalışmanın modelleme kısmında kullanılması açısından önemlidir. Şekil 4.3'den çıkarılabilecek bir başka dikkat çeken sonuç ise yaklaşıklık bileşenlerinin karşılaştırılması ile elde edilmiştir (Şekil 4.3'te son sıradaki iki zaman serisi). Detay bileşenlerinin aldığı değerler açısından Syracuse bileşenleri Kendall bileşenlerinkinden daha yüksek değerler almasına karşın yaklaşıklık serilerinde bu durum söz konusu değildir. Bu durum akım ölçüm serilerinin periyotlarında kararlı olmayan davranışlar olduğunu ifade eder. Böylece her bir bileşenin geçişli bir davranış gösterebileceği anlaşılır (Saco ve Kumar, 2000).

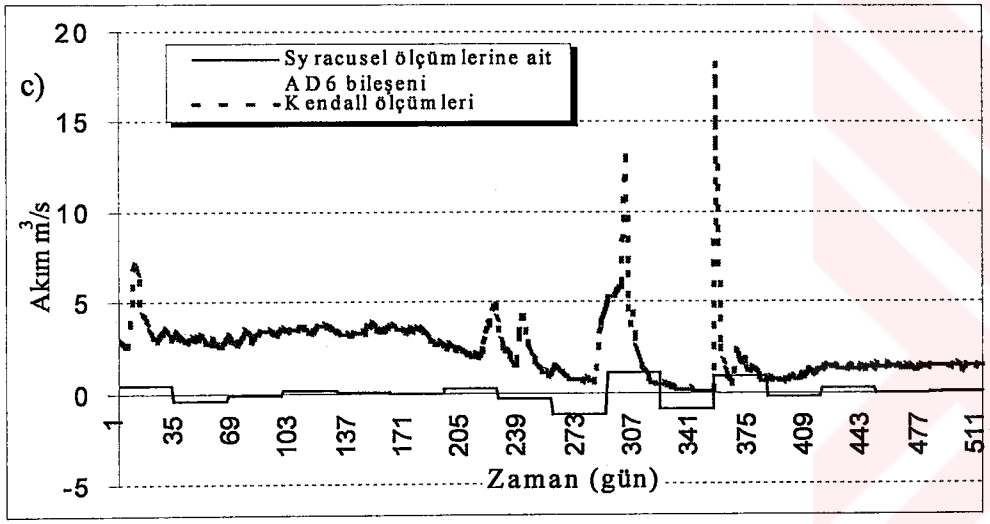
4.3.3 Bileşenlerin analizi

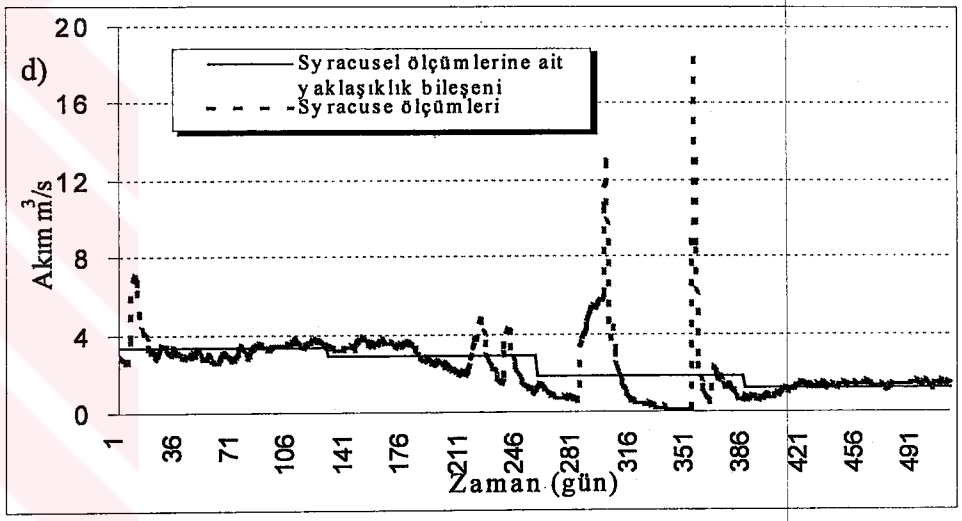
4.3.3.1 Bileşenlerin şekil olarak incelenmesi

Ölçüm serileri ile ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak elde edilen bileşenler arasındaki ilişkinin incelenmesi modelleme açısından önemlidir. Bu karşılaştırma Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekilde Kendall ölçüm istasyonuna ait günlük akım ölçümleri ile Syracuse ölçüm istasyonuna ait günlük akım ölçümlerinin ayrık dalgacık dönüşümü bileşenleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada Syracuse bileşenlerinden 1. seviyedeki detay (AD1), 4. seviyedeki detay (AD4), 6. seviyedeki detay (AD6) bileşenleri ile 7. seviyedeki yaklaşıklık bileşeni şekil olarak Kendall ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Burada gösterilen bileşenlerin karşılaştırılmasında basitlik olması açısından ADD hesaplanırken Haar dalgacık fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece şekil üzerindeki karşılaştırmada basitlik sağlanmıştır.









Şekil 4.4 (a) Kendall ölçüm serisi ile Syracuse AD1 bileşeninin, (b) AD4 bileşeninin, (c) AD6 bileşeninin ve (d) yaklaşıklık bileşeninin, karşılaştırılması

Şekil 4.4 incelendiğinde 7. seviyedeki yaklaşıklık serisi ölçüm serisi ile en iyi gidişi sağlamaktadır (Şekil 4.4-d). Fakat bu bileşen ölçüm serisindeki bir çok salınımı iyi bir şekilde temsil edememektedir. Şekil 4.4-c incelendiğinde AD4 bileşeni akım ölçüm serisinin altında kalmaktadırlar. Fakat bu seri belirtilen regresyon modellerine uyum sağlayacak şekilde bir *A* katsayısı ile çarpılıp boyutları arttırıldıktan sonra, bir *B* sayısı ile toplanarak *y* ekseni üzerinde ötelenirse ölçüm serisi ile arasında büyük bir benzerlik görülecektir. Bu durumu başka bir şekilde ifade edersek 4. seviyedeki bileşene, 7. seviyedeki yaklaşıklık bileşeni ilave edilirse elde edilecek seri ölçüm serisi ile çok yüksek benzerlik gösterir. Bu durum diğer detay bileşenler için uygulandığında en iyi uyumun 6. seviyedeki detay bileşeni kullanılarak elde edilen seride oluştuğu görülmektedir. Tablo 4.1'de Kendall ölçüm serisi ile Syracuse ölçüm serisine ait ADD detay bileşenleri arasındaki korelasyon değerleri görülmektedir. Aynı tabloda Kendall ölçüm serisi ile yine aynı seriye ait ADD detay bileşenlerinin korelasyonları da görülmektedir. Tablo 4.1 incelendiğinde ölçüm serisinin gidişi ile en iyi uyumu 6. detay bileşenin sergilediği daha sonra sırası ile 5, 7 ve 4. bileşenlerin en iyi uyumu sergilediğini gösterir. 1, 4 ve 6. detay bileşenleri ile ölçüm serisinin şekilsel olarak karşılaştırılması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Kendall ölçüm serisi ile Syracuse bileşenleri ve Kendall ölçüm serisi ile Kendall bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları

BİLEŞEN NUMARASI	AD7	AD6	AD5	AD4	AD3	AD2	AD1
KENDALL ÖLÇÜM SERİSİ-SYRACUSE BİLEŞENLERİ	0.328	0.375	0.365	0.255	0.202	0.082	0.166
KENDALL ÖLÇÜM SERİSİ-KENDALL BİLEŞENLERİ	0.332	0.380	0.370	0.263	0.217	0.190	0.222

4.3.3.2 Bileşenlerin enerji spektrumlarının incelenmesi

Akım serileri farklı ölçek seviyelerinde bileşenlerine ayrıldığında, bütün bileşenler arasında akım serisinin karakterine en iyi uyumu gösterecek bir yada birkaç bileşen elde edilebilir. Tez çalışmasında enerji varyansının büyük yüzdesinin korunduğu detay bileşenin hangisi yada hangileri olduğu enerji spektrumu hesaplanarak araştırılmıştır. Bu sayede oluşturulacak modeller arasında elde edilen sonuçların enerji spektrumlarına göre de karşılaştırılması sağlanmıştır.

Bölüm 3'de anlatıldığı üzere enerji spektrumu değerleri her bir ölçek seviyesi için hesap edilmiştir. Bölüm 2'de literatür çalışmasında anlatıldığı gibi Smith ve diğ.

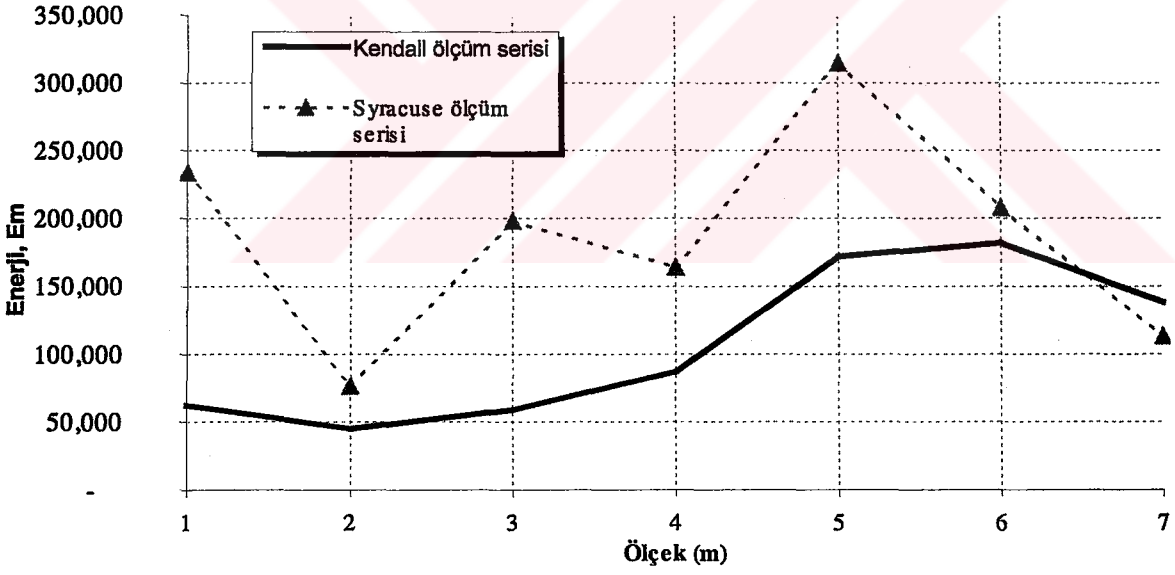
(1998) ve Saco ve Kumar (2000) çalışmalarında normalleştirilmiş enerji spektumlarını kullanarak bileşenlerin enerji dağılımlarına göre akım serilerini bölgesel iklim koşulları göz önünde bulundurarak sınıflama yapmışlardır. Bu çalışmada da enerji spektrumları akım serisindeki detay bileşenlerin enerji varyanslarının araştırılması ve modellemede bir karşılaştırma olması amaçı ile kullanılmıştır.

Bileşenlerin sahip olduğu enerji aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$E_m = \sum_n |w_{m,n}|^2, \tag{4.22}$$

Burada E_m, m. seviyedeki enerjiyi ifade etmektedir. $W_{m,n}$ ise m. seviyede ve n zaman adımındaki bileşenin Ayrık dalgacık dönüşümü katsayısıdır.

Şekil 4.5'de sürekli çizgi (—) Kendall ölçüm serisine ait m. seviyedeki detay bileşenin enerjisini göstermektedir. Kesikli çizgi (---) ise Syracuse ölçüm serisine ait bileşenlerin enerji değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.5 Kendall ve Syracuse ölçüm serilerine ait detay bileşenlerin enerji değerleri

Şekil 4.5'de hem Kendall hem de Syracuse ölçümlerine ait detay bileşenlerinden 5. ve 6. detay bileşenlerinde enerjinin diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin ifade ettiği ölçek seviyesi ise 2^5=32 ve 2^6=64 gündür. Bu durum bize detay bileşeni olarak iki aylık bir periyoda sahip aktivitelerin bölgenin iklim karakteristiği üzerindeki önemli olduğunu ifade eder. Bölgenin hidroklimatik yapısı

göz önünde bulundurulduğunda elde edilen enerji spektrumu Smith ve diğ. (2000) elde ettikleri spektrumla uyumlu olduğu da görülmüştür.

Simith ve diğ. Amerika Birleşik Devletlerinin güney-batı kesimi için yaptıkları incelemede enerji spektumunda 64-256 günlük ölçeklerde en yüksek değerler elde etmişlerdir. Enerji-ölçek grafiği Şekil 4.3'deki ÇÇA sonucunda elde edilen bileşenler ile karşılaştırıldığında da uyumlu görülmektedir. Şekil 4.3'deki çizimlerde bileşenlerin aldığı değerlere göre Syracuse ait detay bileşenlerinin Kendall'a ait olanlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 4.5'te de görülmektedir. Enerji değerlerinin 5., 6. ve nispeten 7. seviyedeki detay bileşenlerinde yüksek olması Kilsby ve diğ. (1999) tarafından yapılan bölge iklim karakteristiğini ifade eden çalışma ile de uyum göstermektedir.

4.3.4 İstasyonlar arası modelleme ve sonuçları

Yukarıda belirtilen bölgedeki iki ölçüm istasyonu için günlük akım serileri ayrık dalgacık dönüşümü yardımıyla bileşenlerine ayrılmıştır. İstasyonlarda eşzamanlı ölçülen 512 akım verisi 7 detay ve 1 adet yaklaşık seri olarak bileşenlerine ayrılmıştır. Sonuçta oluşan 8 adet bileşenle kendi aralarında 8 adet model oluşturulmuştur. Karşılaştırmak için bu iki istasyonun günlük akım ölçümleri kullanılarak bir model daha oluşturulmuştur. Böylece bileşenler ve gerçek gözlem serileri arasında 9 adet regresyon model oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan 730 günlük akım verisinden 512'si modellerin oluşturulmasında kullanılmış, geri kalan 217 ölçüm de modelleri test etmek için kullanılmıştır. Nason ve Sapatinas (2002)'nin rüzgar hızı için yaptıkları çalışmada kullandıkları bir hata kriteri yerine bu çalışmada bir den çok karşılaştırma kriteri kullanılmıştır. Test sonuçları ve modellerin tahmin kapasiteleri yukarıda detaylı açıklanan ortalama karesel hata (OKH) ve toplam mutlak hata (TMH) kriterleri ile karşılaştırılmıştır. OKH pik değerlerin doğru tahmin edilip edilmediği konusunda bize daha anlamı bilgi vermektedir. OKH kriterinde ortay çıkan hatalar karesel arttığından dolayı, eğer model pik değerleri yanlış tahmin ederse pik değerlerde hata çok daha yüksek olur. Bundan dolayı, bütün tahmin değerleri için ortalama alınabilecek bir hata değerine daha ihtiyaç duyulur. TMH kriteri; tüm tahmin serisi için ölçüm değerleri ile olan farkın ortalamasını ifade eder. Ölçüm ve tahminler arasındaki farkın mutlak değerce

toplamının ölçüm sayısına bölünmesi ile elde edilir. Hata kriterlerinin yanında modellenecek bileşenler arasındaki korelasyon ilişkilerine de bakılmıştır.

Sonuçta oluşturulan 9 adet modelin adları OKH, TMH ve model oluşturulan bileşenlerin kendi aralarındaki korelasyon katsayıları Tablo 4.2'de verilmiştir.

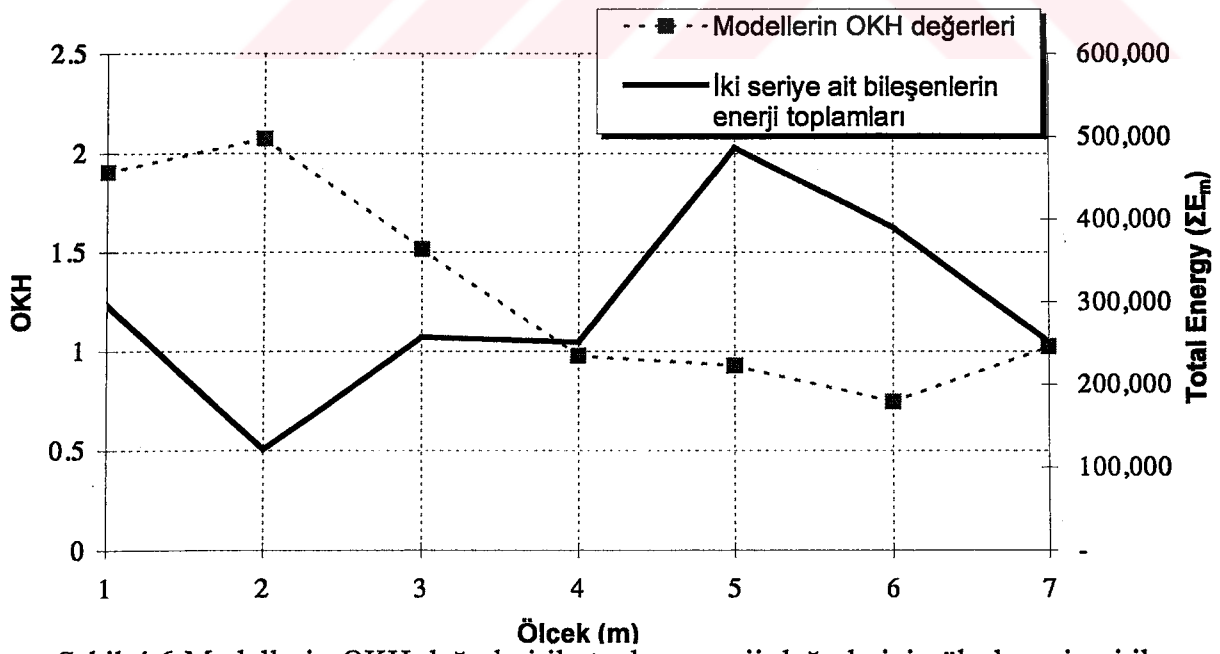
Tablo 4.2 Oluşturulan 9 model için OKH, TMH ve korelasyon katsayıları

Model Numarası	Model adları	OKH	TMH	Korelasyon Katsayıları
Model 0	Ölçüm serileri arasındaki model	0,029	0,365	0,91
Model 1	AD1 bileşenleri arasındaki model	0,039	0,647	0,75
Model 2	AD2 bileşenleri arasındaki model	0,041	0,704	0,43
Model 3	AD3 bileşenleri arasındaki model	0,035	0,511	0,93
Model 4	AD4 bileşenleri arasındaki model	0,028	0,321	0,97
Model 5	AD5 bileşenleri arasındaki model	0,027	0,303	0,99
Model 6	AD6 bileşenleri arasındaki model	0,024	0,182	0,99
Model 7	AD7 bileşenleri arasındaki model	0,029	0,226	0,99
Model 8	Yaklaşıklık bileşenleri arasındaki model	0,028	0,232	0,999

Tablodan da anlaşılacağı üzere en uygun model 6. seviye detay bileşenleri arasında oluşturulan modeldir. Bu durum Şekil 4.4' deki analizi doğrulamaktadır. 6. seviye detay bileşeni içerisinde dönüş aralığı 2^6=64 gün olan akım olaylarını barındırmaktadır. Bu durum yağışlı bölgelerde oluşan günlük ve haftalık değişimin tersine daha uzun bir periyodu ifade eder ve yukarıda açıklandığı gibi bölgenin kurak karakterli iklim özelliğinden kaynaklanmaktadır. Model 6'nın OKH'sı 0,024 ve TMH değeri ise 0,182 m^3/s olmuştur. Model 5'in OKH değeri 0,027 ve TMH 0,303 m^3/s olmuştur. Bunların yanında Model 7'nin OKH değeri 0,029 iken, TMH değeri 0,226 m^3/s olmuştur. Yaklaşıklık serileri arasında oluşturulan Model 8 test serisi ile en yüksek korelasyonu verirken, hata kriterleri açısından OKH değeri 0,028 ve TMH değeri ise 0,232 m^3/s şeklinde oluşmuştur. Tablo 4.2'den AD6 bileşenleri arasında oluşturulan modelin en iyi tahmini yaptığı görülmesinin yanında, Model 4, 5, 6, 7 ve nispeten 8'in diğer düşük ölçekli bileşenler kullanılarak oluşturulan modellerden daha iyi tahminler verdiği görülmektedir. Bu çalışmanın amaçlarından birisi de eksik veri tamamlanması ve bir istasyondan diğer istasyonun verilerinin tahmini çalışmalarında oluşturulan modellerin tahmin gücünün arttırılmasıdır. Çalışmada

fiziki olarak bölgenin iklim karakteristiğini yansıtan bileşenler arasında oluşturulan modellerin diğer bileşenler ile oluşturulan modellere göre daha iyi performans sergilediği anlaşılmıştır.

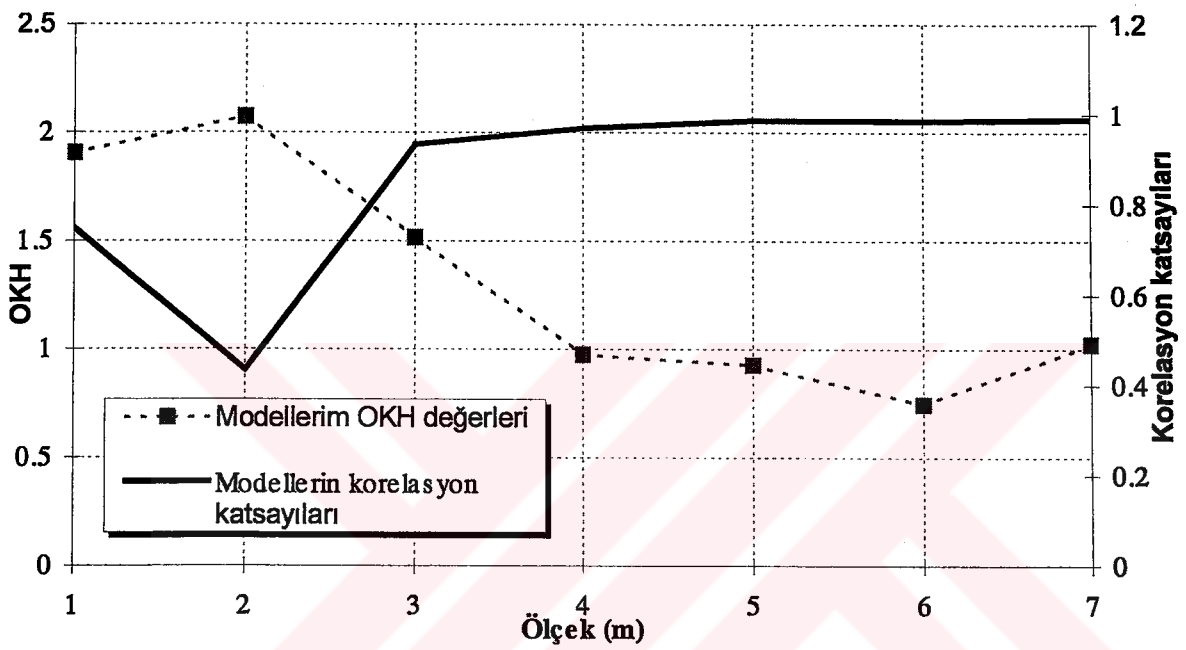
Küçük ölçekli detay bileşenleri ile oluşturulan modellerin test için kullanılan ölçüm serileri ile korelasyonları da çok düşüktür. Bu durum ölçüm serileri arasında oluşturulan modelin performansını düşürmektedir. Küçük ölçeğe sahip detay bileşenlerinin etkisinden arındırılmış daha yüksek ölçek seviyesindeki bileşenlerle oluşturulan modeller iki istasyonda ölçülmüş akım serilerinin davranışlarını daha iyi yansıttıklarından dolayı daha yüksek ölçek seviyesinde oluşturulan modeller daha iyi performansa sahiptirler. Bu durum bölgenin iklim karakteristiğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Daha kurak bölgelerde Saco ve Kumar'ın (2000) çalışmasında görüldüğü gibi ölçek seviyesi yüksek olan bileşenler daha etkili iken, yağışlı bölgelerde düşük ölçek seviyesindeki bileşenler ölçüm serilerinin genel karakteristiğini daha iyi yansıtmaktadırlar. Şekil 4.5 'de gösterilen Kendall ve Syracuse istasyonlarına ait ölçüm serilerinin detay bileşenlerinin enerjileri toplamı hesaplanarak aynı seviyede oluşturulan modellerdeki OKH değerleri ile grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 4.6). Şekil 4.6'da görüleceği üzere ölçek seviyesinin büyümesi ile OKH değerleri azalmakta, tersi olarak enerji değerleri artmaktadır.



Şekil 4.6 Modellerin OKH değerleri ile toplam enerji değerlerinin ölçek seviyesi ile değişimi

Modeller arasında yapılan bir başka karşılaştırma da korelasyon katsayıları ile OKH değerleri arasında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).

Şekil 4.7'de küçük ölçekli bileşenlerle oluşturulan modellerde OKH değerleri daha yüksek olurken korelasyon katsayıları da düşük seyretmektedir. Daha yüksek ölçeklerdeki detay bileşenleri ile oluşturulan modellerde korelasyon katsayıları daha yüksek görülmektedir. Dikkat çeken bir nokta modelle tahmin serileri arasında en küçük korelasyona ait serinin en yüksek OKH değerine sahip olduğudur.



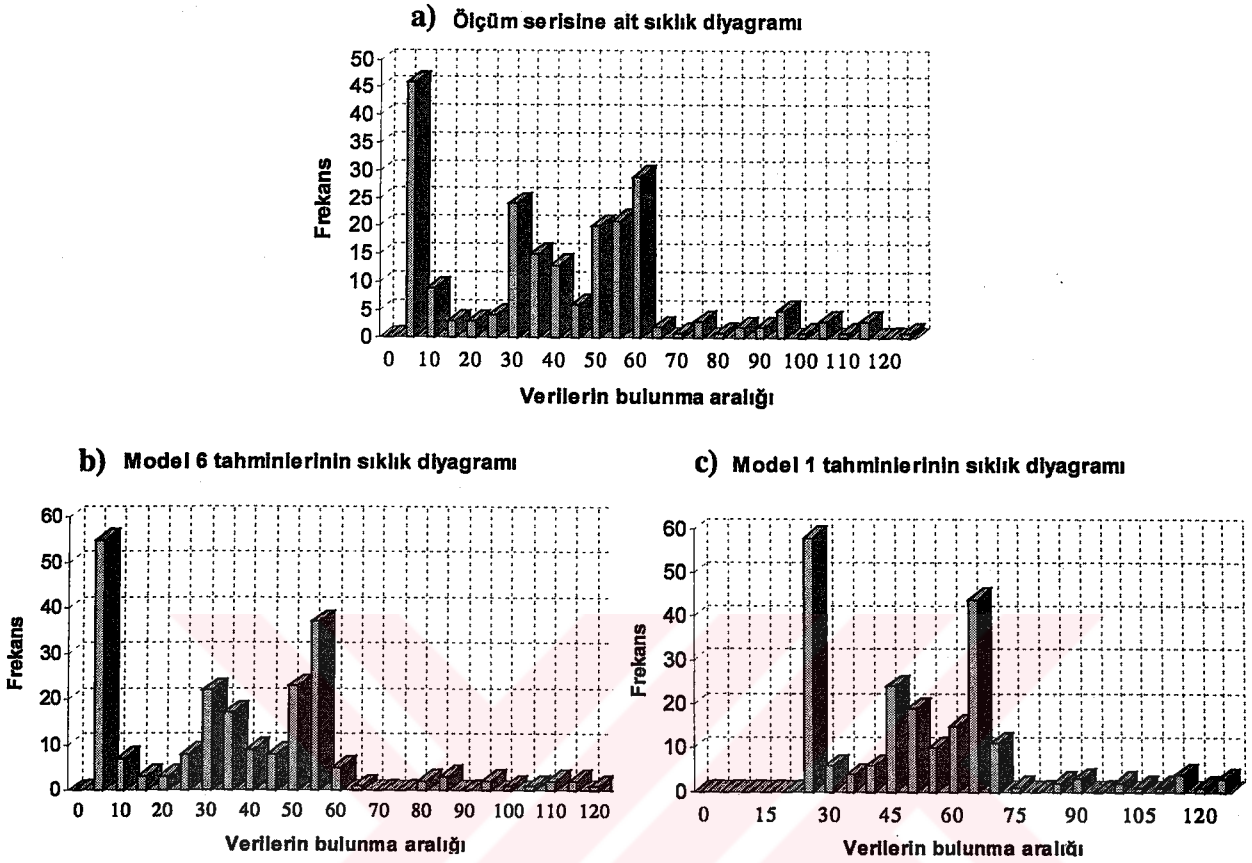
Şekil 4.7 Modellerin OKH değerleri ile korelasyon katsayılarının ölçek seviyesi ile değişimi

4.3.4.1 Tahmin dağılımlarının karşılaştırılması

Modelleme sonucunda elde edilen serilerin ölçüm serilerine benzerliği sıklık dağılımları bakımından da incelenmiştir. Sonuçlar ki-kare (X^2) testi ile sınanarak dağılımların benzerlik durumları ortaya konulmuştur.

Oluşturulan 9 modelden Model 1, Model 6 ve Model 0 ile yapılan tahmin sonuçlarının ölçüm değerleri ile sıklık diyagramları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8). Şekil 4.8'den görüleceği üzere ölçüm serisi sıklık dağılımı ile Model 6 tahminlerinin sıklık dağılımları birbirlerine benzemektedirler. Model 6 ölçüm istasyonlarına ait serilerin 6. seviyedeki detay bileşenleri arasında oluşturulmuş modeldir. Model 6'nın enerji spektrumu dağılımı yukarıda anlatıldığı üzere en yüksek enerjiye sahiptir. Bölgenin iklimsel yapısını da en iyi karakterize eden detay bileşeni 6. seviyedeki

bileşendir. Sıklık dağılımlarının Ki-kare parametreleri aşağıda tablo halinde verilmiştir (Tablo 4.3).



Şekil 4.8 (a) Ölçüm serisi, (b) Model 6 tahminlerine, (c) Model 0 tahminlerine ait sıklık diyagramları

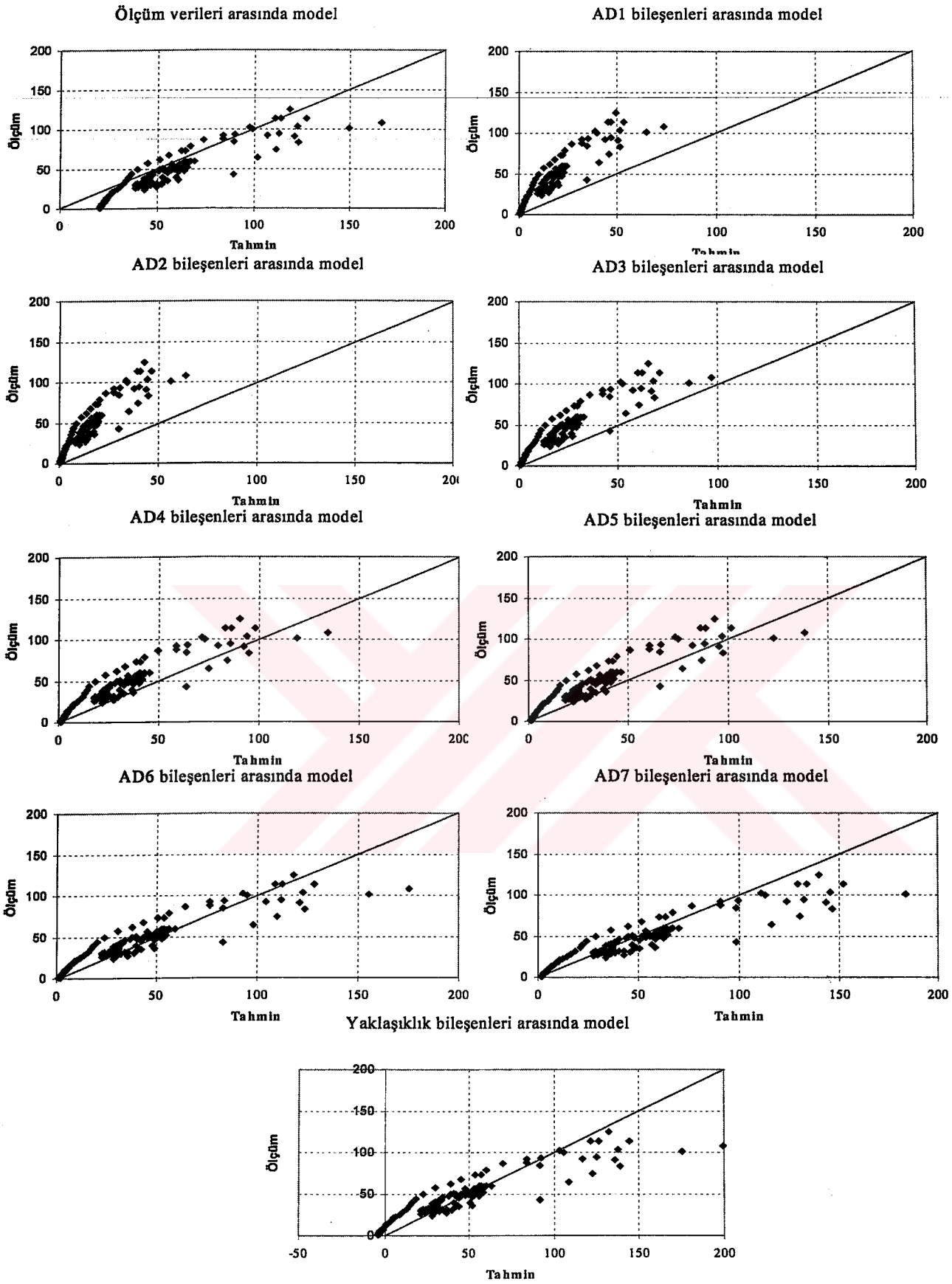
Tablo 4.3 Oluşturulan 9 modelin tahmin dağılımlarının Ki-kare istatistikleri

	MODEL0	MODEL1	MODEL2	MODEL3	MODEL4	MODEL5	MODEL6	MODEL7	YAKLAŞIKLIK
Kİ-KARE	219	210	218	151	137	132	43	85	135

Tablodan görüldüğü gibi en düşük Ki-kare değeri Model 6 için gerçekleşmiştir. Buradan ölçüm serisi sıklık diyagramına benzerlik açısından en iyi modelin Model 6 olduğu görülmektedir.

4.3.4.2 Tahminlerin saçılma diyagramlarına göre karşılaştırılması

Modeller ölçüm serisi ile tahmin serileri arasındaki saçılma diyagramlarına bakılarak da karşılaştırılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Model 0, Model 1, Model 2, ...Model 6, Model 7 ve Model 8 sonucunda tahmin edilen değerler ile ölçüm serisinin karşılaştırıldığı saçılma diyagramları ve regresyon doğruları.

Şekil 4.9'da Model 0, Model 1, Model 2, ...Model 6, Model 7 ve Model 8 için elde edilen akım tahminleri ile ölçüm serileri arasındaki saçılma diyagramları ve korelasyon çizgileri görülmektedir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere lineer ilişkinin en kuvvetli olduğu model Model 6'dır. Bu modelde ölçüm serisi ile tahminler arasındaki ilişkiyi ifade eden x'in önündeki katsayı 1'e yakındır.

4.3.4.3 Modellerin belirsizliği ve dönüşümler

Modelleme sırasında Kendall ölçüm istasyon veriler bağımlı *Yi* değişkenler, Syracuse ölçüm istasyonundaki veriler bağımsız *Xi* değişkenler olarak göz önünde bulundurulmuştur. Kurulacak regresyon denkleminin b_o ve b_1 regresyon katsayılarının hesabı, denklem (4.8), (4.9), (4.10), (4.11) ve (4.12) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda *SSx, SSy ve Sxy* katsayıları sırası ile 1745044,07, 1253397,42, 1348392,32 olarak hesaplanmıştır. Buradan b_o ve b_1 regresyon katsayıları sırası ile 0,772 ve 19,509 olarak elde edilmiştir. İki ölçüm serisi arasında oluşturulmuş regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\hat{y}_i = 19.50 + 0.77x_i \tag{4.23}$$

Regresyon denklemi kullanılarak oluşturulan modelin tahminleri sonucunda elde edilen hatalar Tablo 4.2'de gösterilmişti. Modellerin farklar veya kalıntı terimlerinin ortalamasının 0 olması, varyanslarını eşit olması ve normal dağılıma uygun olması regresyon denkleminin geçerliliği için önemlidir. Eğer bu şartlar yerine gelmiyorsa değişken uygun bir dönüşümle hesaplanarak yeniden modellenir veya alternatif diğer regresyon teknikleri kullanılabilir.

Kalıntı (fark) terimleri incelendiğinde kalıntıların toplamı 7.21911×10^{-12} olarak hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık sıfır demektir. Kalıntıların normal dağılıma uygunluğu iki ayrı test kullanılarak sınanmıştır. Bunlardan ilki K-S testidir. Bu testte öncelikle veriler sıraya düzülerek numaralandırılır. Daha donra küçük kalma ihtimalleri hesaplanarak *(1/n)* bir tablo oluşturulur $F^*(e_i)$. Daha sonra bir *F(ei)* istatistiği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F^*(e_i)=\frac{1}{n} \tag{4.24}$$

$$F(e_i)=z_i=\frac{X_i-\mu_x}{\sigma_x} \tag{4.25}$$

Buradaki e_i modelde elde edilen i. kalıntı terimini ifade etmektedir.

Bu iki istatistik yardımı ile mutlak değerce en yüksek $F^*(e_i)$- $F(e_i)$ değeri hesaplanır. Bu değer K-S istatistiği tablosunda belirli bir güven derecesi için verilen değerle karşılaştırılır.

α=0,10 anlamlılık düzeyinde veri sayısı (n) $n>30$ olduğundan dolayı tablo değeri olarak $0{,}805/(n)^{0,5}$ değeri hesaplanır. Hesap sonucunda 0,04 değeri elde edilmiştir. Bu değer en yüksek $F^*(e_i)$- $F(e_i)$ değeri ile karşılaştırılınca K-S testine göre kalıntıların normal dağılıma uygunluğu red edilir.

İkinci karşılaştırma PPCC testi ile yapılmıştır. Bu testte kalıntılar için bir $F(e_i)$ istatistiği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F(e_i)=\frac{i-a}{n+1-2a} \tag{4.26}$$

Burada a sabit değeri normal dağılım için 0,4 olarak seçilmiştir. i ise kalıntıların sıra numarasını ifade eder. $F(e_i)$ istatistiği için hesaplanan değer ile kalıntıların standart dönüşümleri arasında bir r korelasyon katsayısı hesaplanır. tablo yardımıyla belirli bir anlamlılık düzeyinde elde edilen r* korelasyon katsayısı ile hesaplanan r katsayısı karşılaştırılır.

Test sonucunda r* değeri 0,98 ve r değeri de 0,71 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre normal dağılıma uygunluğu red edilmiştir.

Normal dağılıma uygunluğu red edildiği için X ve Y değişkenleri değişik dönüşüm teknikleri ile yeniden elde edilmiştir. Bunlardan biride boyutsuzlaştırılarak dönüşüm uygulanmasıdır. Dönüşüm için aşağıdaki standartlaştırma işlemi yapılmıştır. Dönüşüm uygulanan yeni değişkenlerle yeniden modelleme yapılmış ve yukarıda belirtilen işlemler tekrar edilmiştir.

$$z_i=\frac{X_i-\mu_x}{\sigma_x} \tag{4.27}$$

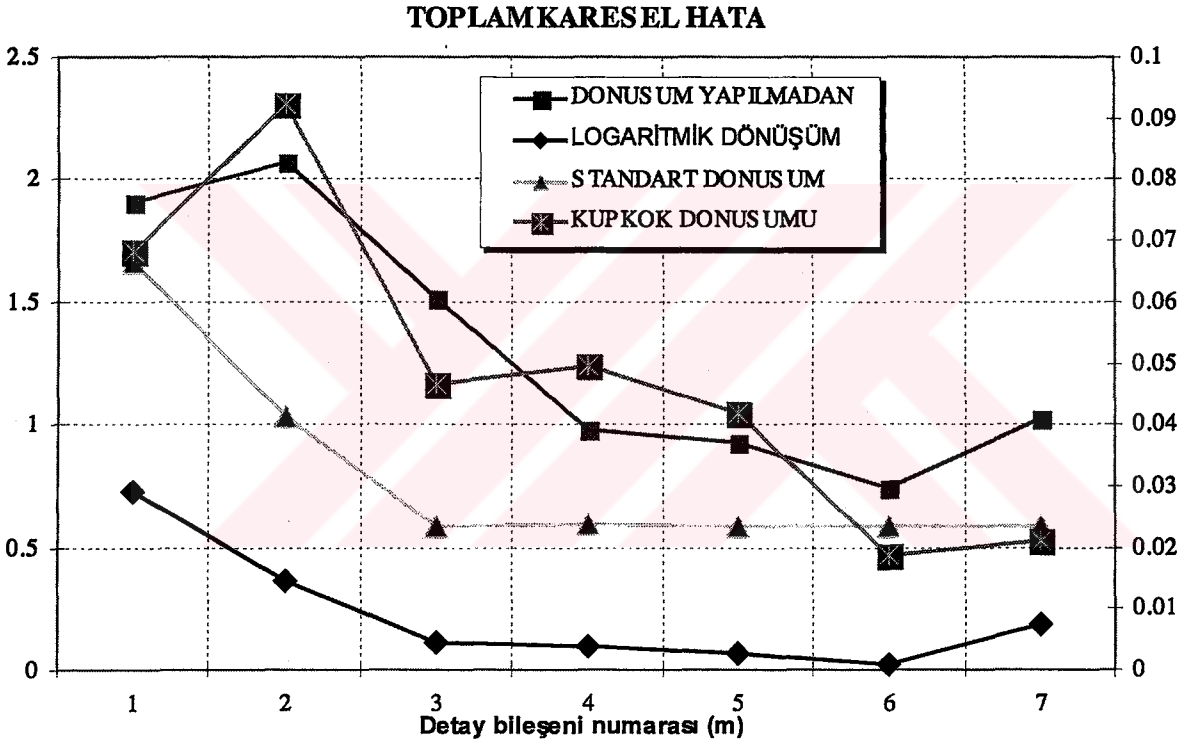
Dönüştürülmüş veriler ile hesaplanan yeni regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\hat{y}_i = 0{,}54X10^{-17} + 0.91x_i \qquad (4.28)$$

Bu denklem uygulanarak y_i değişkeni için yapılan tahminin kalıntı terimlerinin toplamı $-8{,}68194X10^{-14}$ yani yaklaşık 0 olarak hesaplanmıştır.

Boyutsuzlaştırma işleminin yanında değişkenlerin küp kökünün alınması ve logaritmik dönüşüm de uygulanmıştır.

Bu üç dönüşüm sonucunda ve dönüşüm yapılmadan elde edilen hata oranları ve bunların bileşenlere göre değişimleri aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.



Şekil 4.10 Çeşitli dönüşümler kullanılarak oluşturulan modellere ait OKH değerleri

Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere dönüşüm yapılmadan oluşturulan modelleme ile dönüşüm yapılarak yapılan modellemeler sonucunda en düşük hata altıncı detay bileşenleri kullanılarak yapılan modelleme sonucunda elde edilmiştir.

1, 2 ve 3. detay bileşenlerin enerji diyagramları sonuçlarından anlaşılacağı üzere düşük enerjiye sahip olmaları 5, 6 ve 7. detay bileşenlerin yüksek enerjiye sahip olmaları nedeniyle modelleme sonuçlarında küçük ölçek bileşenleri büyük ölçek bileşenlerinden daha yüksek hata vermiştir.

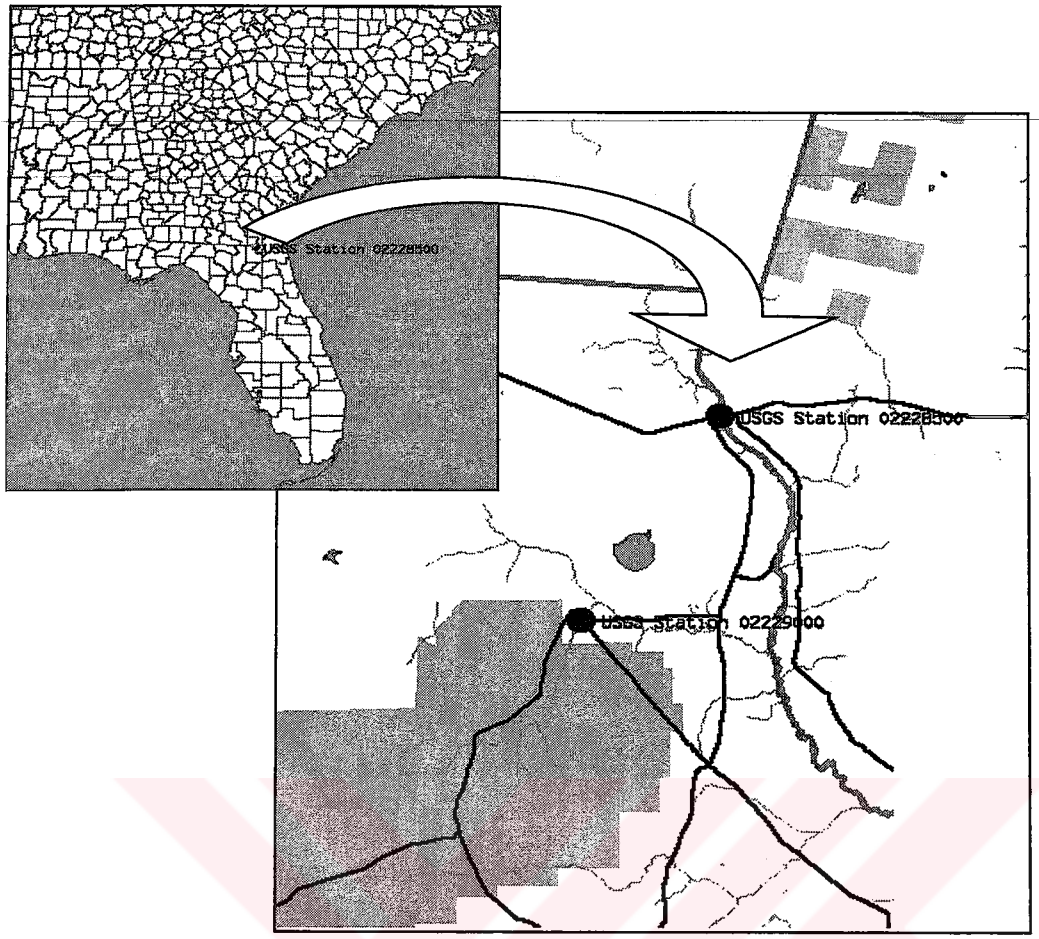
Dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerin enerji dağılımları yapılan dönüşümlerden etkilenmediği için model sonuçlarında belirgin bir değişiklik yoktur.

4.3.5 Coğrafyanın model üzerine etkisi

Dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak yapılan modellemede bölgenin iklimsel karakteristiği önem arz eder. Çalışmanın bu kısmında coğrafi olarak farklı bir bölgedeki akım istasyonları arasında modelleme çalışması yapılmıştır. Böylece model üzerinde farklı bölgelerin etkileri görülmüştür.

Uygulam için St. Marys nehrinin North Prong, ölçüm istasyonunda ölçülen günlük akım verileri model için girdi (X_t) olarak kullanılmıştır. Bu istasyon 30°31'03" enlem, 82°13'50" boylamında bulunmaktadır. Bulunduğu bölge Amerika Birleşik Devletlerindeki Georgia eyaletidir. İstasyon numarası USGS 02228900'dür. St. Marys nehrinin Middle Prong, ölçüm istasyonunda ölçülen günlük akım verileri model için çıktı (Y_t) olarak kullanılmıştır. Bu istasyon 30°26'10" enlem, 82°17'15" boylamında bulunmaktadır. İstasyon numarası USGS 02229000'dir.

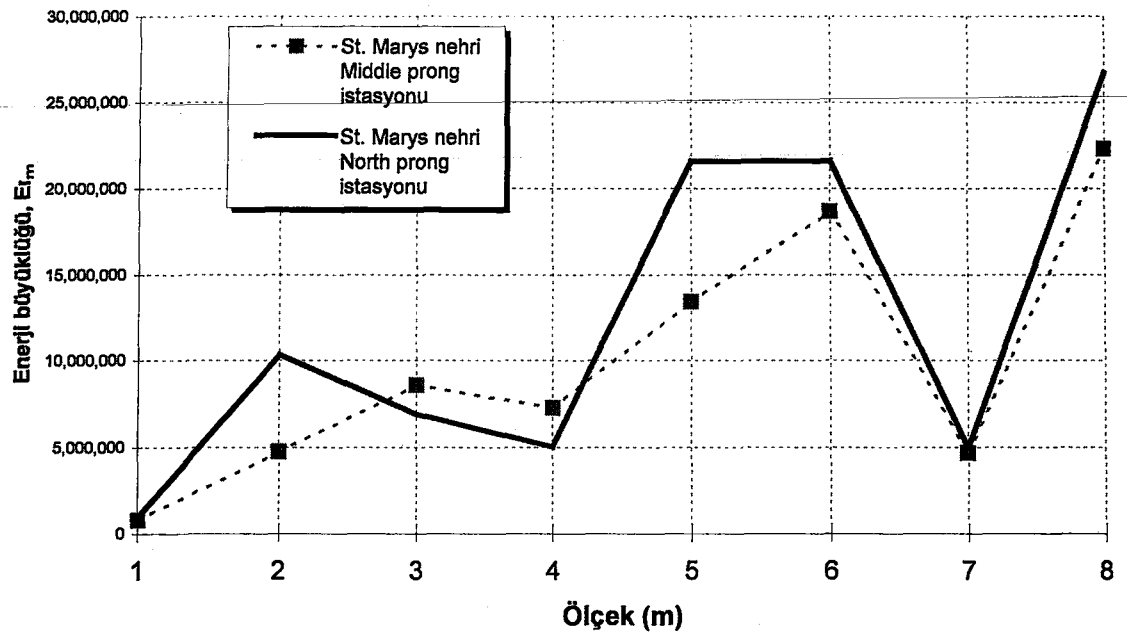
01 Nisan 1997 ve 17 Ocak 2000 tarihleri arsındaki 1644 günlük akım serisi modelleme için kullanılmıştır. Test serisinin ortalama debisi 0,437 m^3/s, çarpıklık katsayısı 5,53 standart sapması 1,50 m^3/s dır. En düşük akım 0,001 m^3/s, en yüksek akım 12,57 m^3/s dir. Bölgenin ve istasyonların genel görünümü Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Ölçüm istasyonlarının coğrafi konumları

Şekil 4.11'e dikkat edilirse ölçüm istasyonları Arizona nehrindekinden farklı olarak St. Marys nehrinin iki ayrı kolunda bulunmaktadır. Bu durumda yapılan modellemenin sağlığı açısından bakıldığında tahminlerin seviyesinin düşmesi beklenebilir. Fakat bu aynı zaman dalgacık dönüşümü kullanılarak bölgesel bir modelde yapılabileceğini göstermesi açısından yararlıdır.

Uygulamada ele alınan ölçüm serisinin uzunluğu 1644 olduğundan ikinin en yakın katı $1024=2^{10}$ dur. Dolayısıyla ölçüm serisi $m=9$ adet bileşene ayrılabilir. Bileşenlerden 8 tanesi detay 1 tanesi ise yaklaşıklık bileşenidir. Öncelikle iki ölçüm istasyonundan elde edilen günlük akım serileri ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak 9 bileşene ayrılmıştır. Her bir bileşene ait enerji dağılımları bağıntı (4.22)'den yararlanarak Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 North Prong ve Middle Prong ölçüm serilerine ait detay bileşenlerin enerji değerleri

Şekil 4.12'de her iki ölçüm serisine ait detay bileşenlerinin hesaplanan enerji değerleri (E_m) görülmektedir. Şekilde ki sürekli çizgiler (—) North Prong istasyonuna ait ölçüm serisi bileşenlerinin belirtilen ölçek seviyesindeki enerji değerlerini ifade etmektedir. Şekildeki kesikli çizgiler ise (--) Middle Prong istasyonuna ait ölçüm serisi bileşenlerinin enerji değerlerini verir. Yaklaşıklık serisi enerji değerleri şekil üzerinde gösterilmemiştir. Şekilden her iki istasyona ait ölçüm serilerinin enerjileri arasında önemi bir fark bulunmadığı görülmektedir.

Akım serisi kayıtları genel itibarı ile düzensiz dağılım gösteren sivri taşkın piklerine sahiptir. Ayrıca değişik aralıklarda devam eden uzun süreli düşük akımlar da mevcuttur. Enerji spektrumundan 2-4 günlük ölçek değerlerinin sahip enerji yüksek görülmektedir (Şekil 4.12). Haziran ayından Ekim ayına kadar bu bölgede sele neden olabilecek yağışları getiren tropical kasırgalar etkilidir. Özellikle kıyı kesimlerinde bu durum önemlidir. Bu durum enerji spektrumunda küçük ölçeklerdeki yüksek değişkenliğe de neden olmaktadır. Kısa sürelerde hidrograflarda meydana gelen artışlar küçük ölçeklerde yüksek enerjilerin oluşmasını sağlar. Bu bölgede kış ve bahar başında taban akım koşullarında oluşan kademeli artışlar 6 ay ve 2 yıllık ölçek seviyesindeki değişkenliği arttırır. Bu durum Şekil 4.9'da 8. ölçek değerindeki enerjinin yüksekliğini netice verir. Ölçüm serisinin bu kararsız yapısı dalgacık enerji spektrumunda farklı ölçeklerde farklı enerji seviyelerinin oluşmasına neden olduğu

görülmüştür. Bu durum Saco ve Kumar (2000)'ın çalışmalarında akım serilerinde elde ettiği çok ölçekli tutarlı modlarla uyum göstermektedir. Daha uzun süreli zaman serisi kayıtlarının analiz edilmesi ile bölgede enerji spektrumuna ait daha tutarlı modlar elde edilebilmesi mümkündür. Fakat tez çalışmasında konu edilen, dalgacık dönüşümü tekniği kullanımının modellemede bir performans artışı elde etmesidir.

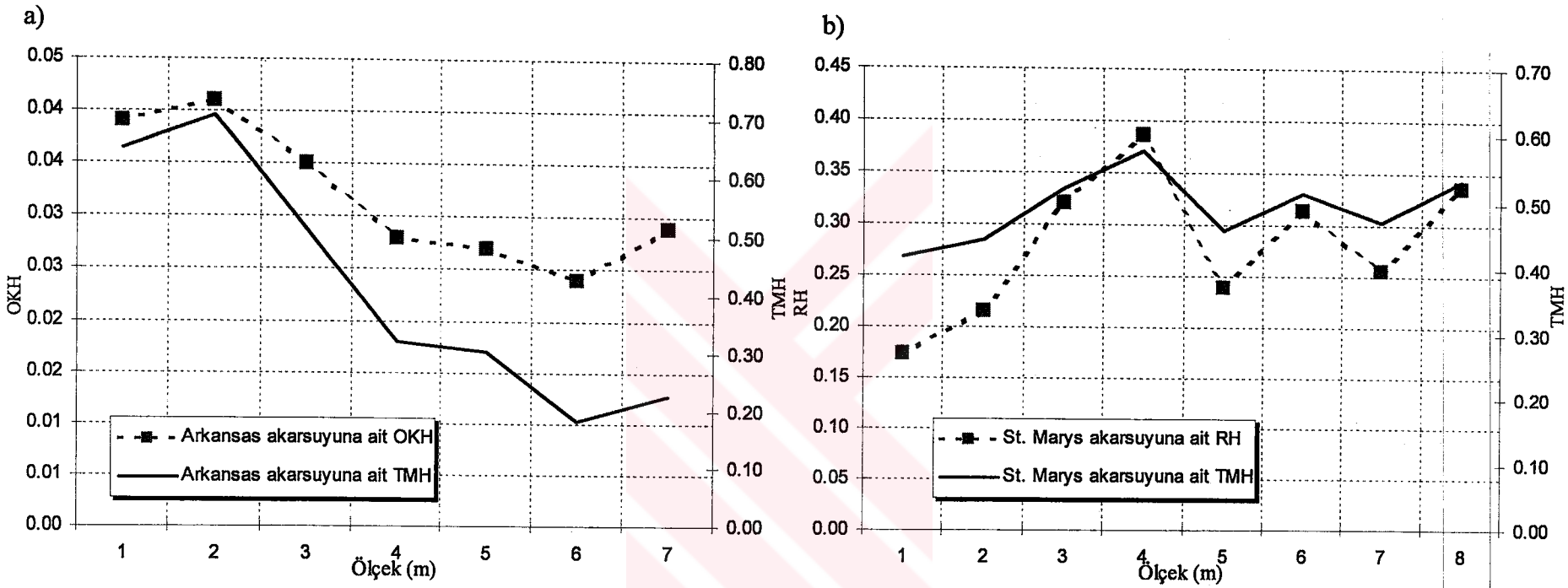
Ölçüm serileri 9 adet bileşene ayrıldıktan sonra ölçüm serileri arasında gerçekleştirilen model ile birlikte toplam 10 model oluşturulmuştur. Modeller eldeki 1644 ölçümün 1024 adeti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modellerde North Prong istasyonu ölçümlerinden elde edilen bileşenler açıklayıcı, girdi (X_t) ve Middle Prong istasyonuna ait ölçümlerden elde edilen detay bileşenler ise cevap, çıktı (Y_t) verileri olarak kullanılmışlardır. Modellerin oluşturulup parametrelerinin belli edilmesinden sonra aynı istasyonlara ait 1644 veriden geri kalan 620 veri modelleri test etmek için kullanılmışlardır. Sonuçlar değişik hata kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Kullanılan verilerde yukarıda söz edildiği gibi keskin taşkın piklerinin bulunması ve hidrograflardaki kısa sürede meydana gelen artışlar nedeniyle daha önce kullanılan OKH kriteri ile verilerin değerlendirilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle karşılaştırmada TMH kriterinin yanında Rölatif Hata (RH) olarak tanımlanan bir başka kriter kullanılmıştır.

Farklı modeller için elde edilen RH ve TMH değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde Model 1 ve 2, Model 5 ve nispeten Model 7 diğer modellere göre daha düşük hata üretmişlerdir. Model 1, 2, 5 ve 7 sırası ile 2^1=2, 2^2=4, 2^5=32 ve 2^7=128 günlük ölçek değerleri ile uyum içerisindedir. 2-4 günlük ölçeğe sahip küçük ölçekli bileşenlerin bölgenin hidroklimatik yapısını iyi tanımlayabilmektedir. Bu nedenle önceki uygulamada Arizona nehri sonuçlarının aksine düşük ölçekli bileşenlerle oluşturulan modellerin hataları daha düşük çıkmıştır.

Tablo 4.4 Oluşturulan 10 model için RH ve TMH değerleri

Model Numarası	Model adları	OKH	TMH
Model 0	Ölçüm serileri arasındaki model	2.184	1.169
Model 1	AD1 bileşenleri arasındaki model	0.174	0.416
Model 2	AD2 bileşenleri arasındaki model	0.216	0.442
Model 3	AD3 bileşenleri arasındaki model	0.321	0.521
Model 4	AD4 bileşenleri arasındaki model	0.385	0.577
Model 5	AD5 bileşenleri arasındaki model	0.239	0.459
Model 6	AD6 bileşenleri arasındaki model	0.314	0.515
Model 7	AD7 bileşenleri arasındaki model	0.255	0.471
Model 8	AD8 bileşenleri arasındaki model	0.337	0.534
Model 9	Yaklaşıklık bileşenleri arasındaki model	2.211	1.179

Hata kriterleri bakımından her iki nehir için oluşturulan modellerde farklı ölçeklerde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Arkansas nehrinde OKH ve TMH değerleri düşük ölçeklerde oluşturulan modellerde artış gösterirken, yüksek ölçeklerde oluşturulan modellerde azalmaktadır. Tersine St. Marys nehrinde RH ve TMH değerlerinde düşük ölçeklerde azalış görülürken, yüksek ölçeklerde bazılarında artış bazılarında da azalış görülmektedir. Bu durum Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Arkansas ve St. Marys nehirlerine ait ölçümlerin detay bileşenlerinden oluşturulan modellerin ürettikleri hata değerleri. a) Arizona nehrine ait Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Toplam Mutlak Hata (TMH) değerleri, b) St. Marys nehrine ait Rölatif Hata (OKH) ve Toplam Mutlak Hata (TMH) değerleri

St. Marys nehri havzasında normal akım koşullarında kısa sürede ani artışlar meydana gelmesinin tersine Arkansas nehri havzasındaki yarı-kurak bir akım rejimi gerçekleşmektedir. Bu nedenden dolayı her iki nehir için oluşturulan modellerde farklı ölçeklerdeki bileşenler havzayı karakterize ettiğinden farklı modellerde performans artışı görülmüştür. Şekil 4.13-a'da Arkansas nehrine ait ÇÇA sonucunda elde edilmiş bileşenler kullanılarak oluşturulan modellerin OKH ve TMH değerleri görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere düşük ölçek seviyelerinde oluşturulan modellerin hataları yüksek ölçek seviyesindeki bileşenler ile oluşturulan modellerin hatalarından daha yüksektir. Şekil 4.13-b'de ise St. Marys nehrine ait bileşenler ile oluşturulmuş 8 adet detay bileşenine ait RH ve TMH değerleri görülmektedir. Bu değerler Arkansas nehrinde oluşanların aksine düşük ölçeklerde düşüktür. Daha yüksek ölçeklerde ise bazen düşük bazen de yüksek değerler bulunmuştur.

4.4 Akım serilerinin modellenmesi

Akarsu akım serilerinde gerek arazi şartları gerekse ölçüm araçlarında olan problemlerden kaynaklanan ölçüm eksikleri oluşmaktadır. Bunların tahmini ve tamamlanmasında en sık kullanılır yöntem zaman serisi modelleridir. Zaman serisi modelleri yalnızca veri tamamlamada kullanılmaz; ileriye yönelik tahminlerde ve sentetik seri türetilmesinde de zaman serileri modelleri kullanılır. Modellerin tahmin gücünde elde edilebilecek bir iyileşme ekonomik açıdan büyük kazanımlar sağlayabilir.

Çalışmanın bu kısmında akım serileri modellerinin tahmin gücünü arttırmak için dalgacık dönüşümü tekniği kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü sentetik zaman serileri üretilmesinde daha önceden kullanılmıştır (Beyazıt ve Aksoy, 2001; Küçük ve diğ., 2004d). Ayrık dalgacık dönüşümü ile bileşenlerine ayrılan serinin bileşenlerinde değişiklikler yapılarak yeniden elde edilebilmesi bir çok alanda da yararlı uygulamalara imkan tanır (Küçük ve diğ., 2004a). Bu çalışmada ise akım serileri dalgacık dönüşümü kullanılarak bileşenlere ayrılmış ve bu bileşenler değişik kombinasyonlarda toplanarak yeni seriler elde edilmiştir.

Akım serileri modellenmeden öncede dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak analizler yapılmıştır. Akım serileri öncelikle Fourier ve kısa süreli Fourier spektrumları ile incelenmiştir. Bu dönüşümlerin akım serilerinin incelenmesinde kullanılması ile yararlı bilgiler elde edilebilmiştir (Küçük ve Ağıralioğlu, 2003).

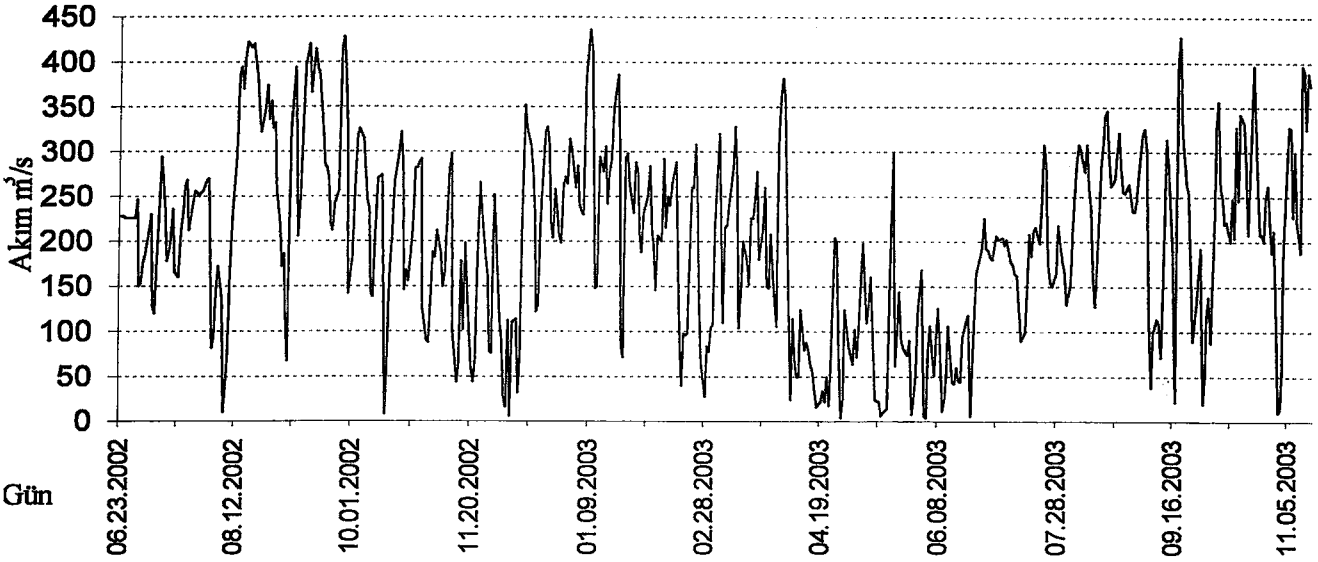
Akım serilerinin kararsız yapısı gereğince içindeki kararsız bileşenlerin açığa çıkarılabilmesi için sürekli dalgacık dönüşümü tekniği kullanılmıştır (Küçük ve diğ., 2004c). Sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla incelenen serinin kararsız karakteri ortaya konulmuştur. Sürekli dalgacık dönüşümünün yanında global dalgacık spektrumu hesaplanarak ölçüm verilerinin içindeki hakim periyotlu bileşenlerin daha iyi görülmesi sağlanmıştır. Son olarak akım serisi ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak bileşenlere ayrılmıştır. Ayrılan bileşenler farklı kombinasyonlar ile tekrar birleştirilerek yeni zaman serileri elde edilmiştir. Böylece ölçüm serisinden bazı ölçekteki bileşenler dışlanmıştır. Ölçüm serisi için uygun bir otoregresif model türü seçilmiş ve yeni elde edilen değişik kombinasyonlardaki bu zaman serileri, seçilen model kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak dalgacık dönüşümü kullanılması ile elde edilen bileşenlerden bölge iklimsel karakterine uyum gösteren bileşenlerin kullanılması ile diğer modellere göre daha az hata üreten modellerin oluşturulması sağanmıştır. Bu sayede ilk defa su kaynakları sahasında dalgacık dönüşümü kullanılarak akım serileri modellenmiştir.

Uygulama için Johns nehrinin Buffalo ölçüm istasyonunda ölçülen günlük akım verileri kullanılmıştır. Bu istasyon 29°35'46" enlem, 81°41'00" boylamında bulunmaktadır. Bulunduğu bölge Amerika Birleşik Devletlerindeki Florida eyaletidir. İstasyon CSX ulaşım köprüsünden yaklaşık 150 m yukarıda, Cross-Florida kanalından 3,84 km aşağıda ve nehir ağzından 142 km yukarıda yer almaktadır. İstasyonun yerini gösterir harita Şekil.4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Ölçüm istasyonunun coğrafi konumu

23 Haziran 2002 ve 16 Kasım 2003 tarihleri arsındaki 512 günlük akım serisi modelleme için kullanılmıştır. Serisinin ortalama debisi 201,4 m^3/s, çarpıklık katsayısı 0,0035 standart sapması 103,4 m^3/s dır. En düşük akım 3,17 m^3/s, en yüksek akım 432,91 m^3/s dir. Ölçümlere ait zaman serisi Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

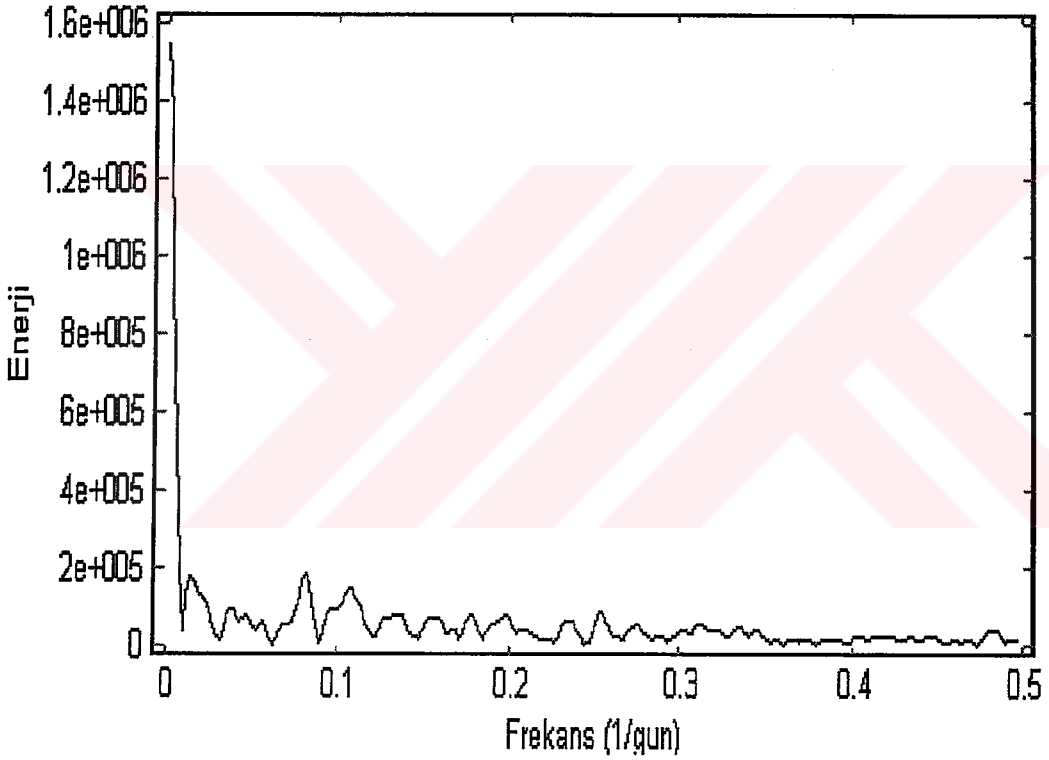


Şekil 4.15 Ölçüm serisi

4.4.1 Akım serisinin Fourier ve Kısa süreli Fourier ile analizi

Akım serisi modellenmeden önce, seri içerisindeki bileşenler hakkında bilgi sahibi olmak önem arz eder. Bu sayede çalışmada kullanılan tekniğin daha verimli kullanılabilmesi ve modellerin fiziksel anlam içermesi sağlanmıştır.

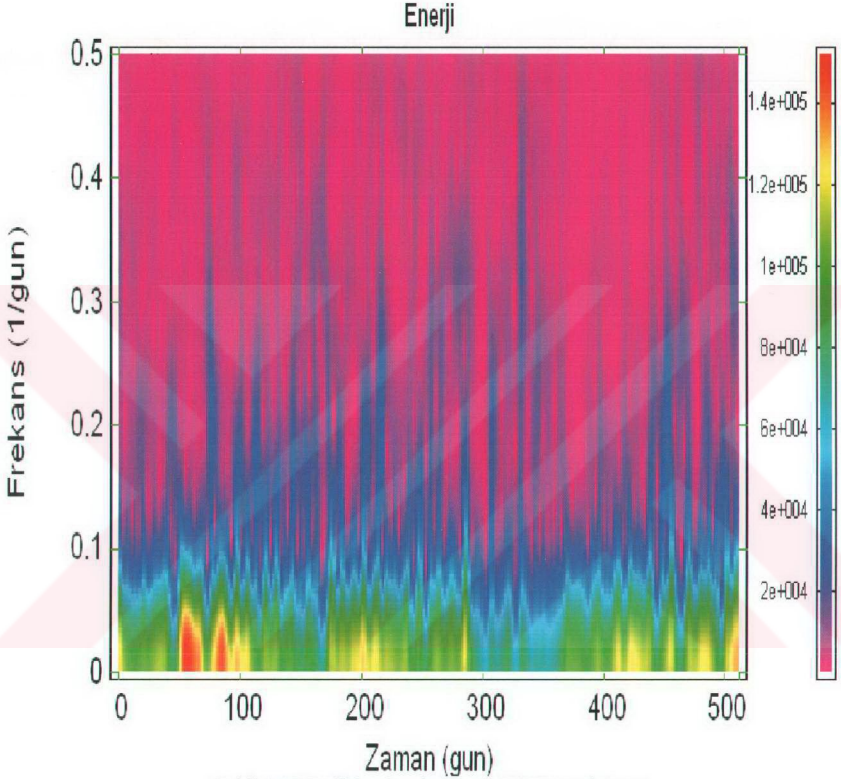
Zaman serisi içerisinde ki periyodik yapıların tespitinde en eski ve sık kullanılır yöntemlerden birisi serinin Fourier güç spektrumunun incelenmesidir. Fourier spektrumu ve hesaplama sırasında kullanılan bağıntılar Bölüm 3'de detaylı olarak verilmiştir. Şekil 4.16'da Buffalo nehrine ait zaman serisi için hesaplanmış Fourier güç spektrumu görülmektedir.



Şekil 4.16 Buffalo akımlarına ait Fourier güç spektrumu

Şekil 4.16'dan görüleceği üzere ölçüm serisinde hakim bir frekans bileşeni görülememektedir. En baskın bileşenler 0'a yakın 0,014, 0,037, 0,082 ve 0,12 frekans değerlerinde veya sırası ile 71 gün, 27 gün, 12 gün ve 8 günlük periyotlarda görülmektedir.

Fourier spektrumu işaretin geneli için bir spektrum verdiğinden zaman içerisinde bileşenlerin değişimi hakkında bir bilgi elde edilememektedir. Bu nedenle akım serisine ait ölçüm değerlerinin kısa süreli Fouirer (KSFD) spektrumu hesaplanarak da incelenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Buffalo akımlarına ait KSFD spektrumu

Şekil 4.17'de yatay eksen zamanı gün olarak göstermektedir. Düşey eksen ise Frekansı gösterir. Şekildeki renkli kısımlar enerji büyüklüğünün zamanla değişimini göstermektedir. Enerji değerlerinin renk cinsinden ölçeklendirilmiş bir cetveli şeklin yanında verilmiştir. Ölçüm serisini gösteren Şekil 4.15 dikkate alındığında, ölçüm serisinde Kasım-Nisan sonu aralığında akım koşullarında belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum Haziran-Kasım aralığında da tekrar eder bir durumdadır. En kurak aralık ise Nisan-Haziran sonu olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.17 dikkate

alındığında yatay eksende 40-170. ve 170-290. günler arasında iki ayrı periyot halindeki yeşil renkli bölgelerde enerjide artışı görülmektedir. Bölgelerin karşı geldiği frekans değerleri 0 ila 0,08 arasındaki bir frekans aralığındadır. Bu da yaklaşık 256 ila 12 gün arasındaki periyoda karşı gelen olayların veya bileşenlerin yeşil renkle gözüken iki ayrı zaman diliminde bulunduğunu ifade eder. Şekil 4.17'de hesap edilen bir başka bölge ise 0,05 - 0,035 frekans değerleri yani 20-28 günlük periyotla ile 0 frekans değeri yani 256 günlük periyot arasında kırmızı renkte gözüken kısımlardır. Bu kısımlar Şekil 4.17'de ki 40-110, 190-210 ve 410-512. günler arasındaki 3 adet kırmızı renkli bölge halinde görülmektedir. Bu kısımda enerjinin değeri cetvelde en yüksek seviye olan $1,2x10^5$ ve üzeri değerdedir. Yeşil ve kırmızı bölgelerin iç içe geçmiş durumu nedeniyle, olaylar ancak zaman ekseninde ne zaman başlayıp ne zaman bittiği tepit edilerek incelenebilir. En dışdaki mavi bölgenin başlangıc frekans değeri ise 0,12 civarındadır fakat bu kısımda zaman içerinde farklılıklar göstererek bazen 0,05 frekans değeri yada 20 günlük periyot değerine kadar çıkmıştır. KSFD spektrumu Fourier spektrum ile uyum göstermesinin yanında, özellikle frekans değerlerinin zamana bağlı değişimini içeren çok daha fazla bilgi sağlar.

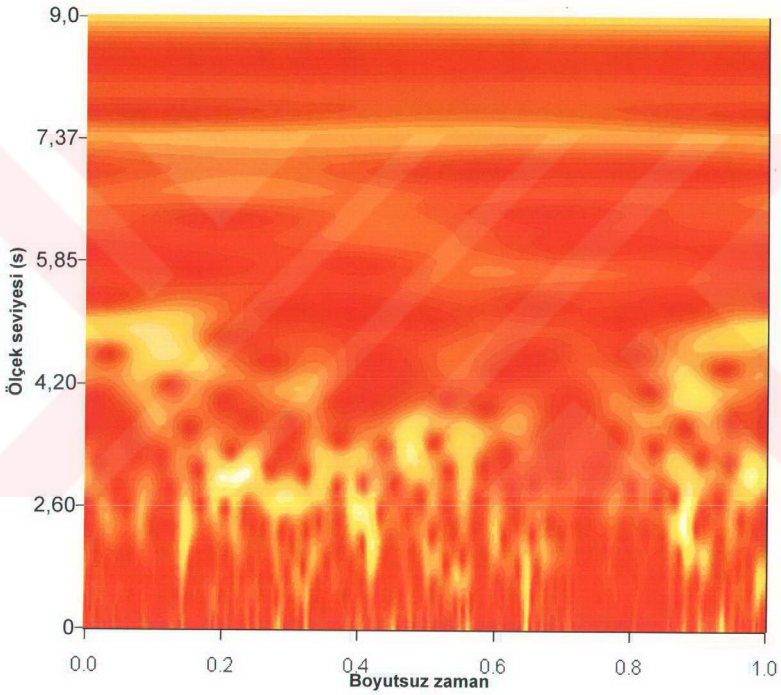
Kısa süreli Fouirer spektrumunda görülen enerjinin yoğun olduğu bölgeler, kullanılan pencere genişliği ile çok yakından ilgilidir. Pencere genişliğinin küçük seçilmesi yüksek frekanslı olayların incelenmesine imkan tanırken zaman ekseninde değişimin başlangıç ve bitişleri daha iyi tespit edilebilmektedir. Fakat bu durumda da düşük frekanslı temel bileşenlerin incelenmesi güçleşmektedir. Temel bileşenlerin incelenmesi için pencere genişliği arttırılmalıdır. Bu da zamandaki çözünürlüğü azalttığından yüksek frekanslı bileşenler düşük frekanslı bileşenler içerisinden elde edilememektedir.

4.4.2 Akım serisinin sürekli dalgacık dönüşümü ve global spektrumla analizi

Bölgenin iklim karakteristiği gereğince zaman serisinde değişik ölçek veya periyottaki olayların bulunması ve bunların ve farklı zaman dilimlerinde oluşması modellemede bir çok zorlukları da beraberinde getirmektedir. Kararsız yapının çok daha iyi incelenmesi ve önemli bileşenlerin seçilmesi için akım serisinin sürekli dalgacık dönüşümü veya yersel dalgacık spektrumu ve global dalgacık spektrumu

hesaplanmıştır. Bu sayede modellemede etkin bileşenlerin seçimi daha ayrıntılı yapılabilmiştir.

Ölçüm serisine sürekli dalgacık dönüşümü uygulanması ile içindeki olayların değişimlerinin zamana bağlı olarak incelenmesi mümkün olmuştur. Zaman serisine ait sürekli dalgacık dönüşümü ortogonal olmayan karmaşık Morlet dalgacığı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen zaman-ölçek-genlik uzayındaki görüntü, yarı logaritmik olarak Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.18 Zaman serisine ait sürekli dalgacık dönüşümü

Şekil 4.18'de yatay eksen zamanı göstermektedir. Zaman ekseni burada en yüksek değeri ile boyutsuzlaştırıldığından 0 ila 1 arasında gösterilmektedir. Düşey eksen ise periyod veya ölçek değerini logaritmik olarak göstermektedir. Bu eksende okunan

değerler sürekli dalgacık dönüşümü görüntüsü içerisinde var olan bir değişime ait periyodu da ifade etmektedir.

Ölçek, yani düşey eksene ait bir dönüşüm tablosu Tablo 4.5'de verilmiştir. Bu tablo yardımıyla düşey eksendeki ölçek değerlerinin gün olarak hangi periyoda karşı geldiği okunabilir. Tabloda 4.5'de *s* ölçek seviyesini ifade etmektedir, *n* ölçüm serisine ait bir olayın gözlemlendiği periyot değeridir. Konu ile ilgili geniş açıklama ve kullanılan bağıntılar Bölüm 3'te verilmiştir. Burada dönüşümüm sürekli yani tüm ölçek seviyelerinde yapılmış olmasına karşın modelleme sırasında 2 ve 2'nin katı değerlerdeki bileşenleri hesap eden ayrık dalgacık dönüşümü ile uyum sağlaması açısından değerler 2'lik (dyadic) ölçekte ve logaritmik olarak verilmiştir.

Tablo 4.5 SDD görüntüsünün düşey eksenine ait ölçek ve aldığı periyot değerleri

Ölçek seviyesi (s)	Periyot karşılığı $n=2^s$ (gün)
9	512
8.14	282.78
7.36	165.25
6.66	101.64
6.03	65.47
5.45	43.98
4.93	30.68
4.46	22.15
4.04	16.49
3.65	12.63
3.31	9.92

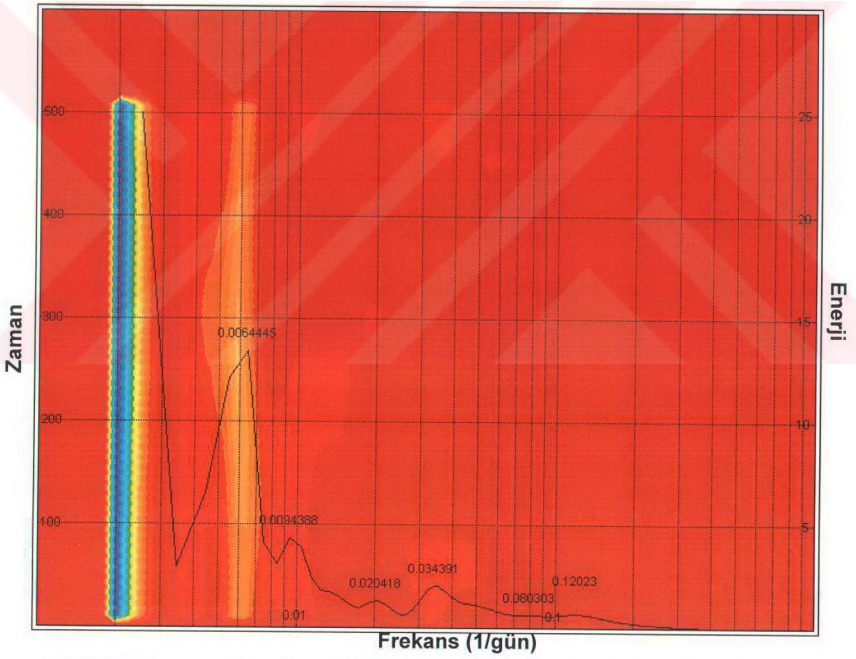
Şekil 4.18'den çıkarılan sonuçları tabloya bakarak yorumlayacak olursak; şekil'deki parlak kısımlar zaman serisi ile çarpım işlemine giren dalgacık fonksiyonunun o ölçek seviyesindeki periyoda sahip bir olayla yüksek bir korelasyon ilişkisine sahip olduğunu ifade eder. Bu sayede istenilen bir dönüş aralığına sahip olayın ölçüm boyunca hangi zamanlarda açığa çıktığı görülebilmektedir. Şekilde birden çok bölgede enerjinin yüksek olması bölgenin iklim karakteri üzerinde değişik periyotlu olayların etkili olduğunu göstermektedir. Bu ölçüm serisinde Kasım-Nisan sonu aralığında akım koşullarında belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum Haziran-Kasım aralığında da tekrar eder bir durumdadır. En kurak aralık ise Nisan-Haziran sonu olarak görülmektedir. Bu kayıt serisi dikkate alındığında 150 günlük dönüş aralığına sahip bir periyotta, normal koşulların üzerinde bir akım artışı söz konusudur. Bu durum Şekil 4.16'daki dönüşümün düşey ekseninde 7,36 ölçek değerine karşı gelen ve tüm ölçüm periyodu boyunca uzanan yüksek enerjili kısma

karşı gelmektedir. Tablo 4.5'de 7,36 ölçek seviyesinin 165 günlük periyoda karşı geldiği hesaplanmıştır.

Bölgenin iklimsel yapısının incelendiği Saco ve Kumar'ın (2000) yaptığı çalışmada; incelenen bölgede siklonik hareketlerden dolayı geniş bir alan üzerinde yağışların ortaya çıkması ile büyük miktarda akış ve yer altı depolamasının oluştuğu belirtilmektedir. Bu bölgenin bir ilginç özelliği ABD'de bulunan en geniş akiferlere sahip olmasıdır. Bu geniş depolama kapasitesi sayesinde yağışlardan sonra da yüksek miktarda taban akımını devam ettirebilmektedir. Yaz sonundan güz başlangıcına kadar Atlantik kıyılarından ve Meksika körfezinden gelen sıcak ve nemli rüzgarlarla oluşan fırtınalar yer yer yağışlara sebebiyet verir. Yine bu bölgede Haziran-Kasım döneminde özellikle kıyı bölgelerinde etkili olan tropik rüzgarlar şiddetli yağışlara neden olur. Fakat bu durum küçük ölçeklerde veya periyotlarda oluştuğundan ve düzensiz bir karakter sergilediğinden global spektrumlarda toplam enerjiye katkısı küçük olur. Kış aylarında taban akımında dereceli meydana gelen bir artışla hidrografta süreklilik gösteren bir yüksek akımı bölgesi oluşur. Taban akımındaki kademeli artış kış buyunca ve baharın başlangıcına kadar devam etmektedir. Bu durum 6 aylık bir periyottaki değişimle karakterize edilebilir. Ayrıca bu ölçek seviyesi içinde de onunla uyumlu bir şekilde 1-3 aylık periyodik iklimsel olaylar görülmektedir. Daha düşük ölçekli değişimlerin farklı periyotlarda ve zamanlarda görülmesi farklı zaman aralıklarında havzada birbirinden farklı periyotta olayların olduğunu gösterir. 45-60 günlük ölçeklerdeki bazı olaylar farklı zamanlarda görülmektedir. Bu iklimsel olaylar, akım serisinin geçici davranışlarını karakterize eder. Bu iklimsel olayların havzanın yağış ve hava sıcaklığına bağlı olarak faklı zamanlarda görülmeleri mümkündür. Bu konuyla ilgili bir çok iklimsel değişkenin bir arada incelenmesi yararlı olur (Küçük ve diğ., 2004b)

Şekil 4.18'den elde edilecek diğer önemli bir bilgi de düşey eksende, 4,93 ölçek seviyesi ve altında, yüksek parlaklıktaki yani yüksek enerjiye sahip kısımların yoğun bulunmasıdır. Bu durum bize ölçüm serisinde 30 gün ve altındaki değişime sahip iklimsel olayların da etkin olduğunu ifade eder. Şekil 4.18'de elde edilen bilgiler global dalgacık dönüşümü yardımıyla daha da kolay anlaşılabilir. Bu nedenle Şekil 4.18 için ayrıca global dalgacık dönüşümü hesaplanmış ve sonuçları Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bu sayede ele alınan günlük akım serisinde hangi ölçek seviyesindeki bileşenlerin daha etkili olduğu daha detaylı incelenmiştir.

Global dalgacık spektrumu Şekil 4.18'de verilen sürekli dalgacık dönüşümü şeklinin varyans veya enerji değerlerinin bütün ölçekler için zaman ekseni boyunca düşey eksen üzerinde toplanmasını ifade eder. Şekil 4.19'da global dalgacık dönüşümü önceden hesaplanan ve Şekil 4.17'de gösterilen spektrumunun (yersel dalgacık spektrumu) üzerinde siyah çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 4.19'da, Şekil 4.18'de bulunan sürekli dalgacık dönüşümü şeklinin global spektruma uyum göstermesi için sol tarafa doğru çevrilmiş ve yatay ekseninde ölçek değerleri yerine frekans değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.19'daki düşey eksenlerden sol taraftaki eksen, şekil sola çevrildiğinden dolayı yataydan düşeye geçen zaman eksenidir. Sağ tarardaki ikinci düşey eksen de siyah çizgi ile çizilen global spektrumunun toplam enerjisini ifade eder. Siyah çizgi ile çizilen global spektrumun pik değerlerine karşı gelen frekans değerleri çizimin üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.19 Zaman serisine ait sürekli dalgacık spektrumu ve üzerine çizilmiş global spektrum

Şekil 4.19'da global spektrumda 0,0064, 0,0094, 0,020, 0,034 ve 0,120 frekanslarında pikler görülmektedir. Bu frekans değerleri sırası ile 156, 106, 50, 29

ve 8 günlük periyotlara karşı gelir. Yukarıda açıklandığı üzere bölgenin iklimsel karakteri üzerinde etkili olan değişik periyotlardaki bileşenler global spektrumda kendisini daha açık bir şekilde göstermiştir. Global spektrum tüm zaman boyunca enerjideki fazlalığın bi ortalamasını da ifade ettiğinden Fourier spektrumuna benzerlik gösterir. Spektrumda enerjinin en fazla olduğu frekans değeri 0,0064 frekans değeri veya 156 günlük periyoda karşı gelen değerdir. Modelleme sırasında elde edilen bileşenlerden hangilerinin modellemede nasıl bir etkiye sahip olacağı modelleme çalışmaları ile incelenmiştir.

4.4.3 Akım serisi için uygun model seçimi

Modelleme çalışmalarına geçmeden önce ölçüm serisine uygun bir model seçilmelidir. Otoregresif model seçilirken farklı modeller denenmiş ve Akaike kriterine (Akaike Information Criterion, AIC) bakılarak model seçilmiştir. Tablo 4.6'da hem ölçüm serisinin hem de boyutsuzlaştırılmış haline ait oluşturulan modeller ve aldıkları AIC değerleri görülmektedir.

Tablo 4.6 Model türleri ve AIC değerleri

MODEL TÜRÜ	AIC	AIC Standart
ARMA(1, 0)	9345	949
ARMA(2, 0)	9323	929
ARMA(0, 1)	9492	1095
ARMA(0, 2)	9368	976
ARMA(1, 1)	9314	920
ARMA(2, 1)	9317	923
ARMA(1, 2)	9317	923
ARMA(3, 0)	9312	919

Yapılan hesaplamalar sonucunda, modelleme işlemlerindeki basitliği göz önünde tutularak ARMA(2, 0) modeli kullanılmıştır.

4.4.4 Akım serisi modellemeleri ve sonuçları

Ele alınan Şekil 4.15'de ki günlük akım serisi Daubechies 8 ortonormal dalgacık fonksiyonu kullanılarak bileşenlerine ayrılmıştır. Ortonormal tabanlı fonksiyonların özelliği orijinal işarete geri dönülebilmesini (sıkıştırma tekniklerinde) sağlamasıdır.

Daubechies'nin önerdiği dalgacık fonksiyonları ayrık dalgacık dönüşümlerini pratik hale getirmiştir. Bileşenlerine ayrılan ölçüm serisi çok çözünürlüklü analiz sayesinde üst üste toplanarak yeniden elde edilebilmektedir. Dolayısıyla tüm detay bileşenlerinin ve yaklaşıklık bileşeninin toplanması ölçüm serisini verir.

Ölçüm serisinin uzunluğu 512 gün olduğundan dönüşümde 7 adet detay bileşeni ve 1 adet yaklaşıklık bileşeni ortonormal Daubechies 8 dalgacığı kullanılarak ÇÇA ile hesaplanmıştır. Elde edilen bileşenler, ARMA (2, 0) modeli kullanılarak, akım serisini modelleme için değişik kombinasyonlarda tekrar toplanmış ve toplam 28 kombinasyon ARMA (2, 0) modeli kullanılarak modellenmiştir. Model kombinasyonları, kombinasyonların toplam enerjileri (ΣE_m) ve değişik hata kriterlerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tabloda enerji seviyelerine göre modellerin büyükten küçüğe doğru sıraları görülmektedir. Enerjisi en yüksek olan ölçüm serisinin kendisi olduğundan en üst sırada verilmiştir. Detay bileşenlerinde ise en yüksek enerjiye sahip bileşenler ayrık dalgacık dönüşümünün $m=2$ seviyesindeki bileşeni olan AD2 ve AD7'dir. Bunları sırası ile AD3, AD4, AD5 ve AD6 izlemektedir. Tabloda kullanılan üç hata kriterinden OKH'ya göre 6 adet, TMH'ya göre 6 adet ve RH'ya göre 5 adet model Model 0'dan daha az hata üretmiştir. Model 0'dan daha az hata üreten modellerde hata oranında oransal olarak en fazla % 32, en az % 7 azalma sağlanmıştır.

Modelleri karesel hata (OKH) değerlerine göre incelediğimizde oluşturulan 5 kombinasyonun, ölçüm serisi modelinden daha az enerjiye sahip olmasına rağmen daha az hata ürettiği görülmektedir. En az hata ölçüm serisinden AD1 ve AD2 bileşenlerinin çıkarılması ile elde edilmiştir.

Model 10 olarak gösterilen kombinasyonda (AD3+AD4+AD5+AD6+AD7 +YAKLAŞIKLIK) enerjide % 5'lik bir azalma olmasına karşın hata değerinde % 31 bir azalma meydana gelmiştir. Bu bir çok modelde kayda değer ve büyük bir iyileşme anlamına gelir.

Aynı modelden AD6 bileşeni çıkarılarak yerine AD2 bileşeni eklenildiğinde elde edilen Model 2'de OKH'da %10'luk bir artış meydana gelir buna karşın toplam enerjide % 2 civarında bir artış oluşmuştur. AD2'nin ilavesi diğer tüm hata kriterleri sonuçlarında da artış meydana getirmiştir.

Tablo 4.7 Akım serisi modellerinin enerjileri ve hata değerleri

Model Numarası	Enerji toplamları ($\Sigma E_m, 10^{10}$)	Model kombinasyonları	OKH (10^6)	RH	TMH
Model 0	3,27	ÖLÇÜM SERİ	4,88	0,65	1659
Model 1	3,25	AD1+AD2+AD3+AD4+AD5+AD7+YAKLAŞIKLIK	5,08	0,68	1733
Model 2	3,20	AD2+AD3+AD4+AD5+AD7+YAKLAŞIKLIK	3,74	0,59	1441
Model 3	3,20	AD1+AD2+AD3+AD4+AD7+YAKLAŞIKLIK	5,86	0,77	1903
Model 4	3,18	AD2+AD3+AD4+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	4,09	0,63	1556
Model 5	3,17	AD1+AD3+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	6,59	0,83	2044
Model 6	3,16	AD2+AD3+AD4+AD7+YAKLAŞIKLIK	4,56	0,67	1651
Model 7	3,16	AD1 +AD2 +AD3+AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	6,71	0,94	2109
Model 8	3,13	AD2+AD3+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	5,11	0,68	1741
Model 9	3,12	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	5,40	0,82	1835
Model 10	3,11	AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	3,35	0,54	1379
Model 11	3,09	AD2 +AD3 +AD4 +AD5+YAKLAŞIKLIK	5,86	0,85	1939
Model 12	3,08	AD3+AD4+AD5+AD7+YAKLAŞIKLIK	3,84	0,58	1504
Model 13	3,06	AD3+AD4+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	4,21	0,62	1616
Model 14	3,06	AD2+AD3+AD7+YAKLAŞIKLIK	6,38	0,80	1967
Model 15	3,04	AD2+AD3+AD4+YAKLAŞIKLIK	6,66	0,93	2087
Model 16	3,00	AD4+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	5,30	0,75	1771
Model 17	2,99	AD3+AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	5,59	0,85	1868
Model 18	2,99	AD2+AD3+AD5+YAKLAŞIKLIK	7,66	0,99	2232
Model 19	2,94	AD2+AD3+YAKLAŞIKLIK	8,43	1,07	2359
Model 20	2,90	AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	6,71	0,94	2109
Model 21	2,89	AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	7,56	1,05	2172
Model 22	2,83	AD2+YAKLAŞIKLIK	10,36	1,27	2620
Model 23	2,83	AD7+YAKLAŞIKLIK	8,54	1,00	2320
Model 24	2,82	AD3+YAKLAŞIKLIK	8,91	1,10	2429
Model 25	2,81	AD4+YAKLAŞIKLIK	8,93	1,17	2436
Model 26	2,76	AD5+YAKLAŞIKLIK	9,95	1,21	2570
Model 27	2,75	AD1+YAKLAŞIKLIK	11,45	1,38	2795
Model 28	2,74	AD6+YAKLAŞIKLIK	10,34	1,26	2653

Model 2'ye AD6'nın ilave edilip AD5'in çıkarılması ile elde edilen Model 4'de hata değerlerinde artış görülmüştür. Bu durum modelin AD6 bileşeninden çok AD5 bileşeninden etkilendiğini ve eklendiğinde hatalarda iyileşme olduğunu gösterir. Bu durumu Model 12 ve 13'u karşılaştırarak da elde etmek mümkündür. Model 12'de AD5 yerine alınan AD6 bileşeni OKH değerinde yaklaşık % 10'luk bir artış meydana getirmiştir. Enerjide ise % 1'in altında bir azalma söz konusudur.

Model 6'da AD1, AD5 ve AD6 bileşenleri çıkarılarak elde edilen kombinasyonda toplam enerjide % 3 civarında bir azalışa karşın Model 0'a göre % 10'a yakın bir iyileşme elde edilmiştir. Model 6 için elde edilen OKH, TMH ve RH değerlerinde farklı oranlarda değişimler elde edilmiştir. OKH'da hata değeri ölçüm serisinde $4{,}88 \times 10^{6}$ olurken, Model 6'da $4{,}56 \times 10^{6}$ olmuştur. RH'da ise bir miktar azalma söz konusudur. Ölçüm serisinde 0,65 olan değer Model 6'da 0,67'ye çıkmıştır. TMH'da çok az bir azalma olmuştur.

Ölçüm serisi modelinden (Model 0) daha az hata üreten modellerin hepsinde AD7 bileşeninin bulunduğu göze çarpmaktadır. AD7'nin etkisini incelemek için en düşük hata değerini veren Model 10'dan AD7 bileşeni çıkarılarak elde edilen Model 17'ye bakıldığında hata değerinde % 40 civarında bir artış olduğu görülmüştür. Rölatif hatada bu değer % 30 civarında oluşmuştur. Enerjideki azalma ise yaklaşık % 3'tür. Model 10'dan çıkarılan AD7 bileşeni yerine AD2 bileşeni ilave edilerek elde edilen Model 9'da hata oranı olarak % 30'luk bir artış meydana gelmiştir. Model 2 kombinasyonundan AD7 bileşeninin çıkarılarak AD6 bileşeninin ilave edilmesi ile oluşan Model 9 kombinasyonunda Model 17'ye nispeten daha az bir hata artışı söz konusu olsa da OKH'da % 30 civarında bir artış meydana gelmiştir. Model 9-17 arasındaki ilişki ile Model 10-2 arasındaki ilişki AD6 ve AD7 bileşenlerinin modellemeye katkısını ifade eder. AD7 bileşeni ile ilgili Model 6-15, Model 2-11, Model 16-21, Model 14-19, Model 14-15 ve Model 14-18 arasındaki hata değerlerindeki değişim dikkate alındığında model üzerindeki bu iki bileşenin etkisi görülebilir. Global dalgacık spektrumunda 155 güne karşı gelen ölçek seviyesinde enerjinin yüksek olduğu ve AD7 bileşeninin bulunduğu 0,0078 frekans değerinde de enerjinin yüksek olduğu görülebilmektedir. AD6 bileşeninin ise global spektrumda karşı geldiği 0,0155 frekans değerinde enerjinin AD7'ye göre çok düşük olduğu fakat AD2'ye göre de yüksek olduğu görülmektedir.

AD4 bileşeninin etkisi de model üzerinde genelde hatayı azaltıcı yöndedir. Model 15'deki kombinasyonda AD4 bileşeni yerine modele alınan AD5 bileşeni ile oluşturulan Model 18 hatayı % 15 civarında arttırmaktadır.

Model 8 ve Model 5 kombinasyonları incelendiğinde AD2 bileşeni yerine alınan AD1 bileşeninin de modellemeye olumsuz yönde etkidiği görülmektedir.

Model 3 ve Model 5 incelendiğinde, AD5 ve AD6 yerine kombinasyona giren AD2 ve AD4 bileşenlerinin hata oranını azalttığı görülmüştür. AD 3 bileşeninin bulunduğu Model 10'dan bu bileşenin çıkarılması sonucunda enerjide oluşan % 3'lük bir artışa karşılık hata oranında Model 10'dakinden % 35 civarında fazlalık göstermektedir.

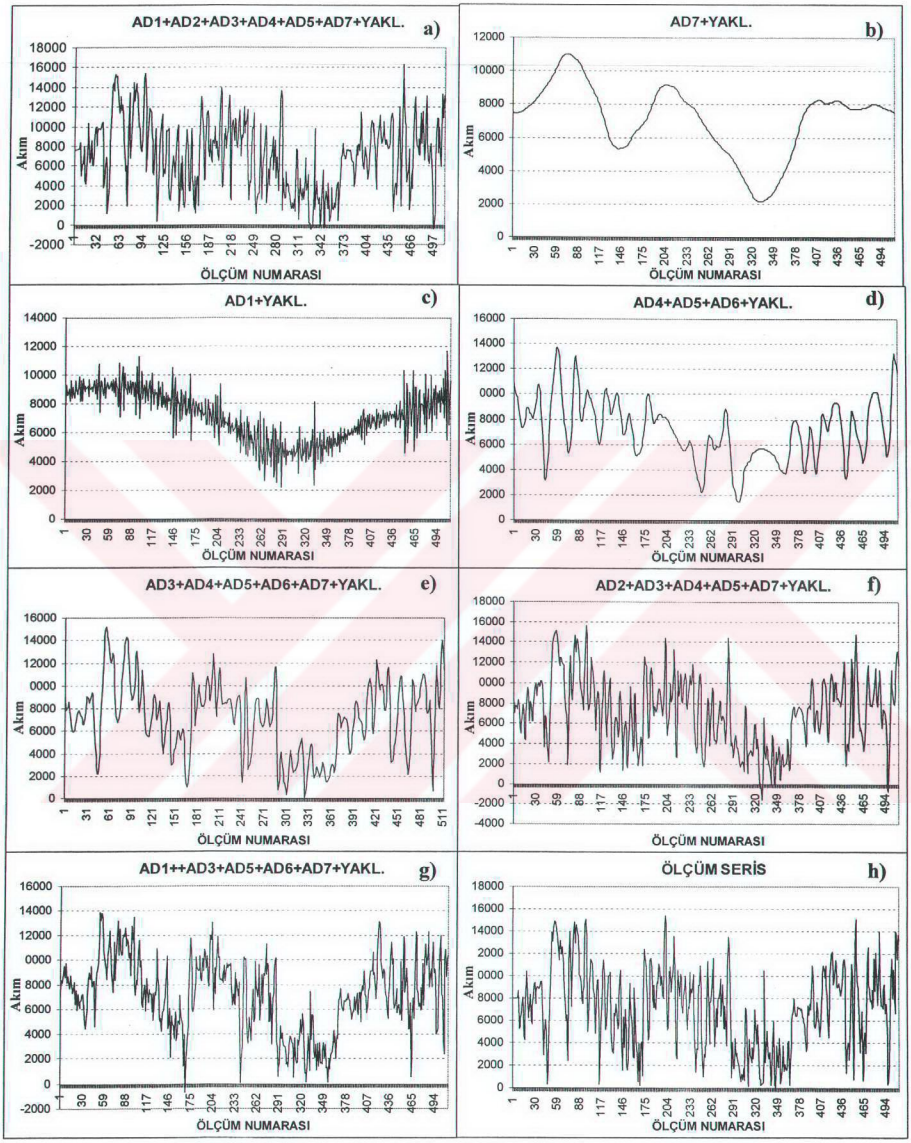
Tablodan çıkacak bir başka önemli sonuç Model 7 ve Model 1 incelendiğinde görülebilmektedir. Model 1 deki, Model 0'a göre sadece AD6 bileşeninin olmadığı kombinasyon, çok az bir yüzdeyle Model 0'dan daha fazla hata üretmiştir. Model 7'de ise ölçüm serisine göre kombinasyonda sadece AD7 bileşeni yoktur. Hata oranları incelendiğinde hatadaki artış Model 1'in çok üzerinde görülmektedir.

Tablodan AD7, AD3 ve AD4 bileşeninin model üzerinde hatayı azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür. AD5 bileşeni AD6 bileşenine göre hatayı daha fazla azaltırken AD6 bileşeni AD2 bileşenine göre daha az hata oluşturmaktadır. En fazla hata artışı ise AD1 bileşeninin ilavesi ile ortaya çıkmıştır. Bu durum Tablo 4.7'de ki Model 23, 24, 25, 26, 28, 22 ve 27'den de hesaplanarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.19'da görülen sürekli dalgacık dönüşümü şeklinde elde edilen ölçek seviyeleri ve global dalgacık spektrumundaki pik değerler ile uyuşum göstermektedir.

Detay bileşenlerinden AD2 bileşeninin en yüksek enerji değeri almasına karşın global spektrumda AD2 bileşenine karşı gelen 2^2=4 günlük periyotta enerji düşüktür. Global spektrumda ve sürekli dönüşümde 8 gün ve daha az periyoda sahip bileşenlerin enerjileri genelde düşük çıkmıştır. Bu durum ayrık dönüşümde çok net elde edilememektedir. Ayrık dönüşümde AD2 bileşeninin yüksek enerjiye sahip olması ölçek değerinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Eğer ölçek değeri bir aralık üzerinde ortalanmış bir değer olsaydı bu bileşende de enerjinin global spektrumdaki gibi düşük çıkması beklenirdi. Burada belirtilmesi gereken bir önemli husus da bölgenin iklimsel karakteristiğinin gereği farklı ölçeklerde, farklı enerji seviyeleri görülmektedir. Bu nedenle ancak sürekli dönüşüm yardımıyla ve global

spektruma bakılarak enerjinin tam olarak nasıl değiştiğine karar verilebilir. Ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenler kendi ölçek seviyelerini temsil ettiklerinden belirli ölçek aralıklarındaki değişimi tam yansıtamayabilirler. Fakat genelde ikinin katı şeklinde elde edilen ölçekler, global spektruma yakın bir gidişat gösterir. Çok çözünürlüklü analizde filtreleme işlemi yardımıyla 2'nin katı şeklinde ölçeklere ayrışan bileşenler ara ölçeklerin değişimi hakkında bir bilgi vermez. Yukarıda sürekli dalgacık dönüşümü ve global dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bilgilerden yararlanarak ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerden hangilerinin önemli olduğu kestirilebilir. Mesela AD2 bileşenin aldığı enerji değeri ayrık dönüşümde sonucunda yüksek çıkarken, global spektrumda düşük çıkmaktadır. Modelleme sırasında AD2'nin etkisi incelenirse Model 22'de yüksek hata değerleri oluştuğu tespit edilir.

Tablodaki 29 modele ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serilerinden 8 tanesi Şekil 4.20'de karşılaştırma amacı ile gösterilmiştir. Şekil 4.20-a'da ki kombinasyon Tablo 4.7'deki Model 1'e aittir. Model 1, AD6 bileşeni haricinde tüm bileşenleri içermektedir. Model 1, Şekil 4.20-h'da gösterilen ölçüm serisine büyük benzerlik göstermektedir. Tüm kombinasyonlar içerisinde en az hata veren model olan Model 10 Şekil 4.20-e'de gösterilmiştir. Şekil, ölçüm serisi ile karşılaştırıldığında temel bileşenlerin ve salınımların yerinde olduğu fakat AD1 ve AD2'nin kombinasyondan çıkarılması ile yüksek frekanslı veya düşük periyotlu yani hızla değişen ve bölgede geçici olarak meydana gelen olaylara ait bileşenlerin seride olmadığı görülmektedir. Şekil 4.20-g'deki kombinasyonda ölçüm serisinden AD2 ve AD4 bileşenlerinin çıkarılmış olmasından dolayı, düşük frekanslı olayların korunduğu halde bazı periyodik bileşenlerin olmadığı kolayca fark edilir. Bu bileşenlerin bölgenin karakterini yansıtması açısından önemli olduğundan Model 5'de hata oranları çok miktarda yükselmiştir. Hatta şekil olarak ölçüm serisinden çok uzak gibi gözüken Şekil 4.20-d'deki kombinasyonda yalnızca AD4, AD5 ve AD6 detay bileşenlerinin kullanılması ile oluşturulan model, Model 5'deki hata oranlarına oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. En düşük ve en yüksek frekansa sahip detay bileşenlerinin oluşturduğu kombinasyonlara ait zaman serileri sırası ile Şekil 4.20-b ve c'de gösterilmiştir. AD7'nin kullanıldığı zaman serisi AD1'in kullanıldığı zaman serisi modelinden daha az hata oluşturmuştur.



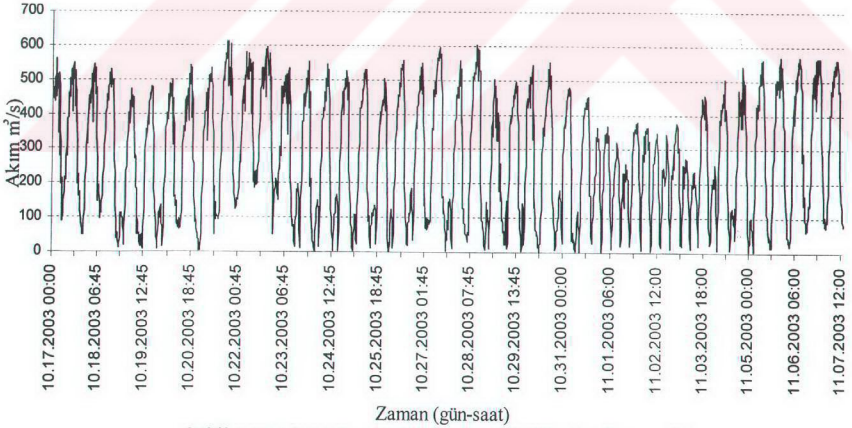
Şekil 4.20 Model 1, 23, 27, 21, 10, 2, 5 ve Model 0'a ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serileri

4.4.5 Kısa aralıklı ölçüme sahip akım serilerinin modellenmesi

Kısa aralıklı gerçek zamanlı ölçümler veya herhangi bir havzada oluşturulmuş gözlem ağından gelen bilgilerin değerlendirilmesi ve gerçek zamanlı modellemede kullanılması önem arz eder. Su seviyesindeki ani değişimler daha çok günlük ortalamalardan değil bu tür gerçek zamanlı ölçümlerden elde edilebilir. Bu ölçümlerdeki en temel periyot ise günlük salınımlardır.

Bu kısımda kısa aralıklı akım serilerinin modellenmesi dalgacık dönüşümü kullanılarak gerçekleştirildi. Analizler sırasında dalgacık dönüşümünün zaman-ölçek ortamında işareti ayrıntılı incelemesinden yararlanıldı. Uygulamada 15 dakika aralıklarla ölçülen 21 günlük akım serisi sürekli dalgacık dönüşümü ve global spektrum yardımıyla analiz edildi. Daubechies 8 ortonormal dalgacık fonksiyonu kullanılarak bileşenlerine ayrılan zaman serisi değişik kombinasyonlarda tekrar toplanarak yeni zaman serileri elde edildi ve bu seriler modellemede kullanıldı.

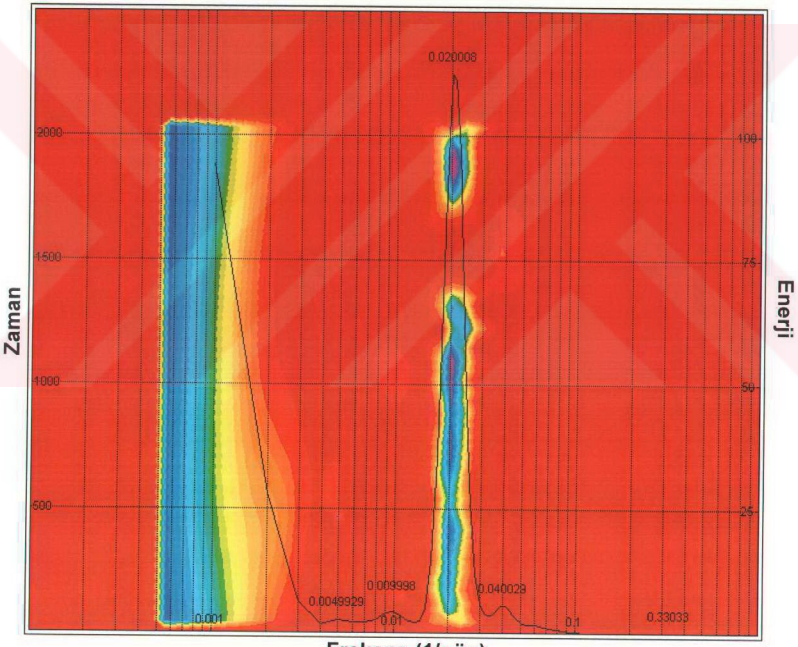
Kullanılan akım serisi bir önceki uygulamada kullanılan Johns nehrinin Buffalo ölçüm istasyonundan elde edilmiş 17 Ekim 2003 saat 00:00 ile 07 Ekim 2003 saat 09:00 arasında kaydedilmiş 2048 adet 15'er dakikalık akım serisidir. Seri Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.21 15 dakika arayla ölçülmüş 2048 adet akım serisi

Şekil 4.21 yakından incelendiğinde, yarım günlük bir periyotta aşağı yukarı kararlı bir gidişat göstermektedir. Bu akım serisinde ortaya çıkan 12 saatlik veya yarım günlük bileşen en temel olaydır. Bunun yanında bu seride olduğu gibi ani sapmalar

oluşabilir. Serideki gidişten en fazla uzaklaşma 31 Ekim ile 4 Kasım tarihleri arasında ani bir akım azalması şeklinde görülmektedir. Genelde bir yağış veya mevsimsel değişime rast gelen farklılıklar global spektrumda ani kırılmalardan çok tedrici değişmeler meydana getirebilir. Sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla bölgenin tüm hidrometeorolojik değişkenleri incelenip değişimler incelenebilir (Küçük ve diğ., 2004b). Bu tarihlerde ölçülmüş yağış verileri ve sıcaklık değerleri incelendiğinde ani bir değişim gözlenmemiştir. Fakat bu seride gözlemlenen değişim ani olarak ortaya çıkıp kaybolması çeşitli ihtimalleri düşündürür. Ölçüm cihazında olabilecek bir değişiklik veya bir su alınması durumu ve benzeri durumlar söz konusu ihtimaller içerisinde sayılabilir. Akım serisinin sürekli dalgacık dönüşümü spektrumu hesap edilip global spektrumu üzerine çizilirse Şekil 4. 22 elde edilir.



Şekil 4.22 Zaman serisine ait sürekli dalgacık spektrumu ve üzerine çizilmiş global spektrum

Şekil 4.22'deki yatay eksen frekans, sol taraftaki düşey eksen, zaman eksenidir. Sağ taraftaki ikinci düşey eksen de siyah çizgi ile çizilen global spektrumunun toplam

enerjisini ifade eder. Siyah çizgi ile çizilen global spektrumun pik değerlerine karşı gelen frekans değerleri çizimin üzerinde gösterilmiştir.

Sürekli dalgacık dönüşümü spektrumunda zaman ekseninin 1500 değerinin hemen öncesinde ve sonrasında meydana gelen sürekliliği bozucu yapı zaman serisinde yukarıda sözü edilen değişimi ifade eder. Bu kırılmanın karşı geldiği frekans değeri 0,04 veya 6 saatlik periyot değeridir.

Global spektrumda oluşan en önemli pik 0,02 frekans veya 12 saat periyoduna karşı gelen piktir. Pikin hemen solunda ve sağında iki küçük pik daha vardır. Diğer önemli enerji fazlalığı ise 0,002 den küçük frekans değerlerinde veya 5 günlük periyottadır.

Daha önceki bir çok araştırmacı serilerde meydana gelen istenmeyen kısımları ayırmak ve böylece serinin ana bileşenlerini korumayla ilgili çalışmalarda bulunmuştur. Venugopal ve Foufoula-Georgiou (1996) yağış verilerinden istenmeyen detay bileşenlerini ayrıştırmak için bir işaret sıkıştırma tekniği olarak dalgacık paketlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında 8192 örnek uzunluğuna sahip yağış verilerinin dalgacık paketleri kullanılarak elde edilen bileşenlerinden ilk 50'si enerjinin %81'i korunarak seriyi ifade edebilmişlerdir. Labat ve diğ. (2000) ise yarım saatlik yağış-akış verilerinden bazı detay bileşenlerini ayırmışlardır. Çalışmalarında detay bileşenlerinin ayrılması ile aktif olmayan periyotlu yağışlar ile bunlara zıt olan aktif periyodlu yağışları açığa çıkarabilmiştir. Zaman serisini bu şekilde ifade ederek yağışlardaki, kararsız ve kesikli tekrar eden olayları belirtmek için uygun bir yol önermişlerdir. Buna ilaveten, akım serilerinde kar erimesi gibi yüksek frekanslı veya küçük ölçekli detay bileşenlerinden ayrıştırılmış (de-noised) veriler aynı zamanda taşkın olayları gibi yapılarınıda muhafaza edebilmişlerdir.

Bu çalışmada özellikle kısa süreli akım ölçüm serilerinin, meydana gelen ani değişimler de göz önünde bulundurularak, modellenmesi sonucundaki başarımı arttırmak için sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla seri analiz edilmiş ve hesaplanan global dalgacık spektrumu ile baskın bileşenler araştırılmıştır. Ayrık dalgacık dönüşümü ile bileşenlerine ayrılan seri değişik kombinasyonlar oluşturularak tekrar toplanmıştır. Model performansları ortalama karesel hata (OKH), rölatif hata (RH) ve mutlak hata (TMH) kriterleri yardımıyla değerlendirilmiştir.

Ele alınan akım serisinde 2048 ölçüm olduğundan seri ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak 9 adet detay, bir adet yaklaşıklık bileşeninine ayrılmıştır. Elde edilen bileşenler kullanılarak 29 değişik kombinasyon oluşturulmuş ve 29 ayrı model oluşturulmuştur. Modeller, aldıkları toplam enerji değerlerine göre sıralanarak Tablo 4.8'de gösterilmiştir. Enerji değerlerinin yanında model kombinasyonları, OKH, RH ve TMH değerleri de Tablo 4.8' e eklenmiştir.

Tablo 4.8 yakından incelenirse en yüksek enerjiye sahip bileşen AD5 dir. AD5'den sonra sırası ile AD4, AD6, AD3, AD9, AD8, AD7, AD1 ve AD2 gelmektedir. Burada AD5 bileşeninin karşı geldiği 32 (8 saat) periyodu, global spektrumda en yüksek pik olan 50 (12 saat) periyoduna yani 0,020 frekans değerine yakındır ve enerjisi oldukça yüksektir. Diğer detay bileşenlerindeki enerjiye göre AD5 %25 daha fazla enerjiye sahiptir. Ayrık dalgacık dönüşümü sonucu elde edilen bileşenler 2'nin katları olduğundan 50 periyot (12 saat) değeri veya 0,020 frekans değerine en yakın bileşen olan AD5'de enerji yüksektir. Global spektruma benzer olarak AD4 ve AD6 bileşenlerinde de diğer bileşenlere göre çok az da olsa bir fazlalık görülmektedir.

Enerjilerdeki farklılık model hatalarında da kendini göstermektedir. Model 18 kombinasyon olarak yalnızca AD5 ve yaklaşıklık bileşenini içerirken Model 19'da AD3, 4, 6, 7 ve yaklaşıklık bileşenini içerdiği halde OKH miktarı yaklaşık iki kat, RH yaklaşık % 40 ve TMH % 40 fazlalık vermektedir. Buradan AD5 bileşeninin modeller üzerinde çok yüksek etkiye sahip olduğu söylenebilir. AD5'den sonra bileşenlerde oluşan en küçük OKH sırası ile AD4, AD6, AD8, AD3, AD9, AD7, AD2 ve AD1 bileşenlerindedir. Yalnızca en düşük hata değerini veren AD1 bileşeni çıkarılarak elde edilen Model 1'deki kombinasyon tüm modeller içerisinde en düşük hatayı verir. Model 2'de ise ölçüm serisinden yalnızca AD9 bileşeni çıkarılarak elde edilen kombinasyonda hata oranı OKH'ya göre 3 kat, RH'ya göre 2 kat ve TMH'ya göre 2 kat artış göstermiştir. Modelden her iki bileşenin çıkarılması ile elde edilen Model 5 'de, Model 1 'de elde edilen sonuçlar kadar olmasa da yinede Model 0'dan OKH'ya göre % 20, TMH'ya göre % 5 bir azalma meydana gelmektedir. RH değeri çok az da olsa bir artış göstermiştir. Hata oranları arasında oluşan bu fark biraz da serinin kararlı yapısından meydana geldiği düşünülebilir. Önceden incelenen günlük ölçüm serisinde bulunan değişik ölçekteki bileşenlerin tersine bu ölçüm serisinde çok daha kararlı temel bileşenler görülmektedir.

Tablo 4.8 Akım serisi modellerinin enerjileri ve hata değerleri

Model Numarası	Enerji toplamları ($\Sigma E_m, 10^{11}$)	Model kombinasyonları	OKH (10^6)	RH	TMH
Model0	2.72	ÖLÇÜM	2.74	0.30	1180
Model1	2.71	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+AD9+YAKLAŞIKLIK	0.96	0.17	711
Model2	2.70	AD1+AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+YAKLAŞIKLIK	3.82	0.40	1466
Model3	2.69	AD3+AD4+AD5+AD6+AD8+AD9+YAKLAŞIKLIK	1.46	0.26	936
Model4	2.69	AD3+AD4+AD5+AD6+AD8+YAKLAŞIKLIK	2.54	0.37	1312
Model5	2.69	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+YAKLAŞIKLIK	2.14	0.31	1151
Model6	2.68	AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+YAKLAŞIKLIK	2.14	0.30	1138
Model7	2.68	AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+YAKLAŞIKLIK	2	0.30	1138
Model8	2.68	AD4+AD5+AD6+AD7+AD8+AD9+YAKLAŞIKLIK	2.04	0.38	1100
Model9	2.67	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	2.96	0.32	1340
Model10	2.66	AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	2.95	0.35	1346
Model11	2.66	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	3.48	0.38	1454
Model12	2.65	AD2+AD3+AD4+AD5+YAKLAŞIKLIK	6.55	0.62	2034
Model13	2.63	AD3+AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	3.48	0.40	1446
Model14	2.60	AD3+AD4+AD5+AD7+YAKLAŞIKLIK	6	0.59	1942
Model15	2.60	AD3+AD4+AD5+YAKLAŞIKLIK	6.53	0.63	2034
Model16	2.59	AD4+AD5+AD6+YAKLAŞIKLIK	4.59	0.57	1689
Model17	2.55	AD3+AD5+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	8.71	0.73	2352
Model18	2.45	AD5+YAKLAŞIKLIK	13.2	1.05	2880
Model19	2.18	AD3+AD4+AD6+AD7+YAKLAŞIKLIK	26.7	1.47	4221
Model20	2.08	AD4+YAKLAŞIKLIK	31.5	1.81	4735
Model21	2.03	AD6+YAKLAŞIKLIK	33.6	1.98	5122
Model22	1.99	AD3+YAKLAŞIKLIK	35.7	2.01	5312
Model23	1.99	AD9+YAKLAŞIKLIK	35.8	2.09	5368
Model24	1.98	AD8+YAKLAŞIKLIK	35.6	2.10	5383
Model25	1.98	AD7+YAKLAŞIKLIK	36.2	2.11	5381
Model26	1.98	AD1+YAKLAŞIKLIK	36.9	2.16	5454
Model27	1.97	AD2+YAKLAŞIKLIK	36.7	2.11	5449

Model 3'de AD1, AD2 ve AD7 bileşenleri dışlanarak elde edilen kombinasyonda hata oranı oldukça düşük gerçekleşmiştir. OKH olarak Model 0'a göre yaklaşık 2 kat daha iyi sonuç vermiştir. RH değeri olarak % 15 ve TMH değeri olarak % 25 daha iyi sonuçlar üretmiştir. Model 3'de kullanılan AD 9 bileşeni yerine AD7 bileşeni kombinasyona dahil edildiğinde modelde hata oranı artmaktadır. Bu durumda AD9 bileşeninin AD7 bileşenine göre modele daha fazla olumlu katkısı olduğu söylenebilir. Aralarında çok az bir enerji farkının olmasına karşın kombinasyonda iki bileşen arasında önemli hata farkları oluşmaktadır. Global spektruma dikkat edilecek olursa AD9 bileşenin ifade ettiği 512 periyoduna karşı gelen 0,00195 frekans değerinde enerjinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüksek enerji bölgesi AD8 bileşenine karşı gelen 0,039 frekans değerinde çok azalmaktadır.

Model 9'da AD1, AD8 ve AD9 bileşenleri dışlanmasına karşın ölçüm serisi modeli olan Model 0'dan OKH olarak % 10'nun altında bir artış meydana gelmiştir.

AD4, AD5 ve AD6 bileşenlerinin model kombinasyonunda olması genelde hatayı düşük tutmaktadır. Mesela Model 16'da sadece bu bileşenler dikkate alınarak yapılan kombinasyonda AD6 dışlanarak yerine AD3 bileşeni koyularak oluşturulan yeni modelde OKH %25 oranında artış göstermiştir. Model 16'ya AD2 bileşeni ilave edilmesi ile oluşan Model 12'de OKH'da azda olsa bir artış meydana gelmiştir. Bu durum enerjinin artmasının yanında uygun bileşenlerin modele katılmasının daha yararlı olduğunu ifade eder. Model 27'de sadece AD2'nin kullanıldığı kombinasyon OKH'ya göre nerdeyse en fazla hatayı üreten modeldir. Model 12'ye AD6 bileşeni ilavesi ile elde edilecek Model 11'de ki kombinasyonun enerjisi Model 12 kadar olmasına karşın OKH değeri nerdeyse yarı oranında düşmüştür. Bu ilginç sonuç eklenecek bileşenin seçiminin önemli olduğunu göstermektedir.

Model 14'de Model 15'e AD7 bileşeni ilavesi ile elde edilen AD3+AD4+AD5+AD7+YAKLAŞIKLIŞ kombinasyonu görülmektedir. Kombinasyonda AD7 yerine AD6'nın alınması sonucunda oluşan Model 13'de OKH Model 14'e göre % 40 civarında azalmıştır. Öte yandan Model 14'den AD4'ün alınıp AD6'nın ilavesi hatada % 50'nin üzerinde bir artışa neden olmuştur. Bu durum AD4 bileşeninin AD6 bileşeninden çok daha hata azaltıcı yönde etkisi olduğu anlamına gelir. Yine Model 14'den AD5 bileşeninin alınması ile elde edilen Model 19

incelendiğinde hatayı AD4 ve AD6 bileşenlerinin alınmasın durumundan çok daha fazla bir oranda arttırmıştır.

AD8 ve AD7 bileşenleri arasında hatayı azaltıcı olması bakımından hangi bileşenin daha etkin olduğunu Model 4 ile Model 10 karşılaştırılarak anlaşılabilir. Model 4'de ki kombinasyonda bulunan AD8 bileşeninin yerine AD7 bileşeninin ilavesi OKH olarak % 15 arttırırken RH olarak bir miktar azaltmıştır.

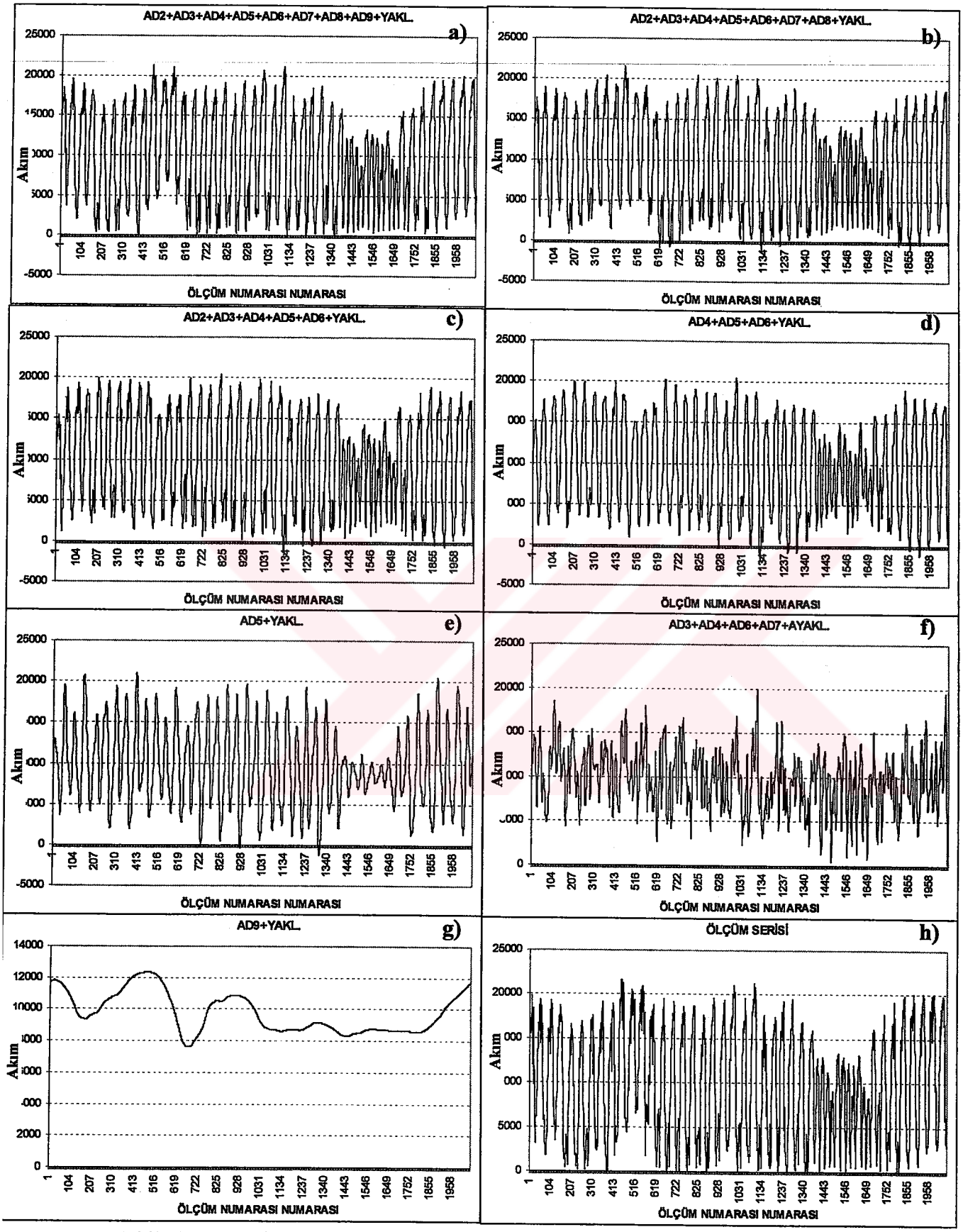
Model 3'de ki kombinasyondan AD3 bileşeni çıkarılarak yerine AD7 bileşeni alınması ile oluşan Model 8'de OKH olarak % 30 civarında bir azalma söz konusudur. Bir diğer karşılaştırma ise Model 8'den AD9 bileşeni çıkarılarak yerine AD3 bileşeninin konulması ile yapılabilir. Elde edilen Model 6'da OKH olarak % 5'lik bir artış söz konusudur. TMH'ya göre de % 5'in altında bir artış olmasına karşın RH'değerinde % 20 civarında bir azalma oluşmuştur.

AD4, AD5, AD6 ve AD9 bileşenleri elde edilen sonuçlara göre genel olarak model hatalarını azaltıcı yönde etkileri olmuştur. Bu bileşenlerden özellikle AD5 bileşeni global spektrumda görülen pik değerine yakın olması ve serinin en temel karakteri olan 12 saatlik değişimi ifade eden 0,02 frekans değerine yakın değer alması bakımından en önemli bileşen olarak görülmektedir. AD4 bileşeni ve AD6 bileşenleri de global spektrumdaki pike yakın bileşenler olarak model sonuçlarına olumlu katkıları olan bileşenlerdir. AD9 bileşeni ise global spektrumun sol tarafındaki bölgeye en yakın bileşen olarak AD5 bileşeni kadar olmasa bile modelde etkisi yüksek olarak görülmektedir.

Üzerinde durulması gereken bir konu da modelleri oluşturan kombinasyonların yalnızca enerjilerine bakılmaması gerekliliğidir. Kombinasyonlarda kullanılan bileşenler ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edildiğinden dolayı global spektrumdaki değerleri tam karakterize edemeyebilirler. 31 Ekim ile 4 Kasım tarihleri arasında oluşan ani debi düşüşü 12 saatlik periyot değerinde görülen temel bileşende bir kırılmaya yol açarak global spektrumda 0,04 frekans seviyesinde bir enerji artışına neden olmuştur. Burada ki düzensizliğin global spektrumla tespit edilmesi ile tahmin sırasında kullanılıp kullanılmayacağına karar verilebilir. Eğer tahminde kullanılmak istenilmiyorsa bu frekans değerine karşı gelen bileşenin çıkarılması ile tahmin performansı arttırılabilir.

Modelleme sonucunda oluşturulan 28 farklı kombinasyondan 8 tanesine ait zaman serileri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Şekil 4.23'de sırasıyla Model 1, 5, 11, 16, 18, 19, 23 ve Model 0'a ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serileri görülmektedir. Şekil 4.23-h'da ölçüm serisine ait zaman serisi aynı zamanda tüm bileşenlerin toplamını veren kombinasyondur. Şekil 4.23-a'da ölçüm serisinden yalnızca AD1 bileşeninin çıkarılması ile elde edilen kombinasyon görülmektedir. Bu kombinasyonla oluşturulan Model 1 aynı zamanda 27 model içerisindeki hata oranı en az olan modeldir. Şekil 4.23-a ile Şekil 4.23-g karşılaştırıldığında gerek hızlı değişen yüksek frekanslı bileşenlerde gerekse temel değişimlerde gözle görülür bir farklılık görülmemektedir. En önemli fark gidişattan çok fazla uzaklaşan bazı piklerin Model 1 kombinasyonunda görülmemesidir. Şekil 4.23-b'de görülen Model 5'e ait kombinasyonda, AD9 bileşeninin olmayışı ölçüm serisinden bazı temel bileşenlerde farklılık göstermesine neden olmaktadır. AD9 bileşeninin çıkarılması ile oluşan değişim 310-619 numaralı ölçümler arasındaki kısımda görülebilmektedir. Model 5 de oluşan hata değerleri OKH ve TMH kriterleri bakımından ölçüm serisinde oluşanlardan daha düşüktür. Bu da serinin temel yapılarının korunduğu anlamına gelir. Şekil 4.23-c'de Model 11'e ait kombinasyonda AD1'in yanında AD7, AD8 ve AD9 bileşenlerinin olmayışı, ölçüm serisine olan benzerliği çok fazla etkilememiştir. Hata oranlarında Model'5 göre % 40'a varan artışlar olmasına karşın sürekli dönüşüm ve global spektrumda gözlenen ve serinin en temel bileşen olan 12 saatlik bileşene yakın periyotlardaki bileşenlerin kombinasyonda bulunması bu benzerliği sağlamıştır. Serinin temel bileşenlerinin kombinasyonda olmasının önemi Şekil 4.23-e ile Şekil 4.23-f karşılaştırıldığında da görülmektedir. Şekil 4.23-e'de yalnızca AD5 bileşeni bulunmasına karşın Şekil 4.23-f'de dört adet detay bileşen vardır. Ölçüm serisine benzerlik açısından değerlendirilecek olursa Şekil 4.23-e ölçüm serisine daha çok benzemektedir. Zaten modelleme sonucunda da bu serinin oluşturduğu hata değerleri Şekil 4.23-f'de görülen serininkinden daha düşüktür.

Şekil 4.23-g'de ise AD9 bileşeni ile yaklaşıklık bileşenin toplamından oluşan kombinasyon görülmektedir ve bu bileşen serinin en büyük periyotlu değişiminin veren olayları ifade eder. Bu zaman serisi ile oluşturulan Model 23'de ki hata oranları çok yüksektir. Fakat şu da belirtilmelidir ki bu bileşen serideki 5,33 günlük bileşenleri ifade eder. Serinin 21 günlük uzunluğa sahip olduğu dikkate alındığında bu bileşenin daha uzun süreli kayıtlarda ne kadar etkin olduğu araştırılmalıdır.



Şekil 4.23 Model 1, 5, 11, 16, 18, 19, 23 ve Model 0'a ait kombinasyonların oluşturduğu zaman serileri

4.4.5.1 Akım modellerinin Fourier dönüşümü ile karşılaştırılması

Akım serilerinin analizinde Fourier dönüşümleri ile filtreleme işlemi daha önceki çalışmalarda kullanılmıştır. Fourier dönüşümü kullanılarak zaman serilerinin anlamlı harmonikleri bulunarak daha sonra diğer harmonikler veriden ayrıştırılması sonucunda elde edilen seri istenilmeyen detaylardan ayrıştırılmış olmaktadır. Fourier dönüşümleri bazen değişik filtreleme teknikleri ile ortaklaşa kullanılmıştır (Bayazıt ve diğ., 2001). Bunlardan biride Kalman filtreleridir. Şen (1991) Fourier-Kalman filtreleme metodunu, ortogonal Walsh serileri ile Kalman filtrelerinin ortaklaşa kullanıldığı bir metotla karşılaştırmıştır. Şen, aylık akım ve yağış verileri için gerçek zamanlı ve uyarlamalı (adaptif) modellerde Kalman filtrelerinde kullanılan Fourier serisi yerine Walsh serilerini kullanmıştır. Walsh serileri sınırlı bir aralıkta lineer oluşu, ortogonal ve simetrik oluşu ve toplama, çıkarma işlemlerinde basitlik sağlaması bu uygulamalarda üstünlük sağlamıştır. Ayrıca Fourier serilerinin etkilendiği keskin kenarlı pik değerlerin neden olduğu Gibbs etkisi Walsh serilerinde görülmemiştir.

Çalışmanın bu kısmında modellemede kullanılan dalgacık dönüşümü tekniği Fourier dönüşümleri ile karşılaştırılmıştır. Öncelikle Fourier dönüşümü kullanılarak zaman serisine ait Fourier katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen Fourier katsayıları yardımıyla anlamlı harmonik sayısı tespit edilmiştir. Anlamlı harmonik sayısı kadar katsayı kullanılarak seri yeniden elde edilmiş ve elde edilen bu yeni seri önceden belirlenen zaman serisi model tipi kullanılarak modellenmiştir.

Bu kısımda amaç Fourier dönüşümü kullanılarak filtrelenen zaman serisinin modellemedeki başarımını, dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan modellemeler ile karşılaştırılmasıdır.

Fourier katsayılarının anlamlı (harmonik) sayısı aşağıdaki şekilde varyans yüzdeleri hesaplanarak tespit edilmiştir.

$$Var_i = \frac{A_i^2 + B_i^2}{2} \tag{4.29}$$

Burada Var_i i. Fourier katsayılarının varyansını, A_i ve B_i i. Fourier katsayılarını ifade eder. Yukarıdaki bağıntıda verilen Var_i üst üste toplanarak anlamlı varyans sayısı tespit edilmeye çalışılır.

$$P_h = \sum_{i=1}^{h} Var_i \qquad (4.30)$$

Burada P_h varyansların ardışık toplamını ifade eder, h ise anlamlı harmonik sayısını ifade eder. Bu bağıntı kullanılarak varyansların hangi harmonik numarasından sonra sabitleşmeye başladığı tespit edilir. Artık bu sayıdan sonra harmoniklerin ters dönüşüme katkısı çok az olur (Bayazıt, M., 1996).

Yapılan hesaplamalar sonucunda Fourier dönüşümü sonucunda elde edilen A_i ve B_i katsayılarından sırasıyla ilk 50, 90, 150, 300 ve 600 çift A_i ve B_i katsayıları alınarak akım serisi yeniden elde edilmiştir. Oluşan yeni zaman serileri modellenerek sonuçlar OKH, RH ve TMH ile karşılaştırılmış ve Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9 Fourier katsayıları ile oluşturulmuş modeller, enerjileri ve hata değerleri

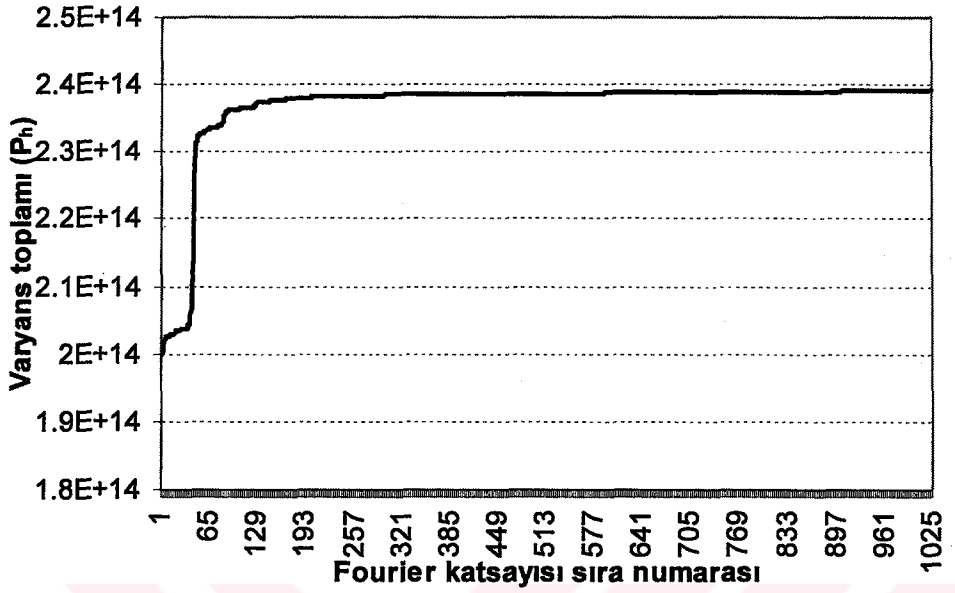
Model Numarası	Enerji toplamları ($\Sigma E_m, 10^{11}$)	Model kombinasyonları	OKH (10^6)	RH	TMH
Model 1	2.59	FOURIER 50 KATSAYI	6.23	0.71	1972
Model 2	2.66	FOURIER 90 KATSAYI	2.85	0.45	1329
Model 3	2.69	FOURIER 150 KATSAYI	1.40	0.31	902
Model 4	2.70	FOURIER 300 KATSAYI	0.75	0.14	643
Model 5	2.71	FOURIER 600 KATSAYI	7.42	0.30	2202

Fourier çözümlemesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde geri dönüşümde kullanılan katsayıların modelin enerjisi ile doğrusal bir ilişki halinde olduğu anlaşılır. Zaten bu durum bağıntı (4.9)'da hesaplanan toplam varyans grafiğinde de görülmektedir (Şekil 4.23).

Şekil 4.24'de yatay eksen Fourier katsayılarının sıra numarasını göstermektedir. Düşey eksen ise Fourier katsayılarının varyanslarının üst üste toplanması sonucunda elde edilen varyans değerlerini göstermektedir. Şekilde yaklaşık 200. Fourier katsayılarından sonra enerjide fark edilir bir artış olmadığı anlaşılmaktadır.

Geri dönüşümde kullanılan katsayı artınca enerji artmaktadır. Mesela ilk 150 katsayı ile yapılan dönüşüm ile toplam enerjinin % 99'unu ifade eden bir seri elde edilir. İlk 50 katsayı ile yapılan dönüşüm de ise toplam enerjinin % 95'i korunmuştur. Katsayı ve enerji azaldıkça modellerde oluşan hata oranları da artmaktadır. Katsayı sayısı belli bir rakamım üzerine çıktığında ise enerjide çok yüksek bir artış olmamasına karşın hata oranlarında azalma yerine artış görülmektedir. Bu nedenle serinin ürettiği Fourier katsayılarının sayısına ve aldığı değerlere bağlı olarak değişik optimum noktalar oluşur. Mesela Tablo 4.9'da görüldüğü gibi 50 katsayıdan 300 katsayıya

kadar katsayı arttırıldığında hata oranlarında bir düşüş meydana gelmektedir. Fakat katsayı arttırılmaya devam edilip 600'e çıkarılırsa enerjide az bir artışa karşın hata da yükselme meydana gelmektedir.



Şekil 4.24 Fourier katsayılarının varyanslarının ardışık toplamı

Tablo 4.9 incelendiğinde 150 katsayı kullanılarak oluşturulan seride enerji miktarı $2{,}69x10^{11}$'dir. Enerji değerine göre karşılaştırdığımızda Tablo 4.8'de aynı enerji miktarına karşı gelen Model 3'de OKH $1{,}46x10^{11}$ olarak elde edilmiştir. RH ve TMH ise sırasıyla 0,26 ve 711 dir. Aynı enerji seviyesinde bu modelin ürettiği hatalardan biraz daha yüksek hatalar üreten modeller de mevcuttur. Mesela Model 4 ve 5, 150 katsayı ile yapılan filtrelemeden daha yüksek hatalar vermiştir. 90 katsayı ile yapılan dönüşüm sonucunda elde edilen zaman serisi için yapılan modellemede elde edilen hatalar aynı enerji seviyesinde Tablo 4.8'deki modellerde oluşan hatalar ile karşılaştırıldığında Model 10 ve 11'de oluşan hatalar OKH ve TMH'ya göre biraz yüksek, RH'ya göre biraz düşüktür. Geri dönüşümde kullanılan Fourier katsayılarının sayısını 300'e çıkardığında enerji $2{,}70x10^{11}$ olur. Aynı enerji seviyede Tablo 4.8'de oluşturulan Model 1'le karşılaştırıldığında tüm hata kriterlerinde elde edilen hatalar oransal olarak % 20 civarında bir azalma olmuştur. Fourier katsayı sayısını 600'e çıkardığımızda enerji enerjide çok büyük bir değişim olmamasına karşın hata miktarlarında oransal olarak % 30 civarında bir artış oluşmuştur. Tablo 4.8'deki Model 1 ile karşılaştırıldığında her üç hata kriterinden daha yüksek hata meydana geldiği görülür.

Ayrık dalgacık dönüşümü ile bileşenlerine ayrılan seride bileşenler 2'nin katı bir sayıya karşı gelen periyotlarda hesaplanırlar. Bu bileşenlerin sayısı ise veri uzunluğuna bağlı olarak değişir. Modelleri oluşturan kombinasyonlar analiz sonucunda seri ile uyum gösteren periyotlardaki bileşenlerden oluşturulduğu zaman modelin hata değerleri düşer. Bu nedenle dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan modellemede modelin enerjisi tek başına belirleyici bir parametre değildir. Mesela Model 3'ün enerjisi Model 0 ve Model 2'nin enerjisinden düşük olmasına karşın hata miktarları bu modellerden çok daha düşük oluşmuştur.

Fourier çözümlemesinde ise harmonik denilen bileşenler katsayıların adetincedir. Anlamlı sayılan bileşenler ise enerjinin belirli bir seviyesine kadar olanlardır. Bu enerjiden sonra gelen harmonikler seriden dışlanarak seri filtrelenmiş olur. Burada herhangi bir fiziksel karakterin korunup korunmadığı konusunda bir inceleme yapılmadığından serinin tüm karakteri filtrelenmiş yeni seride taşınmayabilir. Dalgacık dönüşümünün ölçek seviyesi seriyi karakterize eden bileşenler ile tam uyum sağladığında hem serinin karakteri korunur hem de başarımı en yüksek olan model elde edilir.

4.5 Dalgacık dönüşümleri için kullanılan programlar

Dalgacık dönüşümü hesaplamaları bir istatistik hesap ve grafik programı olan "R" nin "Rwave" modülü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu program GNU (General Public License as published by the Free Software Foundation) lisansı ile dağıtılmaktadır. Program İnternet sitesi adresi ***http://www.r-project.org/*** dır. Orjinali "S" dilinde Rene Carmona (Princeton üniversitesi) tarafından 1998'de yazılmış olan program "R" diline Brandon Whitcher tarafından uyarlanmıştır. Daha sonra Waveslim modülü (2003) haline getirilmiştir. Bileşenlerin (Şekil 4.3) eldesi için kullanılan "R" dilindeki Rwave ve Wavesilim modüllerindeki programların kodları ek halinde EK-A'da verilmiştir. Eklerde aşağıdaki programlara ait kodlar verilmiştir.

mw: Mallat'ın kullandığı dalgacıklar kullanılarak yapılan ikili dalgacık dönüşümü için kullanılan R dilinde yazılmış program. Yeniden oluşturulan (geri çatma) işaret en yüksek değerlerde yerini ve değerlerini koruyabilmektedir. Dönüşüm 1. seviyeden girilen en yüksek seviyeye kadar yapılır. Rene Carmona-Princeton üniversitesi, 1998 (Rwave modülü).

mra: Çok çözünürlüklü ayrışım için kullanılan R dilinde yazılmış program. Bu program bir girdi vektörü veya zaman serisini Mallat (1989) piramit algoritmasını kullanarak J seviyede toplanır bir ayrıştırma işlemini gerçekleştirir. Brandon Whitcher, 2003 (Waveslim modülü).

dwt: En yüksek örtüşmeli ayrık dalgacık dönüşümü için kullanılan R dilinde yazılmış program. Bu fonksiyon (dwt) bir girdi vektörü veya zaman serisine Mallat (1989) piramit algoritmasını kullanarak J seviyede bir ayrıştırma işlemini gerçekleştirir. Brandon Whitcher, 2003 (Waveslim modülü).

modwt: En yüksek örtüşmeli ayrık dalgacık dönüşümü için kullanılan R dilinde yazılmış program. Bu fonksiyon (modwt) bir girdi vektörü veya zaman serisine J seviyede bileşenlere ayırmayı örnek seyreltmeyen ayrık dalgacık dönüşümünü (non-decimated discrete wavelet transform) kullanarak gerçekleştirir. Ters dönüşüm bir vektörün yada bir zaman serisinin yeniden oluşturulmasını (geri çatma) "en yüksek örtüşmeli ayrık dalgacık dönüşümü" kullanarak gerçekleştirir. MODWT kararlı ayrık dalgacık dönüşümü (stationary DWT), ötelenmeli-değişimsiz ayrık dalgacık dönüşümü (translation-invariant DWT) veya zamanla değişimsiz ayrık dalgacık dönüşümü (time-invariant DWT) şeklinde de bilinmektedir. Burada çarpım fonksiyonlar veya vektörler arası bir iç çarpım yerine dalgacık filtrelerinin uygulanması anlamında kullanılır. Ters MODWT dönüşümü Mallat (1989) piramit algoritmasını kullanan bir boyutlu ters dönüşümle yapılır. Brandon Whitcher, 2003 (Waveslim modülü).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Konu ile ilgili yayınların değerlendirilmesi sonucunda işaretin hem zaman hem de ölçek ortamında analizine imkan sağladığı için dalgacık dönüşümü kullanılarak akım serilerinin bileşenlere ayrılması yardımıyla incelenmesinin ve dolayısıyla su kaynakları sahasında kullanımının çok yararlı olacağı söylenebilir.

Özelde yapılan bu tez çalışmasında ise dalgacık dönüşümü tekniği genel olarak akım olaylarının incelenmesinde ve modellenmesinde kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında akım modellerinde iki ana başlık halinde incelemelerde bulunmuştur. Bunlardan ilki istasyonlar arası akımların modellenmesi, ikincisi akım serilerinin zaman serisi olarak modellenmesi. İlk defa dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan modelleme çalışmalarının sonucunda elde edilen temel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

1- Dalgacık dönüşümü tekniği akım serileri gibi kararsız yapıya sahip zaman serilerinin analizinde başarı ile uygulanmıştır. Bu durum su kaynakları sahasında modelleme çalışmalarından önce serinin özelliğinin daha iyi tanınması açısından büyük yarar sağlar.

2- Dalgacık dönüşümü kullanılarak akım serileri içerisindeki değişik periyodik bileşenler birer zaman serisi olarak incelenebilmiştir. Her bir bileşen temsil ettiği ölçek seviyesinin karşı geldiği periyottaki olayı ifade eder. Böylece o periyottaki olayın zaman içerisindeki değişimi incelenebilmiş olur. Bu durum su kaynakları sahasında akım serilerinin yanında daha bir çok hidroklimatolojik verinin derinlemesine incelenmesine imkan tanır.

3- Herhangi bir ölçek seviyesindeki periyodik bileşene ait zaman serisinin akım serisi içerisindeki varyans veya enerji yüzdesi hesaplanmıştır. Böylece o bileşenin akım serisi içerisindeki önemi ortaya konulabilmiştir.

4- Yakım istasyonlar arasında oluşturulacak bir modelde sözü edilen periyodik bileşenlerden önemli olanları, diğer tüm istasyonlar içinde önemli olacaktır. Dolayısıyla bölgenin iklimsel davranışını en iyi temsil eden bileşen veya bileşenler arasında oluşturulan modeller, bir istasyon ölçümleri kullanılarak

diğer istasyondaki veriyi tahmin etmek için kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

5- Akım serisi içerisindeki önemli periyodik bileşenler coğrafyadan coğrafyaya değişir. Farklı iklim özelliğine sahip bir bölgede de modelleme çalışması denenmiş ve modelleme için önemli bileşenlerin farklı bir coğrafyada ne tür özellikler sergilediği ortaya konulmuştur. Böylece dalgacık dönüşümü ile modelleme tekniğinin yeterli analizler yapıldığında her coğrafyada başarılı sonuçlar ortaya koyabileceği gösterilmiştir.

6- Akım ölçümleri zaman serisi olarak ele alınarak sürekli dalgacık dönüşümü ile incelenmiş ve global spektrumları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar akım serilerinin modellenmesinden önce serinin özellikleri hakkında çok yararlı bilgiler vermiştir. Böylece dalgacık dönüşümünün akım serilerinin özelliklerini ortaya koyma açısından da çok yararlı olduğu ortaya konulmuştur.

7- Dalgacık dönüşümü ile elde edilen akım serilerinin bileşenleri, dalgacık dönüşümünün geri dönüşüm özelliğinden yararlanılarak farklı kombinasyonlarda tekrar toplanmıştır. Serinin temel karakterlerini ifade eden bileşenlerin kullanılması ile oluşturulan kombinasyonlar kullanılarak modellerin başarısı yükseltilmiştir. Bu bize analiz sonucunda elde edilen bilgiler ışığında kombinasyonlar oluşturulursa, modellerin daha başarılı olacağını ortaya çıkarmıştır.

8- Akım serilerinin dalgacık dönüşümleri kullanarak modellenmesi ile, gerek geleceğe yönelik tahminlerde gerekse akım serilerinin türetilmesi gibi işlerde kullanılan modellerin başarımı arttırılmıştır.

9- Akım serilerinin modellenmesinde, ölçüm aralığı kısa olan ölçüm serileri de denenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu modellerde de önemli bileşenlerin kullanılmasının hatayı düşürdüğünü göstermiştir. Kısa aralıklı ölçümlerin modellenmesi ile bir çok gerçek zamanlı modelleme uygulamalarında kullanılabilecek hata oranları daha düşük bir teknik ortaya konulmuştur.

10- Uygulamada kalıntıların normal dağılıma uyması için değişkenlere 3 ayrı dönüşüm uygulanmıştır. Dönüşümler sonucunda oluşan en düşük hata değerleri, dönüşüm yapılmadan yapılan modellemeler sonucunda elde edilen

hata değerleri ile uyumluluk göstermiştir. Küpkök ve logaritmik dönüşüm sonucunda da ayni bileşende en küçük hata değerine ulaşılmıştır. Bu bize dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerin enerji oranları dönüşüm yapıldıktan sonra çok az değişim gösterdiğini ve dolayısıyla model sonuçlarını çok az etkilediğini göstermektedir.

11- Gerek istasyonlar arası akım modelleri, gerekse akım serilerinin modellenmesinden önce dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan değişik analizler sonucunda akım serisi üzerinde etkin bileşenlerin ortaya konulması ve bu bileşenlerin kullanılması ile fiziki olarak anlamı yüksek ve daha güçlü modelleri oluşturulabilmiştir.

12- Akım serileri modelleri, Fourier filtreleme tekniği ile de karşılaştırılmıştır. Dalgacık dönüşümü kullanılarak yapılan modellerin bir çoğu Fourier dönüşümü ile filtrelenen seriler kullanılarak yapılan modellemelerden çok daha az hata üretirken fiziki olarak da anlamlı modeller oluşturulabilmiştir.

İstasyonlar arası yapılan modelleme çalışmalarında, öncelikle bileşenler enerji spektrumlarına göre analiz edilmişlerdir. Sonra modellemesi yapılacak iki komşu istasyon arasında aynı ölçek seviyesindeki bileşenler arasında lineer modeller oluşturulmuştur. Modeller model oluşturulurken kullanılmayan veriler ile test edilmiştir. Sonuçlar ortalama karesel hata (OKH), toplam mutlak hata (TMH), rölatif hata (RH), korelasyon katsayısı ve tahminlerin dağılım sıklıkları gibi kriterler yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bileşenler arası modeller yanında her iki istasyona ait ölçüm serileri arasında da bir model oluşturulmuş ve modelde kullanılmayan test verileri ile kontrol edilmiştir.

Modelleme yapılan bölgenin iklimsel karakteristiğine göre oluşturulan modeller arasında en iyi sonucu veren modeller farklı farklı ölçek seviyesindeki bileşenler kullanılarak elde edilmiştir.

İlk uygulamada Arkansas nehri üzerindeki Kendall ve Syracuse ölçüm istasyonları arasında 11 Eylül 2001 ile 10 Eylül 2003 arasında ölçülmüş 730 günlük akım verisinin 512 adeti kullanılarak modelleme yapılmıştır. Geri kalan 217 günlük akım verisi ise oluşturulan modelleri test etmek için kullanılmıştır. Akım serisi 7 detay, 1 yaklaşık bileşenine ayrılmıştır. Ölçüm serileri arasında oluşturulan model de dahil olmak üzere toplam 9 model oluşturulmuştur. Ölçüm serileri arasında korelasyon

katsayısı 0.91'dir. Ölçüm seerileri arasında oluşturulan modellerin OKH değeri 1,013 tür. TMH değeri ise 12,90 ft^3/s'dir. Bu durum test serisinin ortalama debisinin 28,07 ft^3/s olduğu düşünüldüğünde bir hayli yüksek olarak görülmektedir.

Arkansas nehri üzerindeki Kendall ve Syracuse ölçüm istasyonları arasında oluşturulan modellerin sonuçları incelediğinde; hata değerleri en düşük olan model, 64 günlük periyoda sahip bileşen olan ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen bileşenlerden $m=6$ seviyesinde olan AD6 bileşenleri arasında oluşturulan modeldir. Bu model gerçek ölçüm serileri kullanılarak oluşturulan modelden OKH kriterine göre %28 daha iyi tahminde bulunmuştur. Modele ait OKH 0,863 ve TMH 6,41 ft^3/s'dir. Tahmin başına düşen ortalama hatayı gösteren TMH kriterine göre ise bu modelle %50 civarında daha iyi tahminde bulunur. En küçük ölçekli bileşenlerden biri olan AD2 bileşenleri arasında oluşturulan model en yüksek OKH, (1,44) ve TMH (24,87 ft^3/s) değerlerini vermiştir. AD2 bileşenleri arasındaki korelasyon katsayısı ise 0,43 dür. Bu durum ayrıca bileşenlerin sahip oldukları enerjilerin karşılaştırılmasıyla da gözlenmektedir. Oluşturulan modellerin arasındaki ilişkiyi açıklamak için, modelleri oluşturan ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) bileşenlerinin enerjileri de hesaplanmıştır. Şekil 4.5'den anlaşılacağı üzere en düşük enerjiye sahip ADD bileşenlerinin oluşturduğu modelde en yüksek OKH ve TMH değerleri bulunmuştur. Tablo 4.1'den görüleceği üzere AD6 ve AD7 bileşenleri kullanılarak oluşturulan modelin daha iyi tahmin sonuçları vermesi bölgenin çoğrafi yeri ile ilişkilidir. Çalışma yapılan alan coğrafi olarak kurak bir bölgedir. Küçük ölçeklerdeki yüksek frekanslı değişimler yerine 3, 4 aylık frekanslara sahip mevsimlik olayların etkisi bölge üzerinde daha fazladır. Bölgenin bu özelliği nedeniyle gözlenen akım serilerinin AD6 ve AD7 bileşenleri arasında oluşturulan model daha uygun sonuçlar vermiştir. Bu bileşenlerin ifade ettiği olayların periyot değeri sırası ile 64 gün ve 128 gündür.

İkinci uygulamada ise St. Marys nehri üzerindeki North Prong ve Middle Prong ölçüm istasyonlarına ait 1 Nisan 1997 ve 17 Ocak 2000 tarihleri arsındaki 1644 günlük akım serisi modelleme için kullanılmıştır. Model oluşturulurken 1024 günlük akım ölçümleri hesaba katılmıştır. 620 günlük akım ölçümü model oluşturulduktan sonra test için kullanılmıştır. Bu uygulamada bölgenin kararlı olmayan yapısı ve ani hidrograf yükselmeleri göz önünde bulundurarak rölatif hata kriteri (RH), ortalama karesel hata (OKH) kriteri yerine kullanılmıştır. Sonuçlar TMH ve RH kriterlerine

göre değerlendirilmiştir. Enerji spektrumları ile yapılan inceleme sonucunda spektrumda 2-4 ve 32 günlük düşük ölçek seviyelerinde enerjinin diğer bileşenlerin enerjisi yanında büyük olduğu hesaplanmıştır. Bu ölçeklerin yanında 256 günlük ölçek seviyesinde de enerjide nispeten bir yükseklik bulunmuştur. Bölgenin iklim karakteri incelendiğinde, hidrografta kısa sürede olan yükselmeler, sivri taşkın pikleri ani değişen yapıyı ifade etmektedir. Bu durum düşük ölçek seviyesindeki enerjinin yüksekliğini ifade eder. Ayrıca kış boyu ve bahar başında hidrograftaki uzun süreli düşük akım seyri büyük ölçek seviyesindeki enerjide de bir yükseklik olduğunu işaret eder. Model oluşturulmasında kullanılan 1024 günlük akım serileri 8 adet detay bileşene ve 1 adet yaklaşıklık bileşenine ayrılmıştır. Aynı ölçek seviyesinde her bir bileşen için oluşturulan 9 modelin yanında karşılaştırmak için ölçüm serileri arasında da bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan 10 model içerisinde Model 1, 2, 5 ve 7 en düşük hata değerlerini vermiştir. Model 1 ve Model 2'nin rölatif hatası sırası ile % 6,14 ve % 7,12'dir. Bu iki modele ait TMH değerleri sırası ile 14,7 ft^3/s ve 15,6 ft^3/s'dir. Bu durum ölçüm serileri arasında oluşturulan modele göre karşılaştırıldığında RH değeri olarak 4 kat TMH değeri olarak iki kat daha az hata verdiğini ifade eder.

Dalgacık dönüşümü tekniği kullanılarak akım serilerinin de modellenmesi daha az hata üreterek yapılabilmiştir. Çalışmada günlük akım ölçüm serisinin modellenmesi yukarıda sözü edilen bileşenlere ayırma yöntemi ile başarı ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama için Johns nehrinin Boffalo ölçüm istasyonunda ölçülen 23 Haziran 2002 ve 16 Kasım 2003 tarihleri arasındaki 512 günlük akım serisi kullanılmıştır. Zaman serisi öncelikle sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında bir zaman serisi olan akım ölçüm serisinin geçici ve kalıcı özellikleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Daha sonra zaman serisi için oluşturulabilecek en iyi otoregresif model tespit edilmiştir. Bu tespit sırasında denenen modeller arasında Akakike kriterine ve kullanıştaki kolaylığa bakarak ARMA (2, 0) modeli seçilmiştir. Zaman serisi ayrık dalgacık dönüşümü kullanan çok çözünürlüklü filtreleme yardımıyla bileşenlerine ayrılmıştır. Çok çözünürlüklü analiz bileşenlerin üst üste toplanması ile zaman serisinin yeniden eldesine (geri çatma) imkan vermektedir. Bu özellik kullanılarak elde edilen bileşenler değişik kombinasyonlar halinde yeniden toplanarak 20 farklı zaman serisi elde edilmiştir. Elde edilen zaman serileri tespit edilen otoregresif model kullanılarak modellenmiştir. Bulunan sonuçlar OKH, RH ve

TMH kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Tablo 4.7'de kullanılan üç hata kriterinden OKH'ya göre 6 adet, TMH'ya göre 6 adet ve RH'ya göre 5 adet model Model 0'dan daha az hata üretmiştir. Model 0'dan daha az enerjiye sahip olmasına rağmen daha az hata üreten modellerde hata oranında oransal olarak en fazla % 32, en az % 7 azalma sağlanmıştır. En az hata ölçüm serisinden AD1 ve AD2 bileşenlerinin çıkarılması ile elde edilmiştir.

Ölçüm serisi modelinden (Model 0) daha az hata üreten modellerin hepsinde AD7 bileşeninin bulunduğu göze çarpmaktadır. AD7'nin etkisini incelemek için en düşük hata değerini veren Model 10'dan AD7 bileşeni çıkarılarak elde edilen Model 17'ye bakıldığında hata değerinde % 40 civarında bir artış olduğu görülmüştür. Global dalgacık spektrumunda 155 güne karşı gelen ölçek seviyesinde enerjinin yüksek olduğu ve AD7 bileşeninin bulunduğu 0,0078 frekans değerinde de enerjinin yüksek olduğu görülebilmektedir. AD6 bileşeninin ise global spektrumda karşı geldiği 0,0155 frekans değerinde enerjinin AD7'ye göre çok düşük olduğu fakat AD2'ye göre de yüksek olduğu görülmektedir. AD4 bileşeninin etkisi de model üzerinde genelde hatayı azaltıcı yöndedir. Bu sonuçlar AD7 bileşeninin en fazla hatayı azaltan bileşen olduğu ve bu durumunda global spektrumda görüldüğü anlaşılır. AD1'in kullanıldığı modellerde ise hata oranlarında bir artış görülmüştür.

Akımların kısa aralıklarla ölçüldüğü serilerde de modelleme çalışması denenmiştir. Kullanılan akım serisi bir önceki uygulamada kullanılan Johns nehrinin Buffalo ölçüm istasyonundan elde edilmiş 17 Ekim 2003 saat 00:00 ile 07 Ekim 2003 saat 09:00 arasında kaydedilmiş 2048 adet 15'er dakikalık akım serisidir. Analiz sonuçlarında bu akım serisinde ortaya çıkan 12 saatlik veya yarım günlük bileşenin en temel olay olduğu anlaşılmıştır. Ele alınan akım serisinde 2048 ölçüm olduğundan seri ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak 9 adet detay, bir adet yaklaşıklık bileşeninine ayrılmıştır. Elde edilen bileşenler kullanılarak 29 değişik kombinasyon oluşturulmuş ve 29 ayrı model oluşturulmuştur. Burada AD5 bileşeninin karşı geldiği 32 (8 saat) periyodu, global spektrumda en yüksek pik olan 50 (12 saat) periyoduna yani 0,020 frekans değerine en yakın bileşen de AD5 bileşenidir. Buradan AD5 bileşeninin modeller üzerinde çok yüksek etkiye sahip olduğu ve en az hata üreten bileşen olduğu söylenebilir. Mesela Model 18 kombinasyon olarak yalnızca AD5 ve yaklaşıklık bileşenini içerirken Model 19'da AD3, 4, 6, 7 ve yaklaşıklık bileşenini içerdiği halde OKH miktarı yaklaşık iki kat, RH yaklaşık % 40 ve TMH % 40

fazlalık vermektedir. Bu durum oluşturulan modeller üzerinde de hesaplanmıştır. AD5'den sonra bileşenlerde oluşan en küçük OKH sırası ile AD4, AD6, AD8, AD3, AD9, AD7, AD2 ve AD1 bileşenlerindedir.

AD4, AD5, AD6 ve AD9 bileşenleri elde edilen sonuçlara göre genel olarak model hatalarını azaltıcı yönde etkileri olmuştur. Bu bileşenlerden özellikle AD5 bileşeni global spektrumda görülen pik değerine yakın olması ve serinin en temel karakteri olan 12 saatlik değişimi ifade eden 0,02 frekans değerine yakın değer alması bakımından en önemli bileşen olarak görülmektedir. AD4 bileşeni ve AD6 bileşenleri de global spektrumdaki pike yakın bileşenler olarak model sonuçlarına olumlu katkıları olan bileşenlerdir. AD9 bileşeni ise global spektrumun sol tarafındaki bölgeye en yakın bileşen olarak AD5 bileşeni kadar olmasa bile modelde etkisi yüksek olarak görülmektedir

Genel olarak enerjideki artış ve azalışla ilgili olarak modellerin performanslarında orantılı olarak bir artış veya azalış söz konusudur. Fakat toplam enerjinin yanında bölgenin fiziksel karakterini göz önünde bulundurarak yapılan bileşen ilavesinin ve bileşen sayısının önemli olduğu görülmektedir. Neticede bir çok kombinasyonun ölçüm serisi modelinin çok altında enerji ve bileşen sayısı ile çok daha iyi performans sergilediği ortaya konulmuştur. Dalgacık dönüşümünün bileşenlere ayrıma ile zaman serilerinin modellenmesi gerek uygulayıcılar için gerekse bilimsel çalışmalarda yararlı ve pratik kullanılabilir bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan tekniğin geliştirilmesi için şu araştırılmaların yapılması yararlı olacaktır.,

1- Dönüşümde kullanılacak dalgacık türünün seçimidir. Bu konuda zaman serisinin tipi dalgacık seçiminde nasıl etkili olduğu değişik bölgelere ait çalışmalar ile incelenebilir. Ayrıca serinin tipine göre farklı dalgacık tipleri de önerilebilir.

2- Bölge karakterinin ortaya konulmasında bölgedeki diğer etkenler ile olan ilişkilerinin analiz edilmesi de modelleme çalışması için yararlı sonuçlar verir. Mesela yağış, sıcaklık, nem ve diğer etkenler eş zamanlı incelenebilir. Hatta bu değişkenlerin karşılıklı modellenmesi de söz konusu olabilir.

3- İncelenen bölgenin temel karakteristikleri çok daha uzun süreli ölçümler ile incelenirse temel karakterlerin ve geçici karakterlerin belirlenmesinde daha başarılı olunabilir.

4- Modellemede ayrık dalgacık dönüşümü sonuçlarının belirli ölçeklerde bileşenler üretmesi nedeniyle bazen istenilen bileşenin periyodu bileşenlerde rastlanılmayabilir. Bu durumda bileşenlerin seçimi ve eldesinde de literatürde rastlanan bazı tekniklerin kullanılarak ara ölçeklerdeki bileşenlerin elde edilmesine çalışılabilir. Mesela veri azaltmayan dalgacık paketleri tekniği kullanılarak ölçüm serilerinin bileşenlere ayrılması daha değişik ölçek aralıklarındaki bileşenlerin kullanılabilmesini sağlar. Bir diğer yol olarak da veri aralığının değiştirilmesi ile ölçeğin kaydırılması şeklindedir. Mesela 1'er günlük aralık yerine 3 günlük ortalanmış değerler, bir haftalık ortalanmış değerler veya aylık ortalanmış değerler kullanılarak örnek aralığı değiştirilmiş olur. Böylece 2. ölçek seviyesi 4 günlük periyot yerine 12 günlük, 28 günlük veya 4 aylık periyotlara karşı gelmiş olur. Bu durumda çözünürlüğün düşmesi analiz sonuçlarını da etkileyebilir. Bir başka düşünülebilecek yolda dalgacık paket dönüşümlerinin kullanılmasıdır. Bu dönüşüm yalnızca 2'nin katı ölçekleri elde etmez bunun yanında ara ölçeklerdeki bileşenlerde elde edilebilir.

Dalgacık dönüşümlerinin su kaynakları sahasında en çok kullanılabilecek özelliklerinden biride özellik çıkarımıdır. Özellikle kararlı olmayan davranış sergileyen akım serilerinin incelenmesinde dalgacık dönüşümü çok etkili bir yöntemdir. Akım serilerinin modellenmesinden önce incelenmesi veya her hangi bir su yapısı projelendirilmesinden önce uzun dönemli kayıtların dalgacık dönüşümünün çeşitli teknikleri ile ele alınması çok yararlı bilgiler edinilmesini sağlayacaktır. Eldeki ölçüm serisinin türü, uzunluğu, örnek aralığı ve değişimi dalgacık dönüşümünün kullanılmasını etkilemeyecek hemen her seri için analizler başarı ile kullanılabilecektir. Bu çalışmada da modelleme tekniği uygulanmadan önce akım serileri dalgacık dönüşümü kullanılarak incelenmiştir. Gerek kısa uzunluktaki kayıtlar gerekse uzun kayıtlar dalgacık dönüşümü kullanılarak başarı ile analiz edilmiştir. Akım serilerinin kısa aralıklı ölçümlerinin analizinde de yöntem başarı ile kullanılmıştır.

Sonuç olarak ilk defa bu çalışmada dalgacık dönüşümü tekniği, akarsu akım modellemelerinde kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tekniğin analiz gücü ve ayrık dalgacık dönüümü yardımıyla serinin değişik periyottaki bileşenlerinin elde edilmesi, modellemede yüksek bir başarım elde edilebilmesini sağlamıştır. Su kaynakları alanında, dalgacık dönüşümü tekniği kullanımının çok daha yararlı olabileceği yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

Addison, P., S., Murray, K., B., Watson, J., N., 2001. Wavelet Transform Analysis of Open Channel Wake Flows. *Journal of Engineering Mechanics*, **127 (1)**, 58-70.

Bayazıt, M., 1996. İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası. İTÜ, İstanbul.

Bayazıt, M., 1998. Hidrolojik modeller. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası. İTÜ, İstanbul.

Bayazıt, M., Aksoy, H., 2001. Using Wavelets for Data Generation. *Journal of Applied Statistics*, **28 (2)**, 157-166.

Bayazıt, M., Önöz, B., Aksoy, H., 2001. Nonparametric streamflow simulation by wavelet or Fourier analysis. *Hydrological Sciences*, **46** (4), 623-634.

Breaker, L., C., Liu, P., C., Torrence, C., 2001. Interseasonal oscillations in sea surface temperature, wind stress, and sea level off the central California coast. *Continent Shelf Research*, **21**, 727-750.

Cao, L., Hong, Y., Fang, H., He, G., 1995. Predicting Chaotic Time Series with Wavelet Networks. *Physica,* D. **85**, 225-238.

Daubechies, I., 1990. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, **36 (5)**, 961-1005.

Daubechies, I., 1996. Where do wavelets come from? – A personal point of view. *Proceedings of the IEEE*. **84 (4)**, 510-513.

Drago, A., F., Boxall, S., R., 2002. Use of the wavelet transform on hydro-meteorological data. *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**, 1387-1399.

Erlebacher, G., Hussaini, M., Y., Jameson., L., 1996. Wavelets Theory and Applications. Oxford University Press, New York, U.S.A.

Gaucherel, C., 2002. Use of wavelet transform for temporal characterisation of remote watersheds. *Journal of Hydrology*, **269**, 101-121.

Georgiou, E., F., Kumar, P., 1994. Wavelets in Geophysics. Academic Press Inc., California.

Grossman, A., Morlet, J., 1984. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math. Anal.*, **15**, 723-736.

Kilsby, C., G., Ewen, J., Sloan, W., T., Burton, A., Fallows, C., S., and O'Connell, P., E., 1999. The UP modeling system for large scale hydrology: simulation of the Arkansas-Red River basin. *Hydrology & Earth System Sciences*, **3 (1)**, 137-149.

Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E., 1993. A multicomponent Decomposition of Spatial Rainfall Fields 1. Segregation of Large- and Small-Scale Features Using Wavelet Transforms. *Water Resources Research*, **29(8)**, 2515-2532.

Küçük, M., Ağıralioğlu, N., 2003. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü Yardımıyla Durağan ve Durağan Olmayan Verilerin Analizi. *Üçüncü ulusal atmosfer bilimleri sempozyumu*, Mart, 19-21, İstanbul, s. 218-225.

Küçük, F., Küçük, M., Şeker, S., 2004. Veri şifreleme algoritmalarının dalgacık dönüşümü kullanılarak tasarlanması *IEEE, XII. Sinyal işleme ve iletişim uygulamaları kurultayı*. 28-30 Nisan, Çeşme, s. 485-488.

Küçük, M., Tiğli, E., Ağıralioğlu, N., 2004b. Wavelet Transform Analysis for Nonstationary Rainfall-Runoff-Temperature Processes. *Conference on Water Observation and Information System for Decision Support*, Ohrid, FY Republic of Macedonia 25-29 May, s. 1-11.

Küçük, M., Ağıralioğlu, N., 2004c. Kısa süreli Fourier ve sürekli dalgacık dönüşümü yardımıyla günlük akım verilerinin analizi. *IV ulusal hidroloji kongresi ve Hidrolojide yeni teknikler semineri*. İstanbul, 21-25 Haziran, s. 187-198.

Küçük, M., Toprak, F., Z., Kişi, Ö., 2004d. The Comparison of Generated Daily Stream Flow Data Using Wavelet and Markov Models. *BHS International Conference Hydrology: Science & Practice for the 21st Century*, London, UK, 12-16 July, s. A, 28-29.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A., 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, **238**, 149-178.

Lafreniere, M., Sharp, M., 2003. Wavelet Analysis of inter-annual variability in the runoff regimes of glacial and nival stream catchments, Bow Lake, Alberta. *Hydrological Processes*, **17**, 1093-1118.

Liu, P., C., 2000. Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes. Ocean Engineering, **27**, 1221-1230.

Luettich Jr., R., A., Carr, S., D., Reynolds-Fleming, J., V., Crystal, W., F., McNinch, J., E., 2002. Semi-diurnal seiching in a shallow, micro-tidal lagoonal estuary. *Continent Shelf Research*, **22**, 1669-1681.

Mallat, S., G., 1989. A Theory for Multiresoluion Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. **11** (7), 674-693.

Massel, S., R., 2001. Wavelet analysis for processing of ocean surface wave records. *Ocean Engineering*, **28**, 957, 987.

Meyer, Y., 1993. Wavelets Algorithms & Applications. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

Middleton, G., Wilcock, P., 1994. Mechanics in the Earth and Environmental Sciences. Cambridge University Press, Cambridge U.S.A.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J., 1997. Wavelet Toolbox User's Guide. The MathWorks, Inc.

Nason, G., P., Silverman, B., W., 1994. The Discrete Wavelet Transform in S. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, **3**, 163-191.

Nason, G., Sapatinas, T., 2002. Wavelet packet transfer function modelling of nonstationary time series. *Statistics and Computing*, **12**, 45-56.

Ohsaki, Y., 1991. Depram Dalgasını Spektral Analizine Giriş. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.

Panizzo, A., Bellotti, G., Girolamo, P., D., 2002. Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves. *Coastal Engineering*, **44**, 321-338.

Polikar, R., 1996. Wavelet Tutorial: Part I, Part II, Part III. Personal home pages. Iowa State University, U.S.A.

Polikar, R., 1999. The story of wavelets, *in Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering*, pp. 192-197. Mastorakis, N. World Scientific and Eng. Society Press.

Saco, P., Kumar, P., 2000. Coherent modes in multiscale variability of streamflow over the United States. *Water Resources Research*, **36 (4)**, 1049-1067.

Smith, L., C., Turcotte, D., L., Isacks, B., 1998. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. *Hydrological Processes*, **12**, 233-249.

Şeker, S., Ayaz, E., 2003. Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis. *Journal of the Franklin Institute*, **340**, 125-134.

Şen, Z., 1991. Adaptive prediction of hydrological series by Walsh-Kalman model. *Journal of Hydrology*, **122**, 221-234.

Şen, Z., 2002. İstatistik veri işleme yöntemleri. Su vakfı yayınları, İstanbul.

Torrence, C., Compo, G., P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of The American Meteorology Society*, **79 (1)**, 61-78.

Uncles, R., J., 2002. Estuarine Physical Processes Research: Some Recent Studies and Progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**, 829–856

Venugopal, V., Foufoula-Georgiou, E., 1996. Energy decomposition of rainfall in the time-frequency-scale domain using wavelet packets. *Journal of Hydrology*, **187**, 3-27.

Wickerhauser, M., L., Farge, M., vd., 1994. Efficiency comparison of wavelet packet and adapted local cosine bases for compression of a two-

dimensional turbulent field, *in Wavelets: Theory, Algorithms and Applications,* pp. 509-531, Eds. Chui, C.K., Montefusco, L., and Puccio, L., Academic Press, New York.

Whitcher, B., Byers, S. D., Guttorp, P., and Percival, D. B., 2002. Testing for Homogeneity of Variance in Time Series: Long Memory, Wavelets and the Nile River. *Water Resources Research*, **38 (5),** 1-16.

Yüksel, Y., 1999. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Hidrolik. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayım Merkezi, İstanbul.

EK-A

##mw
MALLAT'IN KULLANDIĞI DALGACIKLAR KULLANILARAK, İKİLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İÇİN KULLANILAN R DİLİNDE YAZILMIŞ PROGRAM

Programda kullanılan girdi değişkenleri ve tanımları aşağıda ifade edildiği gibidir.

inputdata: Girilecek zaman serisi veya vektör

maxresoln: ayrıştırma seviyesi

filtername: kullanılacak filtrenin adı (Mallat ve Zhong dalgacıkları için "Gaussian1" şeklinde yada "Haar" dalgacığı şeklinde giriş yapılabilir.

scale: Eğer "TRUE" argümanı kullanılırsa dalgacık dönüşümü çizimleri her seviyede aynı çizim ölçeği ile gösterilecektir. Eğer "FALSE" ise şekiller aldıkları değerlere uygun ölçeklerde çizileceklerdir.

plot: Her seviyedeki dalgacık dönüşümü bileşenlerinin gösterilebilmesini sağlar. (Şekil 4.3)

Programda kullanılan çıktı değişkenleri ve tanımları aşağıda ifade edildiği gibidir.

original: Orijinal işaret, zaman serisi veya vektör.

Wf: İşaretin ikili dalgacık dönüşümü

Sf: İşaretin çok çözünürlüklü bileşenlerinden yaklaşıklık (süzgeçlenmiş) bileşeni.

maxresoln: Ayrışma ölçeği sayısı

np: İşaretin uzunluğu

```
function (inputdata, maxresoln, filtername ="Gaussian1", scale =FALSE,
  plot =TRUE)
{
  x <- adjust.length(inputdata)
  s <- x$signal
  np <- x$length
  Sf <- matrix(0, nrow =(maxresoln +1), ncol =np)
  Wf <- matrix(0, nrow =maxresoln, ncol =np)
  Sf <- t(Sf)
  dim(Sf) <- c(length(Sf), 1)
  Wf <- t(Wf)
```

```
  dim(Wf) <- c(length(Wf), 1)
  y <- .C("Sf_compute", Sf =as.single(Sf), as.single(s), as.integer(maxresoln),
    as.integer(np), as.character(filtername))
  z <- .C("Wf_compute", Wf =as.single(Wf), as.single(y$Sf),
    as.integer(maxresoln), as.integer(np), as.character(filtername))
  Sf <- t(y$Sf)
  Sf <- Sf[(maxresoln * np +1):((maxresoln +1) * np)]
  Wf <- t(z$Wf)
  dim(Wf) <- c(np, maxresoln)
  if (plot)
    plotwt(s, Wf, Sf, maxresoln, scale)
  list(original =s, Wf =Wf, Sf =Sf, maxresoln =maxresoln,
    np =np)
}
```

##mra

ÇOK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ AYRIŞIM İÇİN KULLANILAN R DİLİNDE YAZILMIŞ PROGRAM.

Programda kullanılan girdi değişkenleri ve tanımları aşağıdaki gibidir:

x: x değişkeni bileşenlerine ayrılacak bir vektör veya zaman serisidir. Ayrık dalgacık dönüşümü tekniğine göre x, 2'nin bir üstü şeklinde verilmelidir (2^1, 2^2, 2^3...gibi).

wf: Bileşenlere ayırmada kullanılacak dalgacık filtresinin adıdır. Burada ön değer olarak "la8" alınmıştır. la8 ortonormal (birim dikgen) tabanlı ve uzunluğu L=8 olan Daubechies dalgacık ailesindeki asimetrik grubuna giren dalgacıktır.

J: Bileşenlere ayırmanın seviyesidir. Bu sayı *log(length(x),2)*.değerine eşit veya ondan küçük olmalıdır (ön değer 4 alınmıştır).

method: Bileşenlere ayırmada kullanılacak ayrık dalgacık dönüşümünün türünü belirtir. Burada iki alternatif vardır. Birincisi **"dwt"** (ayrık dalgacık dönüşümü) kullanılabilir. İkinci olarak **"modwt"** (en yüksek örtüşmeli ayrık dalgacık dönüşümü) metodudur. Bu fonksiyon örnek seyreltmeyen ayrık dalgacık dönüşümünü (non-decimated discrete wavelet transform) kullanır. Ters dönüşüm bir vektörün yada bir zaman serisinin yeniden oluşturulmasını (geri çatıma) "en yüksek örtüşmeli ayrık dalgacık dönüşümü" kullanarak gerçekleştirir. Metotta kullanılan vektörün veya zaman serisinin ikinin üstü olması gibi bir sınırlama yoktur. Kullanılan ayrık dalgacık dönüşümleri alt programlar olarak kullanılmış ve aşağıda verilmiştir.

boundary: Karakter şeklinde girilerek sınır şartını belirler. Eğer "**periodic**" girilirse girilen vektör tanımlanan aralıkta periyodik kabul edilir. Eğer "**reflection**" girilirse vektör sınırlarının ötesine simetrik bir yansıma yaptığı kabul edilir.

Program çıktılarında değişken olarak atanan değerler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

D: Dalgacık detay vektörleri

S: Dalgacık yaklaşıklık (süzgeçlenmiş) vektörü

wavelet: Filtrelemede kullanılan dalgacığın adı

boundary: Girilen sınır şartının adı

```
function (x, wf ="la8", J =4, method ="modwt", boundary ="periodic")
{
  switch(boundary, reflection =x <- c(x, rev(x)), periodic =invisible(),
    stop("Invalid boundary rule in mra"))
  n <- length(x)
  if (method =="modwt")
    x.wt <- modwt(x, wf, J, "periodic")
  else x.wt <- dwt(x, wf, J, "periodic")
  x.mra <- vector("list", J +1)
  zero <- vector("list", J +1)
  names(zero) <- c(paste("d", 1:J, sep =""), paste("s", J,
    sep =""))
  class(zero) <- method
  attr(zero, "wavelet") <- wf
  attr(zero, "boundary") <- boundary
  zero[[J +1]] <- x.wt[[J +1]]
  if (method =="modwt") {
    for (k in 1:J) zero[[k]] <- numeric(n)
    x.mra[[J +1]] <- imodwt(zero)
  }
  else {
    for (k in 1:J) zero[[k]] <- numeric(n/2^k)
    x.mra[[J +1]] <- idwt(zero)
  }
  for (j in J:1) {
    zero <- vector("list", j +1)
    names(zero) <- c(paste("d", 1:j, sep =""), paste("s",
      j, sep =""))
    class(zero) <- method
    attr(zero, "wavelet") <- wf
    attr(zero, "boundary") <- boundary
    zero[[j]] <- x.wt[[j]]
    if (method =="modwt") {
      if (j !=1) {
        for (k in c(j +1, (j - 1):1)) zero[[k]] <- numeric(n)
      }
      else {
        zero[[j +1]] <- numeric(n)
      }
      x.mra[[j]] <- imodwt(zero)
    }
    else {
```

```
        zero[[j +1]] <= numeric(n/2^j)
        if (j !=1) {
          for (k in (j - 1):1) zero[[k]] <= numeric(n/2^k)
        }
        x.mra[[j]] <= idwt(zero)
      }
    }
    names(x.mra) <= c(paste("D", 1:J, sep =""), paste("S", J,
      sep =""))
    if (boundary =="reflection") {
      for (j in (J +1):1) x.mra[[j]] <= x.mra[[j]][1:(n/2)]
      return(x.mra)
    }
    else {
      return(x.mra)
    }
}
```

##dwt (ALT PROGRAM)
EN YÜKSEK ÖRTÜŞMELİ AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İÇİN KULLANILAN R DİLİNDE YAZILMIŞ PROGRAM

Programda kullanılan girdi değişkenleri ve tanımları aşağıdaki gibidir:

x, wf, boundary değişkenleri yukarıda tanımlandığı gibi olup,

n.levels yerine yukarıda tanımlanan **J** sayısı girilmelidir (ön değer 4 alınmıştır).

Program çıktı değişkenleri yukarıda tanımlandığı gibidir.

```
function (x, wf ="la8", n.levels =4, boundary ="periodic")
{
  switch(boundary, reflection =x <= c(x, rev(x)), periodic =invisible(),
    stop("Invalid boundary rule in dwt"))
  N <= length(x)
  J <= n.levels
  if (N/2^J !=trunc(N/2^J))
    stop("Sample size is not divisible by 2^J")
  if (2^J >N)
    stop("wavelet transform exceeds sample size in dwt")
  dict <= wave.filter(wf)
  L <= dict$length
  storage.mode(L) <= "integer"
  h <= dict$hpf
  storage.mode(h) <= "double"
  g <= dict$lpf
  storage.mode(g) <= "double"
  y <= vector("list", J +1)
  names(y) <= c(paste("d", 1:J, sep =""), paste("s", J, sep =""))
  for (j in 1:J) {
    W <= V <= numeric(N/2^j)
    out <= .C("dwt", as.double(x), as.integer(N/2^(j - 1)),
```

```
        L, h, g, W =as.double(W), V =as.double(V))[6:7]
      y[[j]] <- out$W
      x <- out$V
    }
    y[[J +1]] <- x
    class(y) <- "dwt"
    attr(y, "wavelet") <- wf
    attr(y, "boundary") <- boundary
    return(y)
}
```

##modwt (ALT PROGRAM)
EN YÜKSEK ÖRTÜŞMELİ AYRIK DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İÇİN
KULLANILAN R DİLİNDE YAZILMIŞ PROGRAM

Programda kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri ve tanımları yukarıda ifade edildiği gibidir.

```
function (x, wf ="la8", n.levels =4, boundary ="periodic")
{
  switch(boundary, reflection =x <- c(x, rev(x)), periodic =invisible(),
    stop("Invalid boundary rule in modwt"))
  N <- length(x)
  storage.mode(N) <- "integer"
  J <- n.levels
  if (2^J >N)
    stop("wavelet transform exceeds sample size in modwt")
  dict <- wave.filter(wf)
  L <- dict$length
  storage.mode(L) <- "integer"
  ht <- dict$hpf/sqrt(2)
  storage.mode(ht) <- "double"
  gt <- dict$lpf/sqrt(2)
  storage.mode(gt) <- "double"
  y <- vector("list", J +1)
  names(y) <- c(paste("D", 1:J, sep =""), paste("S", J, sep =""))
  W <- V <- numeric(N)
  storage.mode(W) <- "double"
  storage.mode(V) <- "double"
  for (j in 1:J) {
    out <- .C("modwt", as.double(x), N, as.integer(j), L,
      ht, gt, W =W, V =V)[7:8]
    y[[j]] <- out$W
    x <- out$V
  }
  y[[J +1]] <- x
  class(y) <- "modwt"
  attr(y, "wavelet") <- wf
  attr(y, "boundary") <- boundary
  return(y)
}
```

ÖZGEÇMİŞ

Murat KÜÇÜK, 1974 Erzurum/Aşkale doğumlu. İlk, orta ve lise tahsilini Erzurum'da tamamladı. 1990 yılında Erzurum lisesinden mezun oldu. 1996 yılında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1998 yılında Atatürk Üniversitesin de araştırma görevlisi oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı. 1999 yılında araştırma görevlisi kadrosu 2547-35 gereğince İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne atandı. 2000 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su mühendisliği programında doktora eğitimine başladı. 1999 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Hidrolik ABD'da araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.