

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOĞAZİÇİ KÖPRÜSÜ HAREKETLERİNİN
İZLENMESİ, ANALİZİ VE MODELLENMESİ**

Jeodezi ve Fotogrametri Yük. Müh. Ercenk ATA

**FBE Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Anabilim Dalı Geomatik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 27 Ekim 2009

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ömer AYDIN (YTÜ)

Juri Üyeleri : Prof.Dr.Tevfik AYAN (İTÜ)

: Doç.Dr.Engin GÜLAL (YTÜ)

: Prof.Dr.Rasim DENİZ (İTÜ)

: Doç.Dr.Halil ERKAYA (YTÜ)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖNSÖZ	xvii
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ	1
2. ASMA KÖPRÜLER, TEMEL ÖZELLİKLERİ VE ELEMANLARI	3
2.1 Ankrajlar	4
2.2 Kuleler	4
2.3 Kablolar	5
2.4 Askı Halatları	5
2.5 Tabliye	6
2.6 Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler	6
2.6.1 Sıcaklığın Etkisi	6
2.6.2 Rüzgarın Etkisi	7
2.6.3 Trafik Yükünün Etkisi	8
2.7 Asma Köprülerde Periyodik Bakımın Önemi	9
2.8 Boğaziçi Köprüsü	9
3. ASMA KÖPRÜ HAREKETLERİNİN İNCELENMESİNDE GPS	11
3.1 GPS (Global Positioning System)	11
3.2 Real Time Kinematic GPS (RTK – GPS)	12
3.2.1 RTK GPS Çalışma Prensipleri ve Algoritması	12
3.2.1.1 OTF (On The Fly) Tekniği	13
3.2.1.2 Düzeltmelerin Hesaplanması ve Yayınlanması	14
3.2.1.3 RTK – GPS Sisteminin Doğruluğu	15
3.3 Mühendislik Yapılarının GPS ile İzlenmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar	15
3.4 Obje Noktalarındaki GPS Ölçümleri İçin Örnekleme Aralığının Seçimi	18
3.5 GPS ile Veri Toplamada NMEA Formatı	19
4. SÜREKLİ VERİLERİN MODELLENMESİNDE DALGACIK ANALİZİ	20
4.1 Fourier Dönüşümü	20
4.1.1 Ayırık Fourier Dönüşümleri	22
4.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümleri	23

4.1.3	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü	26
4.2	Dalgacık Dönüşümü	29
4.2.1	Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)	30
4.2.2	Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD)	34
4.2.3	Sinyallerin Ayırıştırılması	35
4.2.4	Çoklu Çözünürlük Analizi (ÇÇA)	37
4.2.5	Sinyalin Yeniden Elde Edilmesi	41
4.2.6	Dalgacık Fonksiyonları	42
5.	ARAŞTIRMA BULGULARI	47
5.1	Boğaziçi Köprüsü'nde GPS Ölçülerinin Yapılması	47
5.1.1	Kontrol Ağı ve Obje Noktalarının Belirlenmesi	48
5.1.2	Obje Noktalarının Ölçümü	48
5.1.2.1	Ölçü Donanımının Yerleştirilmesi	49
5.1.2.2	Beylerbeyi ve Ortaköy Kule Noktalarına Ölçü Donanımlarının Yerleştirilmesi ..	50
5.1.2.3	Güney Orta Tabliye Noktasına Ölçü Donanımlarının Yerleştirilmesi	52
5.2	Ölçülerin Analize Hazırlanması	53
5.2.1	Köprü Koordinat Sisteminin Oluşturulması	53
5.2.2	Etki Büyüklüklerinin Belirlenmesi	56
5.2.2.1	Rüzgar Kuvveti	56
5.2.2.2	Trafik Yüğü	59
5.2.2.3	Sıcaklık Değişimi	61
5.2.3	Verilerin Filtrelmesi	62
5.2.4	Verilerin İstenen Kayıt Aralıklarında Yeniden Elde Edilmesi ve Trend Analizi ..	62
5.3	Köprü Kule ve Tabliye Hareketlerinin Geometrik Olarak İncelenmesi	66
5.3.1	Kule Hareketlerinin İncelenmesi	66
5.3.1.1	Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Yanal (Y) Hareketlerinin İncelenmesi	66
5.3.1.2	Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerin Açıklık Doğrultusundaki (X) Hareketlerinin İncelenmesi	67
5.3.1.3	Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Düşey Doğrultudaki Hareketlerinin İncelenmesi	69
5.3.2	Ortaköy Kule Hareketlerinin Dış Yüklerle Olan İlişkilerinin İncelenmesi	70
5.3.2.1	Ortaköy Kule 'Y' Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi	70
5.3.2.2	Ortaköy Kule 'X' Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi	74
5.3.2.3	Ortaköy Kule Düşey 'H' Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi	78
5.3.3	Beylerbeyi Kule Hareketlerinin Dış Yüklerle Olan İlişkilerinin İncelenmesi	82
5.3.3.1	Beylerbeyi Kule Yanal 'Y' Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi ..	82
5.3.3.2	Beylerbeyi Kule 'X' Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi	85
5.3.3.3	Beylerbeyi Kule Düşey (H) Hareketinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi	89
5.3.4	Tabliye Hareketlerinin İncelenmesi	93
5.4	Köprü Kule Hareketlerinin Dalgacık Analizi ile İncelenmesi	97
5.4.1	Ayrık Dalgacık Analizi ile İnceleme	97
5.4.1.1	Ortaköy Ve Beylerbeyi Kuleleri Yanal Hareketlerinin (Y) İncelenmesi	98
5.4.1.2	Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Açıklık Doğrultusundaki (X) Hareketlerinin İncelenmesi	100
5.4.1.3	Ortaköy Ve Beylerbeyi Kulelerinin Düşey (H) Hareketlerinin İncelenmesi	102
5.5	Köprü Kule Hareketlerinin Dalgacık Dönüşümüyle Modellenmesi	104
5.5.1	Köprü Kule Hareketlerinin Birbirleri ve Dalgacık Dönüşümünden Elde Edilen Bileşenleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi	105
5.5.2	Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak Köprüye Etkiyen Büyüklüklerle Köprü Hareketlerinin Modellenmesi	108

5.5.2.1	İleriye Yönelik Tahminler İçin Köprü Kuleleri Yanal (Y) Hareketlerinin Dalgacık Analizi İle Modellenmesi	109
5.5.2.2	Kullanılmayan Verilerler Kullanılarak Kule Hareketlerinin Dalgacık Analizi İle Modellenmesi	123
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	132
	KAYNAKLAR.....	135
	EKLER	139
	Ek 1 Verilerin Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile bileşenlerine ayrılmasında kullanılan Matlab komutları.....	139
	Ek 2 Beylerbeyi kule Y değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	141
	Ek 3 Ortaköy kule Y değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.....	145
	Ek 4 Beylerbeyi kule X değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	149
	Ek 5 Beylerbeyi kule Y değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	153
	Ek 6 Ortaköy kule Y değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	157
	Ek 7 Beylerbeyi kule X değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	161
	Ek 8 Ortaköy kule X değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.	165
	ÖZGEÇMİŞ.....	169

SİMGE LİSTESİ

Δ	Örnekleme Aralığı
C	Basınç Katsayısı
c_{Ai}	Yaklaşıklık Katsayıları
c_{Di}	Detay Katsayıları
C_ψ	Kabul Edilebilirlik Sabiti
db	Daubechies Wavelets
dl	Çeliğin Uzama-Kısalma Miktarı
$\phi(t)$	Ölçeklendirme Fonksiyonu
$F(W)$	Fourier Dönüşümü
F_a	Belirlenmek İstenen Frekans
F_c	Merkez Frekans
G	Rüzgar Tepki Katsayısı
$g[n]$	Band Geçiren Filtrenin İmpuls Cevabı
$h[n]$	Alçak Geçiren Filtrenin İmpuls Cevabı
K	Rüzgar Basınç Katsayısı
lb	Çeliğin Uzunluğu
R^2	Belirlilik Katsayısı
s	Ölçeklendirme Parametresi
w	Rüzgar Kuvveti
ψ	Ana Dalgacık Fonksiyonu
α	Isı Genleşme Katsayısı
Δt_s	Sıcaklık Farkı
$\psi_{s,u}$	Baz Fonksiyonu (Dalgacık)

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolları ve Taşımacılık İdareleri Birliği
ADD	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
ÇÇA	Çok Çözünürlüklü Analiz
DD	Dalgacık Dönüşümü
DGPS	Diferansiyel GPS
EDM	Elektronik Uzunluk Ölçer
FD	Fourier Dönüşümü
GPS	Global Konumlama Sistemi
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
NMEA	National Marine Electronics Association
RMS	Karesel Ortalama Hata
RTK-GPS	Gerçek Zamanlı Kinematik GPS
SDD	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
TCK	Türkiye Cumhuriyeti Karayolları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü Kurumu
TUTGA	Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Asma köprülerin çalışma prensibi (Karataş, 1979).....	3
Şekil 2.2 Ankraj bloğu ve köprü bileşenleri (Harazaki, 2000).....	4
Şekil 2.3 Kule semer sistemi detayı (Cengizoğlu, 2006)	5
Şekil 2.4 Tabliyenin oluşturulması.....	6
Şekil 2.5 Boğaziçi Köprüsü'nün genel görünümü.....	10
Şekil 3.1. OTF tekniğinin algoritması	14
Şekil 3.2. Düzeltmelerin üretilmesi ve aktarılması (Ata, 2001)	15
Şekil 3.3. Yeterli sayıda örneklenmiş sinyal	18
Şekil 3.4. Yetersiz sayıda örneklenmiş sinyal	19
Şekil 4.1 Fourier ve Dalgacık dönüşümlerinin hesaplama mantığı.....	21
Şekil 4.2 $y(t)$ sinyalinin güç spektrumu	24
Şekil 4.3 $x(t)$ sinyalinin güç spektrumu	24
Şekil 4.4 $y(t)$ sinyalinin zaman-genlik spektrumu	25
Şekil 4.5 $x(t)$ sinyalinin zaman-genlik spektrumu	25
Şekil 4.6 Kısa süreli Fourier dönüşümü	26
Şekil 4.7 $y(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 32).....	27
Şekil 4.8 $x(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 32).....	27
Şekil 4.9 $y(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 512).....	28
Şekil 4.10 $x(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 512).....	28
Şekil 4.11 Kısa süreli Fourier dönüşüm blokları (sabit zaman-frekans çözünürlüğü)	29
Şekil 4.12 Farklı ölçek değerleri için zaman-genlik grafikleri.....	31
Şekil 4.13 Dalgacık dönüşümü ile çok seviyeli ayrıştırılma işleminin akış diyagramı.....	33
Şekil 4.14 Dalgacık dönüşümü ile çok seviyeli olarak ayrıştırma	34
Şekil 4.15 Ana Dalgacık fonksiyonunun ölçeklendirilmesi ile elde edilen baz fonksiyonlarının spektrumları	36
Şekil 4.16 Sinyal spektrumunun sonlu sayıda baz fonksiyonu spektrumu ile kaplanması	37
Şekil 4.17 Filtre kümesi ile sinyal spektrumun frekans bandlarına ayrılması (Arı vd., 2008). 38	
Şekil 4.18 Ayırık Dalgacık dönüşümün herhangi bir seviyesinde uygulanan adımlar.....	39
Şekil 4.19 Mallat algoritması yardımıyla ayırık sinyalin alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılması (Toprak, 2007)	40
Şekil 4.20 Ayrıştırılmış bir sinyalin yaklaşık ve detay bileşenleri ile oluşturulması	41
Şekil 4.21 Bir s sinyalinin ayrıştırılması ve geriçatılması	42

Şekil 4.22 $y(t)$ sinyalinin 4.seviye ayrık Dalgacık dönüşümü (db8 - 4).....	43
Şekil 4.23 $y(t)$ sinyali ve bu sinyalin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen katsayılardan yeniden oluşturulması ile edilen geriçatılmış sinyalin zaman-genlik gösterimleri	44
Şekil 4.24 $x(t)$ sinyalinin db8 ile 4.seviye ayrık Dalgacık dönüşümü	45
Şekil 4.25 $x(t)$ sinyali ve $x(t)$ sinyalinin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen katsayılardan geriçatılması ile oluşturulan sinyalin zaman-genlik gösterimleri	46
Şekil 5.1 Kontrol ve obje noktaları.....	48
Şekil 5.2 RTK-GPS referans alıcısı.....	49
Şekil 5.3 RTK-GPS verici modem anteni	50
Şekil 5.4 Beylerbeyi kule B1 numaralı obje noktası	51
Şekil 5.5 Beylerbeyi kule B1 numaralı obje noktasındaki GPS ve modem anteni	51
Şekil 5.6 Beylerbeyi kule içine yerleştirilen GPS alıcısı ve bilgisayar donanımı	51
Şekil 5.7 Güney orta tabliyedeki T1 numaralı obje noktası	52
Şekil 5.8 T1 numaralı noktadaki GPS ve modem anteni.....	52
Şekil 5.9 T1 numaralı noktadaki GPS alıcısı ve bilgisayar donanımı.....	52
Şekil 5.10 Beylerbeyi kulede UTM sisteminde toplanan konum bilgilerinin <i>Sağa</i> değerleri..	53
Şekil 5.11 Beylerbeyi kulede UTM sisteminde toplanan konum bilgilerinin <i>Yukarı</i> değerleri	53
Şekil 5.12 Beylerbeyi kule yükseklik değerleri.....	54
Şekil 5.13 Köprü yerel koordinat sisteminin genel görünümü (a) ile sistemin başlangıç noktası olan Beylerbeyi kulenin ayrıntılı görünümü (b)	55
Şekil 5.14 Ölçü tarihlerindeki rüzgar hızının zaman göre değişimi	57
Şekil 5.15 Boğaziçi Köprüsü kulelerine etkiyen toplam rüzgar kuvveti (kayıt aralığı 1sn)...	57
Şekil 5.16 Boğaziçi Köprüsü'nü etkileyen rüzgar yönleri	58
Şekil 5.17 Boğaziçi Köprüsü kulelerine X yönünde etkiyen rüzgar kuvveti	59
Şekil 5.18 Boğaziçi Köprüsü kulelerine Y yönünde etkiyen rüzgar kuvveti	59
Şekil 5.19 Sınıf ağırlıklarına ve geçen araç sayısına göre hesaplanan trafik yükü	60
Şekil 5.20 Ölçü süresince köprüden geçen araç sayısı	61
Şekil 5.21 Sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişim grafiği	61
Şekil 5.22 2 dk kayıt aralıklı 1 haftalık araç sayısı (a), sıcaklık (b) ve rüzgar hızı (c_1, c_2) verilerine ait lineer trend grafikleri.	64
Şekil 5.23 2 dk kayıt aralıklı 1 haftalık veriler ve lineer trend grafikleri. Beylerbeyi kule (1) ve Ortaköy kule (2) obje noktalarındaki Y koordinat bileşeni (a), X koordinat bileşeni (b) ve yükseklik bileşenlerinin (c) lineer trendleri.	65

Şekil 5.24 Beylerbeyi ve Ortaköy kule ‘Y’ verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	66
Şekil 5.25 Beylerbeyi ve Ortaköy kule ‘X’ verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	68
Şekil 5.26 Beylerbeyi ve Ortaköy kule ‘H’ verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	70
Şekil 5.27 Ortaköy kule ‘Y’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	71
Şekil 5.28 Ortaköy kule ‘Y’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	72
Şekil 5.29 Ortaköy kule ‘Y’ ile rüzgar hızı Y bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	74
Şekil 5.30 Ortaköy kule ‘X’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	75
Şekil 5.31 Ortaköy kule ‘X’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	76
Şekil 5.32 Ortaköy kule ‘X’ ile rüzgar hızı X bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	77
Şekil 5.33 Ortaköy kule ‘H’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	79
Şekil 5.34 Ortaköy kule ‘H’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	80
Şekil 5.35 Ortaköy kule ‘H’ ile rüzgar hızı Y bileşeni (a), rüzgar hızı X bileşeni (c) zaman genlik gösterimi, bunlara ait çapraz korelasyon katsayılar grafiği (b) ve (d) ile Ortaköy H ve rüzgar hızı X ve Y bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları (e) ve (f)	81
Şekil 5.36 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)....	82
Şekil 5.37 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi(a), çapraz korelasyon katsayıları(b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d).....	83
Şekil 5.38 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile rüzgar hızı Y bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d).....	85
Şekil 5.39 Beylerbeyi kule ‘X’ ile sıcaklık verilerine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) Beylerbeyi X ve (d) sıcaklık bileşenlerine ait	

frekans – güç spektrumları.....	86
Şekil 5.40 Beylerbeyi kule ‘X’ ile araç sayısına ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi X ve araç sayısı bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları	87
Şekil 5.41 Beylerbeyi kule ‘X’ ile rüzgar hızı X bileşenine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi X ve rüzgar hızı X bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları	88
Şekil 5.42 Beylerbeyi kule ‘H’ ile Sıcaklık verilerine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) frekans – güç spektrumları	90
Şekil 5.43 Beylerbeyi kule düşey hareketi ile araç sayısına ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi H ve araç sayısı bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları	91
Şekil 5.44 Beylerbeyi kule düşey hareketi ile rüzgar hızı Y bileşeni (a1), rüzgar hızı X bileşeni (b1) zaman genlik gösterimi, bunlara ait çapraz korelasyon katsayılar grafiği (a2, b2) ve güç spektrumları (c1) ve (c2)	92
Şekil 5.45 3, 4 ve 5 Haziran 2006 tarihlerindeki köprüden geçen araç sayısı tabliye düşey hareketleri arasındaki ilişki	95
Şekil 5.46 6, 7 ve 8 Haziran 2006 tarihlerindeki köprüden geçen araç sayısı tabliye düşey hareketleri arasındaki ilişki	96
Şekil 5.47 Beylerbeyi kule ‘Y’ (a) ve Ortaköy kule ‘Y’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri.....	98
Şekil 5.48 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule ‘Y’ verisinin dalgacık analizi ile elde edilen 9. (a) ve 8. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule ‘Y’ verisinin 9. (c) ve 8. (d) bileşenleri	99
Şekil 5.49 Beylerbeyi kule ‘X’ (a) ve Ortaköy kule ‘X’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri.....	101
Şekil 5.50 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule ‘X’ verisinin dalgacık analizi ile elde edilen 9. (a) ve 8. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule ‘X’ verisinin 9. (c) ve 8. (d) bileşenleri	102
Şekil 5.51 Beylerbeyi kule ‘H’ (a) ve Ortaköy kule ‘H’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri.....	103
Şekil 5.52 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule ‘H’ verisinin 9. (a) ve 11. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule ‘H’ verisinin 9. (c) ve 11. (d) bileşenleri	104
Şekil 5.53 Beylerbeyi-Y değeri ile Ortaköy Y - detay bileşenleri arasında en yüksek, orta ve	

en düşük korelasyona sahip olanlar	106
Şekil 5.54 Ortaköy-Y değeri ile Beylerbeyi Y - detay bileşenleri arasında en yüksek, orta ve en düşük korelasyona sahip olanlar	107
Şekil 5.55 Beylerbeyi kule Y hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı Y (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri.....	109
Şekil 5.56 Beylerbeyi kule Y hareketi için oluşturulan 9. (a1), 10.(b1) ve 11. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	112
Şekil 5.57 Ortaköy kule Y hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar Y (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri	113
Şekil 5.58 Ortaköy kule Y hareketi için oluşturulan 9. (a1), 10.(b1) ve 11. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	116
Şekil 5.59 Beylerbeyi kule X hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı-X (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri.....	117
Şekil 5.60 Beylerbeyi kule X hareketi için oluşturulan 8 (a1), 9 (b1) ve 10. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	119
Şekil 5.61 Ortaköy kule X hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı-X (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri.....	120
Şekil 5.62 Ortaköy kule X hareketi için oluşturulan 7 (a1), 9 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	122
Şekil 5.63 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	125
Şekil 5.64 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	127
Şekil 5.65 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	129
Şekil 5.66 Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	131

Şekil Ek 2.1 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	141
Şekil Ek 2.2 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	142
Şekil Ek 2.3 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	143
Şekil Ek 2.4 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 10. (a1) ve 11. modeller (b1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin (a2) ve (b2) gerçek değerlerle karşılaştırılması	144
Şekil Ek 3.1 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	145
Şekil Ek 3.2 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	146
Şekil Ek 3.3 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	147
Şekil Ek 3.4 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 9. (a1) ve 10.(b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2) ve (b2)	148
Şekil Ek 4.1 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	149
Şekil Ek 4.2 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	150
Şekil Ek 4.3 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)	151
Şekil Ek 4.4 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 10. (a1) ve 11. modeller (b1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2))	152

Şekil Ek 5.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	153
Şekil Ek 5.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	154
Şekil Ek 5.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	155
Şekil Ek 5.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2).....	156
Şekil Ek 6.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	157
Şekil Ek 6.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	158
Şekil Ek 6.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	159
Şekil Ek 6.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2).....	160
Şekil Ek 7.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	161
Şekil Ek 7.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	162
Şekil Ek 7.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	163
Şekil Ek 7.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek	

değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2).....	164
Şekil Ek 8.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	165
Şekil Ek 8.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	166
Şekil Ek 8.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2).....	167
Şekil Ek 8.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2).....	168

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri (Erdoğan, 2006).....	8
Çizelge 4.1 Dalgacık fonksiyonları	42
Çizelge 5.1 B1 ve O1 obje noktalarının köprü koordinat sisteminde özet konum bilgileri	56
Çizelge 5.2 Farklı filtre derecelerine göre anlamlı alçak frekanslardaki değişimler	62
Çizelge 5.3 2dk kayıt aralıklı dış yük verilerinin trend analizine ait istatistiksel veriler	63
Çizelge 5.4 Haftalık 2dk kayıt aralıklı koordinat verilerinin trend analizine ait istatistiksel veriler	64
Çizelge 5.5 Tabliyede ölçü süresi boyunca toplanan verilere ait özet bilgi	93
Çizelge 5.6 Beylerbeyi ve Ortaköy kule Y koordinatları için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri	99
Çizelge 5.7 Beylerbeyi ve Ortaköy kule X koordinatları için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri	101
Çizelge 5.8 Beylerbeyi ve Ortaköy kule H değerleri için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri	103
Çizelge 5.9 Beylerbeyi-Y değeri ile Ortaköy Y - detay bileşenleri ve Ortaköy-Y değeri ile Beylerbeyi - Y detay bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	105
Çizelge 5.10 Beylerbeyi kule Y hareketinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları.....	111
Çizelge 5.11 Detay bileşenlerinden elde edilen her bir model için hesaplanan model katsayıları ve standart sapmaları	113
Çizelge 5.12 Ortaköy kule Y hareketinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik değeri ve karesel ortalama hatalar.....	114
Çizelge 5.13 Ortaköy kule Y hareketine ait her bir model için hesaplanan model katsayıları ve standart sapmaları	115
Çizelge 5.14 Beylerbeyi kule -X hareketlerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları.....	118
Çizelge 5.15 Ortaköy kule -X hareketlerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları.....	121
Çizelge 5.16 Beylerbeyi kule Y değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama	

hataları.....	124
Çizelge 5.17 Ortaköy -Y değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları	126
Çizelge 5.18 Beylerbeyi kule -X değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları.....	128
Çizelge 5.19 Ortaköy kule -X değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları.....	130

ÖNSÖZ

Bu Tez çalışması Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü ile Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörlüğü arasında 3 yıllığına imzalanan 2003-B-17-007 numaralı protokolün izni ve YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

Akademisyenliğe başladığımdan beri çok uzun yıllardır danışmanlığımı yapan ve bu tez çalışmamın da yürütücülüğünü gerçekleştiren, benden her türlü ilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ömer AYDIN' a göstermiş olduğu samimiyet, yakınlık ve hoşgörü için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının başından beri fikir, düşünce ve yönlendirmeleriyle tezin gidişatına yön vermemde yardımcı olan, aynı zamanda tez izleme jürisinde de bulunan hocam Sayın Doç. Dr. Engin Güral' a teşekkür ederim.

İsmen kendisini yıllardır tanıdığım ancak tez izleme jürisinde bulunması vesilesi ile ilk kez yüz yüze tanışma fırsatı bulduğum, her akademisyenin örnek alabileceği bir insan olduğuna inandığım Sayın Prof. Dr. Tevfik AYAN' a çok teşekkür ederim.

Boğaziçi Köprüsü gibi büyük bir yapıya ait hareketlerin incelenebilmesi için burada yapılacak ölçülerin gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bireysel olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmayan bu çalışmalarda tezin başından sonuna kadar gerek planlama, gerek ölçme ve gerekse değerlendirme aşamalarının tamamında çok büyük bir özveri gösterip yardımlarını esirgemeyen başta Yrd. Doç. Dr. Hediye Erdoğan olmak üzere mesai arkadaşlarım Araş. Gör. Burak AKPINAR' a, Araş. Gör. N. Onur AYKUT' a ve Araş. Gör. Fatih POYRAZ' a teşekkür ederim.

Köprü üzerinde gerçekleştirilen ölçüler sırasında her türlü kolaylığı gösteren ve yardımlarını esirgemeyen Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü ve Boğaziçi Köprüsü Bakım İşletme Şefliği çalışanlarına teşekkür ederim.

Özellikle toplanan verilerin bir İnşaat Mühendisi gözüyle yorumlanması düşüncesiyle yardımlarına başvurduğum Bilgehan KOZANOĞLUNA' na ve onun aracılığıyla fikirlerini aldığım David MacKenzie' ye teşekkür ederim.

Hayatı boyunca benden maddi manevi desteğini esirgemeyen ve bu günlere gelmemi sağlayan, tez ölçülerini gerçekleştirdiğim günlerde sağlık problemleri olduğu halde bunu bana hissettirmemeye çalışan ve bir yıl sonra kaybettiğim canım annem Sebahat ÇETİNTAŞ ATA' yı özlemle anarak çok teşekkür ederim.

Tezin her aşamasında en büyük destekçim olan, tamamlamam için büyük fedakarlıklar gösteren, tüm güzellikleriyle hep yanımda olan, sevgili eşim Selma ATA' ya çok teşekkür ederim.

Her an göreve hazır bekleyen, varlığını hep yanımda hissettiğim sevgili kardeşim Erdinç ATA' ya çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması sırasında bana gösterdikleri hoşgörü, sabır ve destekleri için özellikle GÜNDÜZ ve TUNALI ailelerinin tüm fertleri ile yakın çevremdeki herkese ayrı ayrı çok teşekkür ederim.

ÖZET

Asya ve Avrupa Kıtalarının karayoluyla birbirine bağlayan ve 1074 m ana açıklığı ile dünyanın sayılı asma köprülerinden biri olan Boğaziçi Köprüsü, İstanbul ulaşımında da çok önemli bir konumdadır. Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi asma bir köprü olan Boğaziçi Köprüsü' nün de sağlıklı bir şekilde çalışmasını devam ettirebilmesi ve uzun yıllar hizmet verebilmesi için gerekli kontrollerin yapılması gerekir. Bu ise köprü hareketleri ve dış yüklerin sürekli izlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Hareketlerin sürekli ölçü yapan sistemlerle belirlenmesinde GPS oldukça etkili bir araçtır. 10 Hz' lik örnekleme frekansını destekleyen donanımları ile uzun süre ölçü toplayabilen bu sistem sayesinde köprü hareketlerinin anlık olarak izlenmesi de mümkün olmaktadır.

Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin belirlenebilmesi için köprü kuleleri ile tabliye orta noktasında seçilen 3 obje noktasında bir haftalık RTK-GPS ölçüsü yapılmıştır. Kulelerde örnekleme frekansı 1 Hz, tabliyede ise 10 Hz seçilmiştir. Ayrıca ölçü tarihlerindeki köprüden geçen araç sayısı, rüzgar hızı ve yönü ile sıcaklık bilgileri de toplanmıştır.

Toplanan veriler nokta konumlarına ait X, Y, Z değerleridir. Bu veriler analizlerde ve yorumlamalarda kolaylık sağlaması için köprü koordinat sistemine dönüştürülerek kullanılmıştır.

Kule ve tabliyeye ait hareketlerle dış yükler arasındaki korelasyonlar incelenip Fourier analizi ile frekansları ve periyotları belirlenmiştir. Frekanslar ayrıca Dalgacık (Wavelet) analizi ile de belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bundan sonra wavelet analizi ile veriler bileşenlerine ayrılmış ve elde edilen bileşenler kullanılarak köprü kule hareketleri dış yüklere bağlı olarak modellenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GPS, Dalgacık (Wavelet) Analizi, Boğaziçi Köprüsü, Köprü İzleme, Asma Köprü

MONITORING, ANALYSING AND MODELLING OF THE BOSPORUS BRIDGE MOVEMENTS

ABSTRACT

Bosporus Bridge with a 1074 m main span is one of major suspension bridges of the world, combining Asia and Europe continents by a highway. As in all engineering structures Bosporus Bridge has to have a regular health monitoring in order to service in a reliable way. This can be realized by monitoring the bridge movements and external loads. GPS is a quite useful device which is convenient for continuous surveys. With 10 Hz supporting sampling frequency hardware collecting data without time restriction is possible.

In order to determine the Bosporus Bridge movements' three object points are chosen for measuring RTK-GPS weekly on bridge towers and deck. The sampling frequency is chosen 1Hz on the bridge towers and 10 Hz on the deck.

Also on the date of measurements, the number of vehicles, wind velocity and wind direction and temperature data are gathered.

All these gathered data are X, Y, Z. The data obtained from the object points are transformed to bridge coordinate system in order to interpret the movements.

The correlations between the movements of bridge and external loads are examined; their periods and frequencies are determined by Fourier analysis. Also frequencies are determined and compared with Wavelet analysis. Later the data collected are decomposed into approximation and detail components by Wavelet analysis and modeled regarding the bridge tower movements bound to external loads.

Key Words: GPS, Wavelet Analysis, Bosporus Bridge, Bridge Monitoring, Suspension Bridge

1. GİRİŞ

Köprüler trafik, rüzgar, sıcaklık, deprem, sel gibi yüklere dayanıklı olarak dizayn edilmiştir. Köprülerin yapımından itibaren taşıdığı yükler, depremler vb. nedenlerle oluşan yorulmalar köprülerin tasarlanandan farklı hareket etmesine neden olur. Köprü inşaatında öngörülen tasarım değerleri model parametreleri olarak tanımlanır. Model parametrelerinde öngörülen değerlerinden farklı hareketler yapı güvenliğini tehdit edecek boyutlarda ise derhal gereken önlemler alınmalıdır. Bu nedenle mühendislik yapılarında meydana gelebilecek olumsuz durumları önceden kestirebilmek ve zamanında gerekli tedbirleri alabilmek için, mühendislik yapıları, başta jeodezik gözlemler olmak üzere diğer kontrol yöntemleri ile sürekli gözlenmelidir.

Bir mühendislik yapısının çalışma emniyetinin belirlenmesi yapının planlanması sırasındaki kabullere, yapının inşaatı ve çalışması esnasındaki gözlemlere ve düzensiz davranışların belirlenmesi durumunda acil durum planının uygulanmasına bağlıdır. Yapıda gerçekleştirilen gözlemlerin amacı ise, meydana gelebilecek olumsuzlukların önceden belirlenerek zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktır. Bu nedenle köprülerin doğal hareketleri sürekli olarak izlenmesi ve izleme sırasında ortaya çıkabilecek olağandışı davranışların belirlenmesi ve bakımlarının yapılması gerekmektedir.

Mühendislik yapıları, yapıyı oluşturan elemanların kendi ağırlığı, trafik yükü ve yer kabuğu hareketleri gibi çeşitli faktörlerin etkisinde belirli hareketler yaparlar. Bu etkilere bağlı olarak yapı ve çevresinde değişimler ortaya çıkmaktadır.

Mühendislik yapılarının fiziksel ve matematiksel davranışının anlaşılması çeşitli yüklemeler altındaki parametrelerinin bilinmesine bağlıdır. Bir yapının yükleme parametrelerini belirleyebilmenin en güvenilir yolu yapı üzerinde gerçekleştirilecek ölçmelerdir. Büyük ölçekli yapılarda ölçmelerin yapılması detaylı çalışmalar gerektirmektedir.

Mühendislik yapılarının model parametrelerin belirlenmesinde genellikle ivmeölçerler ve depremölçerler kullanılmaktadır. Son yıllarda mühendislik yapıları üzerinde gerçekleştirilecek ölçmelerde GPS teknolojisi de yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Köprülerde GPS kullanılarak yapılmış bir çok çalışma vardır. Örneğin 2002 yılında Wieser vd. bir asma köprüde GPS ölçüleri yapmışlardır. 3 saniye kayıt aralığı ile 48 saat veri toplamışlardır. Amaçları kuleler ve tabliyedeki hareketleri belirlemektir. Değerlendirmelerde Hızlı Fourier Dönüşümü kullanmışlar.

1997 yılında Ashkenazi de İngiltere'deki Humber köprüsünde de GPS ölçüleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın amacı köprünün orta açıklık ve kulelerindeki deplasmanların belirlenmesidir.

Hong-Kong'da yer alan Tsing-Ma, Kap Shui Mun ve Ting Kua köprüleri 2000 yılında Wong tarafından GPS kullanarak izlenmiştir. GPS alıcıları kulenin üzerinde ve köprünün her iki tarafında yer almıştır. Anlık olarak köprünün ve kulelerin eşzamanlı deplasmanları izlenmeye çalışılmıştır.

Çin' deki 1538.5 m açıklıklı Humen köprüsünün tabliyesinin deplasmanlarını belirlemek için RTK – GPS tekniği kullanılmıştır. Sıcaklık, trafik yükü ve rüzgar yükü altındaki köprünün anlık hareketleri izlenmiştir. Analizlerde auto-regressive moving average vector (ARMAV) ve FFT tekniği kullanılmıştır (Xu vd., 2002).

Bu çalışmada da köprü kulesi ve tabliyesindeki hareketleri incelemek için RTK – GPS yöntemi kullanılmıştır. Bu noktalarda 1 hafta süreyle sürekli ölçüler yapılmış ve veriler depolanmıştır. Kayıt aralıkları kulelerde 1 sn, tabliye üzerinde 0.1 sn seçilmiştir. Ayrıca ölçü tarihlerindeki dış yük (rüzgar, sıcaklık, basınç ve araç sayısı) verileri de kayıt edilmiştir. Modelleme ve analiz aşamalarında regresyon ve Dalgacık Dönüşümü kullanılmıştır.

Boğaziçi Köprüsünde benzer bir çalışma Erdoğan (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kule ve tabliye hareketlerini incelemek için klasik ölçü yöntemleri kullanılmıştır. 10 dk kayıt aralığı ile toplam 10 saatlik ölçü gerçekleştirilmiştir. Köprüye etkiyen dış yüklere (taşıt, sıcaklık, rüzgar ve araç sayısı) ait verilerde kayıt edilmiştir. Modelleme çalışmasında regresyon, AR, MA ve ARMA modeller tercih edilmiştir.

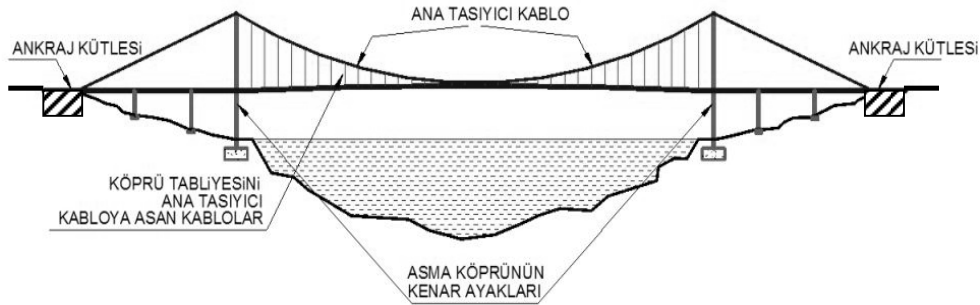
2. ASMA KÖPRÜLER, TEMEL ÖZELLİKLERİ VE ELEMANLARI

Asma köprülerin ilk kullanılışı tarih öncesi devirlere kadar uzanır. İlk çağ insanları asma ağacı ve bambu gibi bazı bitkilerin bükülebilir elemanlarından yaptığı kablolarla nehir, dere, vadi gibi engellerden geçmeyi başarmışlardır.

İlk asma köprü zincir ve ip halatlar kullanılarak Çinliler tarafından inşaa edilmiştir. Çin’de Min nehri köprüsü ile Peru’da San Luis Rey köprüsü eski çağlara ait ilginç asma köprü örnekleridir. Günümüzde kullanılan asma köprülerin ise sadece 100 yıllık bir geçmişi vardır (Adanur, 1997).

Asma köprülerin gelişimindeki en büyük etken çelik kablolardır. El ile yapılan tellerin yerini 14. yüzyılda Avrupa’da makinede çekilen teller alıştır. Günümüz sistemine benzeyen ilk çelik kablo ise 1834 yılında Albert isimli bir Alman tarafından geliştirilmiştir. Çelik kabloların geliştirilmesi ve taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılmaya başlamasıyla asma köprülerde büyük gelişmeler olmuştur (Karataş, 1979).

Asma köprüler, geniş açıklıkların aşılmasında en çok tercih edilen köprü tipidir. Asma köprülerin çalışma prensibi Şekil 2.1’ de basitçe gösterilmiştir. Asma köprülerde iki taşıyıcı kenar ayak (kuleler), iki ana taşıyıcı kablo ve ana taşıyıcı kabloların bağlandığı ankraj kütleleri bulunmaktadır. Araçların geçtiği tabliye denilen yol, askı çubukları adı verilen ve genelde düşey konumda olan kablolar yardımıyla iki ana taşıyıcı kabloya asılmıştır. Burada kule, ana kabloları taşımakta, ankrajlar ana kablonun gergin kalabilmesi için kabloyu dışarıya ve aşağıya doğru çekmektedirler. Askı kabloları tabliyedeki yükü ana kabloya aktarırlar.



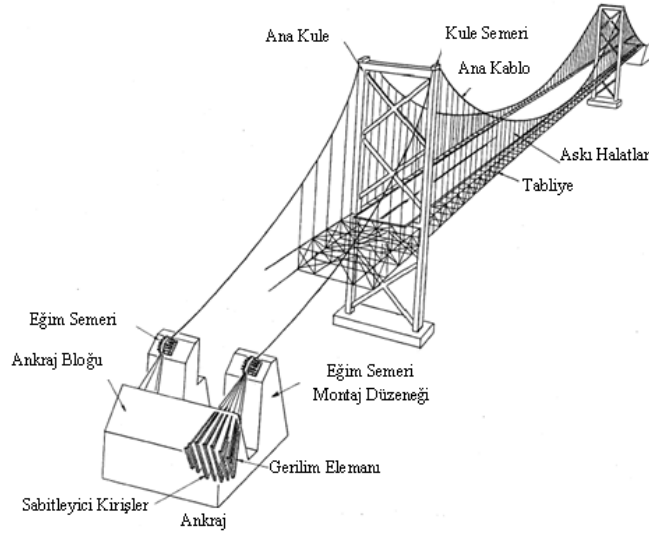
Şekil 2.1 Asma köprülerin çalışma prensibi (Karataş, 1979)

2.1 Ankrajlar

Ankrajlar, kabloların çekme kuvvetlerini dengeleyip kablolardaki kuvvetleri zemine aktararak yapının stabilitesini sağlarlar. Kuvvetlerin dağıtılmasını sağlamak için kablo elemanları ankraj kütleleri içinde yayılmaktadır.

Sağlam kayaların bulunduğu zeminlerde her ana kablo için yapılan ankraj, kaya içine yatayla 30°' lik bir açıyla delinen kama şeklinde bir tünel biçimindedir ve betonla doldurulur.

Sağlam kayaların bulunmadığı zeminlerde ana kablo ankrajı olarak içine ankraj çubuklarının yuvalandığı, yarı gömülü tekparça beton bloklar kullanılır. Genellikle bu ankrajlara ağırlık ankrajları denir. Bazı asma köprülerde kablo ankrajı olarak bir uçta kaya içinde beton tıkaç tipi, öteki uçta ağırlık tipi kullanılmıştır.

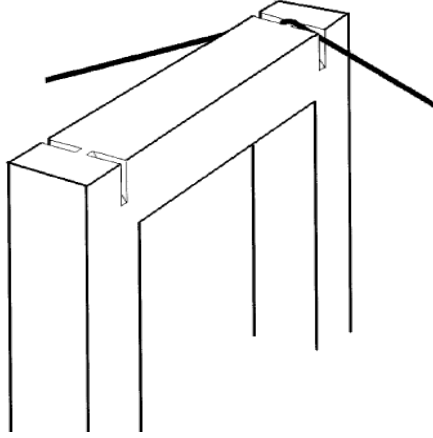


Şekil 2.2 Ankraj bloğu ve köprü bileşenleri (Harazaki, 2000)

2.2 Kuleler

Kuleler köprü açıklığının iki kenarına yapılmış yüksek yapılardır. Bu kuleler genelde içi boş, çelik kutu kesitli olarak yapılırlar. Kulelerin temel işlevi, geçitin her iki kenarında inşaa edilerek, bütün deniz araçlarının geçişine imkan verecek yükseklikte köprüyü oluşturmak ve kabloları destek sağlamaktır.

Kule tepelerinde semer denilen ve kablo tellerini düzenleyen radyal oluklu dökme çelik bloklar bulunur (Şekil 2.3). Kule ayakları genellikle birbiri üstüne bağlanacak büyük, prefabrike, çelik plakalardan yapılır.



Şekil 2.3 Kule semer sistemi detayı (Cengizoğlu, 2006)

Kule ayakları hem kendi ağırlıklarından hem de kablolardan gelen tepki kuvvetlerinden dolayı çok ağır yüklere dayanabilecek biçimde olmalıdır. Bu yüzden de sağlam kayaya oturtulmaları zorunludur (Harazaki vd, 2000).

2.3 Kablolar

Asma köprülerin taşıyıcı ana elemanları kablolardır. Kablolar asma tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar yardımıyla zemine aktarmak için kullanılırlar. Kablolar kenarlarda yapının iki ucunda ankraj kütlelerine monta edilmekte ve mesnet semerleri aracılığı ile üzerlerine oturdukları kulelerin tepelerinden geçmektedirler.

Kablolar çelik tellerden oluşur. Bu teller sıcakta dövülmüş yüksek karbonlu çelik çubukların soğukta çekilmesiyle üretilirler. Korozyona karşı korunmalarını sağlamak için teller bir tabaka saf çinko ile kaplanarak galvanize edilirler (Karataş, 1979).

Ana kablolar yüksek mukavemetli, galvanizli, 5 mm çapında tellerin ayaklar arasında düzenlenen bir çıkırık mekanizması kullanılarak örülmesiyle oluşturulur. Örülme işleminin tamamlanmasından sonra ana kablolar uygun aralıklarla çepeçevre sıkıştırılır ve tabliyeyi taşıyacak olan düşey kabloların bir ucu bu noktalara birleştirilir (Cengizoğlu, 2006).

2.4 Askı Halatları

Askılar tabliyeyi ana kabloya bağlayan elemanlardır. Çelik telli veya normal halatlı olup, ana kabloya bağlanarak tabliyenin taşınmasını sağlamaktadırlar. Düşey ve çapraz olmak üzere iki çeşit askı vardır. Bunların kombinasyonu da kullanılabilir (Cengizoğlu, 2006)..

2.5 Tabliye

Tabliye köprü üzerinde araçların yürüdüğü kısımdır. Kafes kiriş veya kutu kesitli çelik ünitelerden oluşur. Bu üniteler güçlendirilmiş çelik levhaların, kutu kesiti meydana getirecek şekilde birbirine kaynakla birleştirilmesi ile üretilirler. Şekil 2.4’ de görüldüğü gibi platformu oluşturacak olan bu ünitelerin her biri, sırayla su seviyesinden gerekli yüksekliğe çıkartılarak bu seviyede daha önce kaldırılmış olan bir başka üniteye birleştirilir. Kaldırma işlemi ana kablolar arasında düzenlenmiş gezici bir vinç yardımıyla yapılır.



Şekil 2.4 Tabliyenin oluşturulması

2.6 Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler

Köprüleri etkileyen büyüklükler taşıyıcı elemanların kendi ağırlığı, kalıcı ölü yükler, hareketli yükler, sıcaklık, rüzgar, fırtına, deprem yükleri ile köprü üzerindeki frenleme, ilk hareket, merkezkaç kuvveti ve çarpışma sonucu ortaya çıkan diğer büyüklüklerdir. Bu değerler genellikle ülkelerin şartnamelerinden alınır. Ülkemizde köprü tasarımında dikkate alınacak yükleri “Karayolları Genel Müdürlüğü, Yol Köprüleri için Teknik Şartnamesi” düzenler. İngiliz BS 5400 ve Amerikan AASHTO şartnameleri ise dünyaca kabul görmüş diğer önemli şartnamelerdir (Uğur, 2006).

2.6.1 Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık değişimleri malzemelerin uzunluklarının değişimine neden olmaktadır. Sıcaklığın artması ile köprü elemanlarında uzama, sıcaklık düştüğünde ise kısalma oluşmaktadır. AASHTO (Amerikan Devlet Karayolları ve Taşımacılık İdareleri Birliği) standart köprü tanımlamalarına göre en uygun ve basit bir şekilde sıcaklığın uzama-kısalma etkisinin kestirilmesini açıklamaktadır. Aşağıda verilen eşitlik ile sıcaklığın malzemeler üzerindeki etkisi ifade edilmektedir (Erdoğan, 2006)

$$dl = \alpha \cdot (\Delta t_s) \cdot L_b \quad (2.1)$$

dl: Köprüdeki deplasman (uzama-kısalma), l_b ile aynı birimde

α : Sıcaklık genleşme katsayısı, 0.0000065/°F (çelik için) ve 0.000006/°F (beton için)

Δt_s : Sıcaklık farkı (köprü malzemesi yapım sıcaklığı ile etkili köprü sıcaklığı arasındaki fark)

l_b : Nötr noktadan itibaren köprü uzunluğu (genellikle köprünün merkezi nötr noktası alınmaktadır)

Sıcaklık değişimleri köprü ayaklarının tepesini açıklık doğrultusunda hareket etmeye zorlamakta ve ayakların bir konsol gibi eğilmesine neden olmaktadır.

2.6.2 Rüzgarın Etkisi

Rüzgar yükü çok yüksek olmayan normal yapılar için statik, yüksek yapılar için ise yüksekliğe bağlı olarak değişen ve yapıya yatay olarak etkiyen yüküdür. Rüzgarın esiş yönünde çarptığı yapı yüzeylerinde basınç arka yüzeylerde emme kuvveti oluşur. Rüzgar kuvvetinin birimi kN/m^2 dir. w basınç kuvveti yapının geometrisine, rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yapı yüksekliğince belli bir yüksekliğe kadar artar. Bu nedenle cepheye etkiyen kuvvet de yapı yüksekliğince artar (Topçu, A.) . Yüksekliğe bağlı olarak yapılara etkiyen rüzgar kuvveti:

$$w = (0,0000474 * K * G * C) * V^2 \quad (2.2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada;

w : Yapı yüzeylerine etkiyen rüzgar kuvveti (kN/m^2)

K : Rüzgar hız basınç katsayısı

G : Yüksekliğe bağlı olarak hesaplanan rüzgar tepki katsayısı

C : Yatay, düşey ve eğik yüzeylerdeki farklı dış basınç değerleri için belirlenen basınç katsayısı

V : Rüzgar hızı (km/saat)

dir (Erdoğan, 2006). Çizelge (2.1) yüksekliğe bağlı olarak belirlenen K ve G değerlerini göstermektedir.

Çizelge 2.1 Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri (Erdoğan, 2006)

Yükseklik(m)	K	G
0-4,5	0,80	1,32
6	0,87	1,29
10	1,00	1,25
15	1,13	1,21
30	1,38	1,16
90	1,88	1,09
150	2,18	1,06

TSE' nin yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerlerini açıklayan (TS 498:1987 + T1:1997 dahil) standartlarına göre düzlemsel yüzeyler ile sınırlandırılmış kapalı yapı elemanları olarak sınıflandırılan ve rüzgar yönüne dikey, kule tipi yapılarda “C” katsayısının 1,6 olarak alınması öngörülmüştür.

2.6.3 Trafik Yükünün Etkisi

Trafik yükü özellikle tabliyede, rijitleştirici kirişlerin arasında ve üzerindeki ince levhayı eğmeye çalışmaktadır. Bu hareket her araç geçişinde tekrarlanmaktadır. Özellikle kaplama üzerindeki kaynaklı birleşim bölgelerinde etkili olmaktadır.

Her bir asma köprü için farklı trafik yükü öngörülmüştür. Örneğin, Boğaziçi Köprüsü için trafik yükü olarak İngiliz standardının verdiği değerler %10 artırılarak alınmış ve 180 tonluk özel taşıt yükü öngörülmüştür (Adanur, 1997).

Boğaziçi köprüsünün uzunluğu 1074 m. dir. Araçların ortalama boyu 5 m ve araçlar arasındaki güvenli mesafe 20 m alınırsa, 25 m de 1 araç ve köprü üzerinde tek şeritte 43 araç olur. Araçların içlerinde 2 kişi ile birlikte ortalama ağırlıkları 1400 kg. alınabilir. Bu durumda köprünün tek şeridi üzerindeki yük, sadece arabaların geçtiği akıcı koşulda 60 tonluk yük demektir.

Normal 12 metrelik otobüsün boş ağırlığı 12 ton yolcularla birlikte 17 ton olarak kabul edilebilir, kapladığı uzunluk ise 32 m' dir. Tek şeritteki otobüs sayısı 34, tek şerit üzerindeki yük ise 578 ton olmaktadır.

2.7 Asma Köprülerde Periyodik Bakımın Önemi

Asma köprüleri oluşturan elemanlardan bir ya da birkaçının kırılma ya da kopmaları köprüyü oluşturan diğer elemanlara öngörülmemiş fazla yüklerin aktarılması ile kısmi göçmelere hatta köprünün tamamen yıkılmasına sebep olabilir. Benzer bir olay 1967 yılının Aralık ayında ABD'nin Virginia eyaletinde yaşanmıştır. 1928 yılında inşa edilen 670 m açıklıklı “Silver Bridge” asma köprüsü inşa tarihinden 40 yıl sonra yıkılmıştır. Yapılan araştırmalarda yıkılmanın sebebi bir kablo bağlantısının korozyona ve metal yorulmasına maruz kalması olarak tespit edilmiştir (Yılmaz, 2007).

Asma köprülerde kontroller farklı disiplinlerin birlikte yapacakları çalışmalarla gerçekleştirilebilir. Bir inşaat mühendisi kontrolde şüpheli noktaların fotoğraflarını çekip bir sonraki kontrolde bu fotoğraflar ile elemanların mevcut durumlarını kopma oluşumu açısından değerlendirebilir. Diğer taraftan bir harita mühendisi ise kopma açısından kritik eleman olarak belirlenen noktalarda ölçümler yaparak köprü geometrisini çıkarabilir ve bir başka ölçüden elde ettiği değerlerle bu değerleri karşılaştırarak köprü geometrisindeki değişimlerin yorumlanmasını sağlayabilir.

22 Ocak 2004 günü İstanbul’ da yaşanan şiddetli kar fırtınası sırasında İstanbul Boğaziçi köprüsünde bir askı kablosunun tabliye ile bağlandığı levhada bir ayrılma meydana gelmiştir. Oysa köprüde mevcut 272 askı elemanından sadece birinin birleşim levhasındaki ayrılma köprünün güvenliği bakımından önemli sayılmayabilir (Yılmaz, 2007). Ancak yukarıda da açıklandığı gibi bu olay ile periyodik bakım programının ve gerekli kontrollerin zamanda yapılmasının önemi bir kez daha gözden geçirilmelidir.

2.8 Boğaziçi Köprüsü

20. yüzyıl’ın ikinci yarısında İstanbul’un hızla gelişmesi ve Avrupa-Asya arasındaki trafiğin artışı Boğaz’a köprü yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bunun üzerine dünyanın büyük açıklıklı köprüleri arasında yer alan Avrupa ve Asya kıtalarını birleştiren Boğaziçi Köprüsü tasarlanmış ve 1970 yılında da yapımına başlanmıştır. Tasarımı ve projesi İngiliz Freeman, Fox and Partners tarafından yapılmıştır. Cleveland Bridge Cooperation tarafından inşa edilmiştir. 1973 yılında tamamlanarak hizmete açılan köprünün toplam uzunluğu 1560 metredir. Köprünün orta açıklığı 1074 metre, Ortaköy viyadüğü 231 metre, Beylerbeyi viyadüğü 255 metre, köprü genişliği ise 33.40 metredir (Adanur, 1997).

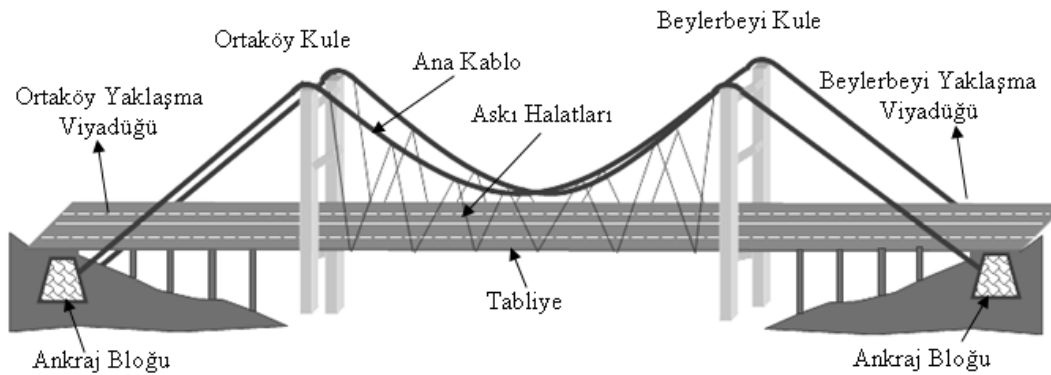
Boğaziçi Köprüsü’nün tabliyesinin denizden yüksekliği 64 m dir. Eğik askılı, narin kuleli,

aerodinamik forma sahip çelik kutu kesit tabliyelili bir köprüdür. Ortaköy ve Beylerbeyi yamaçlarında bulunan kuleler 165 m yüksekliğindedir. Yüksek mukavemetli çelik saçtan yapılmış olan bu kuleler iki ayaklıdır. Bu ayaklar birbirlerine üç diyafram kirişi ile bağlanmıştır. Kule ayaklarının yandan görünüş genişliği 7 metredir. Eksenel yönde yani trafik akış yönünde ise görünüş genişliği tabanda 5.2 m, tepede 3 m' ye düşecek şekilde değişken olarak dizayn edilmiştir. Kule ayaklarının içi boş dikdörtgendir. Kenarları, tek yüzü özel T profilleri ile mukavemeti artırılmış kaynaklı levhalardan oluşturulmuştur. Kule dikdörtgen kesitinin içinde 20 kişilik bir yaya asansörü yapılarak tabliye seviyesine kolayca çıkılması sağlanmıştır. Ayrıca her kulede bakım ve onarım için tepeye çıkmaya yarayan küçük birer personel asansörü mevcuttur (Cengizoğlu, 2006).

Ana açıklık, her biri 17.9 m uzunluğunda, 33.4 m genişliğinde ve 143.5 ton ağırlığında rijit plak panellerden yapılmış 60 adet tabliye elemanından oluşmaktadır. Kabloların arasındaki mesafe 28 m'dir. Her biri 3.5 m genişliğinde, üç gidiş ve üç geliş olmak üzere toplam altı şerit vardır. Tabliye kesiti orta noktasının derinliği 3 m' dir (Adanur, 1997).

Ana kablonun çapı 58 cm dir. Her bir ana kablo ana açıklıkta, her biri 548 çelik telden oluşan 19 bükümünden oluşmaktadır. Kenar açıklıklardaki ana kabloların her birine ise 5 mm çapında 192 çelik telden oluşan 4 tane ek büküm ilave edilmiştir (Adanur, 1997).

Köprü'nün yapımında 63 bin metreküp kazı yapılırken, 4 bin ton betonarme çeliği, 17 bin ton yapı çeliği, 6 bin ton kablo çeliği, 71 bin metreküp beton kullanılmıştır. Ana sistemde hareketli yük 1.33 ton/metre, rüzgar yükü 45 metre, deprem ivmesi 0.1 gr, ana kablodaki çekme 15 bin 400 ton/kablodur. Köprü, o günkü fiyatlarla 516 milyon liraya mal olmuştur. Bu verilerle dünyanın 13. büyük köprüsü konumundadır.



Şekil 2.5 Boğaziçi Köprüsü'nün genel görünümü

3. ASMA KÖPRÜ HAREKETLERİNİN İNCELENMESİNDE GPS

İvmeölçer ve laser interferometre ile kıyaslandığında elektronik uzunluk ölçerlerle (EDM) titreşimlerin ölçülmesi özellikle ekonomik açıdan büyük avantaj sağlamaktadır. EDM' ler sahip oldukları çözünürlükle çok büyük yapıların titreşimlerini ölçebiliyorlarsa bu tür çalışmalarda kullanılabilirler. Bu tür yapıların genlikleri 10–200 mm arasında değişmektedir (Lovse vd., 1995).

Köprü, kule ve buna benzer büyük yapıların frekansları genellikle 0.1 Hz - 10 Hz arasındadır. Bir sinyalin örnekleme frekansı, sinyalin frekansının maksimum.2 katından büyük olursa, sinyal tekrar elde edilebilmektedir. EDM' lerin örnekleme hızı 10 Hz' den daha düşük olduğu için 5 Hz den yüksek frekanslar EDM' ler kullanılarak elde edilememektedir. Ayrıca EDM' lerin bu uygulamalarda kullanılamasındaki bazı dezavantajları aşağıda sayılmıştır.

- Noktalar arasında senkronizasyon yoktur.
- Büyük deformasyonları yakalamak olanaksızdır.
- Sürekli veya anlık olarak çalışılamaz.

Ayrıca bir istasyon kurulmasındaki sınırlamalar, karadaki referans noktalarından görünebilme, rüzgar hızı ve atmosferik koşullardan etkilenme gibi nedenlerden dolayı bu metotlar önerilmemektedir.

GPS sistemi, örnekleme frekansı 10 Hz' e kadar ulaştığı için köprü gibi büyük yapıların izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. GPS sisteminin köprülerin izlenmesinde kullanılmasının tek nedeni gerekli örnekleme frekansına sahip olmasının yanında elde edilen doğruluğun oldukça yüksek olması, sürekli çalışması ve 3 boyutlu konum bilgisi sağlamasıdır (Lovse vd., 1995). Günümüzde birçok ülkede inşaatı devam eden ya da henüz tamamlanmış bazı köprülerde GPS izleme istasyonları kurulmaktadır.

3.1 GPS (Global Positioning System)

GPS Amerika Birleşik Devletleri Savunma Dairesi (DoD) tarafından oluşturulmuş uzay tabanlı bir konum belirleme sistemidir. Sistem herhangi bir yer ya da zamanda, her türlü hava koşulunda yüksek doğrulukta, sürekli konum, hız ve zaman belirleyecek şekilde tasarlanmıştır.

GPS sistemi Uzay Bölümü, Kullanıcı Bölümü ve Kontrol Bölümü olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır.

GPS’ de elektromanyetik sinyaller kullanılır. Kontrol bölümü ile uydular arasındaki iyonosferik etkisinin azaltılması için S band, uydu ve kullanıcı bölümlerinde ise L band kullanılmaktadır. L bandında bir sinyal kesildiğinde diğerinin devreye girmesi ve çift frekans özelliğinden yararlanarak iyonosferik düzeltme olanağı sağlaması amacıyla 2 temel sinyal kullanılmaktadır. Bu sinyaller $L_1 = 1575.42$ MHz ve $L_2 = 1227.60$ MHz sinyalleridir.

L_1 ve L_2 sinyalleri, uydu saat düzeltmeleri, yörünge parametreleri gibi bilgilerin yeryüzündeki alıcıya ulaştırılabilmesi amacıyla kodlarla ve navigasyon mesajı verileri ile modüle edilmiştir.

C/A Kod, L_1 sinyali üzerine modüle edilmiştir. GPS alıcılarının, uydulara en kısa sürede kilitlenmesini sağlar. Dalga boyu 300 m, çözünürlüğü ise 3 m dir.

P kod, L_1 ve L_2 taşıyıcı sinyal frekansları üzerine modüle edilmiştir. Dalga boyu 30 m, çözünürlüğü ise 3 m dir.

GPS ile Pseudorange (Kod) ölçüleri ve Taşıyıcı Faz ölçüleri olarak adlandırılan iki temel büyüklük ölçülmektedir.

Yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda ve bilimsel çalışmalarda taşıyıcı faz ölçüleri, navigasyon amaçlı uygulamalarda ise pseudorange ölçüleri kullanılmaktadır.

Sistemin çalışma prensibi koordinatları bilinen GPS uyduları ve bu uydularla yeryüzündeki GPS alıcısı arasındaki uzunluğun kullanılarak GPS alıcısının koordinatlarını belirlemektir. Uydu –alıcı uzunlukları kod ya da taşıyıcı faz ölçüleri yardımıyla belirlenmektedir. Uydu koordinatları ise kontrol bölümü tarafından belirlenip uydulara yüklenmektedir (Aydın, 2004).

3.2 Real Time Kinematic GPS (RTK – GPS)

RTK – GPS (Real Time Kinematic Global Position System) bağıl konum belirleme esasına göre çalışan, gerçek zamanlı ölçümlere olanak sağlayan bir ölçü yöntemidir. Bağıl konum belirleme ise iki nokta arasındaki baz vektörünün belirlenmesidir. Burada hem referans hem de gezici noktada eş zamanlı ölçülere gereksinim duyulmaktadır.

3.2.1 RTK GPS Çalışma Prensipleri ve Algoritması

RTK uygulamasında kesin koordinatları bilinen bir noktada referans GPS alıcısı sürekli gözlem yaparken gezici GPS alıcısı da konumu belirlenecek noktada ölçüm yapar. Referans alıcı ve uyduların bilinen koordinatlarından gerçek uydu – alıcı uzunluğu belirlidir. Ölçümler

sırasında bu uzunluk faz ölçüleri ile de belirlenir. Gerçek uzunlukla faz ölçülerinden elde edilen uzunluk karşılaştırılarak buradan hesaplanan farklar düzeltme olarak gezici alıcılara yayınlar. Düzeltmeleri alan gezici alıcılar referans alıcıya göre o andaki konumlarını hesaplarlar. RTK - GPS sisteminden elde edilen koordinatlar WGS 84 koordinat sistemindedir. Referans alıcı ile gezici alıcılar arasındaki düzeltme değerinin aktarımı radyo modemlerle gerçekleştirilir (Ata, 2001).

Taşıyıcı dalga faz ölçüleri ile gerçekleştirilen uzunluk ölçme yönteminde alıcılar, uydulardan gönderilen elektromanyetik dalganın alıcıya girmiş olduğu en son kesirli kısmını ölçmektedir. Sinyalin uyduyla alıcı arasındaki tamsayı belirsizliği bilinmemektedir ve bu işlem çeşitli teknikler kullanılarak çözülmektedir. Taşıyıcı faz ölçüsünün doğruluğu, bu devir sayısının kestirimine ve faz ölçme duyarlılığına bağlıdır. RTK GPS' in değerlendirme algoritmaları aşağıdaki prosedürlerden oluşmaktadır (Pırtı, 2005).

- Referans noktası, geziciye ait ölçülerin üretildiği zamana karşılık gelen epoklardaki baz ölçülerini ekstrapolasyon yaparak radyo modem aracılığıyla yayınlar. Referans noktasındaki ölçüler gezici alıcı tarafından kayıt edilir.
- Kaba hatalı ölçüler belirlenir.
- Float tamsayı belirsizlikleri ele alınır.
- Sabitlenmiş tamsayı belirsizlikleri incelenir.
- Baz uzunluğu hesaplanır.

RTK GPS ölçü tekniği L1 ve L2 GPS sinyallerini kullanılarak gerçekleştirilmektedir. RTK GPS tekniğinde baz uzunluklarının hassas bir şekilde hesaplanması için başarılı bir tamsayı belirsizliği çözümüne ihtiyaç vardır. Tamsayı belirsizliği 10-30 sn aralığında referans noktadan olan uzaklığa bağımlı olarak çözülebilmektedir. Tamsayı belirsizliğinin çözümü için çeşitli teknikler mevcuttur. Bu tekniklerin içinde en yaygın olarak kullanılanı OTF (On The Fly) tekniğidir.

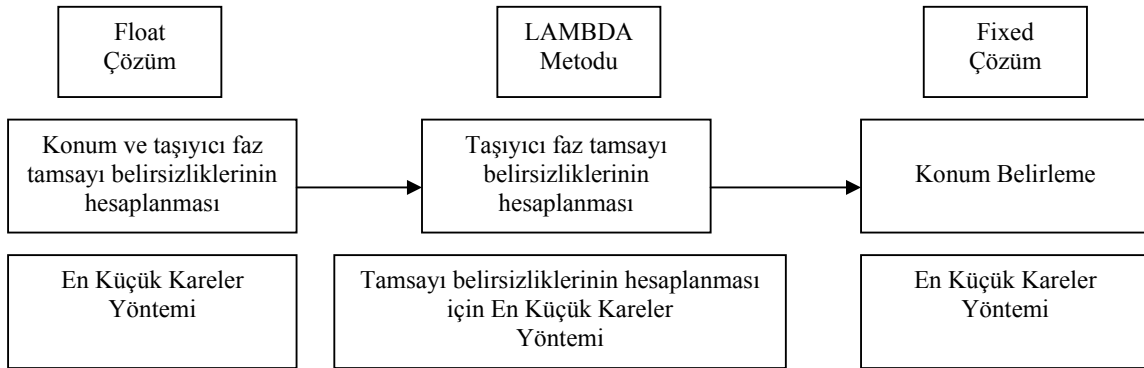
3.2.1.1 OTF (On The Fly) Tekniği

Faz ölçüleri kullanılarak kinematik GPS ile hasas konum belirlemek için ölçü başlangıcında, faz kaymaları oluştuğunda yada yeni bir uydu ölçüye dahil olduğunda tamsayı bilinmeyeninin hesaplanması gerekir. Alıcı hareketliken tamsayı bilinmeyeninin çözülmesi tekniği OTF olarak isimlendirilir.

OTF çözüm yönteminde saatlere bağlı hatalar yok edilerek tamsayı bilinmeyenini içeren ikili farklar kullanılmaktadır. RTK sistemi içerisinde kullanılan hızlı tamsayı belirsizliği çözümünü içeren bir çok OTF yöntemi geliştirilmiştir. OTF yaklaşımları arasında, Belirsizlik Fonksiyonu Metodu, En Küçük Kareler Belirsizlik Araştırma Tekniği, Hızlı Belirsizlik Çözüm Tekniği, Korelasyonsuz En Küçük Kareler Belirsizlik Dengelemesi (LAMBDA) ve hiçlik uzayı metodu sayılabilir. Uygulamalarda tamsayı belirsizliğinin çözümü için en çok kullanılan OTF yöntemi LAMBDA yöntemidir (Pırtı, 2005).

Belirsizlik çözümünde uydu sayısı arttıkça hesaplanan belirsizlik oranı doğruluğu daha yüksek ve çözüm daha hızlı olur. Genelde kısa bazlar için 5 ya da daha fazla uydu gözlenebiliyorsa, belirsizlik bir dakikadan daha kısa zamanda çözümlenebilir (Ata, 2001). Tamsayı belirsizliğinin hızlı bir şekilde belirlenmesinde çeşitli faktörler etkindir. Bu etkenler,

- İzlenen uydu sayısı,
- Uydu alıcı geometrisi,
- Taşıyıcı fazlara ilaveten pseudorange datalarının kullanılması,
- Gözlem bozuklukları
- Tek ya da çift frekanslı alıcıların kullanılmasıdır.

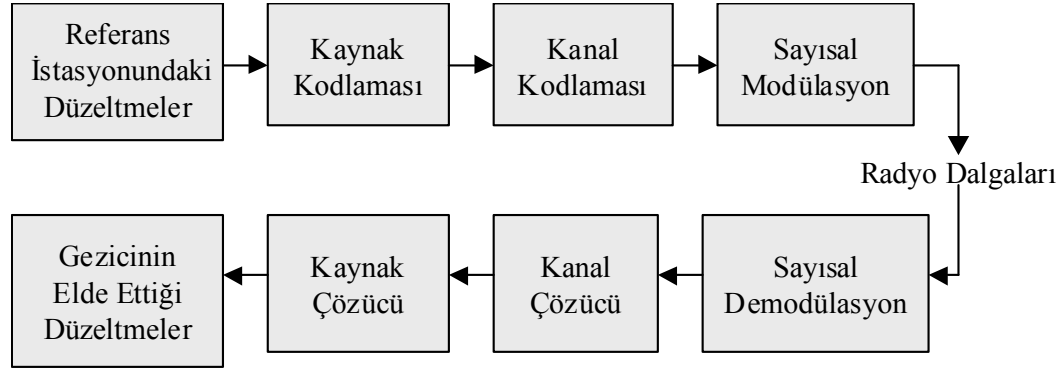


Şekil 3.1. OTF tekniğinin algoritması

3.2.1.2 Düzeltmelerin Hesaplanması ve Yayınlanması

Düzeltmeler referans istasyonunda üretilir ve radyo vericisi tarafından yayınlanır. Bunun için kaynak ve kanal kodlamalarından sonra, düzeltme sembolleri sayısal bir modülatör tarafından radyo dalgalarına dönüştürülür. Gezicide, radyo dalgaları başka bir radyo alıcısı tarafından alınır ve sayısal bir demodülatör tarafından sembollere dönüştürülür (Ata, 2001). Kanal kodlanması ve kaynak kodlanması çözüldükten sonra, düzeltmeler gezici tarafından elde edilmiş olur. Prosedür Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.

Yayınının gecikme süresi yaklaşık 0.4 saniyedir. Böylelikle ölçülen noktanın konumu ölçüler yapıldıktan sonra yaklaşık 0.6 saniyede ekranda görüntülenir (Pırtı, 2005).



Şekil 3.2. Düzeltmelerin üretilmesi ve aktarılması (Ata, 2001)

3.2.1.3 RTK – GPS Sisteminin Doğruluğu

RTK GPS ölçümlerinin doğruluğu referans ve gezici nokta arasındaki uzaklık 20 km'yi aşmadığı sürece maksimum $\pm(0.5-10\text{cm})$ arasında kalmaktadır. RTK GPS Tekniğinde tamsayı belirsizliği doğru olarak çözüldükten sonra koordinatları hesaplanacak olan her bir noktanın doğruluğu yatayda 0.5 ile 2 cm, düşeyde ise 1 ile 3 cm arasında değişmekte ilave olarak da çift frekanslı aletler için 1 ppm ve tek frekanslılar için 2 ppm değeri eklenmektedir (Pırtı, 2005).

3.3 Mühendislik Yapılarının GPS ile İzlenmesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Birçok araştırmacı asma köprülerin hareketlerinin ve frekanslarının belirlenmesi üzerine farklı donanımlar kullanarak çalışmalar yapmıştır. Teknolojideki gelişmelere paralel olarak yüksek frekanslarda hareket belirlemeye olanaklı olan GPS sistemi son yıllarda bu amaçlar için yoğun bir biçimde kullanılmaktadır.

Li Jian-Xin vd 2002 yılında, sürekli veri toplayan GPS alıcılarından toplanan günlük verilerde oluşabilecek kesiklik ya da kopuklukların belirlenmesi ve beyaz gürültünün ayıklanması için Wavelet analizini kullanmışlardır. Ayrıca gerilim bileşenlerinin hesabında da en küçük karelerle prediksyon metodundan yararlanmışlardır. 1996 ve 2002 yılları arasında gerçekleştirdikleri GPS ölçülerinde veri kopukluklarının belirlenmesi, mevsimsel değişikliklerin belirlenmesi ve hata ayıklamada dalgacık analizini başarıyla kullanmışlar ve GPS zaman serilerinin kullanılabilirliğini iyileştirmişlerdir.

Larocca, C. vd. 2005 yılında Brezilya’ da kablo destekli bir yaya köprüsünde choke-ring antenler kullanarak 20 Hz örnekleme aralığıyla ve 2 gün süreli ölçüler yapmışlardır. Ayrıca köprü üzerinde aynı noktalarda ivmeölçerler ve yer değiştirme transdüser ölçüleri de kullanmışlardır. GPS datalarından elde edilen yer değiştirmelerin doğruluk ve duyarlıklarını diğer yöntemlerle karşılaştırmışlardır. GPS ile elde edilen sonuçların ivmeölçerlerin birçoğundan daha doğru sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Roberts, G.W. vd 2008 yılında 173 m açıklıklı bir köprünün viyadüğü üzerinde GPS ölçüsü gerçekleştirmişlerdir. Burada amaç viyadük üzerinde uzun süreli deformasyonların ve kısa süreli sapmaların GPS ile belirlenip belirlenemeyeceğini araştırmaktır. Bunun için 5 noktada 2 gün süreyle 10 ve 20 Hz kayıt aralıkları ile choke-ring antenler kullanılarak GPS ölçüleri yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde köprüye ait sadece 3 frekansın belirlenebildiği, her türlü filtrelemeye rağmen multipathin önüne geçilemediği için diğer frekansların elde edilemediği görülmüştür.

Azar, R.S. vd 2009 yılında köprü deformasyonlarının basit GPS alıcıları ile izlenebileceğine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Malezya’ da bulunan Putrajaya Seri Wawasan kablo destekli köprüsünde 5 noktada GPS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tek frekanslı GPS alıcıları kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 1 cm’ den daha büyük deformasyona rastlanılmamasına rağmen daha hasas sonuçların elde edilebilmesi için çift frekanslı GPS alıcılarının kullanılması tavsiye edilmiştir.

Roberts, G.W. vd. 1999 yılında Humber köprüsünün deformasyon ölçmeleri için GPS ve sonlu elemanlar modelinin karşılaştırılması için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada RTK GPS yöntemi kullanılmıştır. Köprüye 1.5 km uzaklıktaki bir nokta referans noktası olarak seçilmiş, gezici alıcılar ise kuleler ve tabliye üzerine yerleştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı trafiğe kapalı olan köprü üzerinden 5 adet kamyonu farklı şekillerde geçirerek köprünün davranışlarını ve frekanslarını belirlemektir.

Wong, K., 2000 yılında Hong-Kong Tsing-Ma, Kap Shui Mun, Ting Kua köprülerinde GPS ölçmeleri gerçekleştirmiştir. GPS alıcıları kule ve tabliye üzerine yerleştirilmiştir. Örnekleme frekansını 10 Hz (0.1sn) seçilmiştir. Anlık olarak tabliye ve kulelerin eşzamanlı hareketleri izlenmiştir.

Roberts, G.W. vd. (2001) GPS ve üç yönlü ivmeölçerlerin birlikte kullanılması ile yapılarıdaki sapmaların belirlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada ölçülerin örnekleme frekansı üzerinde durmuşlardır. Yapılarıdaki değişimler 5 Hz’den daha büyükse bu değişimlerin GPS

ile belirlenemeyeceğini, bu durumda ivmeölçerler kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. 10 Hz ve daha küçük frekanslar için ise GPS' in yeterli olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Roberts, G.W. vd. (2008) Nottingham Human köprüsünde, rüzgar kuvveti ve yaya yükünün etkisini belirleyebilmek için GPS ve ivme ölçerler kullanmışlardır. GPS için örnekleme frekansını 10 Hz, ivmeölçer için 200 Hz seçerek yapıya ait belirgin frekansları elde etmişlerdir.

Wieser vd. (2002) bir asma köprüde GPS kullanarak 3 saniyelik örnekleme aralığıyla 48 saat süreyle ölçüler yapmışlardır. Özellikle kulelerde belirlenen hareketle sıcaklık arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Tabliyedeki hareketlerin de taşıt yükü etkisiyle düşey yönde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Değerlendirmelerde Hızlı Fourier Dönüşümü kullanmışlar ve hareketlerin frekanslarını belirlemişlerdir. Belirlenen bu frekansların Sonlu Elemanlar yöntemi ile belirlenen doğal frekanslarla uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece yapılan gözlemlerle yapıların yaklaşık doğal frekanslarının belirlenebileceği ifade edilmiştir. Bununla birlikte tabliye üzerindeki GPS alıcılarının kablolardan etkilendiği ve GPS ölçülerinden çok iyi sonuçlar alınamadığı belirtilmiştir.

Ashkenazi 1997' de İngiltere'deki Humber köprüsünde de GPS ölçüleri gerçekleştirmiştir. GPS antenleri orta açıklıkta stratejik noktalara ve kulelere yerleştirilmiştir. Köprüden 1.5 km uzaklıktaki bir refrans noktasına da GPS anteni yerleştirilmiştir. Köprü kinematik GPS yöntemi ile anlık olarak izlenmiştir. Bu çalışmanın amacı köprünün orta açıklık ve kulelerindeki deplasmanların belirlenmesidir.

Hong-Kong'da yer alan Tsing-Ma, Kap Shui Mun ve Ting Kua köprüleri 2000 yılında Wong tarafından GPS kullanarak izlenmiştir. GPS alıcıları kulenin üzerinde ve köprünün her iki tarafında yer almıştır. 10 Hz' lik örnekleme frekansı ile 27 noktada RTK – GPS ölçüleri yapılmıştır. Buradaki amaç; gerçek zamanda köprünün ve kulelerin eşzamanlı deplasmanlarını izlemektir. Ayrıca yapının stres, taşıma kapasitesi, çalışma durumu ve dayanıklılık yeteneği de belirlenmeye çalışılmıştır (Wong, 2000).

Bir başka çalışmada Çin' deki 1538.5 m açıklıklı Humen köprüsünün tabliyesinin deplasmanlarını belirlemek için köprü izleme sistemi oluşturulmuştur. Ölçme yöntemi olarak RTK – GPS tekniği kullanılmıştır. Sıcaklık, trafik yükü ve rüzgar yükü altındaki köprünün anlık hareketleri izlenmiştir. Analizlerde auto-regressive moving average vector (ARMAV) ve FFT tekniği kullanılmıştır. Çalışmada örnekleme frekansı 5 Hz seçilmiştir (Xu vd., 2002).

3.4 Obje Noktalarındaki GPS Ölçümleri İçin Örnekleme Aralığının Seçimi

Asma köprüler değişik davranış gösteren elemanlardan oluştukları için, bina ve barajlara göre daha fazla mod sayısının dikkate alınması gerekir. Mod sayılarının doğru belirlenmesinde en önemli etken örnekleyicinin (örnekleme aralığının) doğru seçilmesidir.

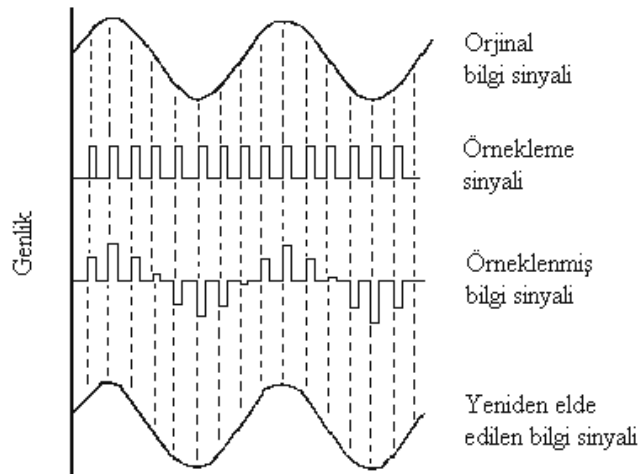
Örnekleyicinin görevi sürekli zaman işaretini ayrık zamanlı işarete dönüştürmektir. Sürekli zaman işaretinden belirli aralıklarla alınan örnek değerleri ayrık zamanlı işaretin değerlerini oluşturmaktadır (MEGEP, 2007).

Analog işaretlerin sayısal şekle çevrilemesi sırasında genelde bir bilgi kaybı olmaması istenmektedir. Bu nedenle örnekleme aşamasında analog işareten olabildiğince çok örnek alınması düşünülebilir. Fakat örnek sayısının fazla olması işlenmesi gereken veri miktarının yüksek olması anlamına gelmektedir (MEGEP, 2007).

Sürekli zaman işaretlerinin değişim hızı işaretlerin frekans bileşenleri tarafından belirlenmektedir. Yüksek frekans bileşenlerine sahip sürekli zaman işaretleri hızlı değişirken, düşük frekanslı bileşenlere sahip işaretler ise daha yavaş değişmektedir (Akdi, 2003).

Örnekleme frekansı analog işaretin maksimum frekansının iki katından büyük olduğunda, örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda bir çakışma olmaz ve tekrarlanan frekans bantları arasında frekans boşlukları oluşur (Wayne, 1997).

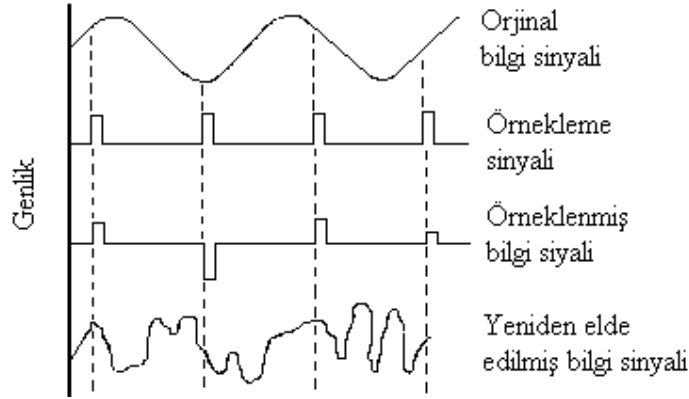
Örnekleme frekansı maksimum frekansının iki katına eşit olduğunda örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda tekrar eden frekans bileşenleri uç-uca gelmektedir. Bu durumda da örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda bir çakışma olmamaktadır (MEGEP, 2007).



Şekil 3.3. Yeterli sayıda örneklenmiş sinyal

Örnekleme frekansı maksimum frekansın iki katından küçük olduğunda örneklenmiş işaretin frekans uzayında bir çakışma meydana gelmektedir. Böylece işaretteki bilgiyi doğru temsil edecek kadar örnek alınamaz ve işaretle bilgi kaybı oluşur (Wayne, 1997).

Örnekleme frekansının işaretin maksimum frekans bileşeninin iki katına eşit veya büyük olması şartı Nyquist kriteridir. Örneklenmiş işaretin frekans spektrumunda çakışma meydana gelmemesi için örnekleme frekansı Nyquist kriterine uygun seçilmelidir (Küçük, 2004).



Şekil 3.4. Yetersiz sayıda örneklenmiş sinyal

Boğaziçi köprüsünün maksimum doğal frekansı 1,189 Hz'dir (15. mod sayısı). Nyquist teoremine göre örnekleme frekansının en az 2,378 Hz olması gerekmektedir. Yüksek yapılarda ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiğinden, köprü için maksimum frekans 0,463 Hz kabul edilebilir. Böylece, tabliye üzerinde 0.1 sn, kulelerde 1 sn aralıklarla toplanan veriler frekansların belirlenmesinde yeterli olacaktır (Erdoğan,2006).

3.5 GPS ile Veri Toplamada NMEA Formatı

RTK GPS ile veri toplama aşamasında NMEA (National Marine Electronics Association) formatından yararlanılmıştır. NMEA uluslararası ortak bir veri formatıdır. ASCII formatında veri çıkışı olan bir formattır. Şu an kullanılmakta olan sürümü NMEA0183 dür.

NMEA formatında GPS alıcısına farklı sorgu komutları gönderilmekte ve alıcı bu sorguyu bir cevap mesajı ile yanıtlamaktadır. Toplanmak istenen veriye göre değişiklik gösteren bu sorgulardan konum bilgisini içeren ve en çok kullanılanları POS, UTM, GGA ve GGL komutlarıdır. Tez çalışmada konum bilgisi olarak UTM komutu kullanılmıştır. Sistem, kullanılan bu komutlara göre değişen, içinde konum bilgilerinin bulunduğu cevap cümleleri göndermektedir (Lodha ve Charaniya, 2002).

4. SÜREKLİ VERİLERİN MODELLENMESİNDE DALGACIK ANALİZİ

Dalgacık Dönüşümü 1807’de Joseph Fouirer’in frekans analiz teorisi ile ortaya çıkmıştır. 1985’de Stephane Mallat sayısal sinyal işleme ile ilgili çalışmalarında Dalgacık Dönüşümüne yer vermiş ve çalışmaları günümüzde birçok uygulamanın temeli olmuştur. Bir kaç yıl sonra S.Mallat’ın çalışmalarından esinlenerek Ingrid Daubechies günümüz Dalgacık Dönüşümü uygulamalarında en çok kullanılan orthonormal baz fonksiyonlarını geliştirmiştir (Graps, 1995)

Birçok sinyal pratikte zaman bölgesinde ifade edilir. Yani sinyal zamanın fonksiyonudur. Diğer bir deyişle eğer sinyali çizmek istersek bir eksen sinyalin genliğini (bağımlı değişken), diğer eksen ise zamanı (bağımsız değişken) gösterir. Ve bu gösterime zaman-genlik gösterimi denir. Fakat bu gösterim çoğu sinyal işleme uygulamaları için genelde iyi bir gösterim şekli değildir. Çünkü bu uygulamalar için gerekli olan asıl bilgi sinyalin içerdiği frekans bilgisinde saklı olabilir (Polikar, 1995)

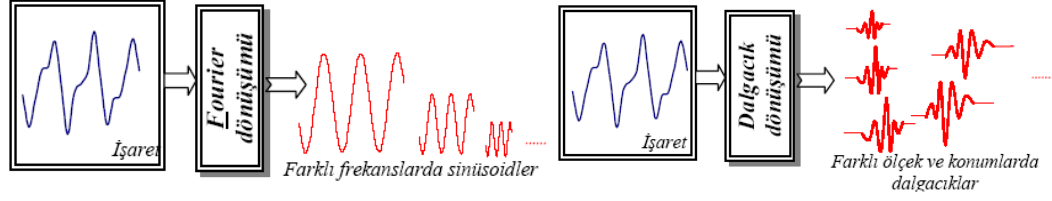
4.1 Fourier Dönüşümü

Sinyaller genellikle zaman bölgesi yerine frekans bölgesinde analiz edilirler. Fourier dönüşümü bir sinyalin içerdiği frekansları gösterir. Fakat hangi zamanda hangi frekansların mevcut olduğunu bildirmez. Yani bütün zaman birimine ait bilgileri verir.

Frekansı zamana göre değişmeyen sinyallerin analizinde Fourier dönüşümü oldukça iyi bir yöntemdir. Fakat geçici durum analizlerinde istenilen sonuçları vermez. Bu nedenle kısa zaman Fourier dönüşümü kullanılmaktadır. Yani Fourier dönüşümü belirli bir zaman penceresi içerisinde uygulanmaktadır. Bu metotla da belirli bir frekansın hangi zaman noktasında mevcut olduğu tespit edilemez. Sadece mevcut olduğu zaman aralığındaki frekans bileşenleri hesaplanır (Arı, 2008).

Dalgacık dönüşümü işlenmemiş sinyali içerdiği farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni kendi ölçek değerinde bir çözünürlükle inceleyen matematiksel bir dönüşüm fonksiyonudur.

Dalgacık analizi düşük frekans bilgisinin daha fazla önemli olduğu durumlar için büyük zaman aralıklarının, yüksek frekans bilgisinin daha fazla önemli olduğu durumlar içinde daha küçük zaman aralıklarının kullanımına izin veren değişik boyutlarda bölgelere sahip bir pencereleme tekniğidir. Şekil 4.1’ de Fourier ve Dalgacık dönüşümlerinin hesaplama mantığı görülmektedir (Vatansever, 2002).



Şekil 4.1 Fourier ve Dalgacık dönüşümlerinin hesaplama mantığı

Birçok sinyal işleme uygulamaları için zaman bölgesindeki sinyalin içerdiği frekans bilgisi önemlidir. Çünkü frekans bölgesinde yapılan inceleme zamandaki ani değişikliklerin tespitinde kolaylık sağlar.

1807 yılında Joseph Fourier her periyodik fonksiyonun, periyodik karmaşık üstel fonksiyonların sonlu toplamı şeklinde ifade edilebileceğini ortaya koymuştur. Buna göre her periyodik fonksiyon, sinüs ve kosinüslerden oluşan bileşenlere ayrıştırılabilir. Fourier dönüşümü, bir dalga biçimini ya da fonksiyonu orijinal dalga şeklini kısaltarak farklı frekans sinüsoidlerine ayrıştırır veya ayırır.

Bir $f(x)$ fonksiyonunun cosinüs dönüşümü şu şekilde tanımlanır;

$$F_c(s) = 2 \int_0^{\infty} f(x) \cos 2\pi_{sx} dx \quad (4.1)$$

Eğer $f(x)$ bir çift fonksiyonsa bu Fourier dönüşümünün çift kısmına eşittir. Genel olarak $f(x)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümünün çift kısmı, $f(x)$ fonksiyonunun çift kısmının cosinüs dönüşümüdür. Cosinüs dönüşümü aşağıda verildiği gibi bir ters dönüşüme sahiptir.

$$f(x) = 2 \int_0^{\infty} F_c(s) \cos 2\pi_{sx} ds \quad (4.2)$$

Aynı şekilde $f(x)$ fonksiyonunun sinüs dönüşümü de;

$$F_s(s) = 2 \int_0^{\infty} f(x) \sin 2\pi_{sx} dx \quad (4.3)$$

olarak tanımlanır.

$f(x)$, 2π periyotlu bir periyodik sinyal olmak üzere; Fourier serisi açılımı kullanılarak bu sinyal (4.4) eşitliğinde verildiği gibi sinüs ve kosinüs terimlerinin sonsuz toplamı şeklinde yazılabilir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad \text{olmak üzere;}$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (4.4)$$

$f(x)$ fonksiyonunun çift ve tek parçalarının sinüs ve cosinüs dönüşümlerinin kombinasyonu, bu fonksiyonun bütün olarak Fourier dönüşümü olarak isimlendirilir ve periyodik bir $f(x)$ fonksiyonunun Fourier Dönüşümü;

$$F(W) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-iwx} dx \quad (4.5)$$

eşitliği ile verilmektedir.

Periyodik olmayan sinyaller içinde bu fikir genişletilerek (4.6) eşitliğinde verilen Fourier dönüşümü geliştirilmiştir.

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.6)$$

Zaman bölgesindeki bir fonksiyonu ilk olarak frekans bölgesinde bir fonksiyona çeviren matematiksel dönüşüm sürekli Fourier dönüşümüdür. Fourier dönüşümü sayesinde zaman bölgesindeki bir sinyalin periyodik olması veya olmaması önemli olmamaksızın içerdiği frekans bilgisi analiz edilebilir. Fourier serisi açılımı, Fourier dönüşümün özel bir halidir yani eğer Fourier dönüşümü alınacak sinyal periyodik ise yapılması gereken sadece Fourier serisi açılımda katsayıların (a_0, a_k, b_k) bulunmasıdır.

(4.7) eşitliğinde verilen Ters Fourier dönüşümü ise frekans bölgesindeki sinyali zaman bölgesine kusursuz olarak tekrar geri çevirmek için kullanılır.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.7)$$

4.1.1 Ayırık Fourier Dönüşümleri

$y[k]$, $y(t)$ fonksiyonunun ayırık zamanda ifade edilişi ve T de örnekleme periyodu olmak üzere ayırık Fourier dönüşümünün ifadesi ise (4.8) eşitliğinde verilmiştir. Ayırık Fourier dönüşümü örneklenmiş sinyallerin diğer bir deyişle ayırık zaman bölgesinde verilen sinyallerin frekans spektrumlarının elde edilmesi için kullanılır.

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} y[k] \exp(-\frac{j2\pi nT}{k}) \quad (4.8)$$

Ayrık Fourier dönüşümü ile ayrık zamanda verilen $y[k]$ dizisi, frekans bölgesindeki yeri mükemmel şekilde belirlenmiş bir grup sinüsoidal dalgalarından oluşan yapı bloklarına ayrıştırılır. Her bir bloğun genliği sinyalin o frekanstaki bileşenin etkinliğinin yani şiddetinin bir ölçütüdür. Bu dönüşümde yapı blokları (4.9) eşitliğinde verilen dönüşümün çekirdek fonksiyonundan ibarettirler.

$$K(t, \omega) = e^{-j\omega t} \quad (4.9)$$

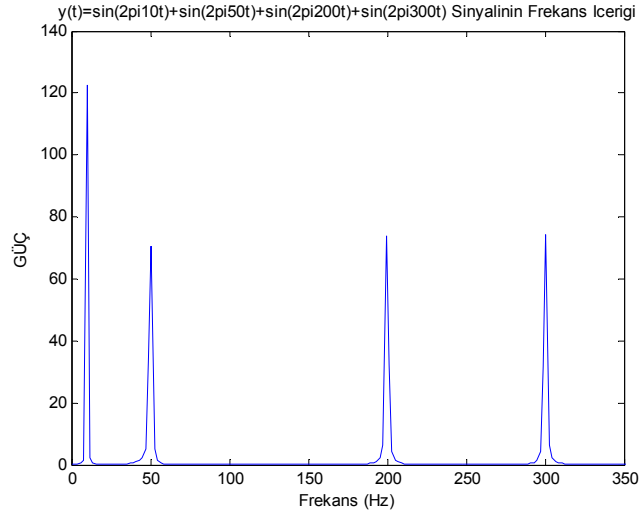
Ayrık Fourier dönüşümü (AFD), fonksiyonun sonlu sayıdaki örnek noktasından Fourier dönüşümünü tahmin eder. Örnek noktaların, diğer zamanlarda işaretin neye benzediğini tipik olarak gösterdiği farz edilir.

4.1.2 Hızlı Fourier Dönüşümleri

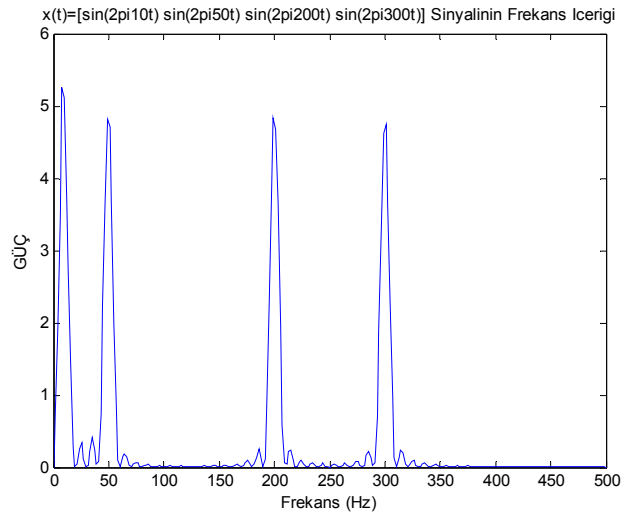
Hızlı Fourier Dönüşümü bir sinyalin Fourier Dönüşümünü etkili şekilde hesaplamaya yarayan bir algoritmadır.

Bir fonksiyonu örneklerle yaklaşık olarak temsil etmek ve Fourier integralini ayrık Fourier dönüşümü ile temsil etmek için, mertebesi örnek nokta sayısı n' e eşit olan bir matrisi uygulamak gerekir. $n \times n$ boyutlu bir matrisi bir vektörle çarpmak, n^2 mertebesinde aritmetik işleme neden olduğu için, örnek nokta sayısı arttığında problem daha karmaşık bir hale gelir. Ancak örnekler düzgün yerleştirilmişse, o zaman Fourier matrisi birkaç matrisin çarpımı şeklinde çarpanlara ayrılabilir ve sonuçta oluşan bu çarpanlar toplam $n \log n$ mertebesinde aritmetik işlem içererek bir vektöre uygulanabilir. Bu *Hızlı Fourier dönüşümü* (HFD) olarak isimlendirilir (Polikar, 1995).

Fourier dönüşümünü daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.2' de $y(t) = \sin(2\pi 10t) + \sin(2\pi 50t) + \sin(2\pi 200t) + \sin(2\pi 300t)$ sinyalinin güç spektrumu verilmiştir. Bu sinyalin Fourier dönüşümü, hızlı Fourier dönüşüm algoritması ile alınmıştır. $y(t)$ sinyali 1 KHz örnekleme frekansında örneklenerek ayrık zamanda ifade edildikten sonra hızlı Fourier dönüşümü ile güç spektrumu elde edilmiştir (Polikar, 1995).



Şekil 4.2 $y(t)$ sinyalinin güç spektrumu

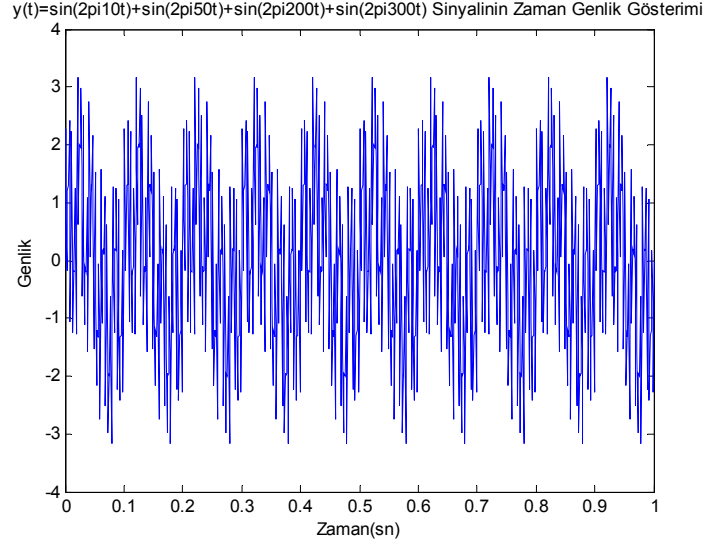


Şekil 4.3 $x(t)$ sinyalinin güç spektrumu

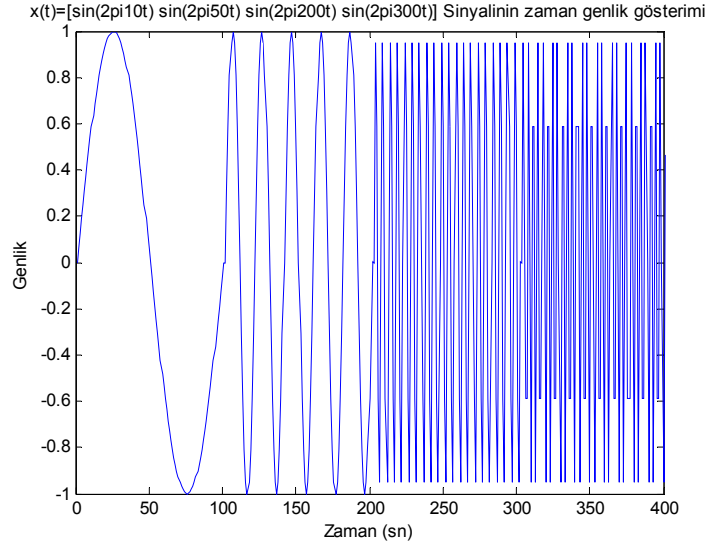
Şekil 4.2' de verilen güç spektrumu Fourier dönüşümü ile elde edilen yüksek frekans çözünürlüğünü göstermektedir.

Şekil 4.3' de verilen $x(t) = \sin(2\pi 10t) \sin(2\pi 50t) \sin(2\pi 200t) \sin(2\pi 300t)$ sinyalin güç spektrumu incelenecek olursa küçük dalgalanmalar ve düşük güç değerleri dışında $y(t)$ sinyalinin genlik spektrumu ile $x(t)$ sinyalinin genlik spektrumunun oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu durumda yukarıda verilmiş iki farklı sinyalin genlik spektrumuna bakarak bu sinyallerin birbiriyle hemen hemen aynı olduğu söylenebilir.

Gerçekte ise durum böyle değildir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’ de sırasıyla $y(t)$ ve $x(t)$ sinyallerinin zaman-genlik gösterimleri verilmiştir. Şekillerde iki sinyalin birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 $y(t)$ sinyalinin zaman-genlik spektrumu



Şekil 4.5 $x(t)$ sinyalinin zaman-genlik spektrumu

$y(t)$ sinyali, frekans içeriği zamanla değişmeyen durağan bir sinyal iken, $x(t)$ sinyali ise farklı zaman aralıklarında farklı frekans bileşenlerine sahip, frekansı zamanla değişen durağan olmayan bir sinyaldir.

4.1.3 Kısa Süreli Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümünün bu iki sinyalin frekans içeriklerini ayırt etmede yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir. Bu sorun Fourier dönüşümün en önemli dezavantajıdır. Frekansı zamanla değişmeyen sinyallerin frekans içeriğinin incelenmesi için Fourier dönüşümü kullanışlı bir araç olabilir. Ancak $x(t)$ sinyali gibi farklı zaman aralıklarında farklı frekans bileşenleri içeren sinyallerin frekans analizi için Fourier dönüşümü yetersiz kalmaktadır.

Bu sorunun çözümü için 1946'da Gabor tarafından Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) veya Gabor dönüşümü olarak adlandırılan Eşitlik 4.10' da verilen matematiksel dönüşümü geliştirmiştir. Bu dönüşüm ile frekans içeriği incelenmek istenen sinyal, sonlu uzunlukta bir pencere fonksiyonu ile dilimlere ayrılmakta ve sonra her dilimin Fourier dönüşümü alınmaktadır (Polikar, 1995).

$$Sf(u, \varepsilon) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t-u)e^{-j t \varepsilon} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{g}(\omega - \varepsilon) e^{-j u (\omega - \varepsilon)} d\omega \quad (4.10)$$

$g(t-u)$ fonksiyonu ile $f(t)$ fonksiyonunun u değeri civarındaki dilimi seçilir. $g(t-u)$ pencere fonksiyonunun uzunluğu KSFD ile elde edilecek zaman çözünürlüğünün derecesini belirler. KSFD ile frekans çözünürlüğünün azalmasına karşılık zaman çözünürlüğü artırılır.

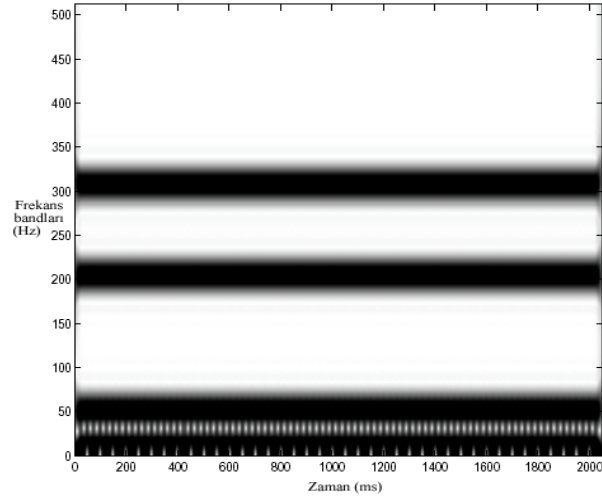


Şekil 4.6 Kısa süreli Fourier dönüşümü

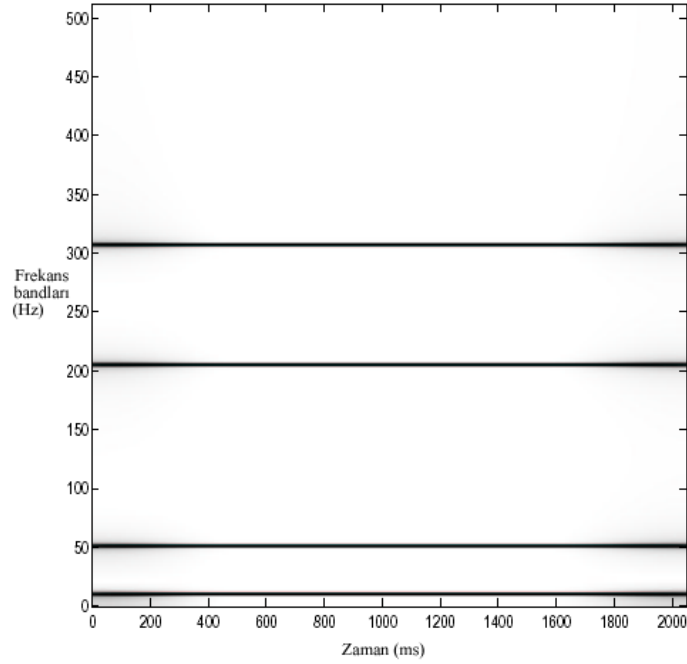
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' da sırasıyla $y(t)$ ve $x(t)$ sinyallerinin KSFD ile edilen zaman-frekans gösterimleri verilmiştir. Genlik spektrumları oldukça benzer olan bu sinyallerin, zaman-frekans gösterimlerinin birbirinden farklı oldukları açıkça görülmektedir. Eğer sadece frekans içerikleri incelenecekse bu iki sinyali ayırt etmek için KSFD yeterlidir. Sinyallerin KSFD dönüşümleri 32 birim pencere uzunluklu Hanning pencereleme fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Pencere fonksiyonunun genişliğinin 512 birim yapılarak KSFD' nün tekrarlanması ile elde edilen sinyallerin zaman-frekans gösterimleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da verilmiştir.

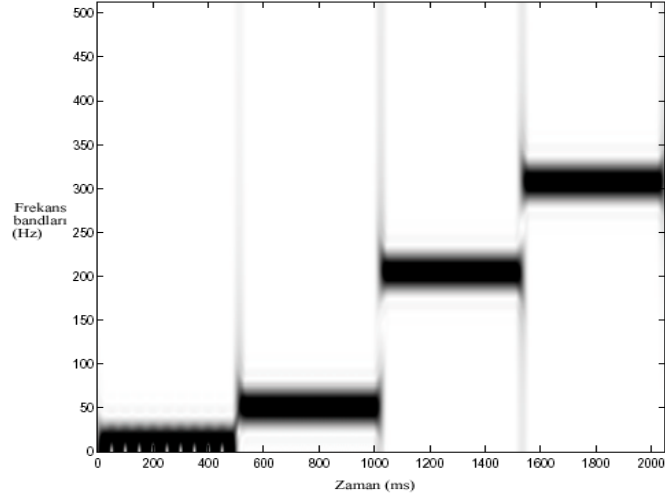
Pencere fonksiyonun genişliğinin artırılması ile zaman çözünürlüğü azaltmış, frekans çözünürlüğü ise artırmıştır (Polikar, 1995).



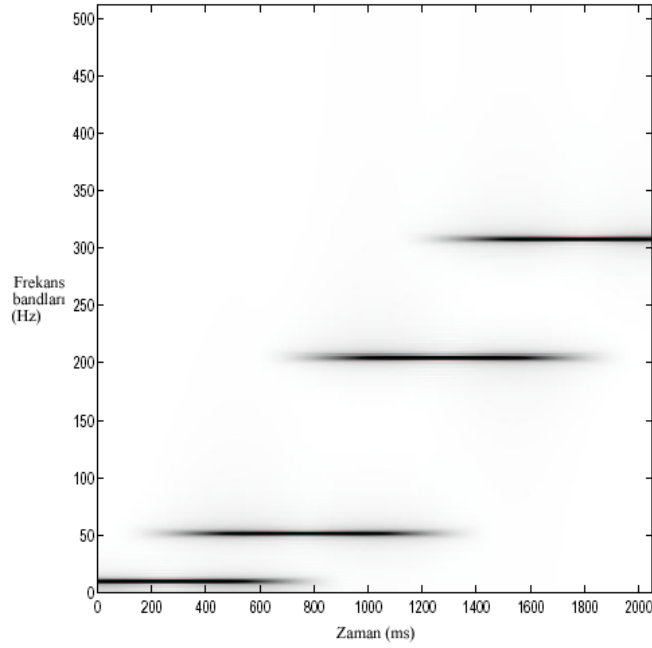
Şekil 4.7 $y(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 32)



Şekil 4.8 $x(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 32)



Şekil 4.9 $y(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 512)

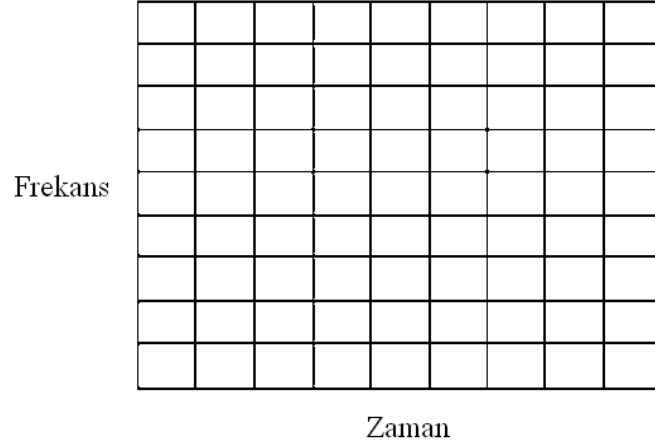


Şekil 4.10 $x(t)$ sinyalinin kısa süreli Fourier dönüşümü (Pencere genişliği 512)

KSFD de Fourier dönüşümü ile ulaşılan mükemmel frekans çözünürlüğü yerine daha düşük frekans çözünürlüğü ve makul derecede zaman çözünürlüğü elde edilir. Fakat pencere fonksiyonun genişliği artırıldığında zaman çözünürlüğündeki kayba karşılık frekans çözünürlüğünde iyileşme sağlanmaktadır.

Frekans çözünürlüğünün üst sınırı ayırık zamana geçişte Nyquist frekansı ile belirlenir. KSFD ile aynı anda hem zaman ve hem de frekans çözünürlüğünü tatmin edici düzeye ulaştırmak mümkün değildir.

KSFD’ de pencere genişliği sabit olduğu için elde edilen frekans çözünürlüğü de sabittir. Yani tüm zaman-frekans bölgesi Şekil 4.11’ de verildiği gibi aynı büyüklükteki parçalara bölünür.



Şekil 4.11 Kısa süreli Fourier dönüşüm blokları (sabit zaman-frekans çözünürlüğü)

4.2 Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık dönüşümü, KSFD deki sabit band genişliğine karşılık; sabit bağıl band genişliği seçimi ile çözünürlük problemine bir çözüm sağlamaktadır. Sabit bağıl band genişliği ifadesi (4.11) eşitliğinde verilmiştir. Dalgacık dönüşümünde farklı pencere genişlikleri, ölçek faktörü değiştirilerek “Ana Dalgacık Fonksiyonu” olarak adlandırılan tek bir fonksiyon ile sağlanır. Yani dalgacık dönüşümdeki baz fonksiyonları “*Dalgacıklar*” olarak adlandırılır.

$$r = \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (4.11)$$

Dalgacık dönüşümünün KSFD den üstünlüğü değişken zaman-frekans çözünürlüğü sağlamasıdır. Birçok sinyal işleme uygulaması için bu büyük bir avantajdır. Çünkü yüksek frekanslar zamanda, alçak frekanslar frekansta daha iyi çözülür.

4.2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)

Dalgacık dönüşümü KSFD analizine benzemektedir. Dalgacık dönüşümünde sinyal, KSFD’deki pencere fonksiyonuna benzer bir fonksiyon (Ana Dalgacık) ile çarpılır ve zaman bölgesinde farklı zaman aralıkları için dönüşüm hesaplanır.

Dalgacık dönüşümünde gerekli olan farklı genişlikteki pencere fonksiyonları (baz fonksiyonları) $\phi(t)$ ölçeklendirme fonksiyonunun ötelenmesi ve ölçeklenmesi ile elde edilir. Farklı pencere genişliklerinin aynı anda kolaylıkla kullanılabilmesi KSFD de mümkün değildir (Toprak, 2007).

Farklı genişlikteki baz fonksiyonları, ortalaması sıfır olan ve sonlu enerjili Ana Dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ ’in ötelenmesi ve ölçeklendirilmesi ile istenilen genişlik ve zaman aralığında oluşturulurlar. Baz fonksiyonlarının (Dalgacıklar) ifadesi (4.12) eşitliğinde verilmektedir (Toprak, 2007).

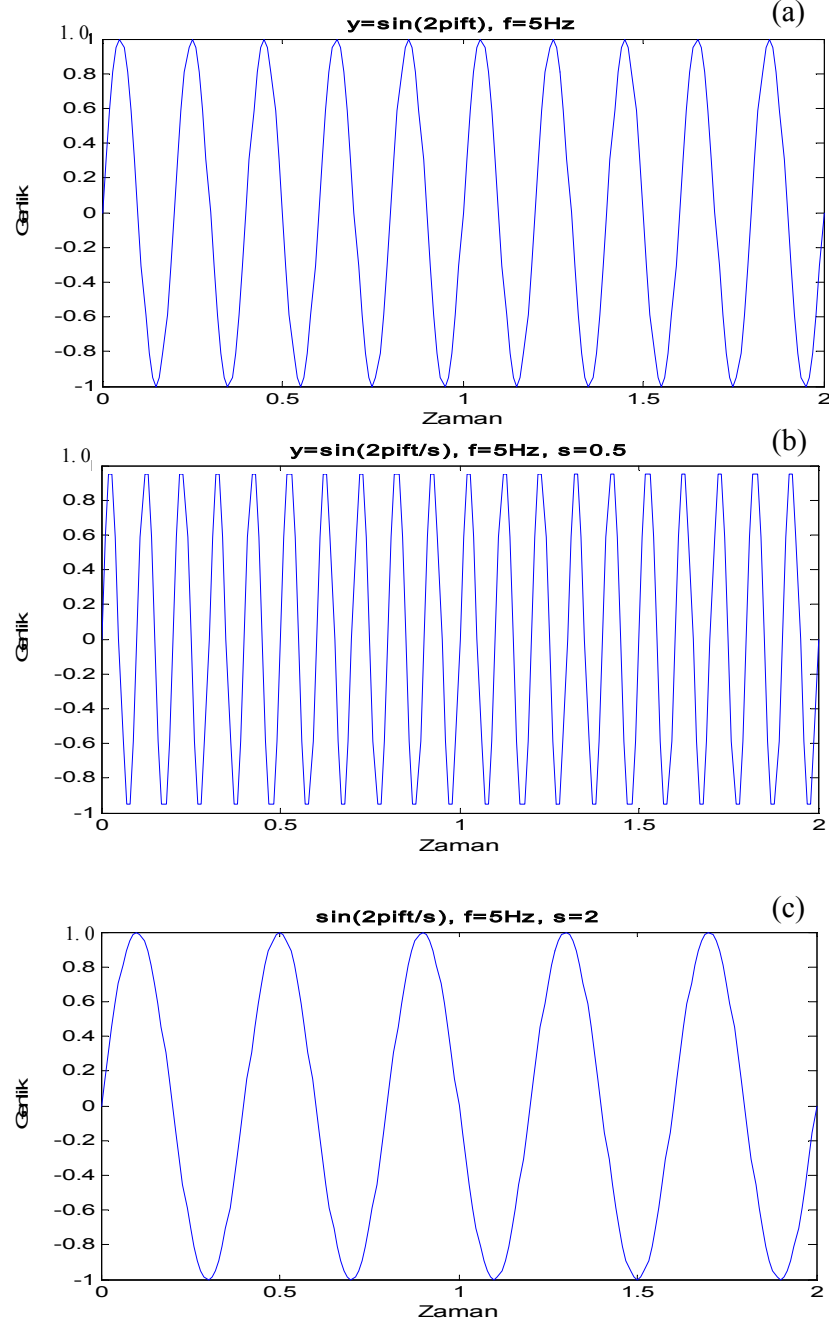
$$\Psi_{s,u} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right), \quad s, u \in \mathbb{R}, \quad s \neq 0 \quad (4.12)$$

Eşitlikte s ölçeklendirme parametresidir ve haritadaki ölçeğe benzer. Haritalardaki durum gibi küçük ölçek, detaylı olmayan genel görünüm, büyük ölçek detaylı görünüm için uygundur. Ölçeklendirme, bir sinyalinin zaman-genlik gösterimini sıkıştıran veya açan bir matematiksel dönüşümdür. Büyük ölçek değeri sinyali açmak için, küçük ölçek değeri sinyali sıkıştırmak için kullanılır. s ölçek parametresine, $0 < s < 1$ aralığında değerler verilirse sinyal açılmış olur, $s > 1$ aralığında değerler verildiğinde ise sinyal sıkıştırılmış olur.

(4.12) eşitliği incelenecek olursa s ölçeklendirme parametresi paydada yer almaktadır. Bu durumda yukarıda anlatılanların tam tersi geçerli olur. Yani s ölçeklendirme parametresine, $s > 1$ aralığında değerler verildiğinde sinyal açılmış ve alçak frekans bileşenlerinin analizi için uygun pencere genişliği elde edilmiş olur. s parametresine, $0 < s < 1$ aralığında değerler verildiğinde ise sinyal zaman ekseninde sıkıştırılmış ve yüksek frekans bileşenlerinin analizi için uygun pencere genişliği elde edilmiş olur.

Ölçeklendirme parametresinin Dalgacık dönüşümdeki rolünün iyice anlaşılması için, Ana Dalgacık fonksiyonu bir sinüs fonksiyonu olduğu varsayılarak, Dalgacık dönüşümde olduğu gibi s parametresi paydada yerleştirilmiş ve parametrenin farklı değerleri için sinüs işaretinin zaman-genlik gösterimleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.12 $\sin(2\pi ft)$ sinyalinin

$f = 5 \text{ Hz}$ için (a), $\sin(\frac{2\pi ft}{s})$ sinyalinin $f = 5 \text{ Hz}$ ve $s = 0.5$ ölçek değeri için (b) ve $\sin(\frac{2\pi ft}{s})$ sinyalinin $f = 5 \text{ Hz}$ frekans değeri ve $s = 2$ ölçek değeri için (c) zaman-genlik grafiğini göstermektedir (Polikar, 1995).



Şekil 4.12 Farklı ölçek değerleri için zaman-genlik grafikleri

(4.12) eşitliğinde u öteleme parametresi, KSFD de olduğu gibi pencere fonksiyonun (Baz fonksiyonu veya Dalgacık) sinyal üzerindeki yerini değiştirir. Yani zaman ekseninde sinyal

boyunca pencereyi hareket ettirir.

$\frac{1}{\sqrt{s}}$ Çarpanı normalizasyon çarpanıdır. Yani bu çarpan sayesinde Ana Dalgacık fonksiyonundan elde edilen pencere fonksiyonlarının enerjisinin, Ana Dalgacık fonksiyonun enerjisi ile aynı olması sağlanır.

(4.13) eşitliğinde Sürekli Dalgacık Dönüşümünün (SDD) matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$Wf(u,s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{u,s}^*(t) f(t) dt \quad (4.13)$$

Dalgacık dönüşümünde de Fourier dönüşümde olduğu gibi (4.14) eşitliğinde verilen ifade kullanılarak orijinal sinyal tekrar elde edilebilir (geriçatım). Bu ifadede yer alan C_ψ katsayısı, kabul edilebilirlik sabiti olarak adlandırılır ve (4.15) eşitliği ile elde edilir.

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^{+\infty} Wf(u,s) \psi_{u,s} \frac{1}{s^2} ds du \quad (4.14)$$

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{\hat{\psi}^*(\omega) \hat{\psi}(\omega)}{\omega} d\omega, \quad C_\psi < \infty \quad (4.15)$$

(4.15) eşitliğinden hareketle ve $\psi(t)$ 'in reel değerli bir fonksiyon olduğu varsayılırsa; $\hat{\psi}(0) = 0$ olmasından dolayı, ana dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ 'nin ortalamasının sıfır olması gerekmektedir.

• Ölçeklendirme Fonksiyonu

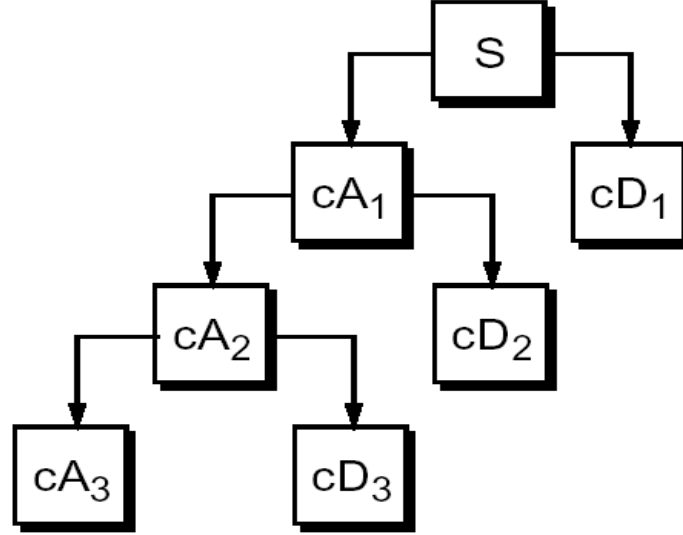
Ana Dalgacık fonksiyonunun ortalaması sıfır olduğu için, Ana Dalgacık fonksiyonun ötelenmesi ve ölçeklendirilmesi ile elde edilen baz fonksiyonlarının (dalgacıklar) da ortalaması sıfırdır. Bu durumda Dalgacık dönüşümü band geçiren filtreleme işlemi ile özdeşdir.

$$|\hat{\phi}(\omega)|^2 = \int_1^{+\infty} |\hat{\psi}(s\omega)|^2 \frac{ds}{s} = \int_\omega^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\varepsilon)|^2}{\varepsilon} d\varepsilon \quad (4.16)$$

(4.16) eşitliği Ana Dalgacık fonksiyonunun ölçeklendirme fonksiyonu $\phi(t)$ 'in ötelenmiş ve ölçeklendirilmiş çeşitlerinin lineer kombinasyonu olduğunu yansıtır. Bu eşitliğe göre ölçeklendirme fonksiyonu bir alçak geçiren filtrenin impuls cevabıdır.

Sonlu enerjili her sinyal, sonlu sayıdaki ölçeklendirme ve baz fonksiyonlarının birleşimi olarak ifade edilebilir. Bu bir sinyalin Dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılmasının temelini

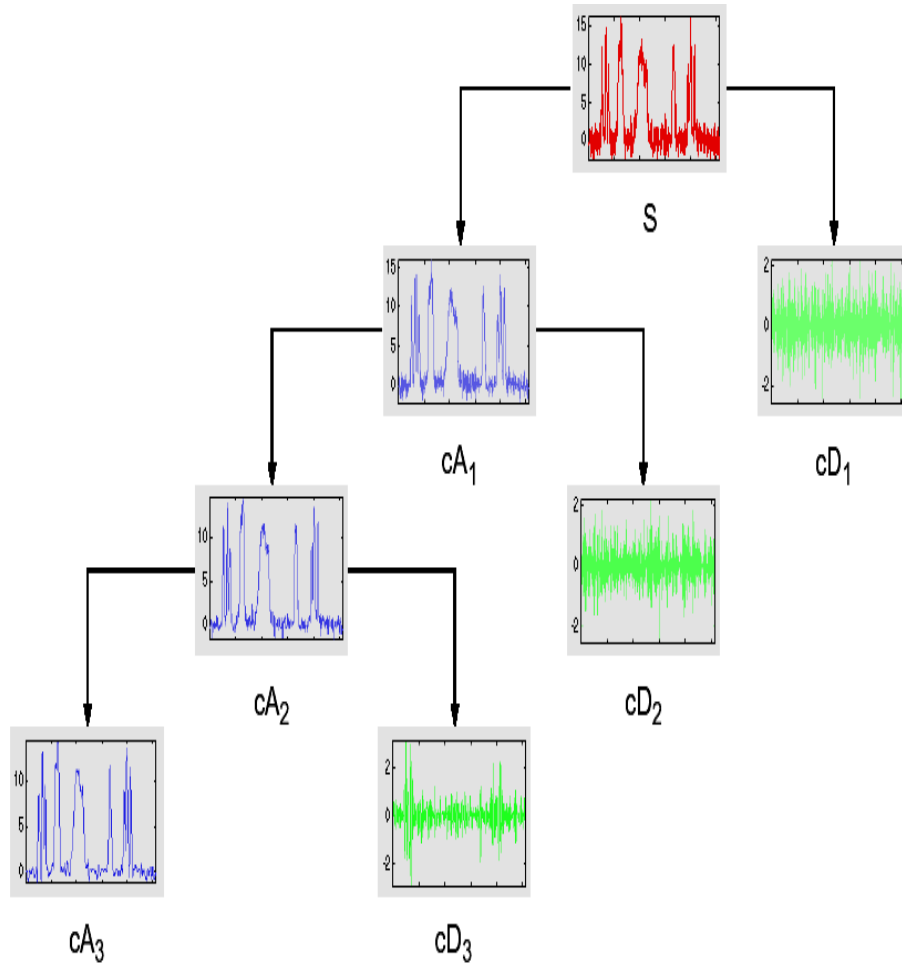
oluşturan ifadedir. Ölçeklendirme fonksiyonu dönüşümü ya da alçak geçiren filtreleme işlemi ile sinyalin alçak frekans bileşenlerini içeren bir yaklaşıklık elde edilir. Dalgacık dönüşümü ya da yüksek geçiren filtreleme işlemi de sinyalin detaylarını yani alçak geçiren filtreleme işlemiyle elde edilemeyen bilgileri verir. Ölçeklendirme fonksiyonu dönüşümü ile elde edilen sinyalin yaklaşıklığı, tekrar ölçeklendirme fonksiyonu dönüşümü ve Dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılabilir. Bu yolla ölçeklendirme parametresi farklı değerlerde olmak üzere bir sinyalin çok seviyeli yaklaşıklığı elde edilebilir (Toprak, 2007).



Şekil 4.13 Dalgacık dönüşümü ile çok seviyeli ayrıştırılma işleminin akış diyagramı

Şekil 4.13’ de sonlu enerjili bir sinyalin Dalgacık dönüşümü ile çok seviyeli olarak ayrıştırılması işleminin akış diyagramı ve Şekil 4.14’ de sonlu enerjili bir sinyalin ayrıştırılması elde edilen bilgilerin gösterildiği bir akış diyagramı verilmiştir.

Çoğu sinyal için, sinyalin alçak frekans bileşenleri sinyalin en önemli parçasıdır. Yüksek frekans bileşenleri ise sinyale dair detayları yansıtır. Ayrıştırma ile elde edilen sinyalin yaklaşıklığı (cA_i) sinyalin alçak frekans bileşenlerini, detaylar (cD_i) ise sinyalin yüksek frekans bileşenlerini içerir.



Şekil 4.14 Dalgacık dönüşümü ile çok seviyeli olarak ayrıştırma

(4.13) eşitliğinde matematiksel ifadesi verilen SDD' nün kullanılmasını zorlaştıran bazı dezavantajlar vardır. SDD ile tek boyutlu sinyalin, iki boyutlu zaman-ölçek gösterimi elde edilir. Bu ise gerekenden fazla veri demektir. Çoğu uygulama için bu fazlalığın giderilmesi gerekmektedir. Fazlalığının giderilmesine rağmen hala sonsuz sayıda baz fonksiyonuna gereksinim olacaktır. Bu sayının işlenebilir bir düzeyde olması gerekir. Bundan dolayı pratikte SDD' nin ayrık versiyonu kullanılır.

4.2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD)

Ayrık dalgacık dönüşümü Sürekli Dalgacık dönüşümündeki ölçeklendirme parametresinin $s = a_0^j$ şeklinde ayrıştırılması ve zamanda ötelemenin bu ölçeklendirme parametresi ile orantılı olarak gerçekleşmesi ($u = kb_0 a_0^j$) ile elde edilir. Bu ölçek ve öteleme parametrelerine göre (4.12) eşitliğinde verilen ifade tekrar yazılırsa (4.17) eşitliğinde verilen ayrık baz fonksiyonlarının eşitliği elde edilir (Toprak, 2007).

$$\Psi_{j,k} = \frac{1}{a_0^j} \Psi \left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j} \right) \quad (4.17)$$

Bu yolla, alçak frekansları analiz eden geniş pencereler (j 'nin büyük değerlerine karşılık Ana Dalgacık fonksiyonundan elde edilen baz fonksiyonları) büyük adımlarla ($u = kb_0 a_0^j$) ötelenmiş olur. Aynı şekilde yüksek frekansları analiz eden dar pencereler (j 'nin küçük değerlerine karşılık Ana Dalgacık Fonksiyonundan elde edilen baz fonksiyonları) sinyaldeki hızlı değişimleri yakalamak amacıyla, küçük adımlarla ötelenmiş olur.

j ve k , tamsayı olup $a_0 > 1$ aralığından olmak şartıyla sabit genişleme adımıdır. Ayırıklaştırmanın nedeni, zaman-ölçek uzayının ayırık aralıkla örneklenmesini sağlamaktır. Genelde $a_0 = 2$ olarak alınır. $b_0 = 1$ alınarak öteleme parametresinin ($u = kb_0 a_0^j$) ikinin katları olarak değişmesi sağlanır (Toprak, 2007).

4.2.3 Sinyallerin Ayırıştırılması

Sürekli bir sinyalin, ayırık baz fonksiyonları kullanılarak dalgacık dönüşümü alınması ile dalgacık katsayıları elde edilir. Bu işlem “*Dalgacık Dizi Ayırıştırması*” olarak adlandırılır. Fakat bu işlem sonunda sinyalin geriçatılması (reconstruction) her zaman mümkün olmamaktadır. Sinyalin geri çatılabilmesi için gerek ve yeter şart (4.18) eşitliğindeki dalgacık katsayılarının enerjisinin iki pozitif sınır arasında olmasıdır. Eşitlikte $\|f\|^2$ sinyalin enerjisi A ve B sinyalden bağımsız olmak üzere ($A > 0$, $B < \infty$) dur.

$$A\|f\|^2 \leq \sum_{j,k} \left| \langle f, \Psi_{j,k} \rangle \right|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (4.18)$$

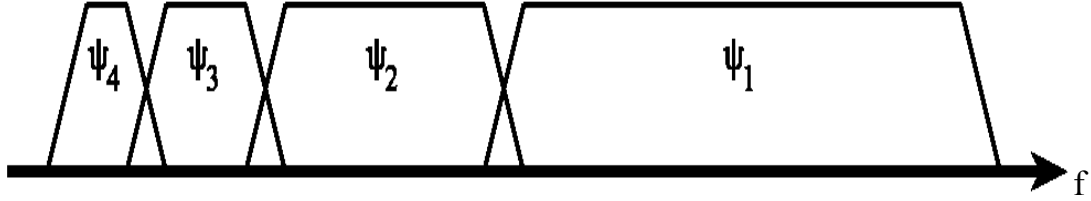
Keyfi olarak seçilmiş herhangi bir sinyal, (4.19) eşitliğinde gösterildiği gibi dalgacık dönüşüm katsayıları ile ağırlıklı ortogonal dalgacık baz fonksiyonlarının toplamı olarak tekrar elde edilebilir. Bu ifade Ters dalgacık dönüşüm olarak adlandırılır.

$$f(t) = \sum_{j,k} \gamma(j,k) \Psi_{j,k}(t) \quad (4.19)$$

Baz fonksiyonlarının analizi yapılan sinyalin boyu kadar ötelenmesi ile dalgacık için bir üst sınır belirlenmiş olur. Fakat analiz için kaç ölçek değerinin yeterli olacağının ve dolayısıyla dalgacık için bir alt sınırın belirlenmesi gerekmektedir.

Baz fonksiyonunun zaman bölgesinde 2 çarpanı ile sıkıştırılması, baz fonksiyonu

spektrumunun 2 çarpanı ile genişletilmesi ve tüm frekans bileşenlerinin 2 çarpanı ile frekans bölgesinde kaydırılması demektir. Bu özelliği kullanarak, zaman bölgesinde ötelenmiş baz fonksiyonları ile sinyal nasıl tümüyle kaplanıyorsa aynı yolla frekans bölgesinde sinyalin sonlu uzunluktaki spektrumu genişletilmiş baz fonksiyonlarının spektrumları ile kaplanabilir. Frekans bölgesinde sinyalin genişletilmiş baz fonksiyonlarının spektrumları ile en iyi şekilde kaplanması Şekil 4.15’ de verildiği gibi genişletilmiş baz fonksiyonlarının spektrumlarının birbirleriyle kesişecek şekilde baz fonksiyonların ayarlanması ile elde edilir (Toprak, 2007).



Şekil 4.15 Ana Dalgacık fonksiyonunun ölçeklendirilmesi ile elde edilen baz fonksiyonlarının spektrumları

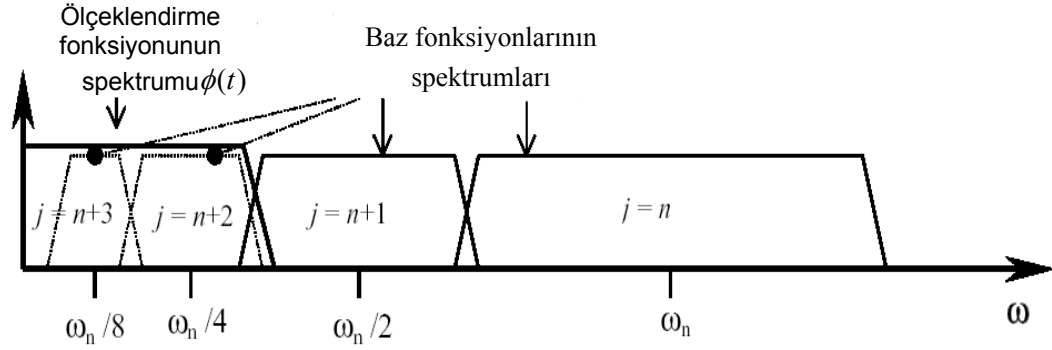
Burada dikkat edilmesi gereken nokta eğer sinyalin enerjisi sonsuz ise, sinyalin spektrumunun veya zaman bölgesinde sinyalin baz fonksiyonları ile kaplanması mümkün değildir. Bu durumda (4.20) eşitliğinde ifade edildiği gibi sinyalin enerjisinin sonlu olması gerekir.

$$\int |f(t)|^2 dt < \infty \quad (4.20)$$

Fakat Ana Dalgacık fonksiyonun zaman bölgesinde 2 çarpanı ile genişletilmesi sonucu elde edilen fonksiyonun spektrumunun band genişliği, ana dalgacık fonksiyonun spektrumunun band genişliğinin yarısı olmaktadır. Yani zaman bölgesinde genişletme, frekans bölgesinde aynı oranda sıkıştırma anlamına gelir. Bu şekilde sıfıra doğru yaklaşarak sinyal spektrumunun sonlu sayıda baz fonksiyonu ile kaplanması mümkün değildir. Çünkü ana dalgacık fonksiyonundan baz fonksiyonları 2 çarpanı ile genişleterek elde edileceğinden, her seferinde elde edilen baz fonksiyonun spektrumunun band genişliği bir öncekinin yarısına eşit olacaktır. Bu durumda sonlu sinyal spektrumun kaplanması içinde sonsuz sayıda baz fonksiyona ihtiyaç vardır

Bu sorunun çözümü için sinyalin spektrumu sıfıra doğru Şekil 4.16’ da gösterildiği gibi 2 çarpanı ile daralan baz fonksiyonlarıyla kaplanmalı, sıfır noktasına en yakın kısmın kaplanması için gerekli sonsuz sayıdaki baz fonksiyonu spektrumu yerine alçak geçiren bir filtre spektrumu yerleştirilmelidir. Bu fonksiyonun spektrumu gerekli olan alçak geçiren filtre

spektrumuna karşılık gelir. Ölçeklendirme fonksiyonun spektrumu alçak geçiren özelliğinden dolayı, ortalama filtresi olarak da adlandırılır (Toprak, 2007).



Şekil 4.16 Sinyal spektrumunun sonlu sayıda baz fonksiyonu spektrumu ile kaplanması

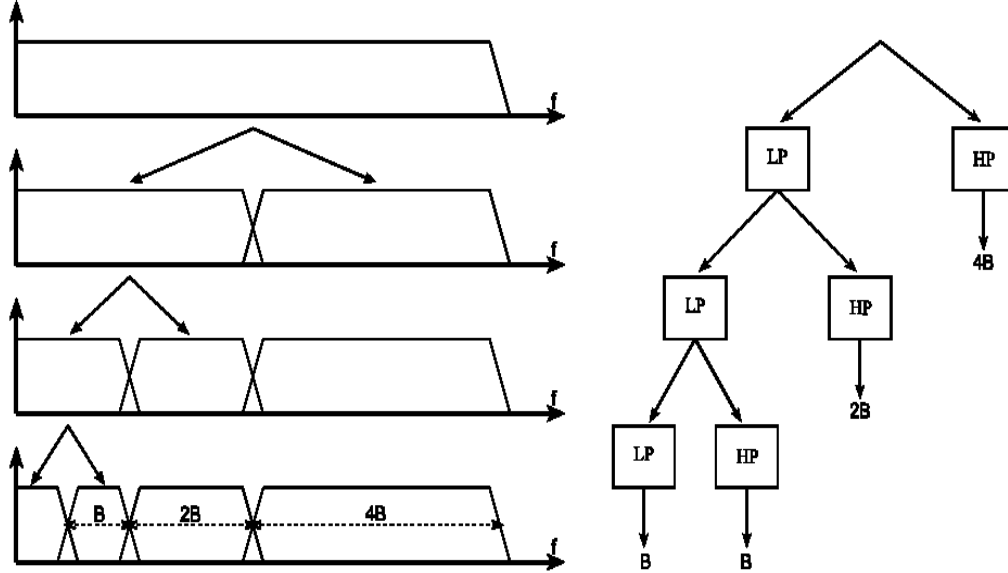
Mallat tarafından tanımlanan ölçeklendirme fonksiyonu ile sonsuz sayıda baz fonksiyonu gereksinimi ortadan kaldırılmış olur. Bu şekilde dalgacık için bir alt sınır belirlenmiş olur. Ancak bir kısım baz fonksiyonunun yerine ölçeklendirme fonksiyonun kullanılması bilgi kaybına neden olur. Bilgi kaybı, sinyalin geri çatılmasını yani dalgacık dönüşümünden tekrar elde edilebilmesini engellemeyecek düzeyde olduğu sürece sinyal gösterimi açısından bilgi kaybı olmadığı düşünülebilir.

Dalgacık dönüşümü bir filtre kümesi olarak düşünülürse, Dalgacık Dönüşümü işlemi sinyalin bu filtre kümesinden geçirilmesi olarak düşünülebilir. Her farklı filtrenin çıkışı dalgacık ve ölçeklendirme fonksiyonu dönüşüm katsayılarıdır. Aslında yapılan bu analiz “*altband kodlaması*” (subband coding) dır.

4.2.4 Çoklu Çözünürlük Analizi (ÇÇA)

Bir önceki bölümde bahsedilen Altband kodlamada gerekli olan filtre kümesi birkaç çeşit yolla elde edilir. Örneğin sinyalin spektrumu birçok band geçiren filtre ile frekans bandlarına bölünebilir. Ancak her filtrenin ayrı tasarlanması gerektiğinden bu işlem zaman açısından çok kullanışlı değildir. Bunun yerine sinyalin spektrumu alçak geçiren ve yüksek geçiren olmak üzere iki parçaya bölünür. Yüksek geçiren kısım detayları içeren kısımdır. İstenilen bilgi elde edilebilirse işlem burada sonlandırılır. Ancak alçak geçiren kısım olarak adlandırılan parçanın içinde hala sinyale ait farklı detaylar bulunmaktadır. Bunların incelenmesi için alçak geçiren kısım tekrar alçak ve yüksek geçiren olmak üzere iki parçaya bölünür. Bu işlem adımları istenilen bilgiler elde edilene kadar devam ettirilir. Böylelikle iteratif bir filtre kümesi elde edilmiş olur. Bu yolla sinyal spektrumunun alçak geçiren ve yüksek geçiren frekans

bandlarına ayrılması Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Frekans bandlarının sayısı ya da bir başka deyişle ayrıştırma seviyesi genelde bilgi veya hesaplanabilir enerji miktarına göre belirlenir (Toprak, 2007).



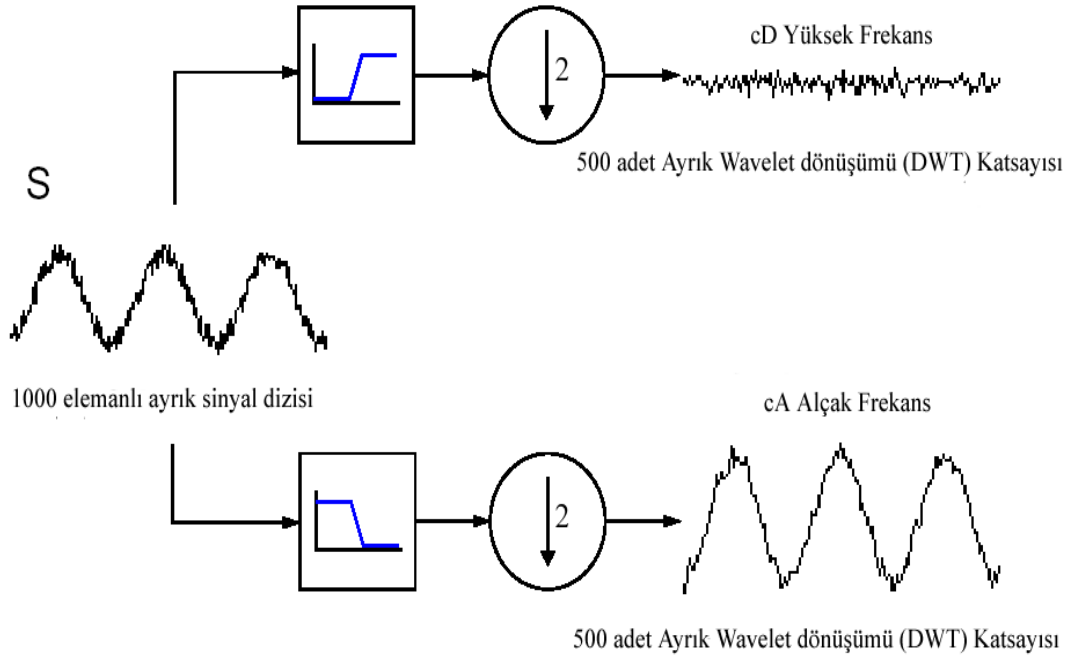
Şekil 4.17 Filtre kümesi ile sinyal spektrumunun frekans bandlarına ayrılması (Arı vd., 2008)

Sinyalin frekans ekseninde sağa doğru gidildikçe her seferinde solundaki filtre spektrumunun band genişliğinin iki katı band genişliğine sahip bir band geçiren filtre kümesi elde edilir. Sinyalin böyle bir alçak geçiren filtreden geçirilmesi işlemi Altband kodlama işlemidir. Bu şekilde sinyalin spektrumu belli frekans bandlarına ayrılır. Bu işlem dalgacık dönüşümü ile özdeştir. Çünkü ana dalgacık fonksiyonundan elde edilen ayırık baz fonksiyonlarının spektrumları ile frekans ekseninde sağa gittikçe genişlikleri ikinin katları olarak değişen filtrelerin spektrumları özdeştir. Alçak geçiren filtre spektrumu ise ölçeklendirme fonksiyonun spektrumu ile özdeştir.

Altband analizinde kullanılan band geçiren filtre kümesi sabit Q faktörlü filtre kümesidir. Genel olarak bu tarz bir analiz “Çoklu Çözünürlük Analizi” (Multiresolution Analysis) olarak adlandırılır.

ADD, 1989 yılında Mallat tarafından ortaya konan piramit şeklindeki bir algoritma ile iki adımlı bir prosedür olarak gerçekleştirilebilen bir eşitliktir. Prosedürün ilk adımı ayırık sinyale alçak ve yüksek geçiren filtrelere uygulanmasıdır. İkinci adımda ise filtrelerin çıkışında elde edilen diziler, seyrek örnekleme ile baştan itibaren her iki dizi elemanın sadece baştaki

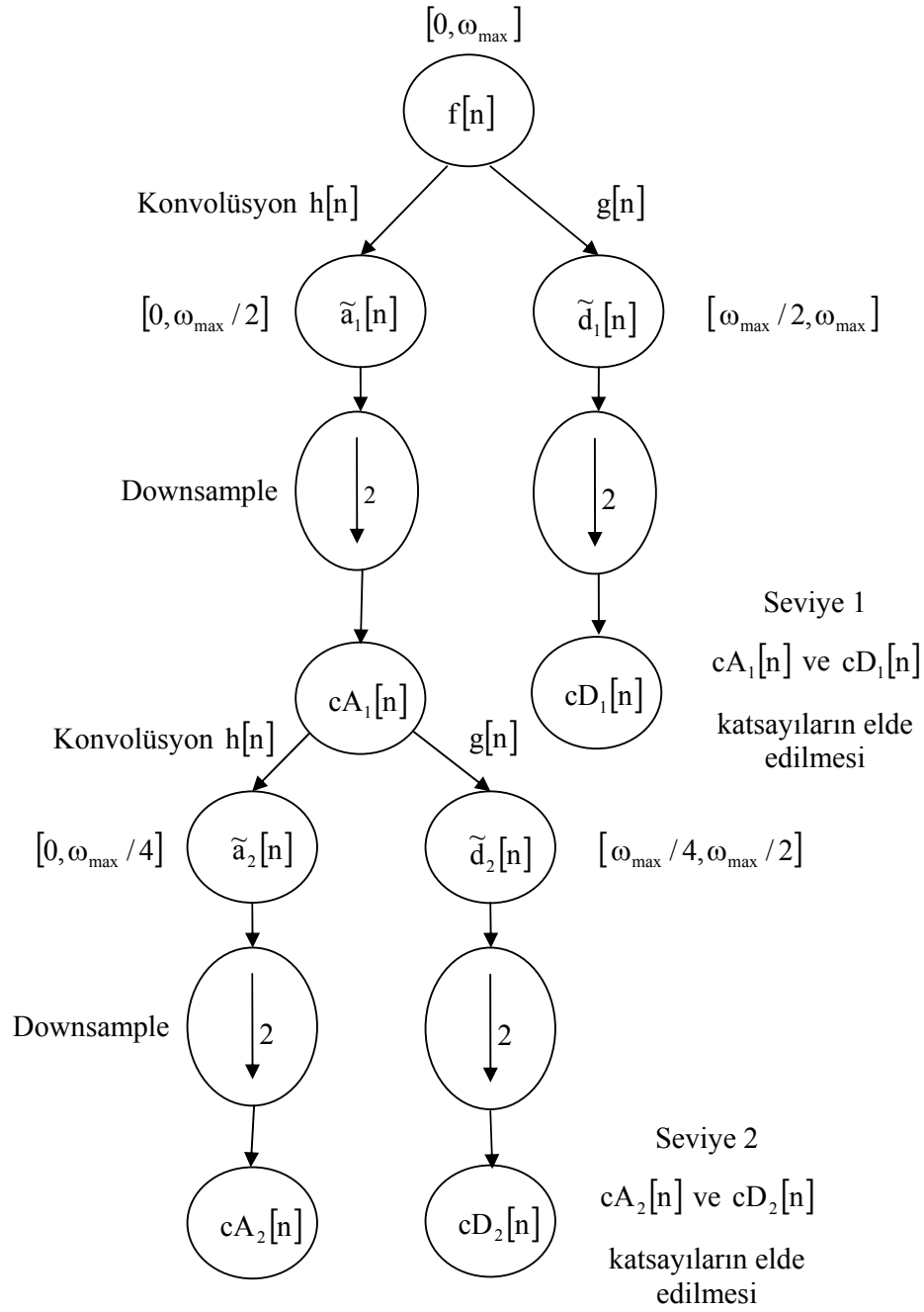
eleman alınarak, eleman sayıları yarıya düşürülür. Ayrıca bu işleme aşağıya doğru örnekleme (downsampling) de denir. Bu şekilde elde edilen sinyal dizilerinin eleman sayılarının toplamı ile ayrık sinyalin eleman sayıları toplamı ile aynı olur. Bu işlem aslında dönüşümün anahtar niteliğindeki adımıdır. İlk bakışta seyrek örnekleme işleminin bilgi kaybına yol açtığı düşünülebilir. Fakat bu işlem ile dalgacık dönüşümünün dezavantajlarından biri olan dönüşüm sonunda elde edilen gereğinden fazla olan bilgiler arındırılır ve Dalgacık dönüşümünün pratikte kullanışlı bir hale getirilmesi sağlanır (Toprak, 2007).



Şekil 4.18 Ayrık Dalgacık dönüşümün herhangi bir seviyesinde uygulanan adımlar

Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.18' de sırasıyla ADD ile bir sinyalin çok seviyeli olarak ayrıştırılması işleminin akış şeması, bu işleme dair bir örnek ve bir basamağında uygulanan adımları göstermektedir.

Şekil 4.19' da Mallat tarafından geliştirilen piramidal algoritma ile ADD' nün ayrıntılı akış diyagramını göstermektedir.



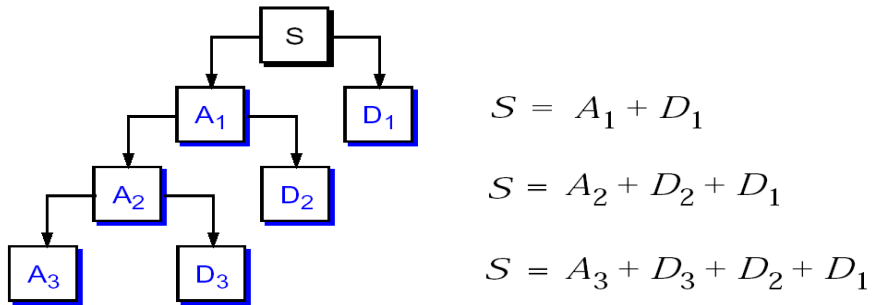
Şekil 4.19 Mallat algoritması yardımıyla ayrık sinyalin alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılması (Toprak, 2007)

Şekil 4.19’ da 2 seviyeli bir ayrıştırma ile sinyal spektrumunun $[0, \omega_{\max}/4]$, $[\omega_{\max}/4, \omega_{\max}/2]$ ve $[\omega_{\max}/2, \omega_{\max}]$ olmak üzere 3 parçaya bölündüğü görülmektedir. Bu şekilde ADD dikkat edilmesi gereken nokta ayırık sinyal dizisinin eleman sayısının 2^N olacak şekilde ifade edilebilmesidir. Eğer ayırık sinyalin eleman sayısı bu şartı sağlamıyorsa sinyal dizisinin eleman sayısı 2^N olana kadar sinyale gerekli sayıda “0” elemanı eklenebilir. Bu işlem sinyalin içerdiği bilgiyi etkilemez (Arı vd., 2008).

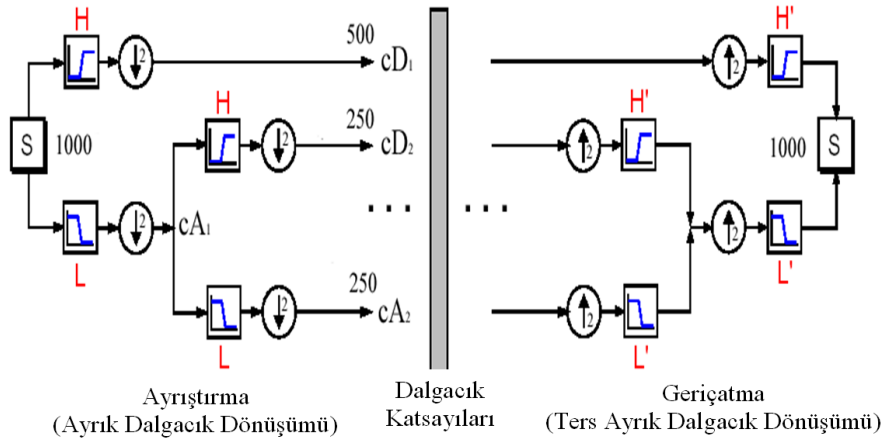
Algoritmada sinyalin spektrumu ilk başta iki eşit parçaya $([0, \omega_{\max}/2], [\omega_{\max}/2, \omega_{\max}])$ bölündükten sonra, alçak geçiren kısmı tekrar iki eşit parçaya bölünerek $([0, \omega_{\max}/4], [\omega_{\max}/4, \omega_{\max}/2])$ sinyal spektrumunun farklı frekans bandlarına ayrılması sağlanır. Eğer gerekli ise bir sonraki adımda yine en son elde edilen alçak geçiren kısım $([0, \omega_{\max}/4])$ iki eşit frekans bandına ayrılabilir (Arı vd., 2008).

4.2.5 Sinyalin Yeniden Elde Edilmesi

Sinyalin ayrıştırma ile elde edilen bileşenlerinden bilgi kaybı olmadan tekrar elde edilmesi işlemine “*Sentez*” veya “*Geriçatılma*” denir. Geriçatılma işleminde, ayrıştırma sonucunda elde edilen dalgacık katsayılarından sinyalin yeniden elde edilmesi gerçekleştirilir. Şekil 4.20’ de gösterildiği gibi ayırık sinyal hangi seviyede ayrıştırıldığı önemli olmaksızın tekrar elde edilebilir. Şekil 4.21 bu yöntemi göstermektedir. Sinyalin ayrıştırılması işleminde aşağıya doğru örnekleme (downsampling) işlemi ile dalgacık katsayıları elde edilir. Geriçatılma işleminde aşağı doğru örnekleme işlemine karşılık yukarı doğru örnekleme (upsampling) işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 4.20 Ayrıştırılmış bir sinyalin yaklaşık ve detay bileşenleri ile oluşturulması



Şekil 4.21 Bir s sinyalinin ayrıştırılması ve geriçatılması

Yukarı doğru örnekleme işleminde, dalgacık katsayıları dizilerine her iki örnek arasında bir “0” genlikli örnek eklenir. Sinyal bu işlem sonunda kayıpsız olarak tekrar elde edilebilir. Aşağıya doğru örnekleme işlemi ile lüzumsuz olarak nitelendirilen bilgilerin arındırılmasının, sinyalin tekrar elde edilmesini engelleyecek bilgi kaybına yol açmadığı, yukarı doğru örnekleme işleminde arındırılan örnekler yerine “0” konmasının sinyalin kayıpsız elde edilmesini engellememesinden dolayı bir kez daha doğrulanır.

4.2.6 Dalgacık Fonksiyonları

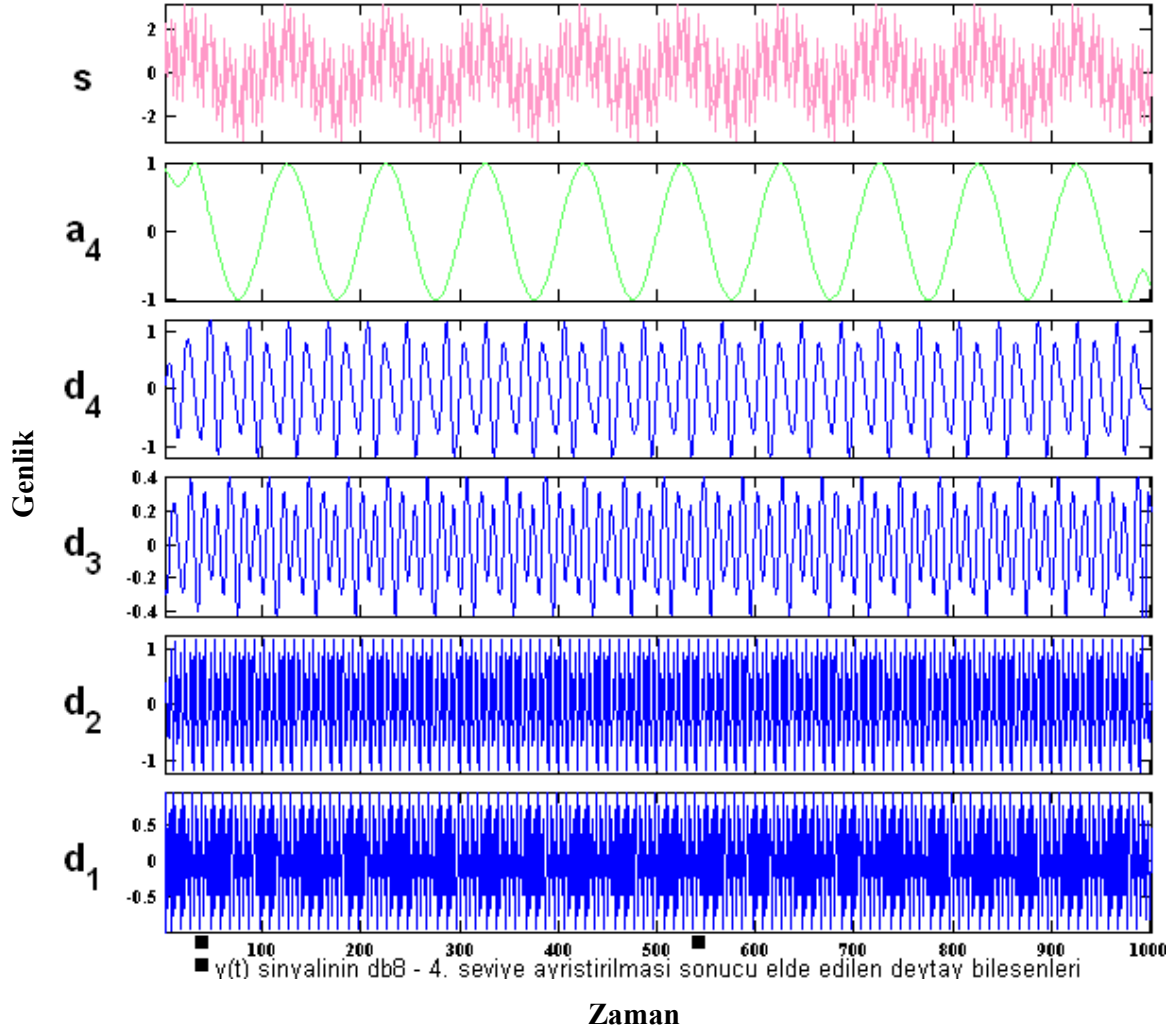
İlk orthonormal Dalgacık fonksiyonları kümesi, 1910 yılında Haar ile ortaya konmuştur. Haar Dalgacık en eski ve en basit Dalgacık fonksiyonudur (Arı vd., 2008). Bundan başka kullanılan diğer Dalgacık fonksiyonları ise Çizelge 4.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Dalgacık fonksiyonları

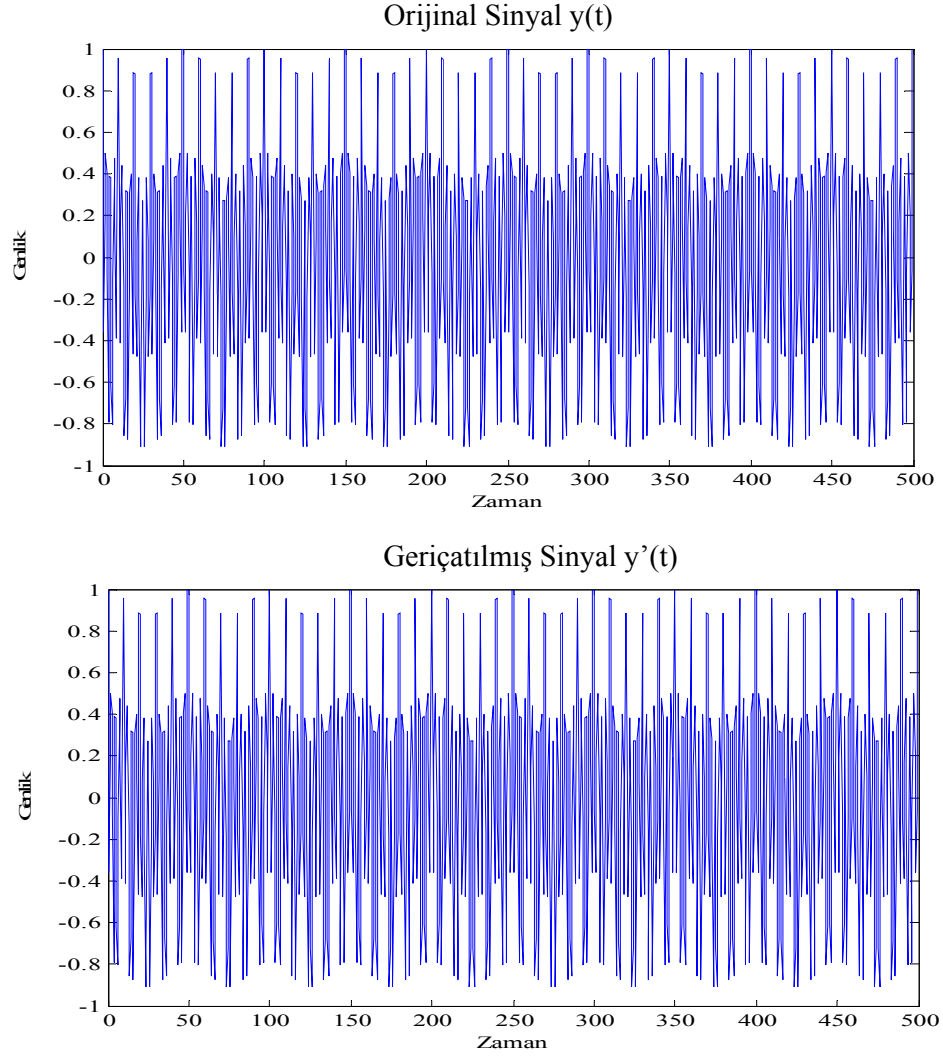
'haar'	Haar wavelet	'gaus'	Gaussian wavelets
'db'	Daubechies wavelets	'mexh'	Mexican hat wavelet
'sym'	Symlets	'morl'	Morlet wavelet
'coif'	Coiflets	'cgau'	Complex Gaussian wavelets
'bior'	Biorthogonal wavelets	'shan'	Shannon wavelets
'rbio'	Reverse biorthogonal wavelets	'fbsp'	Frequency B-Spline wavelets
'meyr'	Meyer wavelet	'cmor'	Complex Morlet wavelets

Tezin uygulama kısmında Daubechies (db) Dalgacık fonksiyonu kullanılarak köprü hareketleri inceleneceğinden db fonksiyonu ile ilgili örnek bir uygulama verilmiştir.

Şekil 4.4' de zaman-genlik gösterimi verilen $y(t)$ sinyalinin Ayırık Dalgacık dönüşümü piramidal algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Sinyal piramidal algoritma ile farklı seviyelerde ayrıştırılarak sinyalin spektrumu farklı sayıda frekans bandlarına bölünmüştür ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.22' de gösterilmiştir.



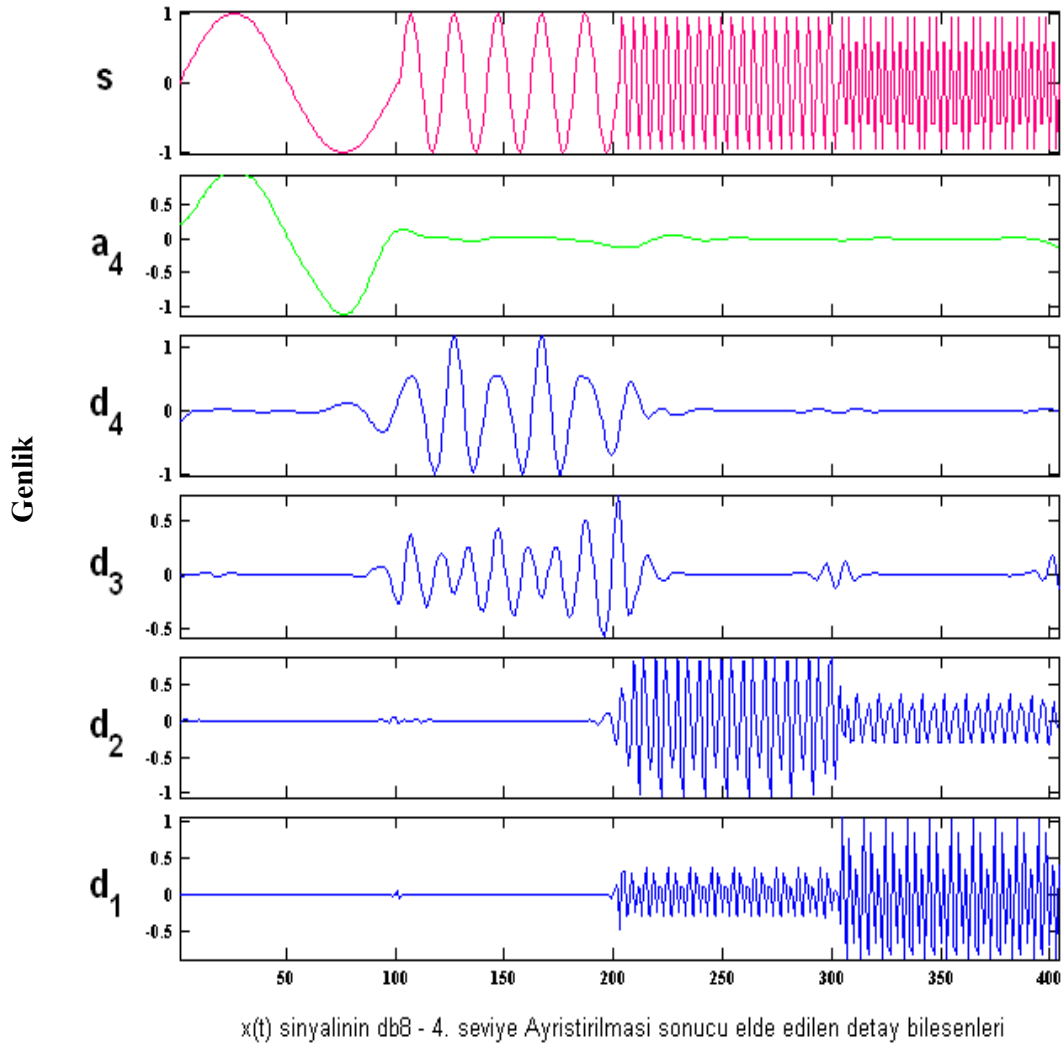
Şekil 4.22 $y(t)$ sinyalinin 4.seviye ayırık Dalgacık dönüşümü (db8 - 4)



Şekil 4.23 $y(t)$ sinyali ve bu sinyalin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen katsayılardan yeniden oluşturulması ile edilen geriçatılmış sinyalin zaman-genlik gösterimleri

Şekil 4.23' de $y(t)$ sinyalinin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen cD_1, cD_2, cD_3, cD_4 ve cA_4 katsayı dizilerinden tekrar elde edilmesi işleminin pratikte gerçekleşmesine örnek olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi sinyal mükemmel şekilde Dalgacık katsayılarından tekrar elde edilmiştir.

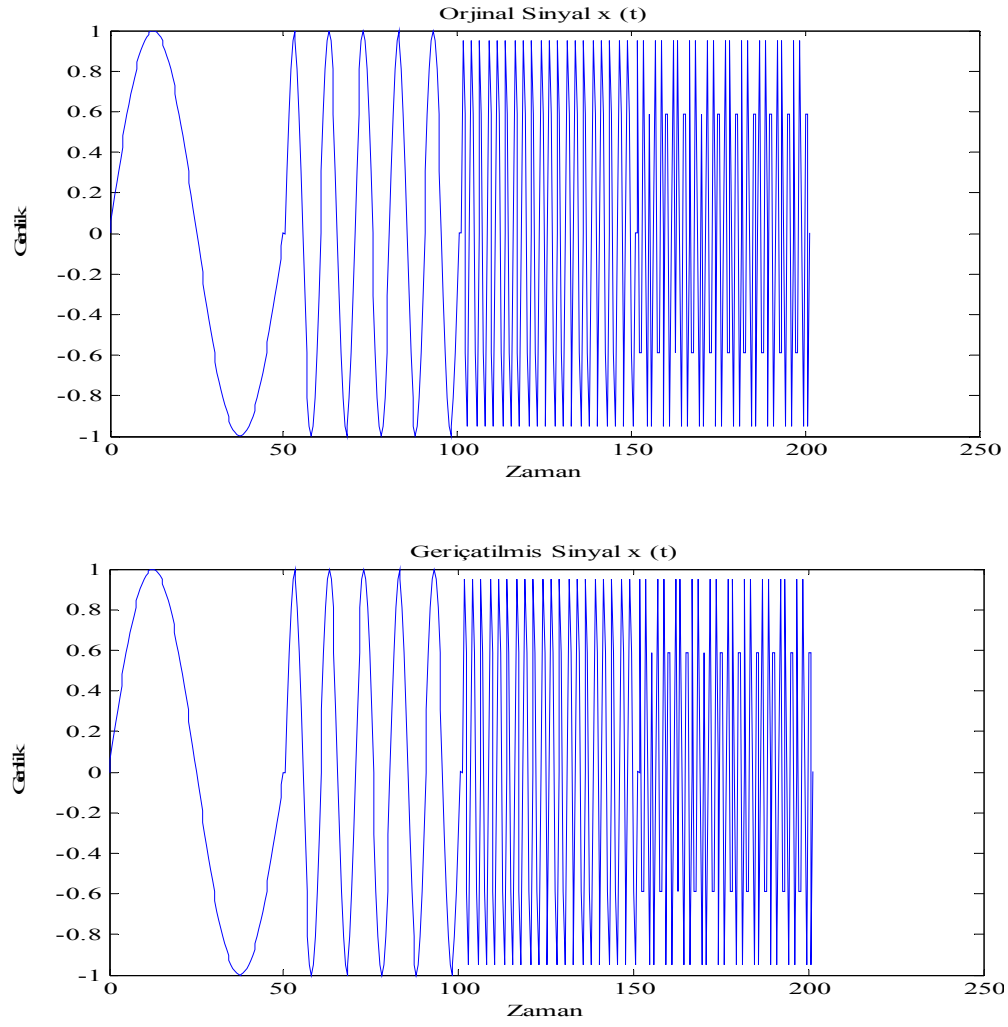
Şekil 4.5' de zaman-genlik gösterimi verilen $x(t)$ sinyalinin Ayırık Dalgacık Dönüşümü de piramidal algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Sinyal piramidal algoritma ile 4. seviyeye kadar ayrıştırılarak spektrumu farklı sayıda frekans bandlarına bölünmüştür ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.24' de gösterilmiştir.



Şekil 4.24 $x(t)$ sinyalinin db8 ile 4.seviye ayrık Dalgacık dönüşümü

Şekil 4.25' de $x(t)$ sinyalinin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen cD_1, cD_2, cD_3, cD_4 ve cA_4 katsayı dizilerinden tekrar elde edilmesi örnek olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi $x(t)$ sinyali de $y(t)$ sinyali gibi mükemmel şekilde dalgacık katsayılarından tekrar elde edilmiştir.

Dalgacık analizi sonucu sinyal hangi seviyede ayrıştırılmış olursa olsun dönüşüm sonucu elde edilen katsayılardan mükemmel şekilde tekrar elde edilebilmektedir (Polikar, 1995).



Şekil 4.25 $x(t)$ sinyali ve $x(t)$ sinyalinin 4.seviye ayrıştırması ile elde edilen katsayılarından geriçatılması ile oluşturulan sinyalin zaman-genlik gösterimleri

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışması kapsamındaki ölçüler 2003 yılında Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü ile Yıldız Teknik Üniversitesi Rektörlüğü arasında 3 yıllığına imzalanan 2003-B-17-007 numaralı protokolün izni ve YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Aynı protokol ve proje kapsamında Erdoğan (2006) tarafından benzer bir doktora çalışması yapılmıştır. Erdoğan (2006) bu çalışmasında Boğaziçi Köprüsü kuleleri ve tabliyesindeki hareketleri incelemek için klasik ölçü yöntemlerini kullanmıştır. Ölçülerin kayıt aralıkları 10 dk olarak seçilmiştir. Operatör destekli bir ölçme tekniği olduğu için ölçü süresi 10 saatle sınırlandırılmıştır. Köprüye etkiyen dış yüklere (taşıt, sıcaklık, rüzgar) ait veriler Karayolları 17. Bölge müdürlüğünden temin edilmiş olup bu verilerin kayıt aralıkları ise 1 saattir. Ölçüler ve dış yükler kullanılarak köprü kulelerinin hareketleri modellenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada köprü kulelerinin dış yüklere bağlı hareketleri regresyon, AR, MA ve ARMA modeller kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise Köprü kulesi ve tabliyesindeki hareketleri incelemek için klasik yöntem yerine GPS yöntemi kullanılmıştır. Doğrudan operatöre ihtiyaç duyulmadan GPS alıcıları sürekli gözlem yapabildiği için ölçüler 1 hafta süreyle devam etmiştir. Böylece köprü kuleleri ve tabliyenin farklı günler ve farklı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Ölçüler boyunca köprüye etkiyen dış yüklerden rüzgar, sıcaklık, basınç ve bulutluluk durumuna ait veriler özel bir meteoroloji istasyonundan alınmış olup kayıt aralıkları 5 dakikadır. Dış yüklerden trafik yüküne ait araç sayısı ve cinsi Karayolları 17. Bölge müdürlüğünden temin edilmiş olup kayıt aralıkları 1 saattir. Modelleme ve analiz aşamalarında regresyon ve Dalgacık Dönüşümü kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada rüzgar yükü olarak toplam rüzgar hızı yerine, rüzgarın yönüne göre rüzgar hızlarının X ve Y bileşenleri kullanılmıştır. Aynı şekilde sıcaklık yerine de ölçülen ortam sıcaklığı yerine güneşin hareketine bağlı olarak değişen yapı elemanlarının sıcaklıkları kullanılmıştır.

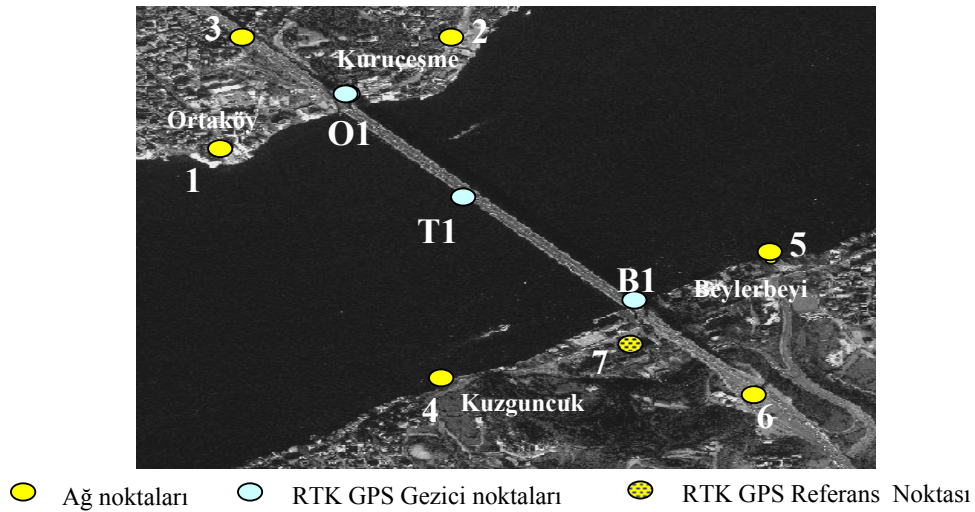
5.1 Boğaziçi Köprüsü'nde GPS Ölçülerinin Yapılması

Köprü kuleleri ve tabliye hareketlerinin belirlenmesinde yapılacak GPS ölçmeleri için RTK GPS yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile düşük kayıt aralıkları ile uzun süreli gözlemler yapılabilmekte ve anlık 3 boyutlu konum bilgisi elde edilebilmektedir. Böylece klasik GPS uygulamalarındaki sonradan değerlendirme aşamasına gerek kalmadan anlık ve yeterli doğrulukta konum bilgisi elde edilebilmektedir. Literatür araştırmalarında yapılan birçok çalışmada tercih edilen yöntem RTK - GPS yöntemidir.

5.1.1 Kontrol Ağı ve Obje Noktalarının Belirlenmesi

RTK – GPS sistemi ile köprü hareketlerinin belirlenebilmesi için referans olarak kullanılacak sabit noktalara ihtiyaç vardır. Yukarıda bahsedilen protokol kapsamında köprünün yakın çevresinde bir kontrol ağı kurulmuştur. Bu ağa ait noktalardan Boğaziçi Köprüsü İşletme Şeflik binasının çatısında bulunan 0007 numaralı nokta RTK – GPS ölçüleri için referans nokta olarak seçilmiştir.

Şekil 5.1 de kontrol ağı noktaları ile obje noktalarının yerleri görülmektedir. Kontrol ağı noktalarından 2, 3, 4 ve 6 numaralı noktalar Pilye, 7 numaralı nokta yarım pilye, 1 ve 5 numaralı noktalar ise zeminde bronz olarak tesis edilmiştir. Köprüdeki hareketleri en iyi temsil edebilecek yerler olarak belirlenen kule tepeleri ile tabliye orta noktasına da obje noktaları işaretleri tesis edilmiştir. B1 ve O1 numaralı noktalar sırasıyla Beylerbeyi ve Ortaköy kulelerinin tepesinde, T1 numaralı nokta ise tabliyenin güney orta kısmındadır.



Şekil 5.1 Kontrol ve obje noktaları

5.1.2 Obje Noktalarının Ölçümü

Obje noktaları olarak belirlenen kule tepeleri ve tabliye orta noktasında gerçekleştirilecek RTK GPS ölçmeleri için biri referans, üçü gezici olmak üzere toplam dört adet GPS alıcısı kullanılmıştır. Kullanılan donanım Thales Z-max RTK GPS alıcılarıdır. Alıcıların RTK ölçme duyarlılıkları, yatayda (0.010m+1.0ppm), düşeyde ise (0.020 m + 1.0 ppm) dir.

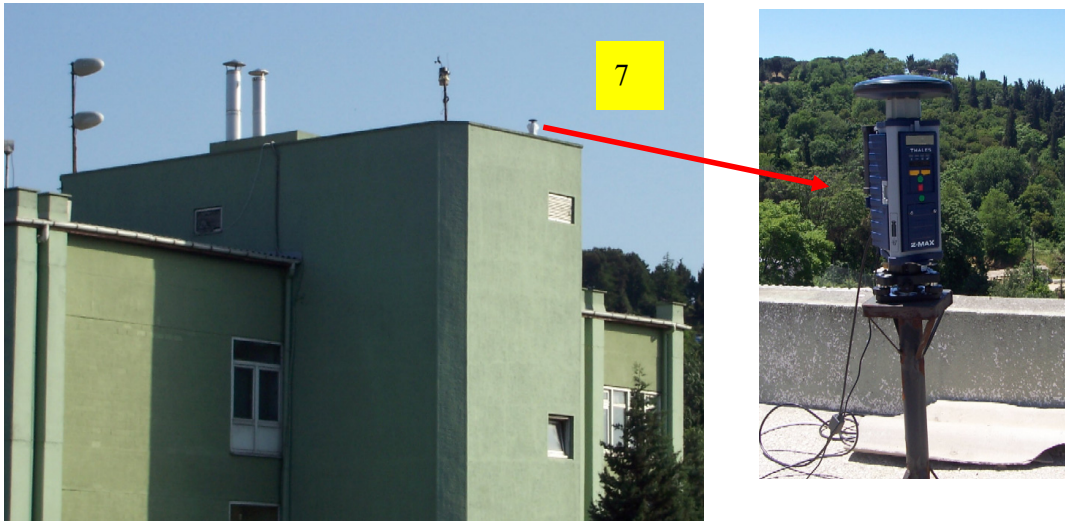
Tüm alıcılar 0.1 sn kayıt aralığında veri toplama kapasitesine sahiptir. Ancak RTK GPS ile

yapılan test ölçülerinde el kontrol ünitelerine sürekli veri kaydı yapılırken sabit kayıt aralıklı veri depolanamadığı görülmüştür. Ayrıca el kontrol üniteleri 1 sn kayıt aralığının altında veri depolayamamaktadır. Literatür incelemelerine göre tabliyede yüksek frekanslı hareketler olduğu için verilerin düşük kayıt aralığında toplanması gerekmektedir. Tüm bu olumsuzlukların giderilebilmesi için verilerin doğrudan bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Verileri doğrudan bilgisayara aktarmak için Ashtech Evalue adlı bir yazılım kullanılmıştır.

Obje noktalarına yerleştirilen GPS alıcıları ile 3– 10 Haziran 2006 tarihleri arasında sürekli GPS ölçüleri gerçekleştirilmiştir.

5.1.2.1 Ölçü Donanımın Yerleştirilmesi

Boğaziçi Köprüsü bakım işletme şefliği binasının üzerinde bulunan ve referans olarak seçilen 7 numaralı noktaya RTK-GPS referans alıcı ve anteni (Şekil 5.2) ile modem verici anteni yerleştirilmiştir (Şekil 5.3). Alıcı ve modem donanımlarının sürekli güç ihtiyaçlarını karşılamak için her iki donanım da doğrudan şebeke elektriğine bağlanmıştır. Ayrıca elektrik kesintilerinden kaynaklanabilecek kapanmaların önüne geçmek için GPS alıcılarının dahili bataryaları da cihazlar üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.2 RTK-GPS referans alıcısı



Şekil 5.3 RTK-GPS verici modem anteni

5.1.2.2 Beylerbeyi ve Ortaköy Kule Noktalarına Ölçü Donanımlarının Yerleştirilmesi

Obje noktalarının ölçümü için Kuleler ve tabliyedeki B1, O1 ve T1 noktalarına 3 adet bilgisayar işlemcisi, 3 adet monitor, 3 adet kesintisiz güç kaynağı yerleştirilmiştir. Beylerbeyi kuledeki B1 noktasına (Şekil 5.4) sadece GPS anteni monte edilmiştir (Şekil 5.5). GPS alıcıları bilgisayar donanımı ile birlikte kule içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 5.6). Böylece GPS alıcısı ve bilgisayar donanımı dış etkilere karşı korumaya alınmıştır. Alıcı – anten ve alıcı – modem bağlantıları için 10 m. uzunluğunda RG 58 anten ve modem kablosu kullanılmıştır. GPS alıcıları doğrudan şebeke gerilimine bağlanmış ve elektrik kesintilerinden etkilenmemek için bir de kesintisiz güç kaynağı kullanılmıştır. Aynı işlemler Ortaköy kuledeki O1 numaralı nokta için de tekrarlanmıştır.



Şekil 5.4 Beylerbeyi kule B1 numaralı obje noktası



Şekil 5.5 Beylerbeyi kule B1 numaralı obje noktasındaki GPS ve modem anteni



Şekil 5.6 Beylerbeyi kule içine yerleştirilen GPS alıcısı ve bilgisayar donanımı

5.1.2.3 Güney Orta Tabliye Noktasına Ölçü Donanımlarının Yerleştirilmesi

Köprü tabliyesinde korkuluk üzerinde bulunan O1 numaralı obje noktasına (Şekil 5.7) GPS anteni ve modem anteni kurulmuştur (Şekil 5.8). Güvenlik için GPS alıcısı bilgisayar ve güç kaynağı orta noktada bulunan güvenlik kulübesine yerleştirilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.7 Güney orta tabliyedeki T1 numaralı obje noktası



Şekil 5.8 T1 numaralı noktadaki GPS ve modem anteni

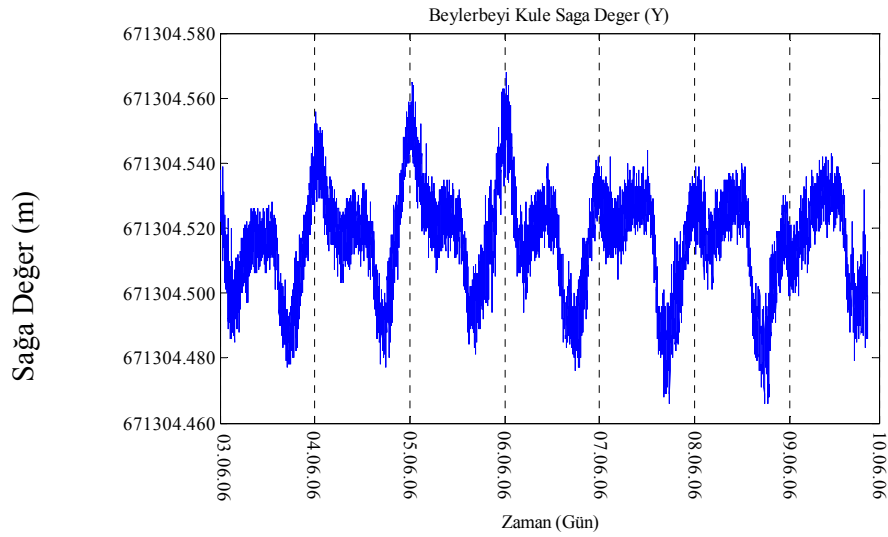


Şekil 5.9 T1 numaralı noktadaki GPS alıcısı ve bilgisayar donanımı

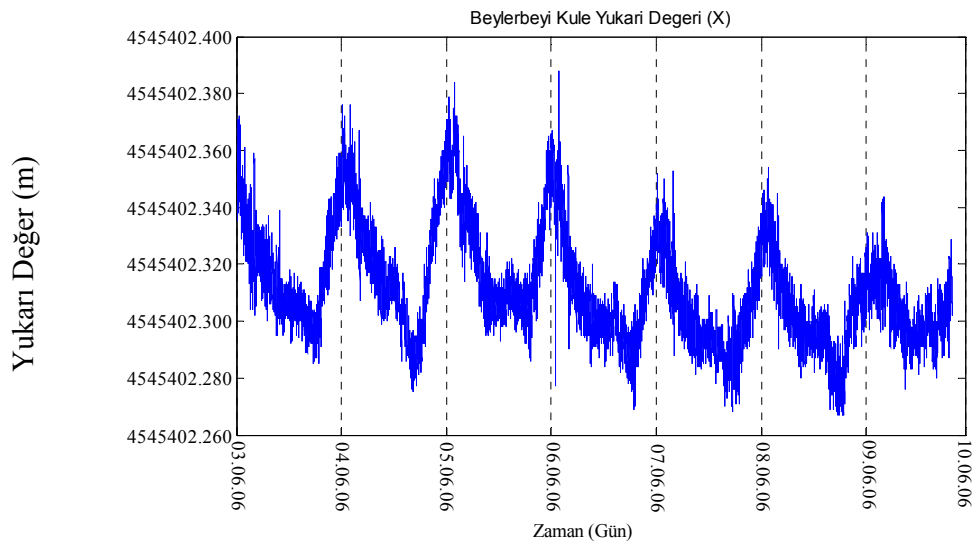
5.2 Ölçülerin Analize Hazırlanması

5.2.1 Köprü Koordinat Sisteminin Oluşturulması

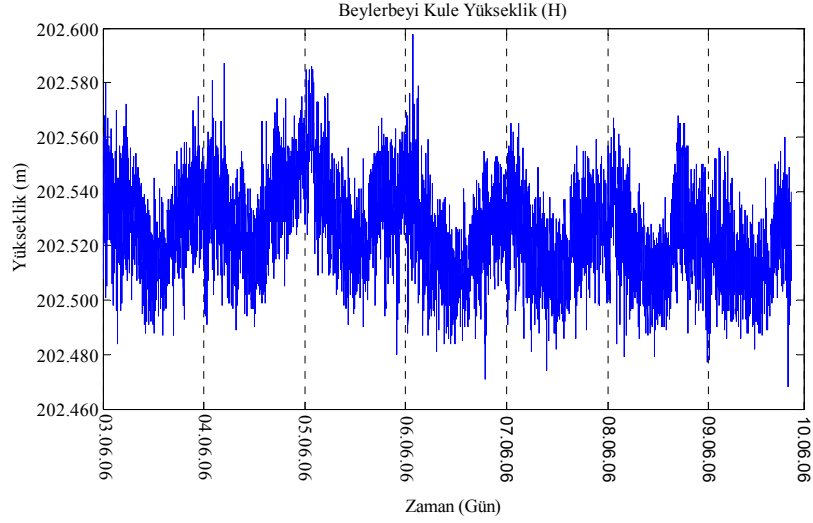
Boğaziçi Köprüsünde gerçekleştirilen GPS ölçülerinden her bir noktaya ait konum bilgileri UTM sisteminde elde edilmiştir. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 UTM sisteminde elde edilen sırasıyla sağa değer, yukarı değer ve elipsoidal yükseklik bileşenlerinin zaman - genlik grafiklerinin göstermektedir. Her bir konum verisi için kayıt aralığı 1sn ve ölçü süresi bir haftadır.



Şekil 5.10 Beylerbeyi kulede UTM sisteminde toplanan konum bilgilerinin *Sağa* değerleri

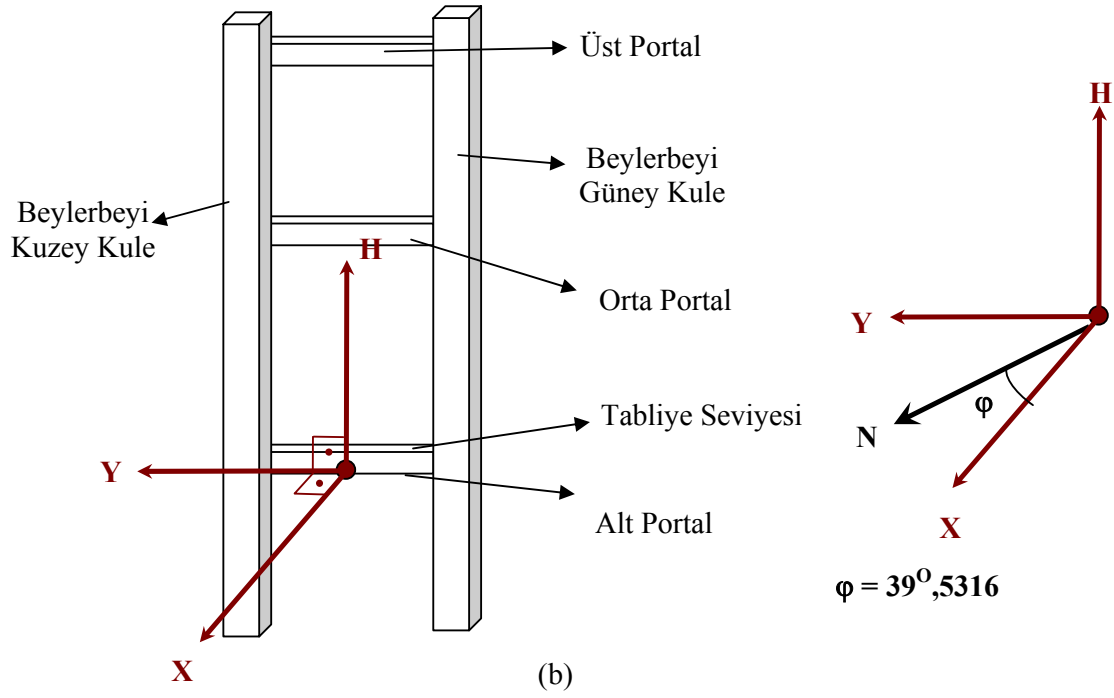
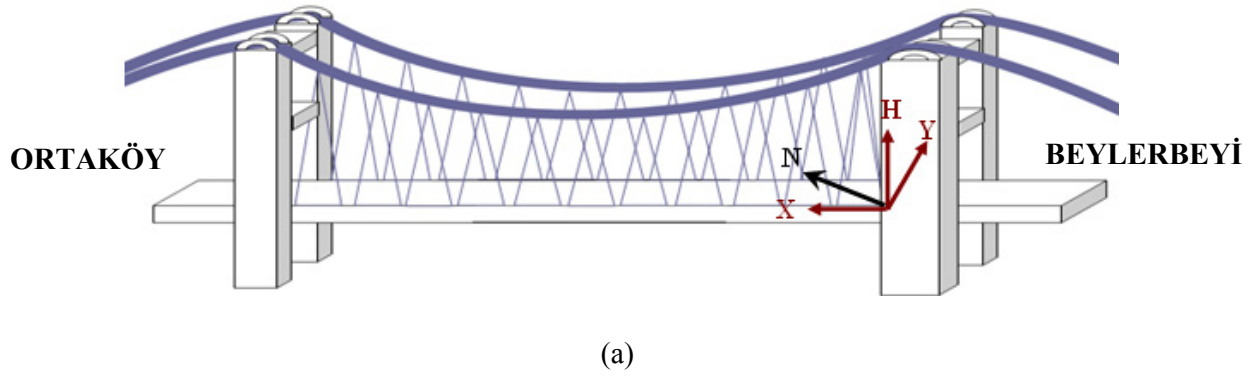


Şekil 5.11 Beylerbeyi kulede UTM sisteminde toplanan konum bilgilerinin *Yukarı* değerleri



Şekil 5.12 Beylerbeyi kule yükseklik değerleri

UTM sisteminde elde edilen bu koordinatlarla köprü hareketlerinin yorumlanması çok kolay olmayacaktır. Bu nedenle köprü hareketlerinin daha iyi yorumlanabilmesi için köprü üzerinde yerel bir koordinat sistemi oluşturulmuştur. Köprü koordinat sistemi olarak adlandırılan bu sistemde, sistemin orijini Beylerbeyi kulenin alt Portalının (tabliyenin hemen altı) orta noktasıdır. Bu noktanın koordinatları (1000 m.,1000 m.) seçilmiştir. Sistemin X eksenini trafik akış doğrultusunda olup Beylerbeyi – Ortaköy yönü pozitif (+X) yön olarak seçilmiştir, +X doğrultusu ile Kuzey doğrultusu arasındaki açı $\varphi = 39^{\circ},5316$ dir. Y eksenini ise trafik akış yönüne dik yönde ve kuzey-doğu istikameti pozitif (+Y)' dir. Yükseklikler için herhangi bir dönüşüme gerek kalmadan doğrudan elde edilen elipsoid yükseklikler kullanılmıştır. Şekil (5.13) oluşturulan yerel koordinat sisteminin eksenlerini göstermektedir.



Şekil 5.13 Köprü yerel koordinat sisteminin genel görünümü (a) ile sistemin başlangıç noktası olan Beylerbeyi kulenin ayrıntılı görünümü (b)

Dönüşüm sonucu elde edilen 1 saniye aralıklarla toplanmış köprü koordinat sistemindeki nokta konum bilgileri ile ilgili özet bilgiler çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1 B1 ve O1 obje noktalarının köprü koordinat sisteminde özet konum bilgileri

Nokta		Maksimum (m)	Minumum (m)	Fark (m)	Ortalama (m)	Std Sapma (m)
B1	Y	997.436	997.297	0.139	997.362	0.021
	X	998.312	998.222	0.090	998.262	0.012
	H	202.599	202.468	0.131	202.525	0.015
O1	Y	995.981	995.803	0.178	995.886	0.023
	X	2072.678	2072.586	0.092	2072.628	0.012
	H	202.649	202.411	0.238	202.536	0.019

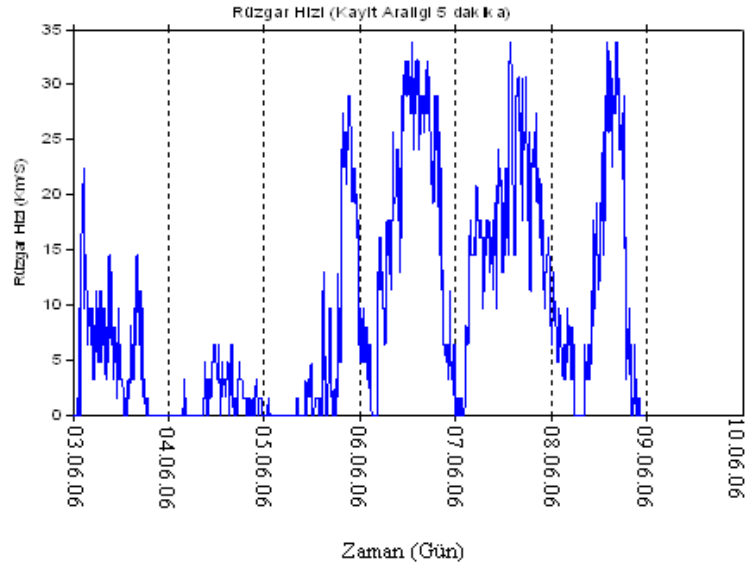
5.2.2 Etki Büyüklüklerinin Belirlenmesi

Boğaziçi Köprüsü'nde gerçekleştirilen GPS ölçülerinden elde edilen obje noktalarına ait konum bilgileri köprünün zamana bağlı hareketleri hakkında bilgi verir. Köprünün bu hareketlerinin sebebi rüzgar, sıcaklık basınç, taşıt yükü vb. olabilir. Bu etkiler ise dış yükler ya da etki büyüklükleri olarak adlandırılır. Bu nedenle dış yüklerin de ölçü süresince gözlenmesi ve kayıt altına alınması gerekmektedir.

Ölçüm tarihleri arasında bu büyüklüklere ait verilerde toplanmıştır. Taşıt yükü için taşıt sayısı ve cinsine ait verilerin kayıt aralıkları 1 saat olup, köprü bakım işletme şefliğinden temin edilmiştir. Rüzgar yönü ve şiddeti ile sıcaklık bilgileri ise köprünün Anadolu ayağı yakınlarında sürekli gözlem yapan bir meteoroloji istasyonundan alınmıştır. Bu verilerin kayıt aralıkları 5 dakikadadır. Analiz işlemlerinde bu verilerin yük olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle Boğaziçi Köprüsü'ne etkiyen büyüklüklerin yük olarak karşılıkları hesaplanmıştır. Bu yüklerle kule noktalarının koordinat değişimleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

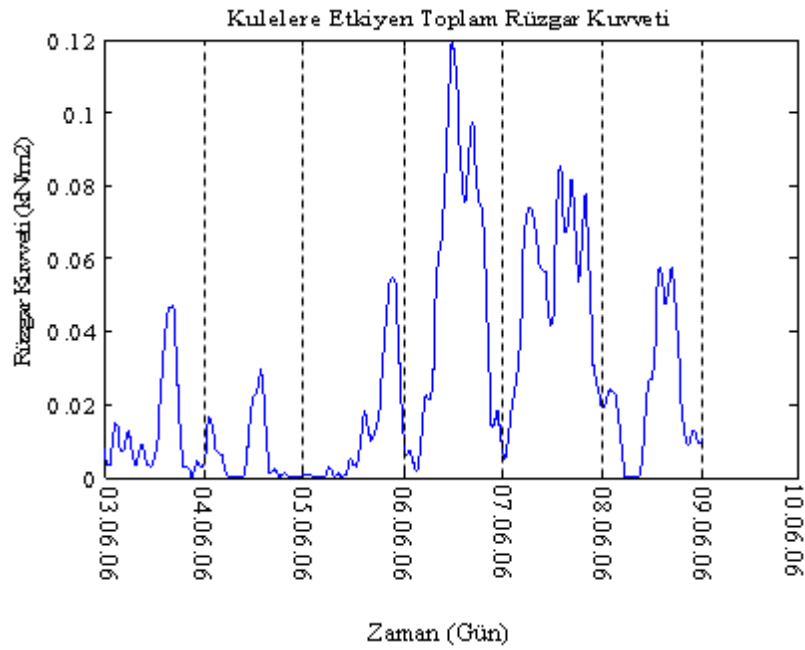
5.2.2.1 Rüzgar Kuvveti

Meteoroloji istasyonundan alınan rüzgar şiddetine ait bilgiler Şekil 5.14' de gösterilmektedir. Burada rüzgar şiddeti Km/Saat olarak alınmış olup kayıt aralıkları 5 dakikadır.

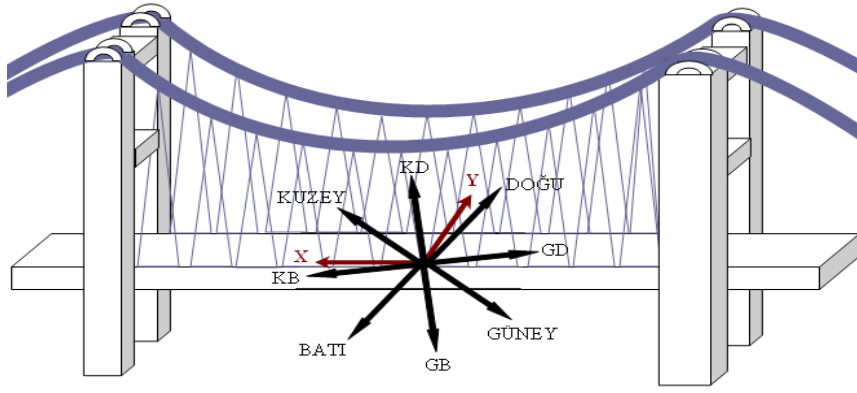


Şekil 5.14 Ölçü tarihlerindeki rüzgar hızının zaman göre değişimi

Rüzgarın analizlerde yük olarak kullanılabilmesi için Boğaziçi Köprüsü'nde m^2 , ye etkiyen rüzgar kuvveti (2.2) eşitliği ve Çizelge (2.1) değerlerine göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen rüzgar kuvvetinin zamana göre değişimi Şekil 5.15' de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Boğaziçi Köprüsü kulelerine etkiyen toplam rüzgar kuvveti (kayıt aralığı 1sn)

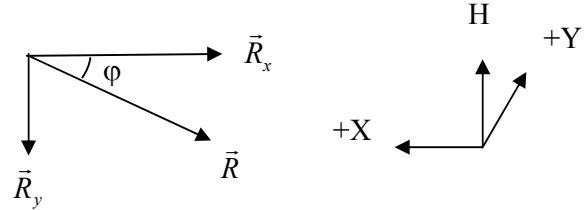


Şekil 5.16 Boğaziçi Köprüsü'nü etkileyen rüzgar yönleri

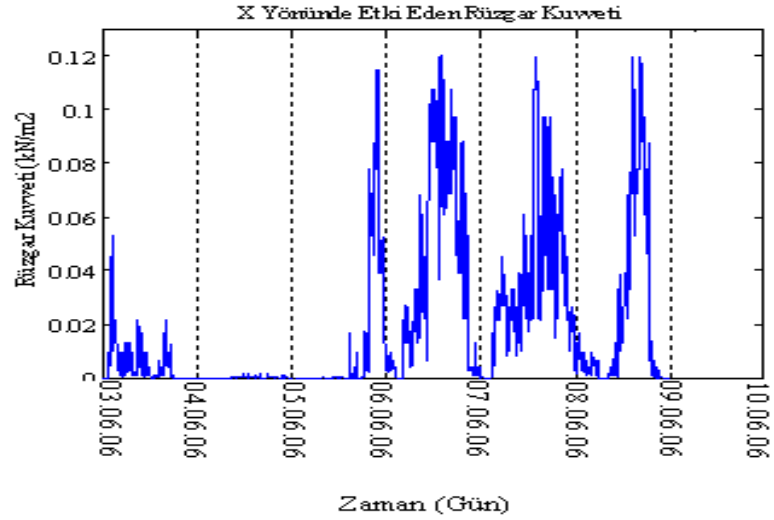
Şekil (5.16)' da Boğaziçi Köprüsü' ne etkileyen rüzgar yönleri görülmektedir. Gerek kuleler gerekse tabliyede rüzgar yükünün etkisini daha iyi ortaya koyabilmek için köprüye etkileyen rüzgar vektörü bileşenlerine ayrılmıştır. Bileşenlere ayırma işlemi köprü koordinat sistemi ile kuzey arasındaki açı değeri ($\varphi = 39^{\circ},5316$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerleri içerisinde bulunan rüzgar yön bilgileri yardımıyla her kayıt aralığında ölçülmüş rüzgar hızına karşılık, X ve Y yönündeki bileşenleri hesaplanmıştır. Örneğin herhangi bir t kayıt anında ölçülen $\vec{R}$ rüzgar vektörünün yönü kuzey, şiddeti de 5 Km/S olsun. Bu durumda kuzeyden esen rüzgarın X bileşeni koordinat sisteminin X eksenini ile zıt yönlü olacağı için hız bileşeni (-) işaretli olacaktır. Aynı şekilde Y yönündeki bileşeni de koordinat sisteminin Y eksenini ile zıt yönlü olacağı için hız bileşeni (-) işaretli olacaktır. X ve Y bileşenlerinin büyüklüğü ise;

$$\vec{R}_x = \vec{R} \cdot \cos \varphi = - 3.86 \text{ Km/S}$$

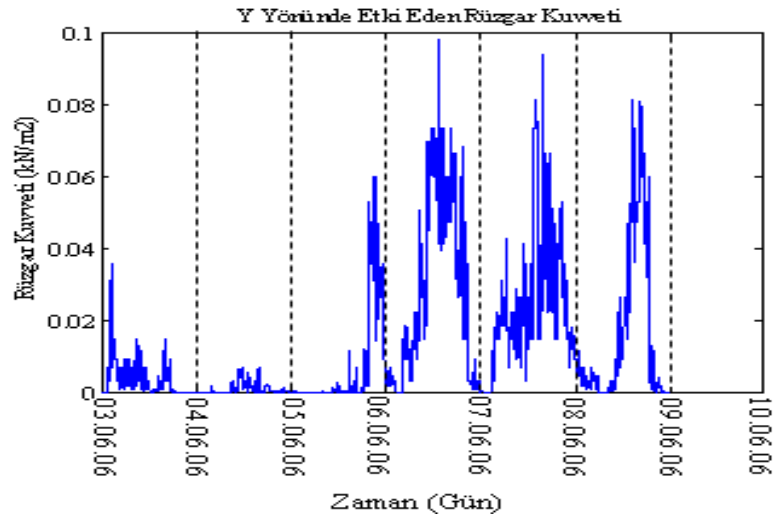
$$\vec{R}_y = \vec{R} \cdot \sin \varphi = - 3.18 \text{ Km/S}$$



Buna göre köprüye etkileyen toplam rüzgar kuvveti bileşenlerine ayrılmıştır. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 x ve y yönündeki 5 dk kayıt aralıklı rüzgar kuvveti bileşenlerini göstermektedir.



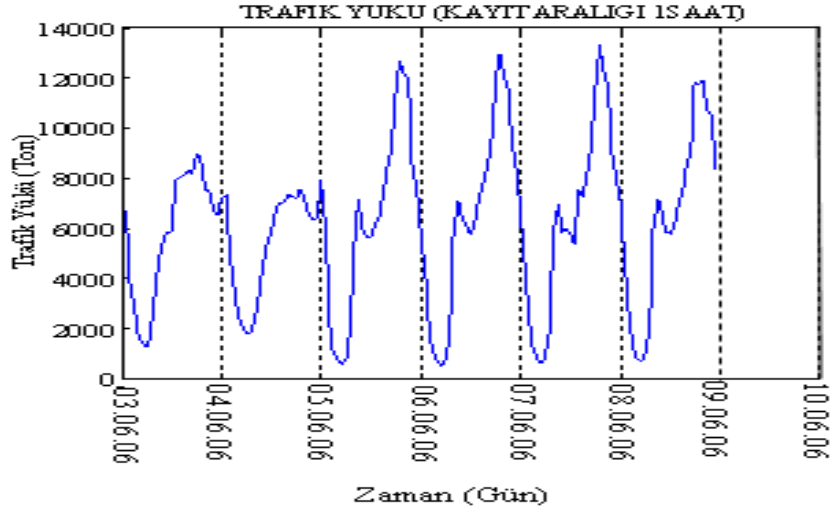
Şekil 5.17 Boğaziçi Köprüsü kulelerine X yönünde etkiyen rüzgar kuvveti



Şekil 5.18 Boğaziçi Köprüsü kulelerine Y yönünde etkiyen rüzgar kuvveti

5.2.2.2 Trafik Yüğü

Erdoğan (2006) çalışmasında Boğaziçi Köprüsü kulelerindeki obje noktalarının etki-tepki büyüklüğüne bağlı matematiksel modellerini oluştururken trafik yükü olarak aracın ait olduğu sınıf, araç sayısı ve ortalama yükü dikkate almıştır. Bu çalışmada da araç sayısına, araç sınıfına ve ortalama yüke göre trafik yükü hesaplanmıştır. Şekil 5.19 1 saat kayıt aralığına sahip trafik yükünün zamana bağlı değişimini göstermektedir.

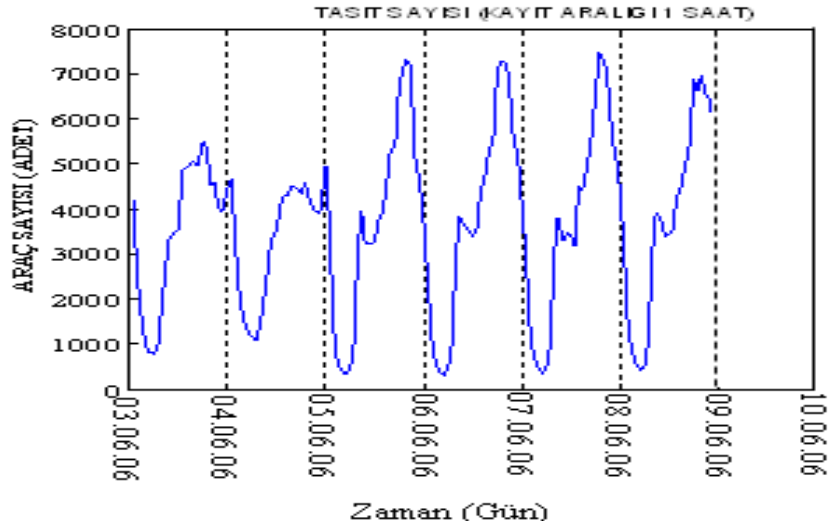


Şekil 5.19 Sınıf ağırlıklarına ve geçen araç sayısına göre hesaplanan trafik yükü

Hesaplamalarda sınıflarına göre taşıt ağırlıkları aşağıdaki gibi seçilmiştir.

- 1. sınıfta yer alan ve aks aralığı 3.20 m' den küçük olan iki akslı otomobil vb. araçlar için ortalama ağırlık 1,5 Ton,
- 2. sınıfta yer alan ve aks aralığı 3.20 m' den büyük her türlü iki akslı araç, kamyonet, pikap, jeep ve benzeri araçlar için ortalama ağırlık 3 ton,
- 3. sınıfta yer alan 3 akslı otobüs, kamyon ve treyler için ortalama ağırlık 18 ton olarak alınmıştır.
- 4. ve 5. sınıf özelliği taşıyan otobüs ve kamyonlar ise Boğaziçi Köprüsü' nü kullanamazlar.

Köprüden ölçü süresince geçen araç sayısının zamana bağlı değişimini gösteren Şekil 5.20 ile Şekil 5.19 karşılaştırıldığında iki şekil birbirinin benzeridir. Bu nedenle Şekil 5.19 da sınıf ağırlıklarına ve geçen araç sayısına bağlı olarak hesaplanan trafik yükü yerine yalnızca geçen taşıt sayısı da trafik yükü olarak kullanılabilir.

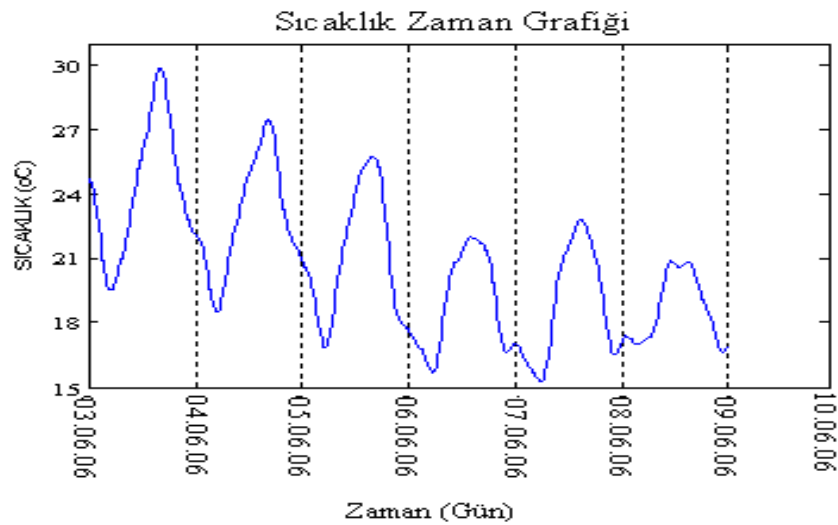


Şekil 5.20 Ölçü süresince köprüden geçen araç sayısı

1 saatlik kayıt aralığına sahip bu veriler bir regresyon modeli yardımı ile değerlendirmelerde hangi aralıkta veriye ihtiyaç duyulmuşsa o kayıt aralığı ile yeniden elde edilmiştir.

5.2.2.3 Sıcaklık Değişimi

Toplanan sıcaklık bilgileri 5 dakika kayıt aralığına sahiptir. Ölçülerin örnekleme aralığı ile sıcaklık değerlerinin örnekleme aralığının aynı olması için regresyon analizi ile istenilen kayıt aralığında veriler yeniden elde edilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Sıcaklık değişiminin zamana bağlı değişim grafiği

5.2.3 Verilerin Filtrelenmesi

Birçok uygulamada, uygulamanın amacına göre kullanılan çok sayıda filtreleme tekniği vardır. Bu filtreler en genel haliyle lineer filtre, medyan filtre ve uyarlamalı filtre olarak sayılabilir. Medyan filtrelerde lineer filtrelemedeki işlemlerin yanı sıra sonuç veri komşu verilerin ortalama değeri ile belirlenir (Altun, A. vd, 2007). Ogaja vd., (2001) GPS kullanılarak yapıların izlenmesine yönelik çalışmalarında özellikle sıçmalı veri gruplarında Medyan filtreyi başarıyla kullanmışlardır. Bu çalışmada verilerin filtrelenmesinde medyan filtreleme kullanılmıştır. Filtrelemenin derecesine karar verebilmek için farklı medyan dereceleri ile filtrelenmiş verilerin anlamlı alçak frekansları incelenmiştir. Çizelge 5.2 Ortaköy kule Y koordinatlarının farklı derecelerde filtrelenmesi ile elde edilen anlamlı alçak frekansları göstermektedir. Çizelge incelendiğinde 81. dereceye kadar olan filtrelemelerde anlamlı frekanslarda bir değişim olmadığı görülmektedir. 81. dereceden sonra ise anlamlı frekans değerlerinden bazıları kaybolmaya başlamıştır. Bu durum veride bilgi kaybına sebep olmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerine ait bütün veriler medyan derecesi 51 alınarak filtrelenmiştir.

Çizelge 5.2 Farklı filtre derecelerine göre anlamlı alçak frekanslardaki değişimler

Anlamlı Alçak Frekanslar	Med1 (Hz)	Med5 (Hz)	Med11 (Hz)	Med31 (Hz)	Med51 (Hz)	Med81 (Hz)	Med101 (Hz)	Med301 (Hz)
1	0.001489	0.001489	0.001489	0.001489	0.001489	0.001489	0.001489	0.001489
2	0.002871	0.002871	0.002871	0.002871	0.002871	0.002871	0.002871	0.002871
3	0.000425	0.000425	0.000425	0.000425	0.000425	0.000425	0.000425	0.000425
4	0.00202	0.00202	0.00202	0.00202	0.00202	0.00202	0.00202	-
5	0.005742	0.005742	0.005742	0.005742	0.005742	0.005742	-	-

5.2.4 Verilerin İstenen Kayıt Aralıklarında Yeniden Elde Edilmesi ve Trend Analizi

Tez çalışmasında kuleler ve tabliyede Nyquist frekansına uygun kayıt aralığına sahip veriler toplanmıştır. Ancak dalgacık analizi çok yoğun matematiksel işlem gerektiren bir uygulama olduğu için sözü edilen kayıt aralıkları ile etkili bir Dalgacık Dönüşümü gerçekleştirmek mümkün değildir. Bu nedenle bir regresyon modeli kullanılarak tüm veriler için 2 dk kayıt aralıklı yeni bir veri gurubu oluşturulmuştur.

Ayrıca analizlerde büyük rakamlarla uğraşmamak için bütün verilerin ortalamadan farkları alınarak elde edilen küçültülmüş değerler kullanılmıştır. Bu şekilde kule ve tabliye hareketlerinin yorumlanması da kolaylaştırılmıştır. Kule ve tabliyelere ait konum bilgileri medyan filtreleme ile filtrelenmiş, dış yükler için ise herhangi bir filtrelemeye gerek görülmemiştir.

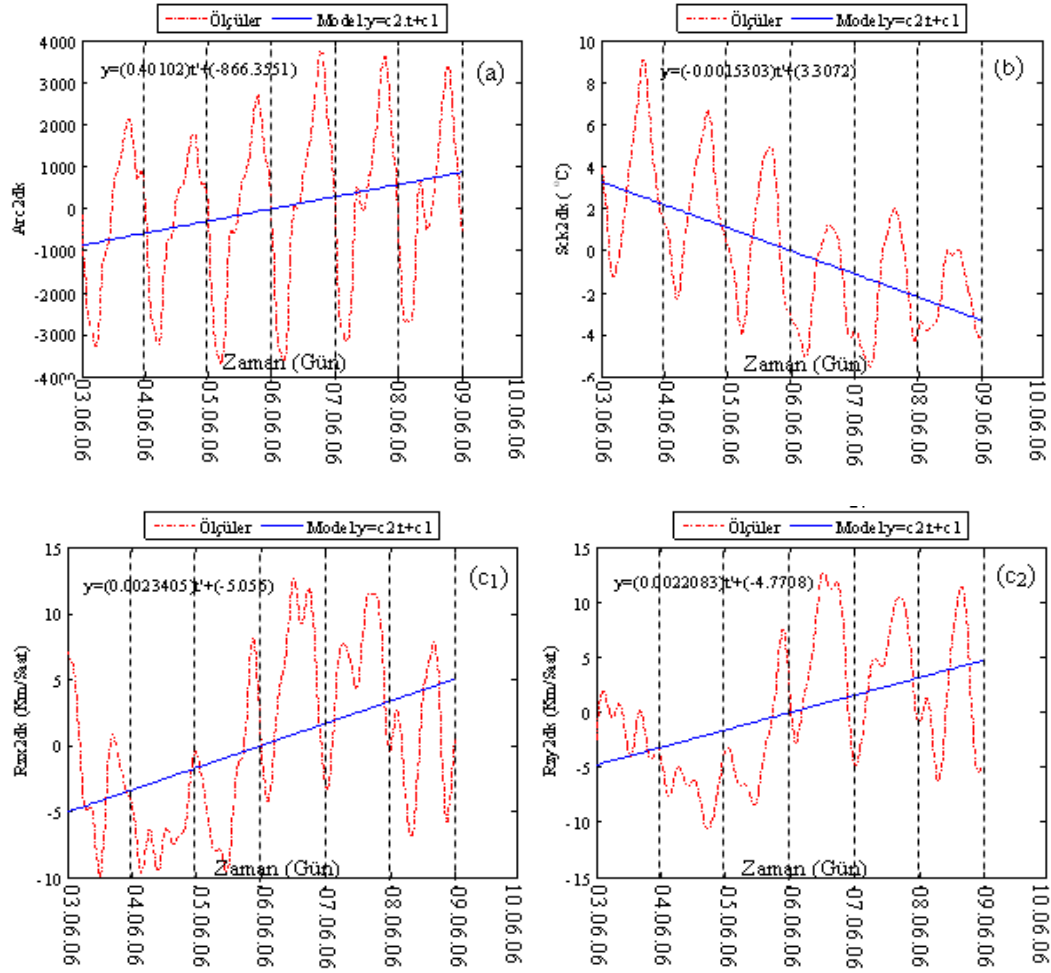
Bir zaman serisi rastgele dağılmış değilse yani genel bir eğilim gösteriyorsa bu eğilim trend olarak adlandırılır. Bu durumda trendin giderilmesi gerekir. Bunun için seriye uygun bir doğru ya da eğri bulunmaya çalışılır. Verilere uyan lineer bir trend üç şekilde elde edilebilir. Bunlardan en geneli lineer trendin elle göz kararı çizilmesidir. İkinci olarak yarı ortalamalarla çizilmesi gelir. Üçüncü ve en çok kullanılan yöntem ise trend doğrusunun en küçük karelerle elde edilmesidir (Doğan, Ü., 2007). Bu çalışmada da trend gidermek için en küçük karelerden yararlanılmıştır.

Boğaziçi Köprüsü tabliye ve kulelerindeki hareketlerin herhangi bir yönde sürekli artması ya da azalması söz konusu değildir. Örneğin tabliye üzerindeki obje noktasında tabliyenin düşey yöndeki hareketi bu noktanın zaman serisinde lineer bir trende neden olmuştur (Erdoğan,2006). Ayrıca belirlenen fonksiyonlardaki eğilimi gösteren katsayıların küçük çıkması sürekli artan yada azalan lineer bir trend bileşeni olması beklentisi ortadan kaldırmaktadır. Analizlerde istatistik olarak var olan trend bileşeni dikkate alınmıştır.

Hem koordinatlar hem de dış yükler için lineer trend analizleri yapılmıştır. Lineer trend analizi için seçilen fonksiyondan elde edilen katsayılar C1 ve C2 olmak üzere bu katsayılar ait test büyüklükleri T testine tabi tutulmuştur. (Çizelge 5.3, Çizelge 5.4)' de görüldüğü gibi katsayıların test büyüklükleri tablo değerinden büyük çıktığı için katsayı değerleri anlamlıdır. Katsayıların anlamlı olması ise verilerde trend olduğunu göstermektedir. Her bir veri grubuna ait trendler giderilerek yeni veri grupları elde edilmiştir. Sonraki analiz aşamalarında da trendi giderilmiş bu veriler kullanılacaktır.

Çizelge 5.3 2dk kayıt aralıklı dış yük verilerinin trend analizine ait istatistiksel veriler

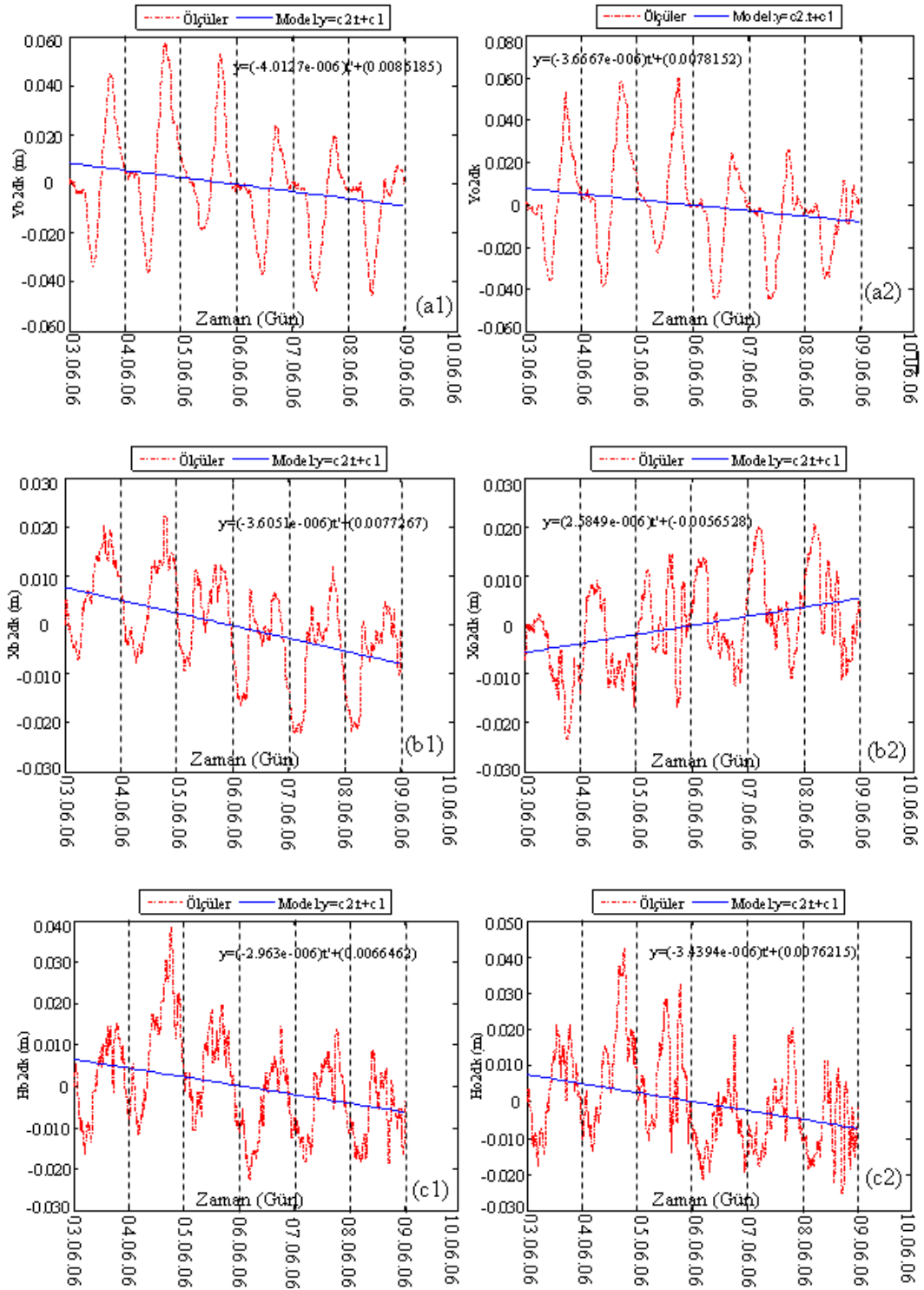
Veri	Dosya	Ölçü Sayısı	TEST BÜYÜKLÜĞÜ		>& <	Tablo Değeri	Trend
			C1	C2			
Araç Sayısı	Arc2dk	4320	-15.1413	17.4838	>	1.960	VAR
Sıcaklık	Sck2dk	4320	39.0481	-45.0740	>	1.960	VAR
Rüzgar X	Rzx2dk	4320	-29.5779	34.1565	>	1.960	VAR
Rüzgar Y	Rzy2dk	4320	-28.8223	33.2813	>	1.960	VAR



Şekil 5.22 2 dk kayıtlı aralıklı 1 haftalık araç sayısı (a), sıcaklık (b) ve rüzgar hızı (c₁,c₂) verilerine ait lineer trend grafikleri.

Çizelge 5.4 Haftalık 2dk kayıtlı aralıklı koordinat verilerinin trend analizine ait istatistiksel veriler

GÜN	Kule	Koord	VERİ	Ölçü Sayısı	TEST BÜYÜKLÜĞÜ		<>	Tablo Değeri	Trend
					C1	C2			
TÜM	B.beyi	Y	Yb2d	4320	13.8399	-16.0744	>	1.960	VAR
		X	Xb2d	4320	29.2263	-34.0176	>	1.960	VAR
		H	Hb2d	4320	20.6440	-22.9590	>	1.960	VAR
	Ortaköy	Y	Yo2d	4320	11.6625	-13.6125	>	1.960	VAR
		X	Xo2d	4320	-22.322	25.4628	>	1.960	VAR
		H	Ho2d	4320	20.9661	-23.6026	>	1.960	VAR



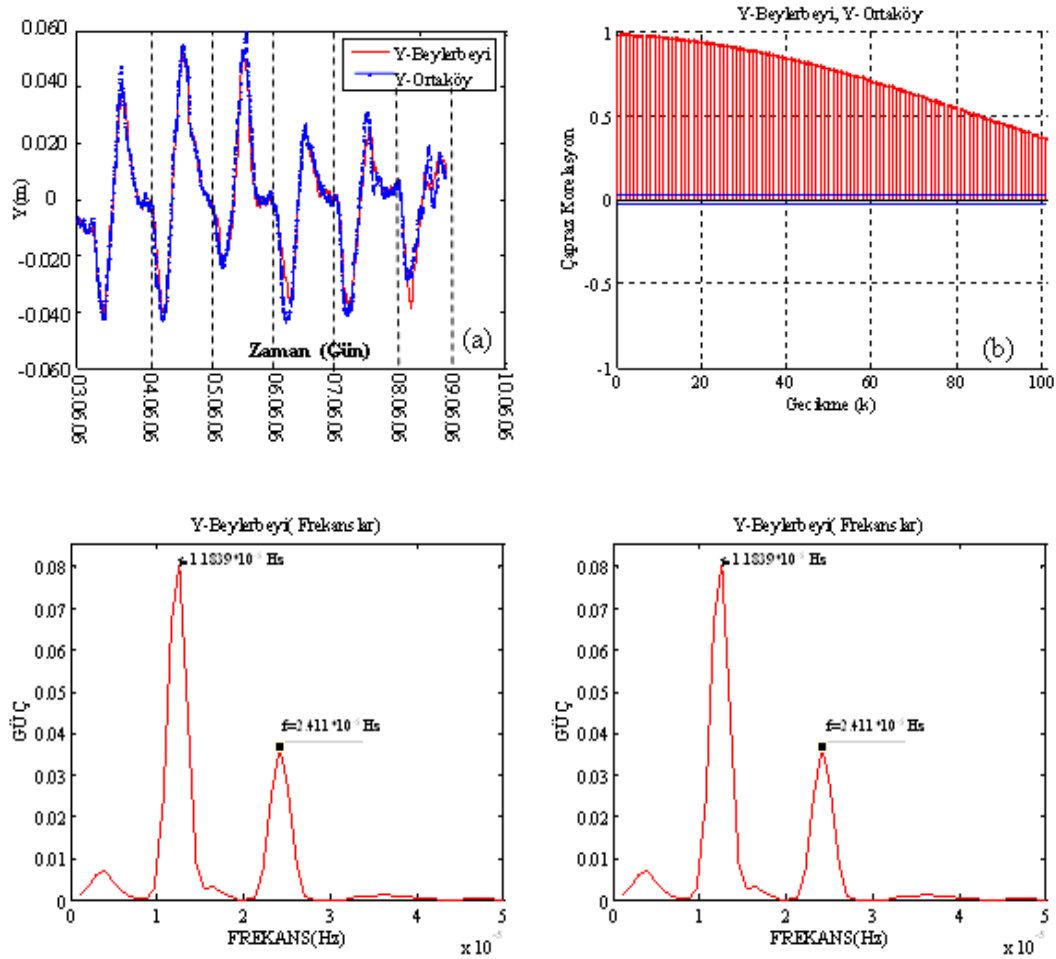
Şekil 5.23 2 dk kayıt aralıklı 1 haftalık veriler ve lineer trend grafikleri. Beylerbeyi kule (1) ve Ortaköy kule (2) obje noktalarındaki Y koordinat bileşeni (a), X koordinat bileşeni (b) ve yükseklik bileşenlerinin (c) lineer trendleri.

5.3 Köprü Kule ve Tabliye Hareketlerinin Geometrik Olarak İncelenmesi

5.3.1 Kule Hareketlerinin İncelenmesi

5.3.1.1 Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Yanal (Y) Hareketlerinin İncelenmesi

Yanal hareket deyiminden köprü kulelerinin, köprü koordinat sistemine göre $-Y$, $+Y$ doğrultusundaki hareketi anlaşılmaktadır. 2 dk kayıt aralıklı veriler kullanılarak Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerinin yanal hareketleri geometrik olarak karşılaştırılmış ve bu iki hareket arasındaki çapraz korelasyon grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca hareketlerin frekans bilgisini görebilmek için Hızlı Fourier dönüşüm tekniği kullanılarak her iki veri için de frekans – güç spektrumları oluşturulmuştur.



Şekil 5.24 Beylerbeyi ve Ortaköy kule ‘Y’ verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.24 incelendiğinde ölçü süresi boyunca Ortaköy ve Beylerbeyi Kulenin yanal hareketlerinin neredeyse bire bir örtüştüğü görülmektedir (Şekil 5.24 (a)). Buradan Kulelerin yanal yöndeki hareketlerinin neredeyse aynı olduğu söylenebilir. İki bileşen arasında hesaplanan korelasyon katsayısı $cc=0.9800$ de bunu kanıtlar niteliktedir. Yine Şekil 5.24 (b)'deki çapraz korelasyon katsayılar grafiği de bu iki bileşen arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir. Her iki kule için de Y bileşenlerindeki değişimin genliği ± 5 cm' dir. Yani ölçü süresi boyunca kulelerin Y yönündeki salınım ± 5 cm genliğiyle maksimum 10 cm dir.

Erdoğan (2006) çalışmasında kulelerin Y yönündeki salınımı ± 3 cm genliğiyle 6 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde bu salınım miktarını 1. periyot için 9 cm, 2.periyot için 8 cm ve 3. periyot için ise 11 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

Şekil 5.24 (c) ve (d) ise bu iki bileşenin içerisindeki periyodik bileşenleri göstermektedir. Buna göre Beylerbeyi kulenin yanal yöndeki salınımında 2 baskın frekans mevcuttur. Bu frekanslar büyükten küçüğe sırasıyla $f_{y1}=1.1839*10^{-5}$ ve $f_{y2}=2.411*10^{-5}$ dir. Bu frekans değerlerine karşılık gelen periyotlar hesaplandığında f_{y1} frekansına karşılık yaklaşık 24 saatlik bir periyot, f_{y2} frekansına karşılık da yaklaşık 12 saatlik bir periyodun denk geldiği görülebilir. Bu periyodik hareketler köprü kulelerinin özellikle sıcaklık ve taşıt yükü nedeniyle gün içerisindeki salınımlarından kaynaklanmaktadır.

5.3.1.2 Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerin Açıklık Doğrultusundaki (X) Hareketlerinin İncelenmesi

Kulelerin açıklık doğrultusundaki hareketlerinden köprü koordinat sistemine göre -X, +X doğrultusundaki salınımı anlaşılmaktadır. 2 dk kayıt aralıklı X koordinat bileşenleri incelenerek her iki kulenin X yönündeki hareketlerinin zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.25' de gösterilmiştir.

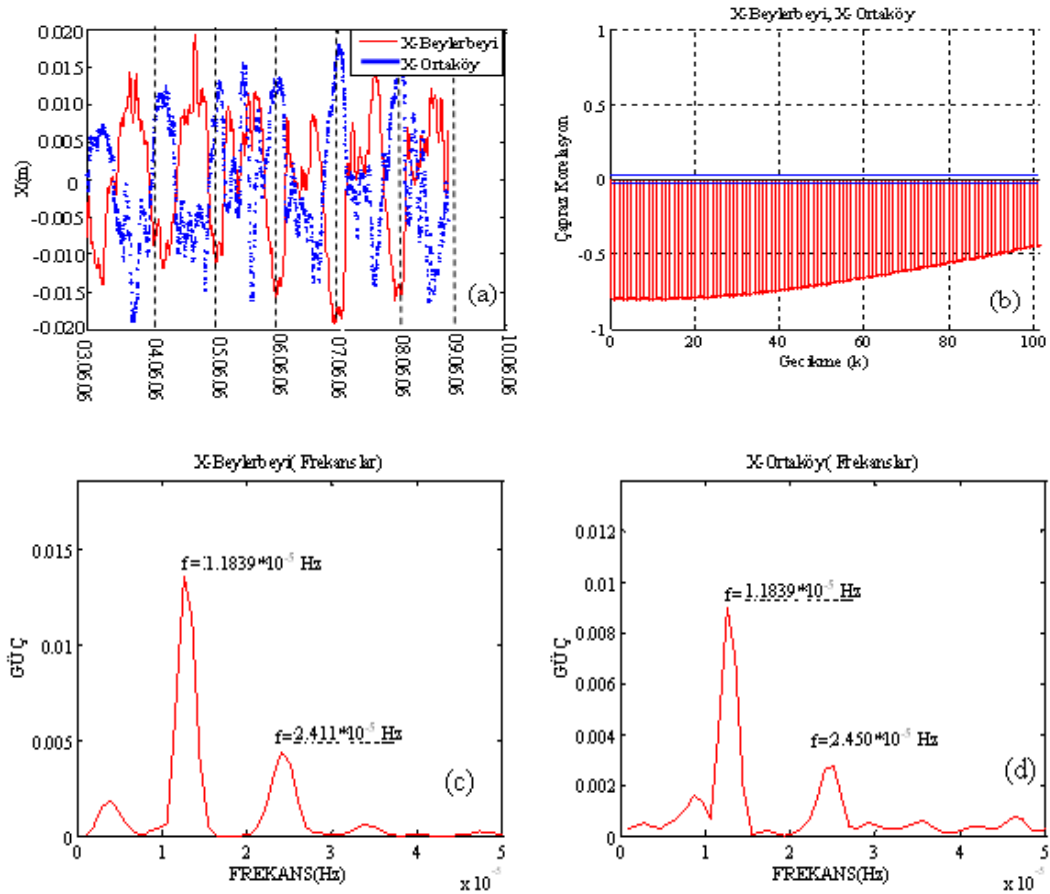
Şekil 5.25' e göre Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin açıklık doğrultusundaki hareketleri birbirlerinin tam tersi yönündedir. Yani kulelerden biri + X yönünde hareket ederken, diğer kule - X yönünde hareket etmektedir. Bu durum asma köprüler için beklenen durumdur. Zıt yöndeki hareketlere karşılık salınımların genlikleri ise neredeyse aynıdır. Her iki kule içinde X bileşenindeki değişimin genliği ± 2 cm aralığında olmak üzere toplam 4 cm' dir.

Erdoğan (2006) çalışmasında kulelerin X yönündeki salınımın genliğini ± 1 cm aralığında

olmak üzere 2 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde bu salınım miktarını 1. periyot için 6.7 cm, 2. periyot için 4.1 cm ve 3. periyot için ise 11 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

İki bileşen arasında hesaplanan korelasyon katsayı değeri $cc = -0.7959$ dur. Şekil 5.25 (b)'deki çapraz korelasyon katsayılar grafiği de bu iki bileşen arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.25 (c) ve (d) deki frekans – güç spektrumları incelendiğinde yine belirgin olarak iki periyodik bileşen görülmektedir. Bu frekanslar $f_{x1} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ ve $f_{x2} = 2.411 \cdot 10^{-5}$ dir. Bu frekans değerlerine karşılık gelen periyotlar incelendiğinde f_{x1} frekansına karşılık yaklaşık 24 saatlik bir periyotun, f_{x2} frekansına karşılık da yaklaşık 12 saatlik bir periyodun karşılık geldiği görülmektedir. Bu periyotlar köprü kulelerinin özellikle sıcaklık ve taşıt yükü nedeniyle gün içerisindeki salınımlarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.25 Beylerbeyi ve Ortaköy kule 'X' verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

5.3.1.3 Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Düşey Doğrultudaki Hareketlerinin İncelenmesi

Kulelerin düşey doğrultudaki hareketleri yükseklik bileşenindeki değişimlerdir. Yükseklik bileşenindeki değişim deyince kulelerin düşey yönde hareket ettiği anlaşılmamalıdır. Yükseklik bileşenindeki değişim kulelerin dış yük etkileriyle (sıcaklık, araç sayısı) eğilmesi sonucu orataya çıkan bir durumdur. Yani kulelerin X ve Y yönündeki hareketlerinin bir sonucu olarak kule yüksekliğindeki değişimdir.

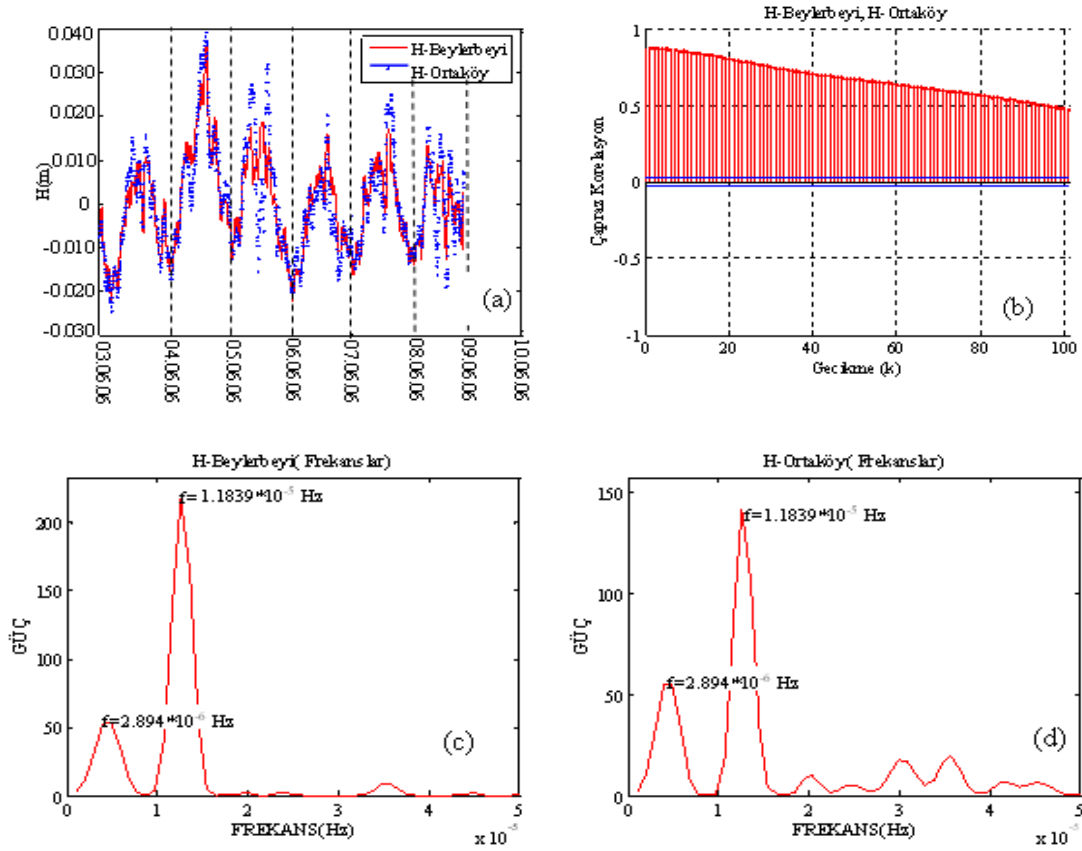
2 dk kayıt aralıklı yükseklik bileşenleri incelenerek her iki kulenin yükseklik değişimlerinin zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.26’ da gösterilmiştir.

Şekil 5.26’ ya göre Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin ölçü süresi boyunca düşey salınımları neredeyse aynı miktarda ve aynı yöndedir. Her iki kule için de düşey yöndeki salınının genliği ± 3 cm aralığında olmak üzere toplam 6 cm’ dir.

Erdoğan (2006) bu salınımı Ortaköy kule için ± 5 cm genlik değeriyle 10 cm olarak, Beylerbeyi kule için ise ± 2 cm genlik değeriyle 4 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde bu ötelenme miktarını 1. periyot için 3.9 cm, 2. periyot için 4 cm ve 3. periyot için ise 8.6 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

İki bileşen arasında hesaplanan korelasyon katsayı değeri $cc = 0.8764$ dür. Şekil 5.26 (b)’ deki çapraz korelasyon katsayılar grafiği de bu iki bileşen arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.26 (c) ve (d) deki frekans – güç spektrumları incelendiğinde yine belirgin olarak iki periyodik bileşen görülmektedir. Bu frekanslar $f_{h1} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ ve $f_{h2} = 2.894 \cdot 10^{-6}$ dır. Bu frekans değerlerine karşılık gelen periyotlar hesaplandığında f_{h1} frekansı yaklaşık 24 saatlik bir periyota, f_{h2} frekansı da yaklaşık 96 saatlik bir periyoda karşılık gelmektedir.



Şekil 5.26 Beylerbeyi ve Ortaköy kule ‘H’ verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

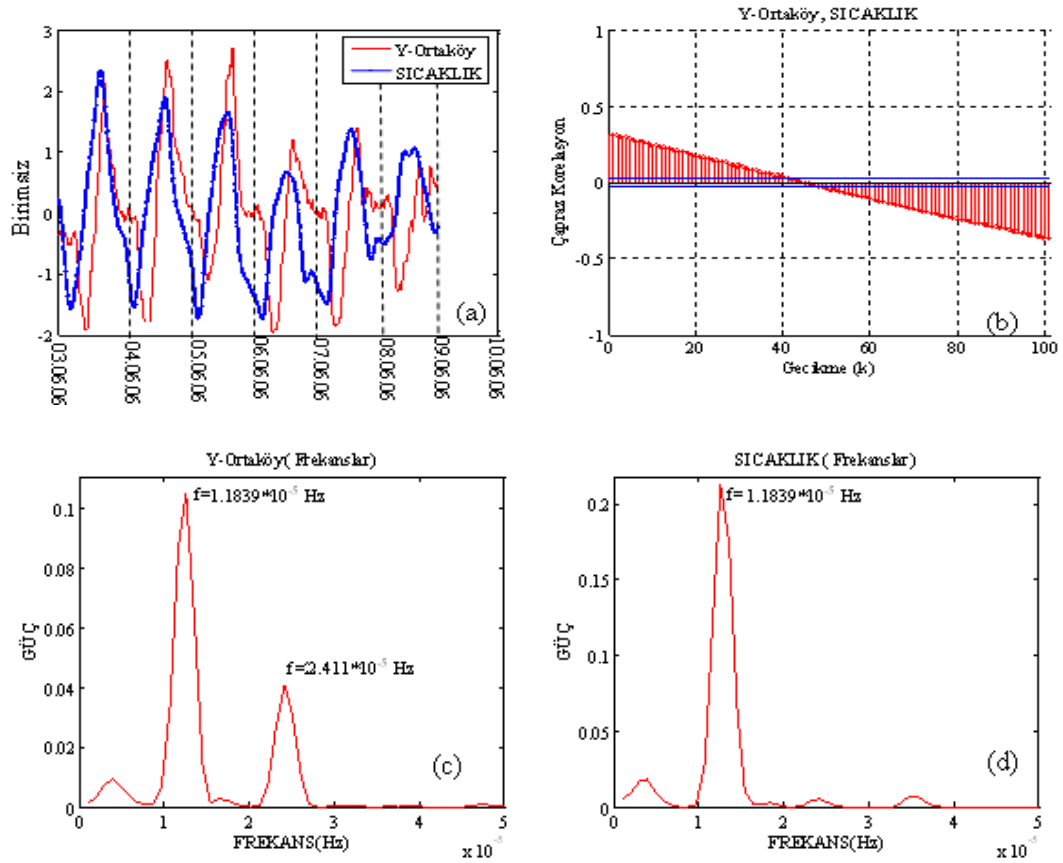
5.3.2 Ortaköy Kule Hareketlerinin Dış Yüklerle Olan İlişkilerinin İncelenmesi

Kulelerin yanal ve açıklık doğrultusundaki hareketlerinin dış yükler olarak adlandırılan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızlarıyla olan ilişkilerinin incelenebilmesi için hem kule hareketleri hem de dış yükler boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuzlaştırma işlemi kulelere ait koordinat değerlerinin bu koordinatların standart sapmasına bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir dış yük için de boyutsuzlaştırma işlemi aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.3.2.1 Ortaköy Kule ‘Y’ Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi

- Ortaköy Kule Y Hareketi – Sıcaklık İlişkisi

Sıcaklık değişiminin Ortaköy kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.27’ de gösterilmiştir.



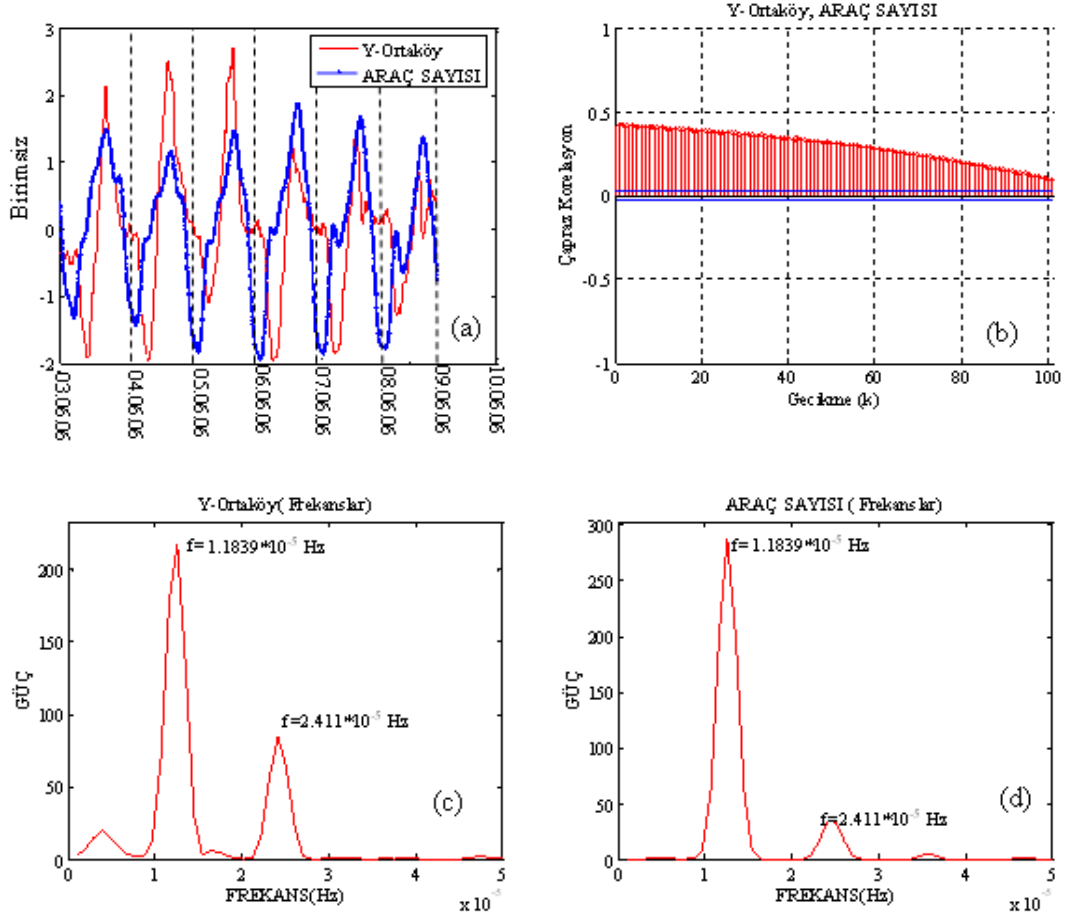
Şekil 5.27 Ortaköy kule ‘Y’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.27 (a) incelendiğinde sıcaklık değişimlerinin Y koordinatlarının değişimi üzerinde oldukça önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelenmiştir. Y Ortaköy bileşeni için 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekans mevcut olduğu daha önce açıklanmıştı. Sıcaklık değeri için ise $f_s = 1.1839 \times 10^{-5}$ Hz lik frekansa sahip tek bir periyodik bileşen mevcuttur. Bu bileşenin periyot karşılığı ise 24 saattir.

• Ortaköy Kule Y Hareketi – Araç Sayısı İlişkisi

Köprü üzerinden geçen araç sayısının Ortaköy kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.28’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.28 Ortaköy kule ‘Y’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.28 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Ortaköy kule Y koordinatları arasında benzerliklerin olduğu söylenebilir. İki büyüklük istatistiksel olarak incelendiğinde elde edilen korelasyon katsayı değeri $cc=0.4218$ dir. Bu değere göre araç sayısı ile Y koordinat değişimleri arasında çok fazla bir ilişki olmamasına karşın tamamen ilişkisiz oldukları da söylenemez.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde Y Ortaköy bileşeni için yukarıda da açıklandığı gibi 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekans mevcuttur. Araç sayısı için ise

$f_{1arc} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ Hz ve $f_{2arc} = 2.411 \cdot 10^{-5}$ Hz lik iki frekans bulunmaktadır. Bu frekansların periyot olarak karşılıkları ise Y koordinat değerlerinki ile aynı olup 12 saat ve 24 saattir.

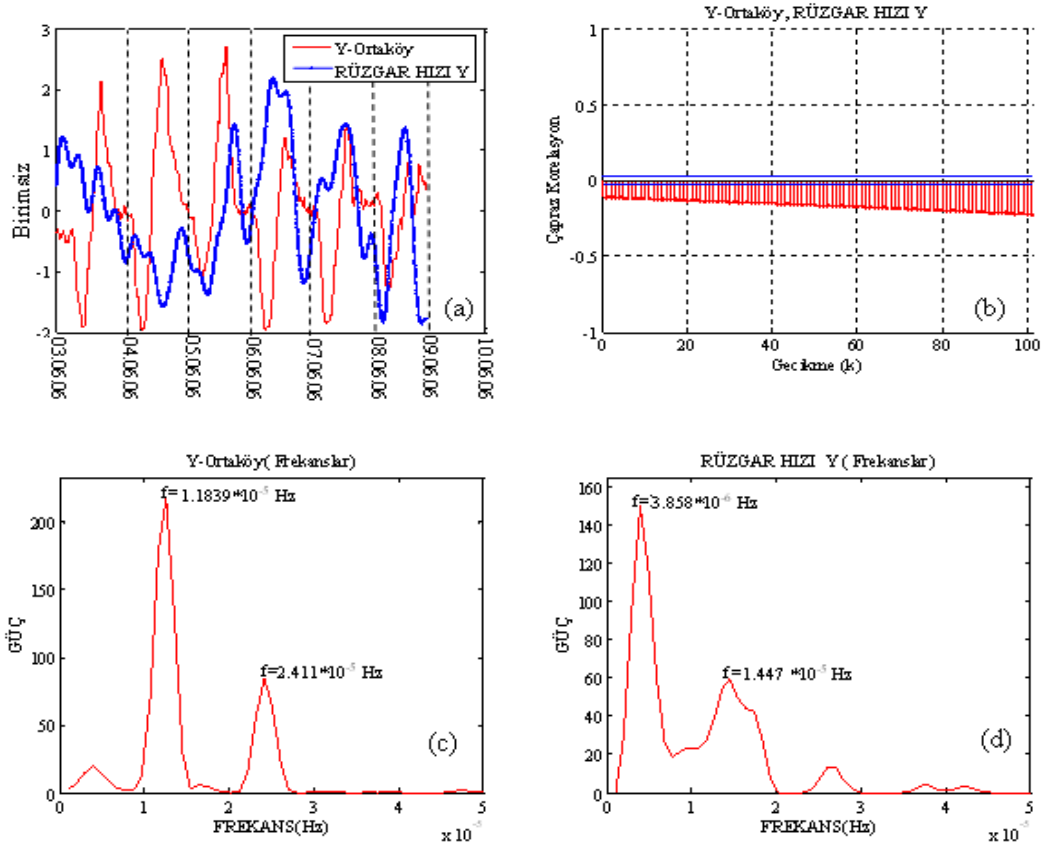
- **Ortaköy Kule Y Hareketi – Rüzgar Hızı Y Bileşeni İlişkisi**

Rüzgar yükü açıklanırken rüzgar hızının koordinatlar üzerine etkisinin daha iyi açıklanabilmesi için esen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerine ayrıldığı açıklanmıştı. Analizler kısmında konum verileri ile rüzgar arasındaki ilişkiler incelenirken Y koordinatlarına karşılık rüzgar hızının Y bileşeni, X koordinatlarına karşılık rüzgar hızının X bileşenleri kullanılmıştır.

Rüzgar hızı Y bileşeninin Ortaköy kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.29’ da gösterilmiştir.

Şekil 5.29 (a) incelendiğinde Ortaköy kule Y koordinatları ile rüzgar hızı Y bileşeni hareketlerinin zıt yönlü olduğu söylenebilir. Ortaköy kule Y koordinatı azalıyorsa kulenin kuzey yönden esen rüzgarların etkisinde olduğunu, artıyorsa güney yönden esen rüzgarların etkisinde oldukları söylenebilir. Rüzgar hızı ile kule hareketleri arasında çok kuvvetli bir iliki görülmemektedir. İki büyüklük arasındaki $cc = -0.1098$ korelasyon katsayısı ve Şekil 5.29 (b)’ deki çapraz korelasyon katsayılar grafiği de bunu doğrular niteliktedir.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde Y Ortaköy bileşeni 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekansa sahiptir. Rüzgar hızı Y bileşeninin ise $f_{1Ry} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Ry} = 1.447 \cdot 10^{-5}$ Hz lik iki frekansı bulunmaktadır. Bu frekansların periyot karşılıkları ise sırasıyla 72 saat ve 19 saattir.



Şekil 5.29 Ortaköy kule ‘Y’ ile rüzgar hızı Y bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

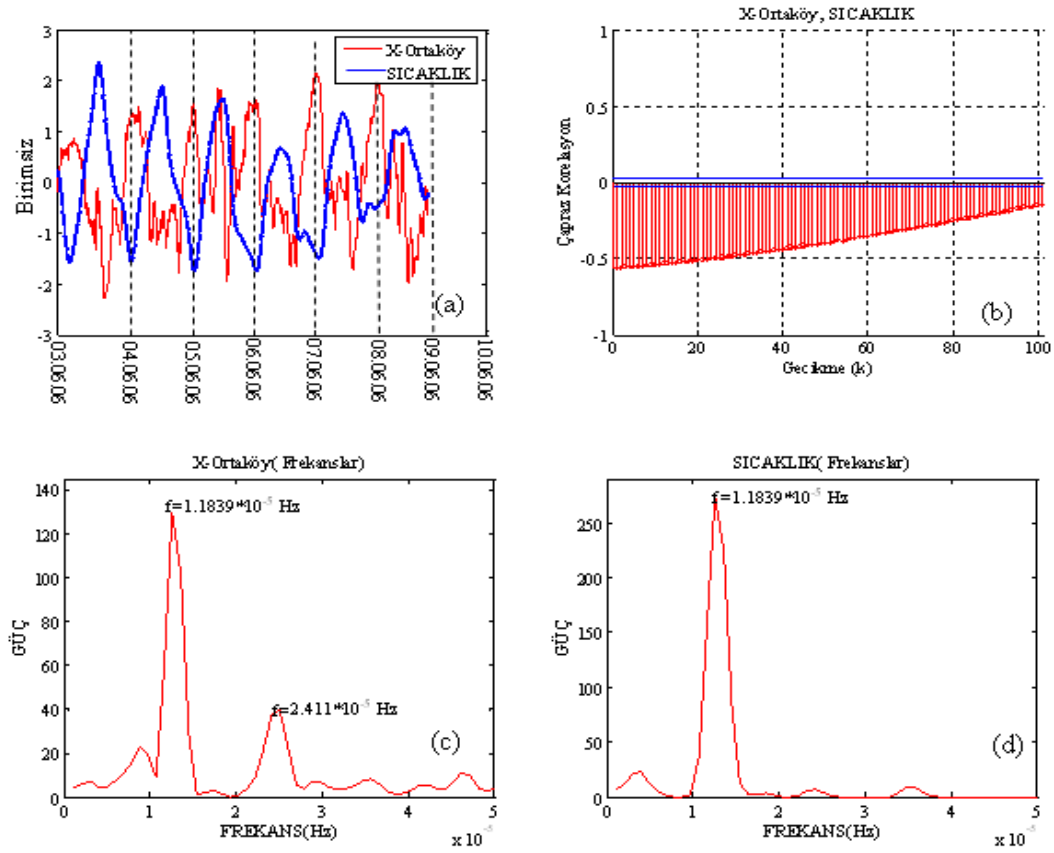
5.3.2.2 Ortaköy Kule ‘X’ Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişisinin İncelenmesi

• Ortaköy Kule X Hareketi – Sıcaklık İlişkisi

Sıcaklık değişiminin Ortaköy kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.30’ da gösterilmiştir

Şekil 5.30’ a göre sıcaklık değişimi ile X koordinat bileşeni arasında zıt yönlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Yani sıcaklık arttıkça X eğeri azalmakta, sıcaklık azaldıkça X değeri artmaktadır. Büyüklükler arasındaki korelasyon ise $cc = -0.5657$ dir.

Ortaköy kule X bileşeni için 12 ve 24 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{X01} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ ve $f_{X02} = 2.411 \cdot 10^{-5}$ iki frekans mevcuttur. Sıcaklık değeri için ise 24 saatlik periyoda sahip $f_{Xs} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ Hz frekanstan söz edilebilir.



Şekil 5.30 Ortaköy kule 'X' ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

• Ortaköy Kule X Hareketi – Araç Sayısı İlişkisi

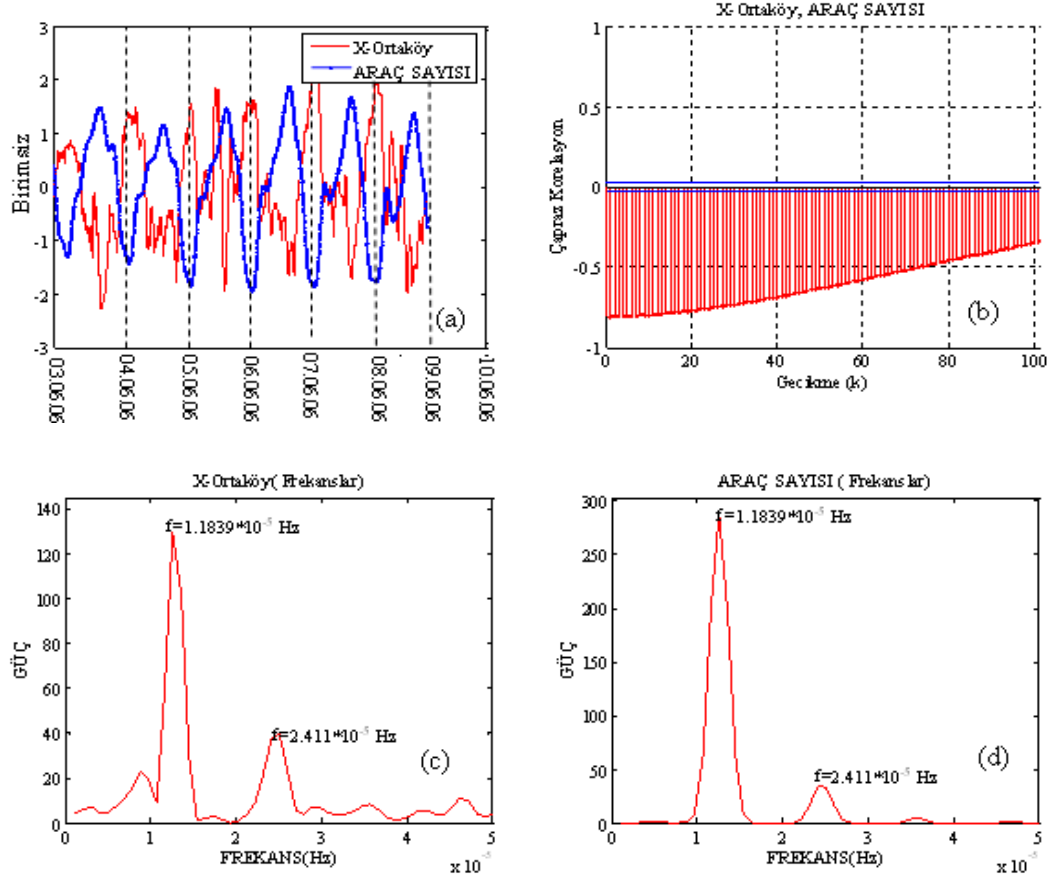
Köprü üzerinden geçen araç sayısının Ortaköy kule X bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.31’ de gösterilmiştir

Şekil 5.31 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Ortaköy kule X koordinatları arasında birbirlerine zıt yönlü ancak kuvvetli bir ilişki olduğu söylenebilir. İki büyüklük arasındaki elde edilen korelasyon katsayı değeri $cc = -0.8071$ dir. Bu değer de iki büyüklük arasındaki zıt yönlü ve kuvvetli bir ilişkiyi göstermektedir.

Asma köprülerin davranışları incelendiğinde de böyle bir ilişkinin olması beklenmektedir. Köprü tabliyesi üzerinde araç sayısı ya da trafik yükü arttıkça ana kabloya etkileyen kuvvet artacaktır. Ana kablo da bu kuvveti ankrajlara iletirken öncelikle kuleleri etkileyecektir. Bu durumda Ortaköy ve Beylerbeyi kuleleri bu kuvvetin etkisiyle açıklık yönünde hareket

edecektir. Açıklık yönündeki bu hareket köprü koordinat sistemi göz önüne alındığında Ortaköy kule X değeri için azalma, Beylerbeyi kule X değeri için artış anlamına gelmektedir.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde hem X Ortaköy bileşeni hem de araç sayısı için baskın 2 periyodik bileşen mevcuttur ve bu iki periyodik bileşen 12 ve 24 saatlik periyotlara karşılık gelmektedir.



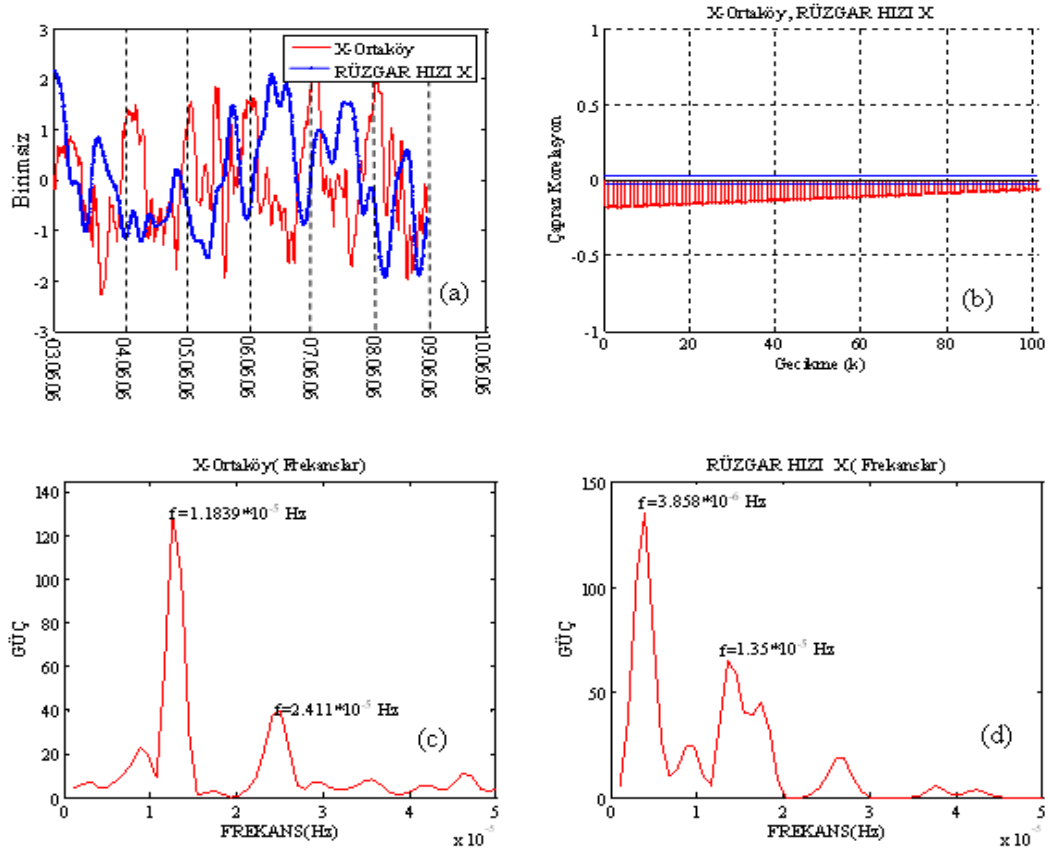
Şekil 5.31 Ortaköy kule 'X' ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

• Ortaköy Kule X Hareketi – Rüzgar Hızı X Bileşeni İlişkisi

Ortaköy kule Y bileşeni ile Rüzgar yükü arasındaki ilişki açıklanırken rüzgar hızının koordinatlar üzerine etkisinin daha iyi açıklanabilmesi için esen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerine ayrıldığı belirtilmişti. Burada da Ortaköy X bileşeni ile rüzgar hızı arasındaki ilişki incelenirken rüzgar hızının X bileşeni kullanılmıştır

Rüzgar hızı X bileşeninin Ortaköy kule X bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik

gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.32’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.32 Ortaköy kule ‘X’ ile rüzgar hızı X bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.32 (a) incelendiğinde Ortaköy kule X koordinatları ile rüzgar hızı X bileşeninin zıt yönlü olduğu söylenebilir. Ortaköy kule X koordinatı azalırken kulenin batı yönünden esen rüzgarların etkisinde olduğu, artarken doğudan esen rüzgarların etkisinde olduğu söylenebilir. Rüzgar hızı ile kule hareketleri arasında çok kuvvetli bir ilişki belirlenememiştir. İki büyüklük arasındaki korelasyon katsayısı $cc = -0.1785$ de istatistiksel olarak bunu doğrular niteliktedir.

Rüzgar hızı X değerinin $f_{1Rx} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Rx} = 1.35 \cdot 10^{-5}$ Hz frekanslara sahip iki periyodik bileşeni bulunmaktadır. Bu frekansların periyot karşılıkları ise sırasıyla yaklaşık 72 saat ve 21 saattir.

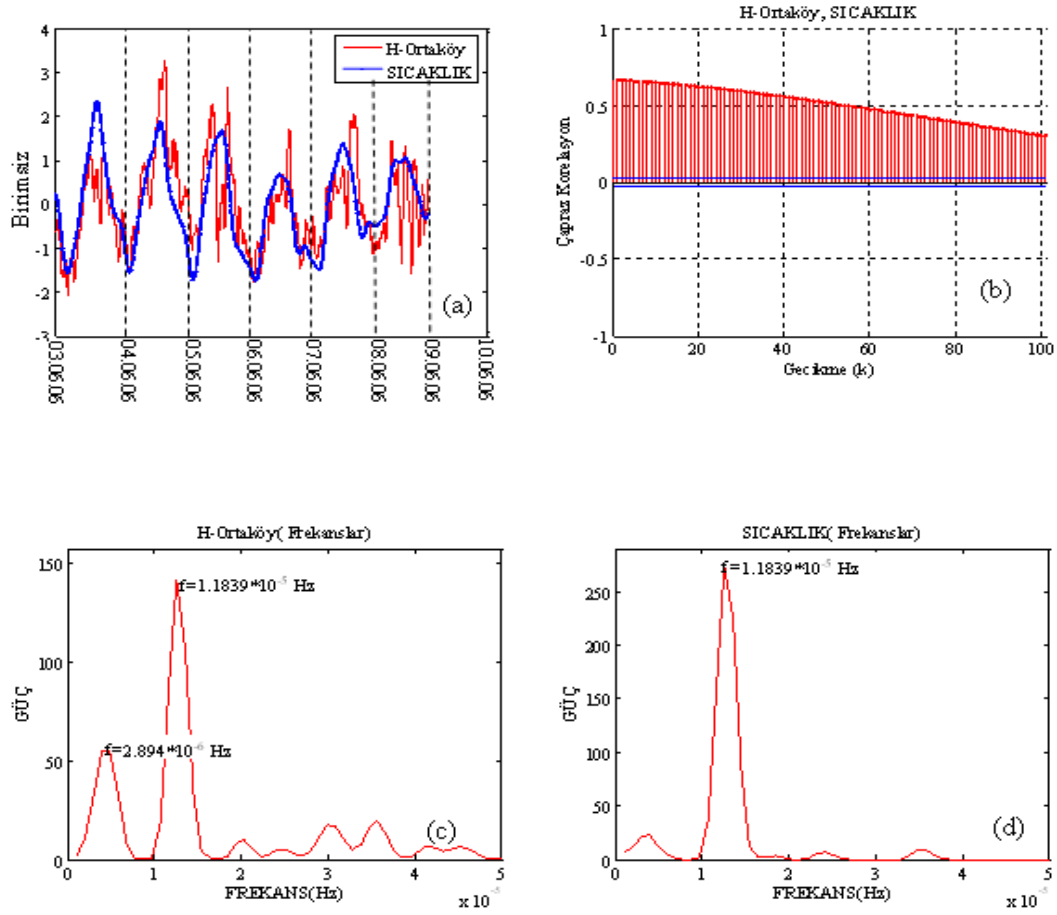
5.3.2.3 Ortaköy Kule Düşey ‘H’ Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi

- Ortaköy Kule Düşey Hareketi– Sıcaklık İlişkisi

Sıcaklık değişiminin Ortaköy kule yükseklik bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.33’ de gösterilmiştir.

Şekil 5.33’ e göre sıcaklık değişimi ile yükseklik bileşeni arasında aynı yönlü ve oldukça da kuvvetli bir ilişki vardır. Sıcaklık arttıkça Ortaköy kule H değeri artmakta, sıcaklık azaldıkça H değeri de azalmaktadır. Bunun sebebi ise sıcaklıkla genleşen çeliğin boyunun uzamasıdır. Bölüm 2’ de eşitlik (2.1) bu hareketin açıklanmasında yardımcı olabilir. Büyüklükler arasındaki korelasyon katsayısı ise $cc= 0.6683$ dür.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde H Ortaköy bileşeni için yaklaşık 24 ve 96 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{H01}=1.1839*10^{-5}$ ve $f_{H02}= 2.894*10^{-6}$ lık iki frekans mevcuttur. Sıcaklık değeri için ise 24 saatlik periyoda sahip $f_{Hs}=1.1839*10^{-5}$ Hz lik bir periyodik bileşen bulunmaktadır.

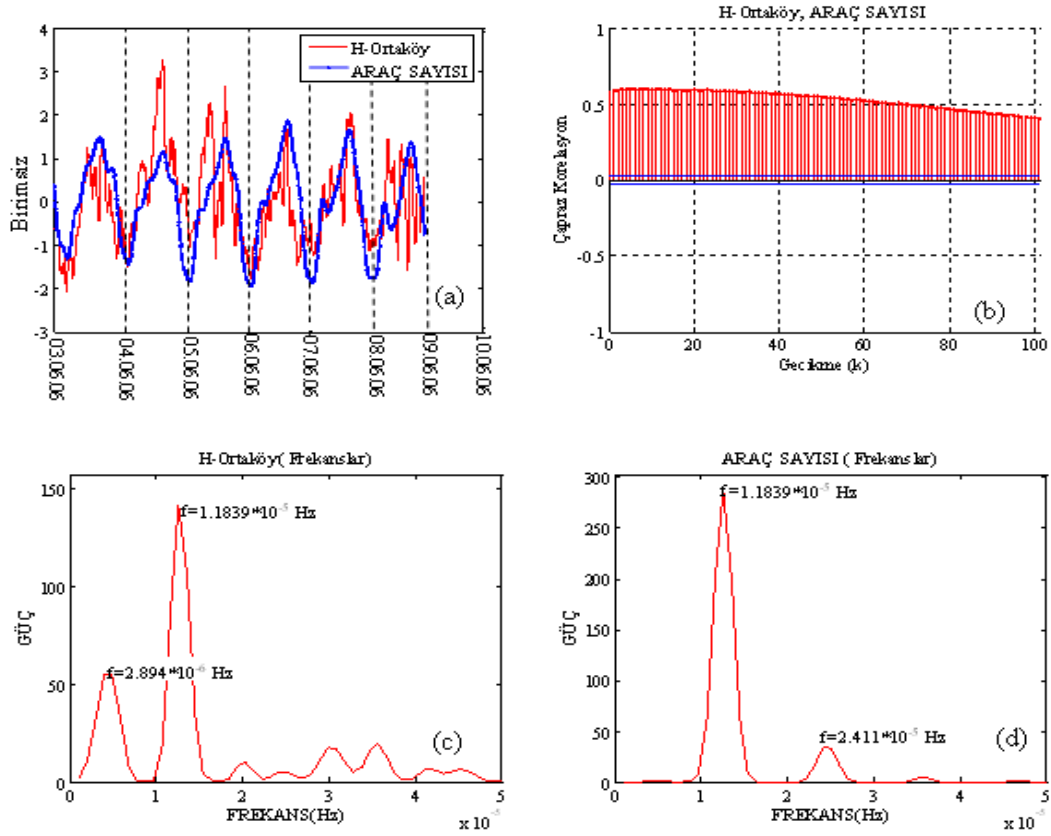


Şekil 5.33 Ortaköy kule ‘H’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

• Ortaköy Kule Düşey Hareketi – Araç Sayısı İlişkisi

Köprü üzerinden geçen araç sayısının Ortaköy kule H bileşeni verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.34’ de gösterilmiştir. Şekil 5.34 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Ortaköy kule H değerlerinin birbirleri ile çok benzer oldukları söylenebilir. İki büyüklük istatistiksel olarak incelendiğinde elde edilen korelasyon katsayı değeri $cc = 0.5943$ dür. Bu değere göre araç sayısı ile Ortaköy H bileşeni arasında iyi denebilecek bir ilişki vardır.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde H Ortaköy bileşeni için yaklaşık 24 ve 96 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{H01} = 1.1839 \times 10^{-5}$ ve $f_{H02} = 2.894 \times 10^{-6}$ lık iki frekans mevcuttur. Araç sayısı için ise $f_{1arc} = 1.1839 \times 10^{-5}$ Hz ve $f_{2arc} = 2.411 \times 10^{-5}$ Hz lik iki frekans bulunmaktadır. Bu frekansların periyot olarak karşılıkları ise Y koordinat değerlerinki ile aynı olup 12 saat ve 24 saattir.



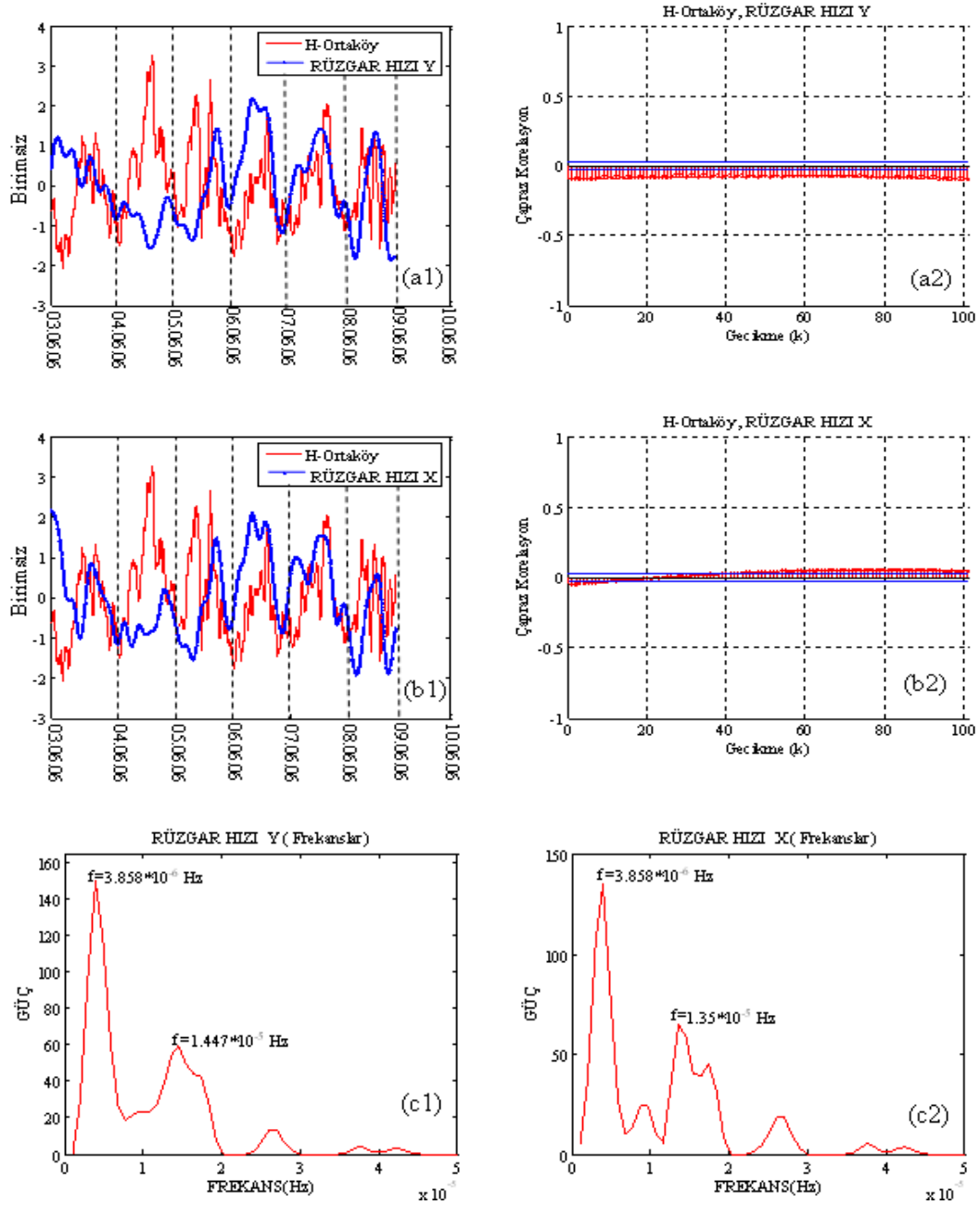
Şekil 5.34 Ortaköy kule ‘H’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

- **Ortaköy Kule Düşey Hareketi – Rüzgar Hızı Arasındaki İlişkiler**

Ortaköy kule yükseklik bileşeni ile Rüzgar yükü arasındaki ilişkiyi açıklamak için daha önce belirtilen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerinden hem X hem de Y bileşeni birlikte kullanılmıştır.

Şekil 5.35 Rüzgar hızı X ve Y bileşenlerinin Ortaköy kule yükseklik bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için verilerin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgilerini göstermektedir.

Şekil 5.35 (a) ve (c) incelendiğinde Ortaköy kule H değeri ile rüzgar hızlarının hem X hem de Y bileşenleri arasında zıt yönlü ve zayıf bir ilişki görülmektedir. H değeri ile Rüzgar X ve Y bileşenleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları ise sırasıyla $cc_{HX} = -0.0496$, $cc_{HY} = -0.0970$ dir.



Şekil 5.35 Ortaköy kule ‘H’ ile rüzgar hızı Y bileşeni (a), rüzgar hızı X bileşeni (c) zaman genlik gösterimi, bunlara ait çapraz korelasyon katsayılar grafiği (b) ve (d) ile Ortaköy H ve rüzgar hızı X ve Y bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları (e) ve (f)

Rüzgar hızı X bileşeni yaklaşık 72 saat ve 21 saatlik periyotlara sahip iki frekans $f_{1Rx} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Rx} = 1.35 \cdot 10^{-5}$ Hz, Rüzgar hızı Y bileşeni ise 72 ve 19 saatlik periyotlara sahip $f_{1Ry} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Ry} = 1.447 \cdot 10^{-5}$ Hz lik periyodik bileşenlere sahiptir.

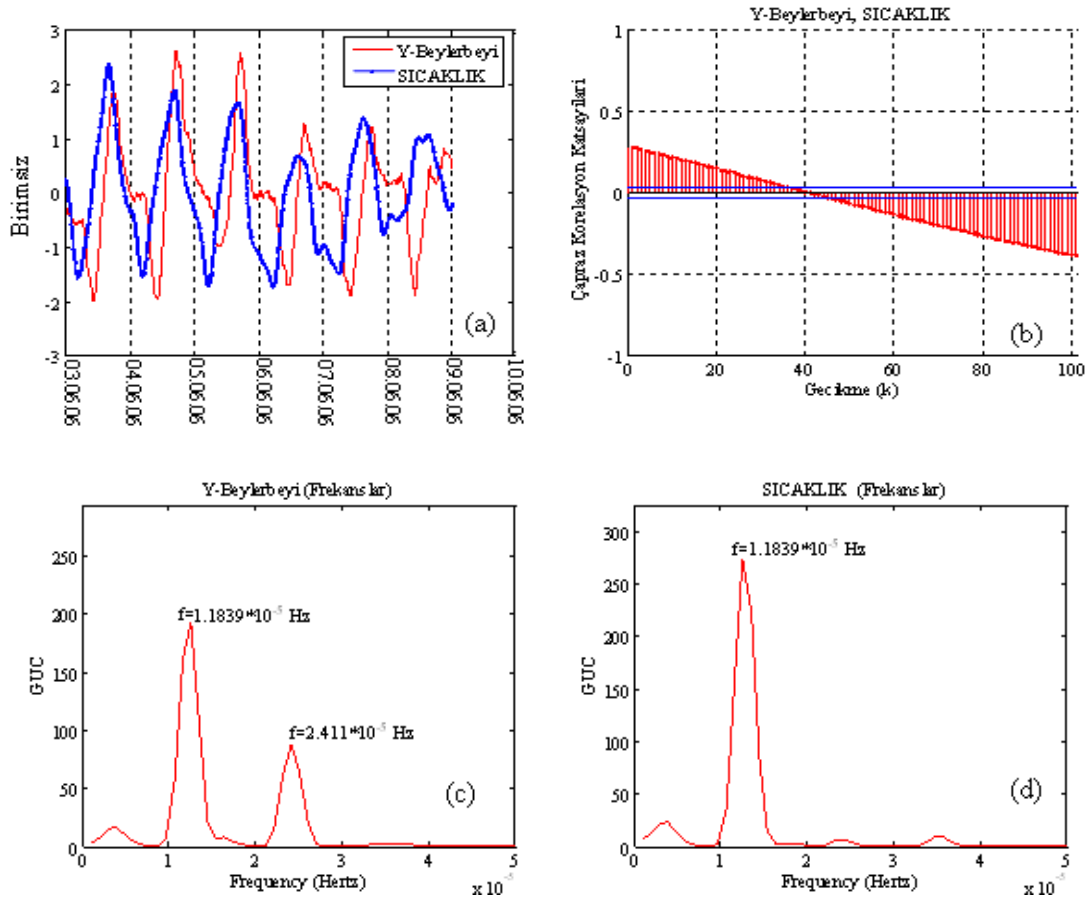
5.3.3 Beylerbeyi Kule Hareketlerinin Dış Yüklerle Olan İlişkilerinin İncelenmesi

Beylerbeyi kulesinin yanal ve açıklık doğrultusundaki hareketlerinin dış yüklerle ilişkilerinin incelenebilmesi için kuleye ait Y, X koordinatları ile H yükseklik değerleri boyutsuzlaştırılmıştır. Boyutsuzlaştırma işlemi kule hareketlerini oluşturan her bir değer için standart sapmasına bölünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir dış yük için boyutsuzlaştırma işlemi de aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.3.3.1 Beylerbeyi Kule Yanal ‘Y’ Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi

• Beylerbeyi Kule Y Hareketi – Sıcaklık İlişkisi

Sıcaklık değişiminin Beylerbeyi kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.36’ da gösterilmiştir.



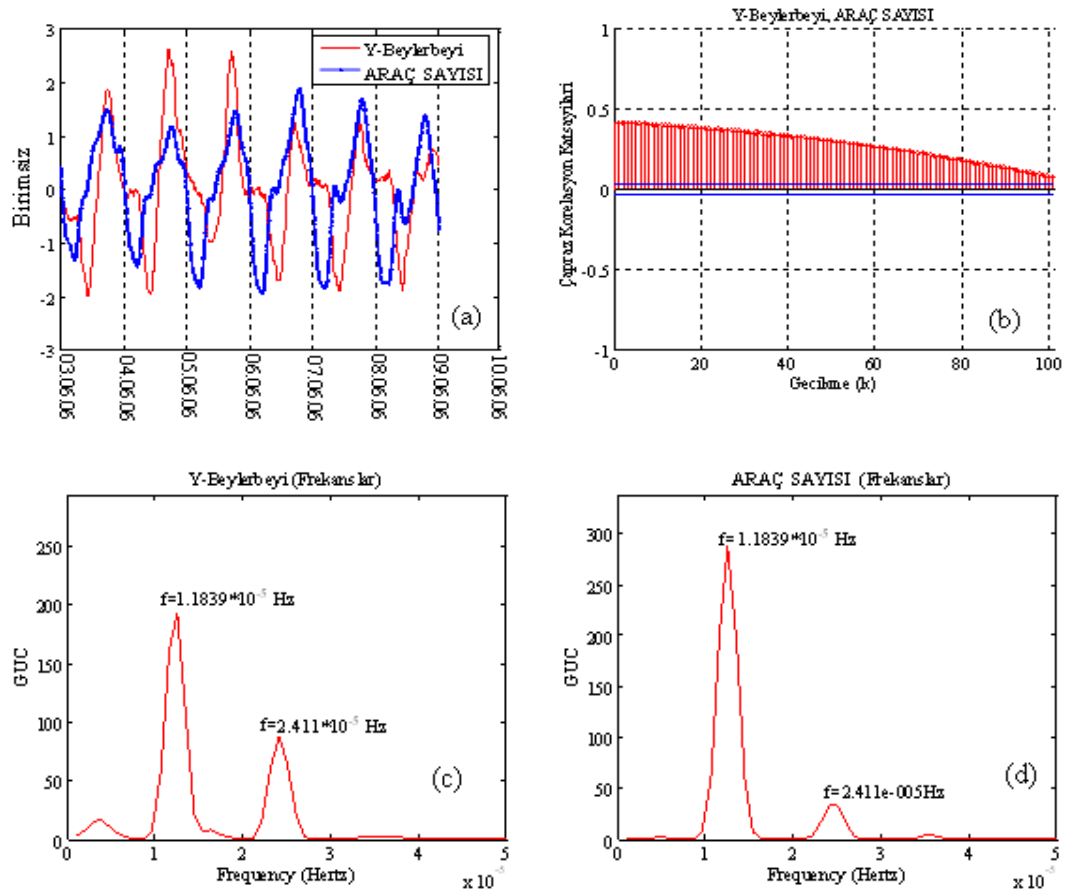
Şekil 5.36 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile sıcaklık verilerine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.36 (a) incelendiğinde sıcaklık değişimlerinin Y koordinatlarının değişimi üzerinde oldukça önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir. Ancak iki büyüklük arasındaki korelasyon katsayısına bakıldığında $cc=0.2838$ gibi düşük bir değer görülmektedir. Korelasyon katsayısına bakarak iki büyüklük arasında çok kuvvetli bir ilişki olmadığı söylenebilir.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelenmiştir. Y Beylerbeyi bileşeni için 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekans mevcut olduğu daha önce açıklanmıştı. Sıcaklık için ise 24 saatlik periyoda sahip, $f_s = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ Hz lik tek bir periyodik bileşen mevcuttur.

• Beylerbeyi Kule Y Hareketi– Araç Sayısı İlişkisi

Köprü üzerinden geçen araç sayısının Beylerbeyi kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.37’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.37 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile araç sayısına ait zaman genlik gösterimi(a), çapraz korelasyon katsayıları(b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

Şekil 5.37 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Beylerbeyi kule Y koordinatları arasında benzerliklerin olduğu söylenebilir. İki büyüklük istatistiksel olarak incelendiğinde elde edilen korelasyon katsayı değeri $cc=0.4168$ dir. Bu değere göre araç sayısı ile Y koordinat değişimleri arasında çok fazla bir ilişki olmamasına karşın tamamen ilişiksiz oldukları da söylenemez.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde Y Beylerbeyi bileşeni için yukarıda da açıklandığı gibi 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekans mevcuttur. Araç sayısı için ise $f_{1arc} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ Hz ve $f_{2arc} = 2.411 \cdot 10^{-5}$ Hz lik iki frekans bulunmaktadır. Bu frekansların periyot olarak karşılıkları ise Y koordinat değerlerinki ile aynı olup 12 saat ve 24 saattir.

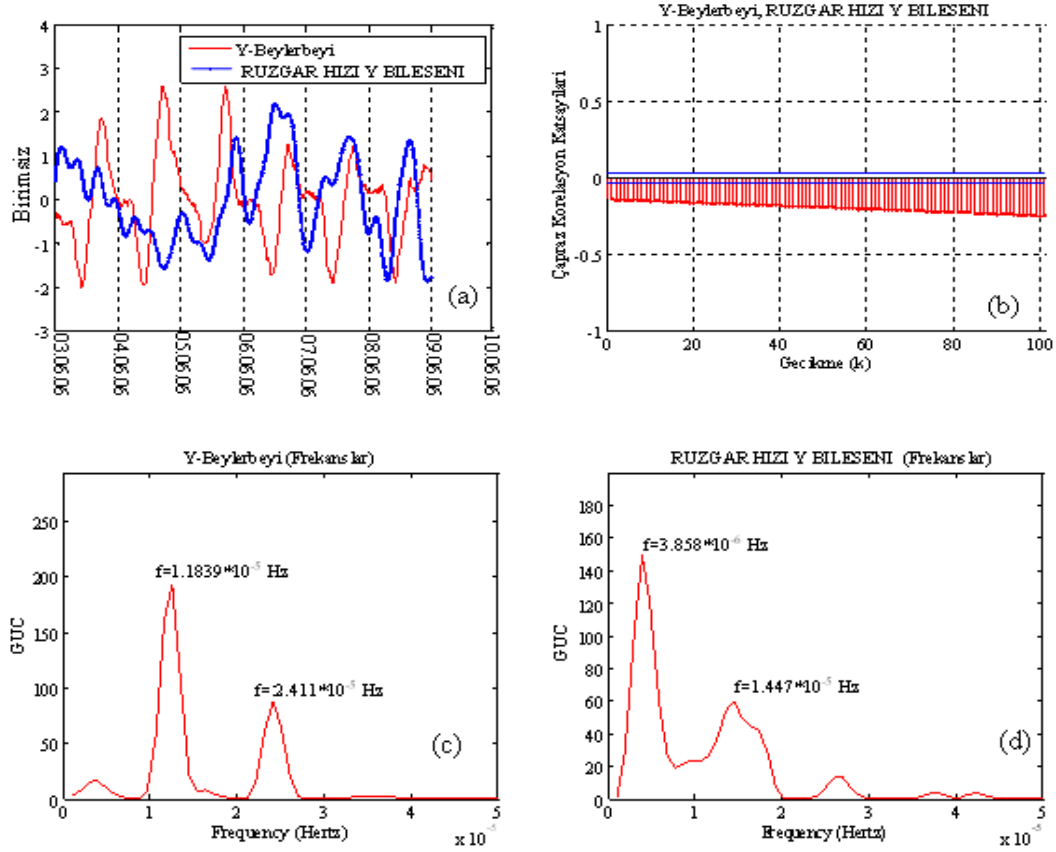
- **Beylerbeyi Kule Y Hareketi – Rüzgar Hızı Y Bileşeni İlişkisi**

Rüzgar yükü açıklanırken rüzgar hızının koordinatlar üzerine etkisinin daha iyi açıklanabilmesi için esen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerine ayrıldığı açıklanmıştı. Analizler kısmında konum verileri ile rüzgar arasındaki ilişkiler incelenirken Y koordinatlarına karşılık rüzgar hızının Y bileşeni, X koordinatlarına karşılık rüzgar hızının X bileşenleri kullanılmıştır.

Rüzgar hızı Y bileşeninin Beylerbeyi kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.38’ de gösterilmiştir.

Şekil 5.38 (a) incelendiğinde Beylerbeyi kule Y koordinatları ile rüzgar hızı Y bileşeni hareketlerinin zıt yönlü olduğu söylenebilir. Beylerbeyi kule Y koordinatı azalıyorsa kulenin kuzey yönden esen rüzgarların etkisinde olduğunu, artıyorsa güney yönden esen rüzgarların etkisinde oldukları söylenebilir. Rüzgar hızı ile kule hareketleri arasında çok kuvvetli bir ilişki görülmemektedir. İki büyüklük arasındaki $cc= - 0.1383$ korelasyon katsayısı ve Şekil 5.31 (b)’ deki çapraz korelasyon katsayılar grafiği de bunu doğrular niteliktedir.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde Y Beylerbeyi bileşeni 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekansa sahiptir. Rüzgar hızı Y bileşeninin ise $f_{1Ry} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Ry} = 1.447 \cdot 10^{-5}$ Hz lik iki frekansı bulunmaktadır. Bu frekansların periyot karşılıkları ise sırasıyla 72 saat ve 19 saattir.



Şekil 5.38 Beylerbeyi kule ‘Y’ ile rüzgar hızı Y bileşenine ait zaman genlik gösterimi (a), çapraz korelasyon katsayıları (b), bu iki büyüklüğe ait güç spektrumları (c) ve (d)

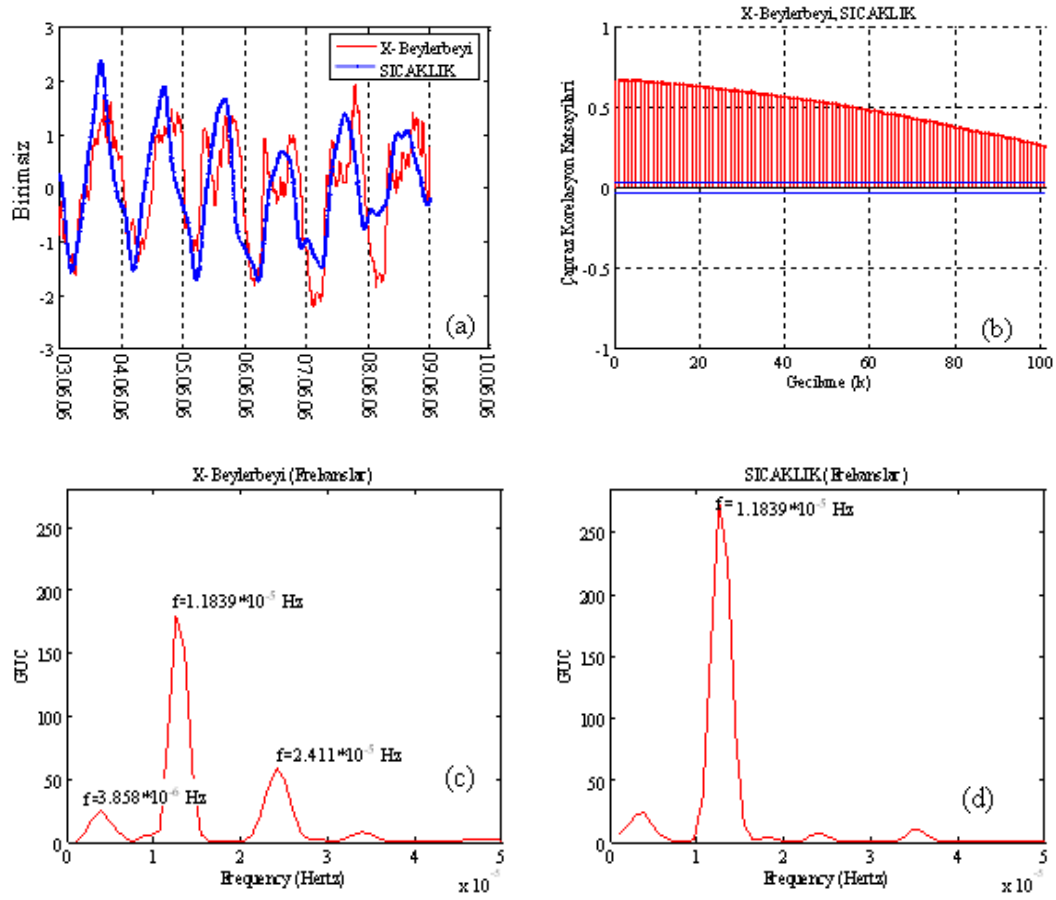
5.3.3.2 Beylerbeyi Kule ‘X’ Hareketlerinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi

• Beylerbeyi Kule X Hareketi – Sıcaklık İlişkisi

Sıcaklık değişiminin Beylerbeyi kule Y bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.39’ da gösterilmiştir

Şekil 5.39’ a göre sıcaklık değişimi ile X koordinat bileşeni arasında zıt yönlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Yani sıcaklık arttıkça X eğeri azalmakta, sıcaklık azaldıkça X değeri artmaktadır. Büyüklükler arasındaki korelasyon ise $cc= 0.6743$ dür.

Her iki büyüklük için periyodik bileşenler incelendiğinde Beylerbeyi kule X bileşeni için 12, 24 ve 72 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{Xo1} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$, $f_{Xo2} = 2.411 \cdot 10^{-5}$ ve $f_{Xo3} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ olmak üzere üç frekans mevcuttur. Sıcaklık değeri için ise 24 saatlik periyoda sahip $f_{Xs} = 1.1839 \cdot 10^{-5}$ Hz lik tek bir frekanstan belirlenmiştir.



Şekil 5.39 Beylerbeyi kule ‘X’ ile sıcaklık verilerine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) Beylerbeyi X ve (d) sıcaklık bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları

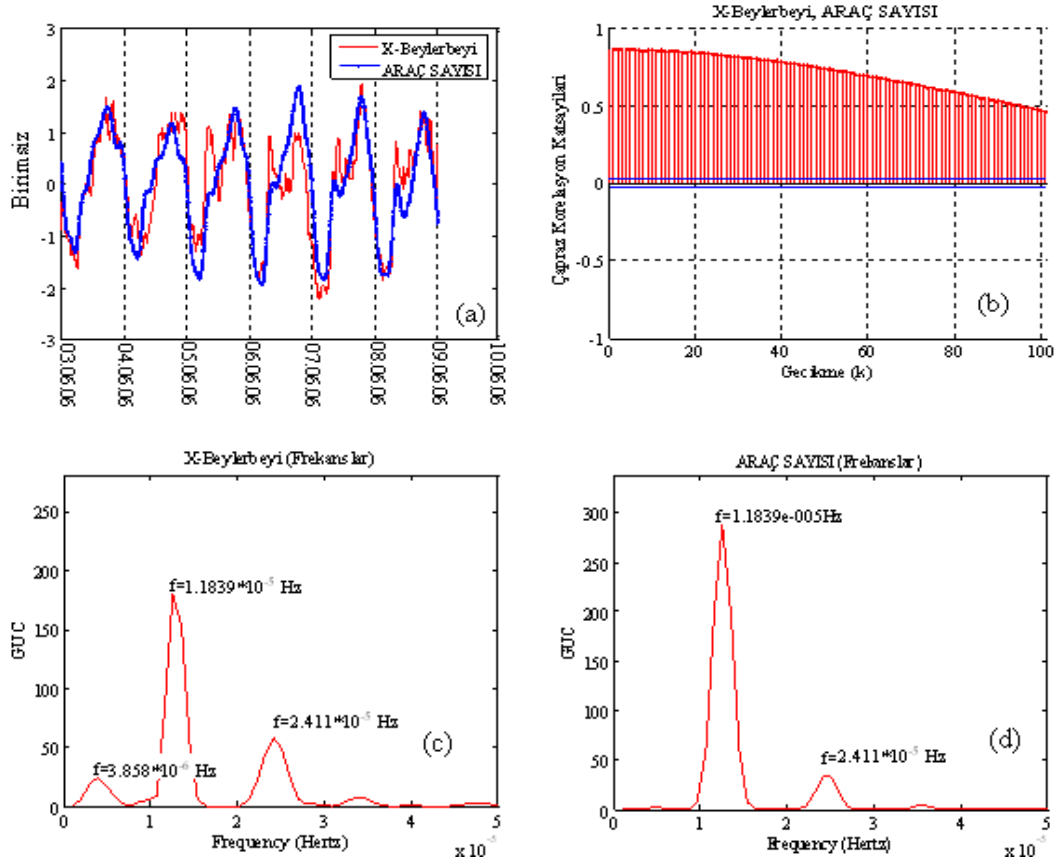
• Beylerbeyi Kule X Hareketi – Araç Sayısı İlişkisi

Köprü üzerinden geçen araç sayısının Beylerbeyi kule X bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.40’ da gösterilmiştir

Şekil 5.40 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Beylerbeyi kule X koordinatları arasında birbirlerine zıt yönlü ancak kuvvetli bir ilişki olduğu söylenebilir. İki büyüklük arasındaki elde edilen korelasyon katsayı değeri $cc = 0.8602$ dir. Bu değer de iki büyüklük arasındaki zıt yönlü ve kuvvetli bir ilişkiyi göstermektedir.

Köprü tabliyesi üzerinde araç sayısı ya da trafik yükü arttıkça ana kabloya etkileyen kuvvet artacaktır. Ana kablo da bu kuvveti ankrajlara iletirken öncelikle kuleleri etkileyecektir. Bu durumda Beylerbeyi kuleleri bu kuvvetin etkisiyle açıklık yönünde eğilecektir. Hem

Beylerbeyi kule X, hem de araç sayısı için 2 periyodik bileşen bulunmaktadır. Bu iki periyodik bileşen 12 ve 24 saatlik periyotlara karşılık gelmektedir.

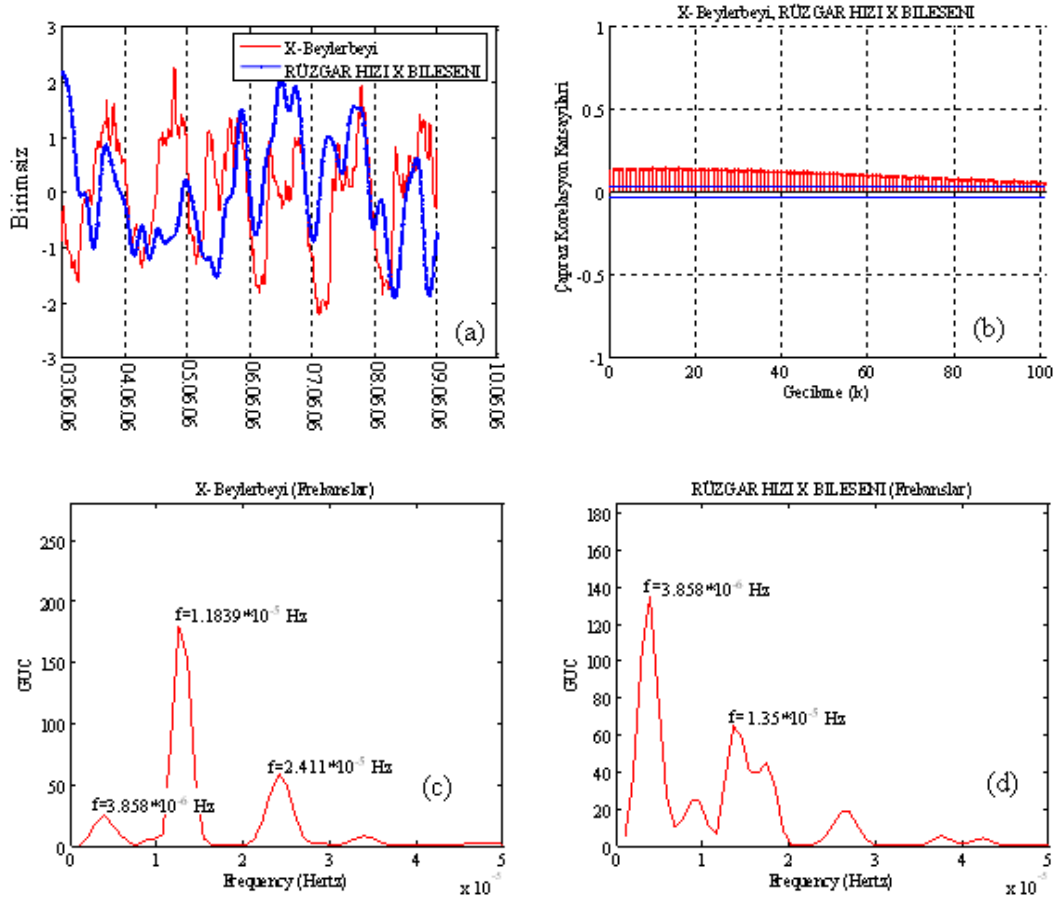


Şekil 5.40 Beylerbeyi kule ‘X’ ile araç sayısına ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi X ve araç sayısı bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları

- **Beylerbeyi Kule X Hareketi – Rüzgar Hızı X Bileşeni İlişkisi**

Beylerbeyi kule Y bileşeni ile Rüzgar yükü arasındaki ilişki açıklanırken rüzgar hızının koordinatlar üzerine etkisinin daha iyi açıklanabilmesi için esen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerine ayrıldığı söylenmişti. Burada da Beylerbeyi X bileşeni ile Rüzgar hızı arasındaki ilişki incelenirken rüzgar hızının X bileşeni kullanılmıştır

Rüzgar hızı X bileşeninin Beylerbeyi kule X bileşeni üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.41’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.41 Beylerbeyi kule ‘X’ ile rüzgar hızı X bileşenine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi X ve rüzgar hızı X bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları

Şekil 5.41 (a) incelendiğinde Beylerbeyi kule X koordinatları ile rüzgar hızı X bileşeni hareketlerinin zıt yönlü olduğu söylenebilir. Beylerbeyi kule X koordinatı azalıyorsa kulenin batı yönünden esen rüzgarların etkisinde olduğunu, artıyorsa doğu yönünden esen rüzgarların etkisinde olduğu söylenebilir. Rüzgar hızı ile kule hareketleri arasında çok kuvvetli bir ilişki görülmemektedir. İki büyüklük arasındaki korelasyon katsayısı $cc= 0.1357$ de istatistiksel olarak bunu doğrular niteliktedir.

Beylerbeyi X bileşeni için daha öncede belirtildiği gibi 12 ve 24 saatlik periyotlara sahip iki frekans mevcuttur. Rüzgar hızı X bileşeninin ise $f_{1Rx} = 3.858 \cdot 10^{-6}$ Hz ve $f_{2Rx} = 1.35 \cdot 10^{-5}$ Hz frekanslara sahip iki periyodik bileşeni bulunmaktadır. Bu frekansların periyot karşılıkları ise sırasıyla yaklaşık 72 saat ve 21 saattir.

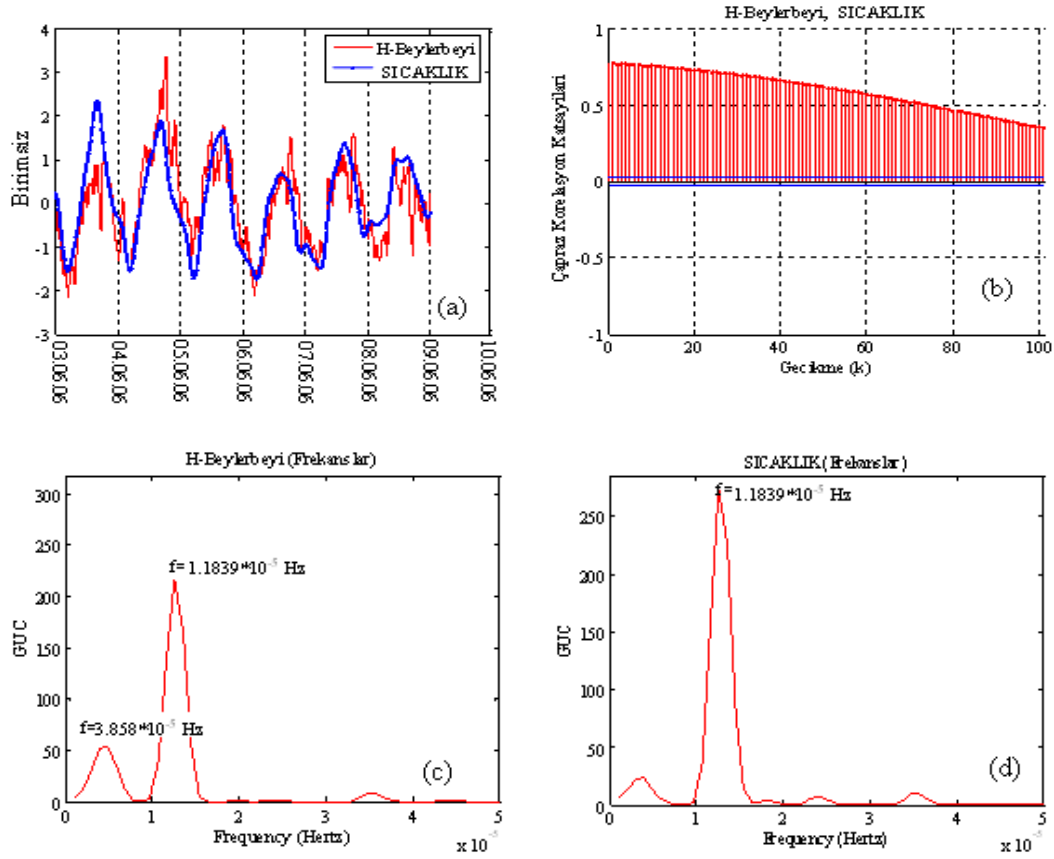
5.3.3.3 Beylerbeyi Kule Düşey (H) Hareketinin Dış Yüklerle İlişkisinin İncelenmesi

- **Beylerbeyi Kule Düşey Hareketi– Sıcaklık İlişkisi**

Sıcaklık değişiminin Beylerbeyi kule düşey hareketi üzerindeki etkisinin incelenmesi için her iki büyüklüğe ait 2 dk kayıt aralıklı verilerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.42’ de gösterilmiştir

Şekil 5.42’ ye göre sıcaklık değişimi ile yükseklik bileşeni arasında aynı yönlü ve oldukça da kuvvetli bir ilişki vardır. Yani sıcaklık arttıkça Beylerbeyi kule H değeri artmakta, sıcaklık azaldıkça H değeri de azalmaktadır. Bunun sebebi ise sıcaklıkla genleşen çeliğin boyunun uzamasıdır. Bölüm 2’ de eşitlik (2.1) bu hareketin açıklanmasında yardımcı olabilir. Büyüklükler arasındaki korelasyon katsayısı ise $cc= 0.6683$ dür.

Her iki bileşen için periyodik bileşenler incelendiğinde H Beylerbeyi bileşeni için yaklaşık 24 ve 96 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{H01}=1.1839*10^{-5}$ ve $f_{H02}= 2.894*10^{-6}$ lık iki frekans mevcuttur. Sıcaklık değeri için ise 24 saatlik periyoda sahip $f_{Hs}=1.1839*10^{-5}$ Hz lik bir periyodik bileşen bulunmaktadır.

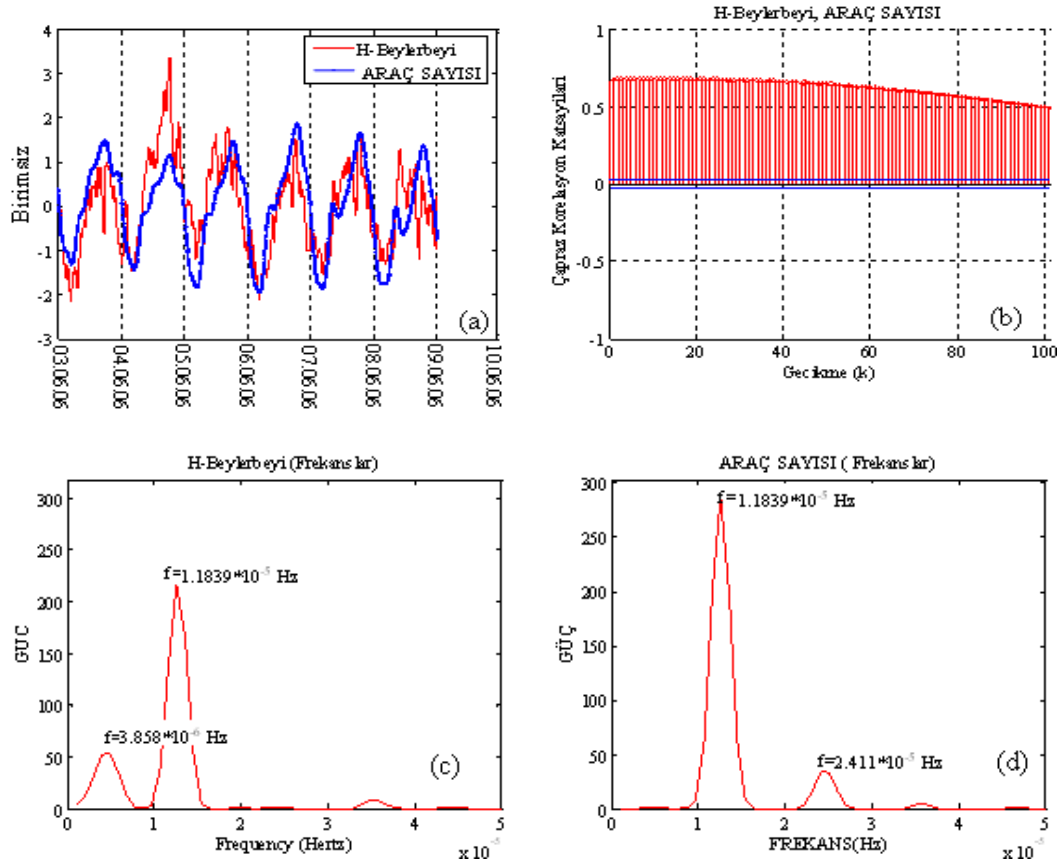


Şekil 5.42 Beylerbeyi kule ‘H’ ile Sıcaklık verilerine ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) frekans – güç spektrumları

• Beylerbeyi Kule Düşey Hareketi – Araç Sayısı İlişkisi

Köprü üzerinden geçen araç sayısının Beylerbeyi kulenin düşey yöndeki hareketlerinin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgileri karşılaştırılarak Şekil 5.43’ de gösterilmiştir. Şekil 5.43 (a) incelendiğinde geçen araç sayısı ile Beylerbeyi kule düşey hareketinin birbirleri ile çok benzer oldukları söylenebilir. İki büyüklük istatistiksel olarak incelendiğinde elde edilen korelasyon katsayısı değeri $cc= 0.6705$ dir. Buna göre araç sayısı ile Beylerbeyi kule düşey hareketi arasında kuvvetli denebilecek bir ilişki vardır.

Her iki değer için periyodik bileşenler incelendiğinde düşey salınım için için yaklaşık 24 ve 96 saatlik periyotlara karşılık gelen $f_{Ho1}=1.1839*10^{-5}$ ve $f_{Ho2}= 2.894*10^{-6}$ lık iki frekans mevcuttur. Araç sayısı için ise $f_{1arc}=1.1839*10^{-5}$ Hz ve $f_{2arc}= 2.411*10^{-5}$ Hz lik iki frekans bulunmaktadır. Bu frekansların periyot olarak karşılıkları ise Y koordinat değerlerinki ile aynı olup 12 saat ve 24 saattir.



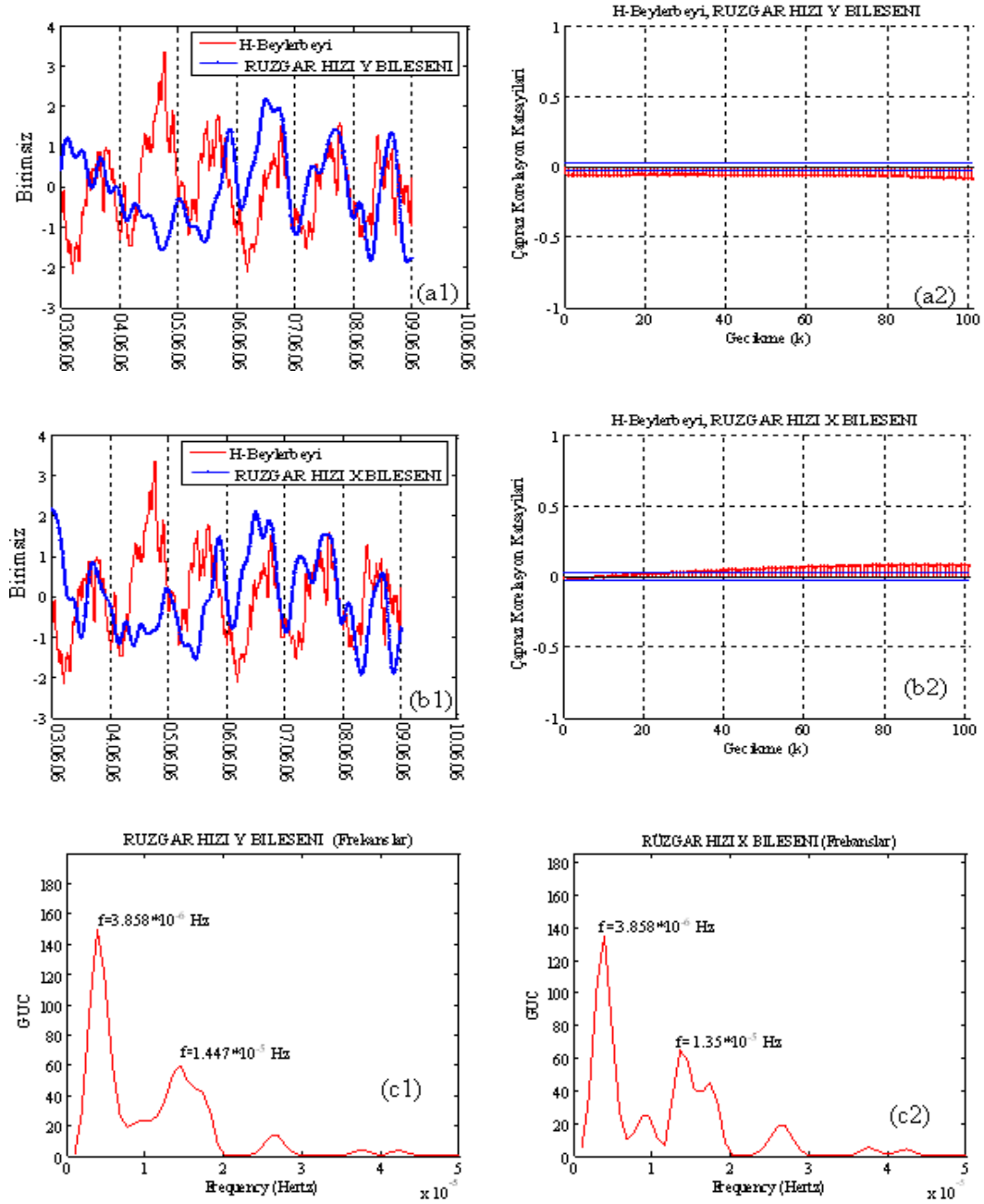
Şekil 5.43 Beylerbeyi kule düşey hareketi ile araç sayısına ait (a) zaman genlik gösterimi, (b) çapraz korelasyon katsayıları, (c) ve (d) sırasıyla Beylerbeyi H ve araç sayısı bileşenlerine ait frekans – güç spektrumları

• Beylerbeyi Kule Düşey Hareketi – Rüzgar Hızı Arasındaki İlişkiler

Beylerbeyi kule düşey hareketi ile rüzgar yükü arasındaki ilişkiyi açıklamak için daha önce belirtilen rüzgar yönlerine göre rüzgar hızlarının vektörel bileşenlerinden hem X hem de Y bileşeni birlikte kullanılmıştır.

Şekil 5.44 Rüzgar hızı X ve Y bileşenlerinin Beylerbeyi kule düşey hareketi üzerindeki etkisinin incelenmesi için verilerin boyutsuzlaştırılmış zaman – genlik gösterimleri, çapraz korelasyon katsayıları ve frekans bilgilerini göstermektedir.

Şekil 5.44 (a) ve (c) incelendiğinde Beylerbeyi kule düşey hareketi ile rüzgar hızlarının hem X hem de Y bileşenleri arasında zıt yönlü ve zayıf bir ilişki görülmektedir. H değeri ile Rüzgar X ve Y bileşenleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları ise sırasıyla $cc_{HX} = -0.01527$, $cc_{HY} = -0.05953$ dır.



Şekil 5.44 Beylerbeyi kule düşey hareketi ile rüzgar hızı Y bileşeni (a1), rüzgar hızı X bileşeni (b1) zaman genlik gösterimi, bunlara ait çapraz korelasyon katsayılar grafiği (a2, b2) ve güç spektrumları (c1) ve (c2)

Rüzgar hızı X bileşeni yaklaşık 72 saat ve 21 saatlik periyotlara sahip iki frekans $f_{1RX} = 3.858 \times 10^{-6}$ Hz ve $f_{2RX} = 1.35 \times 10^{-5}$ Hz, Rüzgar hızı Y bileşeni ise 72 ve 19 saatlik periyotlara sahip $f_{1RY} = 3.858 \times 10^{-6}$ Hz ve $f_{2RY} = 1.447 \times 10^{-5}$ Hz lik periyodik bileşenlere sahiptir.

5.3.4 Tabliye Hareketlerinin İncelenmesi

Köprü kulelerinde 1 Hz örnekleme aralığı ile gerçekleştirilen GPS ölçülerinin yanında tabliye orta noktasındaki GPS ölçüleri 10 Hz kayıt aralığı ile toplanmıştır. Köprü kuleleri GPS ölçüleri için elverişli olsa da tabliye için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. (Şekil 5.8)’ den de görüleceği gibi tabliye orta noktasındaki GPS alıcısı ana kablo ve araçlardan dolayı multipath etkisine maruz kalmaktadır. Elde edilen veriler incelendiğinde özellikle sabah saatlerinde alınan sinyallerde çok fazla sıçrama, kopukluk ve veri kaybı olduğu görülmüştür. Özellikle sabah saatlerinde bozuk olan uydu geometrisi de bu olumsuzluklara eklenince tabliyede ölçü süresi boyunca çok kaliteli veri toplanamadığı gözlemlenmiştir.

Sabah saatlerine ait bu kalitesiz verilerin değerlendirmelerde kullanılması mümkün değildir. Diğer veriler ise birtakım düzenlemelerden geçirilmiş ve her ölçü gününe ait verilerin 11 saatlik kısmı kullanılabilir hale getirilmiştir. Yerel saatle 12:00 – 23:00 saatleri arasını kapsayan veriler tabliyede yapılacak çalışmalar için kullanılmıştır. Çizelge 5.5’ de ölçü süresi boyunca toplanan tabliye koordinatlarına ait özet bilgiler sunulmuştur.

Çizelge 5.5 Tabliyede ölçü süresi boyunca toplanan verilere ait özet bilgi

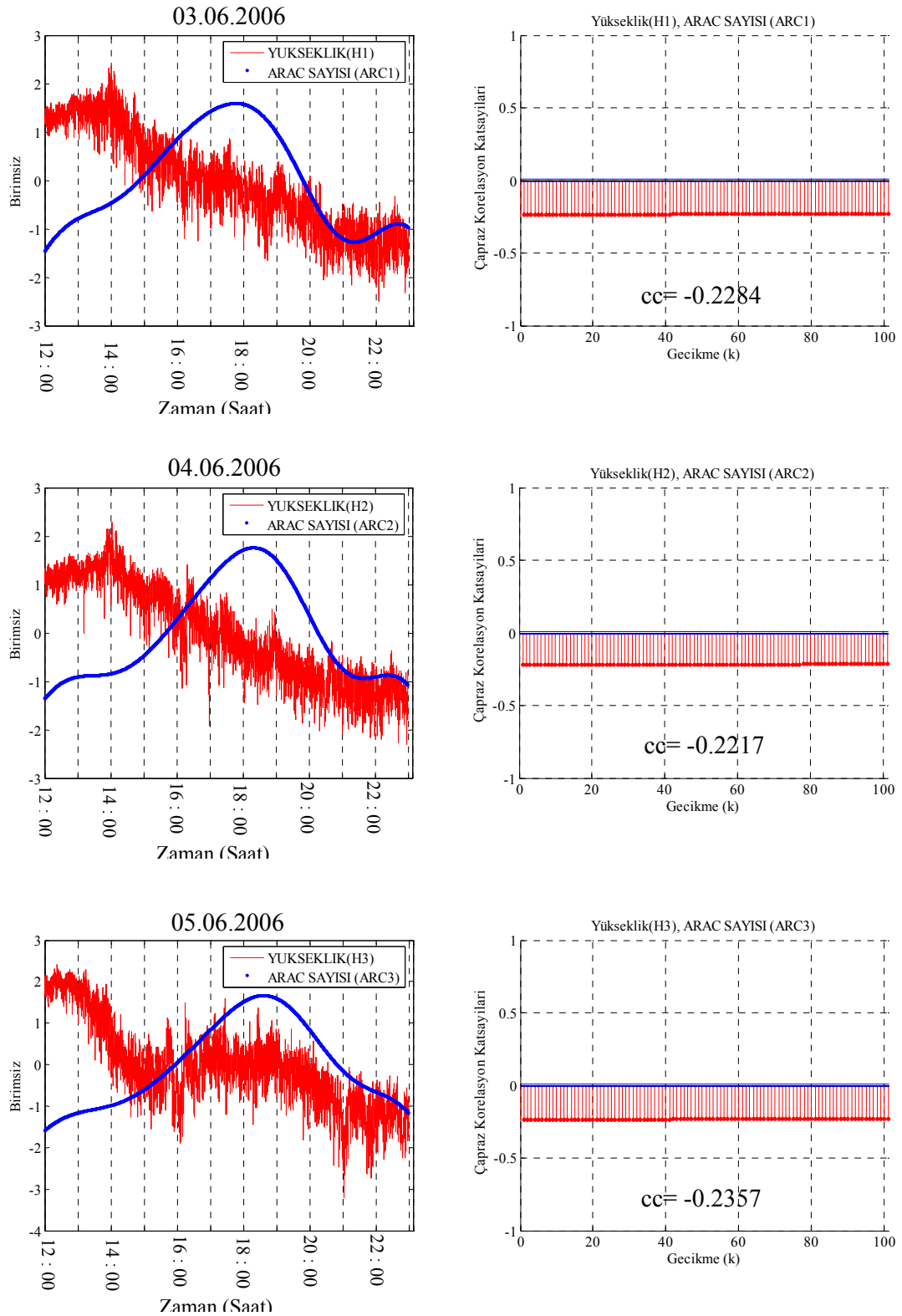
Tarih	Nokta	Maksim. (m)	Min. (m)	Fark (cm)	Std.sap.(cm)
03.06.06	Tabliye	X	1559.522	1559.416	10.616
		Y	984.056	983.926	13.022
		H	109.521	109.131	39.011
04.06.06	Tabliye	X	1559.493	1559.392	10.129
		Y	984.071	983.979	9.149
		H	109.639	109.199	44.024
05.06.06	Tabliye	X	1559.503	1559.399	10.468
		Y	984.068	983.930	13.764
		H	109.585	109.141	44.375
06.06.06	Tabliye	X	1559.499	1559.405	9.436
		Y	984.058	983.889	16.908
		H	109.642	109.211	43.150
07.06.06	Tabliye	X	1559.516	1559.413	10.245
		Y	984.075	983.916	15.965
		H	109.692	109.099	59.257
08.06.06	Tabliye	X	1559.504	1559.397	10.721
		Y	984.043	983.906	13.703
		H	109.666	109.128	53.834
Ortalama	Tabliye	X	1559.506	1559.404	10.269
		Y	984.062	983.924	13.752
		H	109.624	109.152	47.275

Tabliye orta noktası düşey yönde en çok hareket beklenen yerdir. Çizelge 5.5' e bakıldığında ölçü süresi boyunca tabliye orta noktasındaki salınımın ± 20 cm ile ± 30 cm genliğiyle 40 cm ve 60 cm arasında olduğu görülmektedir. X ve Y değerleri ile karşılaştırıldığında en büyük hareketin düşey yönde olduğu açıkça görülmektedir.

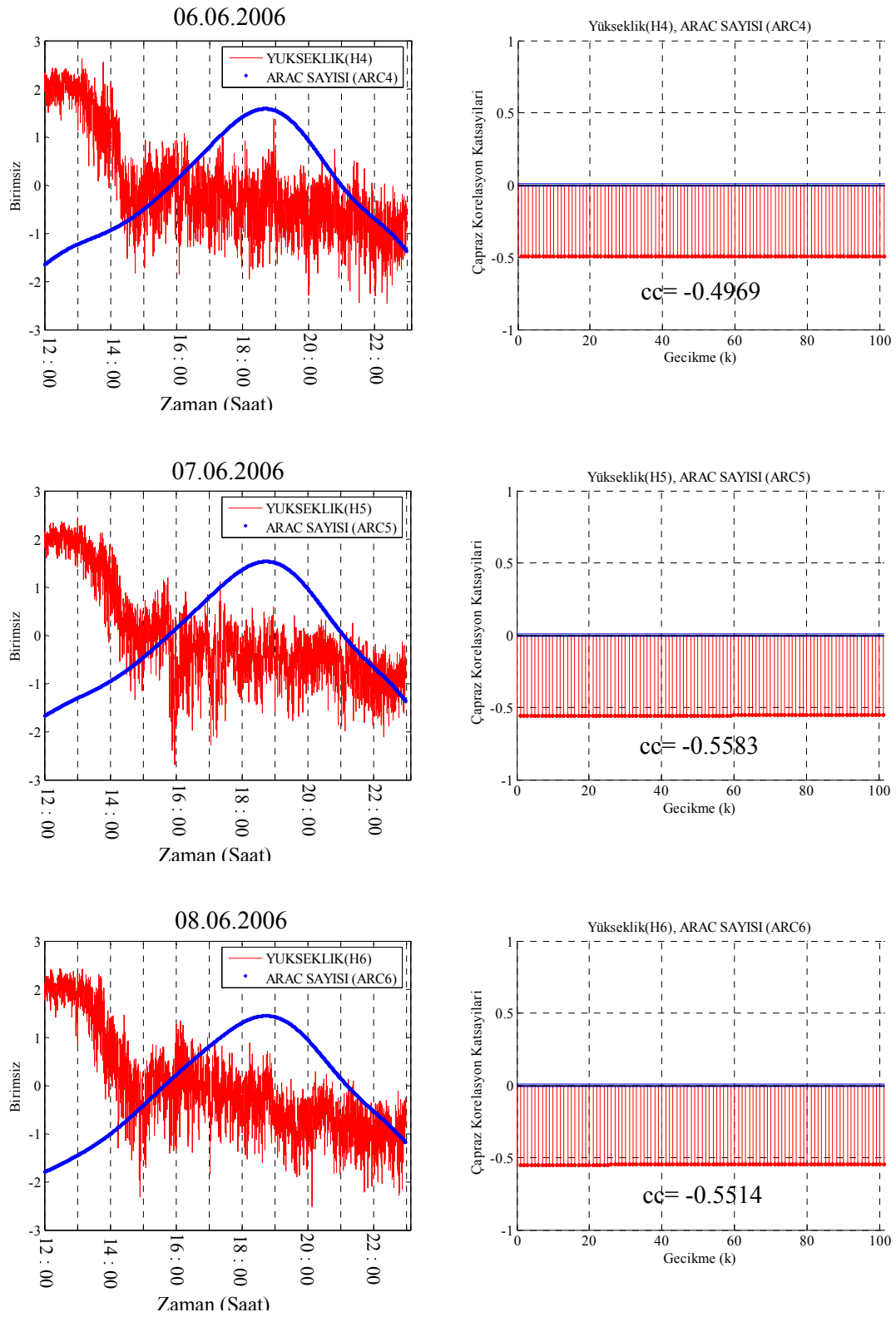
Erdoğan (2006) çalışmasında tabliye orta noktasındaki düşey salınımı ± 12 cm genliğiyle 24 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği çalışmasının 2 periyodunda güney tabliye orta noktasının düşey salınımlarını incelemiştir. 1. periyotta ± 20 cm genliğiyle 40 cm, 2. periyotta ise ± 12 cm genliğiyle 24 cm olarak belirlemiştir.

Adanur (2003) Boğaziçi Köprüsü ile ilgili yaptığı modelleme çalışmalarında tabliye düşey yer değiştirmelerini hesaplamıştır. Buna göre tabliye düşey yer değiştirmesi CQC (Complete Quadratic Combination) yöntemi kullanarak lineer analizle 33 cm, köprünün hareketli yüklerle birlikte lineer olmayan analizi ile 72 cm, elastik zemin analojisi ile 66.62 cm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin Çizelge 5.5' de verilen tabliye düşey salınım miktarlarıyla oldukça benzer olduğu görülmektedir.

Tabliyenin düşey salınımında en önemli etken köprü üzerinden geçen araç sayısıdır. Şekil 5.45 ve Şekil 5.46 ölçü süresince her gün 11 saat boyunca köprü üzerinden geçen araç sayısının bu zaman diliminde tabliye orta noktasındaki düşey hareketle olan ilişkisini göstermektedir.



Şekil 5.45 3, 4 ve 5 Haziran 2006 tarihlerindeki köprüden geçen araç sayısı tabliye düşey hareketleri arasındaki ilişki



Şekil 5.46 6, 7 ve 8 Haziran 2006 tarihlerindeki köprüden geçen araç sayısı tabliye düşey hareketleri arasındaki ilişki

5.4 Köprü Kule Hareketlerinin Dalgacık Analizi ile İncelenmesi

Bölüm 3’ de ayrıntılı olarak açıklanan Dalgacık Analizi verilen bir sinyalin zaman – frekans gösterimi yerine zaman – ölçek gösterimini vermektedir. Burada ölçekten frekansa geçiş yapılmalıdır.

Matlab programıyla sinyallerin hem sürekli hem de ayrık dalgacık dönüşümü elde edilebilir. Bu dönüşümden sinyallerin zaman – ölçek bileşenleri elde edilir. Ölçekle frekans arasında ise aşağıdaki eşitlik geçerlidir.

$$F_a = \frac{F_c}{\Delta \cdot s} \quad (5.1)$$

eşitlikte

F_a = Belirlenmeye çalışılan frekans,

F_c = Dönüşümde kullanılan dalgacık ailesine ait merkez frekans,

Δ = Örnekleme aralığı,

S = Ölçek değeridir.

Tez çalışmasında da verilerin dalgacık analizi Matlab programında yazılan kodlar ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Daubechies 4 dalgacık fonksiyonu (db4) kullanılmıştır. Buna göre db4’ ün merkez frekansı $F_c = 0.7143$ Hz dir. Yine analizlerde 2dk kayıt aralıklı veriler kullanıldığı için Δ örnekleme aralığı da 120 sn’ dir ($\Delta=120$ sn). Frekans belirlemek için yapılması gereken, analiz edilen sinyaller için s ölçek değerinin belirlenmesidir. Dalgacık analizi ile s ölçek değeri hem ayrık dalgacık analizi hem de sürekli dalgacık analizi ile belirlenebilir.

5.4.1 Ayrık Dalgacık Analizi ile İnceleme

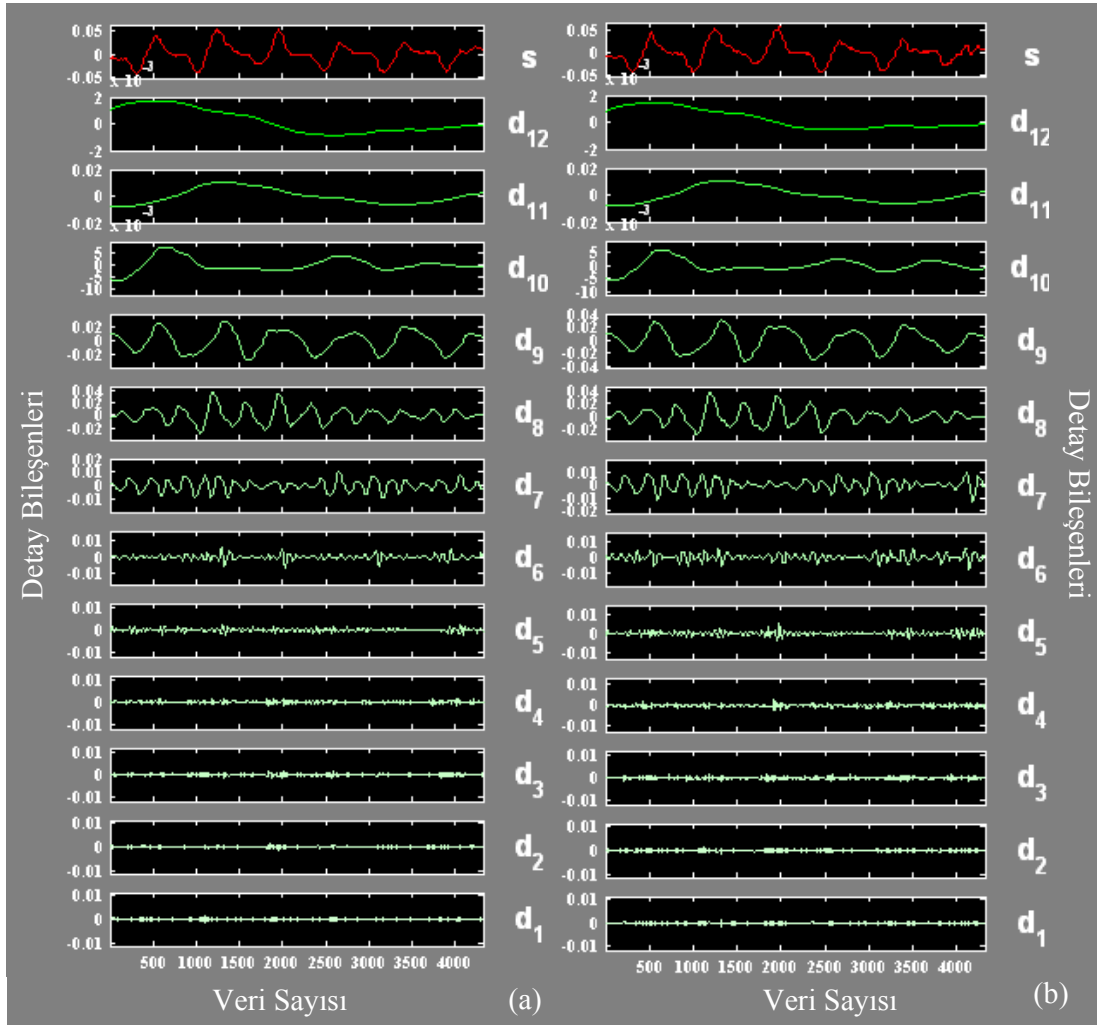
Ayrık dalgacık analizi ile frekans belirleyebilmek için öncelikle verilerin çok çözünürlüklü analiz (ÇÇA) ile bileşenlerine ayrılması gerekmektedir. ÇÇA ile kaçınıcı seviyeye kadar ayrıştırma yapılacağına ya da bileşen sayılarının belirlenmesine Nyquistic kriterine göre karar verilir. Nyquistic kriterine göre bileşen sayısı, veri sayısının yarısı kadar örneği ifade eden 2’nin üst değerine eşittir (2^n) (Küçük, 2004).

Verileri ayrık dalgacık dönüşümü ile bileşenlerine ayırmak için Matlab 7.0 programı kullanılmıştır. Dalgacık ayrıştırmasında kullanılan Matlab kodları Ek1’ de verilmiştir.

5.4.1.1 Ortaköy Ve Beylerbeyi Kuleleri Yanal Hareketlerinin (Y) İncelenmesi

Şekil 5.47 Beylerbeyi ve Ortaköy kulelerine ait 2dk kayıt aralıklı Y koordinat değerlerinin db4 dalgacık ailesi ile Nyquistic kriterine göre ($2^{12}=4096$) 12.seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenlerini göstermektedir. Şekilde ilk sütun Beylerbeyi kuleye, ikinci sütun Ortaköy kuleye ait bileşenleri göstermektedir. Her iki sütunda en üstte yer alan ve ‘S’ ile gösterilen seriler ölçümlerden elde edilmiş verileri ifade etmektedir.

Bileşen sayısı hesaplanırken Nyquistic kriterine göre veri sayısının yarısı kadar örneği ifade eden 2’ nin üst değerlerinden yararlanılmıştır. Buna göre analizlerde kullanılan veri sayısı 4320 dir. Bunun yarısı olan 2160 değeri ise $2^{11}=2048$ değerinden büyüktür. Nyquistic kriterine göre $2048 < 2160$ olduğu için bileşen sayısı hesaplamada 2^n teriminde n değeri 12 seçilmiş ve Y koordinatlarına ait veriler 12. seviyeye kadar ayrıştırılmıştır.



Şekil 5.47 Beylerbeyi kule ‘Y’ (a) ve Ortaköy kule ‘Y’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri

Eşitlik 5.1 kullanılarak frekans hesaplayabilmek için gerekli olan ölçek değerlerine karar vermek için ayrıştırma sonucu elde edilen bileşenlerin enerjileri incelenmelidir. Enerji hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

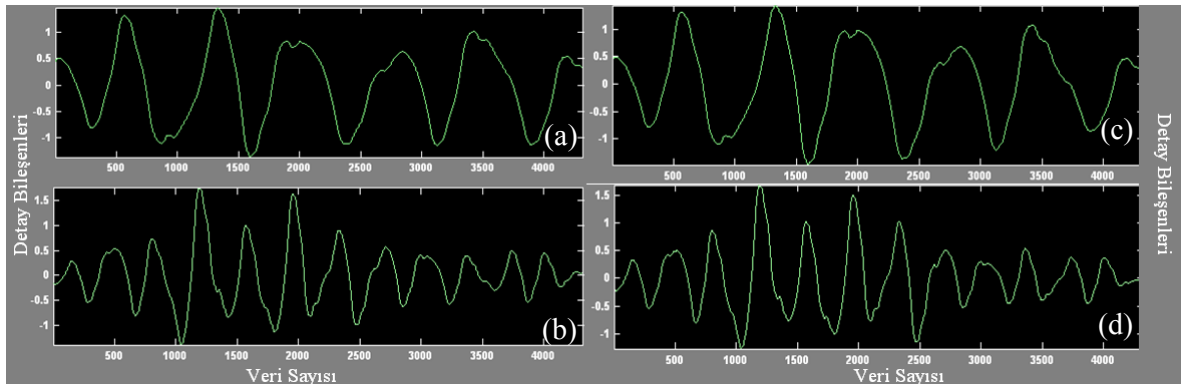
$$E_m = \sum_n |w_{m,n}|^2 \quad (5.2)$$

Burada E_m , m. seviyedeki enerjiyi, $w_{m,n}$ ise m. seviyede ve n zaman adımındaki bileşenin ayrık dalgacık dönüşüm katsayılarıdır. (5.2) eşitliği kullanılarak hesaplanan enerji yüzdeleri Çizelge 5.6’ da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Beylerbeyi ve Ortaköy kule Y koordinatları için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri

	Enerji Yüzdeleri (%)											
Ayrıştırma Seviyeleri	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
Y-Beylerbeyi Verisi	0	0	0.01	0.02	0.04	0.21	1.69	14.62	31.09	1.11	7.23	0.76
Y-Ortaköy Verisi	0	0	0.01	0.02	0.08	0.44	2.23	16.27	36.3	0.83	7.47	0.60

Çizelge 5.6 incelendiğinde her iki kuleye ait Y koordinat bileşenlerinin oluşturduğu ölçüm serisi için en yüksek enerji yüzdesine sahip bileşen 9. bileşendir. Bunu 8. bileşen izlemektedir (Şekil 5.48). 9. bileşenin ölçek değeri $2^9=512$ ve 8. bileşenin ölçek değeri $2^8=256$ dır.



Şekil 5.48 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule ‘Y’ verisinin dalgacık analizi ile elde edilen 9. (a) ve 8. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule ‘Y’ verisinin 9. (c) ve 8. (d) bileşenleri

8. ve 9. bileşenin hangi frekansa karşılık geldiğini hesaplamak için ise (5.2) eşitliği kullanılmıştır. Buna göre 9. bileşen yani 512 ölçek değeri için F_a frekansı;

$$F_{ay9} = \frac{F_c}{\Delta \cdot s} = \frac{0.7143}{120 \cdot 512} = 1.16 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$$

elde edilir. Bu değer ise yaklaşık 24 saatlik bir periyoda karşılık gelmektedir.

8. bileşen yani 256 ölçek değerine sahip baskın bileşen için frekans değeri ise

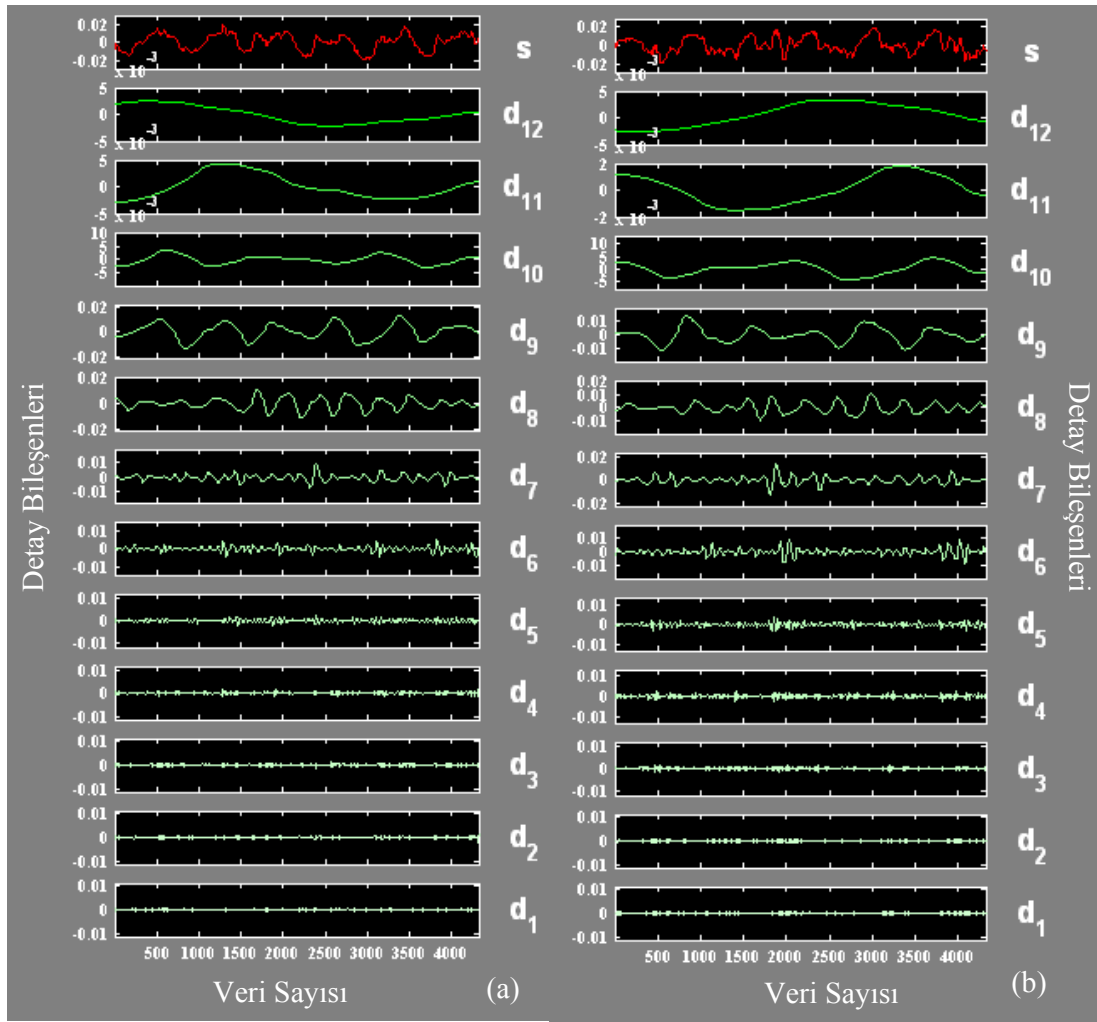
$$F_{ay8} = \frac{F_c}{\Delta \cdot s} = \frac{0.7143}{120 \cdot 256} = 2.33 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$$

olarak elde edilir. Bu frekansın periyodu ise yaklaşık 12 saattir.

Bölüm 5.3.1' de FFT analizi ile elde edilen Ortaköy ve Beylerbeyi kuleleri Y koordinatları için frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen periyot değerleri ile ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen periyotların aynı olduğu görülebilir. Bu ise dalgacık analizinin frekans belirleme çalışmalarında başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

5.4.1.2 Ortaköy ve Beylerbeyi Kulelerinin Açıklık Doğrultusundaki (X) Hareketlerinin İncelenmesi

Bir önceki kısımda yanal hareketler incelenirken anlatılan ifadeler doğrultusunda X bileşenleri de Nyquistic kriterine göre ayrık dalgacık dönüşüm tekniği ile Daubechies-4 (db4) dalgacık fonksiyonu kullanılarak 12 bileşene ayrıştırılmıştır (Şekil 5.49). Her bir bileşenin taşıdığı enerji yüzdeleri (5.3) eşitliği kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar bir tablo halinde Çizelge 5.7' de verilmiştir.

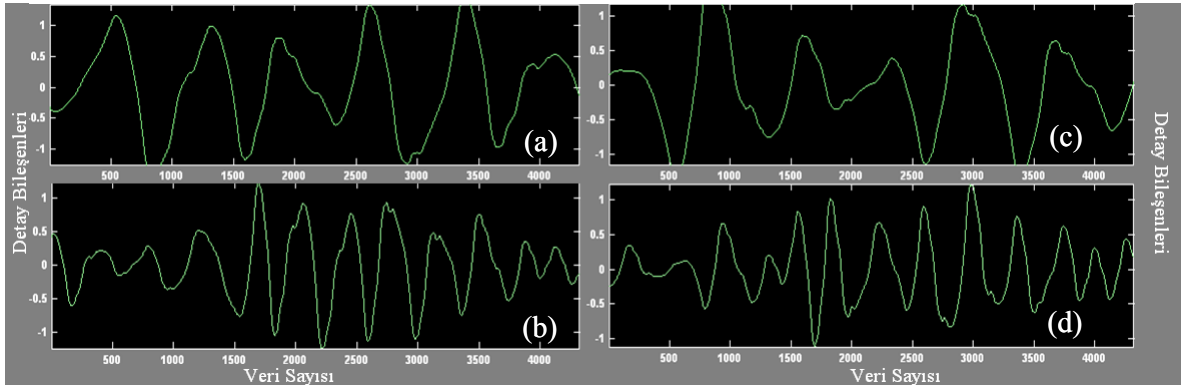


Şekil 5.49 Beylerbeyi kule ‘X’ (a) ve Ortaköy kule ‘X’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri

Çizelge 5.7 incelendiğinde her iki kuleye ait X koordinat bileşenlerinin oluşturduğu ölçüm serisi için en yüksek enerji yüzdesine sahip bileşen 9. bileşendir. Bunu 8. bileşen izlemektedir. 9. bileşenin ölçek değeri $2^9=512$ ve 8. bileşenin ölçek değeri $2^8=256$ dır.

Çizelge 5.7 Beylerbeyi ve Ortaköy kule X koordinatları için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri

	Enerji yüzdeleri (%)											
Ayrıştırma Seviyeleri	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
X-Beylerbeyi Verisi	0	0.01	0.01	0.04	0.09	0.69	1.29	5.55	14.40	1.28	3.24	2.67
X-Ortaköy Verisi	0.02	0.03	0.05	0.19	0.48	3.77	6.71	10.61	26.86	7.42	1.75	8.24



Şekil 5.50 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule 'X' verisinin dalgacık analizi ile elde edilen 9. (a) ve 8. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule 'X' verisinin 9. (c) ve 8. (d) bileşenleri

Yanal hareketlerde belirlendiği gibi burada da 8. ve 9. bileşenin hangi frekansa karşılık geldiğini hesaplamak için ise (5.2) eşitliği kullanılmıştır. Buna göre 9. bileşen yani 512 ölçek değeri için F_a frekansı;

$$F_{aX9} = \frac{0.7143}{120 \cdot 512} = 1.16 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$$

8. bileşen yani 256 ölçek değeri için ise

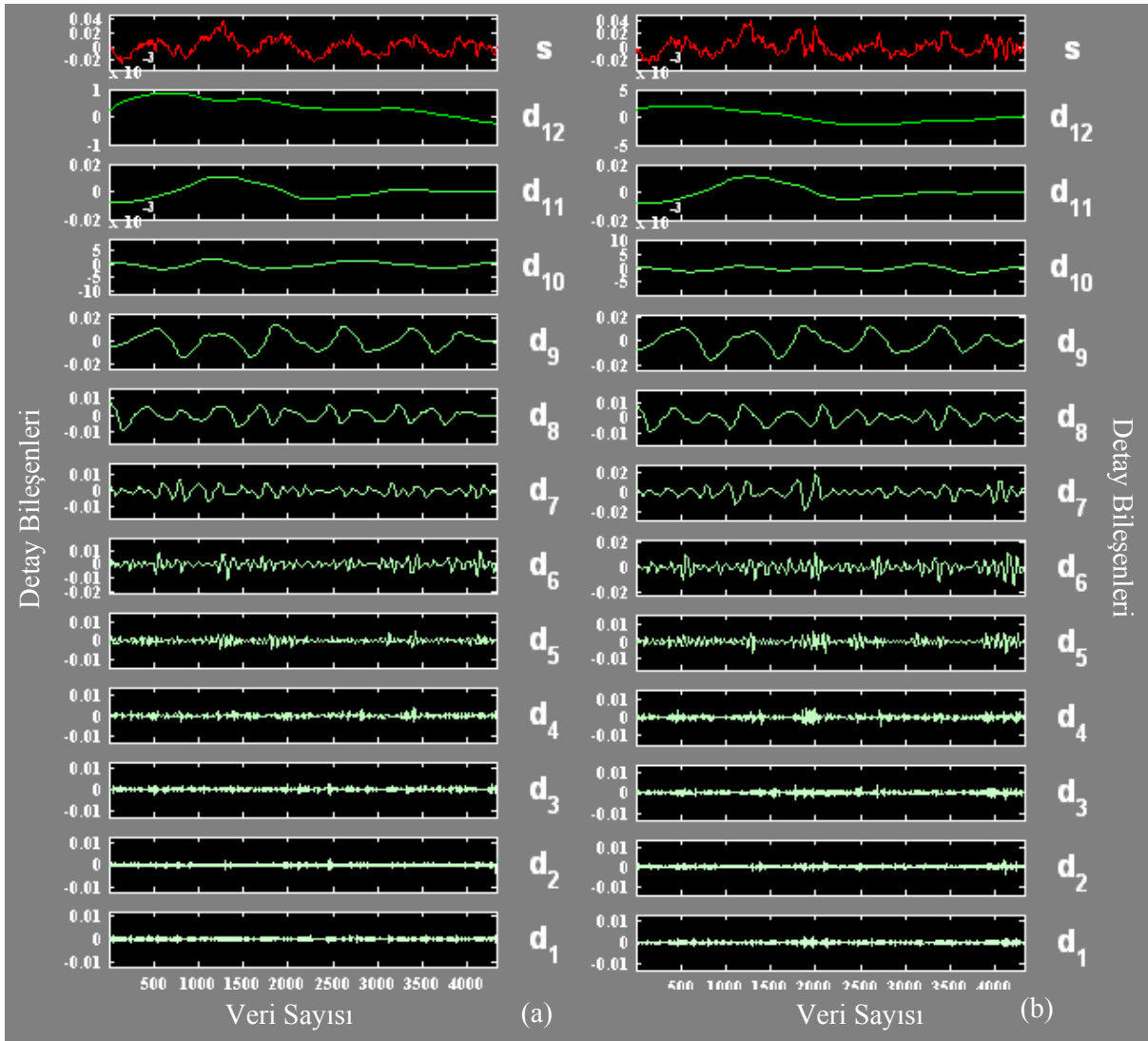
$$F_{aX8} = \frac{0.7143}{120 \cdot 256} = 2.33 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$$

olarak hesaplanır. Bu değerler ise sırasıyla 24 ve 12 saatlik periyotlara karşılık gelmektedir.

Buradan elde edilen periyotlar Bölüm 5.3.1' de FFT analizi ile elde edilen Ortaköy ve Beylerbeyi kuleleri X koordinatları için hesaplanan periyotlarla karşılaştırıldığında her iki yöntemle elde edilen periyot değerlerinin de yaklaşık aynı olduğu görülebilir.

5.4.1.3 Ortaköy Ve Beylerbeyi Kulelerinin Düşey (H) Hareketlerinin İncelenmesi

Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerine ait yükseklik bileşenlerinin sahip oldukları baskın frekansların ve periyotların belirlenmesi için her iki yükseklik bileşeni de Nyquistic kriterine göre ayrık dalgacık dönüşüm tekniği ile Daubechies-4 (db4) dalgacık fonksiyonu kullanılarak 12 bileşene ayrıştırılmıştır (Şekil 5.51).



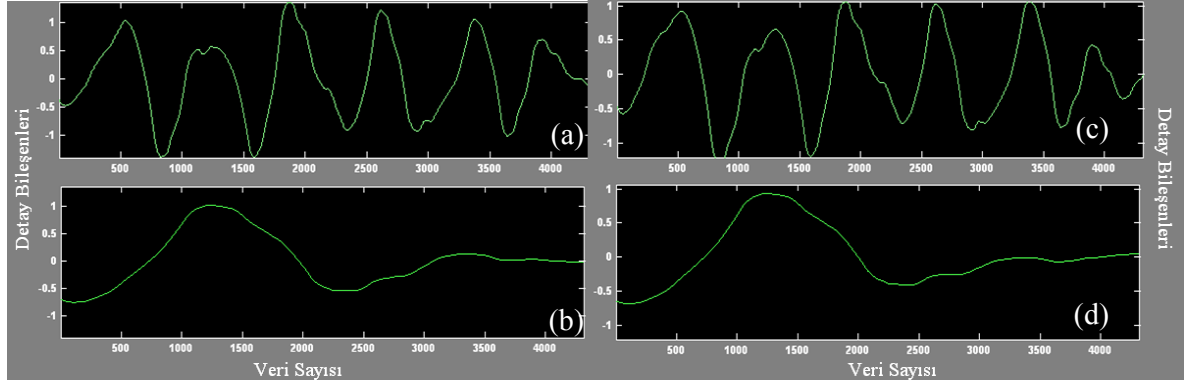
Şekil 5.51 Beylerbeyi kule ‘H’ (a) ve Ortaköy kule ‘H’ (b) değerlerinin db4 - 12. seviye ayrıştırması ile elde edilen detay bileşenleri

Bu ayrıştırma sonucu elde edilen her bir detay bileşenin taşıdığı enerji yüzdeleri (5.3) eşitliği kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.8’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 Beylerbeyi ve Ortaköy kule H değerleri için dalgacık analizinden elde edilen detay bileşenleri ile hesaplanan enerji yüzdeleri

Ayrıştırma Seviyeleri	Enerji yüzdeleri (%)											
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
H-Beylerbeyi Verisi	0.02	0.04	0.06	0.13	0.35	1.81	1.56	3.25	16.75	0.72	14.73	1.23
H-Ortaköy Verisi	0.02	0.03	0.06	0.18	0.57	2.83	4.92	3.30	12.78	0.38	11.65	1.59

Çizelge 5.8 incelendiğinde yükseklik bileşeni için durumun Y ve X bileşenlerinden farklı olduğu görülebilir. Burada da en yüksek enerjiye sahip bileşen 9. bileşen olmakla birlikte ikinci baskın bileşen 11. bileşendir.



Şekil 5.52 Enerji seviyelerine göre belirlenen anlamlı bileşenler. Beylerbeyi kule ‘H’ verisinin 9. (a) ve 11. (b) bileşenleri ile Ortaköy kule ‘H’ verisinin 9. (c) ve 11. (d) bileşenleri

9. bileşen için hesaplanan frekansa karşılık gelen periyot 24 saattir. Bunun yanında 11. bileşenin ölçek değeri $2^{11} = 2048$ dir. (5.2) eşitliği ile 2048 ölçek değerine karşılık gelen frekans değeri hesaplanırsa F_a frekansı;

$$F_{aH11} = \frac{0.7143}{120 \cdot 2048} = 2.91 \cdot 10^{-6} \text{ Hz}$$

olarak hesaplanır. Bu değer ise Bölüm 5.3.1’ de FFT analizi ile hesaplanan frekans değeri $f = 2.894 \cdot 10^{-6}$ ile yaklaşık aynıdır. Elde edilen periyot değerleri yaklaşık 96 gündür.

5.5 Köprü Kule Hareketlerinin Dalgacık Dönüşümüyle Modellenmesi

Bu bölümde dalgacık dönüşümü yardımıyla bir kuleye ait X ve Y koordinat değerlerinin detay bileşenleri kullanılarak diğer kuleye ait X ve Y değerleri kestirilmeye çalışılmıştır.

Dalgacık dönüşümüyle modelleme üzerine bir çalışma K. Murat (2004) tarafından Akım Serilerinin Modellenmesi üzerine yapılmıştır. Çalışmasında bir nehir üzerindeki herhangi bir istasyonda toplanan akım verileri modellenerek bir başka nehirdeki akım serisi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Akım tahminleri için ayrık dalgacık dönüşümü sonucu elde edilen detay bileşenleri kullanılmıştır. Her istasyona ait ölçüm serisi için elde edilen bileşenler aynı ölçek seviyesinde birbirleri arasında regresyon tipi bir model kullanılarak modellenmiştir.

Bu tez çalışmasında da köprü kule hareketlerini modellemek için 2 farklı yöntem seçilmiştir.

Bu yöntemlerden bir tanesi yukarıda bahsi geçen akım serilerinin modellenmesine benzer şekildedir. Bunun için Boğaziçi Köprüsü Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerinde toplanan X ve Y koordinatlarına ait bir haftalık veriler ayırık dalgacık dönüşümü ile bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Ayrıştırma işleminden sonra elde edilen detay bileşenlerinin her birinden birer tane model oluşturulmuştur. Modellerde girdi olarak Beylerbeyi ve Ortaköy kulelerinin X veya Y koordinat değerlerinin toplam 4320 verisinden 3320 tanesi kullanılarak ayırık dalgacık dönüşümü ile elde edilmiş detay bileşenleri kullanılmıştır. Model oluşturulup dış yüklerle kule koordinatları arasındaki ilişki belirlendikten sonra model oluşturmada kullanılmayan bileşenler kullanılarak modeller test edilmiştir. Oluşturulan modeller aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir (Küçük,2004).

$$Y_t(AD_m) \approx A.X_t(AD_m) + B \quad (5.1)$$

Eşitlikte $Y_t(AD_m)$, $X_t(AD_m)$ girdi ve çıktı değerlerinin m. seviyeden ayırık dalgacık dönüşümü bileşenlerini ifade eder. A ve B ise model parametreleridir.

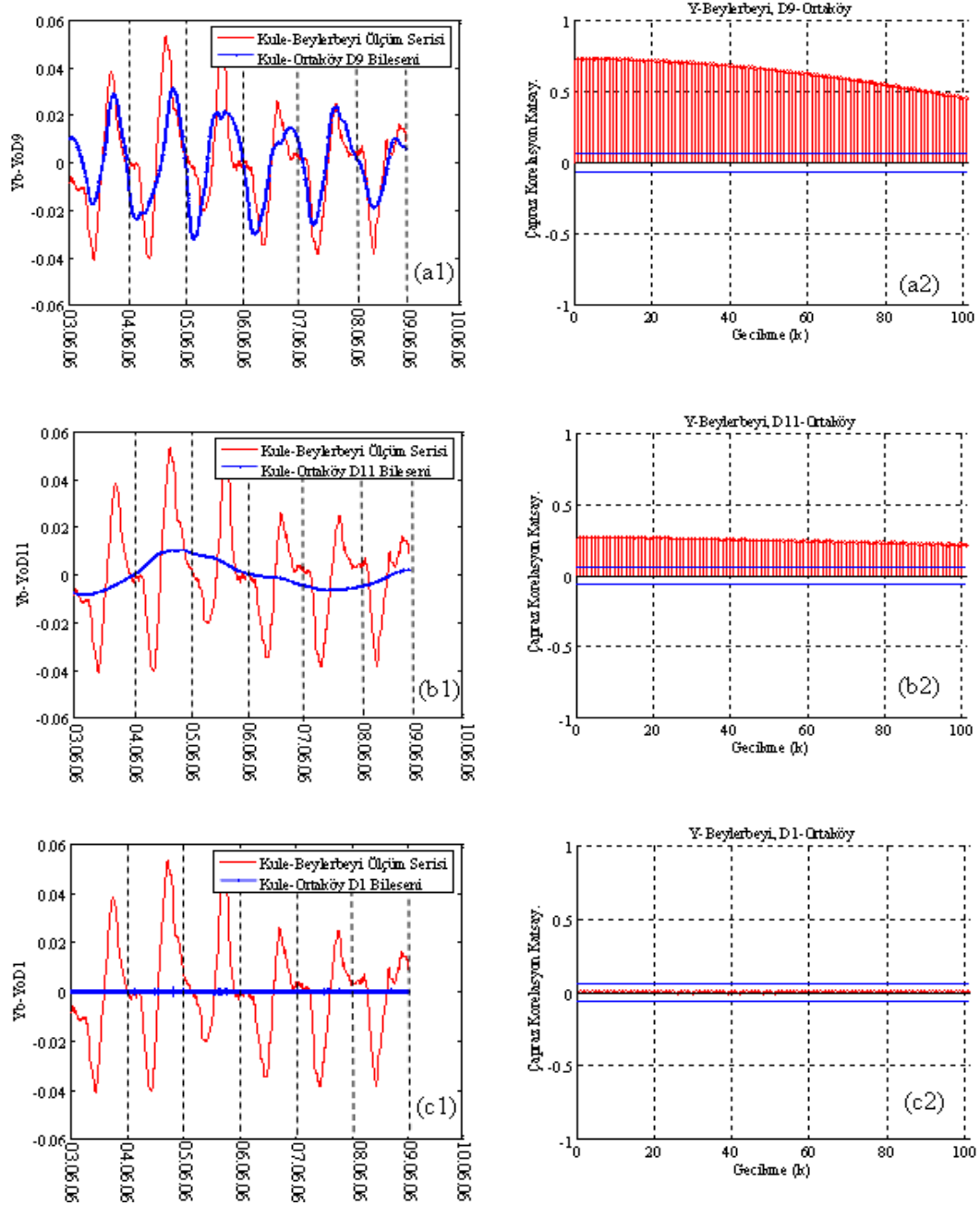
Modelleme işlemine başlamadan önce modellemelere temel oluşturacak kule hareketleri (Y, X ve H) ile dış yükler ve bunların dalgacık dönüşümünden elde edilecek detay bileşenleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

5.5.1 Köprü Kule Hareketlerinin Birbirleri ve Dalgacık Dönüşümünden Elde Edilen Bileşenleri Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi

Şekil 5.53 Beylerbeyi kulesi Y değerleri ile Ortaköy kulesinin detay bileşenleri arasındaki ilişkiyi ve korelasyon katsayılarını göstermektedir. Şekil 5.54 ise Ortaköy kulesi Y değerleri ile Beylerbeyi kulesinin detay bileşenleri arasındaki ilişkiyi ve korelasyon katsayılarını göstermektedir. Şekilde her bir detay bileşeninin gösterilmesi yerine en düşük, orta ve en yüksek korelasyona sahip 1, 11 ve 9. bileşenlere ait grafikler verilmiştir.

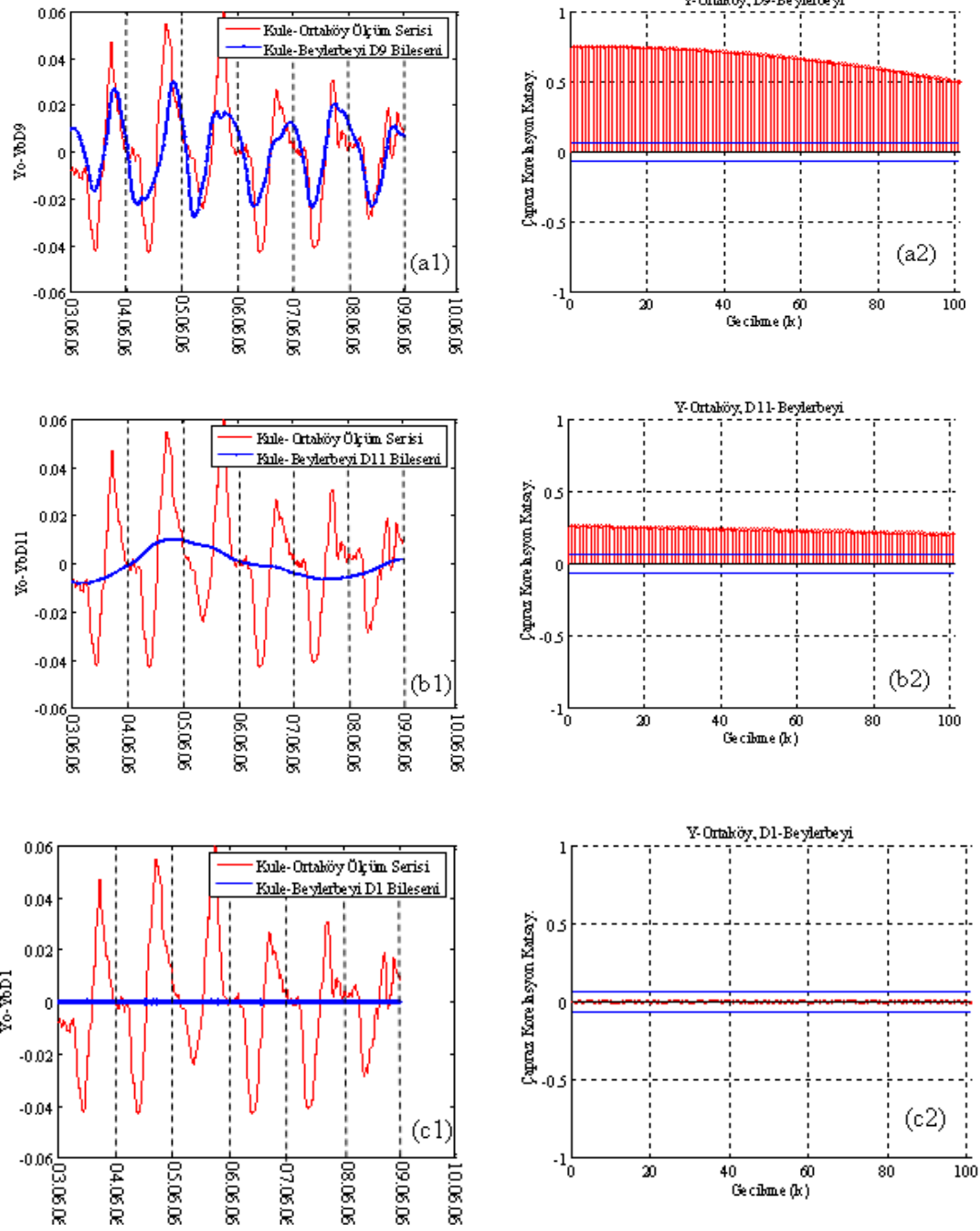
Çizelge 5.9 Beylerbeyi-Y değeri ile Ortaköy Y - detay bileşenleri ve Ortaköy-Y değeri ile Beylerbeyi - Y detay bileşenleri arasındaki korelasyon katsayıları

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
Y-Beylerbeyi değeri ile Y-Ortaköy bileşenleri arasında	0.0001	0.001	0.003	0.003	0.011	0.039	0.163	0.561	0.730	0.158	0.269	0.018
Y-Ortaköy değeri ile Y-B.Beyi bileşenleri arasında	0.0001	0.001	0.003	0.004	0.015	0.055	0.166	0.549	0.745	0.119	0.257	0.010



Şekil 5.53 Beylerbeyi-Y değeri ile Ortaköy Y - detay bileşenleri arasında en yüksek, orta ve en düşük korelasyona sahip olanlar

Çizelge 5.9 incelendiğinde en yüksek korelasyona sahip detay bileşeninin 9. bileşen olduğu görülebilir. Bunu sırasıyla 8, 11, 7 ve 10. bileşenler takip etmektedir. Enerji seviyeleri incelendiğinde de bu seriler içinde baskın bileşenin 9. detay bileşeni olduğu görülmektedir.



Şekil 5.54 Ortaköy-Y değeri ile Beylerbeyi Y - detay bileşenleri arasında en yüksek, orta ve en düşük korelasyona sahip olanlar

5.5.2 Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak Köprüye Etkiyen Büyüklüklerle Köprü Hareketlerinin Modellenmesi

Köprü kulelerinde altı gün boyunca 1 sn örnekleme aralığıyla kayıt alınarak her bir X, Y ve H değeri için 518400 adet veri toplanmıştır. Ayrıca köprüye etkiyen dış yüklerden trafik yükü için araç sayısı 1 saatlik örnekleme aralığı ile toplanmış ve 144 veri elde edilmiştir. Sıcaklık ve rüzgar hızları için örnekleme aralığı 5 dakika olup her iki yük için de 1728’ er veri elde edilmiştir. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi hem kule hareketlerini temsil eden X, Y ve H değerleri, hem de dış yükler olarak adlandırılan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızları için örnekleme aralığı yeniden düzenlenerek her bileşene için 2dk kayıt aralıklı 4320 veri elde edilmiştir.

Bölüm 5.5’ de belirtildiği gibi modelleme işlemi için iki farklı yöntem seçilmiştir. İlk kısımda modeller yardımıyla ileriye yönelik tahminler yapılmaya çalışılmıştır. Her bir koordinat ve yük bileşeni için 2 dk örnekleme aralığı ile oluşturulan 4320 verinin 3320 tanesi modellerin oluşturulmasında, 1000 tanesi de hem modellerin test edilmesi hem de modellerden tahmin yapılmasında kullanılmıştır.

Modellemenin ikinci kısmında yukarıda açıklanan 2 dk kayıt aralıklı veriler oluşturulurken kullanılmayan veriler kullanılarak köprüye etkiyen büyüklükler yardımıyla köprü kule hareketleri modellenmeye çalışılmıştır.

Modellemeler için ayrık dalgacık dönüşümünden elde edilen detay bileşenleri kullanılmıştır. Ayırıştırma seviyesi için Nyquistic kriteri dikkate alınmıştır. Ölçü sayısı 3320 ve bunun yarısı 1660 tır. Nyquistic frekansına göre bu değer altıda kalmayacak şekilde en uygun 2’ nin üst değeri 11 dir ($2^{11} = 2048$). Buradan ayırıştırma seviyesi 11 olarak belirlenmiş ve tüm veriler ayrık dalgacık dönüşümü ile 11. seviyeye kadar ayırıştırılmıştır. Verilerin ayrık dalgacık dönüşümü ile detay ve yaklaşıklık bileşenlerine ayrılmasında kullanılan Matlab komutları Ek 1’ de verilmiştir.

Ayırıştırma işleminden sonra detay bileşenleri arasında 11 matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel model eşitlik (5.3)’ de verilmiştir.

$$Y_{Di} = a + b \cdot (ARC)_{Di} + c \cdot (SCK)_{Di} + d \cdot (RZG)_{Di} \quad (5.3)$$

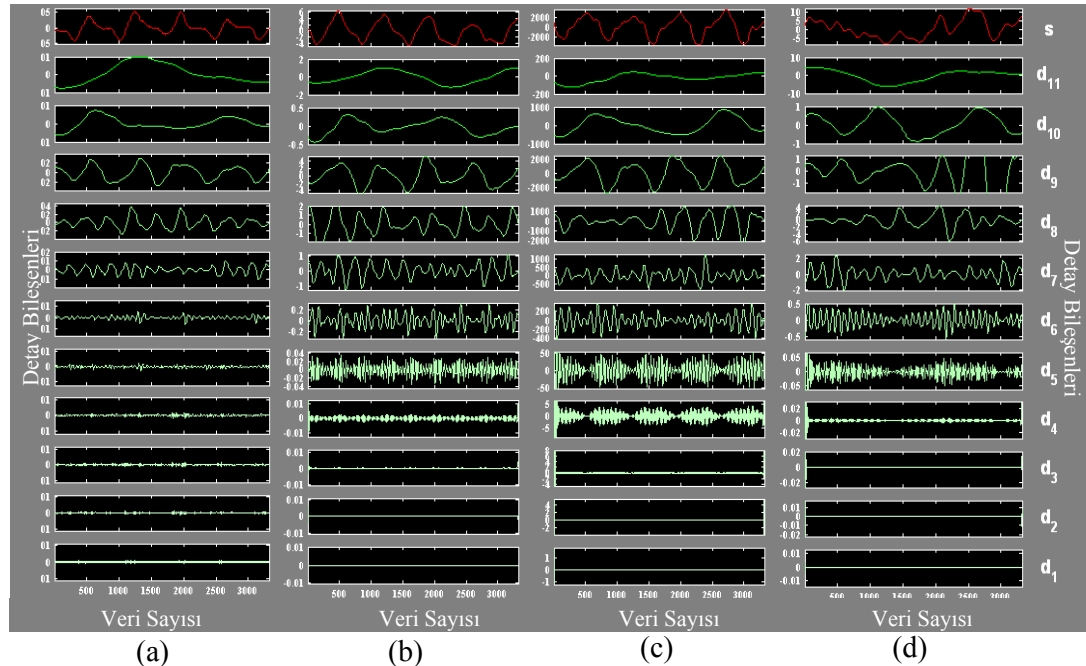
Eşitlikte a, b, c ve d modele ait katsayılarıdır. $(ARC)_{Di}$, $(SCK)_{Di}$ ve $(RZG)_{Di}$ değerleri ise kuleye etkiyen dış yükler olan sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı verilerinin dalgacık ayırıştırması ile elde i. ($i=0, \dots, 11$) detay bileşenlerini göstermektedir. Burada dış yüklerin

oluşturduğu etki büyüklüğüne karşılık kule salınımlarındaki değişim olarak tanımlanan tepki büyüklükleri arasında çoklu regresyon modeli kurulmuştur. Çoklu regresyon modeline ait model katsayılarının çözümü için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

5.5.2.1 İleriye Yönelik Tahminler İçin Köprü Kuleleri Yanal (Y) Hareketlerinin Dalgacık Analizi İle Modellenmesi

• Beylerbeyi Kule –Y Hareketlerinin Modellenmesi

Beylerbeyi kuleye ait Y değerlerini modelleyebilmek için girdi büyüklüğü olarak kullanılan ve 3320 veriden oluşan Y_B , sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı bileşenleri ayrı dalgacık dönüşümü ile db4 dalgacık modeli kullanılarak 11. seviyeye kadar ayrıştırılmıştır. Şekil 5.55 ayrı dalgacık dönüşümü ile 11. seviyeye kadar ayrıştırılan verilere ait detay bileşenlerini göstermektedir. Şekildeki her bir sütun sırasıyla Beylerbeyi kuleye ait “Y” değeri, sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı Y bileşenine ait verileri ifade eder. Şekilde en üst satırda görülen grafik orijinal sinyali yani verinin kendisini, diğer satırlar ise sırasıyla 11. bileşenden 1. bileşene kadar dalgacık analizi ile elde edilen detay bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 5.55 Beylerbeyi kule Y hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı Y (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri

Ayrıştırma sonucu elde edilen bu detay bileşenleri yardımıyla her bir bileşen için (5.3) eşitliği aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

$$D1girdiYb=a + b*D1girdiARC + c*D1girdiSCK + d*D1girdiRZGy$$

$$D2girdiYb=a + b*D2girdiARC + c*D2girdiSCK + d*D2girdiRZGy$$

.....

.....

$$D11girdiYb=a + b*D11girdiARC + c*D11girdiSCK + d*D11girdiRZGy$$

Verilerle daha rahat çalışabilmek için tüm verilerin ortalamadan farkları alınarak küçültülmüş değerler kullanılmıştır.

Eşitliklerdeki katsayılar En Küçük Kareler yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ve katsayıların standart sapmaları kullanılarak test büyüklükleri belirlenmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır.

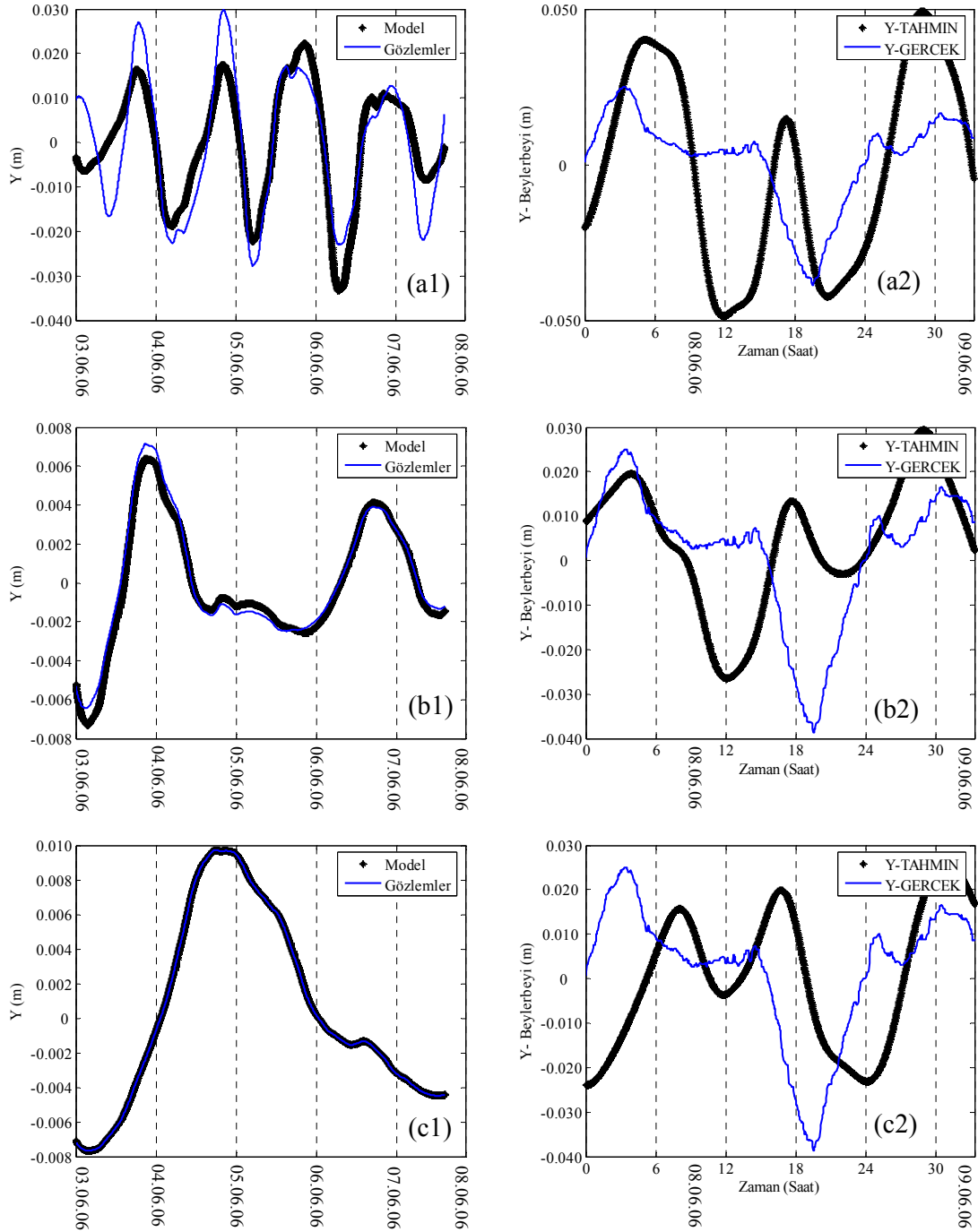
Oluşturulan modellerden elde edilen katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı-Y bileşenlerine ait veriler eşitlik (5.3)' de yerine koyularak Beylerbeyi kulenin tahminle belirlenen Y değerleri elde edilmiştir. Tahminle elde edilen yani modelden hesaplanan bu değerlerle yine test amaçlı ayrılan 1000 verilik gerçek Y değerleri arasında karesel ortalama hata hesabı (RMS) da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.10' da gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 Beylerbeyi kule Y hareketinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

YB HAREKETLERİNİN İLERİYE YÖNELİK TAHMİNLERİ İÇİN 11 MODEL					
Model	RMS (m)	R ²	Katsayı Test Büyüklükleri		
			b için	c için	d için
1	2.1574	1.33*10 ⁻⁵	-0.21 < 1.960	0.18 < 1.960	-0.17 < 1.960
2	0.0008	7.81*10 ⁻⁷	-0.01 < 1.960	0.016 < 1.960	0.01 < 1.960
3	0.1158	0.0044	3.72 > 1.960	-3.52 > 1.960	3.19 > 1.960
4	0.0012	0.0071	0.09 < 1.960	2.61 > 1.960	-1.03 < 1.960
5	0.0004	0.0293	-0.81 < 1.960	-5.18 > 1.960	7.49 > 1.960
6	0.0003	0.0430	-2.00 > 1.960	11.75 > 1.960	-3.37 > 1.960
7	0.0004	0.1669	2.03 > 1.960	5.24 > 1.960	25.10 > 1.960
8	0.0132	0.0798	-4.49 > 1.960	13.69 > 1.960	-7.24 > 1.960
9	0.0008	0.7631	85.52 > 1.960	-51.91 > 1.960	-39.18 > 1.960
10	0.0003	0.9822	319.75 > 1.960	49.07 > 1.960	-59.22 > 1.960
11	0.0004	0.9998	1064.0 > 1.960	-10574 > 1.960	-32083 > 1.960

Çizelge 5.10 incelendiğinde tablonun koyu renkli kısımları anlamlı katsayı değerlerini göstermektedir. Buna göre 1. ve 2. modeller yani 1. ve 2. detay bileşenleri tarafından oluşturulan modellere ait her üç katsayıda anlamsız çıkmıştır. Ayrıca bu bileşenler için R² belirlilik katsayıları da oldukça küçüktür. 3. model katsayıları anlamlı çıkmasına karşın hem modelin R² değeri çok küçük hem de modelle test verisi arasında hesaplanan karesel ortalama hata değeri yüksek olduğu için bu model de kabul görmemiştir.

Doğru tahminler için hem katsayıları anlamlı, hem R² değeri büyük hem de tahmin edilen değerle gerçek değerler arasında hesaplanan karesel ortalama hatası en küçük olan modeller kullanılmalıdır. Buna göre 9, 10 ve 11. modeller tahminler için kullanılabilir. Dış yüklere bağlı olarak oluşturulan Beylerbeyi Y koordinatları modeli ile gözlemlerden elde edilen Beylerbeyi Y koordinatları arasındaki ilişki Şekil 5.56 de gösterilmiştir. Şekil 5.56 9, 10 ve 11. modellere ait bilgileri içermektedir. Diğer modellere ait grafikler Ek2’ de sunulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek ölçülerle olan ilişkisi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.56 Beylerbeyi kule Y hareketi için oluşturulan 9. (a1), 10.(b1) ve 11. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

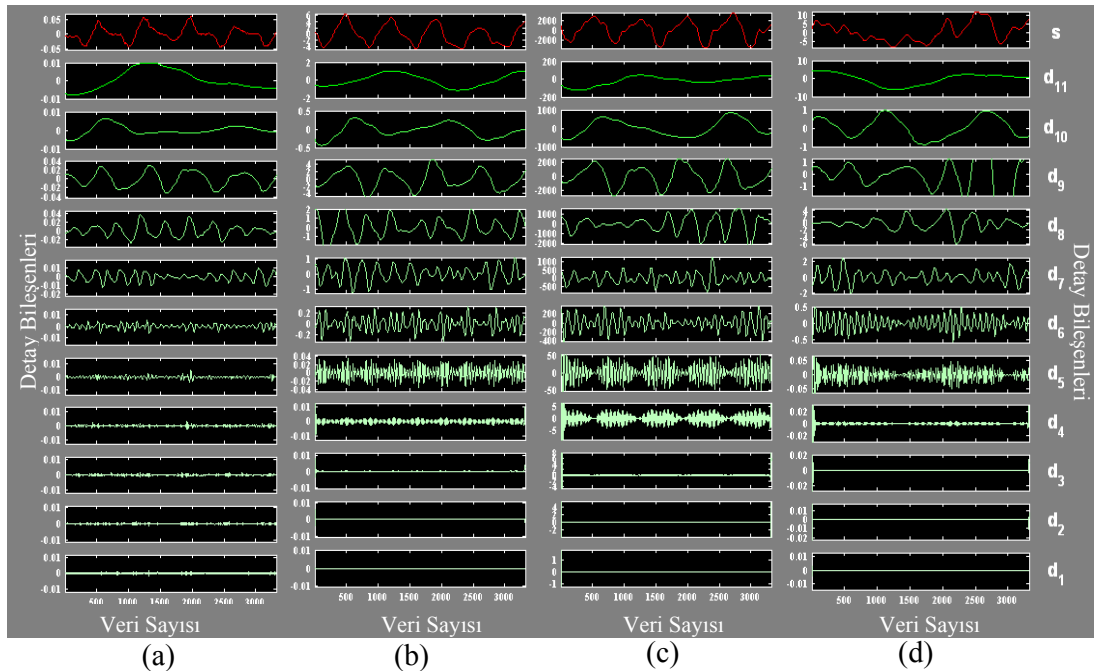
Çizelge 5.11 oluşturulan 11 modele ait model parametreleri ile bu parametrelere ait standart sapma değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.11 Detay bileşenlerinden elde edilen her bir model için hesaplanan model katsayıları ve standart sapmaları

Model	b katsayısı	Std.	c katsayısı	Std. Sapma	d katsayısı	Std. Sapma
1	-0.00044	0.0021	1.6841	9.4438	-0.0689	0.4116
2	-0.000002	0.0003	0.0114	0.7369	0.00009	0.0084
3	0.000087	0.0001	-0.222837	0.0634	0.020482	0.0064
4	0.000001	0.0001	0.017130	0.0066	-0.00174	0.0017
5	-0.000004	0.0001	-0.00417	0.0001	0.00318184	0.0004
6	-0.000003	0.0002	0.0024066	0.2050	-0.000423	0.1258
7	0.00000024	0.0001	0.0007747	0.0002	0.0023248	0.0001
8	-0.0000013	0.0003	0.0029666	0.2167	-0.000914	0.2167
9	0.0000187	0.0001	-0.006559	0.0001	-0.001914	0.0001
10	0.0000077	0.0001	0.003253	0.0007	-0.001554	0.0001
11	0.00001	0.0036	-0.003	0.3109	-0.002106	0.0657

• **Ortaköy Kule –Y Hareketlerinin Modellenmesi**

Ortaköy Kule Y hareketlerini modellemek için Y_0 , sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı bileşenleri ayrık dalgacık dönüşümü ile db4 dalgacık modeli kullanılarak 11. seviyeye kadar ayrıştırılmıştır (Şekil 5.57).



Şekil 5.57 Ortaköy kule Y hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar Y (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri

Ayrıştırma sonucu elde edilen detay bileşenleri ve (5.3) eşitliğinden elde edilen model katsayıları kullanılarak 11 model oluşturulmuştur.

Verilerle daha rahat çalışabilmek için tüm verilerin ortalamadan farkları alınarak küçültülmüş değerler kullanılmıştır.

Oluşturulan modellere ait model katsayılarının belirlenmesi için En Küçük Kareler yönteminden yararlanılmıştır. Elde edilen bu katsayılar $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır.

Oluşturulan 11 model kullanılarak hesaplanan katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı Y bileşenlerine ait veriler eşitlik (5.3)' de yerine koyularak Ortaköy kulenin tahminle belirlenen Y değerleri elde edilmiştir. Tahminle elde edilen bu değerlerle test amaçlı ayrılmış gerçek Y değerleri karşılaştırılarak karesel ortalama hata hesabı (RMS) da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.12' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 Ortaköy kule Y hareketinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik değeri ve karesel ortalama hatalar.

YO HAREKETLERİNİN İLERİYE YÖNELİK TAHMİNLERİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı test büyüklükleri		
Model	RMS (m)	R^2	b için	c için	d için
1	0.238	$1.98 \cdot 10^{-7}$	$0,021 < 1.960$	$ -0,03 < 1.960$	$0,01 < 1.960$
2	3.491	$6.54 \cdot 10^{-4}$	$1.334 < 1.960$	$ -1.29 < 1.960$	$1.46 < 1.960$
3	0.035	$8.11 \cdot 10^{-4}$	$ -1.067 < 1.960$	$1.50 < 1.960$	$ -0.33 < 1.960$
4	0.003	0.0044	$0.304 < 1.960$	$3.08 > 1.960$	$0.32 < 1.960$
5	0.0005	0.0160	$ -1.128 < 1.960$	$ -0.45 < 1.960$	$6.26 > 1.960$
6	0.0003	0.0367	$ -10.653 > 1.960$	$5.05 > 1.960$	$ -1.21 < 1.960$
7	0.0005	0.2951	$ -2.706 > 1.960$	$3.03 > 1.960$	$35.65 > 1.960$
8	0.0003	0.0763	$ -5.146 > 1.960$	$12.29 > 1.960$	$ -8.32 > 1.960$
9	0.0012	0.8059	$96.15 > 1.960$	$ -57.90 > 1.960$	$ -42.27 > 1.960$
10	0.0003	0.9798	$313.92 > 1.960$	$60.59 > 1.960$	$ -91.78 > 1.960$
11	0.0004	0.9998	$1194.15 > 1.960$	$ -8332.86 > 1.960$	$27181.09 > 1.960$

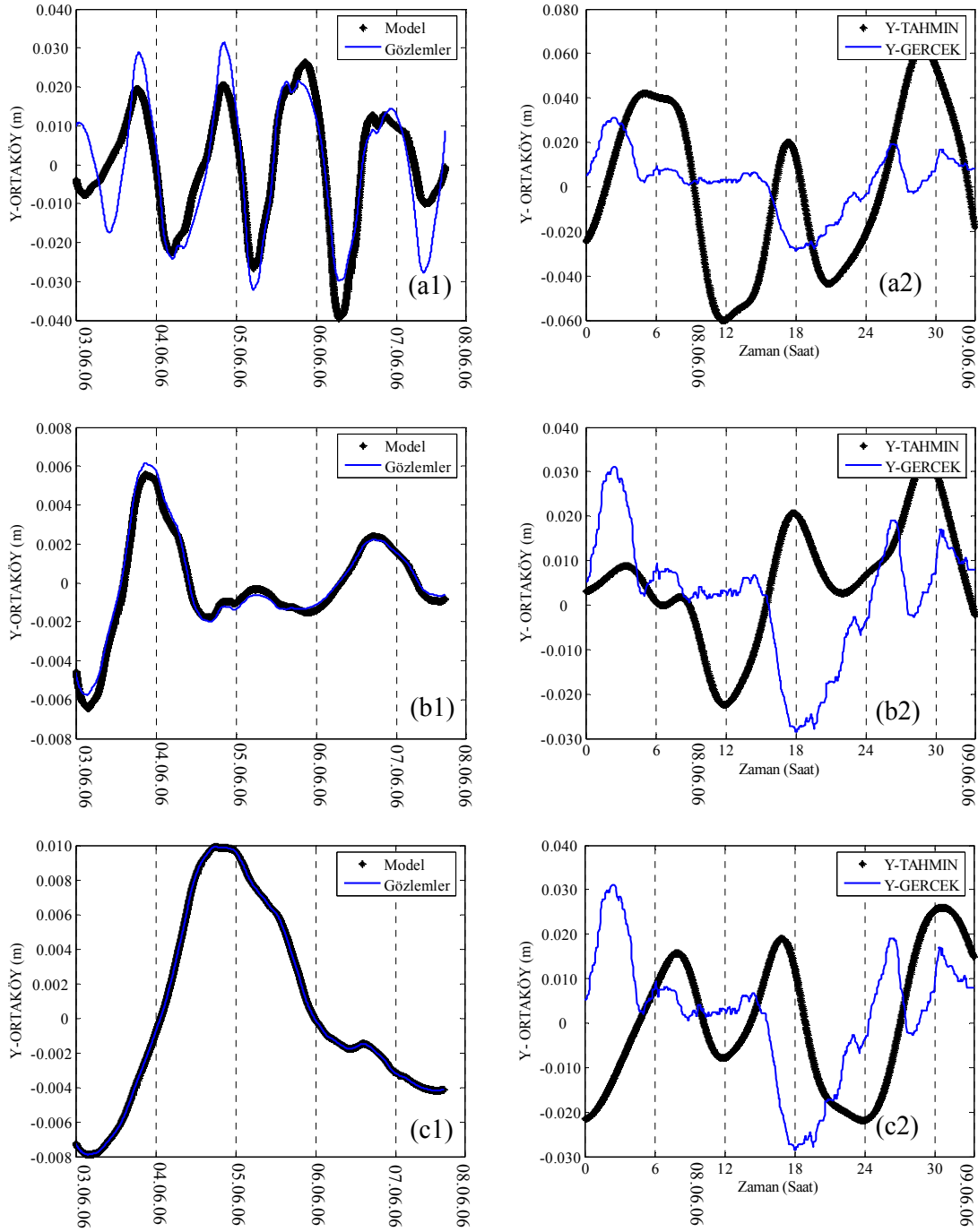
Çizelge 5.12’ de koyu renkli alanlar anlamlı katsayı değerlerini göstermektedir. Buna göre 1., 2. ve 3. modellere ait her üç katsayıda anlamsız çıkmıştır. Ayrıca bu bileşenler için R^2 belirlilik katsayıları da oldukça küçüktür. 4. ve 5. modellerde sadece birer katsayı 6. modelde iki katsayı anlamlı çıkmasına karşılık bu değerler için belirlilik katsayıları oldukça küçük olduğu için tahminlerde bu modellerin de kullanılmaması düşünülmüştür. Ayrıca 8. model içinde belirlilik katsayısı düşük olduğu için bu model de tahminlerde kullanılmamıştır.

Buna göre 9, 10 ve 11. modeller tahminler için kullanılabilir. Dış yüklere bağlı olarak oluşturulan Ortaköy Y koordinatları ile gözlemlerden elde edilen Ortaköy Y koordinatları arasındaki ilişki Şekil 5.58’ de gösterilmiştir. Şekil 5.58 9, 10 ve 11. modele ait bilgileri içermektedir. Diğer modellere ait grafikler Ek-3’ de sunulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek ölçülerle olan ilişkisi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.13 oluşturulan 11 modele ait model parametreleri ile bu parametrelere ait standart sapma değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.13 Ortaköy kule Y hareketine ait her bir model için hesaplanan model katsayıları ve standart sapmaları

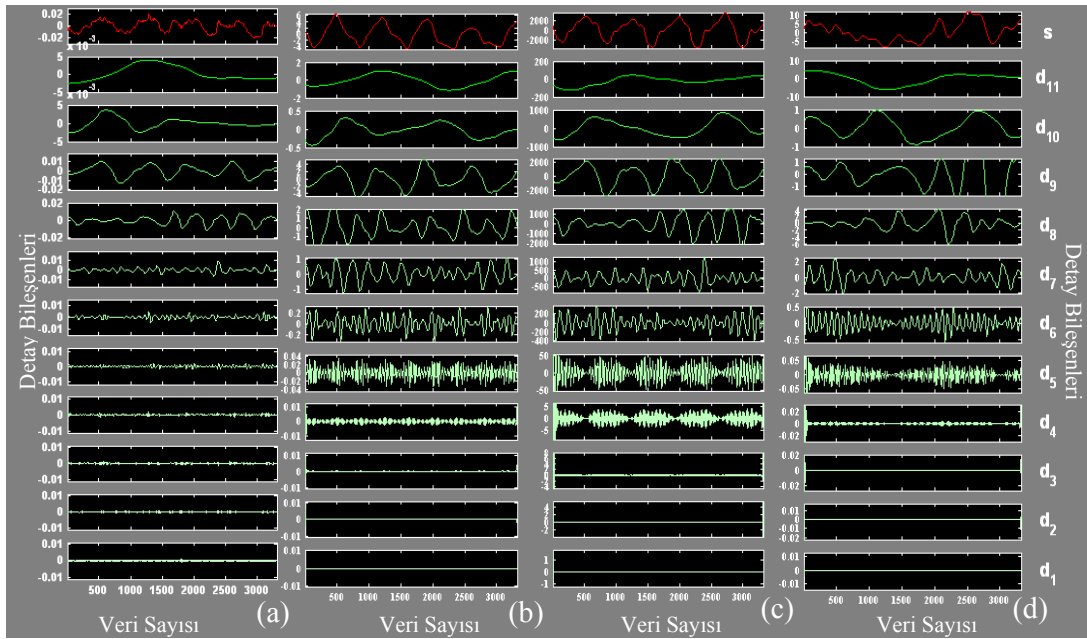
Model	b katsayısı	Std. Sapma(m)	c katsayısı	Std. Sapma(m)	d katsayısı	Std. Sapma(m)
1	$5.25 \cdot 10^{-5}$	0.0025	-0.2750	10.9149	0.0025	0.4757
2	$2.2192 \cdot 10^{-4}$	0.0002	-1.0657	0.8249	0.0137	0.0094
3	$-2.8758 \cdot 10^{-4}$	0.0001	0.1090	0.0729	-0.0024	0.0074
4	$1.35 \cdot 10^{-6}$	0.0001	0.0254	0.0083	$6.77 \cdot 10^{-4}$	0.0021
5	$-8.04 \cdot 10^{-7}$	0.0001	$-5.13 \cdot 10^{-4}$	0.0011	0.0038	0.0006
6	$-2.33 \cdot 10^{-6}$	0.0001	0.0014	0.0027	$-2.0 \cdot 10^{-4}$	0.0017
7	$-6.4 \cdot 10^{-7}$	0.0001	$4.49 \cdot 10^{-4}$	0.0015	0.0033	0.0009
8	$-1.56 \cdot 10^{-6}$	0.0001	0.0028	0.0023	-0.0011	0.0013
9	$2.2 \cdot 10^{-5}$	0.0001	-0.0076	0.0013	-0.0022	0.0005
10	$6.02 \cdot 10^{-6}$	0.0001	0.0032	0.0005	-0.0020	0.0002
11	$4.98 \cdot 10^{-6}$	0.0001	-0.0030	0.0001	-0.0021	0.0001



Şekil 5.58 Ortaköy kule Y hareketi için oluşturulan 9. (a1), 10.(b1) ve 11. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

- **Beylerbeyi Kule –X Hareketlerinin Modellenmesi**

Beylerbeyi kuleye ait X hareketlerini modelleyebilmek için de Y hareketlerinin modellenmesindeki işlem adımları aynen tekrarlanmıştır. Girdi büyüklüğü olarak X_B , sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı-X değerlerinin db4 dalgacık dönüşümünden elde edilen 11 detay bileşeni kullanılmıştır. Şekil 5.59 ayrıık dalgacık dönüşümü ile 11. seviyeye kadar ayrıştırılan verilere ait detay bileşenlerini göstermektedir. Şekildeki sütunlar sırasıyla Beylerbeyi kuleye ait “X” değeri, sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı- X bileşenine ait verileri ifade eder. Şekilde en üst satırda görülen grafik verinin kendisini, diğer satırlar ise sırasıyla 11. bileşenden 1. bileşene kadar detay bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 5.59 Beylerbeyi kule X hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı-X (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri

(5.3) eşitliği kullanılarak her bir detay bileşeni için oluşturulan eşitliklerdeki katsayılar En Küçük Kareler yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ve katsayıların standart sapmaları kullanılarak test büyüklükleri belirlenmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır.

Oluşturulan modellerden elde edilen katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan

sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı-X bileşenlerine ait veriler eşitlik (5.3)' de yerine koyularak Beylerbeyi kulenin tahminle belirlenen X değerleri elde edilmiştir. Tahminle elde edilen yani modelden hesaplanan bu değerlerle yine test amaçlı ayrılan 1000 verilik gerçek X değerleri arasında karesel ortalama hata hesabı (RMS) da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.14' de gösterilmiştir.

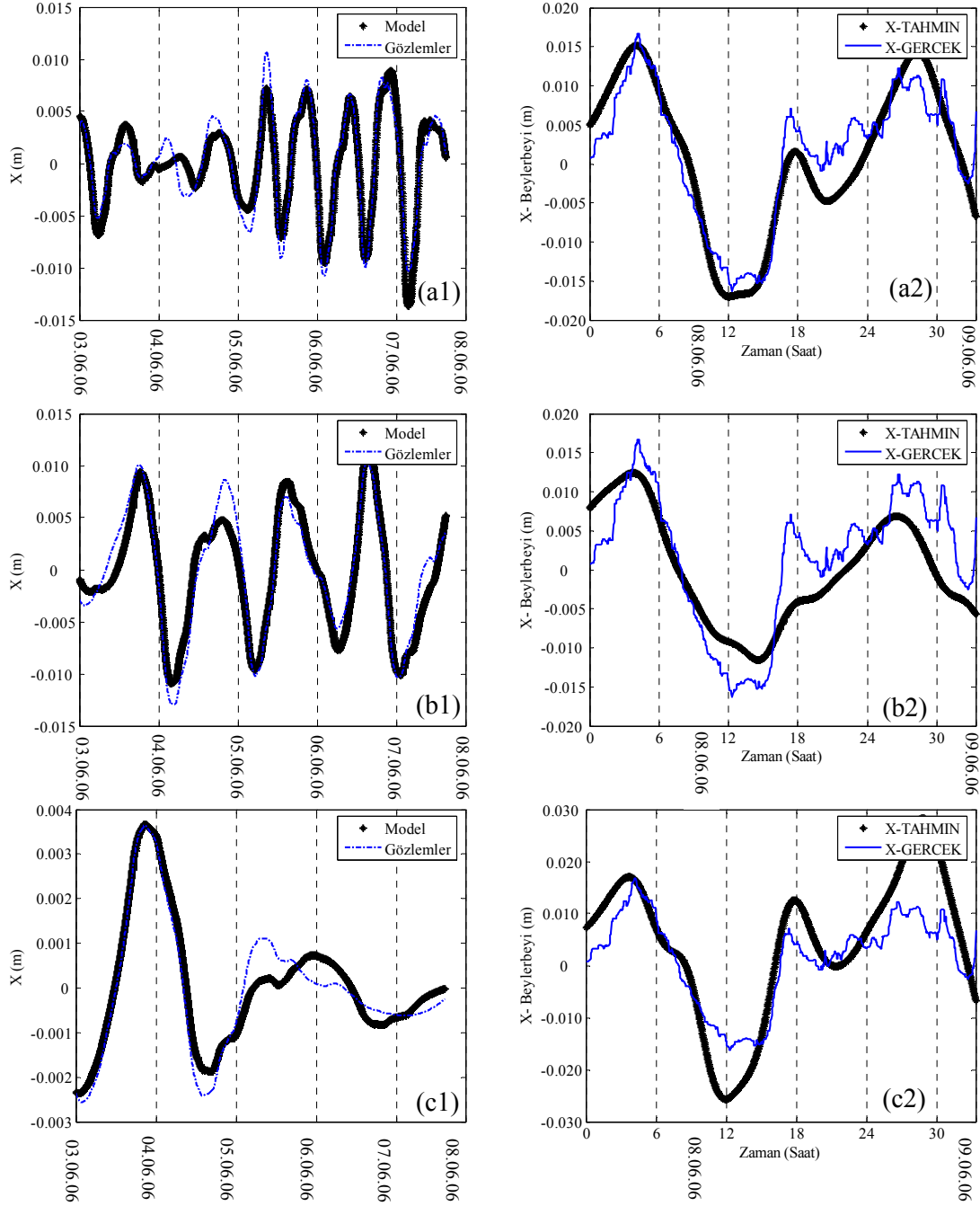
Çizelge 5.14 Beylerbeyi kule -X hareketlerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

XB HAREKETLERİNİN İLERİYE YÖNELİK TAHMİNLERİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Mdl	RMS (m.)	R ²	b için	c için	d için
1	223.722	0.0061	$ -1.242 < 1.960$	$1.111 < 1.960$	$ -0.405 < 1.960$
2	6.135	0.0087	$2.074 > 1.960$	$ -2.236 > 1.960$	$2.594 > 1.960$
3	0.0021	0.0129	$ -1.720 < 1.960$	$0.090 < 1.960$	$0.880 < 1.960$
4	0.0015	0.0120	$ -3.340 > 1.960$	$ -2.707 > 1.960$	$0.664 < 1.960$
5	0.0001	0.0074	$3.780 > 1.960$	$2.180 > 1.960$	$1.648 < 1.960$
6	0.0001	0.1538	$12.015 > 1.960$	$7.479 > 1.960$	$18.390 > 1.960$
7	0.0001	0.4025	$46.765 > 1.960$	$ -16.807 > 1.960$	$12.911 > 1.960$
8	0.0001	0.9130	$158.016 > 1.960$	$13.289 > 1.960$	$ -13.776 > 1.960$
9	0.0001	0.9060	$43.238 > 1.960$	$17.144 > 1.960$	$38.595 > 1.960$
10	0.0001	0.9242	$84.892 > 1.960$	$49.808 > 1.960$	$ -99.288 > 1.960$
11	0.0001	0.9998	$5720.39 > 1.960$	$ -2054.49 > 1.960$	$ -6447.39 > 1.960$

Çizelge 5.14 incelendiğinde tablonun koyu renkli kısımları anlamlı katsayı değerlerini göstermektedir. Buna göre 1. ve 3. modeller yani 1. ve 3. detay bileşenleri tarafından oluşturulan modellere ait her üç katsayıda anlamsız çıkmıştır. Ayrıca bu bileşenler için R² belirlilik katsayıları da oldukça küçüktür. 2. model katsayıları anlamlı çıkmasına karşın hem R² değeri çok küçük hem de modelle test verisi arasında hesaplanan karesel ortalama hata değeri yüksek olduğu için bu model de kabul görmemiştir.

Doğru tahminler için hem katsayıları anlamlı, hem R² değeri büyük hem de tahmin edilen değerle gerçek değerler arasında hesaplanan karesel ortalama hatası en küçük olan modeller kullanılmalıdır. Buna göre 8, 9, 10 ve 11. modeller tahminler için kullanılabilir. Dış yüklere

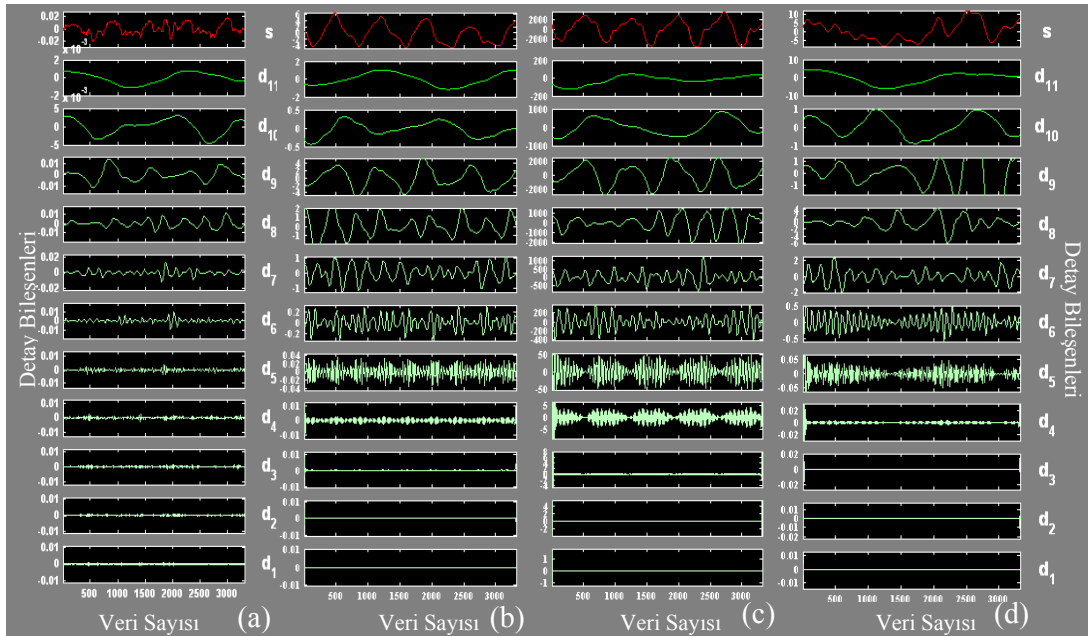
bağlı olarak oluşturulan Beylerbeyi X değerleri modeli ile gözlemlerden elde edilen Beylerbeyi X değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.60' da gösterilmiştir. Şekil 5.60 8, 9 ve 10. modellere ait bilgileri içermektedir. Diğer modellere ait grafikler Ek-4' de sunulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek ölçülerle olan ilişkisi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.60 Beylerbeyi kule X hareketi için oluşturulan 8 (a1), 9 (b1) ve 10. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

• Ortaköy Kule –X Hareketlerinin Modellenmesi

Ortaköy kule X hareketlerini modelleyebilmek için de yine bir önceki kısımda açıklanan Ortaköy kule Y hareketinin modellenmesindeki işlem adımları tekrarlanmıştır. Girdi büyüklüğü olarak X_0 , sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı-X değerlerinin db4 dalgacık dönüşümünden elde edilen 11 detay bileşeni kullanılmıştır. Şekil 5.61 ayrıık dalgacık dönüşümü ile 11. seviyeye kadar ayrıştırılan verilere ait detay bileşenlerini göstermektedir. Şekildeki her bir sütun sırasıyla Ortaköy kule “X” değeri, sıcaklık, araç sayısı ve rüzgar hızı-X bileşenine ait verileri ifade eder. En üst satırda görülen grafikler orijinal sinyali yani verinin kendisini, diğer satırlar ise sırasıyla 11. bileşenden 1. bileşene kadar dalgacık analizi ile elde edilen detay bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 5.61 Ortaköy kule X hareketi (a), sıcaklık (b), araç sayısı (c) ve rüzgar hızı-X (d) bileşenin db4 - 11. seviye ayrıştırılması ile elde edilen detay bileşenleri

Verilerle daha rahat çalışabilmek için tüm verilerin ortalamadan farkları alınarak küçültülmüş değerlerle çalışılmıştır.

(5.3) eşitliği kullanılarak her bir detay bileşeni için oluşturulan eşitliklerdeki katsayılar En Küçük Kareler yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ve katsayıların standart sapmaları kullanılarak test büyüklükleri belirlenmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki

toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır.

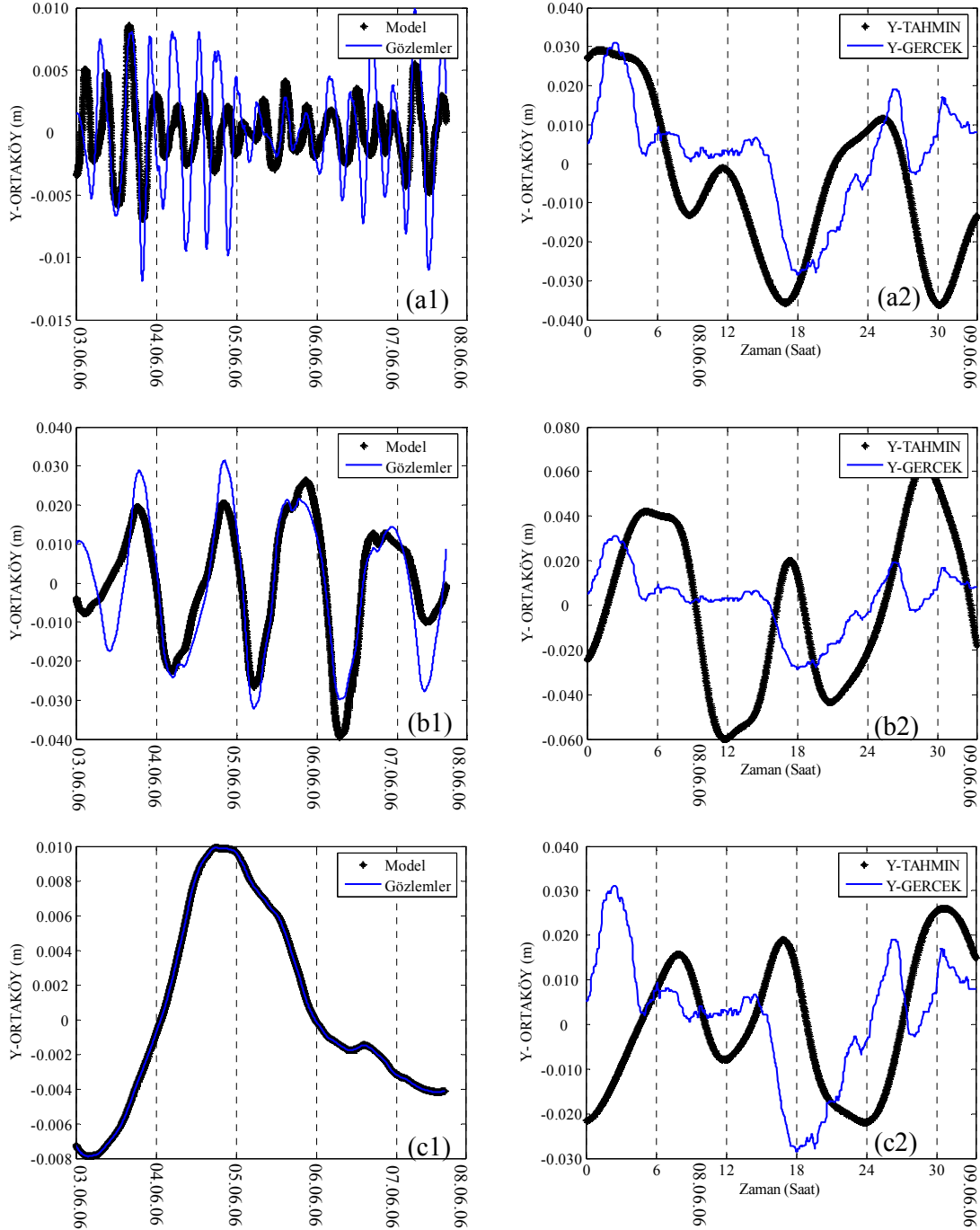
Oluşturulan modellerden elde edilen katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı-X bileşenlerine ait veriler eşitlik (5.3)' de yerine koyularak Ortaköy kulenin tahminle belirlenen X değerleri elde edilmiştir. Tahminle elde edilen yani modelden hesaplanan bu değerlerle yine test amaçlı ayrılan 1000 verilik gerçek X değerleri arasında karesel ortalama hata hesabı (RMS) da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.15' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.15 Ortaköy kule -X hareketlerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

XO HAREKETLERİNİN İLERİYE YÖNELİK TAHMİNLERİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Model	RMS (m.)	R^2	b için	c için	d için
1	74.438	0.0005	$0.534 < 1.960$	$ -0.525 < 1.960$	$0.435 < 1.960$
2	2.317	0.0024	$ -1.170 < 1.960$	$1.089 < 1.960$	$0.269 < 1.960$
3	0.0091	0.0029	$0.111 < 1.960$	$0.681 < 1.960$	$ -0.939 < 1.960$
4	0.0005	0.0037	$2.883 > 1.960$	$0.065 < 1.960$	$ -0.276 < 1.960$
5	0.0001	0.0232	$ -6.845 > 1.960$	$ -4.875 > 1.960$	$1.547 < 1.960$
6	0.0001	0.1743	$ -16.373 > 1.960$	$ -14.878 > 1.960$	$12.477 > 1.960$
7	0.0001	0.5023	$ -45.673 > 1.960$	$17.780 > 1.960$	$29.280 > 1.960$
8	0.0001	0.7797	$ -91.992 > 1.960$	$ -11.758 > 1.960$	$19.590 > 1.960$
9	0.0001	0.8640	$ -21.784 > 1.960$	$ -21.229 > 1.960$	$ -54.049 > 1.960$
10	0.0001	0.9701	$ -352.299 > 1.960$	$36.467 > 1.960$	$50.328 > 1.960$
11	0.0001	0.9999	$47.703 > 1.960$	$ -5076.85 > 1.960$	$4519.87 > 1.960$

Çizelge 5.15 incelendiğinde koyu renkli kısımlar anlamlı katsayı değerleridir. Buna göre 1,2 ve 3. modellere ait her üç katsayı da anlamsız çıkmıştır. Ayrıca bu bileşenler için R^2 belirlilik katsayıları da oldukça küçüktür. 4 ve 5. modellerde katsayıların tamamı anlamlı çıkmamıştır. 6. modelde de R^2 değeri çok yüksek olmadığı için 7. ve daha yukarı detay bileşenlerinden elde edilen modeller modelleme amaçlı kullanılabilirler. Dış yüklere bağlı olarak oluşturulan Ortaköy kule X değerleri modeli ile gözlemlerden elde edilen Ortaköy kule X değerleri

arasındaki ilişki Şekil 5.62’ de gösterilmiştir. Şekil 5.62; 7, 9 ve 11. modellere ait bilgileri içermektedir. Oluşturulan modeller kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek ölçülerle olan ilişkisi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.62 Ortaköy kule X hareketi için oluşturulan 7 (a1), 9 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

5.5.2.2 Kullanılmayan Verilerler Kullanılarak Kule Hareketlerinin Dalgacık Analizi İle Modellenmesi

Bir önceki kısımda ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen 11 adet detay bileşeni ile 11 model oluşturulmuştur. Bu modellemede ise 2 dk kayıt aralıklı verilerin oluşturulmasında kullanılmayan veriler kullanılarak bir önceki bir önceki modelde kullanılan 2 dk kayıt aralıklı verilerle karşılaştırılması yapılmıştır.

➤ Ortaköy Ve Beylerbeyi Kule –Y Değerinin Modellenmesi

Bölüm 5.5.2' de açıklandığı gibi köprü kulelerinde ölçü süresi boyunca 1 sn örnekleme aralığıyla toplanan X, Y ve H bileşenleri ve dış yükler için 120 sn de bir veri alınarak 2 dk kayıt aralıklı 4320 veri elde edilmiştir. Yani 1' den başlayarak her 120 veride bir veri alınarak 2 dk kayıt aralıklı veriler oluşturulmuştur. Model oluşturmada bu verilerden 3320 tanesi kullanılmıştır. Bu modelleme için ise bir önceki modellemede kullanılmayan veriler kullanılmıştır. Yani 1' den başlamak yerine 60. veriden başlayarak 120 veride bir veri alınarak 2 dk kayıt aralıklı yeni bir veri grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu 4320 verinin 3320 tanesi modellerin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Bu modelleme için de yine verilerin ayrık dalgacık dönüşümünden elde edilen detay bileşenleri kullanılmıştır. Ayırıştırma seviyesi için Nyquistic kriteri dikkate alınmış ve tüm veriler ayrık dalgacık dönüşümü ile 11. seviyeye kadar ayırıştırılmıştır.

Ayırıştırma işleminden sonra (5.3) eşitliği kullanılarak 11 detay bileşeni ile 11 tane matematiksel model oluşturulmuştur. Veriler oluşturulurken ortalamadan farkları alınarak küçük verilerle çalışılmıştır.

En küçük kareler yöntemi ile eşitliklerdeki katsayılar elde edilmiştir. Elde edilen bu katsayılar ve katsayıların standart sapmaları kullanılarak test büyüklükleri belirlenmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır.

Oluşturulan modellerden elde edilen katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı-Y bileşenlerine ait veriler (5.3) eşitliğinde yerine koyularak

Ortaköy ve Beylerbeyi kulenin tahminle belirlenen Y değerleri elde edilmiştir. Modelden hesaplanan bu değerlerle 3320 verilik gerçek Y değerleri arasında karesel ortalama hata hesabı (RMS) da yapılmıştır. Çizelge 5.16 Beylerbeyi kule Y değerleri ve Çizelge 5.17 ise Ortaköy kule Y değerleri için elde edilen sonuçları göstermektedir.

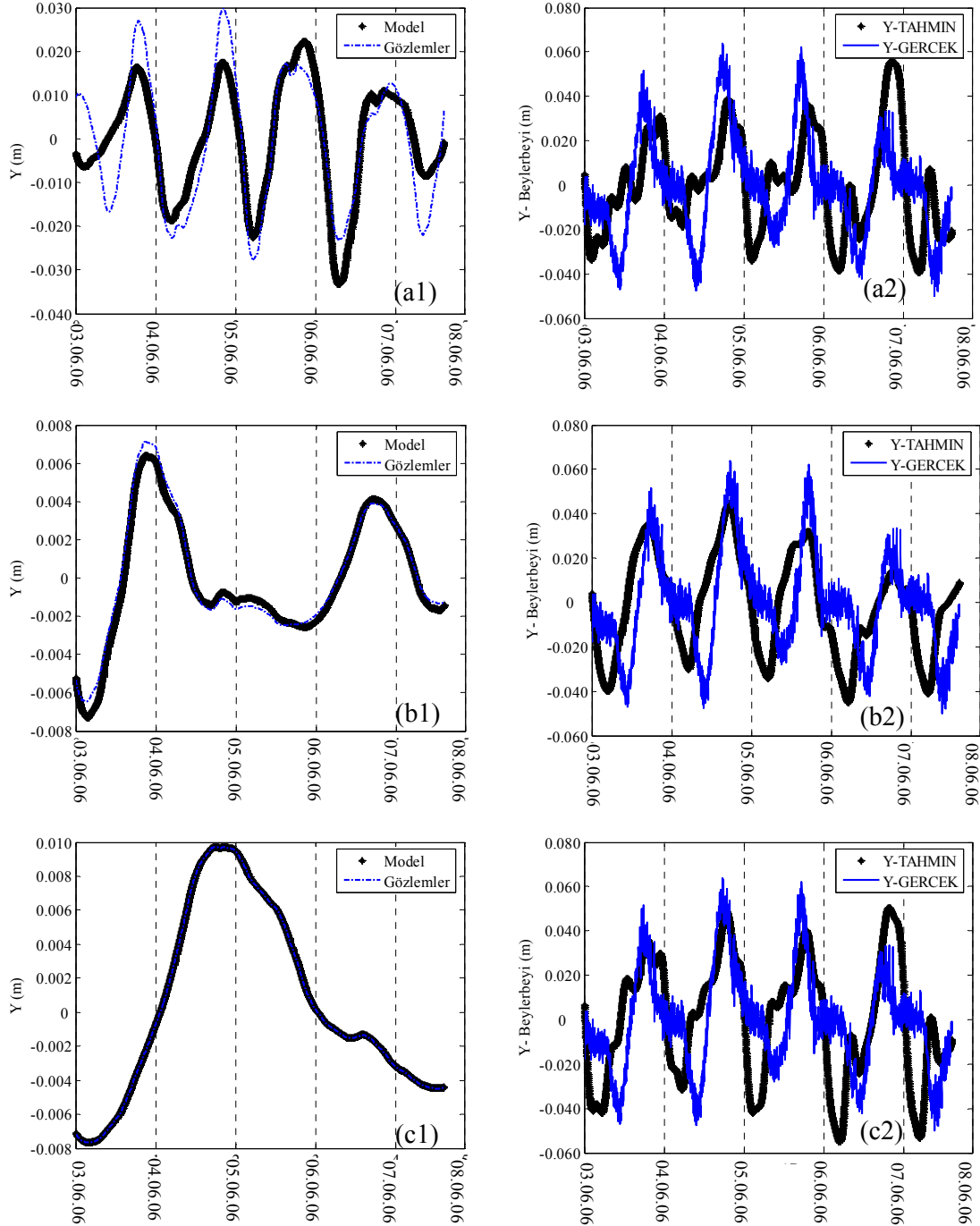
Çizelge 5.16 Beylerbeyi kule Y değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

YB HARETLERİNİN KULLANILMAYAN VERİLERLE TAHMİNİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Model	RMS (m.)	R ²	b için	c için	d için
1	66.187	1.33*10 ⁻⁵	-0.208 < 1.960	0.178 < 1.960	-0.168 < 1.960
2	0.0035	7.91*10 ⁻⁷	-0.013 < 1.960	0.016 < 1.960	0.011 < 1.960
3	1.1056	0.0044	3.72 > 1.960	-3.52 > 1.960	3.19 > 1.960
4	0.0079	0.0071	0.091 < 1.960	2.61 > 1.960	-1.03 < 1.960
5	0.0043	0.0293	-0.806 < 1.960	-5.184 > 1.960	7.487 > 1.960
6	0.0015	0.0430	-1.995 > 1.960	11.745 > 1.960	-3.364 > 1.960
7	0.0024	0.1667	1.027 < 1.960	5.241 > 1.960	25.097 > 1.960
8	0.0015	0.0797	-4.494 > 1.960	13.687 > 1.960	-7.242 > 1.960
9	0.0019	0.7631	85.516 > 1.960	-51.912 > 1.960	-39.182 > 1.960
10	0.0018	0.9822	319.753 > 1.960	49.068 > 1.960	-59.224 > 1.960
11	0.0018	0.9998	1063.818 > 1.960	-10574.3 > 1.960	-3208.3 > 1.960

Çizelge 5.16 incelendiğinde tablonun koyu renkli kısımları anlamlı katsayı değerlerini göstermektedir. Buna göre 1. ve 2. modellere ait her üç katsayıda anlamsız çıkmıştır. Ayrıca bu bileşenler için R² belirlilik katsayıları da oldukça küçüktür. 3. model katsayıları anlamlı çıkmasına karşın hem modelin R² değeri çok küçük hem de modelle test verisi arasında hesaplanan karesel ortalama hata değeri yüksek olduğu için bu model de kabul görmemiştir. 4, 5, 6, 7 ve 8. modellerde gerek katsayılarının anlamsız çıkması gerekse R² değerlerinin düşük olması nedeniyle kule hareketlerini yansıtmakta yetersiz kalmaktadırlar.

9, 10 ve 11. modeller ise tahminler için kullanılabilir. Dış yüklere bağlı olarak oluşturulan Beylerbeyi-Y koordinatları modeli ile gözlemlerden elde edilen Beylerbeyi Y koordinatları arasındaki ilişki Şekil 5.63' de gösterilmiştir. Şekil 5.63 9, 10 ve 11. modele ait bilgileri

içermektedir. Diğer modellere ait grafikler Ek-5’ de sunulmuştur. Oluşturulan model kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek ölçülerle olan ilişkisi de yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir.



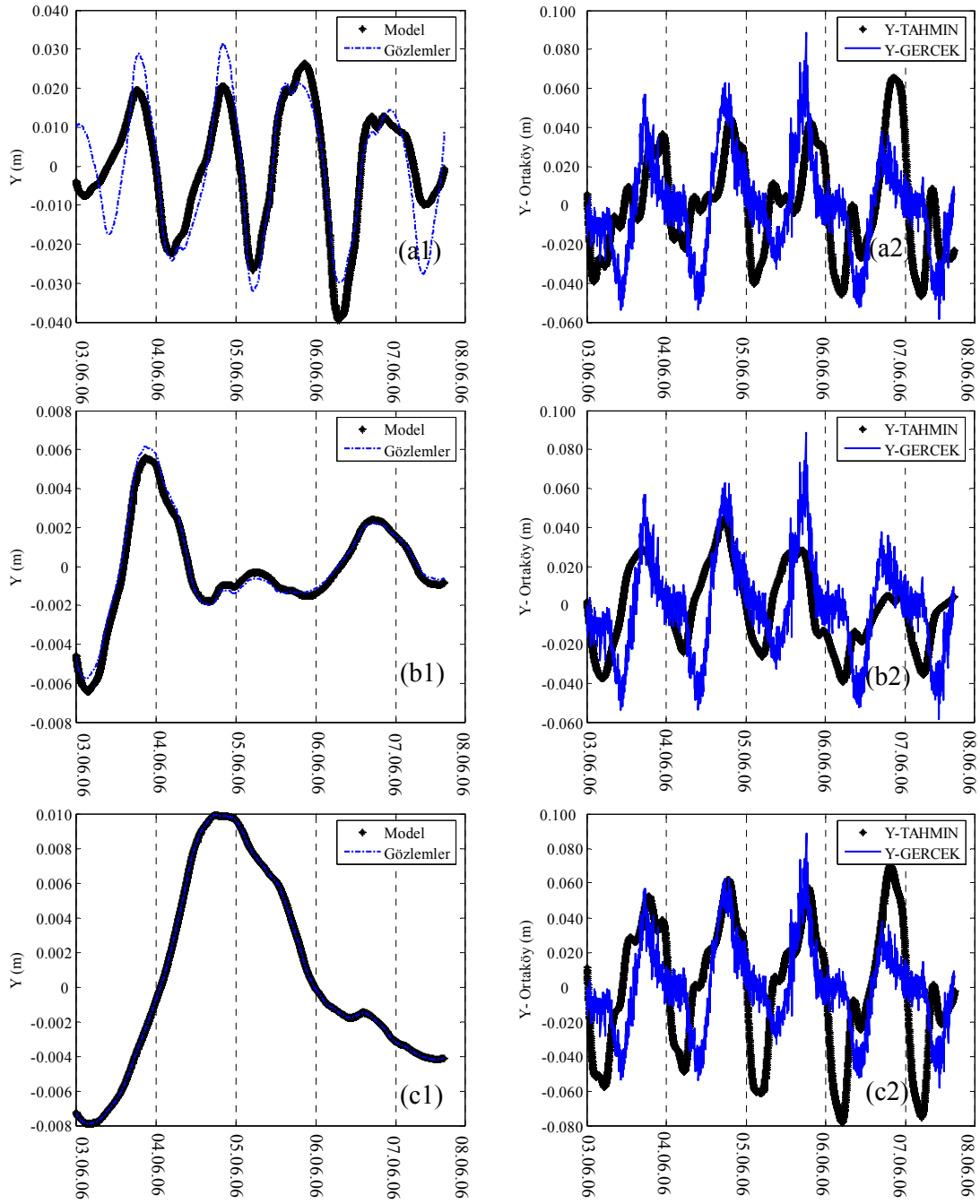
Şekil 5.63 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

Çizelge 5.17 Ortaköy -Y değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

YO HARETLERİNİN KULLANILMAYAN VERİLERLE TAHMİNİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Model	RMS (m.)	R ²	b için	c için	d için
1	66.187	1.33*10 ⁻⁵	-0.208 < 1.960	0.178 < 1.960	-0.168 < 1.960
2	0.0035	7.91*10 ⁻⁷	-0.013 < 1.960	0.016 < 1.960	0.011 < 1.960
3	1.1056	0.0044	3.72 > 1.960	-3.52 > 1.960	3.19 > 1.960
4	0.0079	0.0071	0.091 < 1.960	2.61 > 1.960	-1.03 < 1.960
5	0.0043	0.0293	-0.806 < 1.960	-5.184 > 1.960	7.487 > 1.960
6	0.0015	0.0430	-1.995 > 1.960	11.745 > 1.960	-3.364 > 1.960
7	0.0024	0.1667	1.027 < 1.960	5.241 > 1.960	25.097 > 1.960
8	0.0015	0.0797	-4.494 > 1.960	13.687 > 1.960	-7.242 > 1.960
9	0.0019	0.7631	85.516 > 1.960	-51.912 > 1.960	-39.182 > 1.960
10	0.0018	0.9822	319.753 > 1.960	49.068 > 1.960	-59.224 > 1.960
11	0.0018	0.9998	1063.818 > 1.960	-10574.3 > 1.960	-3208.3 > 1.960

Çizelge 5.17' ye göre 1. ve 2. detay bileşenleri tarafından oluşturulan modellere ait katsayılar anlamsızdır. Bu durumda 1 ve 2. modeller modelleme amaçlı kullanılamazlar. 3. modeli oluşturan katsayılar anlamlı çıkmış fakat R² değeri ile karesel ortalama hata değeri modelin uygun olmadığını göstermektedir. 4, 5, 6 ve 7. modeller de verilerin tahmininde kullanılamazlar.

9, 10 ve 11. modeller ise hem model katsayıları anlamlı çıktığı hem de karesel ortalama hataları düşük ve R² değerleri yüksek olduğu için Ortaköy kulenin Y değerlerinin modellenmesinde kullanılabilirler. Dış yüklere bağlı olarak oluşturulan Beylerbeyi Y koordinatları modeli ile gözlemlerden elde edilen Beylerbeyi Y koordinatları arasındaki ilişki Şekil 5.64' de gösterilmiştir. Şekilde sadece modellemelerde kullanılabilecek 3 bileşen verilmiştir. Diğer bileşenlere ait grafikler Ek-6' da sunulmuştur.



Şekil 5.64 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

➤ Ortaköy Ve Beylerbeyi Kule –X Değerinin Modellenmesi

Bir önceki kısımda Ortaköy ve Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan modellere benzer bir model her iki kulenin X değerleri için de oluşturulmuştur.

Model katsayıları En Küçük Kareler Yöntemi ile elde edilmiş ve standart sapmaları kullanılarak test büyüklükleri belirlenmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi için standart normal

dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir.

Oluşturulan modellerden elde edilen katsayılar ile modelleri test etmek için kullanılacak olan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızı-Y bileşenlerine ait veriler (5.3) eşitliğinde yerine koyularak Beylerbeyi kulenin tahminle belirlenen Y değerleri elde edilmiştir. Tahminle elde edilen bu değerlerle 3320 verilik gerçek Y değerleri arasında hesaplanan karesel ortalama hatalar (RMS) Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.19’ da gösterilmiştir. Çizelge 5.18 Beylerbeyi kule X değerleri ve Çizelge 5.19 ise Ortaköy kule X değerleri için elde edilen sonuçları göstermektedir.

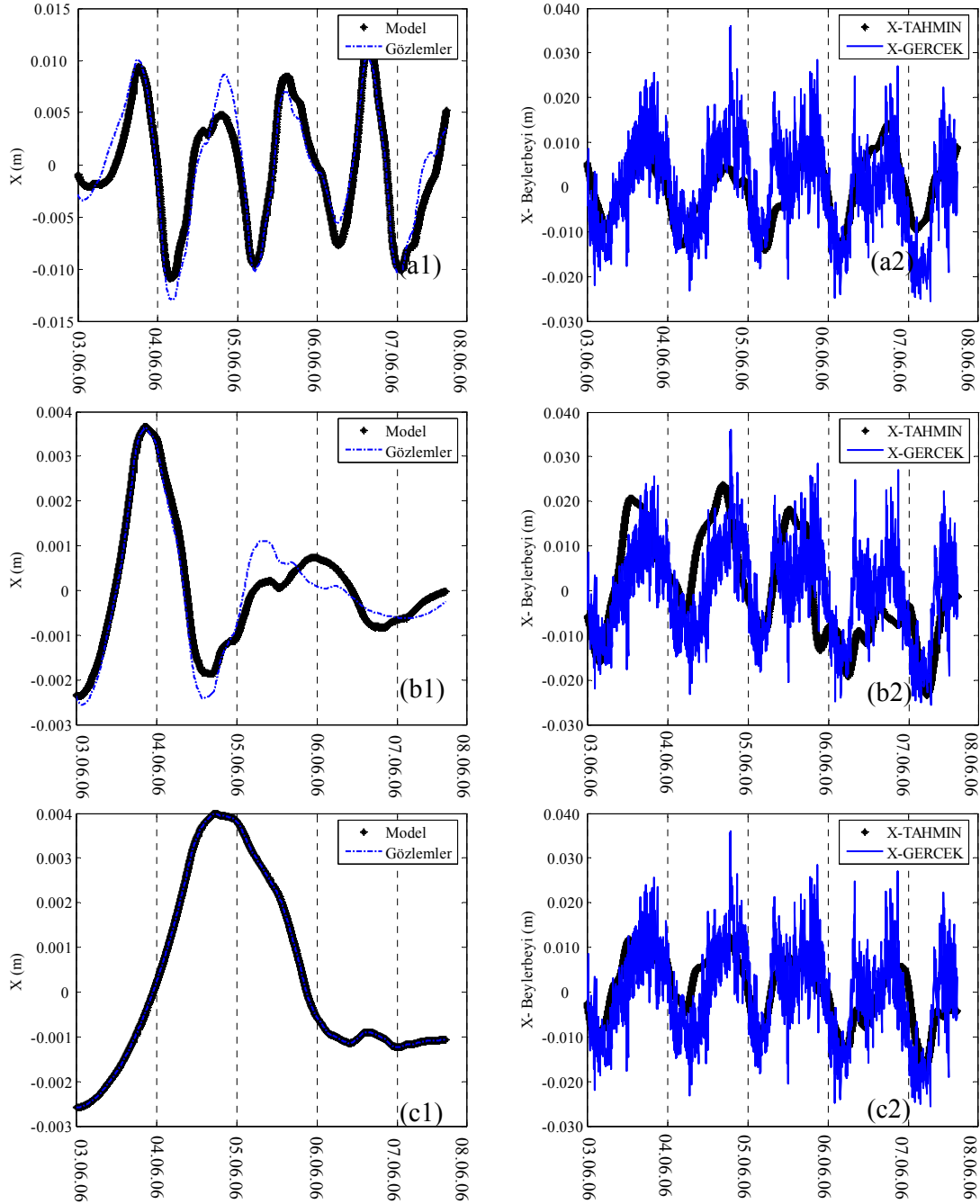
Çizelge 5.18 Beylerbeyi kule -X değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

XB HARETLERİNİN KULLANILMAYAN VERİLERLE TAHMİNİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Model	RMS (m.)	R ²	b için	c için	d için
1	64.462	0.00047	0.5340 < 1.960	-0.525 < 1.960	0.435 < 1.960
2	17.459	0.0024	-1.170 < 1.960	1.089 < 1.960	0.269 < 1.960
3	0.0939	0.0029	0.111 < 1.960	0.681 < 1.960	-0.939 < 1.960
4	0.0017	0.0037	2.883 > 1.960	0.065 < 1.960	-0.276 < 1.960
5	0.0013	0.0232	-6.845 > 1.960	-4.875 > 1.960	1.547 < 1.960
6	0.0010	0.1743	-16.373 > 1.960	-14.878 > 1.960	12.477 > 1.960
7	0.0004	0.5023	-45.673 > 1.960	17.780 > 1.960	29.279 > 1.960
8	0.0002	0.7797	-91.993 > 1.960	-11.758 > 1.960	19.590 > 1.960
9	0.0003	0.8639	-21.784 > 1.960	-21.229 > 1.960	-54.050 > 1.960
10	0.0003	0.9701	-352.299 > 1.960	36.467 > 1.960	50.328 > 1.960
11	0.0003	0.9999	47.703 > 1.960	-5076.85 > 1.960	4519.87 > 1.960

Çizelge 5.18’ e göre 1, 2 ve 3. detay bileşenleri tarafından oluşturulan modellere ait katsayılar anlamsızdır. 4. ve 5. detay bileşenleri için de durum benzerdir. 6. detay bileşeni için her üç katsayı da anlamlı çıkmasına karşılık R² değeri küçük çıkmıştır. Bu nedenlerle adı geçen detay bileşenleri modellemelerde kullanılamaz. Diğer detay bileşenleri ise hem katsayılarının anlamlı çıkması hem de karesel ortalama hatalarının küçük, R² değerlerinin büyük çıkması

nedeniyle modelleme için uygundur.

Dış yüklere bağlı olarak modelden elde edilen Beylerbeyi kule X değerleri ile gözlemlerden elde edilen Beylerbeyi Y koordinatları arasındaki ilişki Şekil 5.65’ de gösterilmiştir. Şekilde modellemelerde kullanılabilecek bileşenlerden 3 tanesi gösterilmiştir. Diğer bileşenlere ait grafikler Ek-7’ de sunulmuştur.



Şekil 5.65 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

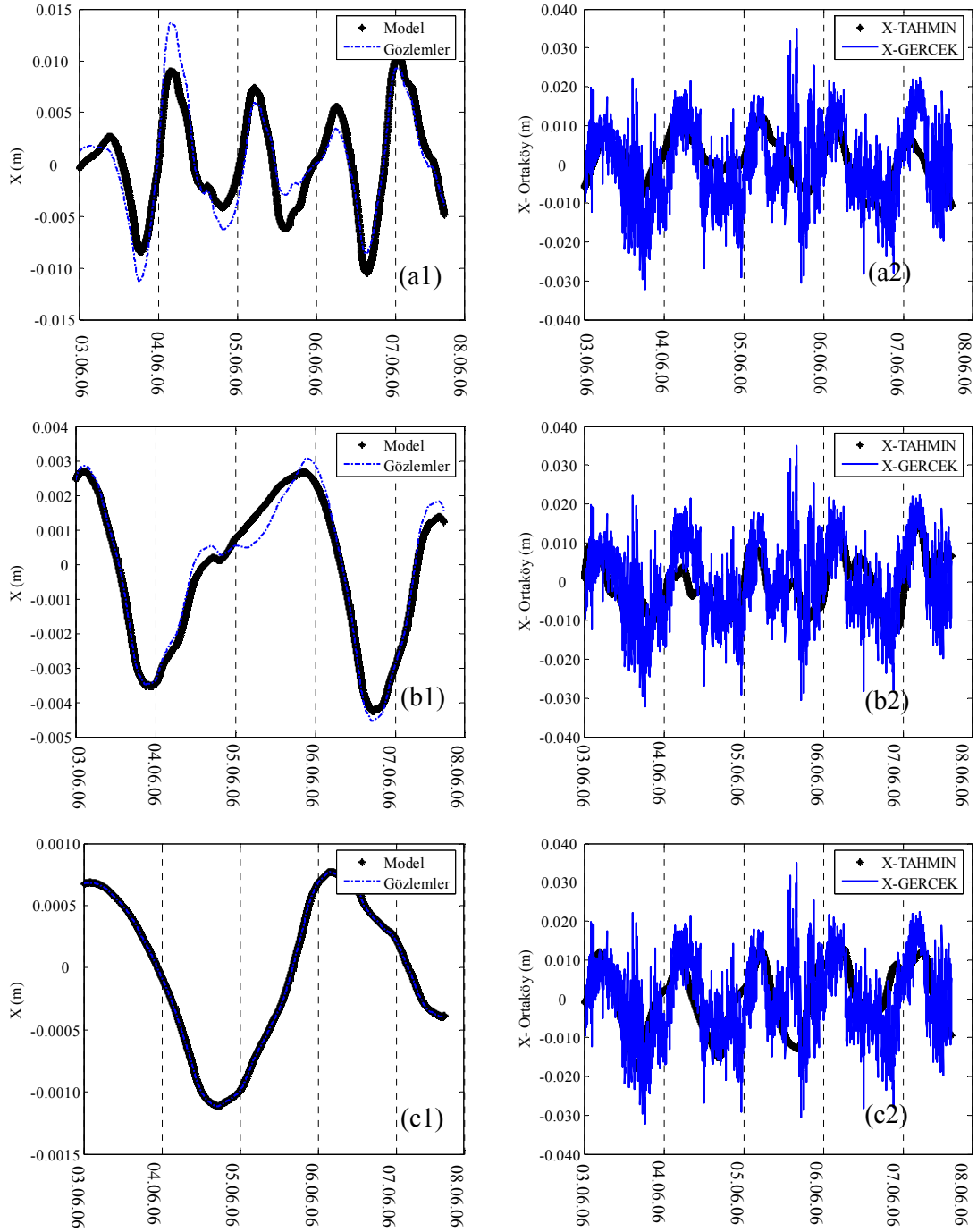
Çizelge 5.19 Ortaköy kule -X değerinin 11 seviye ayrıştırılması ile oluşturulan model katsayılarına ait test büyüklükleri, belirlilik katsayıları ve karesel ortalama hataları

XO HARETLERİNİN KULLANILMAYAN VERİLERLE TAHMİNİ İÇİN 11 MODEL					
			Katsayı Test Büyüklükleri		
Model	RMS (m.)	R ²	b için	c için	d için
1	0.0018	0.0061	$ -1.242 < 1.960$	$1.111 < 1.960$	$ -0.405 < 1.960$
2	49.468	0.0087	$1.074 < 1.960$	$ -1.236 < 1.960$	$1.594 < 1.960$
3	0.0071	0.0129	$ -1.720 < 1.960$	$0.090 < 1.960$	$0.880 < 1.960$
4	0.0125	0.0120	$ -3.340 > 1.960$	$ -2.707 > 1.960$	$0.664 < 1.960$
5	0.0002	0.0074	$3.780 > 1.960$	$2.180 > 1.960$	$1.648 < 1.960$
6	0.0004	0.1538	$12.015 > 1.960$	$7.479 > 1.960$	$18.391 > 1.960$
7	0.0002	0.4025	$46.765 > 1.960$	$ -16.807 > 1.960$	$12.911 > 1.960$
8	0.0002	0.9130	$158.016 > 1.960$	$13.289 > 1.960$	$ -13.778 > 1.960$
9	0.0002	0.9060	$43.238 > 1.960$	$17.144 > 1.960$	$38.595 > 1.960$
10	0.0004	0.9242	$84.892 > 1.960$	$49.809 > 1.960$	$ -99.288 > 1.960$
11	0.0002	0.9998	$5720.392 > 1.960$	$ -2054.49 > 1.960$	$ -6044.74 > 1.960$

Çizelge 5.19 incelendiğinde ye göre 1, 2 ve 3. detay bileşenleri tarafından oluşturulan modellere ait katsayıların anlamsız olduğu görülmektedir. 4. ve 5. detay bileşenleri için de durum benzerdir. 6 ve 7. detay bileşenleri için her üç katsayı da anlamlı ve karesel ortalama hatalarda küçüktür. Ancak bu bileşenler için etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayı (R²) değeri yüksek olmadığı için modellerde kullanılamayacağı düşünülmüştür. 8, 9, 10 ve 11. detay bileşenleri ise her üç şartı da sağladığı için modellemelerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Dış yüklere bağlı olarak modelden elde edilen Ortaköy kule X değerleri ile gözlemlerden elde edilen Ortaköy kule X değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.66' da gösterilmiştir.

Şekilde modellemelerde kullanılabilecek 9, 10 ve 11. bileşenler gösterilmiştir. Diğer bileşenlere ait grafikler Ek-8' de sunulmuştur.



Şekil 5.66 Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 9 (a1), 10 (b1) ve 11. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Boğaziçi Köprüsü Hareketlerinin İzlenmesi, Analizi ve Modellenmesi isimli bu tez çalışmasında köprü hareketlerinin belirlenebilmesi amacıyla en çok hareket beklenen noktalar olarak seçilen tabliye orta noktası (T1) ile Beylerbeyi (B1) ve Ortaköy (O1) kulelerindeki obje noktalarında uzun süreli GPS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. GPS ölçme yöntemi olarak hem anında koordinat elde edilebilen hem de birkaç cm doğrulukla konum belirlemeyi olanaklı kılan RTK – GPS ölçü yöntemi tercih edilmiştir. RTK – GPS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ölçülerde veri toplama işlemi için NMEA formatı kullanılmıştır.

Köprü kulelerinde beklenen alçak frekansları belirleyebilmek için bu noktalarda yapılan RTK – GPS ölçülerinde kayıt aralıkları 1sn (1 Hz) seçilmiştir. Ancak tabliye orta noktasında beklenen hareket ve titreşimlerin daha fazla olacağı yani yüksek frekanslı hareketlerinde bulunabileceği düşünülerek bu noktada kayıta aralığı 0.1 sn (10 Hz) olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kule hareketlerinin belirlenmesinde GPS başarıyla kullanılmıştır. Tabliye üzerinde ise multipathden arındırılmış GPS verisi toplanması açısından yer seçimi konusunda daha titiz davranılması gerekmektedir.

Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerinin açıklık doğrultusundaki hareketleri zıt yönlü ve yaklaşık aynı miktardadır. Elde edilen salınımın genliği ± 2 cm aralığında olmak üzere toplam 4 cm' dir. Adanur (2003) köprünün kendi ağırlığı altında lineer olmayan analizi ile bu salınımı 4.18 cm olarak belirlemiştir. Erdoğan (2006) ise bu salınımını ± 1 cm genliğiyle 2 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde bu salınımı 1. periyot için 6.7 cm, 2.periyot için 4.1 cm ve 3. periyot için ise 11 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

Beylerbeyi ve Ortaköy kulelerinde toplanan veriler kullanılarak yapılan periyodik bileşen analizinde her iki kule için de baskın olan 2 adet frekans belirlenmiştir. Bu frekanslar 24 ve 12 saatlik periyotlara karşılık gelmektedir.

Ortaköy ve Beylerbeyi kulelerinin yanal hareketleri aynı yönde ve aynı miktardadır. Elde edilen salınımların genlikleri ± 5 cm aralığında olmak üzere toplam 10 cm' dir. Erdoğan (2006) bu salınım miktarını ± 3 cm genliğiyle 7 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde 1. periyot için 9 cm, 2. periyot için 8 cm ve 3. periyot için ise 11 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

Açıklık doğrultusunda olduğu gibi yanal yönde de iki baskın frekans mevcuttur ve bu frekanslar 12 ve 24 saatlik periyotlara karşılık gelmektedir.

Her iki kulenin düşey yöndeki salınımları da incelenmiştir. Kulelerin yüksekliklerinde bir değişim beklenmemesine rağmen kulelerin düşey yönde ± 3 cm aralığında olmak üzere toplam 6 cm' lik bir genlikle salınım yaptığı görülmüştür. Kulelerin düşey yöndeki bu salınımı kule ayaklarının dış yükler etkisi ile eğilmesinden kaynaklanmaktadır. Erdoğan (2006) bu salınımı Ortaköy kule için ± 5 cm genlik değeriyle 10 cm olarak, Beylerbeyi kule için ise ± 2 cm genlik değeriyle 4 cm olarak belirlemiştir. Erkaya (1987) ise 3 periyot olarak gerçekleştirdiği ölçülerinde bu salınım miktarını 1. periyot için 3.9 cm, 2. periyot için 4 cm ve 3. periyot için ise 8.6 cm olarak belirlemiştir. Bu bilgilerle karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

Köprü hareketlerinin dış yükler olarak adlandırılan sıcaklık, taşıt sayısı ve rüzgar hızlarıyla olan ilişkileri de incelenmiştir. Buna göre her iki kulenin de yanal hareketlerinin sıcaklıkla olan ilişkilerine bakıldığında şekil olarak çok büyük benzerlikler görülmektedir. Ortaköy kulenin yanal yöndeki hareketinin araç sayısı ile olan ilişkisi çok yüksek değildir. Yine her iki kulenin yanal yöndeki hareketine rüzgar hızının etkisi incelendiğinde şekil olarak bir benzerlik görülememiştir.

Kulelerin açıklık doğrultundaki hareketleri ile dış yükler arasındaki ilişkiler incelendiğinde en yüksek korelasyonun araç sayısına bağlı olduğu görülmektedir. Her iki kulenin açıklık doğrultusundaki salınımı ile rüzgar hızı ve yönü arasında kuvvetli bir ilişki belirlenememiştir.

Kulelerin düşey yöndeki hareketlerin dış yüklerle olan ilişkisine bakıldığında sıcaklıkla düşey yöndeki salınım arasında kuvvetli bir ilişki olduğu söylenebilir. Burada ilk bakışta kule ayakları düşey yönde yer değiştiriyor gibi algılanabilir. Ancak gerçekte durum böyle değildir. Düşey yönde kulelerin yer değiştirme sebebi sıcaklıktan dolayı kule tepelerinin yanal yönde ötelenmesi ve bu ötelemeye bağlı olarak da yükseklik değerinin değişmesidir.

Köprü kulelerindeki hareketlerin içerdiği periyodik bileşenler ayrıca Dalgacık analizi ile de belirlenmeye çalışılmıştır. FFT analizi ile hesaplanan frekans ve periyot değerlerinin aynı dalgacık analizi ile de belirlenmiştir.

Köprü kulelerinin yatay ve düşey hareketleri dalgacık analizi ile modellenmeye çalışılmıştır. Dalgacık analizi ile kule hareketleri 11. seviyeye kadar bileşenlerine ayrılmış ve her bir bileşen için bir model olmak üzere toplam 11 model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu

modellere ait parametre değerleri en küçük kareler yöntemine göre belirlenmiştir. Ayrıca belirlenen bu parametreler ve bunların standart sapmaları kullanarak test büyüklükleri elde edilmiştir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyi ve standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2} = 1.960$ için test büyüklüklerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Ayrıca etki büyüklüklerindeki değişimlerin çıktı büyüklüklerindeki toplam değişime etkisini açıklayabilme oranını veren modellere ait belirlilik katsayıları da (R^2) hesaplanmıştır. Buna göre parametre değerleri anlamlı çıkan ve R^2 değeri büyük olan modeller kullanarak hareketler etki büyüklüklerine bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler gerçek değerle karşılaştırılıp karesel ortalama hatalar (RMS) hesaplanmıştır. Tüm istatistiksel bilgiler incelenerek karşılaştırıldığında dalgacık analizinin kule hareketlerinin modellenmesinde başarıyla kullanıldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

Adanur, S., (1997), “Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analjisi ile Dinamik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 1997.

Adanur, S., “Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Maruz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi”, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 2003.

Adanur, S., Dumanoglu, A.A., Bayraktar, A., (1997), “Asma Köprülerin Lineer Olmayan Dinamik Davranışının İncelenmesi”, Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, ODTÜ, 17-19 Eylül 1997, (269-276), Ankara.

Akdi, Y., (2003), Zaman Serileri Analizi (Birim Kökler ve Kointegrasyon), Bıçaklar Kitabevi, Yayın No:4, 300 s., ISBN: 975-8695-03-7, Ankara, 2003

Altun, Alpaslan A., (2007), “Filtreleme Teknikleri ile İyileştirilmiş Parmakizlerini Yapay Sinir Ağları ile Tanımda Yeni Bir Yaklaşım”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, 22 (2):227-236.

Arı, N., Özen, Ş., Çolak, Ö.H., (2008), Dalgacık Teorisi (Wavelet), Palme Yayınları, Yayın No: 465, 142 s., ISBN: 978-9944-341-70-7

Ashkenazi, V.,(1997), “Experimental Monitoring of the Humber Bridges Using GPS”, Instn. Of Civil Engrs., 120, p.178-182

Ata, E., (2001), “Real Time Kinematic (RTK) Tekniğinin Poligon Ölçmeleri İle Alım Ve Aplikasyon Uygulamalarında Kullanılması”, YTÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 2001

Ayan, T., Deniz, R., Çelik, R.N., Arslan, E., Denli, H.H., Özşamlı, C., Özlüdemir, M.T., “Geçmişten Günümüze Jeodezinin Ülke Genelindeki Tektonik Amaçlı Çalışmalara Katkısı”, TUJJB TUJK 2002 Bilimsel Toplantısı Tektonik ve Jeodezik Ağlar, s. 75, 10–11–12 Ekim 2002, İznik.

Ayan, T., Deniz, R., Çelik, R.N., Arslan, E., Özlüdemir, M.T., Güney, C., Özöner, B., Erol, S., Akyılmaz, O., (2002) “Jeodezik Amaçlı Yerel GPS Ağları ve Tektonik”, TUJJB TUJK Bilimsel Toplantısı Tektonik ve Jeodezik Ağlar, s. 199, 10–11–12 Ekim 2002, İznik.

Aydın, Ö., (2004)“GPS Tekniği”, YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü. Ders Notları (Basılmamış)

Aydın, Ö., Ata, E., Pırtı, A., (2004), “RTK GPS sisteminin poligon ölçmelerinde kullanımı”, YTÜ Sigma Dergisi, Sayı: 2004/1, Sayfa: 56-63, İstanbul 2004

Azar, R.S., Shafri H.Z.M., (2009), “ Mass Structure Deformation Monitoring using Low Cost Differential Global Positioning System Device”, American Journal of Applied Sciences 6 (1): 152-156, 2009, ISSN 1546-9239

Bergland, G. D., (1969), “A Guided Tour of the Fast Fourier Transform”, IEEE Spectrum, Vol. 6, pp. 41-55

Celasun, H. S., (1981), “Asma Köprüler”, İDMM. Akademisi Yayın Müdürlüğü Basımevi, İstanbul, 1981.

Cengizoglu, H., Asma Bir Köprünün Orijinal Tasarım Dayanımının Kopan Bağlantı

Plağından Sonraki Durumu ile Kıyaslanması, İTÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 2006

Çankaya, İ. ve Vatansever, F., (2002), “Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması”, Sakarya Üniversitesi, FBE Dergisi, Sayı: 6-3, Sayfa: 16-26

Çelik, R.N., Ayan, T., Acar, M., Kaplan, M.O., “Deprem Sonrası Büyük Mühendislik Yapılarında Oluşan Hasarların Jeodezik Yöntemlerle Belirlenmesi Örnek Çalışma: Bolu Geçişi”, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, 23–25 Mart 2005, Kocaeli,

Çelik, R.N., Ayan, T., Denli, H.H., Özlüdemir, M.T., Erol, S., Özöner, B., Apaydın, N., Eringer, M., Leinen, S., Groten, E., (2001) “Monitoring Deformation on Karasu Viaduct Using GPS and Precise Levelling Techniques”, Strong Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures, Kluwer Academic Publisher, Series E: Applied Sciences–Vol. 373, NATO Science Series, ISBN: 0–7923–6916–5 Hardbound, ISBN: 0–7923–6917–3 Paperback, 2001.

Çulpan, C., (2002), Türk Taş Köprüleri (Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar), Türk Tarih Kurumu Yayınları 2. baskı, Ankara, 2002, ISBN: 975-1615-02-X.

Doğan, Ü., Üretim planlaması Kontrolü Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi İşletme Bölümü, 9 Ekim 2007.

Erdoğan, H., Güral E., Akpınar B., Ata E., (2005) “Dinamik Sistemlerin Tanımlanması”, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Ankara

Erdoğan, H., Güral E., Akpınar B., Ata E., Poyraz F., (2005) “Mühendislik Yapılarına Etkiyen Büyüklüklerin Modellenmesi”, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul

Erdoğan, H., (2006), “Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Sürekli Jeodezik Ölçülerle Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma”, YTÜ FBE Doktora Tezi, İstanbul

Erkaya, H., (1987), “Mühendislik Yapılarındaki Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle Saptanması ve Model Üzerinde Uygulanması”, Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul

Graps, A., An Introduction to Wavelets, IEEE Computer Society, USA, p. 1-18, (1995)

Güral, E. (2002), “Mühendislik Yapılarının Jeodezik Kontrolü”, GAP IV. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı, Şanlıurfa, 6-8 Haziran 2002.

Güral, E., (2002), “Mühendislik Jeodezisinde Sistem Analiz”, YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü Ders Notları (Basılmamış)

Harazaki, I., Suzuki, S., Okukawa, A., (2000), Suspension Bridges, Bridge Engineering Handbook, Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan, Boca Raton: CRC Press, 2000

İnceöz, S., (1997), “İktidar Hırsı Köprüleri Attırdı”, Aksiyon Dergisi, Sayı: 117/3

Karataş, H., (1979), Asma Sistemler, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yayınları, 153 sayfa, İstanbul, 1979

Küçük, M., (2005) “Dalgacık Dönüşümü Tekniği Kullanılarak Akım Serilerinin Modellenmesi”, İTÜ FBE, Doktora Tezi, İstanbul

Larocca, C., Schaal, R., Santos, M., Langley, R.B., Kim, D., (2005) “Dynamic Monitoring Of Structures At The Millimeter Level: GPS Versus Displacement Transducers And Accelerometers”, ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division,

13-16 September, Long Beach, CA

Lennartz, H.J., Ellegaard, S., “Analyzing Europe's Largest Suspension Bridge” FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002

Li Jian-xin, miyashita K, Ivan P, Torimoto H, Crustal Strain Field in Central Japan, Based on the wavelet analyzed GPS Time – Series Data, 2002

Lovse, J. W. ve Teskey, W. F., (1995), “Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS technology”, Journal of Surveying Engineering, Vo. 121(1), 16-22

MEGEP (Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), (2007), “Elektrik Elektronik Teknolojisi Analog Ve Sayısal Haberleşme”, Ankara 2007

Misiti, M., Misiti, Y. and Oppenheim G., Wavelet Toolbox For Use With Matlab User's Guide, 2nd ed., The MathWork Inc., p. 1.1-1.38, (2000)

Musk, L.F., (1991) “Climate as a factor in the planning and design of new roads and motorways”, in Highway Meteorology, ed. A.H. Perry and L.J. Symons, London: E&FN Spon, p. 1-25.

Ogaja, C., Rizos, C., Wang, J., & Brownjohn, J.M.W. (2001), “A Dynamic GPS System For On-Line Structural Monitoring”, Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics & Navigation (KIS2001), Banff, Canada, 5-8 June, 290-297.

Pırtı, A., (2005), “Yol uygulamasında RTK GPS tekniğinin kullanılması ve doğruluk yönünden incelenmesi”, YTÜ FBE Doktora Tezi, İstanbul 2005

Polikar R., (1995), “The Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis: The Wavelet Tutorial”, 1995. <http://engineering.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>

Qian, S., (2002), Introduction to Time – Frequency and Wavelet Transforms, Prentice Hall PTR, 280 p., ISBN: 0-13-030360-7, USA, 2002

Rao, R. M., Bopardikar, A. S., (1998), Wavelets Transforms Introduction to Theory and Applications, Addison Wesley Longman, Massachusetts, p. 1-94, (1998)

Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A. H., (2001), “The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges”, 10th International Symposium on Deformation Measurements, California, USA

Roberts, G. W., Cosser, E., Meng, X., Dodson, A., (2004), “ High Frequency Deflection Monitoring of Bridges by GPS”, Journal of Global Positioning Systems , Vol. 3, No. 1-2, p. 226-231

Roberts, G. W., Dodson, A.H., Ashkenozi, V. Brown, C. V, Karuna, R., (1999), “ Comparison of GPS measurements and Finite Element Modelling for the Deformation Measurements of the Humber Bridge”, Proc ION GPS, Nashville, USA

Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A., (2000), “Structural Dynamic and Deflection Monitoring Using Integrated GPS and Triaxial Accelerometer”, The 13th International technical Meeting of the satellite Division of the Institute of Navigation, USA

Roberts, G.W., Brown, C., Atkins, C., Meng, X., (2008), “The Use of GNSS to Monitor the Deflections of Suspension Bridges”, 13. FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lneç, Lisbon, 12- 15 May

- Roberts, G.W., Brown, C., Ogundipe, O., (2008), "Monitoring The Deformation of a Motorway Viaduct Using Kinematic GPS", 13. FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lnc, Lisbon, 12- 15 May 2008
- Skyttner, L., (2002) "Monitoring and Early Warning Systems - A Design for Human Survival", Kybernetes, Vol. 31, Iss. 2; pg. 220, 26 pgs., London, 2002.
- Şahin, S., (2005), Malzeme Seçimi Ders Notları, Celal Bayar üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 2005
- Tezcan, S., Asma Köprülerin Dinamik Analizi, 1. Köprüler ve Viyadükleri Sempozyumu, 29.11.2007, Antalya
- Toker, S., Ünay, A.İ., (2004), "Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi", G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 17(2): 129-139 (2004) ISSN 1303-9709
- Topçu, A., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Malzeme Bilgisi Ders Notları
- Toprak, İ.B., (2007), "EEG Sinyallerinin Dalgacık Dönüşümü Ve Yapay Sinir Ağları İle Analizi", Süleyman Demirel Üniversitesi FBE, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 2007
- Uğur, Y., Ethem, E., Caferov, G., (2006), "Sandık Kesitli Köprülerin Analizi", Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri.
- Ural, A., (2005), "Tarihî Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi", Deprem Sempozyumu, 23 – 25 Mart, Kocaeli 2005.
- Vatansever, F., Uysal, F., Uzun, A., (2002) "Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile Gürültü Süzme", ELECO'2002, 18-22 Aralık 2002, Bursa, s. 338-342
- Wayne, T. (1997), Elektronik İletişim Teknikleri, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul 1997
- Wieser, A., Brunner, F. K., (2002), "Analysis of Bridges Deformations Using Continuous GPS measurements", INGEO2002, 2ndConference Surveying, Bratislava, pp. 45-52
- Wong, K. Y., (2000), "Planning and Implementation of the structural Health Monitoring System for Cable-Supported Bridges in Hong Kong", Proceeding of SPIE, Vol.3395, p. 266-276
- Xu, L., Guo, J. J., Jiang, J. J., (2002), "Time-Frequency Analysis of a Suspension Bridge Based On GPS", Journal of Sound and Vibration, Volume 254, Issue 1, 27 June 2002, Pages 105-116
- Yılmaz, M., (1986), Modülasyon Teorisi, KTÜ, Trabzon 1986
- Yılmaz, Ş., (2007), "Asma Köprüler", İnşaat Dünyası Dergisi, Sayı:289

EKLER**Ek 1 Verilerin Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile bileşenlerine ayrılmasında kullanılan Matlab komutları**

```

y=girdiyb2dk; % Ayrıştırma işlemine girecek veri gurubu
K=y;
t=((0:(length(K)-1))/2)';
set(0,'DefaultAxesFontname','Times New Roman')
%%%%%%%%Wavelet Ayrıştırması
[C1,L1]=wavedec(K,11,'db4');
%%%%%%%% alçak frekanslar
cA11=appcoef(C1,L1,'db4',11);
cA10=appcoef(C1,L1,'db4',10);
cA9=appcoef(C1,L1,'db4',9);
cA8=appcoef(C1,L1,'db4',8);
cA7=appcoef(C1,L1,'db4',7);
cA6=appcoef(C1,L1,'db4',6);
cA5=appcoef(C1,L1,'db4',5);
cA4=appcoef(C1,L1,'db4',4);
cA3=appcoef(C1,L1,'db4',3);
cA2=appcoef(C1,L1,'db4',2);
cA1=appcoef(C1,L1,'db4',1);

%%%%%%%%yüksek frekanslar
cD11=detcoef(C1,L1,11);
cD10=detcoef(C1,L1,10);
cD9=detcoef(C1,L1,9);
cD8=detcoef(C1,L1,8);
cD7=detcoef(C1,L1,7);
cD6=detcoef(C1,L1,6);
cD5=detcoef(C1,L1,5);
cD4=detcoef(C1,L1,4);
cD3=detcoef(C1,L1,3);
cD2=detcoef(C1,L1,2);
cD1=detcoef(C1,L1,1);

A11=wrcoef('a',C1,L1,'db4',11);
A10=wrcoef('a',C1,L1,'db4',10);
A9=wrcoef('a',C1,L1,'db4',9);
A8=wrcoef('a',C1,L1,'db4',8);
A7=wrcoef('a',C1,L1,'db4',7);
A6=wrcoef('a',C1,L1,'db4',6);
A5=wrcoef('a',C1,L1,'db4',5);
A4=wrcoef('a',C1,L1,'db4',4);
A3=wrcoef('a',C1,L1,'db4',3);
A2=wrcoef('a',C1,L1,'db4',2);
A1=wrcoef('a',C1,L1,'db4',1);
dm11girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',11);
dm10girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',10);
dm9girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',9);

```

```

dm8girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',8);
dm7girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',7);
dm6girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',6);
dm5girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',5);
dm4girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',4);
dm3girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',3);
dm2girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',2);
dm1girdiyb2dk=wrcoef('d',C1,L1,'db4',1);
figure(1)

```

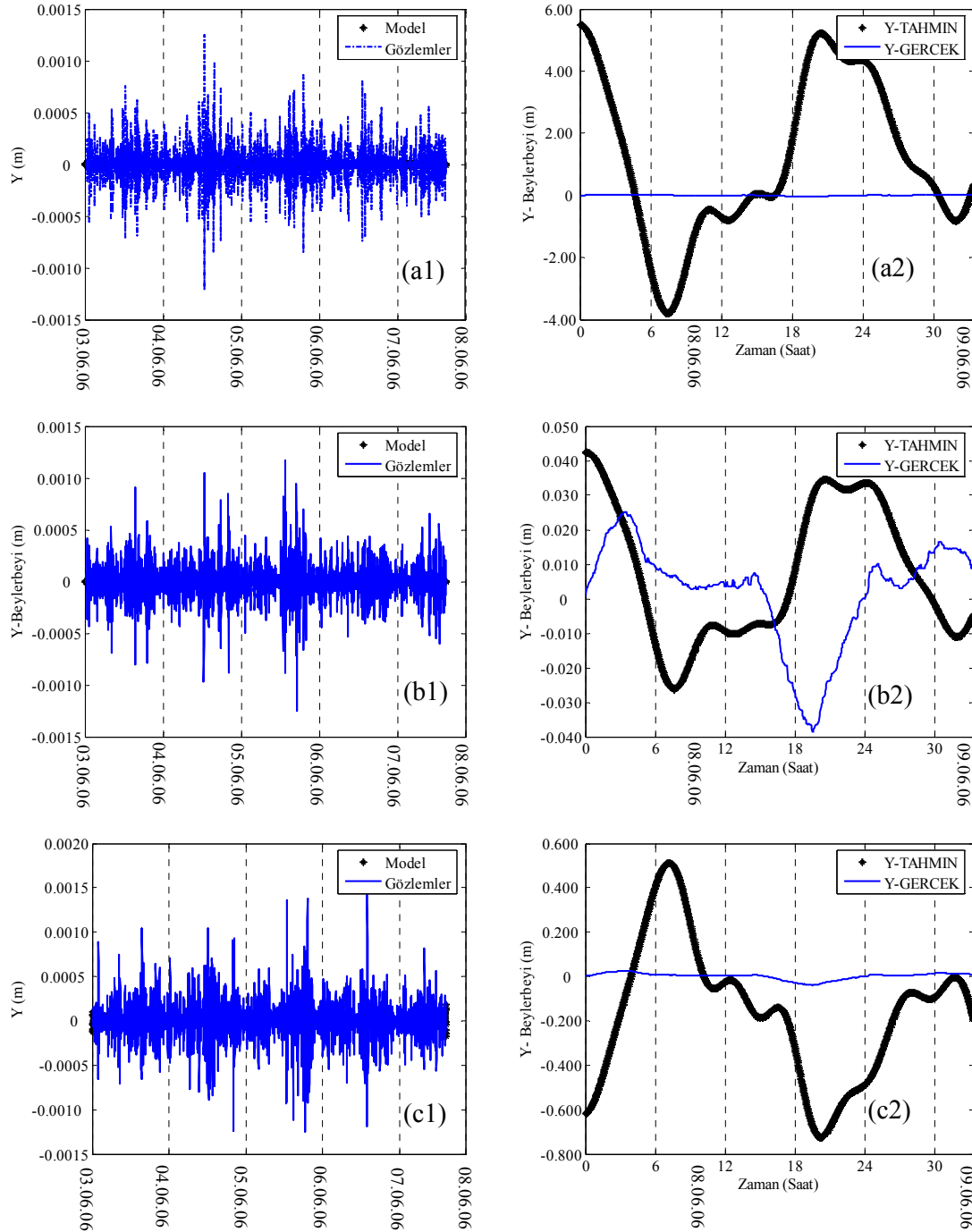
%%%%%%%%%YENİDEN OLUSTURMA

```

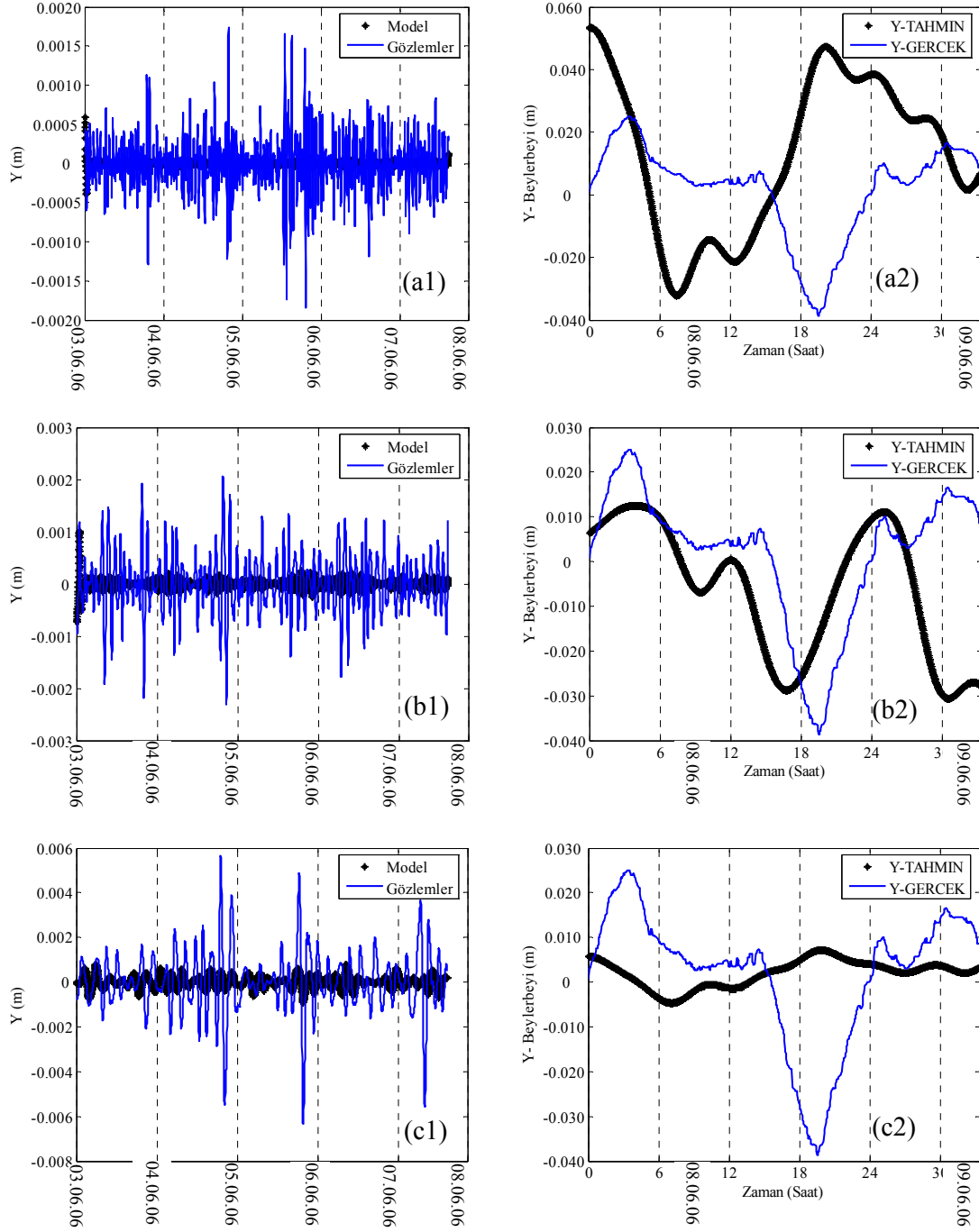
AOyb=waverec(C1,L1,'db4');
err=max(abs(K-AO))
plot(t,AO)
figure(2)
plot(t,K)
title('reconstruct s');
D1=wrcoef('d',C1,L1,'db4',1);
D2=wrcoef('d',C1,L1,'db4',2);
D3=wrcoef('d',C1,L1,'db4',3);
D4=wrcoef('d',C1,L1,'db4',4);
D5=wrcoef('d',C1,L1,'db4',5);
D6=wrcoef('d',C1,L1,'db4',6);
D7=wrcoef('d',C1,L1,'db4',7);
D8=wrcoef('d',C1,L1,'db4',8);
D9=wrcoef('d',C1,L1,'db4',9);
D10=wrcoef('d',C1,L1,'db4',10);
D11=wrcoef('d',C1,L1,'db4',11);
D12=wrcoef('d',C1,L1,'db4',12);
%%%%%%%%%

```

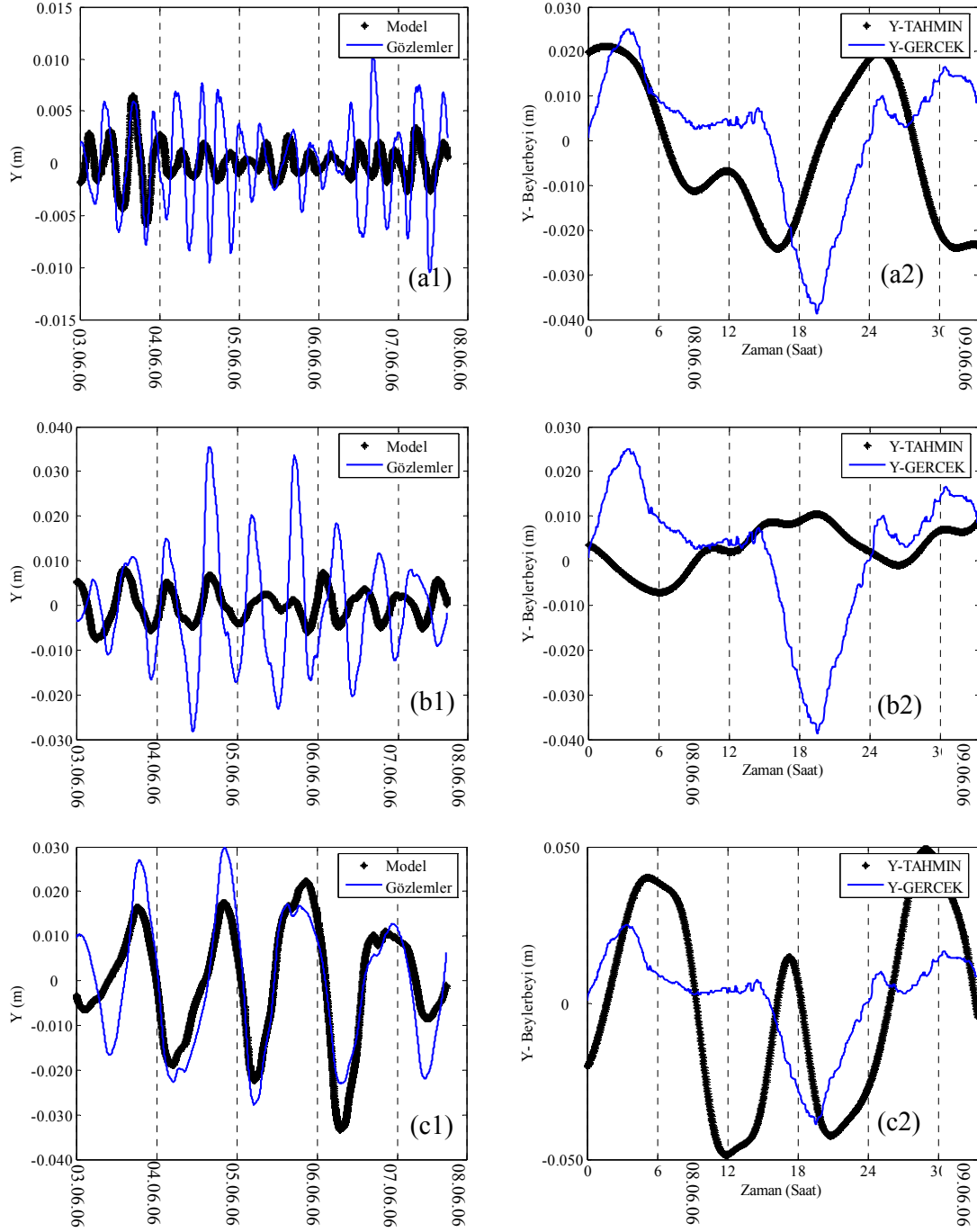
Ek 2 Beylerbeyi kule Y değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



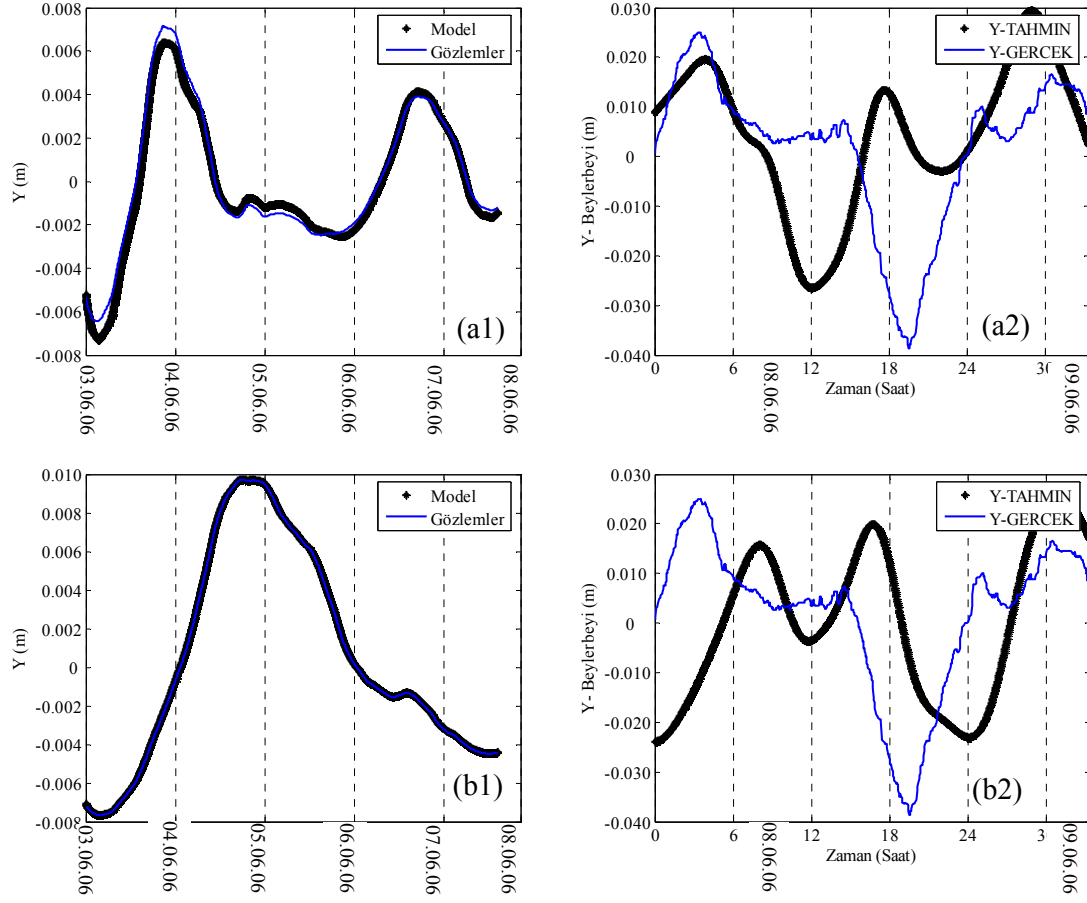
Şekil Ek 2.1 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 2.2 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

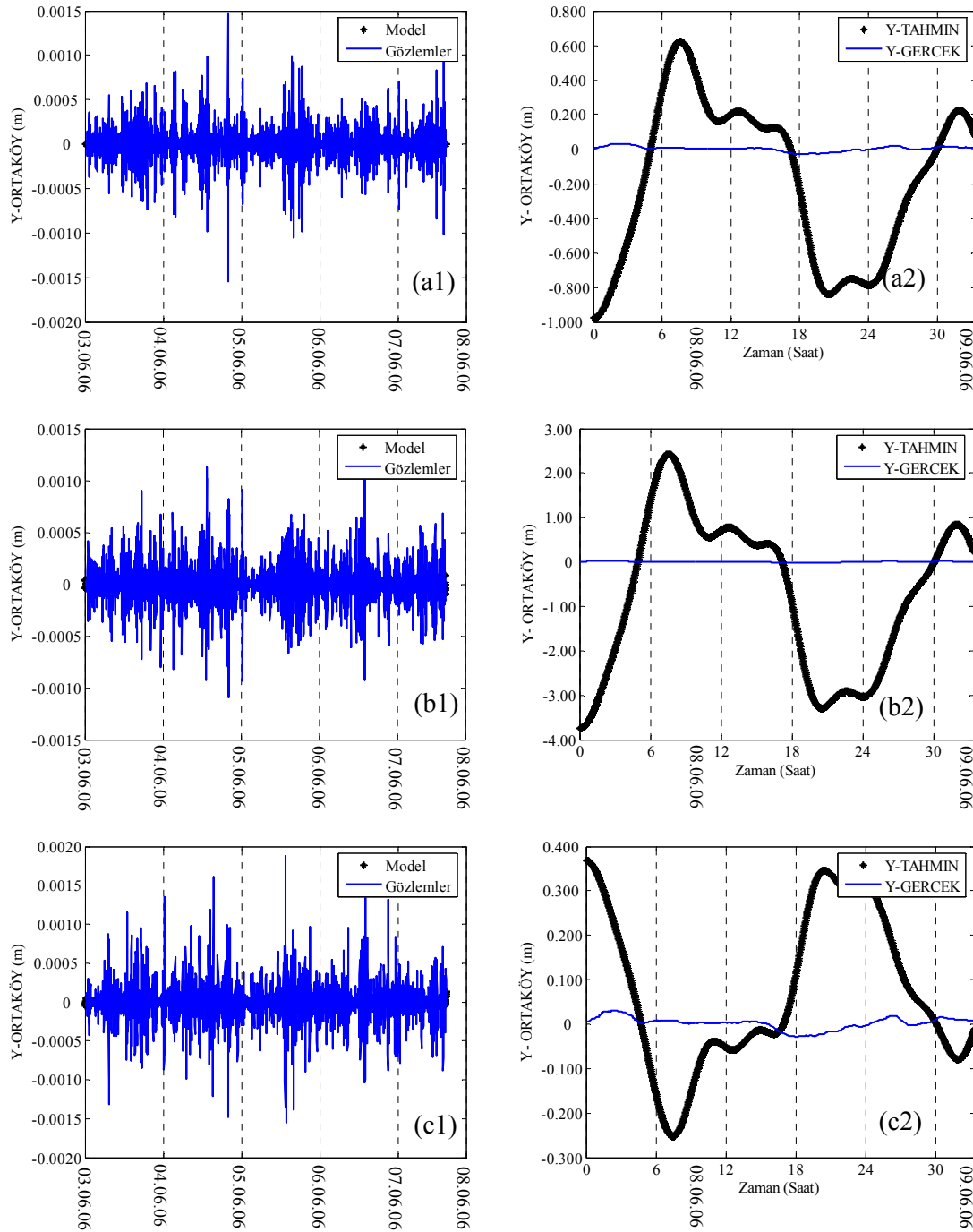


Şekil Ek 2.3 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

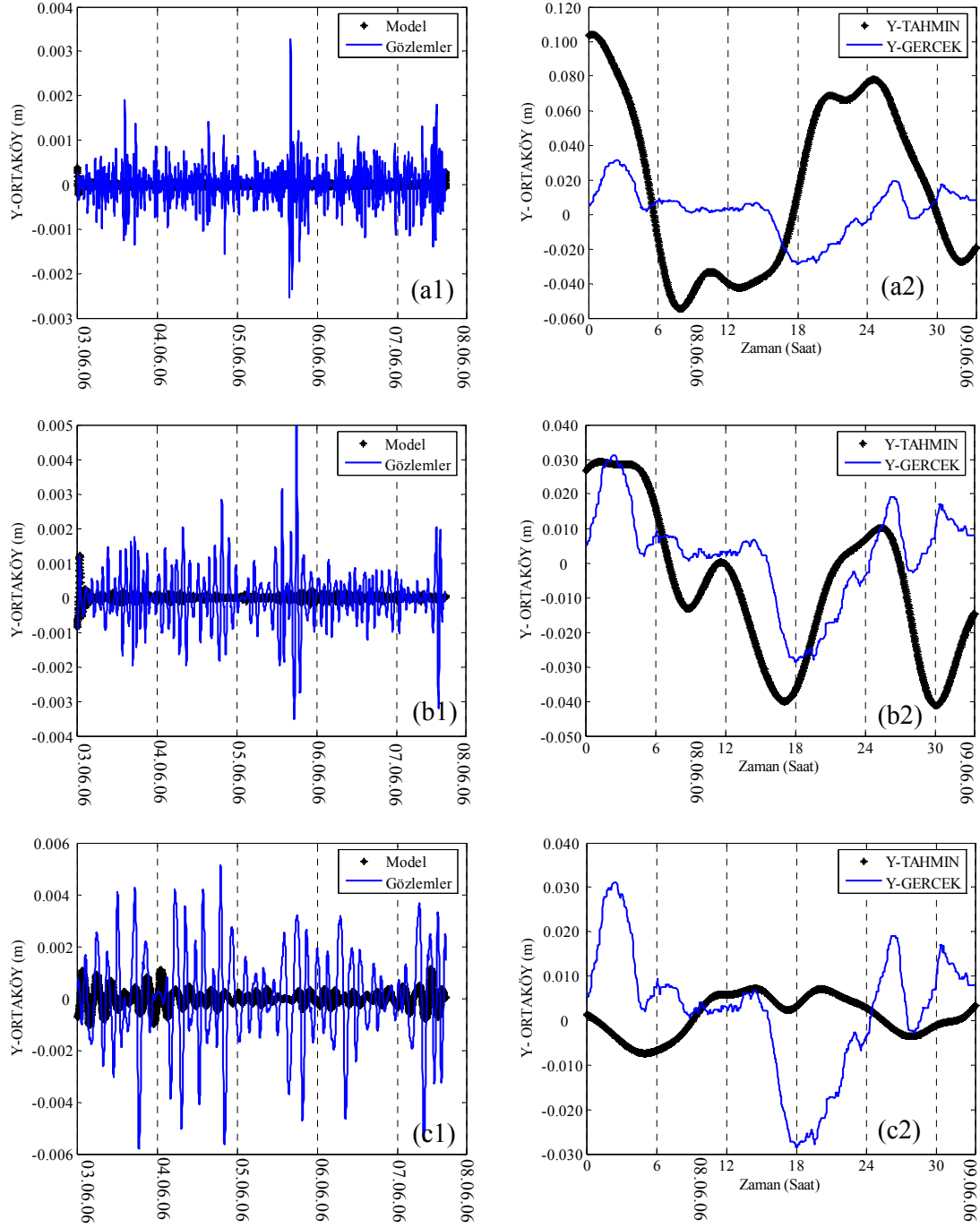


Şekil Ek 2.4 Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 10. (a1) ve 11. modeller (b1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin (a2) ve (b2) gerçek değerlerle karşılaştırılması

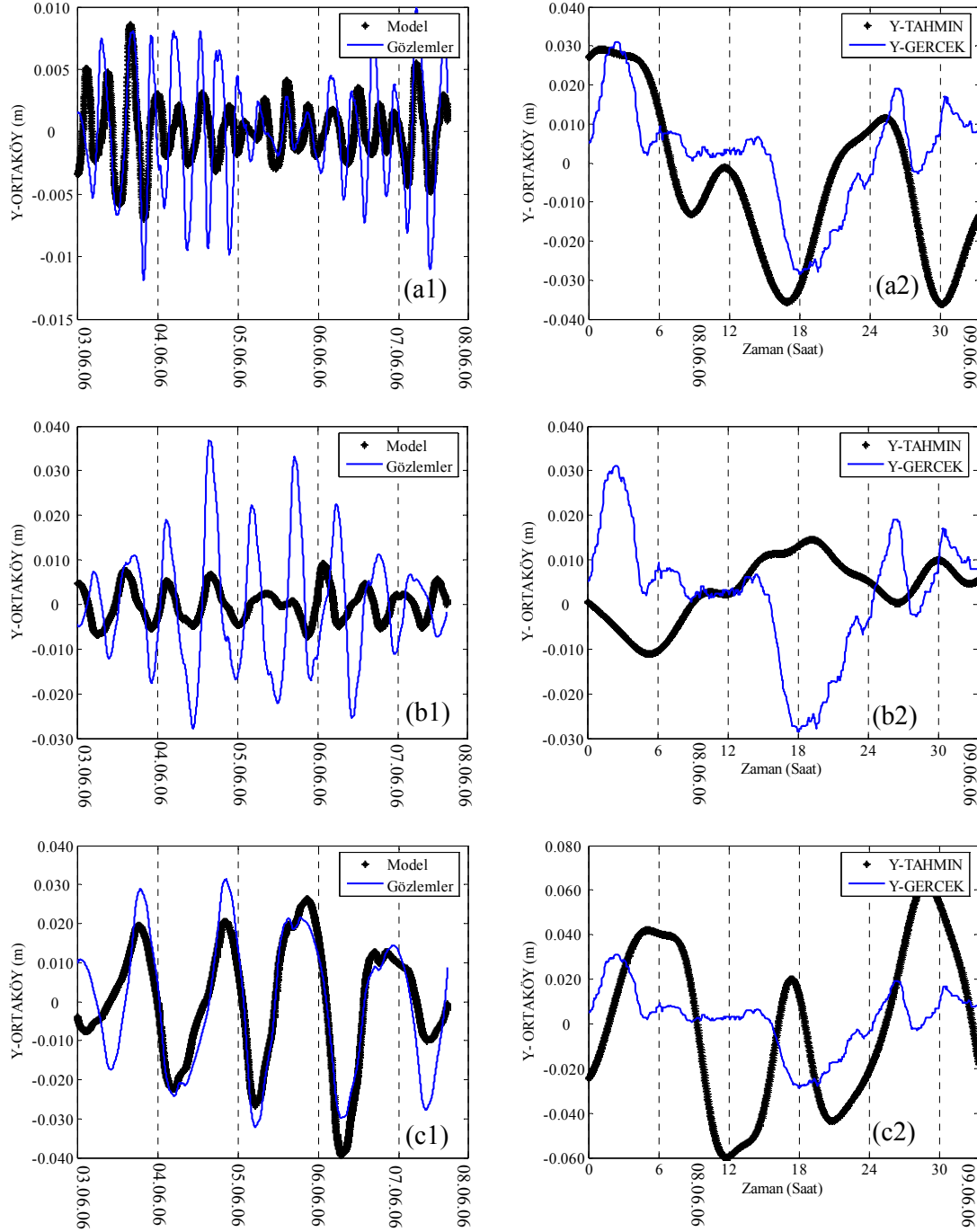
Ek 3 Ortaköy kule Y değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



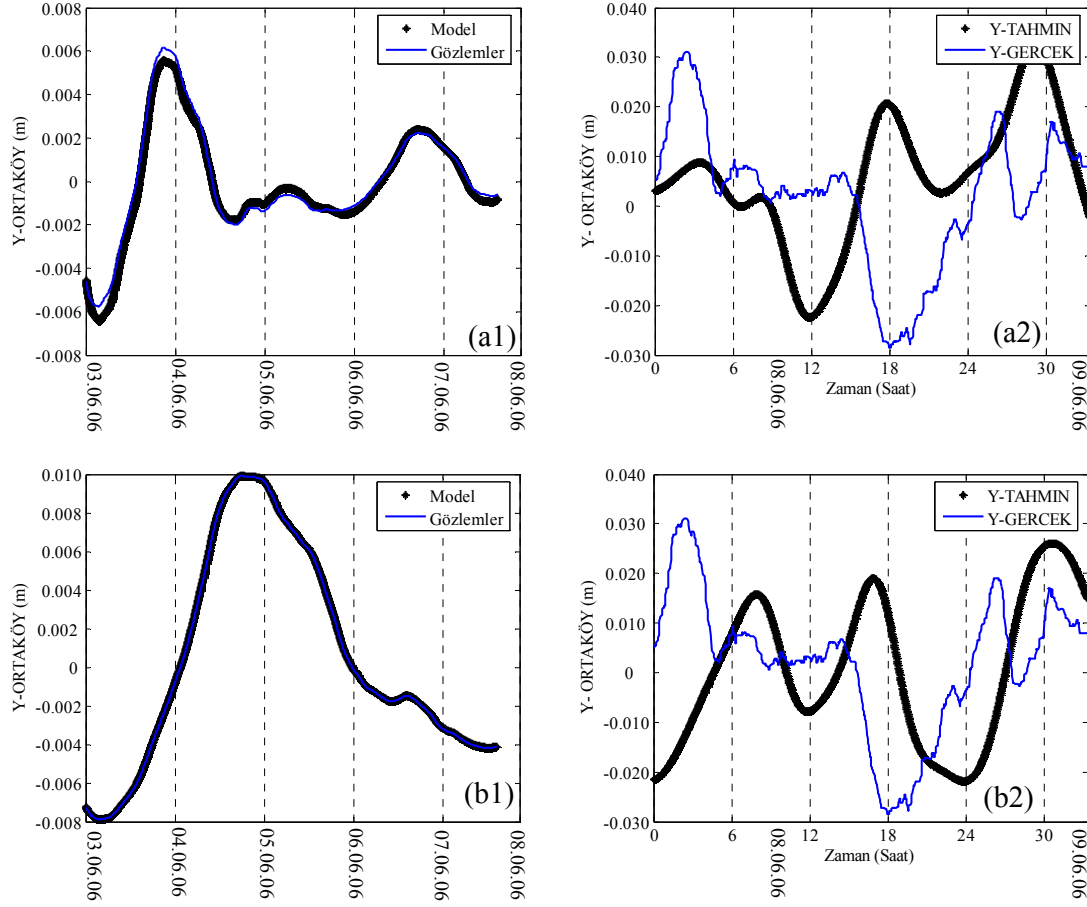
Şekil Ek 3.1 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 3.2 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

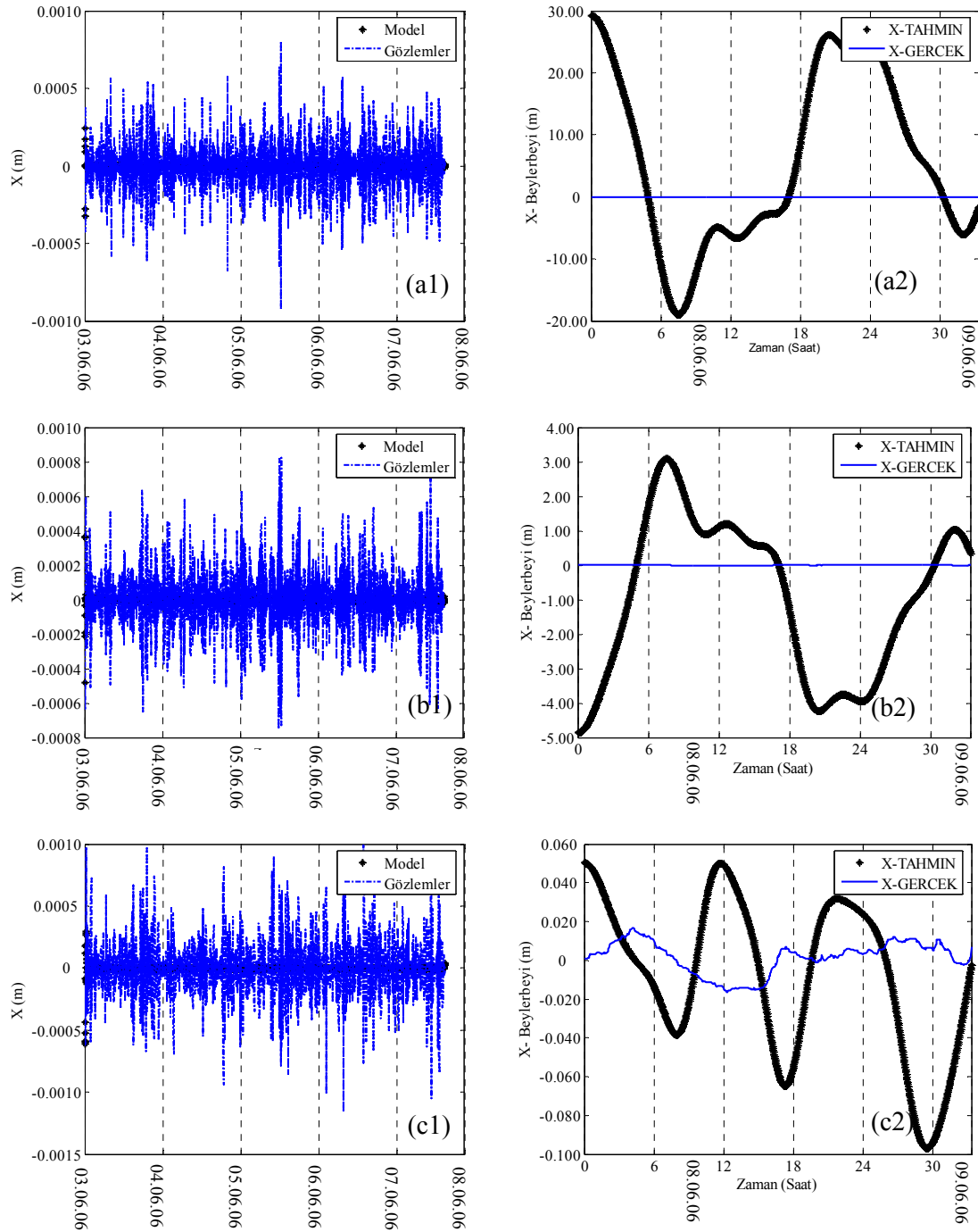


Şekil Ek 3.3 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

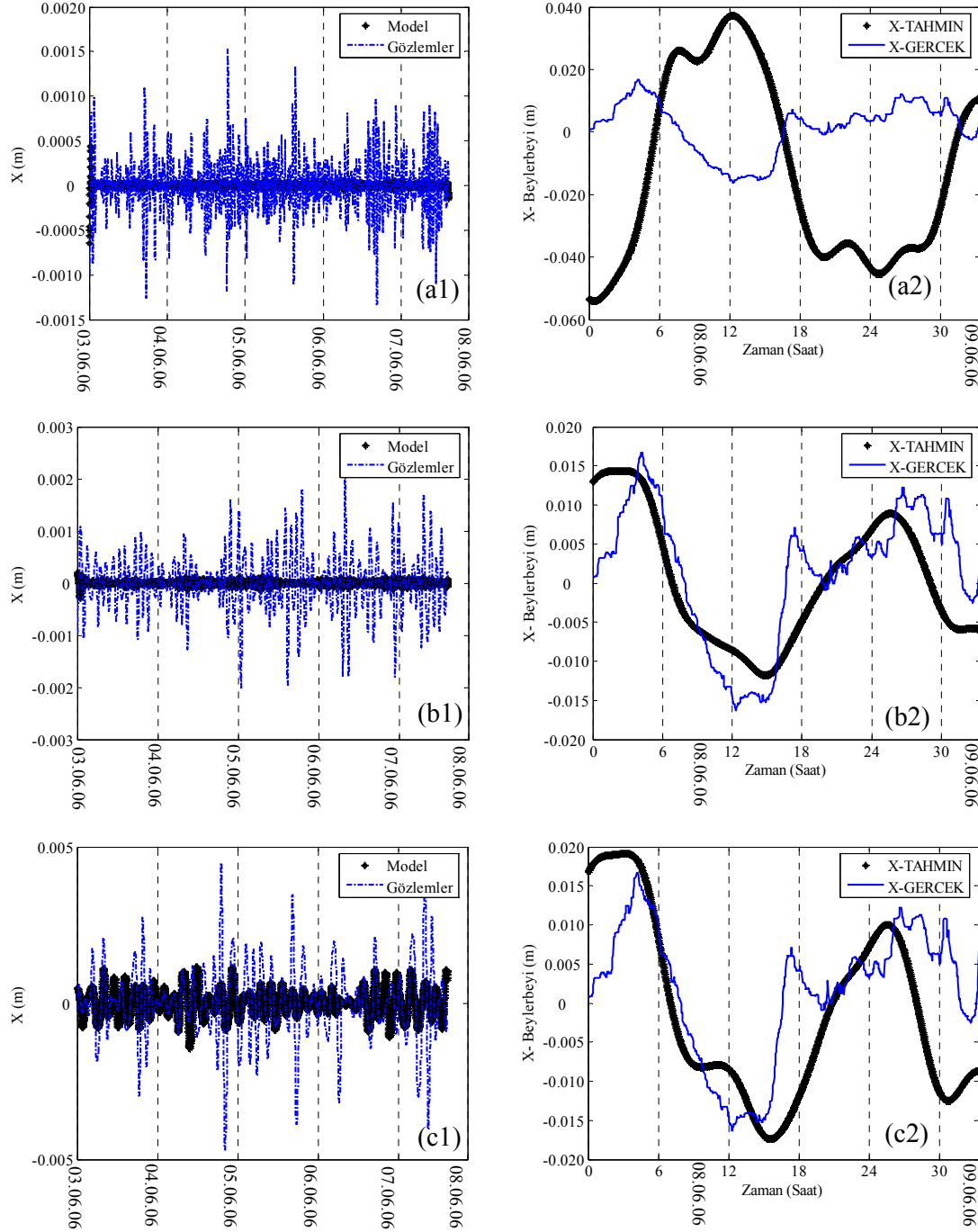


Şekil Ek 3.4 Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 9. (a1) ve 10.(b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2) ve (b2)

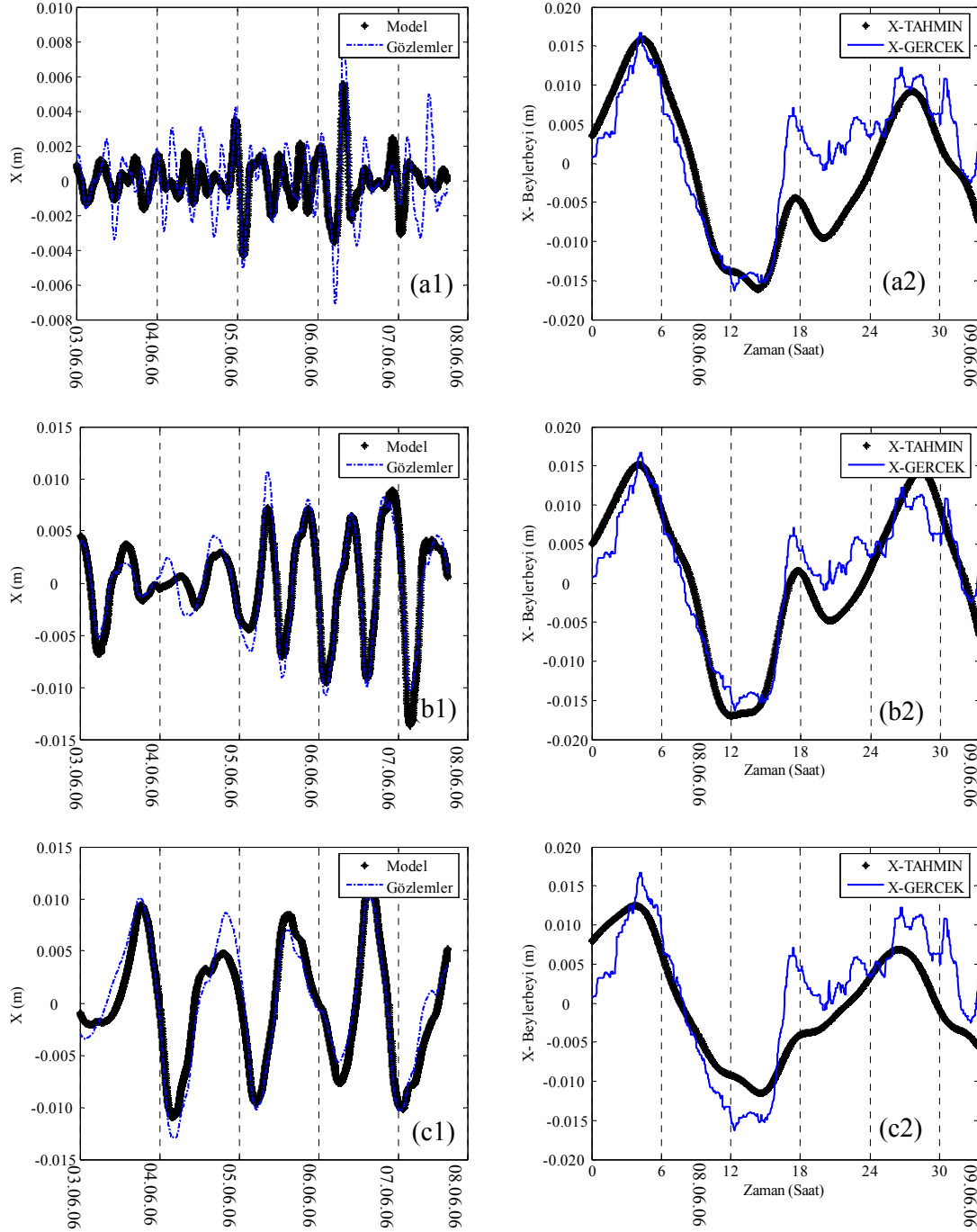
Ek 4 Beylerbeyi kule X değerinin ileriye yönelik tahminleri için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



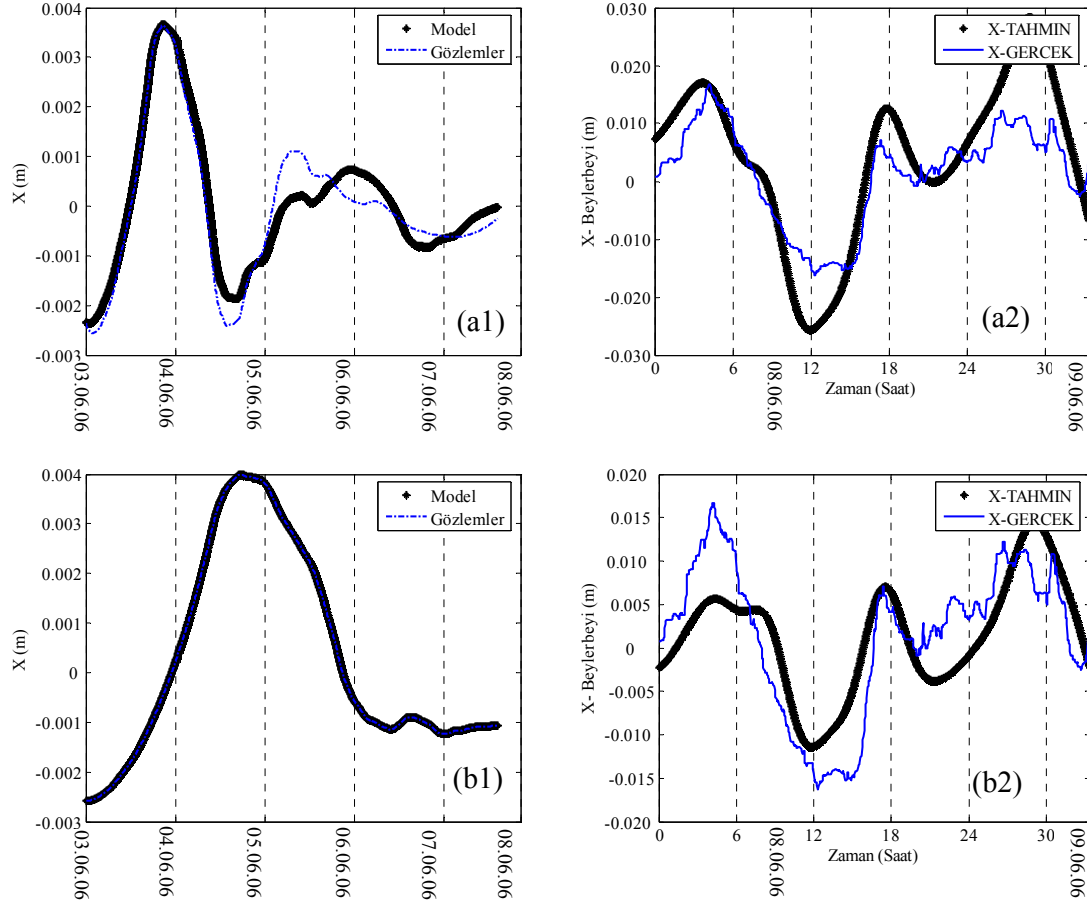
Şekil Ek 4.1 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 1. (a1), 2.(b1) ve 3. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 4.2 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 4. (a1), 5.(b1) ve 6. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

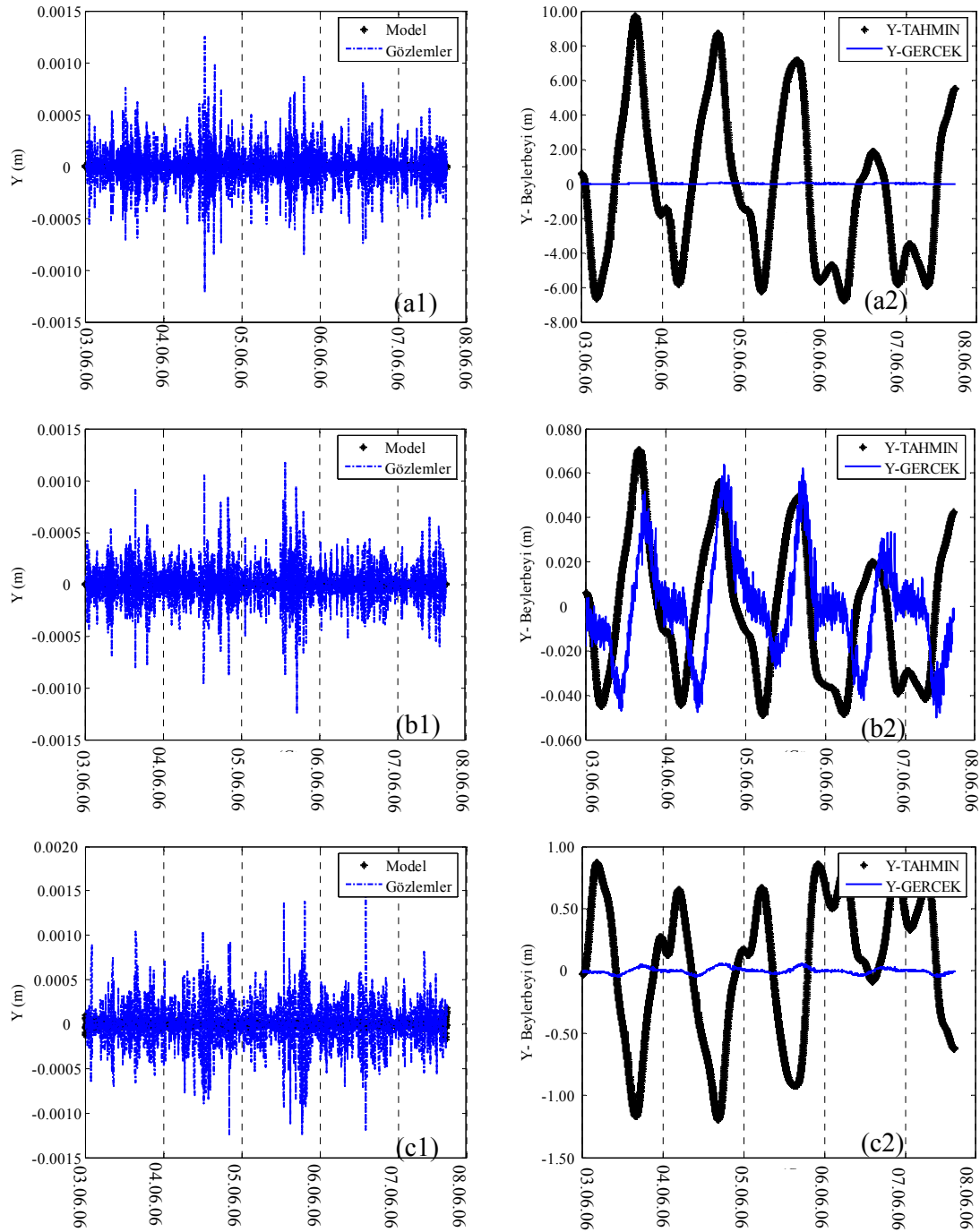


Şekil Ek 4.3 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 7. (a1), 8.(b1) ve 9. modeller (c1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

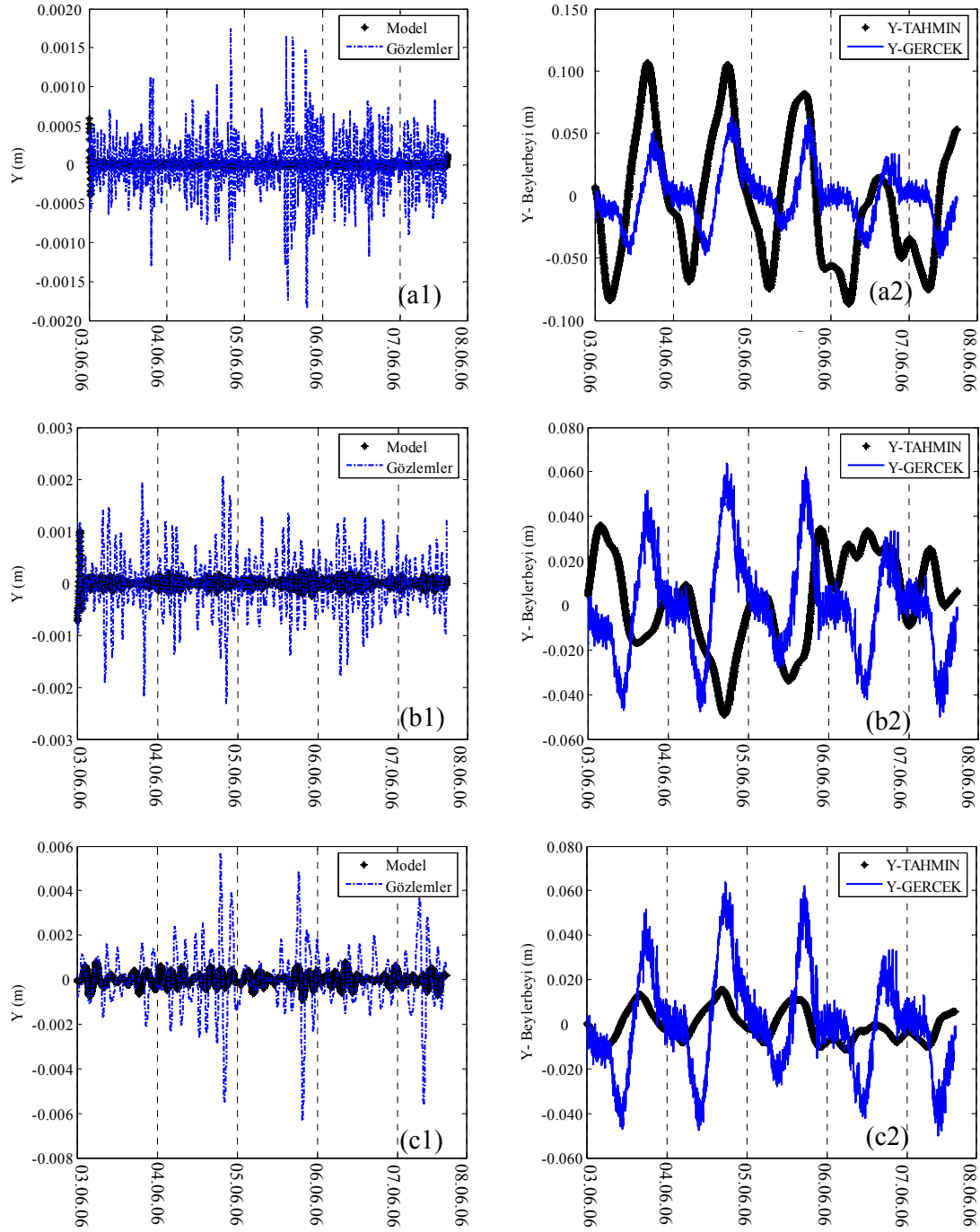


Şekil Ek 4.4 Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 10. (a1) ve 11. modeller (b1) ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2))

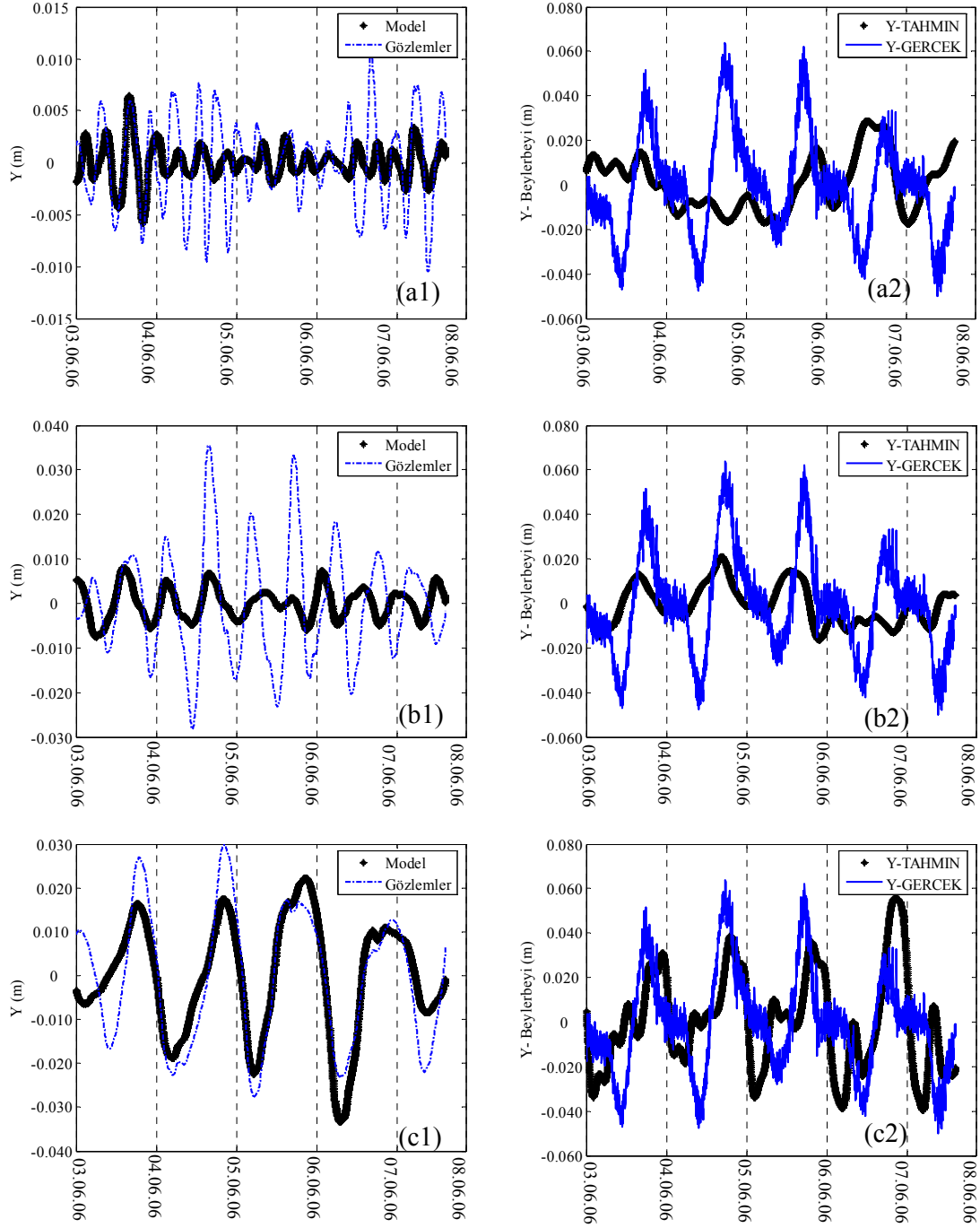
Ek 5 Beylerbeyi kule Y değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



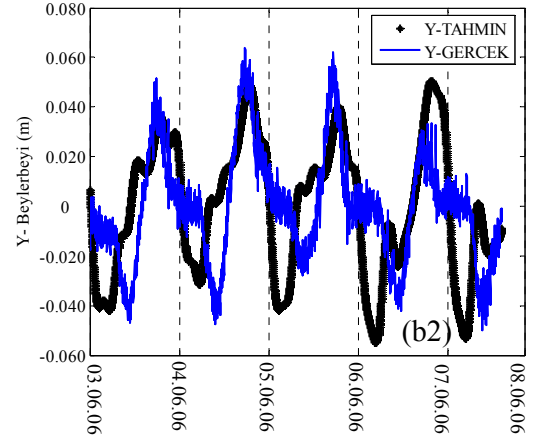
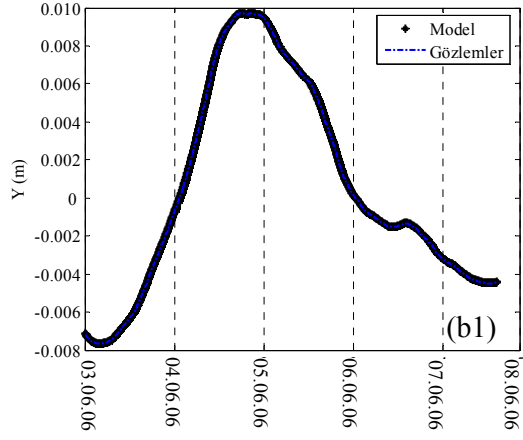
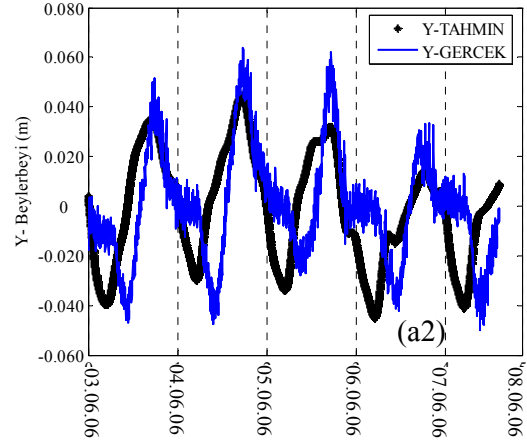
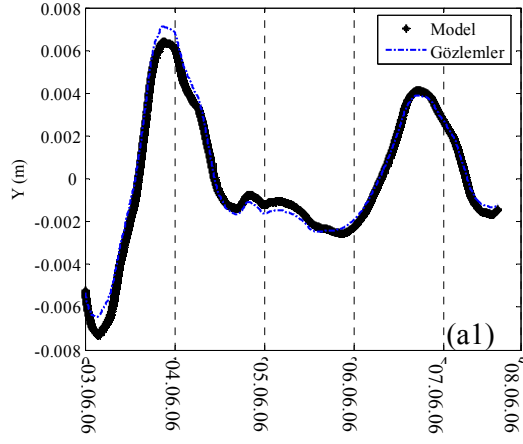
Şekil Ek 5.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 5.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

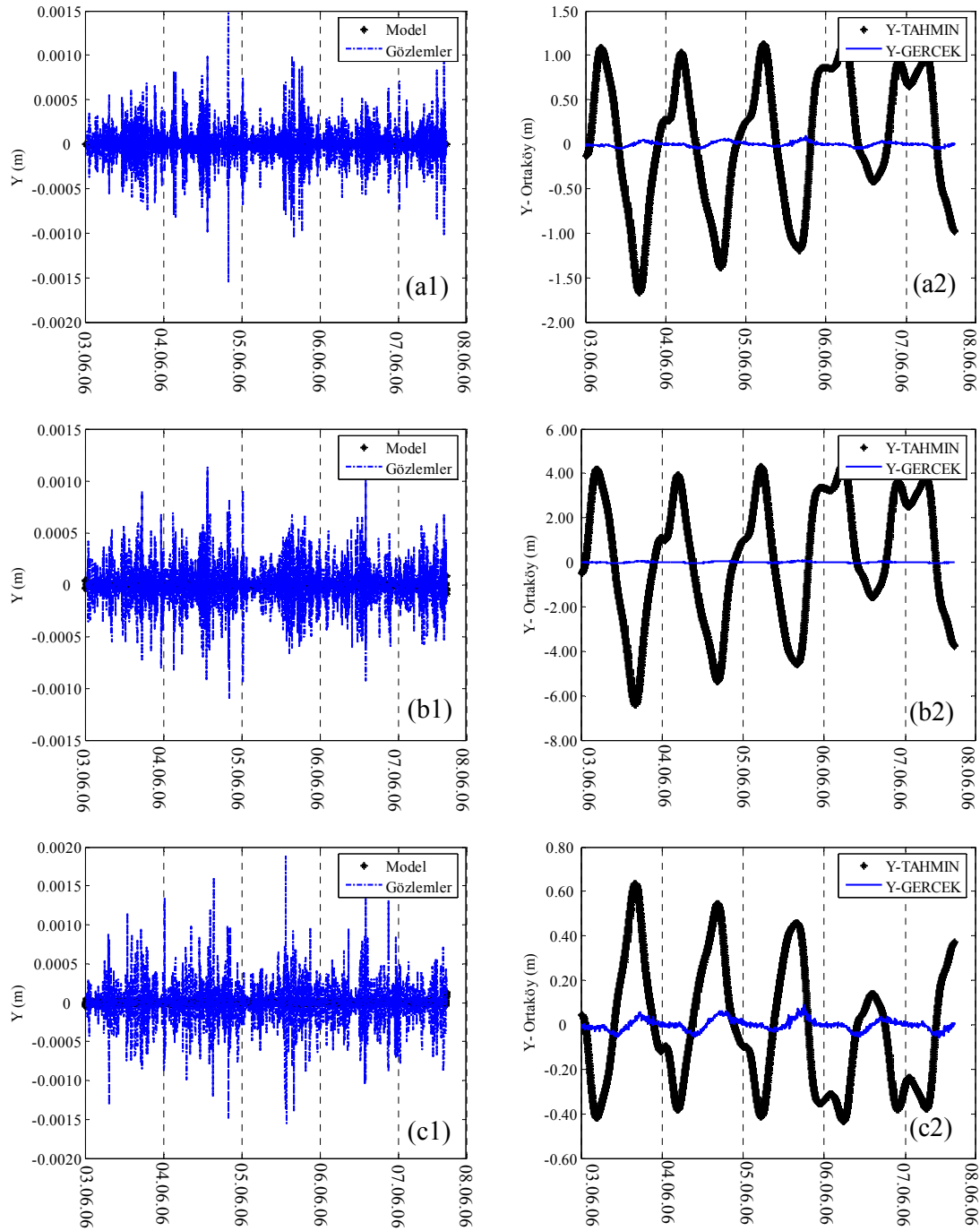


Şekil Ek 5.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

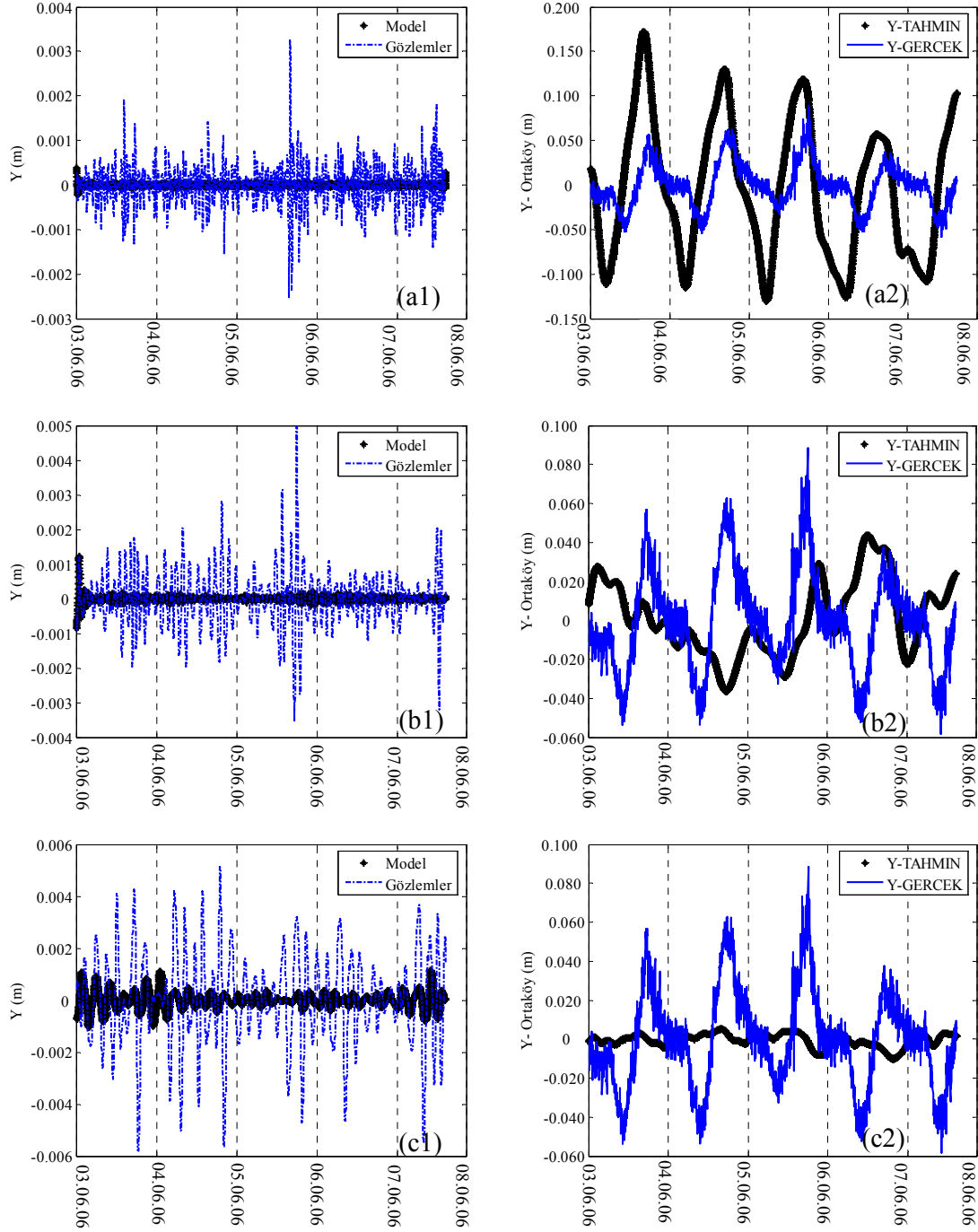


Şekil Ek 5.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule Y değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2)

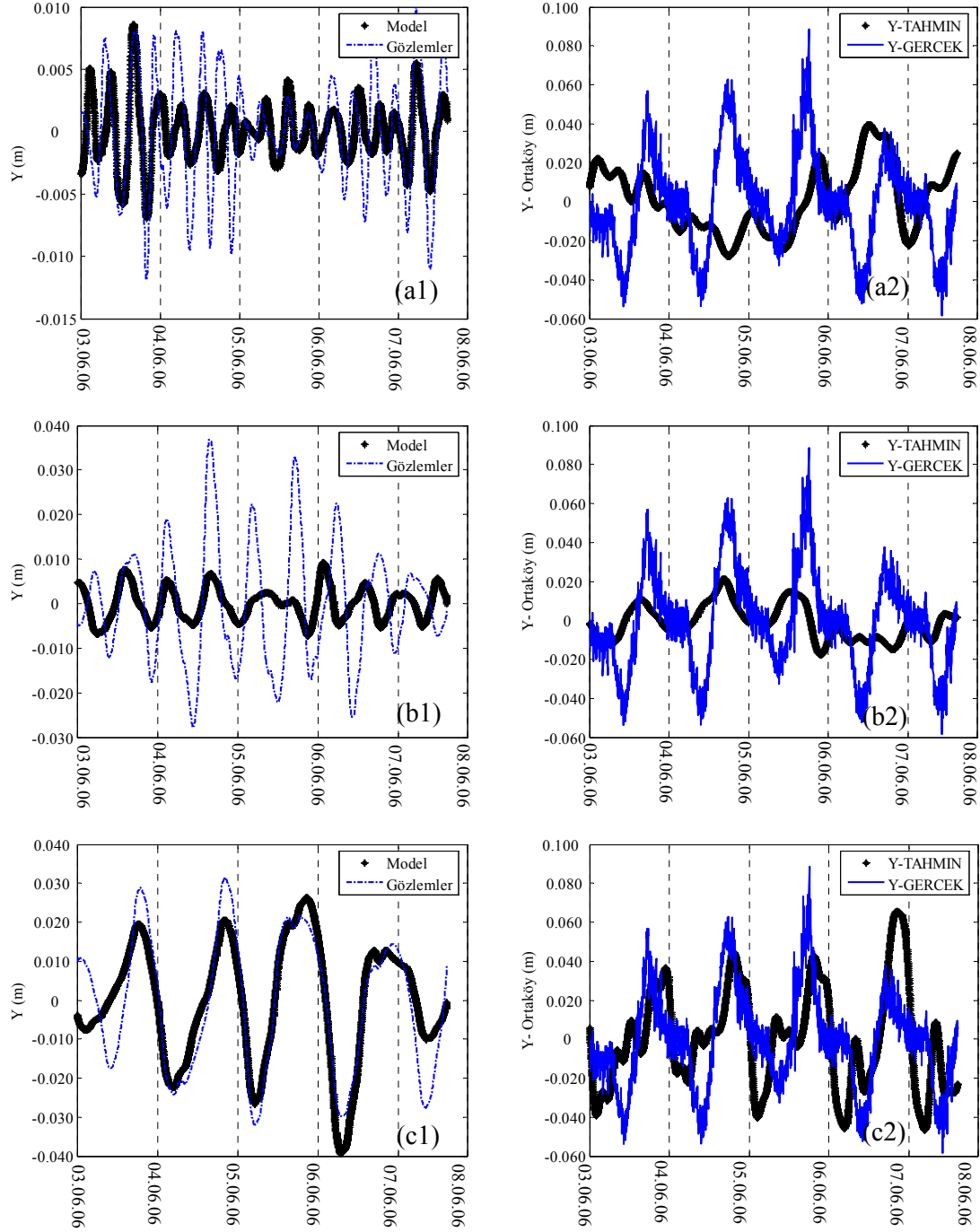
Ek 6 Ortaköy kule Y değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



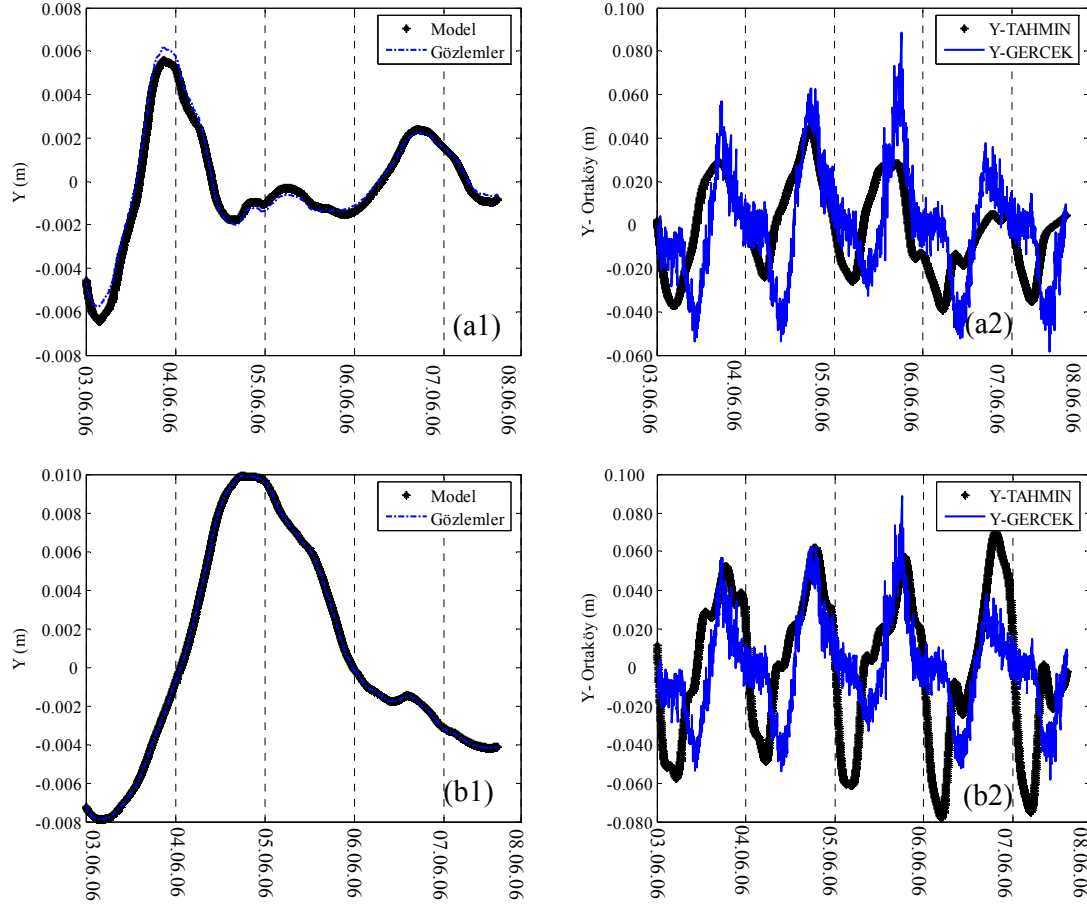
Şekil Ek 6.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 6.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

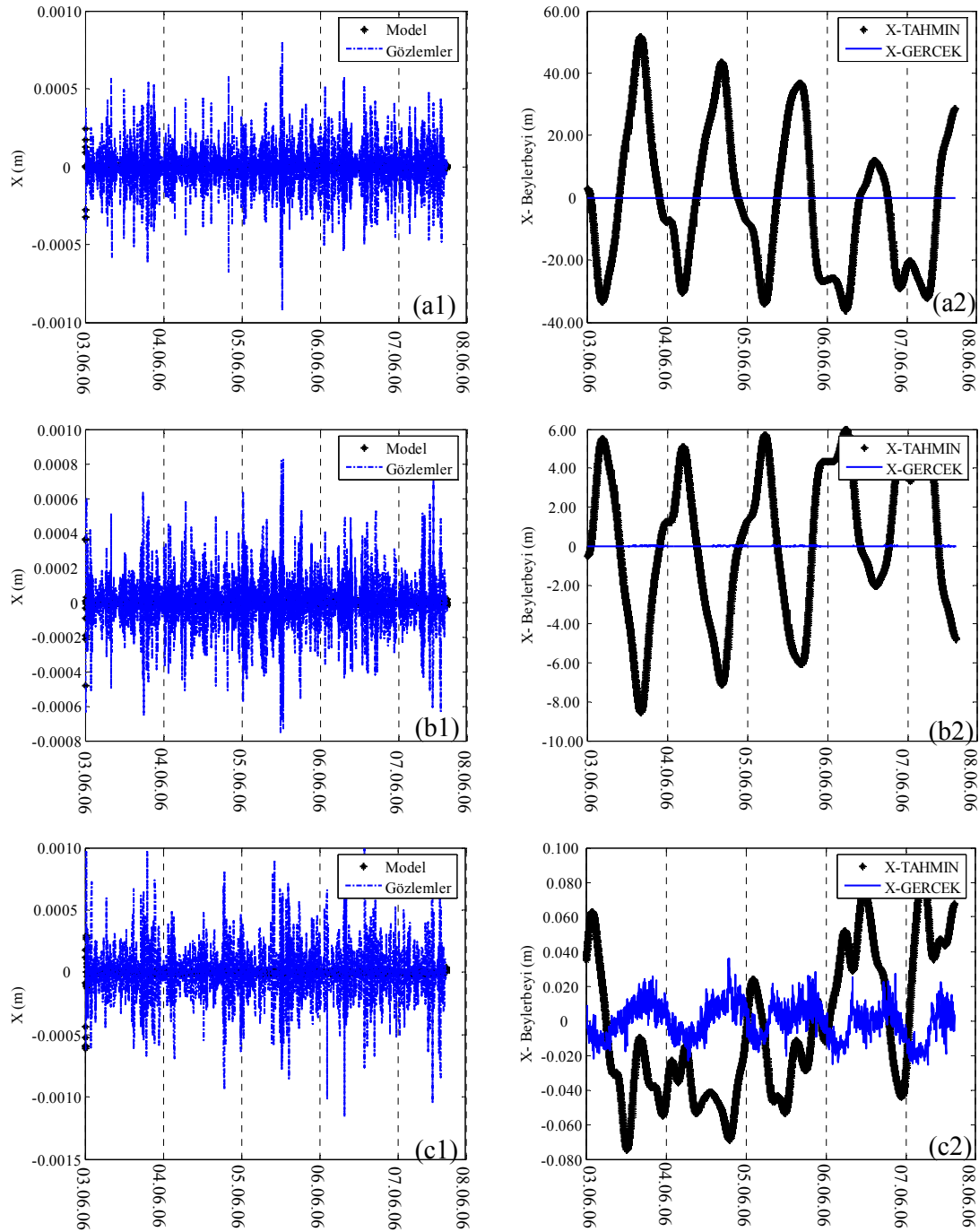


Şekil Ek 6.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

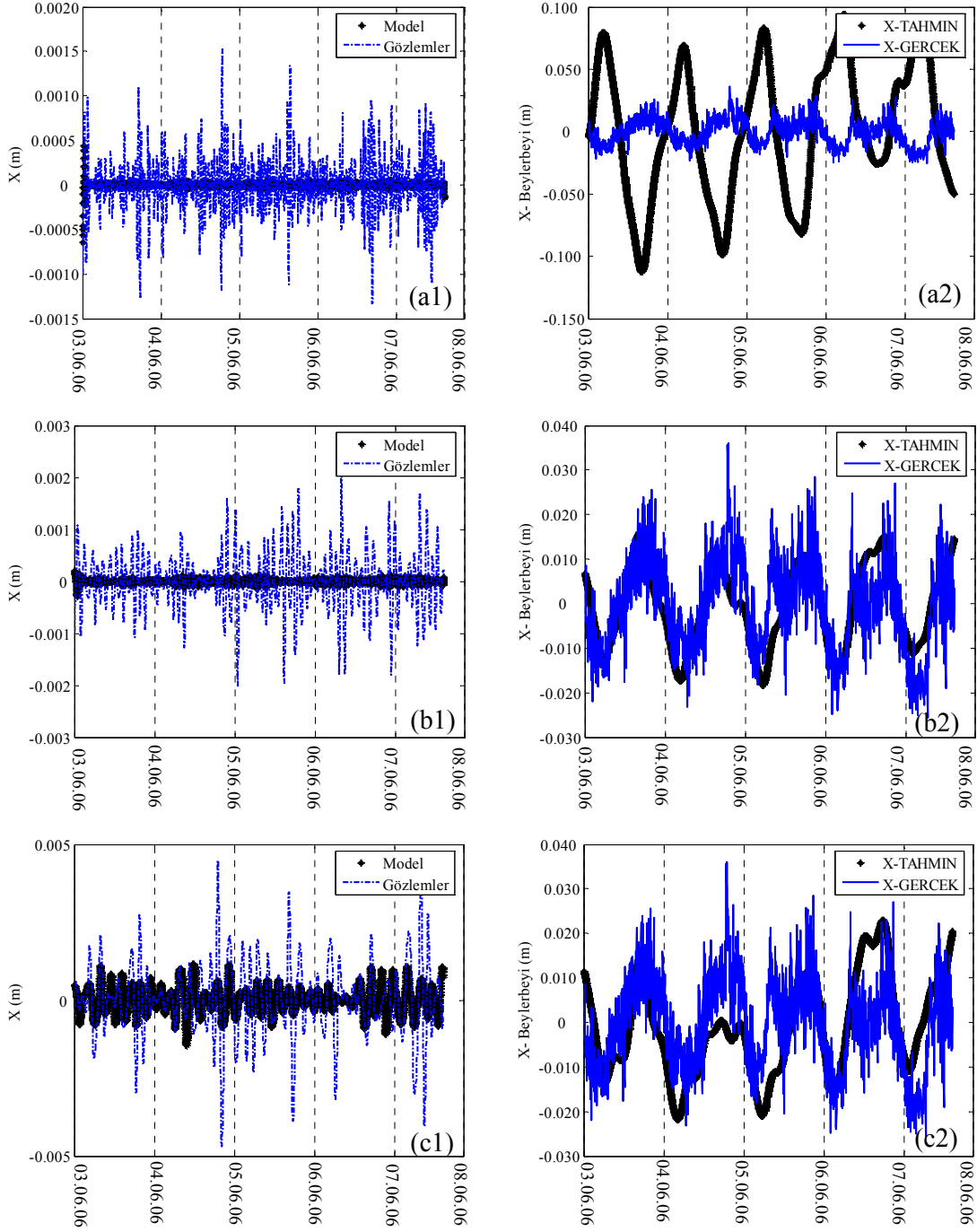


Şekil Ek 6.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule Y değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2)

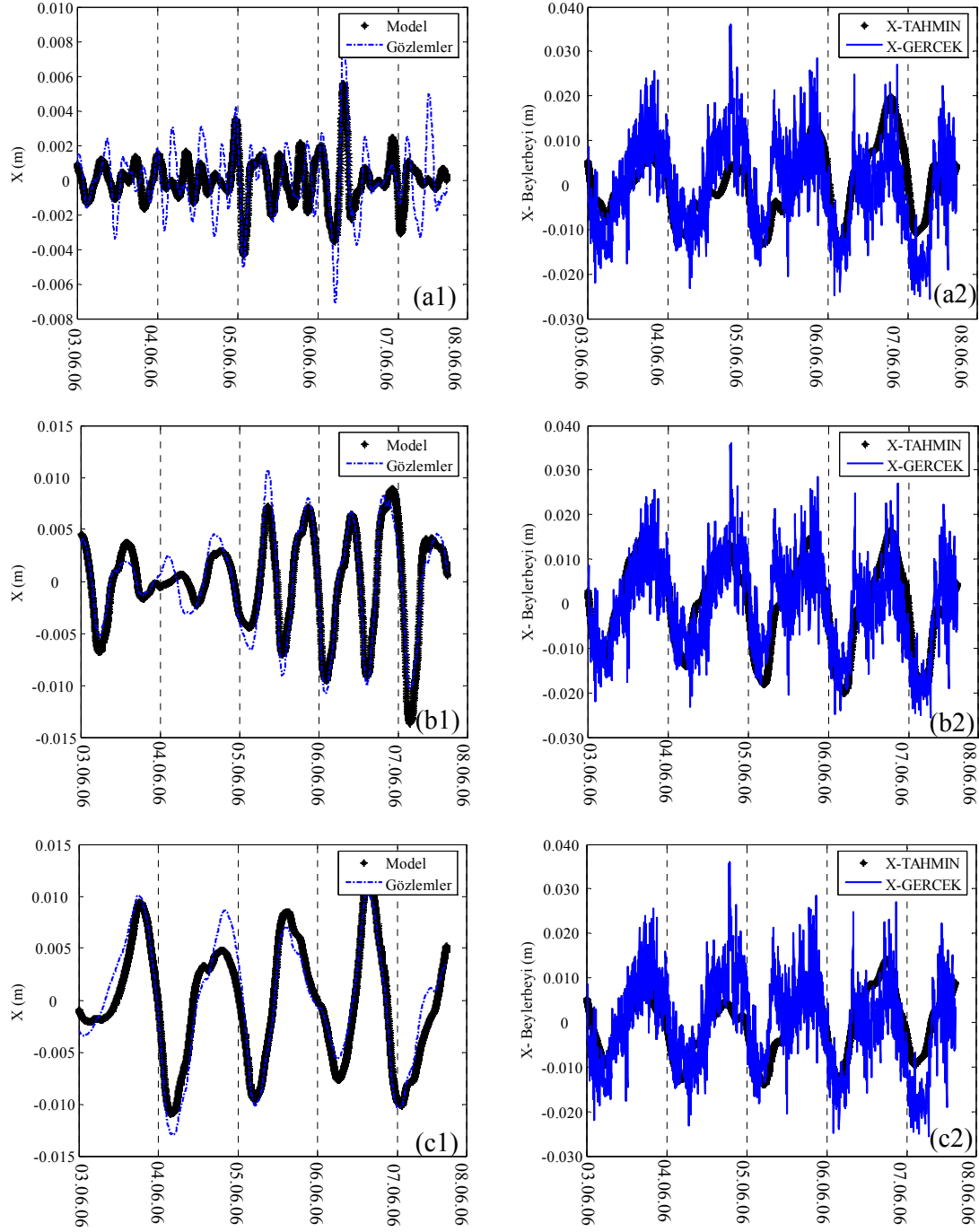
Ek 7 Beylerbeyi kule X değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



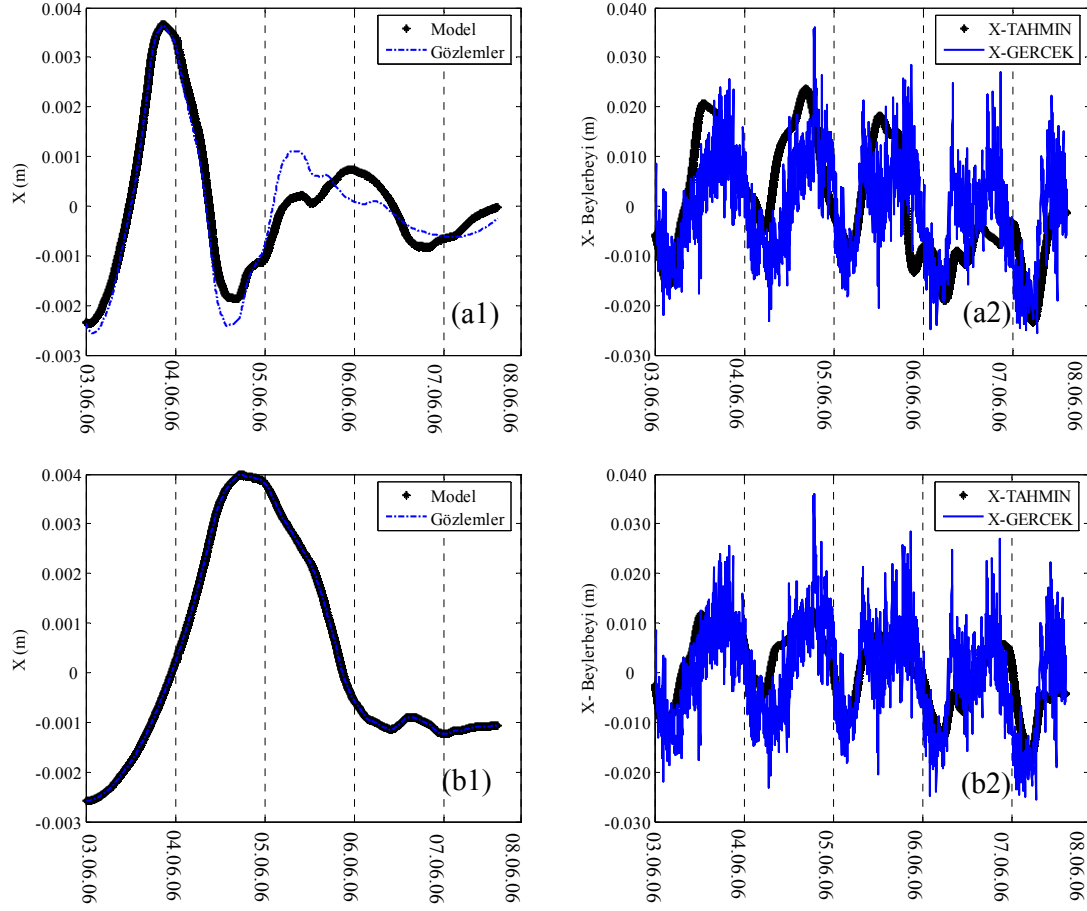
Şekil Ek 7.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 7.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

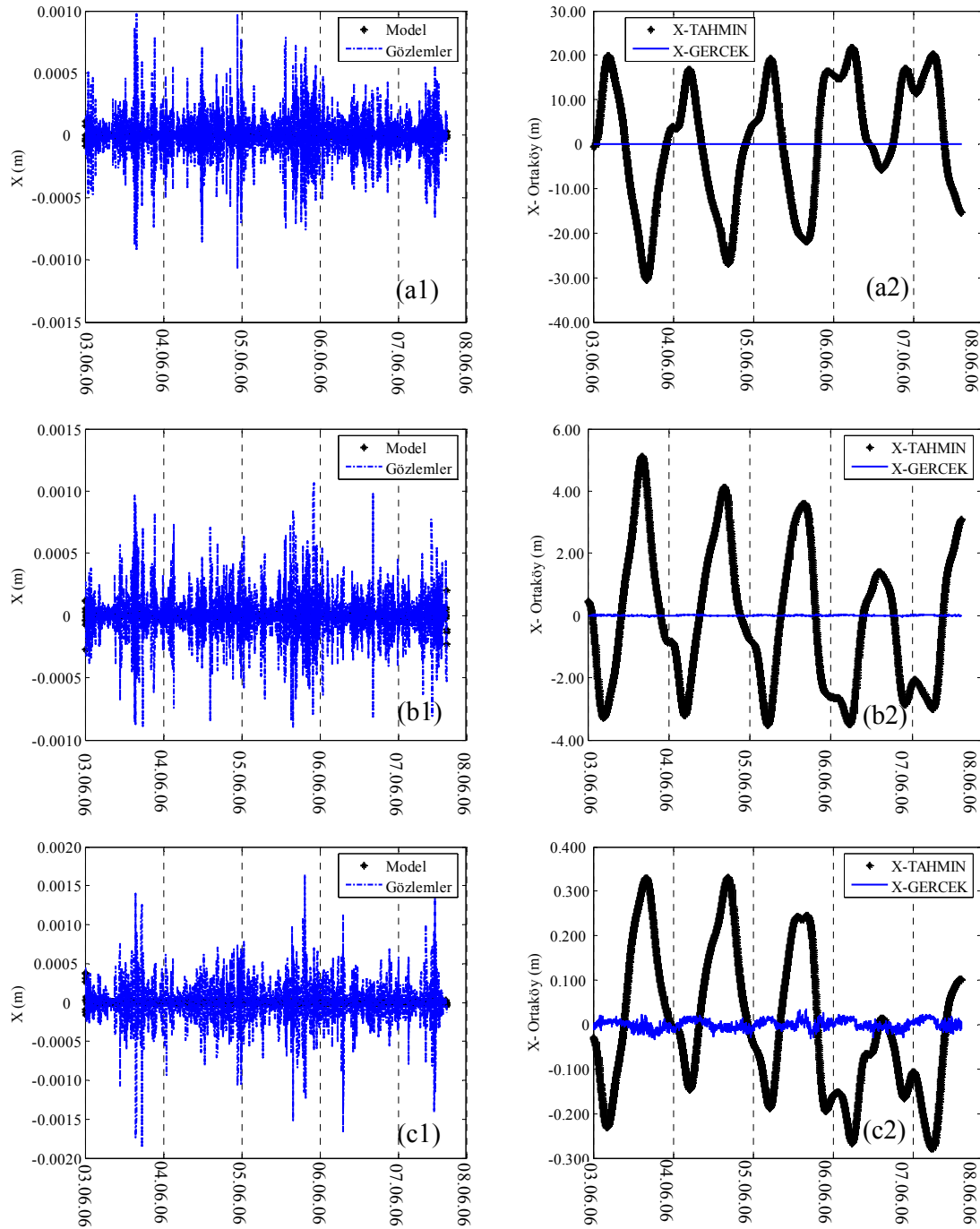


Şekil Ek 7.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)

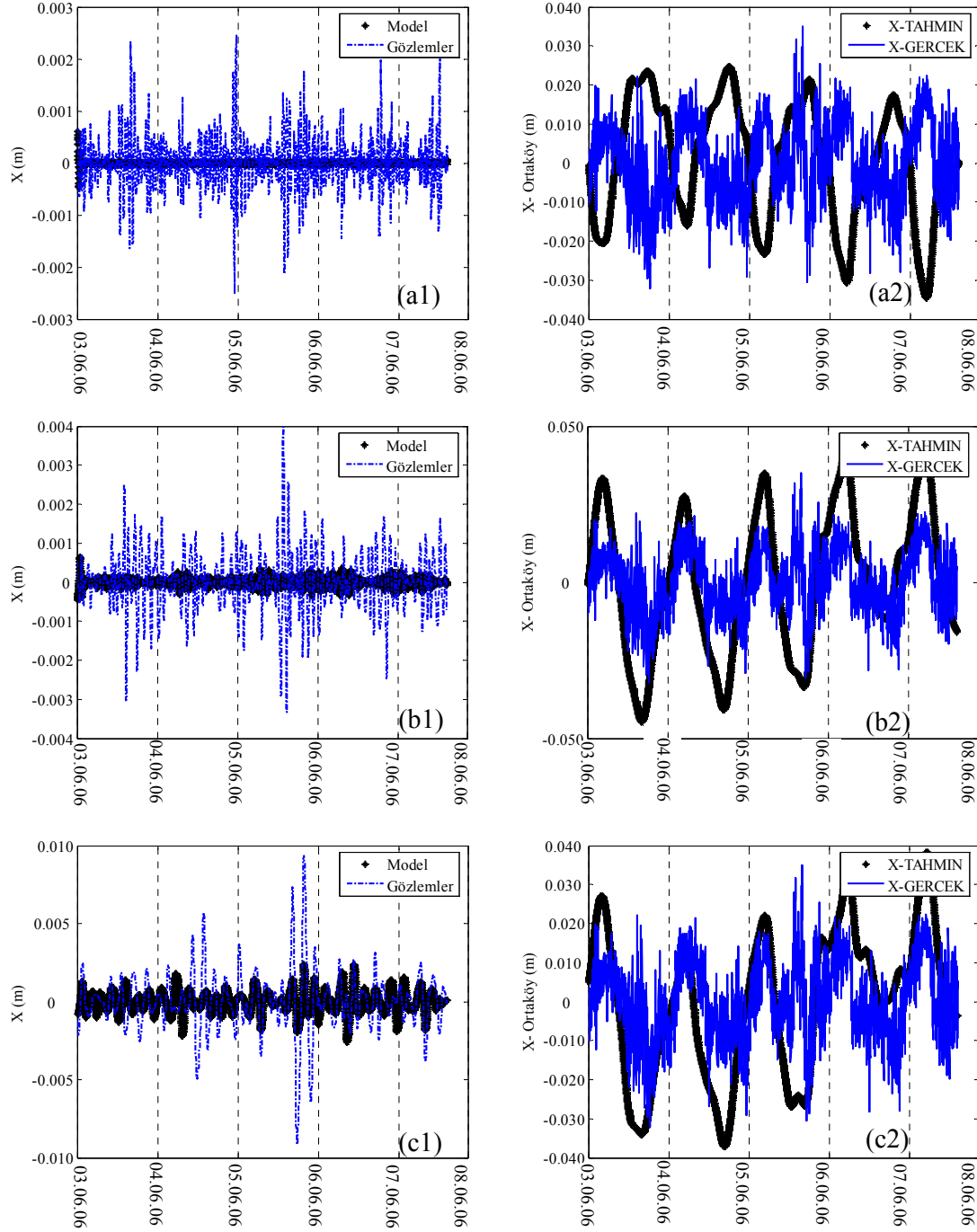


Şekil Ek 7.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Beylerbeyi kule X değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2)

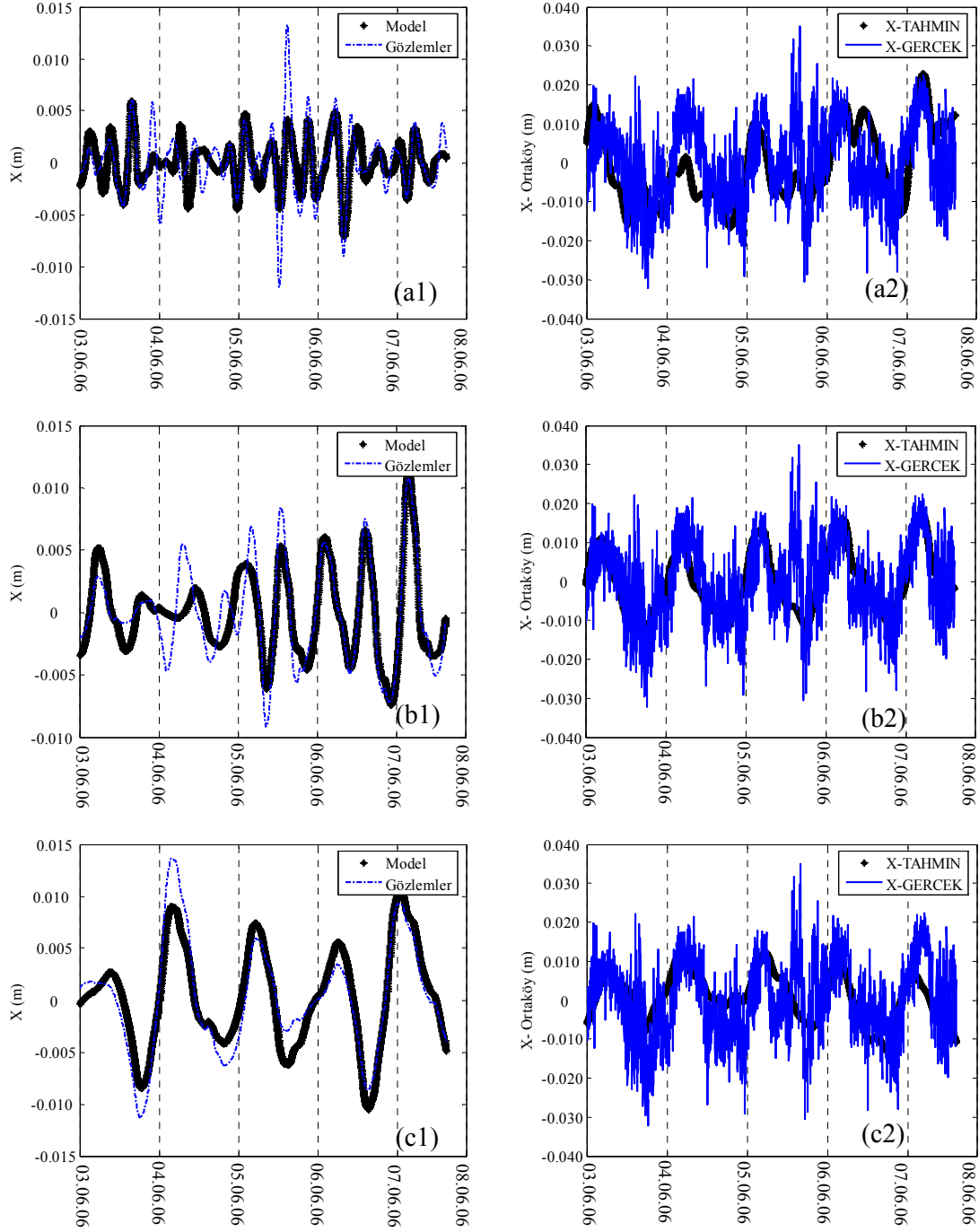
Ek 8 Ortaköy kule X değerinin kullanılmayan veriler kullanılarak modellenmesi için dalgacık analizi ile oluşturulan 11 adet modelin gözlemlerle olan farkları ve modellerden elde edilen verilerle gerçek verilerin karşılaştırılması.



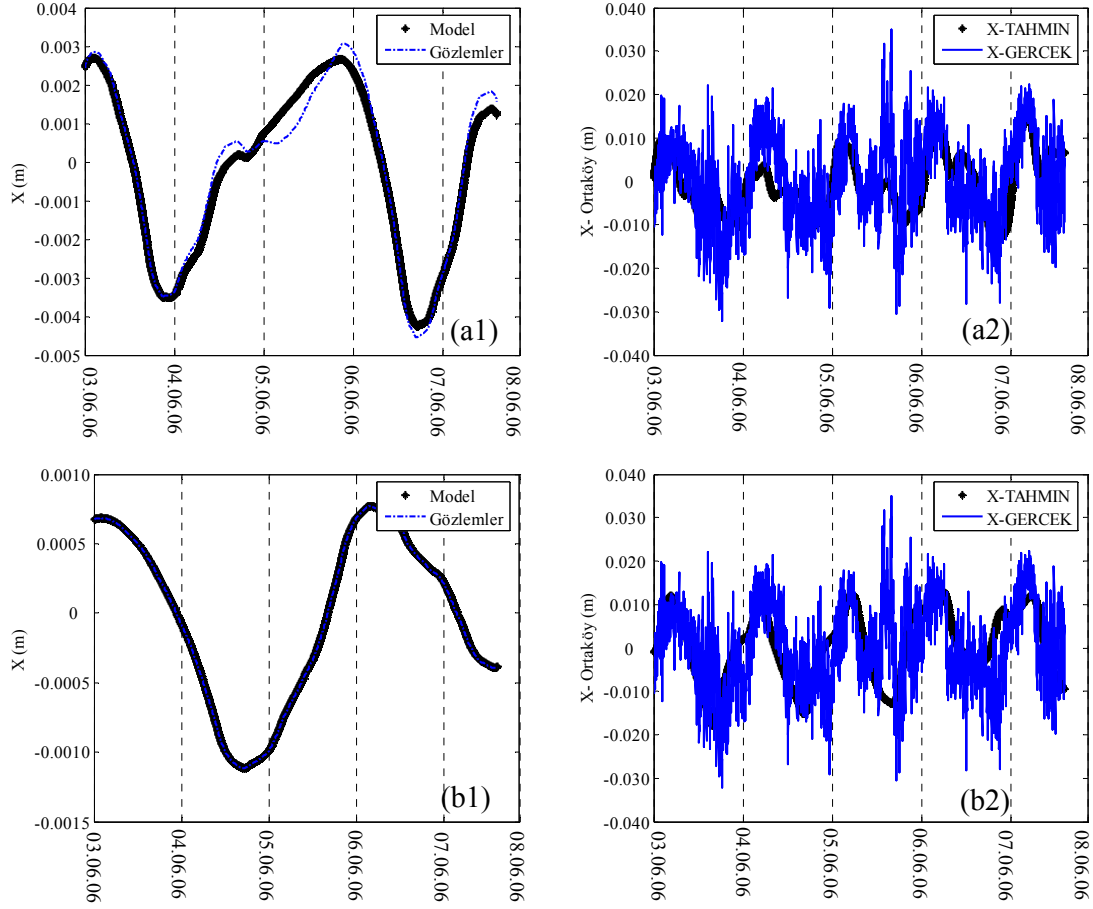
Şekil Ek 8.1 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 1 (a1), 2 (b1) ve 3. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 8.2 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 4 (a1), 5 (b1) ve 6. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 8.3 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 7 (a1), 8 (b1) ve 9. (c1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2) ve (c2)



Şekil Ek 8.4 Kullanılmayan veriler kullanılarak Ortaköy kule X değeri için oluşturulan 10 (a1) ve 11. (b1) modeller ile bu modellerle yapılan tahminlerin gerçek değerlerle karşılaştırılması (a2), (b2)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	18.03.1976	
Doğum yeri	Niğde	
Lise	1990-1993	Bor Şehit Nuri Pamir Lisesi
Lisans	1994-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı
Doktora	2002-2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1998-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri
Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi