

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK YAPILARINDAKİ
DİNAMİK DAVRANIŞLARIN
JEODEZİK ÖLÇMELERLE BELİRLENMESİ**

Jeodezi ve Fotogrametri Yük. Müh. Hediye ERDOĞAN

**FBE Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 07 Nisan 2006
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. V. Engin GÜLAL (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ömer AYDIN (YTÜ)
Prof. Dr. Rasim DENİZ (İTÜ)
Prof. Dr. Muhammet ŞAHİN (İTÜ)
Doç. Dr. Halil ERKAYA (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Mühendislik Yapılarının İzlenmesi Gelişim Süreci	3
1.1.1 Sistem Analizine Göre Tarihi Gelişim.....	3
1.1.2 Sistem Analizi Kapsamında Yapılan Deformasyon Çalışmaları ve Sonuçları	5
1.1.3 Deformasyon Hakkında Genel Bilgiler	9
2 DİNAMİK SİSTEM OLARAK ASMA KÖPRÜLER	16
2.1 Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları.....	16
2.2 Asma Köprülerde Yorulma	18
2.3. Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler	20
2.3.1 Trafik Yüğü	20
2.3.2 Sıcaklık Değişimi	21
2.3.3 Rüzgar Kuvveti.....	23
2.4 Mühendislik Yapılarında Doğal Frekans ve Modların Belirlenmesi.....	24
3. DİNAMİK SİSTEMLERİN ETKİ-TEPKİ BÜYÜKLÜĞÜ İLE TANIMLANMASI	29
3.1 Parametrik Tanımlama.....	31
3.2 Parametrik Olmayan Tanımlama.....	33
3.2.1 ARX Model ve Parametre Kestirimi	36
3.2.1.1 Model Derecesinin Belirlenmesi	39
3.2.1.2 Model Uygunluğunun Test Edilmesi.....	39
3.2.2 Regresyon Analizi	40
3.2.3 Çoklu Regresyon Analizi	43
3.2.4 Çapraz Korelasyon ve Çapraz Kovaryans Fonksiyonları	43
4. DİNAMİK SİSTEMLERİN ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE TANIMLANMASI	46
4.1 Trend Bileşeni Analizi (Y_T)	47
4.2 Periyodik Bileşen Analizi (Y_P).....	49

4.2.1	Hızlı Fourier Dönüşümü	49
4.2.1.1	Sinyallerin Zaman Bölgesinde Filtrelenmesi	52
4.2.1.2	Sinyallerin Pencerelemesi	54
4.2.1.3	Sinyallerin Örnekleme Frekanslarının Belirlenmesi	55
4.2.2	Sinyallerin Enerjisi ve Gücü	56
4.2.3	Harmonik Analiz	57
4.3	Stokastik Bileşen Analizi (Z_t)	59
4.3.1	Stokastik Sürecin Modellenmesi	59
4.3.2	Otokorelasyon Fonksiyonu	60
4.3.3	Kısmi-Otokorelasyon Fonksiyonu.....	62
4.3.4	Durağan Stokastik Süreçler.....	63
4.3.4.1	Durağan Stokastik Sürecin Özellikleri	63
4.3.4.2	Otoregresif Süreç: AR(p).....	64
4.3.4.3	Hareketli Ortalama Süreç: MA(q)	65
4.3.4.4	Otoregresif-Hareketli Ortalama Süreç: ARMA(p,q)	66
4.3.5	Durağan Olmayan Stokastik Süreçler.....	67
4.3.6	Model Derecesinin Belirlenmesi	68
4.3.7	Prediksiyon Hatalarının Analizi	69
5.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	72
5.1	Boğaziçi Köprüsü ve Yapısal Özellikleri.....	72
5.2	Boğaziçi Köprüsü'nde Yapılan Jeodezik Çalışmalar.....	74
5.2.1	Referans ve Obje Noktalarının Tesisi.....	74
5.2.2	Ölçüm Planlaması İçin Örnekleme Frekansının Belirlenmesi	76
5.2.3	Jeodezik Ölçmeler	77
5.3	Etki Büyüklüklerinin Belirlenmesi.....	78
5.4	Referans ve Obje Noktaları Koordinatlarının Belirlenmesi.....	83
5.4.1	Koordinat Sisteminin Seçimi.....	83
5.4.2	Referans ve Obje Noktaları Koordinatlarının Hesabı.....	84
5.4.3	Obje Noktaları Koordinatları Değişimleri (Yapı Hareketleri) İle Etki Büyüklüklerinin Yorumlanması.....	86
5.5	Köprü Hareketlerinin Etki-Tepki Büyüklükleri İle Modellenmesi.....	94
5.5.1	ARX Model ve Çapraz-Korelasyon Analizi.....	94
5.5.2	Regresyon Analizi.....	101
5.5.3	Çoklu Regresyon Analizi.....	105
5.6	Köprü Hareketlerinin Tepki Büyüklüğü İle Modellenmesi.....	111
5.6.1	Trend Bileşeni Analizi.....	111
5.6.2	Periyodik Bileşen Analizi.....	114
5.6.2.1	Ölçülerin Filtrelenmesi ve Pencerelemesi.....	115
5.6.2.2	Ölçülerin HFD ve Güç Spektrumu.....	116
5.6.2.3	Harmonik Analiz.....	124
5.6.3	Stokastik Bileşen Analizi.....	127
5.6.3.1	Stokastik Bileşenin İç Bağımlılığının Belirlenmesi.....	127
5.6.3.2	Model Derecelerinin Belirlenmesi ve Prediksiyon Hatalarının Analizi	129
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	132
	KAYNAKLAR.....	136
	EKLER	142
	Ek 1 Referans Noktaları Dengeleme Sonuçları.....	142
	Ek 2 Kule Hareketlerinin Tanımlanması İçin Belirlenen ARX Modeller, Otokorelasyon ve	

Çapraz-Korelasyon Analizi Grafikleri.....	144
Ek 3 Yapının Y, X ve H Yönlerindeki Hareketleri Zaman Serileri Lineer Trend ve Zamana Bağlı Regresyon Fonksiyonları.....	153
Ek 4 Yapı Hareketlerinin Harmonik Analiz Sonucu Belirlenen Anlamlı Frekanslar (%95 Güven Düzeyi).....	155
Ek 5 Yapının Y, X ve H Yönlerindeki Hareketleri Zaman Serileri Stokastik Bileşen Analizi Sonuçları.....	162
ÖZGEÇMİŞ.....	168

SİMGE LİSTESİ

dl	Deplasman
α	Isı genleşme katsayısı
Δt_s	Sıcaklık farkı
l_b	Nötr noktadan itibaren köprü uzunluğu
q	Rüzgar basıncı
p	Havanın yoğunluğu
V	Rüzgar hızı
p_e	Yapı yüzeylerine etkiyen rüzgar basıncı
K	Rüzgar hız basınç katsayısı
G	Yüksekliğe bağlı olarak hesaplanan rüzgar tepki katsayısı
C	Yatay, düşey ve eğik yüzeylerde farklı dış basınç değeri için belirlenen basınç katsayısı
M	Sistem kütle matrisi
K	Sistem rijitlik matrisi
$\ddot{U}$	İvme vektörü
U	Rölatif yerdeğiştirme vektörü
K_E	Toplam standart elastik rijitlik matrisi
K_G	Toplam geometrik rijitlik matrisi
$G(q)$	Transfer fonksiyonu
α	Doğal frekans faz açısı
w_n	Doğal açısal frekans
t	Zaman
u	Harmonik hareket genliği
$y(t)$	Sistemin çıkış büyüklüğü
$u(t)$	Sistemin giriş büyüklüğü
$g(t)$	İmpuls tepki
q	İleri gecikme işlemci
q^{-1}	Geri gecikme işlemci
$v(t)$	Sistemin bozucu etkileri
$e(t)$	Beyaz gürültü
σ_e^2	$e(t)$ 'nin varyans
$H(q)$	Stokastik kesimin transfer fonksiyonu
x^T	Sistemin bilinmeyen parametreleri
$\bar{y}(t)$	Sistemin kestirim değerleri
$\varepsilon(t)$	Prediksiyon hatası
J_N	Kayıp fonksiyon
k	Gecikme sayısı
s_{rk}	Otokorelasyon katsayıları standart sapması
x	Etki büyüklüğü (regresyon analizi)
R^2	Regresyon analizi belirlilik katsayısı
$\bar{R}^2$	Düzeltilmiş belirlilik katsayısı
$c_{uy}(k)$	Çapraz-kovaryans
$r_{ey}(k)$	Çapraz-korelasyon katsayısı
r_k	Korelasyon katsayısı
z	Standart normal değişken
$X_s(f)$	$x(t)$ sinyali Fourier dönüşümü
$e^{2\pi jft}$	Karmaşık ve periyodik üstel fonksiyon
$w(t)$	Pencere fonksiyonu
∇y_{t+1t}	Birinci dereceden fark alma
$\nabla^2 y_{t+2t}$	İkinci dereceden fark alma
T_s	Örnekleme periyodu

f_s	Örnekleme Frekansı
f_m	Sinyalin band genişliği
E	Sinyal enerjisi
$S(f)$	Sürekli enerji spektral yoğunluğu
S_m	Ayrık enerji spektral yoğunluğu
qf	Frekans sayısı
R_i	Genlik
φ_i	Faz açısı
Z_p	Periyodik bileşen giderilmiş sinyal
Z_t	Standartlaştırılmış stokastik bileşen
$\Phi_{k,k}$	Kısmi otokorelasyon katsayıları
μ	Stokastik sürecin ortalaması
$\theta_1, \theta_2, \dots$	Otoregresif (AR) parametreler
$\hat{x}$	x 'in tahmin değerleri
$\text{Cov}(\hat{x})$	$\hat{x}$ 'in kovaryansı
φ_k	Ortalama hareket (MA) parametreleri
p	AR modelin derecesi
q	MA modelin derecesi

KISALTMA LİSTESİ

AIC	Akaike Bilgi Kriteri
AR(p)	Otoregresif Süreç
ARIMA(p,d,q)	Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama Süreci
ARMA	Otoregresif Hareketli Ortalama Süreç
ARX	Ekstra Girişli Otoregresif Süreç
ARMAX	Ekstra Girişli Ortalama Hareketli Otoregresif Süreç
BIC	Bayes Bilgi Kriteri
BJ	Box-Jenkins
FIG	International Federation of Surveyors
FPE	Final Prediksiyon Hatası
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
MA(q)	Ortalama Hareket
OE	Hata çıkışlı model
TCK	Türkiye Cumhuriyeti Karayolları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Deformasyonların sınıflandırılması	10
Şekil 1.2 Kule şeklindeki bir objedeki deplasman ve şekil değişimleri	10
Şekil 1.3 Ani etkiye sonucu oluşan deformasyon	11
Şekil 1.4 Doğrusal etki sonunda obje deformasyonları	12
Şekil 1.5 Periyodik etkiye karşılık deformasyon.....	12
Şekil 1.6 Sistem teorisinin kısımları	14
Şekil 1.7 Deformasyon modelleri	14
Şekil 2.1 Bir asma köprünün kısımları	17
Şekil 2.2 Basit bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları.....	25
Şekil 3.1 Sistemlerin giriş ve çıkış büyüklükleri ile gösterimi.....	29
Şekil 3.2 Sistemlerin giriş ve çıkış büyüklük sayısına bağlı olarak tanımlanması.....	30
Şekil 3.3 Dinamik sistemlerde etki-tepki ve transfer fonksiyonu ilişkisi	30
Şekil 3.4 Sistem tanımlaması	31
Şekil 3.5 Kalman-Filtreleme Tekniği	32
Şekil 3.6 İmpuls tepkisi.....	33
Şekil 3.7 Parametrik olmayan modelin $G(q)$ transfer fonksiyonu.....	34
Şekil 3.8 Bozucu etkileri ile tanımlanan model.....	34
Şekil 3.9 Parametrik olmayan model	35
Şekil 3.10 Parametrik olmayan yöntemlerle model belirleme aşamaları.....	36
Şekil 3.11 Regresyon analizi sonucu belirlenen düzeltmeler.....	42
Şekil 3.12 $k=\pm 20$ için çapraz-korelasyon katsayıları.....	44
Şekil 4.1 Periyodik bir sinyalin Fourier dönüşümü.....	49
Şekil 4.2 Gürültü içeren (--) ve beşinci dereceden yumuşatma uygulanmış zaman serisi (--)	53
Şekil 4.3 Gürültü içeren (--) ve birinci dereceden farklandırma uygulanmış zaman serisi (--)	53
Şekil 4.4 Sinüsün periyodik olarak tekrar etmesiyle oluşan işaret	54
Şekil 4.5 Periyodunu tamamlamamış sinüs (a), Hanning Penceresi (b), ve pencerelemiş sinyal.....	54
Şekil 4.6 Örnekleme frekansının belirlenmesi	56
Şekil 4.7 Zaman serilerinde model belirleme aşamaları	60
Şekil 4.8 $k=50$ için otokorelasyon katsayıları	61
Şekil 5.1 Boğaziçi Köprüsü'nün genel görünümü.....	73
Şekil 5.2 Boğaz Köprüsü Jeodezik Kontrol Ağı.....	75
Şekil 5.3 Boğaziçi Köprüsü obje noktalarının konumları	75
Şekil 5.4 Tabliye (a), kule ayaklarına (b), ankraj ve kule üstüne (c) tesis edilen obje noktaları şekilleri	76
Şekil 5.5 TCA2003 ile 6 numaralı referans noktasından yapılan ölçümden bir görünüm.....	78
Şekil 5.6 Araç sayısı, rüzgar hızı ve sıcaklık değişimleri (01.09.2003-30.09.2003).....	79
Şekil 5.7 Boğaziçi Köprüsü için öngörülen basitleştirilmiş taşıt yükleri (tek şerit).....	81
Şekil 5.8 Boğaziçi Köprüsü trafik yükü.....	81
Şekil 5.9 Çevre sıcaklığı değişimleri	82
Şekil 5.10 Boğaziçi Köprüsü'nü etkileyen rüzgar yönleri.....	82
Şekil 5.11 Boğaziçi Köprüsü kulelerine etkiyen rüzgar kuvveti	83
Şekil 5.12 Koordinat sistemi	84
Şekil 5.13 Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin belirlenmesi genel akış şeması.....	85
Şekil 5.14 14 numaralı noktanın Y, X ve H yönündeki hareketleri	86
Şekil 5.15 18 numaralı noktanın Y, X ve H yönündeki hareketleri.....	87
Şekil 5.16 72 saatlik sıcaklık değişimleri.....	88
Şekil 5.17 72 saatlik rüzgar hızı değişimleri	88
Şekil 5.18 72 saatlik trafik akışı değişimi	89
Şekil 5.19 Tabliyenin 1/4'lük kesimi Y, X ve H yönündeki hareketleri	91

Şekil 5.20 Tabliye orta noktasının Y,X ve H yönlerindeki hareketleri	92
Şekil 5.21 Tabliye 1/4'lük kesimi Y, X ve H yönlerindeki hareketleri.....	93
Şekil 5.22 14 numaralı nokta. ölçülen ve ARX(7,9) modelden hesaplanan X yönü tepkileri .	96
Şekil 5.23 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları	96
Şekil 5.24 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	103
Şekil 5.25 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	103
Şekil 5.26 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	104
Şekil 5.27 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	104
Şekil 5.28 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri	104
Şekil 5.29 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	107
Şekil 5.30 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	107
Şekil 5.31 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	107
Şekil 5.32 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	108
Şekil 5.33 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri	108
Şekil 5.34 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	109
Şekil 5.35 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	110
Şekil 5.36 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri	110
Şekil 5.37 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri	110
Şekil 5.38 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri	110
Şekil 5.39 14 numaralı noktanın Y yönündeki zaman serisi için lineer trend bileşeni.....	113
Şekil 5.40 Yumuşatma (a) ve farklandırma işlemi yapılmış, Hanning pencere fonksiyonu ile çarpılmış 22 numaralı noktanın H koordinatları zaman serileri.....	115
Şekil 5.41 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri	118
Şekil 5.42 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki genlik-frekans değişimi	118
Şekil 5.43 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri .	118
Şekil 5.44 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri	119
Şekil 5.45 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki genlik-frekans değişimleri	119
Şekil 5.46 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri	120
Şekil 5.47 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri	122
Şekil 5.48 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri .	122
Şekil 5.49 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri	123
Şekil 5.50 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri	123
Şekil 5.51 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri.....	125
Şekil 5.52 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri.....	126
Şekil 5.53 21 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri.....	126
Şekil 5.54 Tabliye orta noktasının ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri....	126
Şekil 5.55 24 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri.....	126
Şekil 5.56 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri zaman serileri stokastik kesimi otokorelasyon katsayıları	128
Şekil 5.57 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri durağan zaman serileri otokorelasyon (a) ve kısmi otokorelasyon (b) katsayıları.....	128
Şekil 5.58 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri zaman serilerinin AR(5) modeli prediksiyon hataları otokorelasyon katsayıları.....	131

Çizelge 1.1 Deformasyon modelleri ve karakteristiği	15
Çizelge 2.1 Önemli bazı asma köprüler	16
Çizelge 2.2 TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesine göre taşıt yük sınıfları	21
Çizelge 2.3 Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri	24
Çizelge 2.4 Boğaziçi Köprüsü'nün ilk 15 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri	28
Çizelge 4.1 Durağan modellerde teorik otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarını özellikleri (p ve q öngörülen modelin dereceleri).....	63
Çizelge 5.1 Boğaziçi Köprüsü'ne ait elemanların kesit özellikleri (Celasun,1981).....	73
Çizelge 5.2 Obje noktalarına yapılan ölçülerle ilgili bilgiler	78
Çizelge 5.3 TCA2003'ün özellikleri	78
Çizelge 5.4 Obje noktalarına etkiyen büyüklüklerle ilgili bilgiler	79
Çizelge 5.5 Boğaziçi Köprüsü'nün 25.09.2003 tarihindeki (kulelerin gözlem zamanı) araç sayısı ve yük hesab	81
Çizelge 5.6 Kulelerdeki obje noktaları hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler	88
Çizelge 5.7 21 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler	90
Çizelge 5.8 22 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler	91
Çizelge 5.9 24 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler	94
Çizelge 5.10 Etki-tepki büyüklüklerine bağlı ARX modele ait analiz sonuçları	97
Çizelge 5.11-a ARX modeller için hesaplanan A(q) ve B(q) polinomları.....	99
Çizelge 5.11-b ARX modeller için hesaplanan A(q) ve B(q) polinomları	100
Çizelge 5.12 Regresyon analizi sonuçları	102
Çizelge 5.13 Çoklu (iki farklı yük ile) regresyon analizi sonuçları.....	106
Çizelge 5.14 Çoklu (üç farklı yük ile) regresyon analizi sonuçları	109
Çizelge 5.15 Yapı tepkimelerinin zaman serileri Mann- Kendall trend testi sonuçları.....	112
Çizelge 5.16 Zaman serilerindeki trend bileşeni regresyon fonksiyonları.....	114
Çizelge 5.17 Tabliye ve kulelerin yüksek frekans- periyot ve genlik değerleri.....	117
Çizelge 5.18 Tabliye ve kulelerin alçak frekans ve periyot değerleri	121
Çizelge 5.19 Periyodik analiz sonucu elde edilen anlamlı frekans sayısı-maksimum alçak frekansa göre harmonik modeller	125
Çizelge 5.20 Periyodik bileşenden arındırılmış seride ortalama ve standart sapma değerleri	127
Çizelge 5.21 Zaman serilerinin stokastik bileşenleri için en uygun modeller ve kriterler.....	130

ÖNSÖZ

Öncelikle tezimin yürütücülüğünü üstlenen, her türlü destek ve anlayışı gösteren sayın Yrd. Doç. Dr. V.Engin Güral'a, tez izleme jürisi Prof. Dr. Ömer Aydın'a, Prof. Dr. Rasim Deniz'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, araştırmaya konu olan Boğaziçi Köprüsü'nün ölçme çalışmalarına bizzat katılarak yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Otto Heunecke'ye, Arş. Gör. Burak Akpınar'a, Arş. Gör. Ercenk Ata'ya, Arş. Gör. Fatih Poyraz'a ve Arş. Gör. N. Onur Aykut'a, dostluklarını ve desteklerini esirgemeyen bölümdeki öğretim üyelerine ve arkadaşlarıma, köprüde yapılan ölçmeler esnasında yardımcı olan başta Dr. Nurdan Apaydın olmak üzere T.C.K 17. Bölge Müdürlüğü personeline, köprüdeki obje noktalarının yapımında emeği geçen İstanbul Sular İdaresi personeline, donanım olarak destek veren Universitaet Bundeswehr'e ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Mühendislik yapılarının planlanması, projelendirilmesi, gerçekleştirilmesi ve yapı ömürlerinin uzatılması çok yüksek maliyet ve emek isteyen çalışmalardır. Bu nedenle, bu tür yapıların sıcaklık değişimi, rüzgar kuvveti ve trafik yükü gibi ölçülebilen etkiler altındaki davranışlarının sürekli ya da periyodik ölçme yöntemleri ile izlenmesi ve tanımlanması gerekmektedir.

Bu amaçla; bu tez çalışmasında dinamik bir sistem olan Boğaziçi Köprüsü'nün jeodezik ölçülerle sürekli izlenmesi durumunda etki ve tepki değişkenlerine bağlı olarak zaman ve frekans bölgesinde parametrik olmayan yöntemlerle tanımlaması yapılmıştır.

Birinci bölümde; mühendislik yapılarının sürekli izlenmesi ve kontrolünün gerekliliği, genel olarak bu konu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, yapılardaki deformasyonların gelişim süreci ve deformasyonların sistem tanımlamasına göre sınıflandırılması ele alınmıştır.

İkinci bölümde; mühendislik yapılarından dinamik bir sistem olan asma köprüler hakkında bilgiler verilerek, yapının temel elemanları ve özellikleri, sıcaklık değişimi, rüzgar kuvveti ve trafik yükü altında gösterdikleri davranışları, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne göre doğal frekans ve periyotlarının belirlenmesi hakkında teorik bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde; sistemlerin tanımlanmasında kullanılan parametrik ve parametrik olmayan yöntemler hakkında bilgiler verilerek, etki-tepki büyüklüğüne bağlı parametrik olmayan yöntemlerden ARX (Ekstra Girişli Otoregresif) model, regresyon analizi, çoklu regresyon analizi ve sistemin etkiye olan tepkimesindeki gecikmeyi açıklayan çapraz-korelasyon fonksiyonu hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde; sistemlerin tepki büyüklüğüne bağlı olarak zaman serileri analizi ile tanımlaması yapılarak, serilerde var olan trend, periyodik ve stokastik bileşenlerin belirlenmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Periyodik bileşenin analizinde ise, seride var olan uzun ve kısa zamanlı değişimlerin frekansları, periyotları, faz açıları ve genlikleri spektrum analizi ile belirlenmesi açıklanmıştır.

Beşinci bölümde; sistem analizi kapsamında araştırılan obje "İstanbul Boğaziçi Köprüsü"nün temel özellikleri verilerek, yapıda etkili olan yükler ve örnekleme frekansları belirlenmiştir. Daha sonra ise yapı çevresinde referans noktaları ve üzerinde obje noktaları tesisi yapılarak, obje noktalarında zaman serisi özelliğinde ölçüler toplanmıştır. Bu ölçüler, ARX, regresyon analizi, çoklu regresyon analizi ve çapraz korelasyon analizi gibi hem etki-tepki büyüklüğü ile hem de tepki büyüklüğü ile parametrik olmayan yöntemlerle analiz edilmiş, tepki büyüklüğüne bağlı zaman serileri analizinde, serilerde var olan trend bileşenleri giderildikten sonra geriye kalan serilerdeki periyodik bileşen analizinde Boğaziçi Köprüsü'nün yüksek ve alçak frekansları güç spektrumlarından yararlanılarak belirlenmiştir. Alçak ve yüksek frekansları belirlemeden önce sinyallerdeki spektral sızımayı azaltmak için seriler Hanning Pencere Fonksiyonu ile çarpılmış ve daha sonra da yumuşatma ve farklandırma işlemleri ile elde edilen serinin (HFD) Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak alçak ve yüksek frekansları belirlenmiştir. Belirlenen alçak frekanslardan yararlanılarak istatistiksel olarak ölçülerde var olan anlamlı periyodik hareketler belirlenmiş ve bu ölçülerin genlik ve faz açıları da hesaplanmıştır. Ayrıca, zaman serisinin stokastik kesimi AR (Otoregresif) ve ARMA (Ort Otoregresif Hareketli Ortalama) modellerle belirlenmiştir.

Son olarak, altıncı bölümde ise yapılan çalışmanın değerlendirme ve analiz sonuçları ile birlikte, bu tür çalışmalara yardımcı olması açısından bazı önerilerde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boğaziçi Köprüsü, Zaman Serileri Analizi, HFD, ARX, AR, ARMA

ABSTRACT

Planning, design and realization of engineering structures have high prime costs. So behaviors of these structures under temperature changes, wind and traffic load must be monitored by continuous or periodical measurement methods.

In this study, Bosphorus Bridge which is a dynamic system had been identified by non-parametric methods in time and frequency domain dependent on cause-response quantities.

In the first section, necessity of monitoring and control of engineering structures, studies about this subject, development process of deformations on structures and classification of deformations according to system identification had been discussed.

In the second section, theoretical information about suspended bridges which are dynamic systems, basic components and properties of structures, behaviors under temperature change, wind and traffic load, determination of natural frequency and periods by Finite Elements Methods had been discussed.

In the third section, parametric and non-parametric methods which are used for system identification, ARX (Autoregressive with Exogeneous) model which is a non-parametric method dependent on cause-response quantity, regression analysis, multiple regression analysis and cross correlation function which explains the response of the system, had been discussed.

In the fourth section, identification of system by time series dependent on response quantity of system, determination of trend, periodic and stochastic components, and time series analysis which represents the system properties had been explained. Determination of frequency, period, phase angles, amplitudes of long and short time changes by spectrum analysis had been discussed.

In the fifth section, basic properties of Bosphorus Bridge had been explained and loads which affects the bridge and sampling frequencies had been determined. And then reference and object points had been constructed around the structure and time series measurement had been taken. These measurements had been analyzed both by cause-response quantities like, ARX, regression analysis, multiple regression analysis and by non-parametric methods. When analyzing the time series dependent on cause quantity, trend component in the series had been eliminated and high and low frequencies of Bosphorus Bridge had been determined by power spectrum in periodic component analysis. Before determination of high and low frequencies, series had been multiplied with Hanning Function to reduce the spectral leakage in signals. And then high and low frequencies had been determined by Fast Fourier Transform after the smoothing and differencing process. By using the low frequencies, significant periodic movements which exist in measurements statistically had been determined and amplitude and phase angles of these measurements had been calculated. And also stochastic section of time series had been determined by AR (Autoregressive) and ARMA (Autoregressive Moving Average) models.

In the last section, process and analysis result of the study had been presented and some suggestions about the subject had been given.

Keywords: Bosphorus Bridge, Time Series Analysis, HFD, ARX, AR, ARMA

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının çalışma emniyeti ve durumu; yapının tasarımı sırasındaki kabullere, inşası sırasındaki ve işletme esnasındaki gözlemlere ve düzensiz davranışların belirlenmesi durumunda acil durum planının uygulanmasına bağlıdır. Bu nedenle, mühendislik yapılarında ortaya çıkan hareket ve şekil değişikliklerini uygun donanım ile ölçmek, elde edilen ölçü değerlerinin büyüklüklerine göre yapıda oluşan deformasyonları şekil ve türüne göre belirlemek ve meydana gelebilecek olası kazaların önceden belirlenerek zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak mühendislik ölçmelerinde önemli bir yer tutmaktadır (Heunecke, 2000).

Mühendislik yapılarının sayısındaki artış, bu yapıların bakımı ve kontrolü ile ilgili problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu tür yapılarda periyodik olarak yapılan kontrollerle yapının güvenlik riski minimuma indirgenmekte ve böylece bakım giderleri de olabildiğince azaltılmaktadır. Bu nedenle yapıların bakım ve kontrolleri ile ilgili olarak standartlar belirlenmiştir.

Örneğin; Avusturya’da karayollarındaki yapılardan ve yolun bakımından Karayolları Müdürlüğü sorumlu tutulmakta ve bu müdürlük aynı zamanda yol güzergahı içerisindeki yapıların güvenliği ile de ilgilenmektedir. Avusturya’da köprülerin izlenmesi karayolu ağı kapsamında RVS13.71’deki esaslara göre ele alınmaktadır (Karayolu bakımı-izlenmesi, karayolu köprülerinin kontrolü). Köprüleri izleme süreci; sürekli izleme, denetim, kontrol ve özel testler olmak üzere dört grupta ele alınmaktadır.

Almanya’da demiryolu ve karayolu köprüleri için DIN1076 standartları uygulanmakta ve yapıların kontrol ölçmelerinin her altı yılda bir yapılması, başlangıç ölçümlerinin yapının bitiminden hemen sonra yapılması ve yapı üzerindeki obje noktalarının tesis edilmesi, eğer altı yılda bir yapılan kontrol ölçmelerinde başlangıç ölçümlerine bağlı olarak yapılarda geometrik değişimler var ise bu değişimlerin testlerinin ve analizlerinin yapılması öngörülmektedir.

Mühendislik yapılarındaki değişimlerin belirlenen standartlar kapsamında periyodik ya da sürekli ölçmelere dayanarak analizinin ve testlerinin yapılmasında genellikle jeodezik deformasyon analizinden yararlanılmaktadır. Welsch ve Heunecke (2001), jeodezik deformasyon analizinin amacını, bir objede meydana gelen deformasyonların tanımlanması ve araştırılan objeye etki eden kuvvetlere karşılık objenin fiziksel tepkimesinin belirlenmesi olarak açıklamaktadırlar. Buna göre “Jeodezik Deformasyon Analizi”, “Dinamik Süreçlerin Jeodezik Analizi” anlamına gelmekte ve mühendislik ölçmelerini ilgilendiren konu izlenen

objenin dinamik süreçleri olmaktadır. En genel ve en kapsamlı modeller dinamik modeller olup, bunun basitleştirilmesi ile statik ve kinematik modeller ile eşdeğerlik modeli elde edilmektedir.

Ancak, model oluşturmada, sistem sınırlarının belirlenmesi çok önemlidir. Eğer sistemin sınırları çok geniş seçilirse, modelin parametrelerini kestirmek zorlaşmakta ve modelin doğru bir analizi mümkün olmamaktadır. Bu yüzden modele bağlı olarak yapılan simulasyon, tahmin ve filtreleme gibi analizler gerçeği yansıtmamaktadır. Diğer yandan, sistem sınırlarının çok dar seçilmesi durumunda da araştırılan obje ile ilgili bazı önemli bilgiler modelde yer almamakta ve modelden elde edilen sonuçlar eksik bilgi yüzünden istenen doğrulukta elde edilememektedir.

Model oluşturmada farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır. Bunlardan biri de parametrik tanımlamadır ve bu tanımlama ile öncül bilgiye dayalı olarak model elde edilebilmektedir. Model ait öncül bilgi, fiziksel yasalara dayanmaktadır ve bu fiziksel yasalar da diferansiyel ya da cebirsel eşitlikler yardımı ile tanımlanmaktadır. Bu eşitlikler enerji, kütle korunumu ya da momentum yasalarına dayanmaktadır. Öncül bilgiler, sadece giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi değil, modelin yapısı ile ilgili ilave bilgileri de içermektedir (Welsch ve Heunecke, 2001).

Bazı durumlarda modelin parametre değerlerini hesaplamak için yeterince öncül bilgi bulunmamakta ya da sistem olabildiğince karmaşık bir yapı özelliği göstermektedir. Bu durumda, sistem derecesi, giriş ve çıkış sinyallerinin seçimi ile ilgili olarak bazı öncül varsayımlar yapılmaktadır. Bu varsayımlar altında sistemi tanımlayan matematiksel model giriş ve çıkış sinyallerinin sayısına bağlı olarak elde edilmektedir. Sistemle ilgili bilgilerin bu şekilde elde edilmesi de parametrik olmayan tanımlama olarak ifade edilmektedir. Bu tür tanımlamalarda sisteme ait giriş sinyali, matematiksel fonksiyon ya da transfer fonksiyonu ve çıkış sinyallerinden ikisinin bilinmesi durumunda diğer üçüncü değişken belirlenebilmektedir. Böylece sistemle ilgili tahmin, simulasyon ve filtreleme yapılabilmektedir (Welsch ve Heunecke, 2001; Bosch ve Klauw, 2000).

Parametrik olmayan tanımlamalarda, özellikle dinamik sistemlerde çıkış sinyallerinin giriş sinyaline olan tepkimesinde herhangi bir gecikme olup olmadığının belirlenmesi için de çapraz-korelasyon analizinden yararlanılmaktadır.

Sistemlerin tanımlanmasında kullanılan bir diğer yöntem ise sistemlerin çıkış sinyallerine bağlı olarak sinyallerde var olan trend, periyodik ve stokastik bileşenlerin ortaya konulduğu zaman serileri analizi ve sinyallerin frekans özelliklerini incelemeye kullanılan spektral

analizdir. Başka bir ifade ile, spektral analiz ile araştırılan sistemde var olan periyodik hareketler belirlenmektedir. Günümüzde periyodik hareketlerin daha doğru ve daha hızlı bir şekilde belirlenmesinde HFD kullanılmaktadır. HFD yüksek miktarda işlem gerektiren uygulamaların bilgisayar ile gerçekleştirilmeye başlandığı 1965’li yıllarda çıkmıştır. HFD, sayısal sinyal işleme alanında spektrum analizi ve korelasyon gibi işlemlerin yapılmasında önemli rol oynamaktadır (Bergland, 1969).

Diğer yandan, potansiyel risk ve tehlikelerle birlikte ekonomik beklentilerde çözüm yöntemleri arasından uygun modellerin seçimi için önemli olmaktadır. Bu nedenle, basitleştirilmiş modeller ile bazı pratik çözümler elde edilebilmekte ve bazı pratik uygulamalar için toplanan jeodezik ölçülerin modellemeye gerek kalmadan grafiklerle ve sayısal olarak sunulması yeterli olmaktadır. Özellikle çok büyük miktardaki verilerle çalışıldığında, kurulan ilişkiler, görsel olarak ortaya konulduğundan, değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koymada güçlü bir ifade biçimi oluşturmaktadır (Bosch ve Klauw, 2000).

Bu çalışmada; Sistem analizi kapsamında, mühendislik yapılarından Boğaziçi Köprüsü’nün sıcaklık değişimi, rüzgar kuvveti ve trafik yükü etkisi altında, özellikle hareket ve şekil değişimlerinin belirgin olarak ortaya çıktığı obje noktaları Y, X ve H koordinatlarının (tepki değerleri) zaman serilerinden yararlanılarak; köprü kulelerinin etki-tepki büyüklüğüne bağlı parametrik olmayan yöntemlerle (ARX; dışkaynak girişli otoregresif model, regresyon ve çoklu regresyon analizi) modellenmesi, model parametrelerinin ve derecesinin belirlenmesi, modelin geçerliliğinin istatistik açıdan test edilmesi, çapraz korelasyon analizi ile tepkinin etkiye göre gecikip-gecikmediğinin tespit edilmesi, köprünün kule ve tabliye üzerindeki obje noktalarının sadece tepki büyüklüğüne bağlı zaman serileri analizi ile köprü hareketlerinde var olan trend, periyodik ve stokastik bileşenlerin tespit edilmesi, Hızlı Fourier Dönüşümü ile frekans bölgesine dönüştürülen zaman serilerinde yapılan periyodik analizde, köprünün yüksek ve alçak frekanslarının hesaplanması ve yüksek frekansların köprünün doğal frekansları ile karşılaştırılması, uzun-zamanlı periyodik hareketlere ait harmonik modelin belirlenmesi ve modelin test edilmesi, genlik ve faz açılarının belirlenmesi ile köprünün tanımlanması amaçlanmıştır.

1.1 Mühendislik Yapılarının İzlenmesi Gelişim Süreci

1.1.1 Sistem Analizine Göre Tarihi Gelişim

1970’lerin sonunda ve 1980’lerin başında FIG (International Federation of Surveyors) komisyonlarından 6.1 Çalışma Grubu, çalışmalarını yeni izleme sistemlerinin geliştirilmesi ve jeodezik deformasyon ağlarının geometrik analizi yönünde yoğunlaştırmıştır. Sürekli izleme

sistemleri bunun başlangıcı olup, bununla ilgili bilgiler 1975 yılında Krakow da yapılan I. FIG Deformasyon Ölçmeleri Sempozyumunda sunulmuştur. Bu aşamada, deformasyon analizinde temel problem jeodezik kontrol ağlarındaki sabit olmayan referans noktalarının tanımlanması konusunda yapılmıştır. Farklı araştırmacılar tarafından birkaç yaklaşım sunulmuş ve daha sonra bu farklı yaklaşımları karşılaştırıp, deformasyon ölçmelerinin geometrik analizi konusundaki teorileri birleştirerek geliştirmek amacıyla 1978 yılında Bonn'da yapılan II. Sempozyum'da bir Ad-Hoc Deformasyon Analizi Komitesi (kısa süreli, bir konu için kurulan komite) kurulmuştur. Bu komite çalışmalarına Almanya'da Karlsruhe, Hannover, Stuttgart ve Münih Üniversiteleri, Kanada'da New Brunswick Üniversitesi, Hollanda'da Delf Üniversitesi gibi bir çok araştırma kurumu katılmıştır. Komite çalışmaları, Montreux'deki XVI. FIG Kongresinde (Chrzanowski, 1981), Budapeşte'deki III. Deformasyon Ölçmeleri Sempozyumunda (Heck vd., 1982), Sofya'daki XVII. FIG Kongresinde (Chrzanowski ve Secord, 1983) ve Toronto'daki XVIII. FIG Kongresinde (Chrzanowski ve Chen, 1986) özetlenmiştir.

Ad-Hoc Komitesi çalışmalarına paralel olarak özellikle Stuttgart Üniversitesi'nde (Felgendreher, 1981, 1982), Hannover Üniversitesi'nde (Boljen, 1983, 1984), Fredericton Üniversitesi'nde (Chrzanowski vd., 1981; Chen, 1983; Chrzanowski vd., 1986; Chen ve Chrzanowski, 1986), Calgary Üniversitesi'nde (Teskey, 1986, 1988) ve Münih Üniversitesi'nde (Ellmer, 1987; Kersting, 1992) deformasyon analizinin fiziksel yorumlaması ve etki faktörleri (etki büyüklüğü) ile sonuç deformasyonlar (tepki büyüklüğü) arasındaki ilişkinin modellenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bazı araştırmacılar önemi artan otomatik ölçme tekniklerinden yararlanmaya başlamıştır (Pelzer, 1970a, 1977b, 1978). Bu araştırmacıların çalışmaları jeodezik deformasyon analizinin geliştirilmesi, dinamik bir süreç olan deformasyon kavramının daha iyi anlaşılması konusunda temel oluşturmaktadır. Deformasyon analizinin disiplinler arası bir çalışma olarak görülmesi gerektiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak da jeodezik deformasyon analizinin inşaat mühendisliği ve geoteknik uygulamaları içermesi sağlanmıştır.

Dinamik süreçlerin analizi ile uğraşan Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisleri çalışmalarında karmaşık teknik terimlerle karşılaşmışlardır. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendislerinin deformasyonların fiziksel yorumlanmasında kullanmaya başladıkları terminoloji, fizik, mekanik ve diğer bilim dallarında uzun zamandır kullanılmaktaydı. 1992'de Hannover'deki VI. FIG Sempozyumu'nda bu karmaşık terimlere açıklık sağlanmıştır. Örneğin; deformasyon ölçmelerinin sadece parametrik analizi bazı araştırmacılar tarafından "statik" olarak adlandırılmış, zamana bağlı geometrik analizi ise "dinamik" olarak adlandırılmıştır. Bu

konudaki asıl karmaşıklık geometrik modelleme ile gözlenen deformasyonların ayrımının yapılmamış olmasıdır. Sonuç olarak diğer bir Ad-Hoc Komitesi Hannover’de oluşturulmuş ve dinamik modeller açısından deformasyon modellerinin sınıflandırılması ve terminolojisi konusunda çalışmalara başlamıştır.

Ad-Hoc Komitesi’nde Bulgaristan’dan Prof. Milev, Almanya’dan Pfeufer ve Welsch, Polanya’dan Proszynski, İsrail’den Steinberg ve Kanada’dan Teskey yer almışlardır. Bu komite 1993’de Banff’taki VII. FIG Sempozyumu’nda ve 1994’de Haifa’daki Dinamik deformasyon Modelleri konusundaki seminerde iki gelişme raporu sunmuştur. Daha sonra, Welsch (1996) Hong Kong’daki VIII. FIG Sempozyumu’nda sistem teorisi ve sinyal işleme konusunda bir durum raporu sunmuştur. Devam eden çalışmalarla ilgili bir özetle Polanya Olsztyn’deki IX. FIG Deformasyon Ölçmeleri Sempozyumu’nda sunulmuştur. Bu oturum son 20 yılda yapılan deformasyon analizi yöntem ve modellerinin özetlenmesi ile son bulmuştur.

2001 yılında Kalifornia Orange’da düzenlenen X. FIG Uluslararası Deformasyon Ölçmeleri Sempozyumu’nda Olsztyn’deki önerileri de içeren bir Ad-Hoc Komitesi’nin resmi bir raporu sunulmuştur. Bu raporda, jeodezik deformasyon analizi konusundaki son gelişmeler, deformasyon analizinin sistem analizi kapsamında parametrik ve parametrik olmayan yöntemlerle ele alınması, sürekli gözlemlerin yapılması durumunda zaman serileri analizinden yararlanılması, yapılardaki değişimlerin zaman ve frekans bölgelerinde incelenmesi, pratik uygulamalarla örneklenmiştir. Bu da deformasyon analizi konusunda disiplinler arası bir yaklaşımdan her bir disiplinin elde edeceği yararlar konusunda açıklık getirmiştir.

1.1.2 Sistem Analizi Kapsamında Yapılan Deformasyon Çalışmaları ve Sonuçları

Mühendislik yapılarındaki dinamik deformasyonların sistem teorisine göre hem zaman bölgesinde hem de frekans bölgesindeki parametrik ve parametrik olmayan tanımlamaları üzerine pek çok araştırmacı teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bunlardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Ellmer (1987), sıcaklık değişimleri sonucu yapıların tepkisini parametrik olmayan modellerle açıklamıştır. İlk olarak etki ve tepki değerleri için zaman serilerini belirlemiş, daha sonra Fourier analizi yapılarak değişimlerin periyodik analizleri elde edilmiştir. Son olarak da bir SISO (single input-single output) model tanımlama ile sıcaklık değişimleri ile deformasyon arasındaki ilişki açıklanmıştır. Uzun zamanlı sıcaklık değişimlerinin yapıyı etkilediği ve bu tür modellerin deformasyon belirleme de kullanılabilirliği ifade edilmiştir. Ancak parametrik modellemeye dayalı dinamik süreçlerin fiziksel yorumunda her zaman bir sınırlama olduğu, yorumların sistemin gösterdiği ipuçlarına bağlı olarak yapılabileceği de ifade etmiştir.

Erkaya (1987), Boğaziçi Köprüsü'nün kritik yerlerine (kuleler, köprü ayakları ve tabliye) obje noktası tesisi yapılmış ve bu obje noktalarına önden kestirme ve trigonometrik yükseklik ölçme yöntemlerine göre üç periyot gözlemler yapılmıştır. Kule ve köprü ayaklarındaki çökmelerin belirlenmesinde hassas nivelman yöntemi kullanılmıştır. Yapılan araştırma ve analiz sonucu kulelerde ve köprü ayaklarında var olan kaymaların anlamsız olduğuna karar verilmiştir.

Lovse (1995), Kanada'da Calgary kulesinin dinamik deformasyon ölçmelerini GPS kullanarak belirlemiştir. Kulenin yüksekliği yaklaşık olarak 160 m olup, GPS antenlerinden birisi kuleden 1 km uzaklıkta bir binanın çatısında yer almıştır. 2 GPS anteni de kulenin tepesine yerleştirilmiştir (birisi yedek olarak düşünülmüş). Örnekleme frekansı 10Hz olup, toplam 15 dakika ölçüm yapılmıştır. HFD sonucu; kuzey-güney ve doğu-batı hareketinin frekansı 0.3 Hz, kuzey-güney genliği yaklaşık ± 15 mm ve doğu-batı genliği ± 5 mm olarak saptanmıştır.

Roberts, Dodson, Ashkenozi, Brown ve Karuna (1999), Açıklığı 1410 m, yüksekliği 155.5 m olan ve 2 kule ile desteklenen Humber köprüsü'nde yapılan çalışmada, GPS antenleri köprüde orta açıklıkta stratejik noktalara ve kulelere yerleştirilmiştir. Köprüden 1.5 km uzaklıktaki bir referans noktasına da GPS anteni yerleştirilmiştir. Humber köprüsünün deformasyonlarını belirlemek için trafiğe kapalı köprüye 160.19 ton (5 kamyon) yük farklı konumlarda uygulanarak, bu yük altındaki köprünün davranışı RTK GPS ile ölçülerek tespit edilmiştir. Bu çalışma da; köprünün eksenleri yönünde, orta açıklıkta, kulelerinin kuzey-güney, doğu-batı ve düşey yöndeki deplasmanları ve frekansları belirlenmiştir. Ayrıca, trafik yükü ve diğer yükler altında köprünün davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan köprü modelinden hesaplanarak belirlenmiştir. Ölçülerle, sonlu elemanlar modelinden hesaplanan köprü davranışları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Hess vd. (2000), Parametrik sistem tanımlama üzerine, 10x2 m boyutlarında oluşturdukları bir yapının, yanal yüzeyine farklı büyüklüklerde adım adım artırılarak uyguladıkları yükün yapıda oluşturduğu tepkiyi, hem sonlu elemanlarla (sistem eşitliği) hem de nivelman ve extensometer ile ölçerek (gözlem eşitliği), aradaki farkı Kalman-filtreleme ile analiz etmişlerdir. Analiz sonucu anlamlı deformasyonlar elde edilmemiş ve yapıya ait malzeme parametrelerinin de öngörülen parametrelerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Roberts, Meng ve Dodson (2000), Mühendislik yapılarındaki hareketlerin GPS kullanarak ölçülebileceği üzerine, özellikle ölçülerin örnekleme frekansı üzerinde araştırmalar yapmışlardır. GPS'nin maksimum 10 Hz örneklem frekansı için yapı hareketlerinin Nyquist

Teoremine göre 5 Hz üzerinde olmaması gerektiği ifade edilmiştir. Eğer yapılarda 5 Hz'den daha büyük değişimler var ise bunun da accelerometer (0.5-100 Hz) ile belirlenebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, accelerometrenin (ivme ölçer) zamanla sürüklenme (drift) özelliği gösterdiği de ifade edilmiştir.

Wong (2000), Hong-Kong'da yer alan Tsing-Ma, Kap Shui Mun ve Ting Kua köprüleri 3 kablo destekli köprüler olup, hareketleri GPS kullanarak izlenmiştir. GPS izleme sistemi 4 alt gruptan oluşmuştur. GPS ölçme sistemi, bilgi toplama sistemi, bilgi işleme ve analiz sistemi, değerlendirme ve analiz sistemidir. GPS alıcıları kulenin üzerinde ve köprünün her iki tarafında yer almıştır (27 nokta). Örnekleme frekansı 10Hz'dir. Alınan ölçüler bilgi toplama sistemi ile bilgi işleme ve analiz sistemine eşzamanlı olarak transfer edilmiş ve gerçek zamanda köprünün ve kulelerin eşzamanlı deplasmanları izlenmiştir. Ayrıca yapının stress, taşıma kapasitesi, çalışma durumu ve dayanıklılık yeteneği de belirlenmiştir.

Roberts, Meng ve Dodson (2001), Nottingham Human köprüsünde, rüzgar kuvveti ve yaya yükünün etkisi GPS ve accelerometer ölçümleri ile belirlemiştir. GPS ölçümleri için örnekleme hızı 10 Hz, üç eksenli accelerometer için 200 Hz'dir. Ölçülerin pencerelemesi, HFD, spektrum analizi, gibi analizlerle yapıya ait belirgin frekanslar X, Y ve H koordinatları yönlerinde belirlenmiştir.

Kuhlman (2001), Almanya'da, 150,61 m uzunluğuna sahip vadi üzerindeki Nesenbachtal köprüsü üzerinde hem yapı hareketlerini (deformasyon olarak tanımlanmış) hem de yapıya (malzemesi beton) etkileyen sıcaklık değişimlerini ölçmüştür. Sıcaklık değişimleri sensörlerle, yapının tepkisi de Leica D12002 ile 10 dakika örnekleme aralığı ile 2 gün ölçülmüştür. Sıcaklık değişimleri ve deformasyon ölçümleri arasında yapılan çapraz korelasyon analizinde maksimum korelasyon değeri $k=0$ (dakika) zaman gecikmesinde ortaya çıkmış ve sıcaklığın gecikmesiz olarak yapıda etkili olduğu belirtilerek, dinamik model, statik model olarak ele alınmıştır.

Diğer yandan; gözlemler zamana bağlı olarak yapıldığından etki-tepki arasındaki ilişki (fonksiyonel model) regresyon analizi ile oluşturulmuştur. Stokastik modelde ölçüler başlangıçta korelasyonsuz kabul edilmiştir. Ancak yüksek örnekleme hızı yüzünden iki gözlem arasında küçük zaman farkları olduğundan ölçülerin otokorelasyonlu olduğu ve yapılan hesapları etkilediği ifade edilmiştir. Özellikle kestirilen parametrelere, vanyans ve serbestlik derecelerine otokorelasyonun etkisi araştırılmıştır.

Wieser ve Brunner (2002), Tulu/Avustralya'daki asma köprünün kısa süreli deformasyonlarını belirlemek için, örnekleme aralığı 3 saniye olmak üzere toplam 48 saat

gözlem yapmıştır. Köprü tabliyesi üzerindeki GPS alıcılarının kablolarının varlığından dolayı etkilendiği ve bu yüzden yüksek presizyolu GPS ölçüleri elde edilemediği belirtilmiştir. Köprü tabliyesi üzerindeki noktaların konum doğruluğu yatayda 2 cm iken kulelerde konum doğruluğu 2 mm olarak tespit edilmiştir. Özellikle kulelerdeki deformasyonun sıcaklık değişimlerinden meydana geldiği ve sıcaklık-deformasyon arasında yüksek bir korelasyon olduğu belirtilmiştir. Tabliyenin her 10 saniyede bir ölçülen trafik yükü etkisi ile düşey yönde değişimlerinin cm düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık değişimleri ve rüzgar kuvvetleri ile X, Y, H yönlerindeki koordinat değişimleri arasında çapraz-korelasyon analizi yapılmıştır. Kuzey bileşeninin sıcaklık ile korelasyonlu olduğu görülmüş ve bu iki zaman serisi arasında yapılan çapraz korelasyon analizi ile çapraz korelasyon katsayısının 2 saatlik bir gecikme için maksimum değeri 0,8 bulunmuştur. Doğu bileşeni ile sıcaklık arasında ise korelasyon olmadığı görülmüştür.

Ayrıca, tepki değerleri ile, frekans bölgesinde frekans tepki fonksiyonu, zaman bölgesinde ise impuls tepki fonksiyonu ile sistem tanımlaması yapılmıştır. Ölçülere Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak ortalama spektral güç yoğunluk fonksiyonları hesaplanmış ve belirlenen frekansların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile belirlenen doğal frekanslarla uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece yapılan gözlemlerle yapıların yaklaşık doğal frekanslarının belirlenebileceği ifade edilmiştir. Ölçüler sonucu düşeyde ilk frekans (1.mod) 0,563 Hz, sonlu eleman yönteminde de ilk frekans (1.mod) 0,501 Hz olarak belirlenmiştir.

Cheng, John ve Zheng (2002), GPS tekniğinin mühendislik yapılarının izlenmesindeki avantajlarını araştırmış ve klasik ölçme yöntemleri ile karşılaştırmıştır. GPS için örnekleme frekansının 10 Hz, hatta 20 Hz olmasının yapıdaki değişimleri nicelemedeki önemini vurgulamıştır.

Shin (2004), Japonya’da Keio Üniversitesinde 7 katlı bir binanın parametrik olmayan modellerle yapısal özelliklerini tanımlamıştır. Yapının deprem anındaki etkileri sensörlerle, yapının tepkisi ise accelerometer ile ölçülmüştür. Etki- tepki arasında yaygın olarak kullanılan ARX (ekstra girişli otoregresif) ve ARMAX (ekstra girişli ortalama hareketli otoregresif) modeller oluşturulmuş ve bu modellerden hesaplanan değerlerden frekans ve sönüm oranları hesaplanmıştır. Analiz sonucu ARMAX modelin sonuçları yapının dizayn değerleri rijitlik ve sönüm oranları ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca ARMAX modelin % 51.77 fit değeri ile en büyük ve en uygun model derecesini belirleyen kriter FPE (Final Prediction Error; Sonuç prediksyon hatası) en küçük 44.0734 olarak belirlenmiş ve bu tür modellerin yapıların izlenmesi ve tanımlanmasında uygun ve güçlü bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

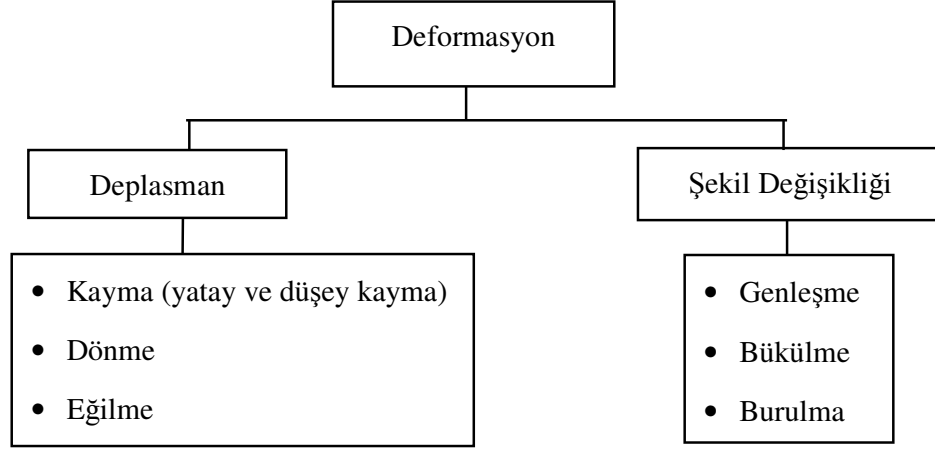
Fagan, Duniak, Xiaoning ve Smith (2004), düşük katlı bir binanın rüzgar yükü ile olan ilişkisi varyansı 44.4 olan ARX(15,15) model ile açıklamışlardır. Etki- tepki büyüklükleri örnekleme frekans 30 Hz alınarak zaman serisi özelliğinde toplanmıştır. ARX modelden hesaplanan büyüklüklerle spektral analiz yapılmış ve belirlenen frekansın etki büyüklükleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca yapının modelinden hesaplanan ve ölçülen değerlerinin grafikleri oluşturularak, ölçü-model değeri arasındaki ilişki açıklanmıştır.

Roberts, Cosser, Meng ve Dodson (2004), Köprülerdeki yüksek frekansların GPS ile belirlenmesi üzerine hem deneysel hem de Wilford Asma köprüsü üzerinde GPS alıcıları JNS100 ve Leica'nın alıcılarını kullanarak ölçüler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda tespit edilen örnekleme hızları sırası ile 50 Hz ve 10 Hz'dir. Deneysel çalışmalarında 50 Hz ve 10 Hz ölçüleri için standart sapmalar; JNS100 (50 Hz) için; Doğu bileşeni 0.0037 m, kuzey bileşeni 0.0056 m. ve yükseklik 0.0064 m'dir. JNS 100 (10 Hz) için; Doğu bileşeni 0.0037 m, Kuzey bileşeni 0.0056 m ve yükseklik 0.0067 m'dir. Her iki alıcı ile yapılan ölçülerin standart sapmalarının uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Daha sonra köprü üzerinde özellikle büyük değişimlerin beklendiği tabliye orta noktasında GPS anteni ve accelerometre (50 Hz) ile ölçümler yapılmıştır.

Shane ve Jha (2005), Sistemdeki deformasyonların ARX modelden yararlanılarak belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Sistem olarak ince bir alüminyum plaka seçilmiş ve bir sinüs dalgası şeklindeki 200 Hz'lik etki büyüklüğü sisteme uygulanmıştır. Sistemin tepki değerleride sensörlerle ölçülmüştür. Ayrıca bu sistemin sonlu elemanlarda 4 düğüm noktalı bir modeli oluşturulmuştur (sistemin hasarsız durumu). Sistemin hem ölçülerden hem de sonlu elemanlardan hesaplanan tepkilerinden ARX modeli elde edilmiş ve bu modellerin katsayıları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olması durumunda sistemin hasarlı olabileceği ifade edilmiştir.

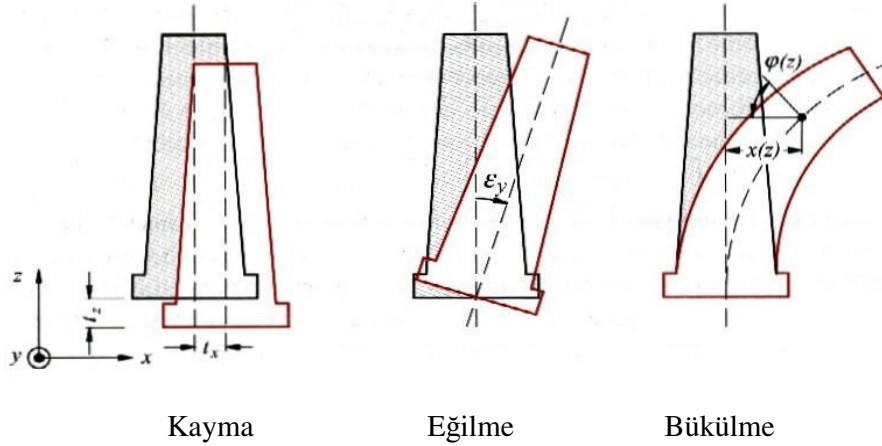
1.1.3 Deformasyon Hakkında Genel Bilgiler

Jeodezik terminoloji de yapılardaki deplasman (konum değişikliği) ve şekil değişiklikleri için deformasyon kavramı kullanılmaktadır (Şekil 1.1). Bu kavramlar bütün geometrik değişimleri, nedenlerinden bağımsız olarak tanımlamaktadır. Kayma denince, kontrol edilmesi gereken yapı elemanlarında düşey ya da yatay yönde paralel bir konum değişimi anlaşılmaktadır. Eğilme ise yapı elemanlarının geometrik konumlarının düşeyden veya yataydan ayrılmasını ifade eder. Kaymalar ve eğilmeler yapıda bir şekil değişikliği oluşturmazlar (Erkaya, 1987).



Şekil 1.1 Deformasyonların sınıflandırılması

Şekil değişikliğinde obje noktaları arasındaki geometrik ilişki değişmektedir. Objelerin genleşmesi çekme kuvveti altındaki objenin boyundaki uzama veya basınç kuvveti altında objenin boyundaki kısalmadır. Objenin ana eksenine dik şekil değişikliği bükülme olarak tanımlanmaktadır. Burulma ise objenin ana eksen boyunca dönmesidir. Şekil 1.2’de kule şeklindeki bir objedeki deplasman ve şekil değişimleri gösterilmiştir.



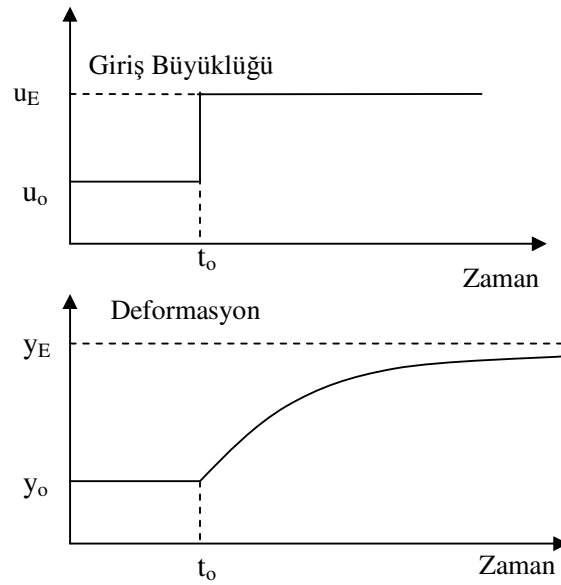
Şekil 1.2 Kule şeklindeki bir objede deplasman ve şekil değişimleri

- **Deformasyona neden olan etkiler ve deformasyonlar**

Deformasyona neden olan etkiler doğal veya yapay olarak ortaya çıkmaktadırlar. Etkilerin yapısal ve tam olarak adlandırılması bir çok nedenden dolayı zor veya bazen de mümkün olmamaktadır. Bu nedenle deformasyona neden olan etki faktörlerinin hangileri olduğunun tek tek test edilmesi ve ortaya çıkan deformasyonların şekli ve akışının ortaya konması gerekmektedir .

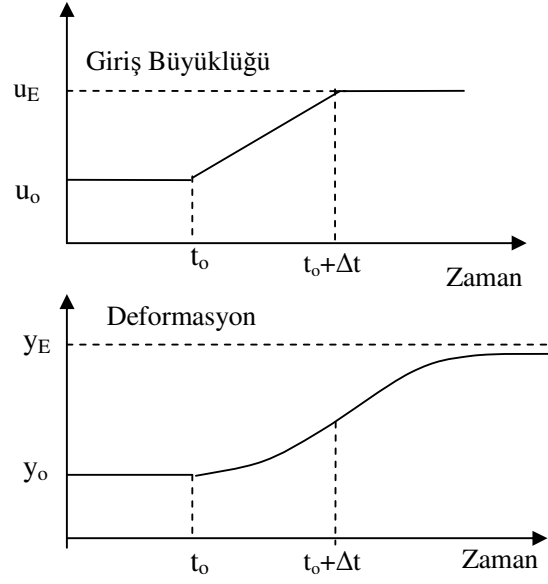
Bir çok deformasyon oluşumunda sıcaklığın etkisi önemli bir rol oynamaktadır. Bu sıcaklık etkileri günlük ve yıllık periyotlarda obje çevresinde oluşan sıcaklık değişimleri ve güneş ışımalarıdır. Objenin malzeme yapısına ve objedeki sıcaklık dağılımına bağlı olarak objede geometrik değişimler meydana gelmektedir. Objenin çevresinde meydana gelen yeraltı suundaki değişimlerde objede anlamlı geometrik değişimlere neden olabilmektedir. Yüzeysel olarak etkiyen kuvvetler ile örneğin; trafik yükü ve yüksek bir kuleye etkiyen rüzgar kuvveti sonucunda köprülerde deformasyonlar meydana gelmektedir.

Bir etki sonucunda objelerin tepkimeleri ani, doğrusal ve periyodik tepkimeler şeklinde meydana gelmektedir. Şekilde (1.3)'de t_0 zaman noktasındaki u_0 etkisine karşılık olarak y_E tepkimesini göstermektedir. Şekilde t_0 zaman noktasına kadar sisteme sabit bir etki olmaktadır. Bu etkiye karşılık sistemde sabit bir tepkime vermektedir. t_0 zaman noktasında sisteme ani bir etki verilmekte ve sistemde bu etkiye karşılık olarak ani bir reaksiyon göstermemektedir. Sistem maksimum tepkimeye ulaşınca kadar belirli bir süre geçmektedir. Bu şekilde ani etki sonucu meydana gelen deformasyonlar pratikte çok az meydana gelmektedir. Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'de Pelzer'in 1987'de tanımladığı farklı etkiye sonucu oluşan deformasyonlar görülmektedir.



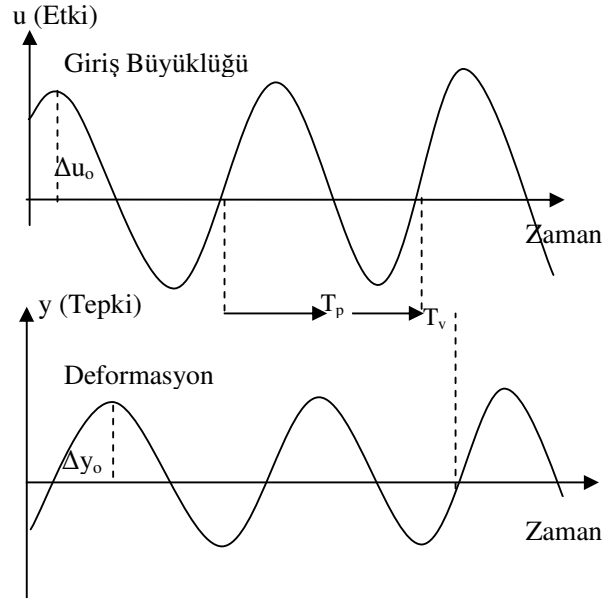
Şekil 1.3 Ani etkiye sonucu oluşan deformasyon

Çoğunlukla sistem üzerindeki etkiler zamanla doğrusal olarak artmaktadır. Böyle bir durumda, Şekil (1.4)'de t_0 zaman noktasında doğrusal etkiye karşılık tepkime oluşmakta ve $t_0 + \Delta t$ zaman noktasında maksimum hızına ulaşmaktadır.



Şekil 1.4 Doğrusal etki sonunda obje deformasyonları

Objeye reaksiyonlarının bir başka çeşidi ise periyodik etkiye karşı periyodik tepkimedir. Bu Şekildeki periyodik etkiler özellikle günlük ve yıllık periyotlarda meydana gelmektedir. Şekil (1.5)'de görüldüğü gibi obje bu periyodik etkiye karşılık olarak yine periyodik olarak aynı frekansta fakat T_v faz kayıklığı ile karşılık vermektedir. Etki ile tepkime (deformasyon) arasındaki genlik ilişkisi ise objenin malzeme özelliğine, frekansa ve periyot uzunluğu T_p ye bağlıdır.



Şekil 1.5 Periyodik etkimeye karşılık deformasyon

- **Deformasyon ölçmelerinde obje tanımlaması**

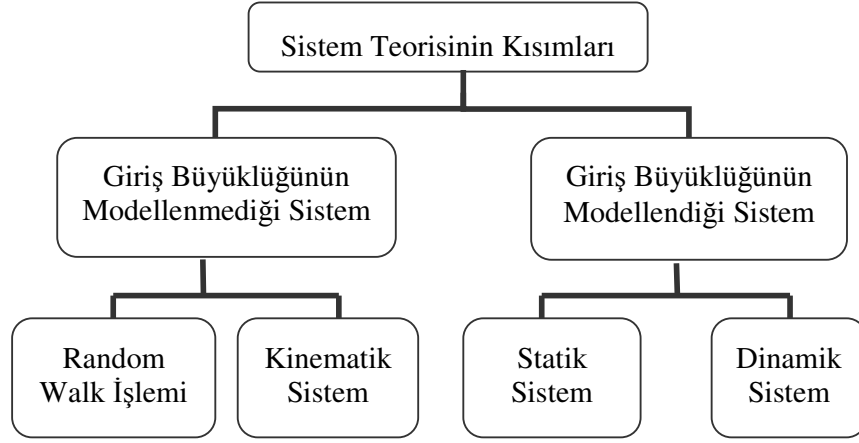
Objelerde meydana gelebilecek deformasyonların belirlenmesinde obje tanımlamasının yapılması gerekmektedir. Bu da “geometrik ve zamansal tanımlama” olarak iki şekilde ele alınmaktadır.

Objenin geometrik tanımlanmasındaki temel amaç, objede meydana gelebilecek deformasyonların ortaya çıkartılmasıdır. Mühendislik jeodezisinde modelleme işleminde ölçülecek olan obje ve davranışı belirli sayıdaki obje noktaları ve ölçü periyotları ile tanımlanmaktadır. Obje noktalarının sayısı, konumları ve yerleştirilmesi ve ölçü periyotlarının seçimi ölçülecek olan objeye bağlı olmaktadır. Bu nedenle obje noktaları objede meydana gelecek hareketleri temsil edecek şekilde belirlenmelidir.

Deformasyon ölçülerinde zamansal tanımlamada önemlidir. Zamansal tanımlamadan ölçülerin ne zaman başlayacağı ve ne zaman sona ereceği ve hangi aralıklar ile tekrarlanacağı anlaşılmaktadır. Ölçülerin hangi aralıklar ile gerçekleştirilmesi gerektiği büyük ölçüde objenin davranışıyla ilişkilidir. Zamansal tanımlamada objeye etkiyen etkiler ve objenin bu etkilere karşı olan tepkimelerinin hangi zaman aralıklarında, periyodik veya sürekli elde edilmesi gerektiği araştırılmaktadır. Eğer objeye etkiyen kuvvetlerin ve objenin tepkimesi yavaş gerçekleşiyorsa periyodik jeodezik ölçüler gerçekleştirilmektedir. Kontrol edilemeyen etkiler, düzensiz ve zor tahmin edilen deformasyonlarda sürekli ölçme yöntemleri tercih edilmektedir.

- **Deformasyon değerlendirme modellerinin sınıflandırılması**

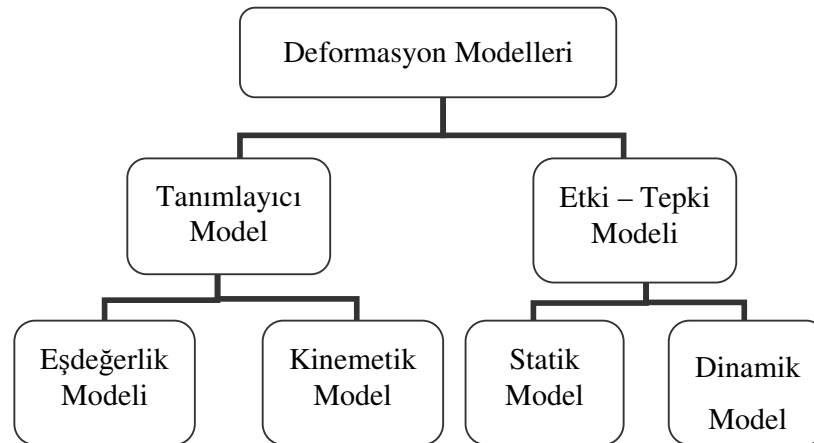
Son zamanların araştırma konularından birisi deformasyon ölçülerinin değerlendirme modellerinin sınıflandırılması ve sistematik duruma getirilmesidir. Araştırılan obje dinamik sistem olarak kabul edildiğinde değerlendirme modellerinin sınıflandırılmasında sistem teorisi gündeme gelmektedir. Sistem teorisinin amacı gerçekte mevcut olan sistemlerin davranışları hakkında nicelikli bilgiler vererek modeller oluşturarak sistemi tanımlamak ve analiz etmektir.



Şekil 1.6 Sistem teorisinin kısımları (Gülal, 2002)

Dinamik sistemler, sistem teorisi anlamında enerji depolayan ve zamanla depoladığı enerjiyi veren sistemler olarak tanımlanmaktadır. Değerlendirme sırasında geçmişteki belirli bir zaman noktasına kadar olan değerler değerlendirmeye katılmaktadır. Eğer bir sistem geçikmesiz olarak yeni bir denge konumuna ulaşıyorsa özel bir durum söz konusu olmaktadır. Sistemin çıkış büyüklüğü aynı zaman noktasındaki giriş büyüklüğüne bağlı olmakta ve bu durumda statik sistemlerden bahsedilmektedir. Sisteme etkiyen giriş büyüklüklerinin dikkate alınmadığı sistemin tepkimesinin sadece zamanın fonksiyonu olarak tanımlandığı sistemler kinematik sistemler olarak ifade edilmektedir. Büyüklükleri bir hareket yasası oluşturmayan sistemler ise Random Walk olarak tanımlanmaktadır.

Sistem teorisine göre yapılan yukarıdaki sınıflamaya uygun olarak deformasyon ölçülerinin değerlendirilmesinde öngörülen değerlendirme modelleri Şekil (1.7) ve özellikleri Çizelge (1.1)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Deformasyon Modelleri (Welsch ve Heunecke, 1999)

Eşdeğerlik modelinde iki farklı zaman döneminde mevcut olan obje durumları arasındaki geometrik değişimler incelenmektedir. Kinematik modelde obje hareketi objeye etkiyen kuvvetler göz önüne alınmadan objenin hareketi zamanın fonksiyonu olarak hareketin zamansal akışı, hızı ve ivmesi belirlenmektedir. Statik modelde objenin yük ile jeodezik olarak belirlenen tepkimesi arasındaki fonksiyonel ilişki tanımlanmaktadır. Dinamik modelde ise objenin hareketleri zamana bağımlı olarak objeye etkiyen kuvvetler ile tanımlanmaktadır.

Çizelge1.1 Deformasyon modelleri ve karakteristiği (Welsch ve Heunecke 1999)

Deformasyon Modeli	Eşdeğerlik Modeli	Kinematik Model	Statik Model	Dinamik Model
Zaman	Modellenemez	Zamanın fonksiyona göre hareketi	Modellenemez	Kuvvet ve zamanın fonksiyonu olarak şekil değişikliği
Kuvvet	Modellenemez	Modellenemez	Kuvvetin fonksiyonu olarak şekil değişikliği	
Objenin Durumu	Dengede	Hareket sürekli	Kuvvet altında dengede	Hareket sürekli

2. DİNAMİK SİSTEM OLARAK ASMA KÖPRÜLER

Sistem analizinde kullanılan asma köprüler modern çağın başlangıcı Brooklyn Köprüsü'nün tasarım ve yapımıyla ortaya çıkmıştır. Brooklyn Köprüsü dünyanın sekizinci harikası olarak ilan edilmiştir.

1940 yılında, Tacoma Köprüsü yapımı tamamlandıktan üç ay gibi kısa bir zaman sonra yıkılmıştır. Araştırmalar sonucunda köprünün rüzgardan meydana gelen salınımlara karşı koyamamasının ve de özellikle burulma rijitliğinin az oluşunun yıkılmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Köprünün kafes kirişli tabliyesi de rüzgardan meydana gelen salınımları artırmış ve köprünün yıkılmasında önemli rol oynamıştır. Bu köprünün yıkılması, 1940 yılından sonra asma köprü inşasında yeni arayışlara gidilmesine neden olmuştur. Arayışlar kutu kesitli ve aerodinamik forma sahip asma köprü tabliyeleri inşa edilmesi düşüncesini geliştirmiştir (Abo-Hamid ve Utku, 1978)

Önemli köprülerin inşası birbirini izlemiştir. Yapı bakımından önemli asma köprüler Çizelge (2.1)'de verilmektedir. Bu köprülerden; Severn, Boğaziçi ve Humber, eğik askılı, diğerleri ise düşey askılı olarak yapılmıştır. Boğaziçi Köprüsü'nün kenar açıklıkları ana kablolara asılı olmayıp, zemine inşa edilmiş temeller üzerine oturtulmuştur. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nde ise kenar açıklık bulunmamaktadır (Dumanoglu ve Brownjohn, 1992).

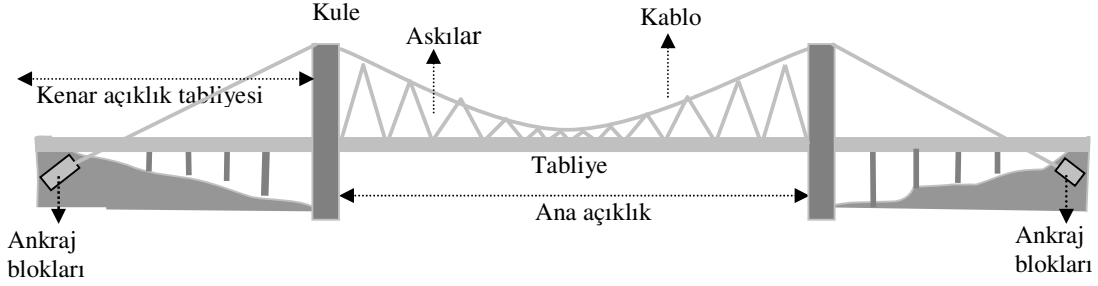
Çizelge 2.1 Önemli bazı asma köprüler

Köprü Adı	Bulunduğu Yer	Trafiğe Açılış Tarihi	Uzunluğu(m)
George Washington	New York	1931	1066
Golden Gate	Sanfrancisco	1937	1280
Mackinac	Michigan	1957	1158
Forth Road	İngiltere	1964	1006
Verrazano-Narrows	New York	1965	1296
Severn	İngiltere	1966	988
Tagus River	Lisbon	1967	1013
Bosporus (Boğaziçi)	İstanbul	1973	1074
Humber	İngiltere	1981	1410
Fatih Sultan Mehmet	İstanbul	1989	1090
Akashi Kaikyo	Japonya	1998	1991

2.1 Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları

Asma köprüler, 550 m'den büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılan yapılardır. Kenar açıklıklar zemin üzerindedir. Zeminle kenar açıklık tabliyeleri arasındaki uzunluk az ise kenar açıklıklar asma yapılmayıp, maddi açıdan daha ekonomik çözüm olan, zemine oturan ayaklar

üzerine inşa edilerek tek bir asılı açıklıktan oluşabilirler. Büyük açıklıkların geçilmesi istenildiğinde orta ve kenar açıklıklar asılı olarak yapılabilir. Çok daha büyük açıklıkların geçilmesi söz konusu olduğu durumlarda ise dört veya daha büyük açıklıklı olarak tasarlanmaktadır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).



Şekil 2.1 Bir asma köprünün kısımları

Kuleler:

Asma köprü kuleleri, tabliye yüzeyinden daha yüksekte inşa edilen betonarme veya çelik yapılardır. Kuleler, tepelerindeki mesnet semerleri aracılığı ile, ana kabloların orta ve kenar açıklıkta daima eşit olmayan çekme kuvvetleri etkisindedirler. Ancak kulelerin devrilmesini engellemek için, bu çekme kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin eşit olmasına özen gösterilmektedir. Kuleleri meydana getiren dikmeler kutu kesitli olup, genelde içleri boştur. Yol seviyesine ve bakım onarım için mesnet semerlerine çıkmayı sağlamak için kulelerde asansör tertibatı vardır. Dikmeler; kule tepelerinden, tabliye altından ve kuleler çok yüksekse orta seviyeden kirişlerle birbirlerine bağlanmaktadır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Ankrajlar:

Ankrajlar, kablolarındaki kuvvetleri zemine aktarmaktadırlar. Genelde ağırlık ankrajı ve tünel ankrajı olmak üzere iki tip ankraj kullanılmaktadır. Ankrajların projelendirilmesinde dikkat edilmesi gereken hususu, ankrajlardan zemine iletilen büyük yatay kuvvetlerin oluşturduğu kaymaya karşı, bir güvenlik faktörü temin edilmektedir. Kablodan ankraja gelen çekme kuvvetlerinden düşey bileşeni ankraj ağırlığı ile, yatay bileşeni ise, zemin yüzeyinde oluşturulan kademelerle zemin kohezyonundan faydalanılarak, zemin ile ankraj arasındaki sürtünmeyi artırarak karşılanmaktadır.

Ankrajlar kabloların çekme kuvvetlerini dengeleyip, yapının stabilitesini sağlamaktadırlar. Ankraj bloklarının çözümü zemin cinsine göre değişmektedir. Eğer blokların inşa edilecekleri yer kayalıksa ve bu kayalık yeterli mukavemete sahipse, blokların inşasından vazgeçilebilmektedir. Kabloların uzantısında, içine kabloların ankraj uzantılarının gömüleceği,

beton kütlesiyle doldurulan, galeriler açılmaktadır. Ankrajın emniyetini artırmak için sözkonusu galeriler alt kısımlarından betonarme bir kiriş ile birbirine bağlanmaktadır. Diğer inşa durumlarında, kabloların çekme kuvveti ve ankraj kütlelerine ait kuvvetlerin (ölü ağırlık, toprak etkisi, vs.) bileşkesi gibi iki kuvvetin etkisi altında dengede bulunan kütleler inşa edilmektedir. Bu dengenin sağlanmasında ağırlık kütlesi denilen ankraj blokları önemli rol oynamaktadırlar. Kuvvetlerin dağıtılmasını sağlamak için, kablo elemanları ankraj kütleleri içinde yayılmaktadırlar. Ankraj kütleleri aynı zamanda yapının kenar ayağını teşkil edecek şekilde inşa edilmektedirler (Pugsley, 1968; Bulson vd., 1983).

Kablolar ve Askılar:

Asma tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar vasıtasıyla zemine aktarmaktadırlar. Asma köprülerin taşıyıcı ana elemanları kablolardır. Kablolar kenarlarda yapının iki ucunda ankraj kütlelerine monte edilmekte ve mesnet semerleri aracılığı ile üzerlerine oturdukları kulelerin tepelerinden geçmektedirler.

Yaklaşık olarak her 50 cm’de bir bağlı paralel telli kablolar ve soğukta işlenmiş yüksek dayanımlı çelik telden yapılmış kablolar olmak üzere iki çeşit kablo vardır.

Askılar çelik telli veya normal halatlı olup, ana kabloya bağlanarak tabliyenin taşınmasını sağlamaktadırlar. Düşey veya eğilimli olmak üzere iki çeşit askı vardır (Dumanoğlu ve Adanur, 1998).

Tabliye:

Tabliye genellikle kafes giriş şeklinde veya rüzgarlardan meydana gelen salınım tesirlerine karşı koymak için kutu kesitli ve aerodinamik formda yapılmaktadır.

Tabliye mesnet bağlantıları:

- a) Sıcaklık değişimlerinden oluşan uzamalardan meydana gelen boyuna kaymalara,
- b) Hareketli yüklerden oluşan deformasyonlardan meydana gelen, mesnet çizgisine paralel yatay bir eksen etrafındaki dönmelere,
- c) Rüzgardan oluşan deformasyonlar sebebiyle düşey bir eksen etrafındaki dönmeler, imkanı vermemelidir (Pugsley, 1968; Bulson vd., 1983).

2.2 Asma Köprülerde Yorulma

Ana kablolar:

Bunlar yüksek mukavemetli çelik kablolardan oluşmaktadır. Ana kablolar köprünün kendi

ağırlığı ile yüklüdürler. Uzun açıklıklı köprüler için trafiğin neden olduğu değişimler büyük değildir. Bu nedenle 2 durum ortaya çıkmaktadır.

1. Korozyondan dolayı herhangi bir bölgedeki boyama ve kaplamaya gelen zararın kablo tellerinde oluşturduğu oyulma durumu,
2. Kule tepelerindeki kabloların eğriliğinin değişmesi (yatay ve düşey düzlemlerdeki hareketlerden doğan) veya askıların bağlantı noktalarındaki tellerin veya tel gruplarının küçük rölatif boyuna hareketleri nedeni ile birleşik teller arasındaki sürtünmelerin artmasıdır (Dumanoglu ve Adanur, 1998).

Askılar:

Burada daha çok kablolardan yapılan askılar incelenmektedir. Özellikle kablo uçları civarında kablonun elastikliği sağlanmalıdır. Bu bölgelerdeki koşulların şiddetlenmesinin bir başka nedeni de, askıların rüzgarda titreşim yapma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca diğer tip yatay titreşimlerde etkili olmakta ve askı uçlarında eğilmeye neden olmaktadır. Ayrıca yapım sırasında ve sonradan yapılan birleşim işlemleri yüzünden, özellikle alt uçlar, kütlelerden ve korozyondan en fazla etkilenen bölümlerdir. Askılar ana kablolardan daha büyük gerilme değişikliklerine sahiptirler (Celasun, 1981).

Tabliye:

Burada iki durum söz konusudur. Ancak her iki durumda da sonradan yapıyı kurabilmek için tabliye elemanları büyük üniteler halinde yapılmaktadırlar. Bunlardan ilki, kaynak bileşimi ile ilgilidir. Kaynaklanma ile küçük iç çatlaklar oluşmaktadır. Çatlakların gerçek ve etkili olarak içte oluşması, bu yapıların dikkatli ve düzenli gözlenmesini gerektirmektedir.

İkincisi ise, tabliye yüzeyidir. Yol yüzeyi 1 ve 2 inch kalınlığında asfalttan oluşmaktadır. Bu asfalt kaplama yaklaşık 18 inch aralıklarla, daha ağır enine elemanlar arasına yerleştirilen boyuna kirişler tarafından rijitleştirilmiş çelik levha üzerine dökülmektedir. Trafik yükü rijitleştirici kirişlerin arasında ve üzerindeki ince levhayı eğmeye çalışmaktadır. Bu hareket her araç geçişinde tekrarlanmaktadır. Burada özellikle kaplama üzerindeki kaynaklı birleşim bölgelerinde bir yorulma problemi ortaya çıkmaktadır (Celasun, 1981).

Kuleler:

Kulelerle ilgili yorulma üzerine fazla bir açıklama yapılmamaktadır. Çünkü bu elemanlardaki basınç kuvveti nedeni ile pratikte yorulma problemi oluşmamaktadır.

Diğer yandan ankrajlarda da yorulmanın daha az olduğu ifade edilmektedir. Ankrajlar, yüksek

çekme gerilmeli yapılar içermektedirler.

Ayrıca halatların sıklaştırılmasından dolayı bir uzama oluşmaktadır. Bu yüzden halatlar yapıldıktan sonra, öncelikli olarak ön uzamaya tabii tutulmaktadırlar. Verilen yük, hesaplanan yükten %10-20 fazla olmaktadır (Celasun, 1981).

2.3 Asma Köprülere Etkiyen Büyüklükler

Mühendislik yapıları her bir yapı elemanının kendi ağırlığından kaynaklanan yükler, hareketli yükler (taşıt ve yayaların ağırlığı), hareketli yüklerin çarpma ve dinamik etkisi, rüzgar yükleri, kar yükü, ısı gerilmeleri, buz ve akarsu akıntı kuvvetleri gibi yükleri taşıyacak şekilde boyutlandırılır. Bütün bu yüklere karşılık yapılar farklı tiplerde ve özelliklerde tepkiler gösterirler.

Asma köprüler de değişik yükler altında farklı davranışlar sergilerler. Bu nedenle gerek yapı olarak gerekse etkileyen yükler olarak çok fazla karmaşık özelliklere sahiptirler. Özel bir yapı olan asma köprülere etki eden büyüklükler, çoğunlukla trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimleri olarak ele alınmaktadır.

2.3.1 Trafik Yüğü

Elastik yapılarda, özellikle köprülerde hareketli yüklerin dinamik etkisinin belirlenmesi çok fazla karmaşık problemlerdir. Fazla sayıda parametreye sahip bu tür problemler pek çok araştırmacı tarafından çözümlenmeye çalışılmış ve güvenilir sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu amaçla çalışmalar, ya teorik ya da deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, hareketli yüklerin bazı parametrelerini indirmek, genellikle de ihmal etmek suretiyle köprülerin dinamik davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Örneğin taşıt tipinin ihmal edilmesi ve sönüm parametresinin sabit alınması gibi yaklaşımlarla problem basite indirgenmeye çalışılmıştır (Michaltsos, 2002). Diğer yandan hareketli yüklerin, köprü titreşimine neden olan en önemli parametresinin hız olduğu yapılan araştırmalarda belirtilmiştir (Hench ve Fafard, 1997).

Köprülerin üzerinden geçen taşıt yükleri, standart kamyonlardan veya bunlara eşdeğer olan şerit yüklerinden oluşmaktadır. Standart kamyonlara eşdeğer şerit yükleri, trafik şeridi boyunca üniform yayılı yük ile bir tekil yükten oluşmaktadır. Üniform yayılı yükün ve tekil yükün şeritin eksen çizgisine dik 3,00 m.lik bir genişliğe yayılı olduğu kabul edilmektedir. TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesine göre dört ayrı standart yükleme sınıfı bulunmaktadır ve bu yükler Çizelge (2.2)'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi'ne göre taşıt yük sınıfları

Yük Sınıfı	Araç Tipi
0	Otomobil, motorsiklet, kamyonet ve minibüsler (aks aralığı <3,20 m)
1	Kamyonet, midibüs, kamyon, ambulans, belediye/halk otobüsü ve büyük otobüs (aks aralığı >3,20 m)
2	Otobüs, kamyon ve treyler (3 akslı)
3	Otobüs, kamyon ve treyler (4 ve 5 akslı)

2.3.2 Sıcaklık Değişimi

Sıcaklık değişimleri malzemelerin uzunluklarının değişimine neden olmaktadır. Malzemelerin bu temel özelliğinin bir sonucu olarak, köprülerde üst yapı elemanlarında uzama ve kısalma değişimleri meydana gelmektedir. Sıcaklığın artması ile köprü elemanlarında uzama, sıcaklık düştüğünde ise kısalma oluşmaktadır. Geleneksel olarak köprülerde bu değişimleri karşılamak için mesnet (yapının dayanak noktası) ile üst yapı arasında genişleme mafsalları bulunmaktadır (Arsoy, 1999).

Yapı sıcaklıkları, sürekli değişen meteorolojik koşullarda belirlenmektedir. Meteorolojik koşullar çok karmaşık oldukları için tam olarak anlaşılmaları çok zordur. Basit olarak yapı sıcaklığını etkileyen faktörler aşağıda kısaca özetlenmiştir (O'Connor ve Shaw, 2000).

- Günlük sıcaklık (özellikle gündüz sıcaklıkları)

Günlük sıcak değişimleri, köprü sıcaklığını belirlemede çok önemli parametrelerden birisidir. Bu sıcaklığın, rüzgar ve diğer hava koşullarından etkilenmeden standart bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir.

- Rüzgar hızı

Rüzgar hızı lokal alanlarda sıcaklığın değişimine neden olmaktadır. Genel olarak yüksek rüzgar hızı, yapıdaki sıcaklığı düşürmektedir.

- Yapı malzemelerinin sıcaklığa bağlı özellikleri

Metallerde sıcaklık akışı betondan daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu nedenle metal köprülerde yapı sıcaklığı değişimi, beton köprülerden daha yüksektir.

- Yoğunlaşma (Çökelme)

Yoğunlaşma, alt yapı ve üst yapı arasındaki sıcaklık transferinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Yoğunlaşma yapı sıcaklığını düşürmektedir.

- Diğer hava koşulları

Bütün bu faktörlerin etkisi ile yapıdaki sıcaklık dağılımı genellikle karmaşık bir durum almaktadır. Bu nedenle bazı (örneğin; köprü boyunca sıcaklığın sabit alınması gibi) genellemeler ve indirgemeler yapılmaktadır. Köprülerdeki sıcaklık değişimleri 2 bölümde incelenmektedir.

1. Ortalama köprü sıcaklığı: Köprüler için etkili bir sıcaklık olup, köprülerdeki uzama ve kısaltmalar hesaplanabilmektedir.
2. Köprünün yanal uzunluğuna, boylamasına uzunluğuna ve yüksekliğine ve bağlı olarak sıcaklık değişimi: Sıcaklık köprü tabliyesinin bir tarafından diğerinde yada en alt ve en üst bölümlerinde farklılık göstermektedir. Yani sıcaklık gradyenti belirlenmektedir. Sonuçta, sıcaklık köprüde üniform olmayan bir dağılım göstermektedir. Bu etki daha çok köprü kirişlerinin eğilmesine neden olmaktadır.

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.

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

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

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

Δt_s : Sıcaklık farkı (projede öngörülen sıcaklık ve köprüye etkiyen sıcaklık arasındaki fark)

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

Köprünün yapım sıcaklığı ve köprünün maksimum sıcaklığı arasındaki fark köprülerde zararlı olabilecek boyutlarda uzama-kısalma etkisi oluşturabilmektedir. Yukarıda verilen eşitlik ile bu hareketler basit olarak hesaplanabilmektedir. Bu nedenle proje esnasında olası maksimum sıcaklık farkı Δt değerine karşılık maksimum hareket hesaplanmaktadır.

Köprü, hem yıllık hem de günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. En büyük uzama, yaz günleri, en büyük kısalma ise kış geceleri meydana gelmektedir. Sıcaklıktan dolayı köprüde oluşan genleşmeler ile sıcaklık değişimleri arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Yani sıcaklık artışı ile köprüde genleşme artmaktadır. Bu nedene günlük ve yıllık sıcaklık değişimleri ile köprüde sıcaklığa bağlı günlük ve yıllık genleşmeler hesaplanabilmektedir.

2.3.3 Rüzgar Kuvveti

Rüzgar kuvveti köprülerin tasarımında her zaman çok önemli olmuş ve bu konuda fazlası ile araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda, rüzgar kuvvetinin güvenilirlik ve doğruluk tanımı için rüzgarın özelliklerini ifade etmede belirsizlikler bulunduğu ifade edilmektedir. Bu belirsizlikleri gidermek için köprüdeki rüzgarın etkisi ile ilgili tasarım parametreleri ve varsayımlar ayrıntılı bir biçimde araştırılması gerekmektedir (Ochshorn, 1981).

Rüzgar kuvvetinin yapıyı etkileyen üniform yayılı hareketli bir kuvvet olduğu, yatay ve köprü eksenine dik doğrultuda ve sabit şiddette etkilediği kabul edilmektedir. Rüzgarın, köprü eksenine dik düzlemdeki bütün elemanların yüzeylerine etkidiği kabul edilmektedir (O'Connor ve Shaw, 2000).

Asma köprülerde tabliye rüzgar kuvvetinden en fazla etkilenen bölümdür. Tabliye kirişi, yanal rüzgar kuvvetlerine karşı çok esnektir. Bunun açıklık ortasındaki yanal deplasmanı üstte genleşmez kabloların varlığı dolayısı ile tabliyenin ortasında bir yükselme ortaya çıkacak kadar büyük olmaktadır. Köprülerde rüzgar kuvveti kısmen tabliye sisteminin yatay bir düzlemdeki elastik eğilmesi ile ve kısmen de kabloların ortaya koyduğu yerçekimi etkisi ile karşılanmaktadır.

Gerçek bir aerodinamik kesit, rüzgar akımını bölmek için keskin uçlar (rüzgar burnu) yapılarak sağlanabilmektedir. Bunun için levhalara rüzgar yönü ile ilgili olarak eğim verilir. Bu rüzgarın sürüklenme katsayısını 0,5'e kadar indirebilmektedir. Aerodinamik kesitlerin uygulanması rüzgardan doğacak titreşimlerden kurtulmanın en etkili yoludur. Aerodinamik kesit prensibi ilk kez 1960'lı yılların ortasında Severn Köprüsü'nde uygulanmıştır. Buna benzer bir kesit daha sonra Boğaziçi Köprüsü'nde ve Humber Köprüsü'nde kullanılmıştır. Ayrıca Boğaziçi Köprüsü'nün etkileyen rüzgar yükü altında salınımına geçmediğinden emin olmak için tabliyenin 100'mlik bir bölümünün 1/50 ölçekli model, İngiltere'de Ulusal Fiziksel Laboratuvarı'nda rüzgar tüneline denetlenmiştir (O'Connor ve Shaw, 2000).

TCK Yol Köprüleri Teknik Şartname'sine göre; rüzgar yükü köprü boş iken $0,25 \text{ t/m}^2$ alınmaktadır. Dolu köprülerde rüzgar yükünün $0,125 \text{ t/m}^2$ olduğu ve hem köprüye hem de

trafik şeridine etkidiği kabul edilir (bu yükler 160 km/sa'lık rüzgar hızı baz alınarak hesaplanmıştır).

Yapılan rüzgar analizi çalışmalarında, rüzgarın yatay olarak her yönde esebileceği kabul edilmektedir. Diğer yandan rüzgarın esme yönü de önemli bir etken olup, yüksekliğe bağlı olarak da değişim göstermektedir. Ayrıca rüzgar tüm yüzey boyunca etkili olmaktadır. Genel olarak rüzgar kuvvetinin hesaplanmasında matematiksel olarak kullanılan eşitliğin temeli Bernoulli eşitliğine dayanmaktadır. Bu eşitlik,

$$q = 0,5 p V^2 \quad (2.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada q rüzgar basıncı, p havanın yoğunluğu ($1,225 \text{ kg/m}^3$) ve V'de rüzgar hızıdır. Yüksekliğe bağlı olarak yapı yüzeylerine rüzgarın uyguladığı kuvvet

$$p_e = (0,0000474 K G C) V^2 \quad (2.3)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada;

p_e : 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 (Ochshorn, 1981). Çizelge (2.3) yüksekliğe bağlı olarak belirlenen K ve G değerlerini göstermektedir.

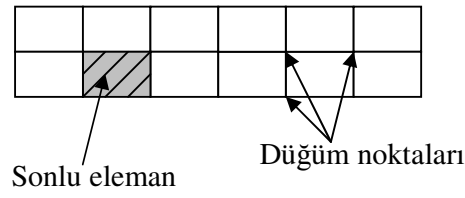
Çizelge 2.3 Yüksekliğe bağlı K ve G değerleri (Ochshorn, 1981)

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

2.4 Mühendislik Yapılarında Doğal Frekans ve Modların Belirlenmesi

Mühendislik Yapılarının doğal frekans ve modlarını belirlemede Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, yapıların sonlu elemanlar ağı oluşturulurken elemanların dağılımına, boyutuna, şekline ve sayısına karar verme zorunluluğu

vardır. Bu durumda orijinal yapı, mümkün olduğu kadar orijinaline yakın bir şekilde elde edilebilmektedir. Böyle bir çalışmanın genel amacı, basit yer değiştirme modellerinin yaklaşık doğru çözümler vermesi için yapının, yeteri kadar küçük elemanlara bölünmesini öngörmektedir. Bölünen bu her bir elemana sonlu eleman ve birleştikleri köşe noktaları da düğüm noktaları olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.2). Her bir düğüm noktası altı serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar üç adet öteleme ve üç adette dönme serbestliğidir. Elemanın davranışı bu bilinmeyen serbestlik derecelerini kapsayan denklemlerle ifade edilmektedir. Böylece sonsuz serbestlik derecesi olan bir sürekli ortam, sonlu serbestlik derecesi olan bir modele dönüşmektedir. Bu model yapının “Sonlu Eleman Modeli” olarak adlandırılmaktadır. Her eleman komşusu olan diğer elemanlara gerçekte sonsuz sayıda nokta ile bağlanmaktadır. Fakat sonlu elemanlar metodunda her elemanın sadece düğüm noktaları aracılığı ile komşu elemanlara bağlı olduğu kabul edilmektedir. Böylece yer değiştirmelerin uygunluğunun sadece bu noktalarda sağlanması yeterli olmaktadır (Taşcı vd., 2004).



Şekil 2.2 Basit bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları

Sonlu elemanlar metodu ile asma köprülerin dinamik analizinin yapılabilmesi için, köprü üzerine zamana bağlı olarak değişen yüklerin uygulanması gerekmektedir. Ancak uygulanan bu yükün yüksek frekanslı veya rastgele olarak değişmesi veya yükün aniden uygulanması gerekmektedir. Dinamik analiz için; rijitlik matrisi (eleman tipine bağlı olarak, eleman deplasman alanını tarif eden şekil fonksiyonları kullanılarak her tip eleman için ayrı ayrı hesaplanır), kütle ve sönüm matrisi gerekmektedir.

Dinamik analizlerde ilk adım olarak genelde doğal frekans değerleri ve bu frekanslara ait Şekil değiştirme modları hesaplanmaktadır. Bu değerler yapının her hangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışını tespit etmektedirler. Bu modları inceleyerek zorlayıcı kuvvetlerin yapıya hangi modlarda daha çok enerji verebileceği ve yapının hangi noktasındaki tepkiye hangi modun daha büyük katkı yapacağı tespit edilmektedir. Genellikle yapılan çalışmalarda az sayıda modun ve bunlarla ilgili frekans değerlerinin hesaplanması pratik açıdan yeterli olduğu ifade edilmektedir.

Herhangi bir yapının frekansları, yapının sadece kütle matrisi (yani kütlesi) ve rijitlik matrisi (yani malzeme özelliklerinden oluşan matris) dikkate alınarak sönümsüz serbest titreşimi

sonucu elde edilmektedir. Dolayısıyla bir yapının doğal frekansları, yapıya etkiyen diğer yüklerden (rüzgar, deprem, araç ve vb) bağımsız hesaplanmaktadır (Dumanoğlu ve Adanur, 1998). Buna göre sönümsüz serbest titreşim eşitliği

$$M\ddot{U}+KU=0 \quad (2.4)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada;

M : Sistem kütle matrisini,

K : Sistem rijitlik matrisini,

$\ddot{U}$: İvme vektörünü,

U : Rölatif yerdeğiştirme vektörünü

göstermektedir. Sistemin toplam rijitlik matrisi $K=K_E+K_G$ 'dir. K_E : toplam standart elastik rijitlik matrisini, K_G : ise toplam geometrik rijitlik matrisini göstermektedir. Harmonik hareket için sistemin U yerdeğiştirmeleri,

$$U=ucos(w_nt-\alpha) \quad (2.5)$$

dir. Burada;

α :Faz açısını,

w_n :Doğal açısal frekansı,

t : Zamanı,

u : Harmonik hareketin genliğini,

U : Yerdeğiştirmeyi

göstermektedir. Eşitlik (2.5), Eşitlik (2.4)'de yerine yazıldığında;

$$[K-w_n^2M]U=0 \quad (2.6)$$

eşitliği elde edilmektedir. Sıfırdan farklı çözüm ancak katsayı determinantının sıfıra eşit olmasıyla mümkün olmaktadır.

$$|K-w_n^2M|=0 \quad (2.7)$$

Bu eşitliğe yapısal sistemin frekans eşitliği denir ve serbestlik derecesi kadar köke sahiptir. Bulunan köklerin karekökleri ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$) köprünün n adet titreşim modunun doğal açısal frekanslarını göstermektedir. Sistemin doğal frekanslarının en küçüğüne temel frekans denilmektedir. Modal titreşim frekansları büyüklüklerine göre sıralanarak belirlenmektedir.

$$0 \leq w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_n \quad (2.8)$$

Her bir doğal açısal frekans için Eşitlik (2.6)'daki katsayı matrisi hesaplanıp i 'inci modal frekansa karşılık gelen harmonik titreşim genlikleri u_i hesaplanabilmektedir.

$$u_i^T = [u_{1i} \ u_{2i} \ . \ . \ . \ u_{ni}] \quad (2.9)$$

Her bir doğal açısal titreşim frekansı için hesaplanan genlik vektörleri; modal vektör, doğal mod veya kısaca mod olarak adlandırılmaktadır. Maxwell-Betti Teoremi kullanılarak normalleştirilmiş modlar bulunabilir. Bu teoreme göre i 'nci ve j 'nci doğal titreşim modları arasındaki ortogonalite (2.10) eşitliği ile gösterilmektedir.

$$u_i^T M u_j = 0, \quad i \neq j \quad (2.10)$$

Serbest titreşimin normalleştirilmiş modu Φ_{ij} ,

$$\Phi_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sqrt{u_j^T M u_j}} \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte;

u_{ij} : i 'nci düğüm noktasında j numaralı açısal frekanstan meydana gelen genlik,

M : Sistem kütle matrisi,

u_j : j 'nci açısal frekanstan meydana gelen genlik vektörüdür (Dumanoglu ve Adanur, 1998).

Diğer yandan, Dumanoglu ve Severn (1989)'da rüzgar ve trafik yükü nedeniyle meydana gelen geçici titreşimlerin ölçümleri sonucunda asma köprülerin mod şekilleri ve doğal frekanslarının elde edilebileceğini göstermişler ve örnek olarak da Boğaziçi ve Humber köprülerini seçmişlerdir.

Analizlerde dikkate alınacak mod sayısı yapı tipine göre değişmektedir. Yüksek bina analizlerinde ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiğinden, bu tür yapılar için yapı davranışını belirlemede ilk üç modun dikkate alınması yeterli olmaktadır. Barajlarda ise ilk altı modun dikkate alınması yeterli doğrulukta sonuçların bulunabilmesine imkan vermektedir. Asma köprüler, bina ve barajlara göre daha karmaşık yapılardır. Dumanoglu ve Severn (1987) çalışmalarında kulelerin, tabliyenin ve kabloların, geniş bir mod aralığında, asma köprülerin davranışına önemli katkıların olduğunu belirtmişlerdir.

Dinamik analizlerde, yapı davranışının doğru olarak belirlenmesi yeterli sayıda mod sayısının dikkate alınması ile mümkün olmaktadır. Asma ve kablolu köprülerin düşey doğrultudaki

analizinde ilk 15 modun dikkate alınması yeterli olmaktadır (Soyluk, 1997).

Çizelge (2.4)'de Dumanoglu ve Severn (1985) tarafından Boğaziçi Köprüsünün Sonlu Elemanlar Metodu ile oluşturulan modelinden elde edilen ilk 15 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri görülmektedir. Köprünün doğal frekansları yukarıda da bahsedildiği gibi yapıya etkiyen rüzgar kuvveti, deprem, trafik yükü gibi yüklerden bağımsız olarak sadece yapının kütlesi ve malzeme özellikleri dikkate alınarak sönümsüz serbest titreşim sonucu hesaplanmıştır. Hesaplanan frekanslar küçükten büyüğe doğru sıralanmakta ve en küçük frekans değeri köprünün 1. moduna, en büyük frekans değeri ise 15. moduna karşılık gelmektedir. Bu değerlerle köprünün herhangi bir zorlayıcı kuvvet altındaki davranışı belirlenebilmektedir. Özellikle ilk mod değerleri yapı davranışlarının büyük bir kısmını yansıttığı ifade edilmektedir.

Çizelge 2.4 Boğaziçi Köprüsü'nün ilk 15 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri
(Dumanoglu ve Severn, 1985)

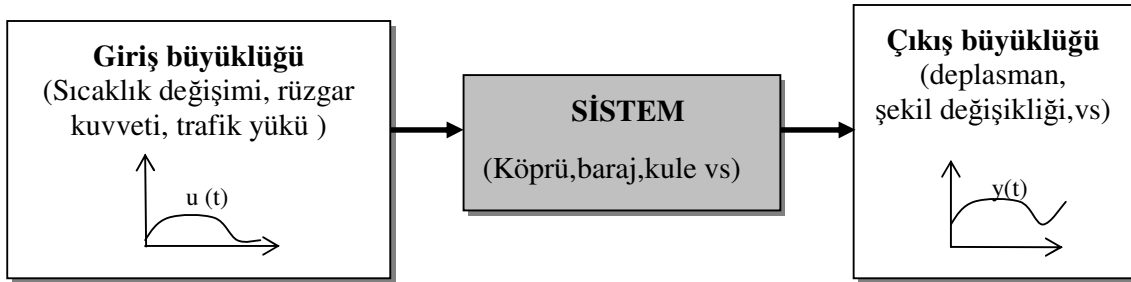
	ModNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Lineer Olmayan Analiz ($K=K_E+K_G$)	Periyot (s)	7,87	6,05	4,42	3,47	2,64	2,16	1,76	1,75	1,48	1,27	1,10	0,96	0,95	0,94	0,84
	Frekans (Hz)	0,127	0,165	0,226	0,288	0,378	0,463	0,570	0,573	0,677	0,788	0,913	1,046	1,058	1,062	1,189

3. DİNAMİK SİSTEMLERİN ETKİ-TEPKİ BÜYÜKLÜĞÜ İLE TANIMLANMASI

Ekonomi, tıp ve teknik gibi alanlarda karşılaşılan problemler gerçek dünyadan bir kesit yansıtmaktadırlar. Bu kesit, sistem olarak adlandırılır. Sistemler (lineer, nedensel, kararlı ve tersine çevrilebilir), bağımsız değişkenler (etki büyüklüğü; giriş sinyali) ve bağımlı değişkenler (tepki büyüklüğü; çıkış sinyali) arasındaki bağlantıyı oluşturan bir oluşum olarak düşünülmektedir. Sistem ve fiziksel bir büyüklük olan, matematiksel olarak tanımlanabilen ve ölçü teknikleri ile belirlenebilen sinyal terimi, sistem teorisinin temellerini oluşturmaktadırlar.

Bir çok sinyal pratikte zaman bölgesinde, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Başka bir ifade ile, bir sinyalin grafiksel olarak gösteriminde, bir eksen sinyalin genliğini (bağımlı değişken), diğer eksen ise zamanı göstermektedir. Bu gösterim sinyalin zaman-genlik ilişkisini ortaya koymaktadır. Fakat bu tür gösterimler sinyal işleme (zaman bölgesinde verilmiş sinyali işlenmemiş sinyal olarak kabul edersek, herhangi bir matematiksel dönüşüm uygulanan sinyal de işlenmiş sinyal olarak ifade edilir) uygulamaları için genelde yetersiz kalmaktadır. Çünkü, uygulamalar için gerekli olan asıl bilgi sinyalin içerdiği frekans bilgisinde saklı kalabilmektedir. Bu durumda sinyalin zaman-genlik gösterimi yerine frekans spektrumu incelenmektedir. Frekans spektrumu sinyalin içerdiği frekans bileşenlerini yani sinyalde mevcut olan frekansları göstermektedir ve frekans bölgesinde tanımlanmaktadır.

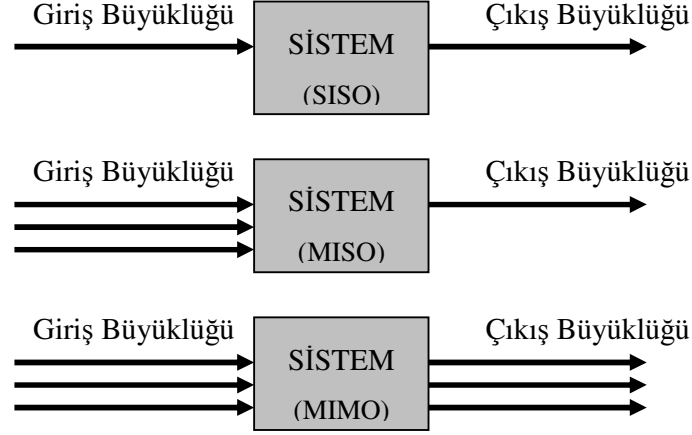
Yaşamın bütün kesimlerinden, özellikle teknik ve ekonomide karışık sistemlerin araştırılması ve zamansal davranışının tanımlanması sistem teorisinde matematiksel modellerle gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.1 Sistemlerin giriş ve çıkış büyüklükleri ile gösterimi

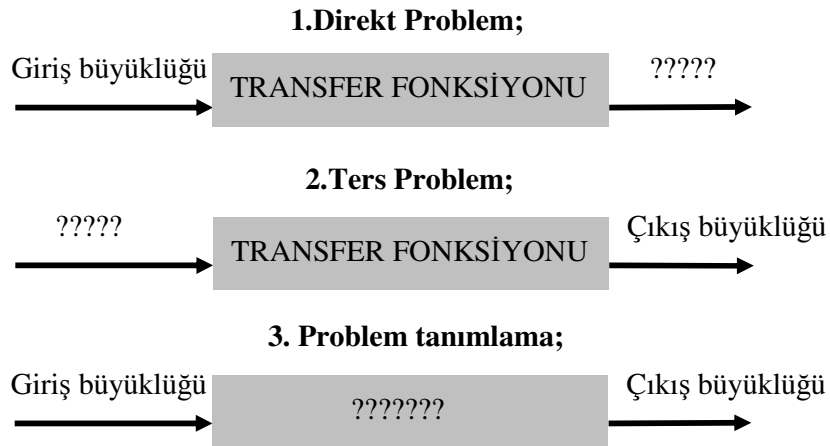
Bir sistemin elemanları probleme bağımlı olarak giriş büyüklüğü $u(t)$ ve çıkış büyüklüğü $y(t)$ şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Sistemi tanımlayan matematiksel model, sistem analizi ile sistemin giriş ve çıkış büyüklükleri arasında oluşturulan bir fonksiyon (transfer fonksiyonu) ile elde edilmektedir. Giriş büyüklüğü Şekil (3.1)'de görüldüğü gibi sistemden çıktıktan sonra çıkış büyüklüğüne dönüşmektedir.

Sisteme etkiyen giriş ve sistemin tepkisi olan çıkış büyüklüğünün sayısına bağlı olarak sistemler; bir giriş büyüklüğü-bir çıkış büyüklüğüne sahip sistemler (single input-single output; SISO), çoklu giriş büyüklüğü-bir çıkış büyüklüğüne sahip sistemler (single input-multi output; MISO) ve çoklu giriş büyüklüğü-çoklu çıkış büyüklüğüne sahip (MIMO) sistemler olarak da tanımlanmaktadır.



Şekil 3.2 Sistemlerin giriş ve çıkış büyüklük sayısına bağlı olarak tanımlanması (Gülal, 2002)

Dinamik sistemlerin matematiksel modellerinin kurulmasında teorik ve deneysel sistem analizinden faydalanılmaktadır. Teorik sistem analizinde model de yapılan kabullerle hesaplama yapılmaktadır. Deneysel sistem analizinde ise sistemin zamansal davranışı için matematiksel model, ölçülen giriş ve çıkış büyüklüklerinden elde edilmektedir. Deneysel sistem analizi “tanımlama” olarak da adlandırılmaktadır.

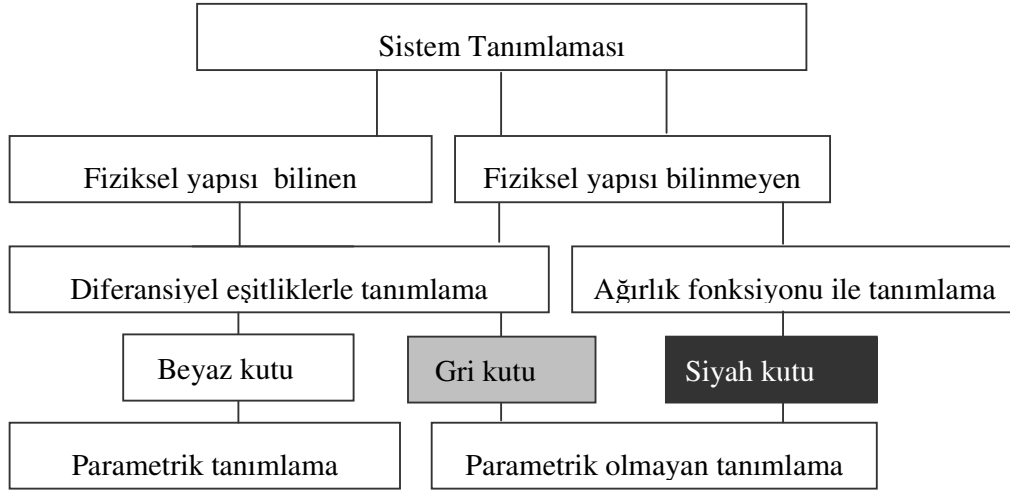


Şekil 3.3 Dinamik sistemlerde etki-tepki ve transfer fonksiyonu ilişkisi

Dinamik sistemlerde genel olarak etki büyüklüğü, transfer fonksiyonu ve tepki büyüklüğüne bağlı olarak üç tür problemle karşılaşılır. Bunlar, etki-tepki ve transfer fonksiyonunun

bilinen ve bilinmeyen durumuna göre, Şekil (3.3)'de gösterilmektedir. Etki-tepki büyüklüğünün bilinmesi durumu olan 3. problemin bir sistem tanımlama problemi olduğu da görülmektedir.

Sistem teorisinde, sistem tanımlaması, dinamik bir sistemin transfer fonksiyonunun matematiksel-fiziksel gösteriminin oluşturulması şeklinde tanımlanmaktadır. Transfer fonksiyonunun oluşturulması için nasıl bir modelin yapılabileceği, parametrik ve parametrik olmayan tanımlamaların seçimine bağlı olmaktadır.



Şekil 3.4 Sistem tanımlaması (Welsch, 1996)

3.1 Parametrik Tanımlama

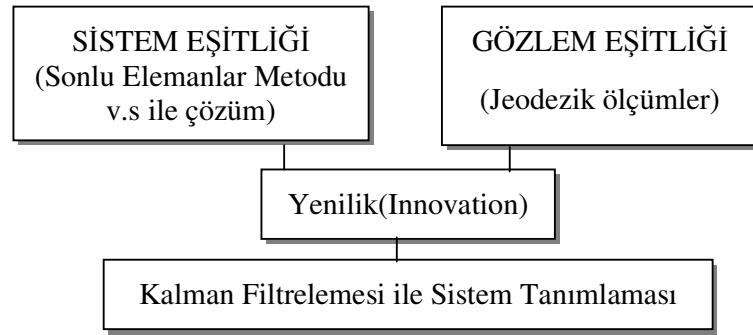
Parametrik tanımlama ile sistemin davranışı, fiziksel yasalar ile sisteme ait bileşenler dikkate alınarak matematiksel modellerle tanımlanabilmektedir. Bu tip modelde sistemin bütün bilgisi ele alınmaktadır. Bu tür yaklaşımlar çok faydalı olmasına rağmen, sistemin bütün bilgisini ele almak her zaman mümkün olmamaktadır. Parametrik tanımlama ile belirlenen parametrik model aynı zamanda bir beyaz kutu (white-box) model adını da almaktadır.

Parametrik modellerin tanımlanmasında koordinat sistemleri referans sistemler olarak önemli bir yere sahiptirler. Koordinatlardan başka ek olarak sistemin fiziksel parametreleri de kullanılmaktadır. Sistem teorisi çalışmalarında fiziksel parametreler sistemin doğal ilişkisini tanımlamaktadırlar (Eichhorn ve Möhlenbrink, 2001).

Eğer parametrik sistem tanımlaması ile sürecin lokal değişimlerinden çok, sadece zamana bağlılığı dikkate alınırsa sistem toplu (lumped) parametre modellerle tanımlanmaktadır. Toplu

parametrik modellerde sistemin farklı özellik gösteren bileşenlerinin homojen bir yapıda olduğu kabul edilmekte ve bu bileşenler tek bir noktada toplanmaktadır. Örneğin; farklı türde malzemelere sahip herhangi bir yapının zamana bağlı olarak sıcaklık değişimlerine verdiği tepkinin belirlenmesinde yapının bütün malzemelerinin homojen olarak düşünülmesi, toplu parametrik model tanımlaması olarak ele alınabilmektedir. Diğer yandan parametrik sistem tanımlaması ile sürecin zamandan daha çok parametrenin lokal değişimlerine bağlılığı da dikkate alınırsa sistem parçalı (distributed) parametre modellerle tanımlanmaktadır. Başka deyişle; herhangi bir yapıya ait farklı malzemelerin her birinin sıcaklık değişimlerine tepkisi ayrı ayrı ele alınmaktadır. Parçalı parametre durumunda, parça sayısı arttıkça daha doğru sonuçlar elde edilmesine rağmen sürecin işlem hacmi artmakta ve daha çok zaman harcanmaktadır. Parçalı parametrelere en güzel örnek ise, Sonlu Elemanlar Yöntemidir.

1960'lı yılların başlarında Kalman ve Bucy tarafından geliştirilen Kalman filtrelemesi, sistemlerin tanımlanmasında kullanılan oldukça popüler ve evrensel bir kestirim aracı olup bütün model türlerine uygulanabilmektedir (Grewal and Andrews, 2001). Kalman filtrelemesinin dinamik sistemlerin tanımlanmasında ve kalibre edilmesindeki temel işleyişi, Şekil 3.5'de kısaca özetlenmiştir. Şekil (3.5)'de bir tarafta sistem eşitliği olarak adlandırılan, diferansiyel eşitliklerle ifade edilen objenin model teorisi yer almaktadır. Diğer tarafta ise objenin gerçek davranışlarının izlendiği ölçümler bulunmaktadır ve gözlem eşitlikleri olarak ifade edilmektedirler. Kalman filtrelemesi En Küçük Kareler Yöntemini kullanarak her iki eşitliği birleştiren bir tekniktir. Yenilik ise; objenin ölçülen ve predikte edilen reaksiyonu arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.



Şekil.3.5 Kalman-Filtreleme Tekniği (Heunecke, 1995)

Bazı durumlarda, model oluşturmada fiziksel yasaların kullanılması mümkün olmasına rağmen, modele ait parametreler bilinmemektedir. Bu durumda sistem tanımlaması, beyaz kutu (white-box) ve siyah kutu (black-box) modelinin bir kombinasyonu şeklindedir. Bu tür modeller de gri kutu (gray-box) model olarak adlandırılmaktadır.

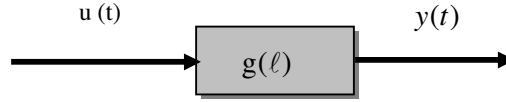
3.2 Parametrik Olmayan Tanımlama

Parametrik olmayan tanımlama da sistem birkaç fiziksel yasa ile çok karmaşık tanımlanabilmekte ya da yeterince öncül bilgi elde edilememektedir. Yani sistemin yapısı bilinmemektedir. Bu durumda genel bir model yapısı kullanılmakta ve sistemin tanımlanması ölçülen giriş ve çıkış büyüklüklerine bağlı olarak yapılmaktadır. Giriş ve çıkış büyüklükleri fiziksel herhangi bir anlamı olmaksızın ilişkilendirilmekte ve öngörülen modelin parametreleri bir kestirim işlemi kullanılarak elde edilmektedir. Bu tür modeller aynı zamanda siyah-kutu (Black-box) model olarak da adlandırılmaktadırlar (Nelles, 2000).

Parametrik olmayan modelin belirlenmesinde en iyi bilinen model gösterimleri olan impuls tepki ve transfer fonksiyonundan yararlanılmaktadır. İmpuls tepki, girişe bir impuls uygulandığında modelin zamana bağlı bir tepki göstermesidir. Modelin t zamanındaki $y(t)$ çıktısı, $u(t)$ girişi ve sonsuz sayıda impuls tepki $g(t)$ 'nin çarpımı ile elde edilmektedir (Bosch ve Klauw, 2000).

$$y(t) = \sum_{\ell=0}^{\infty} g(\ell)u(t - \ell) \quad (3.1)$$

İmpuls tepkisi, Şekil (3.6) ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6 İmpuls tepkisi

q ileri gecikme işlemcisi ile; $qu(t)=u(t+1)$, q^{-1} geri gecikme işlemcisi ile de; $q^{-1}u(t)=u(t-1)$ tanımlamaları ile (3.1) eşitliği,

$$y(t) = \sum_{\ell=0}^{\infty} g(\ell)[q^{-\ell}u(t)] = \left[\sum_{\ell=0}^{\infty} g(\ell)q^{-\ell} \right] u(t) \quad (3.2)$$

şeklini almaktadır. Bu eşitlikteki

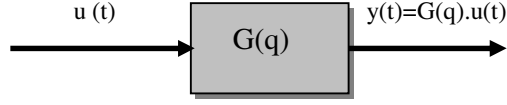
$$G(q) = \sum_{\ell=0}^{\infty} g(\ell)q^{-\ell} \quad (3.3)$$

transfer fonksiyonu (3.2) eşitliği

$$y(t)=G(q)u(t) \quad (3.4)$$

şeklini almaktadır. Bu model etki ve tepki sinyalleri arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır.

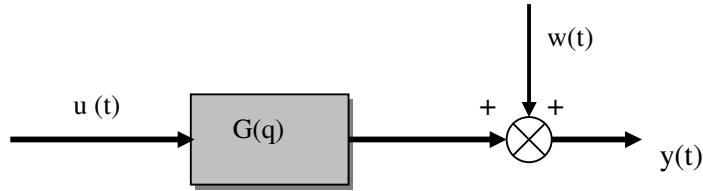
Belirlenen bu model aşağıdaki şekilde yeniden gösterilebilir.



Şekil 3.7 Parametrik olmayan modelin $G(q)$ transfer fonksiyonu

Şekil (3.7) ve (3.4) eşitliğinde tanımlanan model, gerçek sistemi tanımlama da çok kullanışlı bir model değildir. Çünkü, modelde giriş sinyalinin tam olarak bilindiği (hatasız) ve deterministik bir sinyal olarak ele alındığı görülmektedir. Fakat uygulamalarda, her zaman sistemi etkileyen bozucu etkiler (hatalar) vardır ve bu etkiler stokastiktir. Bu etkiler sistem tanımlamasında ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi, sinyal ölçümü sırasında meydana gelmekte (gürültü, sensörlerde sürüklenme (drift)) ve tam olarak tespit edilememektedir. Bu yüzden yapılan bütün sinyal ölçmeleri bu tür hatalardan etkilenmektedir. İkincisi ise, sistemlerin giriş sinyali olarak ele alınan sinyallerle birlikte kontrol edilemeyen başka giriş sinyallerinden de etkilenmesidir. Örneğin; hareket halinde bir geminin izlediği rota sistemin çıkış sinyali, kontrol edilebilen rota açısı ise giriş sinyali olarak ele alındığında, geminin rotası yani giriş sinyali su akıntısından etkilenmektedir. Bu akıntı kontrol edilemeyen bir giriş sinyalidir ve genellikle de tahmin edilememektedir.

Sistem tanımlamasında bütün bozucu etkiler $w(t)$ sinyalinde toplanmakta (sistemi etkileyen birden fazla bozucu etki var ise bu etkiler toplu (lumped) olarak ele alınmakta) ve çoğunlukla da sistemin çıkış sinyalinin içerisinde yer aldığı kabul edilmektedir.



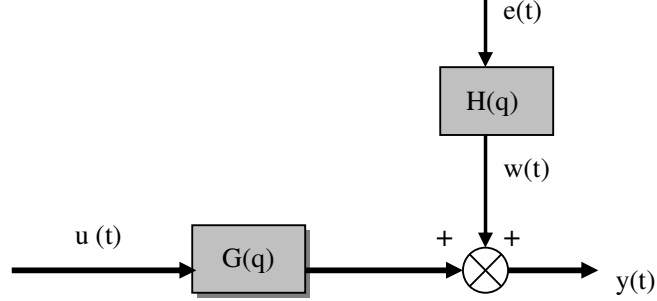
Şekil 3.8 Bozucu etkileri ile tanımlanan model (Bosch ve Kluauw, 2000)

Bozucu etkiler lineer bir filtreleme ile filtrelenmiş bir beyaz gürültü (white noise) sürecinden oluşmaktadır. Bilindiği gibi hemen hemen bütün stokastik süreçlerin, lineer bir filtreleme uygulanmış rasgele özel bir süreç tarafından oluşturulduğu varsayılmaktadır. Bu özel rasgele süreç korelasyonsuz stokastik bir özelliğe sahiptir ve beyaz gürültü $e(t)$ olarak adlandırılmaktadır. Beyaz gürültülü bir süreç istatistiğin birinci (ortalama=0) ve ikinci (varyans= σ_e^2) momentleri ile tanımlanmaktadır. Uygulamalarda genel olarak normal dağılımlı

olduğu varsayılmaktadır (Bosch ve Klauw, 2000). Bu durumda sistemin stokastik kesimi $w(t)$

$$w(t)=H(q)e(t) \quad (3.5)$$

eşitliği ile tanımlanmakta ve burada $H(q)$ stokastik kesimin transfer fonksiyonunu oluşturmaktadır. Bu durumda Şekil (3.8) aşağıdaki şekilde oluşturulabilir



Şekil 3.9 Parametrik olmayan model

Şekil (3.9)'da gösterilen model, bir deterministik kesim $G(q).u(t)$ ve bir stokastik kesim $H(q)e(t)$ den oluşmaktadır. Parametrik olmayan modeli tanımlayan eşitlik

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (3.6)$$

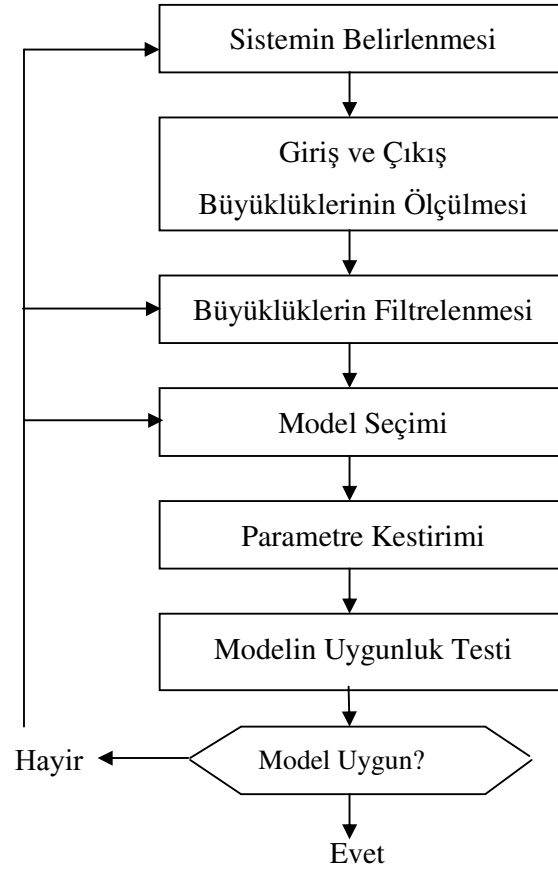
şeklinde ifade edilebilir (Bosch ve Klauw, 2000). Yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan modeller

- ARX model (Auto-regressive with eXogenous Input; ekstra girişli otoregresif model)
- ARMAX model (Auto-regressive Moving average with eXogenous Input; ekstra girişli ortalama hareketli otoregresif model)
- OE model (Output Error; hata çıkışlı model)
- BJ model (Box-Jenkins)

dir. Parametrik olmayan yöntemlerle model elde etmede Şekil (3.10)'da gösterilen iteratif bir işlem süreci gerçekleştirilmektedir.

Bu süreçte, ilk olarak araştırmaya konu olan objenin yani sistemin, sistemi etkileyen büyüklüklerin ve sistem sınırlarının belirlenmesi, daha sonra ise sistemin özelliklerini yansıtacak şekilde etki ve tepki büyüklüklerinin ölçülmesi ve bu ölçümler için seçilen örnekleme aralığının (örnekleme frekansı) sistemin davranışlarını ortaya koyacak şekilde olmasına özen gösterilmesi (Bölüm 4.2.1.3 Sinyallerin Örnekleme Frekanslarının

Belirlenmesi), giriş ve çıkış büyüklüklerinin ortalama değerlerinden çıkartılması, ölçülerde var ise trend bileşenin (Bölüm 4.1 Trend Bileşeni Analizi) ve uyuşumsuz ölçülerin giderilmesi ile filtreleme işleminin yapılması, sistem için uygun bir model öngörülmesi ve bu modele ait parametrelerin bir kestirici ile hesaplanması (Bölüm 3.2.1 ARX Model ve Parametre Kestirimi), model derecesinin AIC (Akaike Bilgi Kriteri) ve BIC (Bayes Bilgi Kriteri) kriterlerine göre belirlenmesi ve en son olarak da öngörülen modelin uygunluğunun test edilmesi (standart sapma, kayıp fonksiyon değeri, hataların otokorelasyon fonksiyonu gibi) süreçleri ile sistemi en iyi şekilde temsil eden modelin uygun olduğuna karar verilmektedir.



Şekil 3.10 Parametrik olmayan yöntemlerle model belirleme aşamaları

3.2.1 ARX Model ve Parametre Kestirimi

ARX ve ARMAX modeller parametrik olmayan yöntemlerle sistem tanımlamada yaygın olarak kullanılan model tipleridir. Özellikle ARX modelin derecesinin ve parametrelerinin kestiriminin giriş ve çıkış büyüklüğüne bağlı bir regresyon analizi yaklaşımı ile belirlenmesindeki kolaylık nedeniyle yapılan araştırmalarda en çok tercih edilen bir model türüdür.

ARX model, AR otoregresif kısım, yani değişkenin geçmiş değerlerindeki bilgi ile söz konusu değişkenin gelecek değerlerinin tahmin edilmesi; (Bölüm 4.3.4.2 Otoregresif Süreç) ve ilave bir girişin uygulandığı X kısım ile tanımlanmaktadır.

Giriş büyüklüğü $u(t)$, çıkış büyüklüğü $y(t)$ olan bir sistem,

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nb) + e(t) \quad (3.7)$$

lineer fark denklemi ile modellenenmektedir. Burada; $e(t)$ beyaz gürültü sürecini ve $t=1, 2, \dots, N$ zaman aralıklarını göstermektedir (Ljung, 1999; Özbek, 1996). (3.7) eşitliği q^{-1} gecikme operatörü;

$$q^{-1}y(t)=y(t-1)$$

kullanılarak, (3.7) eşitliği

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t) \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $A(q)y(t)$ modelin otoregresif (AR) bölümü, $B(q)u(t)$ de modelin ilave girişli X bölümüdür. Ayrıca

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$$

ve na, nb modelin dereceleri, $a_1 \dots a_{na}, b_1, \dots, b_{nb}$ modelin bilinmeyen parametreleridir. (3.7) veya (3.8) modeli giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki dinamik ilişkiyi göstermekte ve literatürde ARX (Autoregressive exogenous input) modeli olarak bilinmektedir. (3.8) eşitliği (3.6) eşitliği ile,

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t) + \frac{1}{A(q)} e(t) \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; $G(q) = \frac{B(q)}{A(q)}$ deterministik kesimin transfer fonksiyonu,

$$H(q) = \frac{1}{A(q)} \text{ stokastik kesimin transfer fonksiyonudur.}$$

(3.7) eşitliğinden yararlanarak sistemin herhangi bir zamandaki çıkış büyüklüğü, sistemin daha önceki giriş ve çıkış büyüklükleri ile belirlenmektedir.

$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nb)$ eşitliğinin vektör olarak ifadesi,

$$x^T = [a_1, \dots, a_{na}, b_1, \dots, b_{nb}]$$

ve

$$A = [-y(t-1) \dots -y(t-na) \ u(t-1) \dots u(t-nb)]$$

olmak üzere sistemin beklenen değerleri $E(y(t)) = A \cdot x$

eşitliği ile ifade edilir. Beklenen değerlerin kestirim değerleri ise

$$\bar{y}(t) = A \cdot x \quad (3.10)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Modele ait x^T parametrelerin kestiriminde, En Küçük Kareler Yöntemi en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde parametre kestirimi için, bilinmeyen parametrelerin doğrusal fonksiyonları olan ölçülerin $E(y(t))$ beklenen değerlerinin $y(t)$ ölçü değerleri ile $\bar{y}(t)$ kestirim değerleri arasındaki farklarının karesel toplamının minimum olması öngörülmektedir. Sistem analizinde ölçü değerleri ile kestirim değerleri arasındaki fark $\varepsilon(t)$ “prediksiyon hatası” olarak adlandırılmaktadır ve bu hataların karesel toplamının minimum olması ile modelin parametreleri kestirilmektedir. Prediksiyon hatası düzeltme değerleri olarak da ele almaktadır (Ljung (1999)). Prediksiyon hatası

$$\varepsilon(t) = y(t) - \bar{y}(t)$$

ve

$$\varepsilon(t)^T \varepsilon(t) = \min$$

olması koşulu ile x 'in En Küçük Kareler tahmin edicisi ve ağırlık katsayılar matrisi

$$\bar{x} = (A^T A)^{-1} \cdot (A^T y(t)) \quad (3.11)$$

$$Q_{xx} = (A^T A)^{-1}$$

dir. Birim ağırlıklı ölçünün standart sapması, $f = N$ (ölçü sayısı) - u (bilinmeyen parametre sayısı) serbestlik derecesine göre,

$$mo = \sqrt{\frac{\varepsilon_{(t)}^T \varepsilon_{(t)}}{f}} \quad (3.12)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Sistem tanımlamasında

$$J_N = \frac{\sum_{t=1}^N \varepsilon_{(t)}^2}{N} \quad (3.13)$$

eşitliği kayıp fonksiyon olarak ifade edilmekte ve sistemin modellenemeyen rasgele kesiminin

büyükliğini yansıtmaktadır. Bir parametrenin standart sapması ise

$$m_x = mo\sqrt{Q_{xx}} \quad (3.14)$$

eşitliği ile verilmektedir.

3.2.1.1 Model Derecesinin Belirlenmesi

Model parametrelerinin belirlenmesi kadar önemli olan bir diğer problem, ölçülere en uygun olan modelin derecesinin belirlenmesidir. Farklı derecelerde seçilen modellerden en uygun olanı tespit etmek için farklı kriterler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlar; Akaike Bilgi Kriteri (AIC), Bayes Bilgi Kriteri (BIC) ve Final Prediksiyon Hatası (FPE) kriterleri çok sayıda öngörülen modeller içerisinde en uygun model derecesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bunlardan; AIC kriteri,

$$AIC = N \log(\epsilon_{(t)}^T \epsilon_{(t)}) + 2m \quad (3.15)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada, $m=na+nb$ olmak üzere, öngörülen modeller içerisinde en küçük değerler veren AIC, en uygun model olarak seçilmektedir (Bölüm 4.3.6'da ayrıntılı bilgi verilmiştir).

3.2.1.2 Model Uygunluğunun Test Edilmesi

Model derecesinin belirlenmesinde kullanılan AIC, BIC gibi kriterler en uygun model seçiminde de kullanılmaktadır. Ancak, bu her zaman yeterli olmamaktadır. Bunun için, çok sayıda öngörülen modeller içerisinde, (3.12) eşitliği ve (3.13) eşitliğinde verilen sırası ile standart sapma (mo) ya da kayıp fonksiyon (J_N) değerleri en küçük olan model en uygun model olarak kabul edilmektedir. Standart sapma ve yada kayıp fonksiyon değerleri sistem tanımlamasında modelin güvenilirlik ölçütü olarak kullanılmaktadır.

Bunlardan başka, predikasyon hatalarının otokorelasyon katsayıları ile de modelin uygunluğu hakkında karar verilmektedir. Bilindiği gibi otokorelasyon tek bir zaman serisi değişkeninin gecikmeli değerleri arasındaki değişimin ölçüsü olarak adlandırılmaktadır. Otokorelasyon fonksiyonu serideki yakın komşu veri noktaları arasında ne kadar korelasyon olduklarını belirlemektedir. Zaman serisindeki trend, periyodik hareket ve düzensiz hareketler gibi bileşenlerin araştırılmasında otokorelasyon analizinden yararlanılmaktadır. Otokorelasyon katsayısı; k gecikme sayısı ve $\bar{e}$ hatalarının ortalaması olmak üzere

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i - \bar{\epsilon})(\epsilon_{i+k} - \bar{\epsilon})}{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \quad (3.16)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Otokorelasyon katsayıları yaklaşık olarak sıfır ortalamalı ve $s_{rk} \approx 1/\sqrt{N}$ standart sapmalı normal dağılıma sahiptir (Chatfield,1996). Katsayılar için istatistiksel anlamlılık testi için; $H_0:r_k=0$ veya $H_1:r_k \neq 0$, hipotezleri kurulmaktadır. Belirlenen test büyüklüğü

$$t_{r_k} = \frac{r_k}{s_{rk}} \quad (3.17)$$

öngörülen yanılma olasılığında ($\alpha=0,05$) Çizelge değerinden (standart normal dağılım) büyükse otokorelasyon katsayısının sıfır olduğu hipotezi reddedilir. Yada hesaplanan otokorelasyon katsayısı;

$$-u_{1-\alpha/2} \cdot s_{rk} < r_k < +u_{1-\alpha/2} \cdot s_{rk} \quad (3.18)$$

güven sınırının dışına düşerse sıfır hipotezi reddedilmekte, aralığın içine düşerse sıfır hipotezi kabul edilmektedir. Başka bir deyişle, modellerden elde edilen düzeltmelerin otokorelasyon katsayılarının öngörülen sınır değerleri içerisinde kalması, seçilen modelin uygun olduğunu, aksi takdirde modelin uygun olmadığının bir göstergesidir.

3.2.2 Regresyon Analizi

Regresyon analizi değişkenler arasındaki bağıntıyı temsil eden matematik modeli belirlemeye ve modelin yeterlilik düzeyini araştırmaya yönelik, etkin ve değişik bilim alanlarında yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir (Günel, 2003).

Genel olarak polinom şeklindeki bir regresyon modeli

$$y(t) = a + b_1 x(t) + b_2 x^2(t) + \dots + b_{nb} x^{nb} + e(t) \quad (3.19)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $y(t)$; bağımlı değişken vektörü (tepki büyüklüğü), x ; bağımsız değişken vektörü (etki büyüklüğü), a , b_1 ve b_2 bilinmeyen parametre vektörü, e ; hata değişkeni vektörü olup, ortalaması sıfır ($E(e)=0$) ve varyansı ($\text{var}(e)=\sigma^2$) sabittir.

Regresyon analizinde bağımsız değişkenlerin modele ne şekilde gireceği ya da değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade edecek olan modelin hangi model olacağı konusunda başlangıçta bir fikir elde etmek için, gözlem noktalarının koordinat eksenindeki dağılımını gösteren grafikleri incelenmektedir. Belirlenen model kullanılarak yapılan tahminlerin beklenen değerleri yansıtması, kullanılan veri grubu hangi modele uyuyorsa, modelin o şekilde seçilmesine bağlı

olacaktır. Ancak seçilen modelin sonraki aşamalarda ek testlerden geçmesi gerekmektedir.

- **Regresyon analizi parametrelerinin kesitirimi ve test edilmesi**

En Küçük Kareler Yöntemi uygulanarak belirlenen regresyonun istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla modeldeki parametrelerin ayrı ayrı test edilmesi gerekmektedir. (3.19) eşitliğinden yararlanılarak

$$x^T = [a, b_1, b_2, \dots, b_{nb}] \text{ ve}$$

$$A = [1 \ x(t) \ x(t)^2 \dots x(t)_{nb}]$$

olmak üzere En Küçük Kareler Tekniğine göre (3.11) eşitliği ile x^T bilinmeyen parametreler, (3.12) eşitliği ile standart sapma (m_o) ve (3.14) eşitliği ile de bir parametrenin standart sapması (m_x) hesaplanmaktadır. Ancak, başlangıçta öngörülen polinomun derecesi olabildiğince küçük seçilmekte ve parametreleri istatistiksel olarak anlamsız çıkana kadar polinomun derecesi artırılmaktadır.

(3.11) eşitliği ile hesaplanan parametrelerin anlamlı olup olmadıklarını test etmek için kurulan sıfır hipotezinde her bir parametre değerinin “0” olduğu ileri sürülmektedir. $H_0: a=b_1=b_2=b_{nb}=0$ ’dır. (3.20) eşitliği ile belirlenen test büyüklüğü (parametre/parametrenin standart sapması) serbestlik derecesi $f=n-u$ ve anlamlılık düzeyi %5 için t-dağılımının güven sınırı $t_{f,1-\alpha/2}$ ile karşılaştırılmaktadır.

$$\hat{t} = \frac{x}{m_x} \quad (3.20)$$

Eğer $\hat{t} > t_{f,1-\alpha/2}$ ise polinom parametrelerinin “0” beklenen değerinden sapmaları anlamlı olup, polinomun derecesi $\hat{t} < t_{f,1-\alpha/2}$ (parametrelerin “0” beklenen değerinden sapmaları anlamsızdır) olana kadar artırılmaktadır.

Ancak parametrelerin test edilmiş olması belirlenen modelin değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koyan en iyi model olduğunu veya verileri gerçekten temsil eden bir model olduğunu göstermemektedirler. Çünkü; model, en iyi model olmasa bile regresyon ve parametreler önemli olabilmektedirler.

- **Belirlilik katsayısı (R^2):**

Belirlilik katsayısı, kullanılan $x(t)$ değişkenlerinin $y(t)$ ’deki toplam değişimi açıklayabilme oranını vermekte ve $0 < R^2 < 1$ aralığındadır (Newton vd., 1996). Bu katsayı;

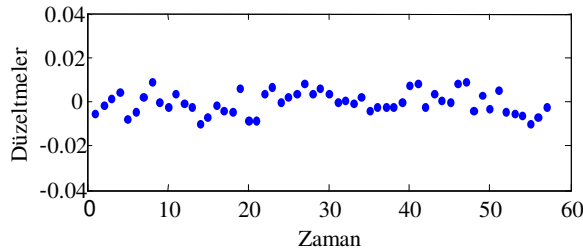
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N \varepsilon(t)^2}{\sum_{t=1}^N (y(t) - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t))^2} \quad (3.21)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. R^2 'nin büyük çıkması her zaman modelin iyi olduğu sonucunu göstermemektedir. Çünkü, modele konu ile ilgili veya ilgisiz bir değişkenin eklenmesi R^2 'nin değerini artırmaktadır. Dolayısıyla R^2 'si büyük olan modeller her zaman tahmin yapmada en iyi model olmamaktadır (Montgomery, 1990). Ancak modele giren değişkenler yönünden herhangi bir problem yoksa, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki toplam değişimi açıklayabilme ölçütü olarak kullanılmaktadır. R^2 'nin karekökü y ile x değişkenleri arasındaki çoklu korelasyon katsayısını vermektedir.

- **Prediksiyon hatalarının incelenmesi**

Regresyon modeli ile belirlenen hatalar, modelin uygunluğu hakkında açıklayıcı bilgiler vermektedirler. En küçük kareler regresyon analizinde hata teriminin ortalaması sıfır, varyansı sabit olduğu ve birbirleriyle korelasyonsuz olduğu varsayılmaktadır.

Hataların otokorelasyonlu olup olmadığının araştırılması için en basit yöntem hata değerlerinin zamana karşı grafiğinin oluşturulmasıdır. Bu grafik oluşturulduğunda, otokorelasyon problemi olmayan hata-zaman grafiğinde hatalar sıfır çizgisi etrafında düz bir band şeklinde dağılıma sahip olmaktadır.



Şekil 3.11 Regresyon analizi sonucu belirlenen düzeltilmeler

Ayrıca, regresyon analizinin yapıldığı zaman serisi niteliğindeki bağımsız ve bağımlı değişkenlerin durağan olması gerekmektedir. Yani serilerde trend bileşeni olmaması gerekmektedir. Eğer serilerde trend bileşeni var ise iki değişken arasındaki ilişki trende bağlı olarak gerçek olmaktan çok sahte olmaktadır. Ancak, her iki zaman serisi de aynı dereceden durağan iseler değişkenler arasındaki regresyon gerçek ilişkiyi yansıtmaktadır (Bölüm 4.1 Trend Bileşeni Analizi).

3.2.3 Çoklu Regresyon Analizi

Çoklu regresyon modelinde bağımlı değişkeni açıklayan birden fazla bağımsız değişken modelde yer almaktadır. Çoklu regresyon modelleri En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak çözümlenebilmektedir. Kurulan çoklu regresyon modeli genel olarak aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.

$$y(t) = a + b_1 \cdot x_1(t) + b_2 \cdot x_2(t) + \dots + b_k \cdot x_k(t) + e(t) \quad (3.22)$$

Burada k ; modeldeki bağımsız değişken sayısı, $y(t)$; bağımlı değişken vektörü (tepki büyüklüğü), x_k ; bağımsız değişken vektörleri (etki büyüklükleri), a , b_1 ve b_2 bilinmeyen parametre vektörü, e ; hata değişkeni vektörü olup, ortalaması sıfır ve varyansı sabittir.

Kurulan çoklu regresyon modeli de yukarıda ifade edilen polinom şeklindeki regresyonda olduğu gibi tahmini denklem kurularak hesaplanmakta ve test edilmektedir. Ancak (3.21) eşitliğindeki R^2 kullanımı çoklu regresyon modellerde uygun olmamaktadır. Çoklu modellerde, modele yeni bir değişken ilave edildiğinde R^2 değeri her zaman artmaktadır. Payın değeri artarken payda aynı kalmaktadır. Bu nedenle düzeltilmiş çoklu belirlilik katsayısı $\bar{R}^2$ kullanılıp, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k} \quad (3.23)$$

3.2.4 Çapraz Korelasyon ve Çapraz Kovaryans Fonksiyonları

Sistemlerin tanımlanmasında, sistemin giriş ve çıkışı arasındaki istatistiksel ilişki çapraz-korelasyon fonksiyonu ile de açıklanmaktadır. Aynı zamanda, giriş-çıkış değişkenleri arasında gerçekleştirilecek bir çapraz-korelasyon işlemi ile sistemin tepkisinin, etkiye göre gecikip-gecikmediği de belirlenebilmektedir. Yani etkiyen büyüklük, etkiden hemen sonra tepkiye sebep olmuş ise sistemde herhangi bir gecikme durumu meydana gelmemektedir. Sistemde gecikme durumunun meydana gelmesi için ise sistemin etkiye karşılık tepkisinde bir süre değişim olmaması gerekmektedir (Welsch ve Heunecke 2001).

Çapraz-korelasyon için, aynı periyot içerisinde birim zaman aralıklarında u ve y gibi iki değişkenden N sayıda gözlem yapıldığında, gözlemleri $(u_1, y_1), \dots, (u_N, y_N)$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu gözlemler, (U_t, Y_t) gibi ayrık iki değişkenli stokastik bir sürecin sonlu bir gerçekleştirilmesi olarak ele alınabilmektedir. İki değişkenli bir süreci tanımlamak için ikinci dereceden momentlerinin bilinmesi faydalı olmaktadır. Tek değişkenli bir süreç için, ikinci dereceden momentler, ortalama ve özkovaryans fonksiyonudur. İki değişkenli bir süreç için,

iki bileşenin her biri için ortalama ve özkovaryans fonksiyonundan oluşan ikinci dereceden momentlere ilave olarak yeni bir fonksiyon olan çapraz-kovaryans fonksiyonu

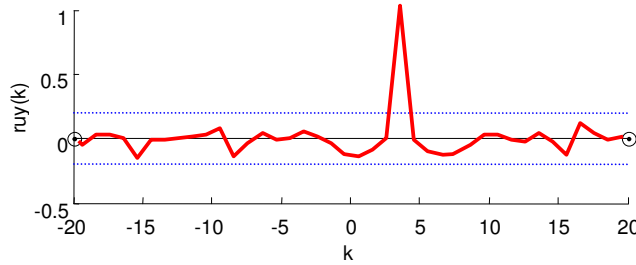
$$c_{uy}(k) = \begin{cases} \sum_{t=1}^{N-k} (u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) / N & k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ \sum_{t=1-k}^N (u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) / N & k = -1, -2, \dots, -(N-1) \end{cases} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Chatfield, 1996). Çapraz-korelasyon fonksiyonu ise

$$r_{yu}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t).u(t-k) \quad (3.25)$$

eşitliği ile verilmektedir. Çapraz-korelasyon da içsel bağımlılık $k=0$ için değil $k_{\max}$ için ortaya çıkmaktadır ve bir serinin diğer bir seri ile ilişkisini göstermektedir. Çapraz-korelasyon katsayılarının güven sınırları da, (2.18) eşitliğine benzer şekilde, %95 güven aralığı için; $\pm 1,96/\sqrt{N}$ olarak verilmektedir.

Şekil (3.12)'de herhangi bir dinamik sistemde etki büyüklüğü ile tepki büyüklüğünün $k=\pm 20$ için hesaplanan çapraz-korelasyon katsayıları görülmektedir. $k=4$ 'de çapraz-korelasyon katsayısının öngörülen sınır değerinden büyük olması, sistemde 4 birim kadar sonra bir gecikme durumunun olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.12 $k=\pm 20$ için çapraz-korelasyon katsayıları

Şekil 3.12'de bir örneği görülen çapraz-korelasyon fonksiyonunun özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

- $r_{yu}(k) = r_{uy}(-k)$
- $k=0$ için çapraz-korelasyon fonksiyonu

$r_{yu}(0) = E\{y(t)u(t)\}$ 'dir. Otokorelasyon fonksiyonunun tersine çapraz-korelasyon fonksiyonunda istatistiksel bağımlılık $k=0$ için değil $k_{\max}$ değeri için ortaya çıkmaktadır.

- Çapraz-korelasyon fonksiyonu otokorelasyon fonksiyonuna göre fazladan bir sinyalin (eğer varsa bir sinüs titreşiminin) fazı hakkında bilgi vermektedir (Hekimoğlu, 1981).
- $k < 0$ için, $r_{yu}(k) \neq 0$ ise model nedensel değildir. Yani, sisteme etki başlamadan sistem tepki gösteriyorsa, sistem etkiyi bilerek önceden ona uygun bir davranış gösteriyor demektir. Oysa, gerçek zamanlı olarak çalışan tüm pratik sistemler etki olmadan tepki göstermezler ve tepki etkiden hemen sonra yada gecikmeli olarak meydana gelmektedir.

4. DİNAMİK SİSTEMLERİN ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ İLE TANIMLANMASI

Zaman serileri analizi, tepki büyüklüğüne dayalı olarak sistemlerin davranışları hakkında faydalı bilgiler verebilmektedir. İşletme, ekonomi, mühendislik, çevre bilimleri, tıp ve diğer bir çok bilimsel araştırmalarda zaman serilerinin gelecekte göstereceği performansı ve davranış biçimini kestirmek için serilerin özelliklerini belirlemede zaman serisinin ayrıştırılması gerekmektedir. Zaman serileri, bir dönemden diğerine değişkenlerin değerlerinin ardışık bir şekilde gözlemlendiği sayısal büyüklüklerdir. Gözlenen verilerin zaman içinde ardışık bir biçimde gerçekleşmesi verilerin gelişimini görme ve analizi açısından çok önemlidir. Zaman serileri analizi, ardışık olarak belli aralıklarla gözlenen sistemin zaman serisindeki; trend, periyodik ve düzensiz hareketleri ayrıştırarak, sistemin özelliklerini ortaya koymakta, sistemi tanımlamakta ve özellikle parametrik olmayan durumlarda sıkça uygulanmaktadır.

Zaman serileri analizi ve modellemesi ile tek bir seriye ait gözlemlerin dinamik veya zamana bağlı yapısını anlamak mümkün olmaktadır. Dinamik yapının sunduğu bilgi, serilerin temsil ettiği sistemi kontrol etmek ve geleceğe ilişkin doğru tahminlerin yapılmasını sağlaması açısından önemli olmaktadır. Diğer yandan zaman serisi modelleri bir değişkendeki hareketleri, kendi geçmiş değerlerindeki gelişmelerle açıklamakta ve zaman içerisindeki konumuna göre değerlendirilmektedir.

Zaman serilerinin modellenmesinde zaman yeni bir boyut olarak ele alınmaktadır. Dinamik özellik gösteren sistemlerde, modeller için kullanılan istatistiksel işlemler, zaman serisi analizlerinde ele alınan modellerde de kullanılmaktadır. Örneğin,

$$Y_t = \beta X_t + e_t \quad (4.1)$$

bir statik modeldir. Eğer X_t değişkeninde bir değişme olursa, Y_t anında değişime cevap vermektedir. Ancak X_t değişkeninde bir değişme söz konusu değilse bu durumda Y_t 'de de herhangi bir değişme olmayacaktır. Dolayısı ile sistem her zaman bir denge pozisyonunda gözlenecektir. Değişken X_t 'nin bir gecikmeli değeri dikkate alındığında sisteme dinamik bir özellik kazandırılmış olur ve sistem

$$Y_t = \beta_1 X_t + \beta_2 X_{t-1} + e_t \quad (4.2)$$

eşitliği ile tanımlanır. Eğer X_t bir birim artarsa, Y_t beklenen değeri β_1 'in birim değerine bağlı olarak anında artacak, fakat $\beta_1 + \beta_2$ 'in tam değişimi bir zaman dönemi geçtikten sonra hissedilecektir.

Bir model içerisinde dinamik etkileri belirlemenin bir diğer yolu da, bağımlı değişkenin gecikmeli değerlerinin kullanımı ile mümkün olmaktadır. Bağımlı değişkenin önceki değerleri modele eklenince,

$$Y_t = \alpha Y_{t-1} + \beta Y_t + e_t \quad (4.3)$$

elde edilmektedir. Burada α ve β tahmin edilmesi gereken parametrelerdir (Harvey, 1990). Burada zaman serisi değişkeni Y_t belirli bir düzene göre kendi geçmiş değerleri tarafından belirlenmektedir ve bu çerçevede ele alınan zaman serisi modellerinde rassal değişken e_t zaman boyunca ortalaması sıfır ve sabit bir varyansla durağan bir stokastik süreç olarak tanımlanmaktadır.

Zaman serisi analizlerinde ilk olarak serinin zamana bağlı grafiğinin oluşturulması ve daha sonra seride var olan trend, periyodik ve stokastik bileşenlerin analizi yapılarak seriden giderilmesi sağlanmaktadır. Bir zaman serisinin gözlenen değerlerinin bu üç bileşenden oluştuğu düşünülerek fonksiyonel bir ilişki,

Zaman Serisi= f (Trend Bileşeni, Periyodik Bileşen, Stokastik Bileşen)

olarak yazılabilir. Buna göre Y_t gibi bir zaman serisinde bütün bileşenlerin toplamsal modeli

$$Y(t)=Y_T+Y_P+Z_t \quad (4.4)$$

dir. Burada; $Y(t)$, t dönemindeki serinin gözlemlerini, Y_T , trend bileşeni, Y_P , periyodik bileşen ve Z_t , stokastik bileşeni göstermektedir.

Bazı durumlarda gözlenen sisteme ait birden fazla zaman serileri bulunabilmektedir. Başlangıç ve bitiş zamanları aynı olan bu serilerin benzer davranışlarını belirlemek amacıyla zaman serilerinin analizinden başka kullanılan bir diğer istatistiksel yöntem Temel Bileşenler Analizi yada Deneyisel Ortogonal Fonksiyon analizidir.

4.1 Trend Bileşeni Analizi (Y_T)

Ardışık olarak yapılan gözlemlerde doğal etkiler veya insan etkisiyle homojenliğin bozulması gibi herhangi bir faktöre bağlı olarak artan veya eksilen yönde gözlemlenen değişimler trend olarak adlandırılmaktadır (Tülücü, 1996).

Zaman serilerinde istatistiksel olarak trend bileşeni olup olmadığı verilere doğrudan bağlı olmayan Mann-Kendall ve Kendall Sıra Korelasyon testi ile yapılmaktadır. Mann-Kendall testinde zamana göre sıralanmış $y_1, y_2, \dots, y_n$ gözlemleri, H_0 hipotezine göre zamandan bağımsız ve benzer dağılmış rasgele değişkenlerdir. H_1 hipotezine göre ise ($k \neq j$) olmak üzere

tüm $(k, j \leq n)$ için seride y_k ve y_j değerlerinin dağılımı benzer değildir, yani seride lineer bir trend bulunmaktadır. Mann-Kendal testinin istatistiği olan S , (4.5) ve (4.6) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Karabörk ve Kahya, 1999).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(y_j - y_k) \quad (4.5)$$

$$\text{sgn}(y_j - y_k) = \begin{cases} +1 & \text{eğer } (y_j - y_k) > 0 \\ 0 & \text{eğer } (y_j - y_k) = 0 \\ -1 & \text{eğer } (y_j - y_k) < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Normal bir dağılıma sahip ve ortalaması sıfır olan test istatistiği S 'nin varyansı;

$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ şekilde hesaplanmaktadır. Standart normal değişken (z) ise

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S > 0 \\ 0 & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eğer öngörülen anlamlılık düzeyinde, $|z| \leq z_{1-\alpha/2}$ ise H_0 hipotezi kabul edilir, aksi durumda reddedilir. Hesaplanan S değeri pozitif ise artan, negatif ise azalan bir trendin varlığına işaret eder. Bu teknik eksik verilerin varlığına müsaade ettiği ve verilerin belirli bir dağılıma uyma zorunluluğunu aramadığı için özellikle kullanışlıdır (Yu vd., 1993).

Zaman serilerindeki trend bileşeninin belirlenmesi, bazı periyodik hareketlerin çok uzun zaman içerisinde gerçekleşmesi durumunda çok güç olmaktadır. Örneğin, bir periyodik hareket 30 yıllık bir zaman içerisinde gerçekleşiyor ise ve 10 yıllık bir veri ile bu periyodik değişim, trend bileşeni şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle gözlemlerin gerçekte varolan değişimleri yansıtacak şekilde gerekli olan zaman kadar yapılması çok önemli olmaktadır.

Zaman serilerinde trend bileşeni bulunduğu tespit edilirse, bu bileşenin seriden ayrıştırılması için En Küçük Kareler Yöntemi ile zamana bağlı uydurulan bir doğru ($Y_T = a + b.t$) denklemi ile elde edilmektedir. Elde edilen denklemin katsayıları ise Bölüm 3.2.2'de açıklanan regresyon analizi ile hesaplanmaktadır.

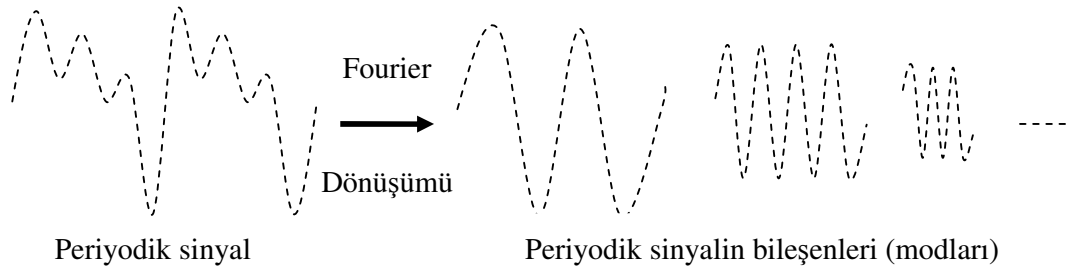
4.2 Periyodik Bileşen Analizi (Y_P)

Periyodik bileşen, zaman serilerinde düzenli olarak tekrarlanan değişimleri ifade etmektedir. Dünyanın kendi ve güneş eksenini etrafında dönmesi nedeniyle bir yıldan daha az periyotlarda yapılan gözlemlerde belli aralıklarla periyodik bileşen ortaya çıkmaktadır. Günlük gözlemlerden oluşan bir serinin olası periyodik bileşenleri fourier yaklaşımı ile temsil edilmektedir (Salas vd., 1980).

Periyodik salınımlar, periyotları bilinen ve bilinmeyen şeklinde iki alt kümeye ayrılmaktadır. Periyotların bilinmesi durumunda periyodik bileşenlerin zaman serisinden giderilmesi daha kolay olmaktadır. Ancak periyotların bilinmemesi durumunda periyotların ayrıntılı incelenmesi için spektral analiz adı ile bilinen yöntem kullanılmaktadır ve bu yöntem zaman serisinin frekans bölgesindeki analizini ortaya koymaktadır. Başka deyişle zaman bölgesinde zamanın farklı noktalarındaki gözlemler arasında ortaya çıkan ilişkiler frekans bölgesinde periyodik hareketlerin belirlenmesi üzerinde durulmaktadır. Her iki bölgede de yapılan analizler birbirini tamamlayıcı özelliğe sahiptirler ve aynı bilgi farklı yollarda zaman serisinin niteliği hakkında farklı fikirler vermektedirler. Bu nedenle zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüşüm Hızlı Fourier Dönüşümü ile yapılmaktadır.

4.2.1 Hızlı Fourier Dönüşümü

Fonksiyonlar kendilerini oluşturan sinüs veya kosinüs gibi periyodik fonksiyonlarla ifade edilebilmektedirler. Bir fonksiyonun kendisini oluşturan bir çok sayıda alt fonksiyonlarla ifade edilebilmesi matematiksel olarak fonksiyonların kullanılabilirliğini arttırmıştır. 19. yüzyılda Fransız matematikçisi Joseph Fourier herhangi bir periyodik fonksiyonun sonsuz sayıda karmaşık üstel periyodik fonksiyonun toplamıyla ifade edebileceğini göstermiştir. Şekil (4.1)'de periyodik bir sinyalin frekans dönüşümü ile elde edilen sinüs bileşenleri gösterilmiştir (Bayazıt, 1996).



Şekil 4.1 Periyodik bir sinyalin Fourier Dönüşümü (Bayazıt, 1996)

Herhangi bir sinyali $x(t)$ şeklinde zamana bağlı bir fonksiyon olarak gösterecek olursak bu fonksiyonun değişik kompleks üstel fonksiyonlar şeklinde göstermek için bu fonksiyonun üstel fonksiyonlarla skaler olarak çarpılıp zaman aralığı boyunca toplanması gerekir. Aşağıdaki bağıntılar sırasıyla Fourier ve Ters Fourier Dönüşümlerini ifade etmektedir (Polikar, 1996).

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.8)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_s(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (4.9)$$

bağıntılardaki t , zamanı, f ise frekansı ifade etmektedir. Burada $e^{j2\pi ft}$ karmaşık ve periyodik üstel fonksiyonu ifade etmektedir. $X_s(f)$ ise $x(t)$ sinyalinin Fourier Dönüşümü'dür. Sinyalin yeniden elde edilmesi için frekans katsayıları belirlenen üstel fonksiyonlarla katsayıların çarpılıp zaman aralığı boyunca toplanması gerekmektedir. Böylece farklı frekanslardaki periyodik fonksiyonlar toplanarak sinyal yeniden oluşturulmaktadır.

Daha sonra Fourier'in fikirleri genelleştirilerek periyodik olmayan fonksiyonlarında bu şekilde ifade edilebileceği benimsenmiştir. Dr. Gabor tarafından ortaya atılan Gabor Dönüşümü, pencere fonksiyonu olarak tanımlanan bir sabit fonksiyonun zamanda ötelenmesi ile taranan herhangi bir sinyalin Fourier Dönüşümü (FD) alınarak, bölgesel frekans analizinin yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu durumda, pencerelenmiş sinyalin Fourier Dönüşümü, işaretin frekans bileşenleri yanında zaman bilgisini de içermektedir. Dönüşümde kullanılan pencere fonksiyonu, zaman ve frekans bölgelerinde (domain) sınırlı olan Gaussian fonksiyonudur. 1965'de ortaya atılan, yeni bir algoritmayla Gabor Dönüşüm, değişik pencere fonksiyonlarının kullanıldığı Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) olarak genişletilmiştir (Korürek, 2000). KSFD dönüşümünü sağlayan bağıntı aşağıdaki şekilde verilmiştir (Misiti vd., 1997).

$$KSFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot w^*(t - \tau)] e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.10)$$

Burada; $x(t)$ sinyali, $w(t)$ pencere fonksiyonu, $*$ karmaşık eşleniği, τ zamanda ötelenmedir. KSFD, bir pencere fonksiyonuyla çarpılan sinyalin FD'nden oluşmaktadır. Her t ve f için yeni bir KSFD katsayı takımı hesaplanmaktadır. Bu şekliyle FD, sadece frekansın bir fonksiyonu iken KSFD, hem frekansın, hem de zamanın bir fonksiyonudur.

Sayısal sinyal işlemenin pratik uygulamalarının çoğunda, bilgisayar sonsuz $x(n)$ dizisinin elemanlarını saklayamaz ve sürekli ω frekansının değerlendirilmesi olanaksızdır. Ayrıca teorik olarak tanımlanan bazı serilerin aksine gerçek serilerin Fourier Dönüşüm'leri hesaplanamamaktadır. Bu nedenle sayısal sinyaller için Fourier dönüşümünün kullanılması uygun olmamaktadır. N uzunluğunda, (sonlu) bir $x(t)$ ayrık sinyal için “Ayrık Fourier Dönüşümü” (AFD),

$$\begin{cases} X_s(f) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) \cdot e^{-j f \frac{2\pi}{N} t} \\ x(t) = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} X_s(f) \cdot e^{j f \frac{2\pi}{N} t} \end{cases} \quad (4.11)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. AFD'nin doğrudan hesaplanmasında her bir $X_s(f)$ değeri için N karmaşık çarpma ve $N-1$ karmaşık toplama işlemi kullanılmaktadır. Bu durumda N adet AFD değeri hesaplanırken, N^2 çarpma ve $N(N-1)$ toplama işlemi yapılmaktadır.

AFD doğasındaki periyodiklik nedeniyle bir sinyalin N -noktalı AFD alındığında işaretin N periyodu ile periyodikmiş gibi işlem görmektedir. Bu nedenle, AFD hesabı, en az sinyalin örnek sayısı kadar ayrık frekans değerinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. AFD sinyalin örnek sayısından daha az sayıda ayrık frekans değerinde hesaplandığında, sinyalin frekans spektrumunun seyrek örneklenmesi nedeniyle zamanda örtüşme (aliasing) meydana gelmektedir. Bu durumda zaman örtüşmesinden dolayı işaret değerleri Ters-AFD ile geri oluşturulamamaktadır. AFD hesabındaki N değeri sinyalin örnek sayısından fazla olabilir ve bu durumda işaretin sonuna sıfır değerlerinin eklenmesi ile sinyalin uzunluğu N 'ye çıkarılabilmektedir (Ertürk, 2004)

AFD hesaplamasında etkin ve günümüzde kullanılan yaklaşım HFD algoritmalarıdır. 1965 yılında Cooley ve Tukey tarafından kurulan HFD (Fast Fourier Transform- FFT) algoritması; AFD'den farklı değildir. AFD'nin hesaplanması için etkili ve mükemmel bir algoritmadır. AFD'nin sayısal sinyal işleme alanında spektrum analizi ve korelasyon gibi işlemlerin yapılmasında önemli rol oynamasının nedeni HFD algoritmalarından kaynaklanmaktadır (Bergland, 1969).

Bir sinyalin frekans spektrumunun hesapsal yöntemlerle elde edilmesi için 2π ile periyodik olan ayrık-zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterli olmaktadır. Ayrık-zamanlı frekans spektrumunun 2π 'lik temel periyodunda N adet eşit aralıklı frekans değeri

$$\omega = \frac{2\pi}{N} k, \quad k=0,1,2,\dots,N-1$$

şeklinde. Burada k tamsayısı 2π 'lik temel frekans bandındaki ayrık frekans değerlerini belirtmektedir ve frekans endeksi olarak adlandırılmaktadır. Fourier dönüşümü için N adet ayrık frekans değeri için hesaplandığından , $k=0,1,...,N-1$, toplam N adet karmaşık Fourier Dönüşüm değeri $X_s(f)$ elde edilmektedir. Bir sinyalin frekans spektrumu için sinyalin genlik, faz ve güç spektrumları HFD sonucu elde edilen karmaşık sayılardan kolayca belirlenebilmektedir.

4.2.1.1 Sinyallerin Zaman Bölgesinde Filtrelenmesi

Filtreleme sinyallerin belirli frekanslarını güçlendirmek yada zayıflatmak, belirli frekanslarını tamamen bastırmak veya ortaya çıkarmak amacı ile kullanılmaktadır. Filtreler gürültü gibi sinyallerdeki kirlenme etkenlerinin ayıklanması için de kullanılmaktadır. Genel olarak, filtreleme ile istenen frekanslarla istenmeyen frekansların kesin olarak ayrıştırılması istenmektedir. Filtreler, geçirdikleri ve bastırdıkları frekans aralıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Alçak-geçiren filtreler (low-pass filter), düşük frekansları geçirerek yüksek frekansları bastırmaktadır. Bunun için zaman serilerinde yumuşatma işlemi yapılarak serilerin uzun-zamanlı yada alçak-frekansları elde edilmektedir.

Zaman serilerindeki periyodiklik ve trend gibi bileşenlerin daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarılması ve bunun için seride yer alan gürültü bileşeninin giderilmesi için yumuşatma işlemi için kayan ortalamalar yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde her kaymada aritmetik ortalama işleminden geçmiş verilerden bir tanesi düşerken onun yerine sağ taraftan bir yenisi girmektedir. Böylece üst üste binen kısımları olan aritmetik ortalama değerler serisi elde edilmektedir. Kayan ortalama işlemine kaç tane veri alınacağını önceden tespit edilmesi gerekmektedir. Örneğin; $y_1, y_2, \dots, y_n$ gözlem değerlerinin 3- değerli aritmetik ortalama için üçüncü dereceden kayan ortalamalar

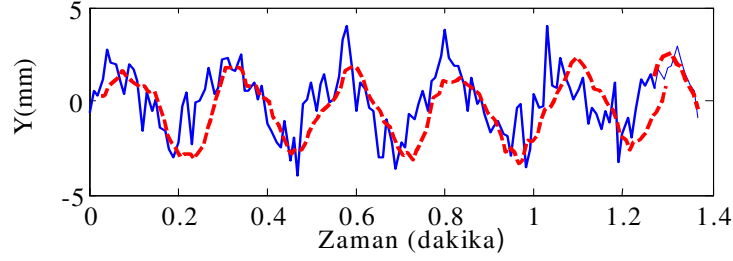
$$y_1=(y_1+y_2+y_3)/3, y_2=(y_2+y_3+y_4)/3, y_3=(y_3+y_4+y_5)/3, \dots, y_{n-2}=(y_{n-2}+y_{n-1}+y_n)/3 \quad (4.12)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. En büyük ve en küçük veri değerlerinin etkilerinin daha da fazla yumuşatılmaması için kayan ortalamalarda tek dereceler (3,5,...) alınmaktadır. Diğer yandan ortada bulunan veri değerine diğerlerinden fazlaca bir ağırlığın verilmesi için

$$y_i=(y_i+4y_{i+1}+6y_{i+2}+4y_{i+3}+y_{i+4})/16 \quad (4.13)$$

şeklinde kayan ağırlıklı ortalamalar kullanılmaktadır. Bu ağırlıklı ortalama, özellikle kısa gözlem süreli verilerdeki periyodikliklerin ortaya çıkarılmasında kullanılmaktadır. Şen (2002), beşinci dereceden ağırlıklı kayan ortalamaların verilerdeki gürültü bileşeninin giderilmesi için faydalı olduğu belirtilmektedir. Şekil (4.2)'de içerisinde gürültü bileşeni

olan, 5. dereceden ağırlıklı kayan ortalamaların uygulandığı bir zaman serisi örneği görülmektedir.



Şekil 4.2 Gürültü içeren (-) ve beşinci dereceden yumuşatma uygulanmış zaman serisi (--)

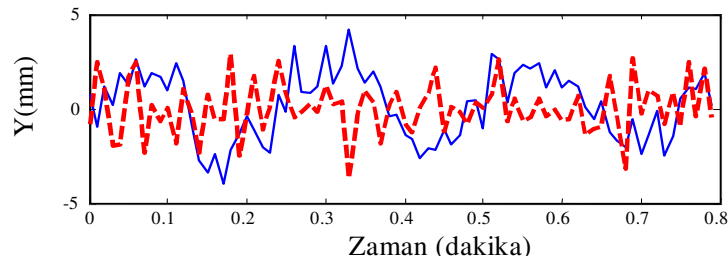
Yüksek-geçiren filtreler (high-pass filter) düşük frekansları bastırarak yüksek frekansları geçirmektedir. Bunun için de zaman serilerinde farklandırma yapılarak serilerin lokal değişimleri yada yüksek frekansları elde edilmektedir. Farklandırma aynı zamanda serilerde yapılan bir yumuşatma işlemidir. Bu yöntemde değişik zaman aralıklarına karşılık gelen veriler arasındaki ardışık farkların bulunması öngörülmektedir. Böylece ard arda gelen verilerde bulunan gürültü bileşenlerinin birbirinden çıkarılması ile verilerden kısmen giderilmektedir (Şekil 4.3). Farklandırma $t=1, 2, \dots, N$ olmak üzere, 1. dereceden bir fark alma

$$\nabla y_{t+1} = y_{t+1} - y_t \quad (4.14)$$

ve 2. dereceden bir fark alma ise

$$\nabla^2 y_{t+2} = y_{t+2} - y_{t+1} = y_{t+2} - 2y_{t+1} + y_t$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır (Box ve Jenkins, 1970). Farklandırmanın kaçınıcı dereceye kadar yapılması gerektiğini belirlemek için, ardışık olarak yapılan her bir farklandırma sonucu elde edilen serinin ortalaması hesaplanmaktadır. Daha sonra, ortalaması birbirine yaklaşık eşit olan serilerden bir önceki serinin derecesi, farklandırmanın derecesi olarak seçilmektedir.



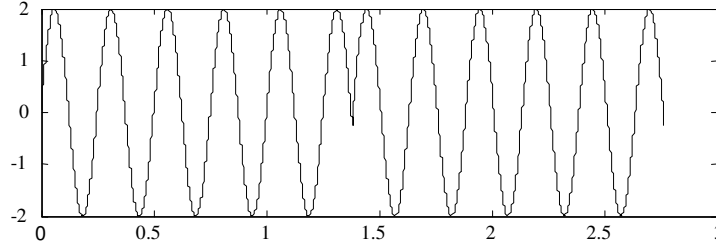
Şekil 4.3 Gürültü içeren (-) ve birinci dereceden farklandırma uygulanmış zaman serisi (--)

Bant- geçiren filtreler (band-pass filter) düşük ve yüksek frekansları bastırarak aradaki bir frekans bandını geçirmektedir. Bant-söndüren filtreler (band-stop filter) ise düşük ve yüksek

frekansları geçirerek aradaki bir frekans bandını bastırmaktadır.

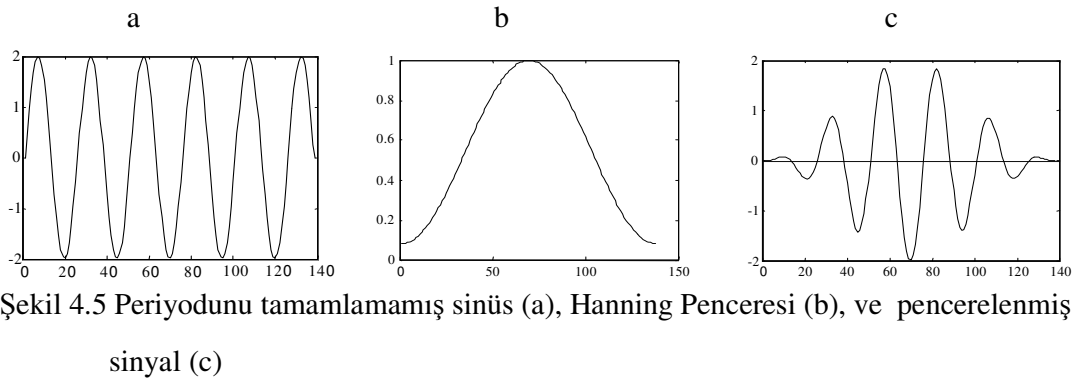
4.2.1.2 Sinyallerin Pencerelemesi

Ayrık Fourier Dönüşümü'nün yapısındaki periyodiklik nedeniyle bir sinyalin spektrumu AFD ile hesaplanırken, sinyal son örneğinin arkasından tekrar ilk örneği geliyormuş gibi işlem görmektedir. Bunun nedeni sinyalin periyodik olarak tekrar ettiği düşünüldüğünde, sinyalin son örneğinin arkasından bir sonraki periyot için tekrar sinyalin ilk örneği gelmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Sinüsün periyodik olarak tekrar etmesiyle oluşan işaret

AFD hesabında sinyalin son örnekleri ile ilk örnekleri birbirini takip ediyormuş gibi ele alındığında, aralarındaki frekans ilişkisi frekans bileşenlerinin değerlerine yansımaktadır. AFD hesabı sırasında sinyalin son değerleri ile ilk değerleri arasında meydana gelen ve Ayrık Fourier Dönüşümü'nün doğasından kaynaklanan suni devamsızlık, enerjinin diğer frekanslara sızması şeklinde algılanabileceğinden spektral sızma (spectral leakage) olarak adlandırılmaktadır. AFD hesabı sırasında spektral sızmayı azaltmanın bir yolu, sinyalin son değerleri ile ilk değerleri arasındaki devamsızlığın giderilmesidir. Bu amaçla sinyalde, AFD öncesi pencereleme kullanılmaktadır (Ertürk, 2004).



Şekil (4.5)'de periyodunu tamamlamamış bir sinüs sinyalinin (a), Hanning Pencere fonksiyonu (b) ile çarpılması sonucu elde edilmiş sinyal (c) görülmektedir.

Pencereleme yöntemi sinyalin AFD hesabı öncesinde, genliği kenarlara doğru yavaşça sıfıra

yaklaşan bir pencere fonksiyonu ile çarpılmasını öngörmektedir. Bu sayede sinyalin son değerleri ile ilk değerleri arasındaki devamsızlık giderilmektedir. Bu amaçla kullanılan pencereleme fonksiyonları; Üçgen, Blackman, Hamming ve genel amaçlı uygulamalarda kullanılan Hanning Fonksiyonu

$$w(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4.15)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Bir sinyalin pencere fonksiyonu ile çarpılması için sinyalin uzunluğuna eşit bir pencere işareti oluşturulmaktadır.

4.2.1.3 Sinyallerin Örnekleme Frekanslarının Belirlenmesi

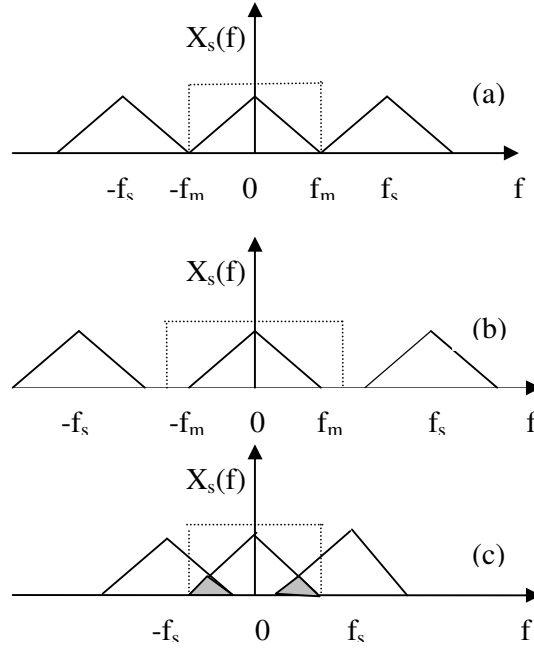
Sürekli sinyal değerlerinin belirli zaman aralıklarında örnekleme yapılması gerekmektedir. Örnekleme işlemi, sürekli zaman sinyalinin örnekleme anındaki değerinin ayrık zamanlı sinyalin değeri olarak atanması şeklinde tanımlanmaktadır. Kolaylık ve uyumluluk için genelde örnekleme, zaman aralıkları sabit tutularak, iki ardışık örnek arasındaki süre eşit alınmaktadır. Ardışık iki örnekleme anı arasındaki süre, genelde saniye cinsinden örnekleme periyodu olarak adlandırılmakta ve T_s ile gösterilmektedir. Örnekleme periyodunun tersi olarak tanımlanan örnekleme frekansı f_s ile gösterilmektedir ($f_s = 1/T_s$). Örnekleme frekansı bir saniye zaman aralığı boyunca alınan örnek sayısını belirtmektedir (Ertürk, 2004).

Örnekleme frekansının, analog sinyalin (bir sürekli zaman sinyalinin alabileceği değer sayısı sınırlandırılmamış ise bu sinyal analog sinyal olarak adlandırılmaktadır) maksimum frekans bileşeni frekansının iki katına eşit veya büyük olması şartı Nyquist kriteri olarak bilinmektedir. Örnekleme frekans spektrumunda bir çakışma meydana gelmemesi için örnekleme frekansı Nyquist kriterine uygun bir şekilde, f_m sinyalin band genişliği ve $X_s(f)$ örnekleme frekansının fourier dönüşümü olmak üzere

$$f_s \geq 2f_m \quad (4.16)$$

olarak seçilmektedir. Bu kritere göre belirlenmiş bir örnekleme frekansı ile örnekleme yapılan bir sinyalde bilgi kaybı olmamaktadır.

Örnekleme frekansı analog sinyalin maksimum frekansının iki katından büyük olduğunda ($f_s > 2f_m$) örnekleme frekans spektrumunda bir çakışma olmamakta, ancak tekrarlanan frekanslar arasında frekans boşlukları oluşmaktadır (Şekil 4.6-b).



Şekil 4.6 Örnekleme frekansının belirlenmesi (Ertürk, 2004)

Örnekleme frekansı analog sinyalin maksimum frekansının iki katına eşit olduğu zaman ($f_s=2f_m$) örneklenmiş sinyal frekans spektrumunda tekrar eden frekans bileşenleri uç-uca gelmektedir. Bu durumda örneklenmiş sinyalin frekans spektrumunda bir çakışma oluşmamaktadır (Şekil 4.6-a).

Örnekleme frekansı analog sinyalin maksimum frekansının iki katından küçük olduğunda ($f_s<2f_m$) ise analog sinyal spektrumunun örnekleme frekanslarında tekrar etmesi sonucu, örneklenmiş sinyalin frekans bölgesinde bir çakışma meydana gelmektedir (Şekil 4.6-c). Bunun nedeni örnekleme frekansının düşük olması nedeniyle, sürekli zaman işaretinden alınan örnek sayısının az olmasından kaynaklanmaktadır. Sinyaldeki bilgiyi doğru olarak temsil edecek kadar örnek alınmaması sonucu sinyalde bilgi kaybı olmaktadır.

4.2.2 Sinyallerin Enerjisi ve Gücü

Bir sinyalin enerjisi yada gücü sinyalin hangi frekanslarda yoğunlaştığının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Zamanın sürekli bir fonksiyonu olan deterministik bir analog sinyal $y(t)$ integrali alınabilir bir fonksiyondur ve sinyal enerjisi E

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt \quad (4.17)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. (4.11) eşitliğinin modül karesi spektrum $S(f)$ olarak adlandırılmaktadır.

$$S(f) = |X_s(f)|^2 \quad (4.18)$$

$S(f)$ enerji spektral yoğunluğu, frekansın bir fonksiyonu olarak enerjinin dağılımını ifade etmektedir. Eğer $y(t)$ sinyalinin $-\infty < n < \infty$ için ayırık bir $y_n = y(n\Delta t)$ serisi oluşturmak üzere Δt eşit aralıklarında örnekleme yapılsa, band-sınırlı bir süreçten örneklenen veriler için sürekli enerji spektral yoğunluğu Eşitlik (4.18) ifadesi ile özdeş olacaktır.

$$S'(f) = |X_s(f)|^2 \quad (4.19)$$

Eğer $n=0$ 'dan $n=N-1$ 'e kadar olan bir zaman serisi ele alındığında, $m=0,1,...,N-1$ için $f=m\Delta f$ frekanslarında örnekler alınarak HFD dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir. Böylece ayırık enerji spektral yoğunluğu, $0 \leq m \leq N-1$ için

$$S_m = |X_m|^2 \quad (4.20)$$

Ayrık S_m ve sürekli $S'(f)$ her ikisi de periodogram spektral kestirimleri olarak tanımlanmaktadır. Ancak, S_m ve $S'(f)$ $m=0,1,...,N-1$ için $f = m/N\Delta t$ 'de hesaplandığında özdeş değerler vermemektedirler. Çünkü, sonlu bir veri kümesine dayalı ayırık spektrum, sonsuz bir veri kümesine dayalı sürekli spektrumun bozulmuş bir türüdür (Allen ve Mills, 2004).

4.2.3 Harmonik Analiz

Harmonik analiz de periyodik hareketler sinüs ve kosinüs dalgalarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu analiz frekansı bilinen bir zaman serisindeki periyodik bileşenlerin ortaya çıkarılmasında ve bu bileşenlerin seriden giderilmesinde kullanılmaktadır (Bloomfield, 1976 ve Pocock, 1974).

Trend bileşeni giderilmiş (Y_p), zaman serisi değerlerinden yararlanılarak, Eşitlik (4.21)'de bilinen frekans değerleri ile sinyaldeki harmonik hareketlere ait katsayılar hesaplanmakta ve böylece serinin periyodik hareketinin genlik ve faz açıları belirlenmektedir. Harmonik fonksiyonun genel eşitliği

$$Y_p = \bar{Y} + \sum_{i=1}^{qf} R_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (4.21)$$

dir. Burada; $\bar{Y}$: Y_p 'lerin ortalaması; qf : frekans sayısı; $t: 1, 2, ..., N$; R_i : genlik ve ϕ_i : f_i frekansına ait faz açısını göstermektedir. (4.21) eşitliği doğrusal olmadığı için dengeleme algoritması kullanılarak Taylor'a göre doğrusallaştırılması sonucu (4.22) eşitliği elde edilmektedir. Bu eşitlikteki bilinmeyen parametreler $\bar{Y}$, a_i , ve b_i , En Küçük Kareler

Yöntemine göre hesaplanmaktadır. Böylece zaman serisinin bilinmeyen genlik ve faz açısı değerleri a ve b katsayılarından hesaplanabilmektedir (Chatfield,1996).

$$Y_p = \bar{Y} + \sum_{i=1}^{qf} [a_i \sin(2\pi f_i t) + b_i \cos(2\pi f_i t)] \quad (4.22)$$

Periyodik hareketin genliği

$$R = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.23)$$

ve faz açısı ise

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (4.24)$$

dir. İki adet periyodik sinyalden hangisinin önce, hangisinin sonra geldiğini gösteren parametre bu iki periyodik sinyal arasındaki faz farkıdır ve derece ile ifade edilmektedir (Chatfield, 1992). Diğer yandan faz açısını belirlerken a ve b katsayılarının işaretlerinin dikkate alınması gerekmektedir.

(4.22) eşitliğinde bilinmeyen parametrelerin En Küçük Karelere Yöntemine göre hesaplanmasında A katsayılar ve x^T bilinmeyenler matrisleri, $w=2\pi f$ alınarak

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin(w_1 t_1) & \cos(w_1 t_1) & \sin(w_2 t_1) & \cos(w_2 t_1) & \dots & \sin(w_i t_1) & \cos(w_i t_1) \\ 1 & \sin(w_1 t_2) & \cos(w_1 t_2) & \sin(w_2 t_2) & \cos(w_2 t_2) & \dots & \sin(w_i t_2) & \cos(w_i t_2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \sin(w_1 t_N) & \cos(w_1 t_N) & \sin(w_2 t_N) & \cos(w_2 t_N) & \dots & \sin(w_i t_N) & \cos(w_i t_N) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$x^T = [\bar{Y} \quad a_1 \quad b_1 \quad a_2 \quad b_2, \dots, a_i \quad b_i] \quad (4.26)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Kuhlmann,1996). (3.11) eşitliği kullanılarak bilinmeyen parametreler (x^T) hesaplanmaktadır. (3.14) ve (3.20) eşitlikleri kullanılarak parametrelerin anlamlı olup olmadıkları test edilmekte ve anlamlı katsayılar (ikisinden birisinin anlamlı olması yeterli) ait frekanslar fonksiyona dahil edilmektedir. Böylece (4.22) eşitliği harmonik fonksiyondan hesaplanan değerlerle trend bileşeni giderilmiş zaman serisindeki periyodik bileşenlerin ortalaması (m_p) ve standart sapması (s_p) ile

$$Z_p = \frac{Y_p - m_p}{s_p} \quad (4.27)$$

giderilmiş olmaktadır (Hipel ve McLeod, 1994).

Ancak, periyodik hareketlerin $k=1, 2, \dots, N$ olmak üzere, $1/N, 2/N, \dots, k/N$ gibi tamsayı frekanslarında olmasından dolayı yapılan harmonik analiz sonucu ölçülerde bir miktar giderilmemiş periyodiklik kaldığı ifade edilmektedir (Şen, 2002).

4.3 Stokastik Bileşen Analizi (Z_t)

Periyodik bileşenden arındırılmış olan Z_p serisinin ortalaması sıfır ve standart sapması bire eşit olan bir süreç olmadığı Çetin (1996) tarafından belirtilmekte; ortalaması $\bar{Z}$, standart sapması S_z , olan Z_p sürecinin, aşağıdaki eşitlik kullanılarak standardize sürece dönüştürülmesi önerilmektedir.

$$Z_t = \frac{Z_p - \bar{Z}}{S_z} \quad (4.28)$$

Bu eşitlik kullanılarak elde edilen Z_t değişkeni, ortalaması sıfır ve standart sapması bir olan standardize bir stokastik bileşendir. Bu bileşen otoregresif (Autoregressive;AR), hareketli ortalamalar (Moving Average;MA) ya da diğer doğrusal regresyon denklemleri ile ifade edilebilen bir özellik göstermektedir. Otoregresif özelliğe sahip serilerde, ardışık terimler arası ilişki deterministik olarak belirlenebilmektedir. Standardize değişkene otoregresif bir modelin uyup uymadığına, değişkenin serisel bağımlılığının incelenmesi ile karar verilmektedir (Çetin, 1996).

4.3.1 Stokastik Sürecin Modellenmesi

Stokastik sürece ait otoregresif modellerin kurulmasında genel olarak kullanılan işlem adımlar Şekil (4.7)'de kısaca özetlenmiştir. Modellerin kurulması dört temel aşamayı içermektedir.

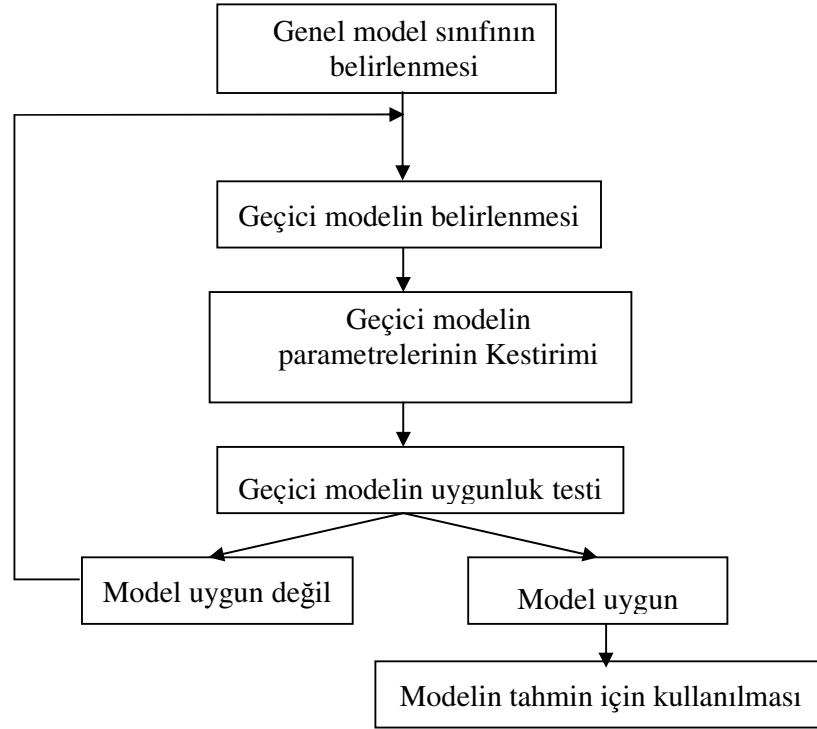
Birinci aşamada genel model sınıfı belirlenmektedir. Genel modelin seçimi için zaman bölgesinde tanımlanan otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının grafiklerinden faydalanılmaktadır. Çizelge (4.1)'deki otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları dikkate alınarak modellere ilişkin teorik fonksiyonların özelliklerinden yararlanılmaktadır.

İkinci aşamada, verilerin yapısına uyan geçici bir model belirlenmektedir. Bu amaçla otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarından yararlanılmaktadır. Model belirleme aşamasında uygun olan modellerinden birisi seçilmektedir.

Üçüncü aşamada, geçici modelin parametreleri, etkin istatistiksel teknikler kullanılarak tahmin edilmekte ve katsayıların standart hataları hesaplanarak anlamlı olup olmadıkları test

edilmektedir. Ayrıca uygun kriterler kullanılarak en iyi model seçimi yapılmaktadır.

Son aşamada ise belirlenen modelin tahmin amacıyla uygunluk kontrolü yapılmaktadır. Bunun için genel olarak, uygun olduğu varsayılan geçici modelin hatalarının otokorelasyon katsayılarının grafiği çizilerek, otokorelasyon fonksiyonu incelenmektedir. Söz konusu fonksiyon belirli bir Şekil gösteriyorsa ve Q-testi anlamlı çıkıyorsa hataların tesadüfi dağılmadığı sonucuna varılmaktadır. Yani, belirlenen modelin uygun olmadığına karar verilmektedir. Böylece, ikinci aşamaya tekrar dönülerek bu süreç, yeni bir geçici model ile uygun model belirleninceye kadar tekrarlanmaktadır. Uygunluk kontrolünden geçen model ise artık tahmin yapmak amacıyla kullanılabilir (Yaman, 2001).

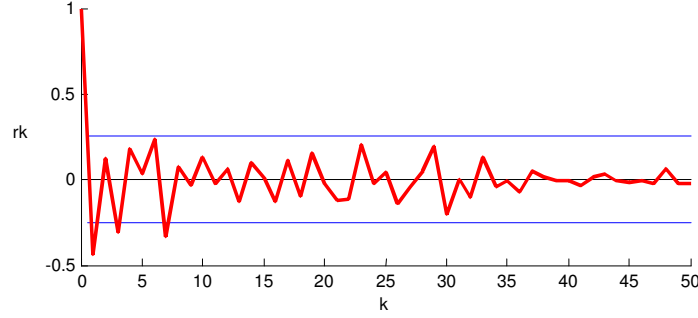


Şekil 4.7 Zaman serilerinde model belirleme aşamaları (Yaman, 2001)

4.3.2 Otokorelasyon Fonksiyonu

Otokorelasyon bir değişkenin bir yada daha fazla gecikmeli dönemi arasında korelasyonlu olması durumu, Bölüm 3.2.1.2’de açıklanarak, (3.16), (3.17) ve (3.18) eşitlikleri ile otokorelasyon katsayılarının hesaplanması ve test edilmesi açıklanmıştır. Trend, periyodik ve düzensiz bileşenleri içeren veriler otokorelasyon analizi yaklaşımı kullanılarak araştırılmaktadır. Otokorelasyon katsayıları sıfır civarında simetriklik özelliği gösterdiğinden k sayıda gecikmeler için ya pozitif ya da negatif katsayılar hesaplanmaktadır. Şekil 4.8’de $k=50$ gecikme değerleri için hesaplanan otokorelasyon katsayıları görülmektedir. $k=0$ hariç,

$k=1,3$ ve 7 için hesaplanan katsayıların öngörülen sınır değerine göre anlamlı olduğu görülmektedir..



Şekil 4.8 $k=50$ için otokorelasyon katsayıları

Otokorelasyon katsayılarının k geciktiricisine karşılık gelen katsayılarla grafiklerinin çizilmesi ile ölçülerin kendi içerisinde yorumlanmasında oldukça faydalı olmaktadır. Grafiklerin yorumlanmasında genel olarak dikkat edilmesi gereken önemli noktalar şunlardır (Chatfield, 1996).

- (a) Eğer bir zaman serisi tamamen rasgele ise, k 'nın sıfırdan farklı bütün değerleri için $r_k \approx 0$ dır.
- (b) Durağan seriler genellikle kısa-süreli korelasyon özelliği göstermektedirler. Sıfırdan çok daha büyük birkaç katsayı birbirini takip ederek küçülmektedirler. Ancak, k 'nın en büyük değeri için korelasyon katsayısı yaklaşık olarak sıfır olmaktadır. Şekil 4.8'de bu özellik görülmektedir.
- (c) Eğer bir zaman serisi yön değiştirme eğiliminde ise yani ardışık gözlemler ortalamanın farklı yanlarında yer alıyorsa, korelasyon katsayıları grafiği de yön değiştirme eğilimindedir. Yani r_1 negatif ise r_2 pozitifdir.
- (d) Eğer bir zaman serisi bir trend içeriyorsa, otokorelasyon katsayısı, k 'nın çok büyük değeri hariç, sıfıra inmemektedir. Bu nedenle otokorelasyon fonksiyonu durağan seriler için daha anlamlı olup, r_k hesaplanmadan önce trend seriden çıkartılmaktadır.
- (e) Zaman serisi periyodik bir değişim içeriyorsa, korelasyon katsayılar grafiği de aynı frekans da bir titreşim sergilemektedir. Bu nedenle periyodik değişimlerin serilerden çıkartılması gerekmektedir.

DeLurgio (1998), uygulamalarda otokorelasyon katsayılarının belirlenmesi için genelde gözlem sayısının minimum $N=50$ ve k (gecikme süresi) değerinin $N/4$ 'den büyük olmasına,

ancak veri sorunu varsa gözlemlerin kaybının etkisini artırmamak için k 'nın uygun bir gecikme sayısı ile sınırlandırılması gerektiğini ifade etmektedir.

4.3.3 Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu

Kısmi otokorelasyonlar diğer zaman gecikmelerinin etkisi ($t=1,2,...,k-1$) yok edildiğinde Z_t ve Z_{t-k} gibi iki değişken arasındaki ilişkinin derecesini ölçmede kullanılmaktadır. Başka bir ifade ile, Z_t ile Z_{t-1} arasında anlamlı bir otokorelasyon olduğu, ayrıca Z_{t-1} ile Z_{t-2} arasında da anlamlı bir otokorelasyonun olduğu varsayılın. Sonuçta, Z_{t-1} hem Z_t ile hem de Z_{t-2} ile ilişkilidir. Z_t ile Z_{t-2} arasındaki korelasyonu ölçmek amacıyla aradaki Z_{t-1} değerinin etkisini bulma işlemi kısmi-otokorelasyon olarak adlandırılmaktadır (Sevüktekin ve Nargeleçekenler, 2005).

Zaman serilerinin modellenmesinde, özellikle de AR modelin kaçınıcı mertebeye kadar devam edeceğinin belirlenmesinde de “Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu” yardımcı olmaktadır. $\Phi_{k,k}$ kısmi otokorelasyon katsayıları, r_k otokorelasyon katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\phi_{1,1} = r_1 \quad (4.29)$$

$$\phi_{k,k} = \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} * r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} * r_j} \quad (4.30)$$

$$\phi_{k,j} = \phi_{k-1,j} - \phi_{k,k} \phi_{k-1,k-j} \quad k \neq j \quad (4.31)$$

r_k : k aralıklı otokorelasyon katsayısını göstermektedir. $\phi_{k,k}$ katsayıları ($k=1,2,...$) yukarıda ifade edilen denklemler kullanılarak ardışık olarak hesaplanmaktadır. Bu katsayıların sıfırdan anlamlı derecede farklı olup olmadıkları kontrol edilmektedir. $\text{Var}(\phi_{k,k}) \approx 1/N$ olduğuna göre $|\phi_{k,k}| > 1,96/\sqrt{N}$ ise $\phi_{k,k}$ 'nın sıfırdan farklı olduğu %5 anlamlılık düzeyinde kabul edilmektedir.

Çizelge 4.1 Durağan modellerde teorik otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının özellikleri (Kendall vd., 1990).

Model	Otokorelasyon Fonksiyonu	Kısmi Otokorelasyon Fonksiyonu
AR(p)	Üstel veya sinüzoidal olarak gittikçe azalır	p gecikmesinden sonra katsayı aniden düşerek istatistiksel olarak anlamsız olur
MA(q)	q gecikmesinden sonra katsayı aniden düşerek istatistiksel olarak anlamsız olur	Üstel veya sinüzoidal olarak gittikçe azalır
ARMA(p,q)	(q-p) gecikmesinden sonra üstel veya sinüs dalgalarının bir karışımı görünümündedir.	(p-q) gecikmesinden sonra üstel veya sinüs dalgalarının bir karışımı görünümündedir.

4.3.4 Durağan Stokastik Süreçler

Bir zaman serisinin ortalamasında ve varyansında sistematik bir değişme yoksa, düzenli periyodik değişimler ortaya çıkarmıyorsa seri durağandır denilmektedir. Durağan bir süreçte stokastik sürecin özellikleri zaman boyunca değişmemektedir.

Zaman serileri olasılık teorilerinin önemli bir kısmı durağan zaman serileri ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla durağan olmayan zaman serilerini durağan hale dönüştüren zaman serileri analizine yoğun bir biçimde gereksinim duyulmaktadır. Zaman serisi modellerini geliştirebilmek için, belirli bir stokastik sürecin zamana bağlı olarak değişip değişmediğinin bilinmesi gerekmektedir. Eğer stokastik sürecin özellikleri zaman boyunca değişiyorsa, yani süreç durağan değilse zaman serilerinin geçmiş ve gelecek boyunca zaman aralıklarını basit bir cebirsel modelde göstermek zor olmaktadır. Diğer taraftan eğer stokastik süreç zaman içinde sabitse, yani süreç durağan ise geçmiş değerlerden tahmin yapılabilecek sabit katsayılı bir denklem ile süreç modeli elde edilebilmektedir. Durağan stokastik süreç modelleri; Otoregresif (AR), Hareketli Ortalama (MA) ve Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) süreçler olarak incelenmektedir.

4.3.4.1 Durağan Stokastik Sürecin Özellikleri

Her hangi bir stokastik zaman serisi $t=1,2,...,N$ olmak üzere, $Z_1,...,Z_N$ 'in birleşik olasılık dağılım fonksiyonu $P(Z_1,...,Z_N)$ 'dir. Benzer şekilde gelecek bir gözlem Z_{N+1} 'in koşullu olasılık dağılım fonksiyonu $P(Z_{N+1}|Z_1,...,Z_N)$ tarafından elde edilmektedir. Eğer Z_t serisi durağan ise, bu durumda

$$P(Z_t,...,Z_{t+k})=P(Z_{t+m},...,Z_{t+k+m}) \quad (4.32)$$

ve

$$P(Z_t)=P(Z_{t+m})$$

olacaktır. Bu sonuç herhangi bir t,k ve m dönemleri için yazılabilmektedir. Y_t serisi durağan ise serinin ortalaması

$$\mu_Y = E(Z_t) \quad (4.33)$$

ile tanımlanmaktadır ve durağandır. Y_t serisinin varyansı

$$\sigma_Y^2 = E[(Z_t - \mu_Z)^2] \quad (4.34)$$

ile tanımlanmaktadır ve durağandır. Diğer yandan

$$E[(Z_t - \mu_Z)^2] = E[(Z_{t+m} - \mu_Z)^2]$$

olduğundan herhangi bir k gecikmesi için serinin kovaryansı

$$\gamma_k = \text{Cov}(Z_t, Z_{t+k}) = E[(Z_t - \mu_Z)(Z_{t+k} - \mu_Z)] \quad (4.35)$$

ile tanımlanmaktadır ve durağandır ve $\text{Cov}(Z_t, Z_{t+k}) = \text{Cov}(Z_{t+m}, Z_{t+m+k})$ 'dır (Pindyck ve Rubinfeld, 1991).

4.3.4.2 Otoregresif Süreç:AR(p)

Zaman serisi modellemesinde Z_t gibi bir değişkenin geçmiş değerlerindeki bilgi, söz konusu değişkenin gelecek değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tür gecikmiş bağımlılığı ortaya koyan istatistiksel model p. dereceli otoregresif bir süreç aşağıda verilmektedir.

$$Z_t = \mu + \theta_1 Z_{t-1} + \theta_2 Z_{t-2} + \dots + \theta_p Z_{t-p} + e_t \quad (4.36)$$

p. dereceye sahip AR modelinde; μ stokastik sürecin ortalaması, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 'ler bilinmeyen otoregresif parametreler, e_t hata terimi ise ortalaması sıfır ve varyansı sabit korelasyonsuz rassal değişkenlerdir.

AR sürecin bilinmeyen değişkenleri, kısmi otokorelasyon katsayılarından yararlanarak belirlenebilmektedir (Çizelge 4.1). Ancak daha tutarlı bir tahmin için ise En Küçük Kareler Yöntemi kullanılmaktadır.

Zaman serisi sürecinin gözlenen değerlerinin tamamı için (4.36) eşitliği yeniden yazılırsa

$$\begin{aligned} Z_{p+1} &= \mu + \theta_1 Z_p + \theta_2 Z_{p-1} + \dots + \theta_p Z_1 + e_{p+1} \\ Z_{p+2} &= \mu + \theta_1 Z_{p+1} + \theta_2 Z_p + \dots + \theta_p Z_2 + e_{p+2} \\ &\dots \\ Z_N &= \mu + \theta_1 Z_{N-1} + \theta_2 Z_{N-2} + \dots + \theta_p Z_{N-p} + e_N \end{aligned} \quad (4.37)$$

eşitlikleri elde edilmektedir. Matris gösterimi ile bu eşitlik sistemi

$$\bar{Z}_t = A.x + e \quad (4.38)$$

dir. Burada

$$\bar{Z}_t = (Z_{p+1}, Z_{p+2}, \dots, Z_N)$$

$$e = (e_{p+1}, e_{p+2}, \dots, e_N)$$

$$x = (\mu, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & Z_p & Z_{p-1} & \dots & Z_1 \\ 1 & Z_{p+1} & Z_p & \dots & Z_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & Z_{N-1} & Z_{N-2} & \dots & Z_{N-p} \end{bmatrix}$$

olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal istatistiksel model (3.38) eşitliği için x 'in En Küçük Kareler Yöntemine göre tahmin değerleri

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{Z}_t \quad (4.39)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. $\hat{x}$ 'in kovaryansı

$$\text{Cov}(\hat{x}) = \hat{\sigma}_e^2 (A^T A)^{-1} \quad (4.40)$$

olarak hesaplanmaktadır ve varyans

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{(y - A\hat{x})'(y - A\hat{x})}{(N - 2p - 1)} \quad (4.41)$$

ile gösterilmektedir (Sevüktekin, Nargeçekenler, 2005). AR modelin belirlenmesi ve analizi Bölüm 3'de açıklanan ARX modelin analizi ile benzerlik göstermektedir. İki model arasındaki temel fark, AR modelde giriş büyüklüğünün olmaması ve sadece çıkış büyüklüğüne bağlı olarak ele alınan bir zaman serisinin stokastik kesimi modeli olmasıdır.

4.3.4.3 Hareketli Ortalama Süreç:MA(q)

Bir değişkenin AR(p) modelinde gözlenen değeri onun geçmiş ve bir rassal değişkenin hata değeri ile belirlenmektedir. Oysa, MA(q) modelinde Z_t değeri, serinin geriye doğru q dönem geçmiş hata terimlerinin ve ortalamasının doğrusal fonksiyonudur. MA(q) modelleri genel olarak aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$Z_t = \mu + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (4.42)$$

Burada, korelasyonsuz rassal hata terimleri e_t ortalaması sıfır ve sabit bir varyansa sahiptir. ϕ_h ($h=1, 2, \dots, q$) bilinmeyen parametrelerdir. Genel olarak bir hareketli ortalama süreci 1, 2 veya

daha fazla dönem geriye doğru rassal hataların e_t ağırlıklı bir ortalaması olarak değişkenin Z_t 'ye ait zaman serisi gözlemlerini göstermektedir.

MA(q) süreci için otokorelasyon fonksiyonu

$$r_k = \begin{cases} \frac{\varphi_k + \varphi_{k+1}\varphi_1 + \varphi_{k+2}\varphi_2 + \dots + \varphi_q\varphi_{q-k}}{1 + \varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \dots + \varphi_q^2} & k = 1, 2, \dots, q \\ 0 & k > q \end{cases} \quad (4.43)$$

(4.43) eşitliği ile verilmektedir (Fuh, 2003). Burada MA(q) süreci için otokorelasyon fonksiyonu q gecikmeden sonra sıfır olmaktadır. Bir hareketli ortalama sürecini belirlemede örneklem otokorelasyon fonksiyonu yararlı bilgiler sunmaktadır. Dolayısıyla sıfırdan farklı ve çok uzun olmayan gecikmelerde hesaplanan otokorelasyonlar MA sürecinin derecesini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Çizelge 4.1).

MA sürecin derecesi q'yu belirlemek için yapılacak diğer bir işlem bilinmeyen parametreler φ_q 'leri tahmin etmektir. Tahmin için AR(p) modelin bilinmeyen parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan En Küçük Kareler Yöntemi kullanılmaktadır.

4.3.4.4 Otoregresif-Hareketli Ortalama Süreç: ARMA(p,q)

AR ve MA süreçlerinin belirli bazı özelliklere sahip oldukları otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının bulunması ile görülmektedir. Örneğin MA(q) sürecinin derecesi hesaplanan otokorelasyon katsayısı r_k 'nin kesildiği gecikme dönemi ile belirlenebilmektedir. Başka bir ifade ile q'den daha büyük gecikmelerde otokorelasyonlar sıfır olarak alınmaktadır. Bununla birlikte bir model için hesaplanan otokorelasyonlar daha ileri gecikmelerde sıfıra doğru bir azalma gösterir, fakat kısmi otokorelasyonların hesaplanmasında çok kısa süreli gecikmelerde kesilme söz konusu oluyorsa otoregresif sürecin daha baskın olduğu ifade edilmektedir.

Bazı durumlarda zaman serisi verileri için hem otokorelasyon hem de kısmi otokorelasyon fonksiyonları belirli bir gecikmede kesilmediği gibi sıfıra doğru çok yavaş hareket etmektedirler. Böylece zaman serisi hem otoregresiflik hem de hareketli ortalama bileşenlerini aynı anda içermekte ve zaman serisi modelinde bu iki durum birlikte ortaya çıkmaktadır. Başka bir ifade ile zaman serisi modeli hem AR, hem de MA bileşenleri p ve q dereceden olmak üzere ARMA(p,q) olarak tanımlanabilmektedirler. ARMA(p,q) model

$$Z_t = \mu + \theta_1 Z_{t-1} + \dots + \theta_p Z_{t-p} + e_t + \varphi_1 e_{t-1} + \dots + \varphi_q e_{t-q} \quad (4.44)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, μ ; Z_t 'nin ortalaması, e_t , $E(e_t)=0$ ve varyansı $\text{Var}(e_t)=\sigma_e^2$ ile korelasyonsuz rassal değişkenler olduğu varsayımı yapılmaktadır. Eğer bu süreç durağan ise tüm dönemler için sabit bir ortalamaya sahip olacaktır (Fuh, 2003).

ARMA süreci AR ve MA bileşenlerinin bir kombinasyonu olduğundan otokorelasyon fonksiyonu hem AR hem de MA sürecinin özelliklerini birlikte göstermektedir (Çizelge 4.1). ARMA sürecinin bilinmeyen parametreleri de En Küçük Kareler prensibine göre belirlenmektedir. Ayrıca, ARMA(p,q) modelinin parametre tahmininde öncelikle otoregresif sürecin (p) parametreleri olan katsayıları hesaplanmaktadır. Daha sonra seriden otoregresif kısım çıkarılarak yeni bir seri elde edilmektedir. Elde edilen seri MA(q) kısmı içerdiğinden hareketli ortalama parametreleri hesaplanmaktadır.

4.3.5 Durağan Olmayan Stokastik Süreçler

Zaman serilerinin bir çoğu zaman boyunca değişen belirli bir stokastik sürecin özelliklerini taşıdığından durağan olmamaktadır. Durağanlık, zaman serisi verilerinde belirli bir zaman içerisinde sürekli artma veya azalmanın olmadığı, verilerin zaman boyunca bir yatay eksen boyunca dağılım gösterdiği şeklinde tanımlanmaktadır. Yada zaman serisi verilerinin sabit bir ortalama etrafında dalgalandığı ve dalgalanmanın varyansının özellikle zaman boyunca sabit kaldığı şeklinde ifade edilmektedir. Durağan olmayan zaman serilerinin durağanlaştırmak için serinin bir veya daha fazla farkını alarak bir dönüştürme işlemi uygulanmaktadır.

Sürecin derecesini tanımlayan d , zaman serisinin durağanlaştırılması için alınması gereken fark sayısını belirtmektedir. Durağan olmayan bir Z_t serisinin bir kere farkı alındığında seri durağan hale gelmiş ise sürecin derecesi $d=1$ olarak tanımlanmakta ve aynı zamanda fark alma sayısı sürecin homojenlik derecesi hakkında da bilgi vermektedir. Fark alınmış seri

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad (4.45)$$

olarak tanımlanmaktadır. Seri hala durağan değilse durağan hale gelene kadar farkı alınmaktadır. Otoregresif-hareketli ortalama ARMA(p,q) süreci durağan değilse, sürecin durağan olana kadar farkının alınması sonucu otoregresif-entegre-hareketli ortalama ARIMA(p,d,q) süreci geliştirilmiş ve Box-Jenkins yaklaşımı olarak da bilinmektedir. Bu modelin analizi de serinin farkı alındıktan sonra diğer modellerde olduğu gibi aynı işlem adımları ile analiz edilmektedir.

4.3.6 Model Derecesinin Belirlenmesi

Stokastik modellemede en önemli konulardan birisi de eldeki veriye uyacak en iyi modelin seçilmesidir. Model derecesinin belirlenmesinde, veriyi temsil edecek en az sayıda parametre içeren modelin seçilmesi ilkesi esas alınmaktadır. Modelin derecesi olması gerektiğinden daha küçük seçildiğinde parametrelerin tahmini tutarlı olmamakta, olması gerektiğinden daha büyük seçildiğinde ise parametrelerinin tahmininin varyansı büyük çıkmaktadır. Bu iki durumda da modelden elde edilen sonuçlar güvenilir olmamaktadır. Modelin derecesinin seçiminde en çok olabilirlik yöntemi her zaman model için olabilecek en büyük dereceyi seçmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile derece seçimi hatalı sonuçlara neden olmaktadır. En çok olabilirlik yönteminin geliştirilmiş biçimi Akaike (1973) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde farklı sayıda parametreye sahip olan farklı modeller arasından seçim yapılmaktadır. Bu yöntem her bir modelin ayrı ayrı en çok olabilirlik fonksiyonunu bulup olabilirlik fonksiyonunun değeri en büyük olan modeli en uygun model olarak seçmektedir.

Pratikte model belirleme kriterleri olan, Akaike Bilgi Kriteri (AIC, Akaike Information Criterion), Schwartz Bayesian Kriteri (SBC, Schwartz Bayesian Criterion), ve En Son Kestirim Hatası (FPE, Final Prediction Error) en çok kullanılmaktadır. Verilen herhangi bir zaman serisini ARMA(p,q) olarak modellemek istediğimizde AIC istatistiği,

$$AIC = N\ell(\epsilon_{(t)}^T \epsilon_{(t)}) + 2(p+q) \quad (4.46)$$

değerini minimum yapan p ve q değerleri seçilerek bulunmaktadır. Buna göre, AIC'yi minimum yapan p ve q değerleri aranan modelin dereceleridir.

SBC kriteri ise

$$SBC = N\ell(\epsilon_{(t)}^T \epsilon_{(t)}) + r \ln(N) \quad (4.47)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada SSE prediksyon hataları kareleri toplamıdır ve r de tahmin edilen parametrelerin sayısını göstermektedir. Hem AIC hem de SBC negatif değerler alabilmekte ve bunlardan en küçük değeri veren p ve q değerleri model dereceleri olarak seçilmektedir.

Diğer kriter FPE istatistiği ise

$$FPE = \hat{\sigma}^2 \frac{n+p}{n-p} \quad (4.48)$$

olarak verilmektedir ve yine FPE istatistiğini en küçük yapan değer model derecesi olarak

alınmaktadır. FPE'nin aldığı değer χ^2 Çizelge değeri ile karşılaştırıldığında modelin uygunluğu test edilmektedir. Bu istatistikler arasında bir ilişkinin olduğunu ve bir metoda göre belirlenen model derecelerinin diğerine göre pek farklı çıkması beklenmemektedir (Özkara, 2005).

Örneklem otokorelasyonları ve örneklem kısmi otokorelasyonlarına bakılarak da model hakkında sezgisel olarak bir karar varılmakta ve bu model üzerinde istatistiksel sonuçlar çıkarılarak yani uygun model bulunmaya çalışılmaktadır. Bazen örneklem otokorelasyonları ve örneklem kısmi otokorelasyonlarına bakılarak model dereceleri hakkında sezgisel de olsa bir fikir elde edilememektedir.

4.3.7 Prediksiyon Hatalarının Analizi

Zaman serileri için oluşturulan modellerin veriler için uygun olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. Çoğunlukla modelin test edilmesi prediksiyon hataları ile yapılmaktadır.

“Prediksiyon hataları= gözlem değerleri-modelden elde edilen değerler”

olarak tanımlanmaktadır. Zaman serisi modellerinde modelden elde edilen değerler, bir sonraki tahmin değerleridir. Örneğin; AR(1) modeli için θ katsayısı En Küçük Kareler ile kestirilmektedir. t zamanında modelden hesaplanan değer ise $\theta.Z_{t-1}$ ($Z_t = \mu + \theta_1 Z_{t-1}$)'dir. Z_t 'ye göre prediksiyon hataları,

$$\varepsilon_t = Z_t - \theta.Z_{t-1} \quad (4.49)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır.

Model çok iyi seçilmiş ise hatalar rasgele ve sifıra yakın değerler olarak elde edilmektedir. Yada hataların otokorelasyon katsayıları, en büyük N değeri için bile yaklaşık olarak normal dağılmış olup, sıfır ortalama ve $1/\sqrt{N}$ varyans değerine sahip olmaktadır. Chatfield (1996), %95 güven aralığı için r_k 'nin güven aralığını $\pm 1,96/\sqrt{N}$ olarak tanımlamaktadır. Eğer hataların otokorelasyon katsayıları bu güven sınırları içerisinde kalıyorsa, model veriler için uygun olup tahmin için kullanılabilir. Bu metot bazı durumlarda ARMA modelden elde edilen hataların analizi için uygun sonuçlar vermemektedir (Box ve Pierce, 1970). Çünkü ARMA modelden elde edilen hataların otokorelasyon fonksiyonu bazı durumlarda gerçek hatalardan elde edilen otokorelasyon fonksiyonundan farklı özellikler göstermektedir. Bunun sonucu olarak da yanlış model elde edilebilmektedir. Bunun için de, modelin uygunluk testi için kullanılan bir başka metot ise Q-istatistiğidir.

Q-istatistikleri bir grup otokorelasyon katsayısının sıfırdan anlamlı bir şekilde farklı olup olmadığının test edilmesinde kullanılmaktadır. Q-istatistikleri hesaplanan otokorelasyonların bir kısmını dikkate alarak test geliştirdikleri için literatürde Q-istatistiklerine portmanteau testleri adı verilmektedir (Sevüktekin ve Nargeleçekenler, 2005).

Örneklem otokorelasyonlarını kullanan ve Box ile Pierce (1970) tarafından geliştirilen Q-istatistiği

$$Q = N \sum_{j=1}^k r_j^2 \quad (4.50)$$

(4.50) eşitliği ile belirlenmektedir. Burada N örneklem büyüklüğü ve k gecikme uzunluğudur. Eğer veriler durağan bir ARMA (otoregresif hareketli ortalama) sürecinden üretilmiş ise Q-istatistikleri k serbestlik derecesi ile χ^2 dağılımı göstermektedir. Eğer Q değeri χ^2 tablosundaki kritik tablo değerini aşarsa, (4.52) eşitliği ile ifade edilen anlamlı otokorelasyonların olmadığı sıfır hipotezi red edilmektedir. Q-istatistiğinde maksimum gecikme sayısının yaklaşık olarak 20 civarında olması gerektiği önerilmektedir (Chatfield,1996).

Box-Pierce Q-istatistiği kullanıldığında orta büyüklükteki örneklerde yapılan çalışmalarda zayıf kalması nedeniyle alternatif bir portmanteau testi Ljung-Box tarafından önerilmiştir. Ljung-Box Q-istatistiği,

$$Q_{(k)} = N(N+2) \sum_{j=1}^k \frac{[r_j]^2}{N-j} \quad (4.51)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Ljung-Box Q-istatistiği, Box-Pierce Q-istatistiğine göre daha uygun bir χ^2 dağılımı sergilemektedir. Ayrıca, bu testlerle tahmin edilen bir modelden elde edilen prediksyon hatalarının bir rasgele süreç gibi davrandığı kontrol edilmekte ve modelin uygunluğu hakkında da yorum yapılmaktadır. Tahmin edilen modelde s-sayıda korelasyon var ise serbestlik derecesi tahmin edilen katsayıların sayısı ile sınırlamak mümkün olmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir modelin hataları test ediliyorsa Q, k-m (m model derecesi; p, q yada p+q olabilir) gibi bir serbestlik derecesi ile χ^2 dağılımına sahip olmaktadır. Q-istatistiğine göre kurulan sıfır ve alternatif hipotezde

$$H_0: Q(k) < \chi_{1-\alpha, k-p-q}^2 \quad (4.52)$$

ise H_0 hipotezinin uygun olduğu kabul edilmekte,

$$H_1: Q(k) \geq \chi_{1-\alpha, k-p-q}^2 \quad (4.53)$$

ise H_1 hipotezi reddedilmektedir.

Yani geçici modelin uygun olmadığına karar verilmektedir. Bu istatistikler örneklem otokorelasyonlarına bağlı olmaktadır.

Ayrıca model parametreleri belirlendikten sonra model parametreleri yerine konularak model tarafından izah edilemeyen prediksyon hatalarının otokorelasyon katsayıları da hesaplanarak uygun model araştırması yapılmaktadır.

Hataların rasgele olmasından başka, model katsayılarının istatistiksel anlamlılığının da test edilmesi gerekmektedir. Kestirilen katsayılar sıfırdan farklı anlamlı değerler alması gerekmektedir. Eğer, değilse, modelin derecesi azaltılarak, daha basit bir model ile çalışılması gerekmektedir. Aşağıda verilen Eşitlik ile bütün AR, MA ve ARMA modellerin katsayılarının sıfırdan farklı bir değer alıp almadıkları test edilebilmektedir.

θ_1 ; AR(1) modelin katsayısı, N; zaman serisi gözlem sayısını göstermek üzere, standart normal dağılıma göre θ_1 'in %95 güven aralığı (4.55) eşitliği ile hesaplanmaktadır

$$\text{var}(\theta_1) = \frac{1 - \theta_1}{N} \quad (4.54)$$

$$\theta_1 \pm 2\sqrt{\text{var}(\theta_1)} \quad (4.55)$$

Bu eşitlik, güven sınırı sıfır içermiyor ve sıfırdan anlamlı derecede farklı ise, kestirilen parametre anlamlı olmaktadır (Anderson, 1971). Kestirilen parametreler standart sapmaları ile de karşılaştırılarak, parametrelerin anlamlı derecede sıfırdan farklı olup olmadıkları test edilebilmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Sistem teorisine göre, zaman serisi özelliğindeki etki ve tepki büyüklüklerinden yararlanarak parametrik olmayan yöntemlerle dinamik bir sistem olan Boğaziçi Köprüsü'nün davranışları araştırılmış ve tanımlanması yapılmıştır. Bu amaçla; Boğaziçi Köprüsü'nde belirgin değişimlerin çıkması beklenen kısımlarından; kulelerde en üst, tabliye orta noktasında, tabliyenin ¼'lik kısımlarında birer tane obje noktası (ayrıca, kule ayaklarında, kule orta girişinde, ankraj bloklarında ve tabliye orta noktası kuzey kesiminde de birer tane obje noktası tesis yapılmış, ancak bu çalışmada ele alınmamıştır) ve bu obje noktalarının izlenmesi için de 6 tane (bu çalışmada üçü kullanıldı) referans noktası tesisi yapılmıştır. Ayrıca, yapılan jeodezik ölçmeler esnasında yapıya etkiyen sıcaklık değişimleri, rüzgar kuvveti ve trafik yükü büyüklükleri de ölçülmüştür. Gerek obje noktalarında yapılan jeodezik ölçümler gerekse yapıya etkiyen büyüklükler zaman serisi özelliğinde yapılmıştır. Elde edilen ölçülerle kulelerde etki-tepki ilişkisine bağlı ARX, çapraz korelasyon, regresyon ve çoklu regresyon analizleri, hem kulelerde hem de tabliyede ise sadece tepkiye bağlı zaman serileri analizleri (trend bileşeni, harmonik analiz ve stokatik kesimin AR ve ARMA ile modellenmesi), yapının frekansları, genlikleri ve faz açıları hesaplanarak yapının davranışları açıklanmaya çalışılmıştır.

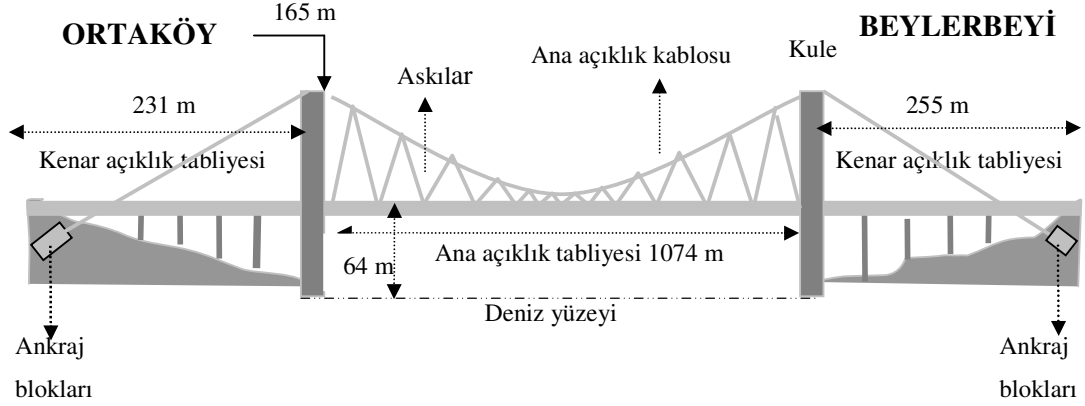
Araştırmaya konu olan Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'nün sorumluluğu altındaki İstanbul Boğaziçi Köprüsü'ne ait yapılan bütün bu çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi ile Karayolları Genel Müdürlüğü arasında imzalanan “2003-B-17-007” nolu protokol kapsamında ele alınmıştır.

Ayrıca bu çalışma Yıldız teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından da desteklenmektedir.

5.1 Boğaziçi Köprüsü ve Yapısal Özellikleri

Boğaziçi Köprüsü İstanbul'da Asya'yı ve Avrupa'yı bağlamaktadır. Tasarımı ve projesi İngiliz Freeman, Fox and Partners tarafından yapılmıştır. Cleveland Bridge Cooperation tarafından 1970 yılında inşaatına başlanmış ve 1973 yılında trafiğe açılmıştır. Boğaziçi Köprüsü 1074 m ana açıklıklı, sırasıyla Avrupa ve Asya yakalarında olmak üzere 231 m ve 255 m kenar açıklıklı, su yüzeyinden yüksekliği 64 m olan içi boş kapalı kutu kesit tabliyeli, narin kuleli ve eğik askılı modern bir asma köprüdür. Ana açıklık, her biri 17,9 m uzunluğunda, 33,4 m genişliğinde ve 143,5 ton ağırlığında rijit plak panellerden yapılmış 60 adet elemandan oluşmaktadır. Kabloların arasındaki mesafe 28 m'dir. Her biri 3,5 m genişliğinde, üç gidiş ve üç geliş olmak üzere toplam altı şeritten oluşmaktadır. Şekil (5.1)'de

Boğaziçi Köprüsü'nün genel bir durumu görülmektedir. Ayrıca, Çizelge (5.1)'de Boğaziçi Köprüsü'ne ait, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri verilmektedir.



Şekil 5.1 Boğaziçi Köprüsü'nün genel görünümü

Tabliyenin esas görevi trafik yüklerini askılara dağıtmak ve burulmada tüm dinamik dengeyi önemli derecede destekleyecek yeterli rijitliğin elde edilmesini sağlamaktır. Tabliye kesiti orta noktasının derinliği 3 m'dir. Tabliye her bir kulede bulunan kule kirişleri üzerindedir.

Boğaziçi Köprüsü kabloları, minimum çekme mukavemeti 160 kg/mm^2 olan 5 mm çapındaki galvanizlenmiş (Demir-çelik esaslı malzemenin, yüzey hazırlama işleminden geçirildikten sonra erimiş haldeki çinko banyosuna daldırılarak yüzeyinde demir-çinko alaşımı ve saf çinkodan oluşan ve korozyona karşı koruyucu olan bir kaplama elde edilmesidir) çelik tellerden yapılmışlardır. 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.

Çizelge 5.1 Boğaziçi Köprüsü'ne ait elemanların kesit özellikleri (Celasun,1981)

Eleman Adı	Elastisite Modülü (KN/m ²)	Alan (m ²)	Atalet Momenti (m ⁴)
Kenar açıklık tabliyesi, Ankrajlar	0	0,3300	1,8000000
Ana açıklık tabliyesi	205000000	0,8510	1,2380000
Kuleler	205000000	1,3600	9,0000000
Kenar açıklık kablolu	193000000	0,4380	0,0076371
Ana açıklık kablolu	193000000	0,4100	0,0066918
Kenar açıklık kablolu	193000000	0,4380	0,0076371
Askılar	162000000	0,0042	0,0000007

Boğaziçi Köprüsü kuleleri çelik kutu kesitli olup 165 m yüksekliğindedir. Her bir kule iki çelik kutu kesitten yapılmış olup, bu kesitler belirli noktalarda birbirlerine bağlanmıştır. Kulelerdeki her kutu kesit alanı tabanda 7mx5,2m, tepede ise 7mx3m boyutundadır. Plaka kalınlıkları 20 mm'dir.

Boğaziçi Köprüsü'nde kenar açıklık tabliyeleri ana kabloya bağlı olmayıp zemine inşaa edilen temeller üzerine oturtulmuştur. Orta ayak temellerin üzerine yerleştirilen 1,5 m çapındaki çelik kolonlar, kutu kesitli içi boş taşıyıcı çelik ana kirişlere mesnet oluşturmaktadır.

Her bir kulenin zemin yüzeyindeki temelleri su yüzeyinden yaklaşık olarak 3 m yukarıdadır. Temeller beton olarak yapılmış olup sert kaya zemine kadar inmektedir. Temel derinlikleri Ortaköy yakasında 17m-24m arasında, beylerbeyi yakasında ise 5m-10m arasında değişmektedir. Ankraj bloklarının her biri, iki kablo ankraj odasını içermektedir. Blokların takriben 2/3'ü toprak içinde olmak üzere derinlikleri kademeli olarak 40 m'ye kadar inmektedir.

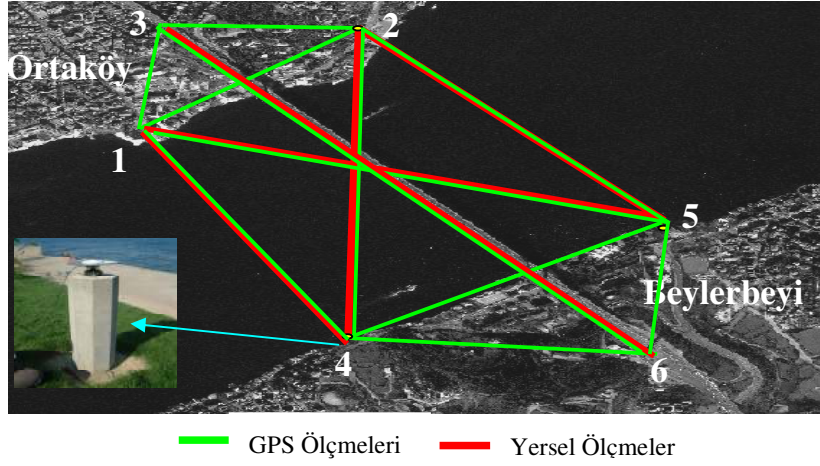
Ankraj bloklarının her iki hücrelerinde beton kütle içine birer çelik konstrüksiyon çerçeve yerleştirilmiş olup, bunların içindeki 244 tane ön gerilmeli çubuğa daha sonra daha sonra kablo çekmesini dengelemek için toplam 15400 ton çekme gerilmesi verilmiştir. Bu çerçeveye daha sonra ana kabloların uçları monte edilmiştir (Dumanoglu, 1998).

Boğaz Köprüsü'nün proje esasları ise; Köprü 6 şeritli bir karayolu trafiğini taşıyacak şekilde projelendirilmiş olup iki tarafta yaya yolu düzenlenmiştir. Trafik yükü olarak ilgili İngiliz yük standardının verdiği değerler % 10 artırılarak alınmış ve 180 tonluk özel taşıt yükü de gözetilmiştir. Rüzgar yükü için maksimum rüzgar hızı 45 m/sn alınmıştır. Ayrıca İstanbul'un deprem bölgesinde olduğu düşünülerek köprü, temel zemin ivmesi yatayda 0,1 g'lik ivmesine dayanacak şekilde hesaplanmıştır. Düşey için ise 0,05 g olarak hesaplanmıştır.

5.2 Boğaziçi Köprüsü'nde Yapılan Jeodezik Çalışmalar

5.2.1 Referans ve Obje Noktalarının Tesisi

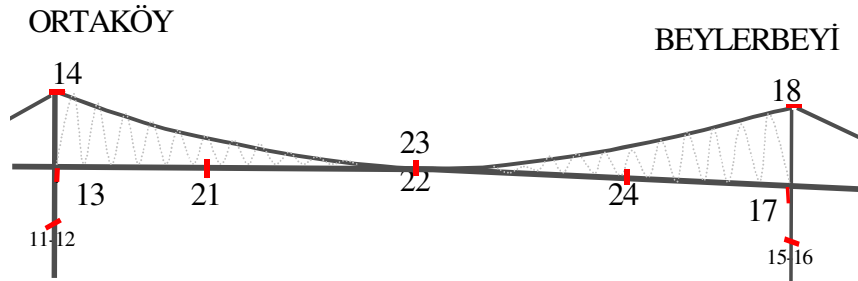
Boğaziçi Köprüsü'nde ilk olarak referans ve obje noktalarının yerlerinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın hem yersel yöntemle hem de GPS ile yapılması düşünüldüğünden, noktaların birbirlerini görmeleri şartı mümkün olduğunca gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca referans noktalarının yerleri, olabildiğince sağlam zeminlere ve daha çok da obje noktalarının konumuna bağlı olarak belirlenmiştir. Çünkü obje noktaları, Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.3'de ifade edilen açıklamalar doğrultusunda, köprüde olası hareketlerin ortaya çıkabileceği yerlere tesis edilmiştir.



Şekil 5.2 Boğaziçi Köprüsü Jeodezik Kontrol Ağı

Bu çalışmada 6 adet referans noktası tesis edilmiş olup, bunlardan 4'ü pilye (2, 3, 4 ve 6 numaralı noktalar) 2'si bronz (1 ve 5 numaralı noktalar) şeklindedir. Şekil (5.2)'de referans noktaların yerleri ve ağ geometrisi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi 1, 2, 4 ve 5 numaralı noktalar sahil kıyısına daha yakın, 3 ve 6 numaralı noktalar ise deniz seviyesinden, sırası ile yaklaşık 48 m, 65 m yükseklikte tesis edilmiştir.

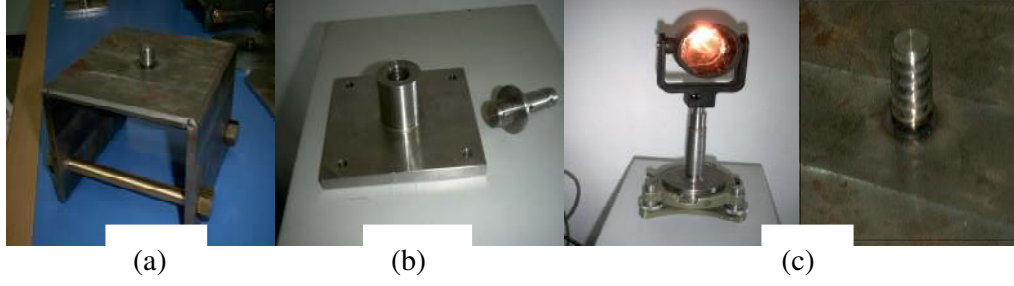
Obje noktalarının yerleri, Şekil (5.3)'de görülmektedir. Tabliye üzerindeki objeler; 3 tanesi köprünün güney kesimine (21, 22 ve 24), 1 tanesi kuzey kesimine (23) korkuluklar üzerine tesis edilmiştir. Bunlardan 22 ve 23 numaralı noktalar köprünün orta noktasına karşılıklı olarak, diğer 21 ve 24 numaralı noktalar ise köprünün 1/4' lük kısımlarına vidalamak suretiyle tesis edilmiştir.



Şekil 5.3 Boğaziçi Köprüsü obje noktalarının konumları

Şekil (5.4)'de obje noktalarının şekilleri görülmektedir. Obje noktalarından 11, 12, 15 ve 16 numaralı noktalar kulenin ayaklarına, 13 ve 17 tabliyenin altında yer alan kule kirişinin orta noktasına, 14 ve 18 de kulenin en üst kiriş noktası üzerindeki korkuluk üzerine kaynak

yapılmak suretiyle tesis edilmiştir. 31, 32, 33 ve 34 numaralı noktalarda ankraj bloklarına vidalarla monte edilmiştir.



Şekil 5.4 Tabliye (a), kule ayaklarına (b), ankraj ve kule üstüne (c) tesis edilen obje noktaları şekilleri

5.2.2 Ölçüm Planlaması İçin Örnekleme Frekansının Belirlenmesi

Mühendislik yapılarındaki sürekli değişimlerin ayrık-zamanlı ölçümlerle belirlenmesi için ölçme işlemlerine başlamadan önce, ilk olarak ölçmede kullanılacak aletlerin örnekleme frekanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle de obje noktalarında yapılacak ölçmelerden elde edilen ölçülerin izlenen yapının hareketini ortaya koyacak nitelikte olması gerekmektedir. Bunun için hem ölçmede kullanılacak aletin örnekleme frekansı hem de izlenen yapının maksimum frekansının bilinmesi gerekmektedir. Nyquist teoremine göre, örnekleme frekansı, izlenen yapının maksimum frekansının iki katına eşit ya da büyük olması gerekmektedir (Bölüm 2.4’de ayrıntılı açıklama yapılmıştır).

Boğaziçi Köprüsü’nün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile hesaplanan düşey doğrultudaki doğal frekansları Çizelge 2.4’de verilmiştir. Köprünün maksimum doğal frekansı 1,189 Hz’dir (15. mod sayısı). Nyquist teoremine göre karmaşık bir yapı olan Boğaziçi Köprüsü’nün olası bütün hareketlerini belirlemek için örnekleme frekansının en az 2,378 Hz olması gerekmektedir. Ancak, ölçme işleminde kullanılacak TCA2003’ün maksimum örnekleme frekansı yaklaşık 1Hz olduğundan, köprünün 0,5 Hz frekans değerinden daha büyük frekans değerlerini ya da hareketlerini belirlemek mümkün olmayacaktır. Bu değer (0,5 Hz) köprünün ilk altı mod sayısına (0,463 Hz) karşılık geldiğinden, yapılacak analizlerde yaklaşık olarak köprünün ilk altı mod şekilleri, frekansları ve periyotları elde edilmiş olacaktır. Yüksek yapılarda ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90’ını içerdiğinden, köprü için maksimum frekans 0,463 Hz kabul edilebilir. Böylece, tabliye üzerindeki obje noktalarından TCA2003 ile yaklaşık 1 saniye aralıklarla alınan ölçülerin köprünün hareketlerini belirlemede önemli bir bilgi kaybı olmaksızın yeterli olabileceği söylenebilir.

5.2.3 Jeodezik Ölçmeler

Boğaziçi Köprüsü'nde ölçümler 22.09.2003- 26.09.2003 tarihleri arasında hem klasik yersel ölçme yöntemi hem de GPS ölçme yöntemi olarak, iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

GPS ile sadece referans noktalarında ölçümler yapılmıştır. GPS ölçmelerinde 3 adet çift frekanslı Ashtech-Z Surveyors alıcıları ve 3 adet Topcon Hiper GGD alıcıları kullanılmıştır. Ashtech-Z Surveyors alıcılarının frekansları 5 Hz olup, Topcon alıcılarının ise 10 Hz'dir. 1, 2 ve 3 nolu noktalarda Topcon, 4, 5 ve 6 nolu noktalarda da Ashtech alıcıları kullanılmıştır. Referans noktalarının tamamı eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Oturum süresi 2 saat olup, veri toplama aralığı 20 saniyedir.

Yersel yöntemlerle ölçmeler Leica'nın TCA2003 serisi kullanılarak referans ve obje noktalarının bütününde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak referans noktalarında daha sonra da obje noktalarından ölçümleri yapılmıştır.

Referans noktalarında ölçümler 4 tam silsile şeklinde yapılmış olup, her bir noktada doğrultu, düşey açı, mesafe, basınç, sıcaklık, alet yüksekliği ve hedef yüksekliği ölçülmüştür. Ayrıca ölçmeye başlama-bitiş saati, ölçme süresi, tarih gibi bilgiler de kayıt edilmiştir.

Obje noktalarından ise ölçüler kule üzerindeki 14 ve 18, tabliye üzerindeki 21, 22 ve 24 numaralı obje noktalarında Çizelge (5.2)'de görüldüğü gibi belirli bir zaman aralığı içerisinde sürekli olarak yapılmıştır. Tabliye üzerindeki obje noktalarında ölçümler 1saniye (örnekleme frekansı 1Hz), kule üzerindeki obje noktalarında ise 10 dakika zaman aralıklarında yapılmıştır.

Obje noktalarında da referans noktalarında olduğu gibi her bir obje noktası için doğrultu, düşey açı, mesafe, basınç, sıcaklık, alet yüksekliği ve hedef yüksekliği ölçülmüştür. Ayrıca ölçüye başlama-bitiş saati, ölçme süresi, tarih gibi bilgiler de kayıt edilmiştir. Çizelge (5.2)'de obje noktalarına yapılan ölçümlerle ilgili bazı bilgiler görülmektedir.

Boğaziçi Köprüsü ölçmelerinde kullanılan TCA2003 yüksek performanslı bir elektronik takeometredir. Mühendislik ölçmelerinde, özellikle de deformasyon ölçmelerinde tekrarlı ölçülerin tamamen otomatik olarak yapılması ile hem zaman kazancı hem de işgücünde azalma sağlanmaktadır. ATR sisteminin en önemli özelliklerinden birisi de özel reflektöre ve reflektörlerde özel aygıtlara gereksinim duymamasıdır. Şekil (5.5)'de TCA2003 ile 6 numaralı referans noktasından (pilye) obje noktalarına yapılan bir ölçüm görülmektedir.

Çizelge 5.2 Obje noktalarına yapılan ölçümlerle ilgili bilgiler

Ölçümlerin Yapıldığı Tarih	DN (Referans Noktası)	BN (Obje Noktası)	Obje Noktası Yeri	Ölçümlerin Zaman Aralığı
24.09.2003	4	22	Tabliye orta nok	15 ¹³ -15 ⁴²
24.09.2003	4	24	Tabliyenin 1/4' ü	14 ³³ -15 ⁰²
25.09.2003	6	14	Kule üstü	09 ⁵¹ -19 ²¹
		18	Kule üstü	
26.09.2003	1	21	Tabliyenin 1/4' ü	8 ²⁹ -9 ²⁶
22.09.2003	11-15-16-17-31-32-33 ve 34 numaralı obje noktalarının ölçüleri referans noktalarının ölçümü ile birlikte iki tam silsile yapılmıştır.			

ATR modülü ile gözlemci kabaca reflektörün bulunduğu yere cihazı yönelttikten sonra ATR prizmayı otomatik olarak bulup tam merkezine hedeflemektedir. Görüş alanı içerisindeki reflektörü bulmak için servo motorları yardımıyla daire çapını küçülterek, spiral hareket yapmaktadır. TCA2003'ün özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir. Bu sistemle, önceden belirlenen aralıklarda 50'ye yakın noktada sürekli ölçü yapılabilir. TCA2003'ün örnekleme frekansı daha öncede ifade edildiği gibi yaklaşık 1 Hz'dir.

Çizelge 5.3 TCA2003'ün özellikleri



Şekil 5.5 TCA2003 ile 6 numaralı referans noktasından yapılan ölçümden bir görünüm

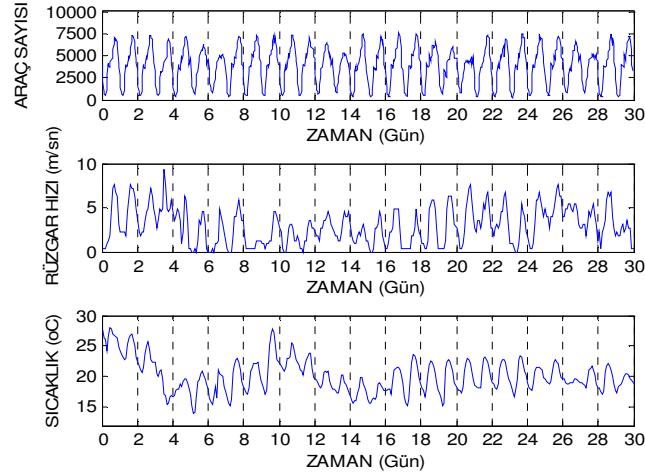
Açı ölçme doğruluğu	(0,5'') 0,15mgon
Uzaklık ölçme doğruluğu	1 mm + 1ppm
1 prizma ile max. Ölçülebilen uzaklık	2,5 km / 3,5 km
Büyütmesi	30x
En kısa odaklama mesafesi	1,7 m

5.3 Etki Büyüklüklerinin Belirlenmesi

Boğaziçi Köprüsü'nde etkili olan büyüklükler, her iki saatte bir ölçülen sıcaklık değişimleri, trafik yükü için, her bir saatte köprüden geçen araç sayısı ve araç cinsi, rüzgar kuvveti için ise iki saatte bir ölçülen rüzgarın hızı ve yönü ile ilgili bilgiler Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır. Bu büyüklüklerle (trafik, sıcaklık ve rüzgar yükü) obje

noktalarının koordinat değişimleri açıklanmaya çalışılmıştır. Özellikle kule üzerindeki obje noktaları koordinat değişimleri ile etkiyen yükler arasında etki-tepki ilişkisine bağlı analizler yapılmıştır.

Ancak, tabliye üzerindeki obje noktalarının koordinat değişimleri ile etkiyen yükler arasında grafiksel bir yorumlama yapılmıştır. Çünkü tabliyede yapılan ölçüm süresince etkiyen büyüklüklerde belirgin değişimler gözlenememiştir. Çizelge (5.4)'de obje noktalarında etkili olan büyüklüklerle ilgili bilgiler verilmiş ve Şekil (5.6)'da da ölçümün yapıldığı zaman aralığını kapsayan bir aylık grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Araç sayısı, rüzgar hızı ve sıcaklık değişimleri (01.09.2003-30.09.2003)

Çizelge 5.4 Obje noktalarına etkiyen büyüklüklerle ilgili bilgiler

Tarih ve Ölçüm Zamanı	N No	Etkiyen Büyüklük	Maksimum Değer (Zaman)	Minimum Değer (Zaman)	Maksimum Değişim	Ölçüm Aralığındaki Davranış
26.09.2003 (08:29:49-09:26:26)	21	Sıcaklık	22.25 °C (14:00)	18.45 °C (06:00)	3.80 °C	Artış
		Rüzgar	7.60 m/s (18:00)	2.70 m/s (06:00)	4.90 m/s	Çok Az Azalma (NE)
		Araç Sayısı	7230 adet (18:00-18:59)	467 adet (04:00-04:59)	6763 adet	Azalma
24.09.2003 (15:13:40-15:41:16)	22	Sıcaklık	22.55°C (14:00)	17.80 °C (06:00)	4.75 °C	Azalma
		Rüzgar	4.90 m/s (20:00)	0.90 m/s (06:00)	4.00 m/s	Değişim Yok (N-E)
		Araç Sayısı	7423 adet (17:00-17:59)	284 adet (04:04:59)	7139 adet	Artış
25.09.2004 (10:00-19:21)	14-18	Sıcaklık	21.20 °C (16:00)	17.50 °C (06:00)	3.70 °C	09:50-12:00 artış 19:19'a kadar
		Rüzgar	6.70m/s(NNE) (16:00)	0.40m/s(NNE) (04:00-06:00)	6.30 m/s	09:50-12:00 ve 14:00-16:00 artış, sonra yavaşlama
		Araç Sayısı	7466 adet (17:00-17:59)	483 adet (05:00-05:59)	6983 adet	09:50-19:19 artış, sonra yavaşlama

Boğaziçi Köprüsü'nde obje noktalarında yapılan jeodezik ölçümlerden elde edilen gözlem sonuçları, yapının ölçüm anındaki hareketlerini yansıtmaktadır. Köprüde harekete sebep olan yükler ise köprünün kendi ağırlığına ilaveten trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimleridir. Ölçüm anında bütün bu etkiler farklı birimlerde ölçülmektedir. Rüzgarın hız olarak, trafik yükünün ise taşıt sayısı, taşıdığı yük, şerit sayısı ve taşıtın hızı şeklinde elde edilmektedir. Bu verilerin analiz işlemlerinde yük olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle Boğaziçi Köprüsü'ne etkileyen büyüklüklerin yük olarak karşılıkları hesaplanmıştır.

Ayrıca, kule üzerindeki obje noktaları tepkileri ile köprüde etkili olan büyüklükler arasındaki matematiksel ilişkinin ya da transfer fonksiyonunun belirlenmesi için, köprüye etkileyen büyüklüklerin, köprünün tepki büyüklüklerinin zaman aralıkları ile eşzamanlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için köprünün kulelerinde etkili olan büyüklükler zamana bağlı regresyon analizi ile polinom şeklinde 10 dakika zaman aralıkları için hesaplanmıştır.

Köprüye etkileyen büyüklükler trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimleri olmak üzere üç aşamada incelenmiştir.

1.Trafik yükü:

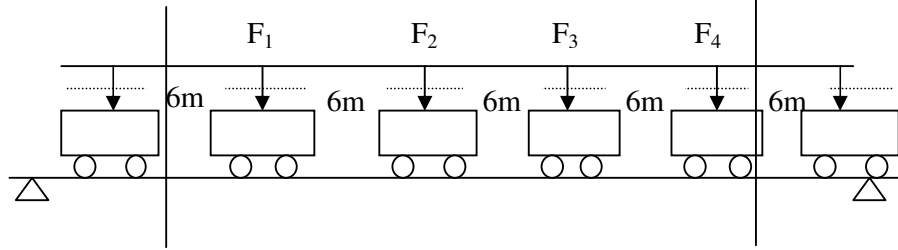
Boğaziçi Köprüsü kulelerindeki 14 ve 18 numaralı obje noktalarının etki-tepki büyüklüğüne bağlı matematiksel modellerinin oluşturulmasında öngörülen trafik yükü (etki büyüklüğü), aracın ait olduğu sınıf, araç sayısı ve ortalama yükü dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge (5.5)'de gösterilmiştir. Hesaplanan bu yük değerleri, bir saatlik zaman aralığında köprüden geçen toplam araç sayısına göre hesaplanmıştır. Oysa tepki büyüklükleri 10 dakika zaman aralıklarında ölçüldüğünden, etki büyüklüklerinin de 10 dakika zaman aralıklarındaki değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu değerleri belirlemek için regresyon analizinden yararlanılarak (3.19) eşitliği ile bir saatlik yük değerlerinin zamana bağlı polinom şeklindeki

$$Y_{TY} = 4170,1 - 20,004.t + 0,5828.t^2 - 0,0044.t^3 + 0,00001.t^4$$

fonksiyonundan köprü için 10 dakika zaman aralıklı yük değerleri hesaplanmıştır. Ancak, yapılan gözlemler sonucu her bir aracın köprüden geçişi yaklaşık 1,56 dakika olup, köprü boyunca (1560 m) hızı da 60 km/saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil (5.7)'de görüldüğü gibi, her bir taşıt uzunluğu 3 m ve taşıtlar arası mesafe de 3 m kabul edilerek, trafik yükü köprü boyunca değil de her 6 m'de bir çizgisel yük olarak hesaplanmıştır. Celasun (1981), köprülerde taşıt yükünün,

$$\text{“Taşıt yükü} = 6 (\text{şerit sayısı}) \times \text{yük (her 6 m' deki yük)} \times 0.75 (\text{yük çarpanı})$$

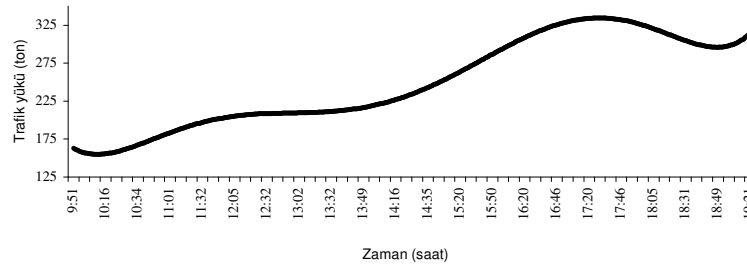
olarak hesaplamasını ve şerit sayısı 4’den fazla olduğunda ise trafik yükünün 0,75 yük çarpanı ile çarpılmasını öngörmektedir. Yapılan bütün bu genellemeler ve yaklaşımlardan yararlanılarak Boğaziçi Köprüsü trafik yükü, kulelerde yapılan gözlem süresi için hesaplanmış ve grafiği Şekil (5.8)’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Boğaziçi Köprüsü için öngörülen basitleştirilmiş trafik yükleri (tek şerit)

Çizelge 5.5 Boğaziçi Köprüsü’nün 25.09.2003 tarihindeki (kulelerin gözlem zamanı) araç sayısı ve yük hesabı

Tarih/Zaman	0. Sınıf			1. Sınıf			2. Sınıf			3. Sınıf			Toplam Yük(3şerit) (ton)
	adet	yük (ton)	toplamy (ton)	adet	yük ton	toplamy (ton)	adet	yük (ton)	toplamy (ton)	adet	yük (ton)	toplamy (ton)	
25.09.03/10:00-11:00	36	0,15	5,4	3588	1	3588	113	3,5	395,5	21	6,5	136,5	4125,4
25.09.03/11:00-12:00	47	0,15	7,05	3865	1	3865	110	3,5	385	23	6,5	149,5	4406,6
25.09.03/12:00-13:00	53	0,15	7,95	4939	1	4939	100	3,5	350	21	6,5	136,5	5433,5
25.09.03/13:00-14:00	45	0,15	6,75	4612	1	4612	95	3,5	332,5	19	6,5	123,5	5074,8
25.09.03/14:00-15:00	42	0,15	6,3	5199	1	5199	109	3,5	381,5	19	6,5	123,5	5710,3
25.09.03/15:00-16:00	48	0,15	7,2	5762	1	5762	162	3,5	567	15	6,5	97,5	6453,7
25.09.03/16:00-17:00	41	0,15	6,15	6336	1	6336	165	3,5	577,5	30	6,5	195	7114,7
25.09.03/17:00-18:00	57	0,15	8,55	6949	1	6949	431	3,5	1508,5	29	6,5	188,5	8654,6
25.09.03/18:00-19:00	54	0,15	8,1	6084	1	6084	562	3,5	1967	25	6,5	162,5	8221,6
25.09.03/19:00-20:00	56	0,15	8,4	6767	1	6767	208	3,5	728	32	6,5	208	7711,4



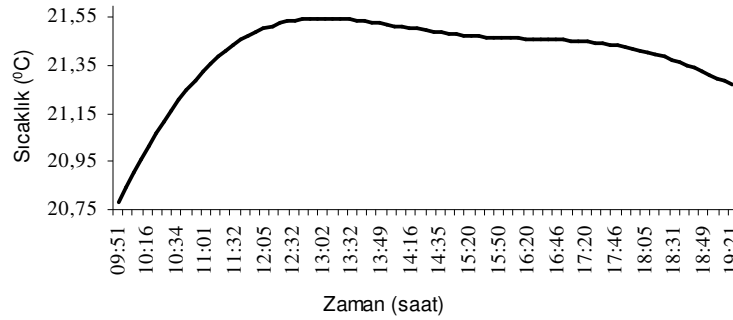
Şekil 5.8 Boğaziçi Köprüsü trafik yükü

2. Sıcaklık değişimi:

Boğaziçi Köprüsü'ne etkiyen çevresel sıcaklık değişimleri Şekil (5.9)'da görülmektedir. Sıcaklık değişimleri de her 2 saatte bir ölçüldüğünden, (3.19) eşitliğinden yararlanılarak regresyon analizi ile köprü için her 10 dakika da olması gereken sıcaklık değerleri,

$$y = 20,86 + 0,0063.t - 0,00002.t^2$$

fonksiyonu ile hesaplanmıştır ve belirlenen sıcaklık değişimleri yapının her bölgesinde eşit olarak kabul edilmiştir.

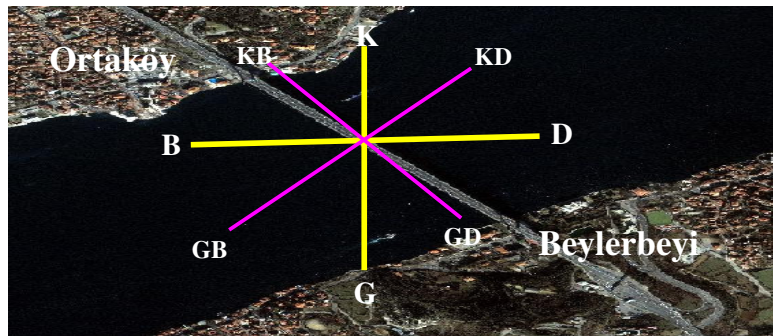


Şekil 5.9 Çevre sıcaklığı değişimleri

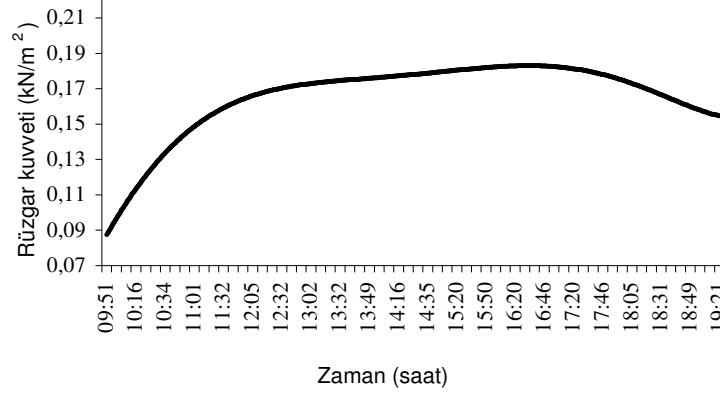
3. Rüzgar kuvveti:

Boğaziçi Köprüsü'nde m^2 'ye etkiyen rüzgar kuvveti (2.3) eşitliği ve Çizelge (2.3) değerlerine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, Şekil (5.10) ile köprüyü etkileyen rüzgar yönleri açıklanmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda her iki kuleye etkiyen rüzgar büyüklükleri aynı kabul edilmiş olup, 2 saatte bir ölçülen rüzgar hızları, trafik yükü ve sıcaklık değişimlerine benzer şekilde regresyon analizi ile (2.19) eşitliğinden yararlanılarak her 10 dakika için hesaplanmıştır.

$$y = 0,0789 + 0,0102.t - 0,0004.t^2 + 0,000008.t^3$$



Şekil 5.10 Boğaziçi Köprüsü'nde etkili olan rüzgar kuvvetinin yönleri



Şekil 5.11 Boğaziçi Köprüsü kulelerine etkiyen rüzgar kuvveti

Gerek kule yüzeylerine gerekse tabliyeye etki eden rüzgar yükü birim alana etkiyen yük olarak hesaplanmıştır. Şekil (5.11) Boğaziçi Köprüsü kulelerinde birim alana etkiyen rüzgar yükünü göstermektedir. Birim alana etkiyen rüzgar yükü kule ve tabliye bölümlerinde aynıdır. Sadece toplam alana etkiyen yük farklılık göstermektedir. Bunun sebebi de alanların farklılığından kaynaklanmaktadır. Toplam alana etkiyen yükün belirlenmesi için, rüzgarın obje noktalarının ölçümü sırasındaki esme yönü dikkate alınmıştır. Çizelge 5.4’de de görüldüğü gibi ölçme süresince köprünün kuleleri ve tabliye bölümü rüzgar hızı ve yönlerine göre kuzey-kuzeydoğu yönden esen rüzgardan etkilenmektedir. Kulelerin kuzey ve güney dış yüzey alanları ile iç yüzey alanları birbirine eşittir ($\approx 1155 \text{ m}^2$). Ana açıklık ve yan açıklık yönündeki yüzeylerinde alanları da birbirine eşittir ($\approx 676,5 \text{ m}^2$).

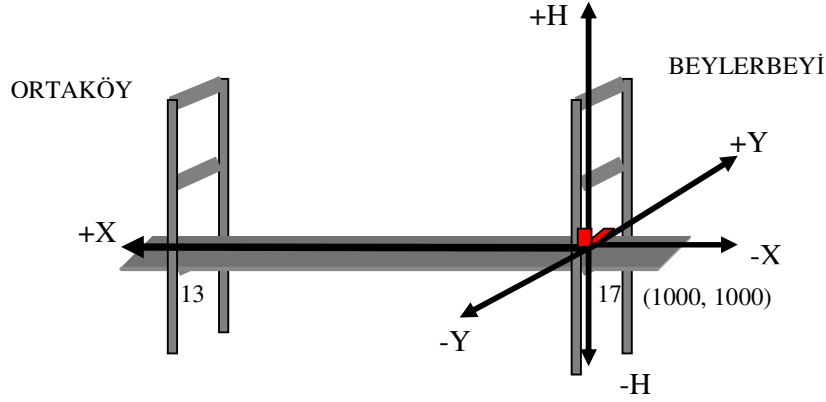
5.4 Referans ve Obje Noktaları Koordinatlarının Belirlenmesi

5.4.1 Koordinat Sisteminin Seçimi

Boğaziçi Köprüsü’nün, referans ve obje noktalarının değerlendirme ve yapının davranışının belirlenmesi işlemleri için orijini Anadolu yakası (Beylerbeyi) ayağındaki orta kirişin orta noktası (17 numaralı obje noktası) olan lokal bir koordinat sistemi seçilmiştir. Şekil (5.12)’de yapı için öngörülen koordinat sistemi görülmektedir.

Bu koordinat sisteminde; X eksen, köprünün boyuna (açıklık) doğrultusu (17-13 nolu noktaların yönünde), Y eksen köprünün yanal doğrultusu ve boyuna doğrultusuna dik, H’ de düşey doğrultudur. Yükseklik başlangıcı olarak da Ortaköy’deki 1 numaralı referans noktası esas alınmıştır. Bu noktanın deniz seviyesinden olan yüksekliğini belirleyebilmek için eski Şifa Yurdu’nun karşısındaki 12 no’lu RS noktasından çıkış alınarak geometrik nivelman ile bu noktanın ortometrik yüksekliği belirlenmiştir (1,967m). Böylece referans ve obje

noktalarının üç boyutlu koordinatlarını belirlemek için yapının gerekli üç boyutlu lokal koordinat sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 5.12 Koordinat sistemi

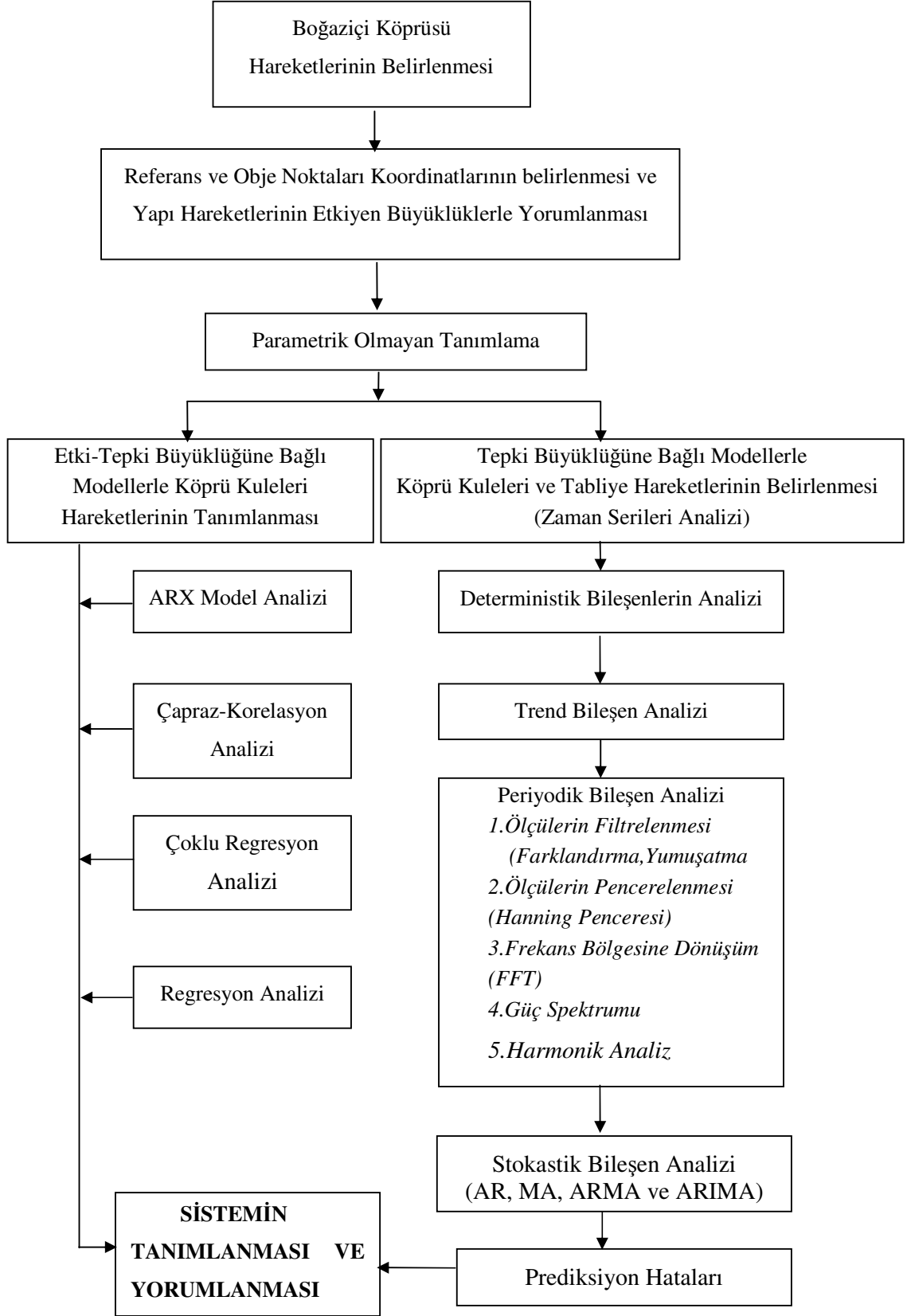
Bu şekilde seçilen koordinat sistemi, yapının hareket yönleri ile ilişkili olduğundan yapılan ölçümlerin değerlendirilmesine, yapı davranışlarının açıklanmasına ve analiz sonuçlarının daha iyi yorumlanmasına büyük yarar sağlayacağı düşünülmüştür. Boğaziçi Köprüsü'nün davranışlarının belirlenmesi genel akış şeması Şekil (5.13)'de gösterilmiştir.

5.4.2 Referans ve Obje Noktaları Koordinatlarının Hesabı

Referans noktalarının hem yersel hem de GPS ölçüleri Hannover Üniversitesi tarafından yazılmış "Hanna" programında birlikte dengelenmiştir. Ancak, GPS ölçüleri ilk olarak kendi içinde WGS-84'de dengelenmektedir. Daha sonra da dönüşüm parametreleri yardımıyla köprünün koordinat sistemine dönüştürülmüş dengeli ölçüleri ve bunların kovaryans matrisi dikkate alınarak yersel ölçülerle birlikte dengelenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir (Strauss ve Water, 1995). Diğer yandan, ölçülerin dengelenmesi yatay ve düşey konumlar için ayrı ayrı yapılmıştır. Pope yöntemine göre yapılan uyşumsuz ölçü testinde, uyşumsuz ölçü çıkmamıştır.

Yersel yöntemlerle yapılan ölçmelerde, referans noktaları arasında ölçülen optik yol uzunluğuna ait düzeltmeler (meteorolojik düzeltmeler; 1. hız ve 2. hız) ve indirgemeler (geometrik indirgemeler; ışın yolu eğriliği, eğim ve yükseklik, yeryüzü eğriliği) Hanna programı içinde hesaplanmaktadır. Ek 1'de referans noktaları dengeleme sonuçları verilmiştir.

Dengelenmiş referans noktaları koordinatlarından yararlanılarak, obje noktalarından 22 ve 24 numaralı noktanın koordinatları 4, 21 numaralı noktanın koordinatları 1, 14 ve 18 numaralı noktalarının koordinatları da 6 numaralı referans noktası koordinatlarından hesaplanmıştır.



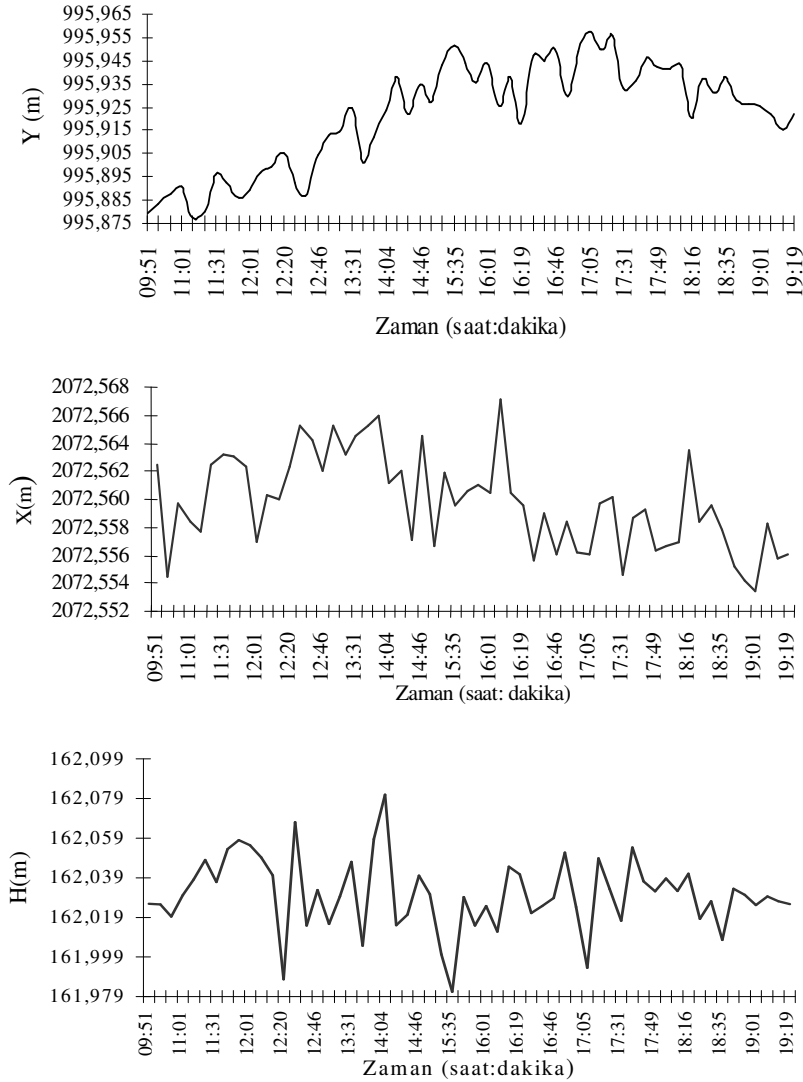
Şekil 5.13 Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin belirlenmesi genel akış şeması

Referans–obje noktaları arasında ölçülen optik yol uzunluğu için de düzeltme ve indirgemeler yapılarak, obje noktalarının Y ve X koordinatları kutupsal yöntemle, H yükseklik değerleri de trigonometrik yöntemle hesaplanmıştır.

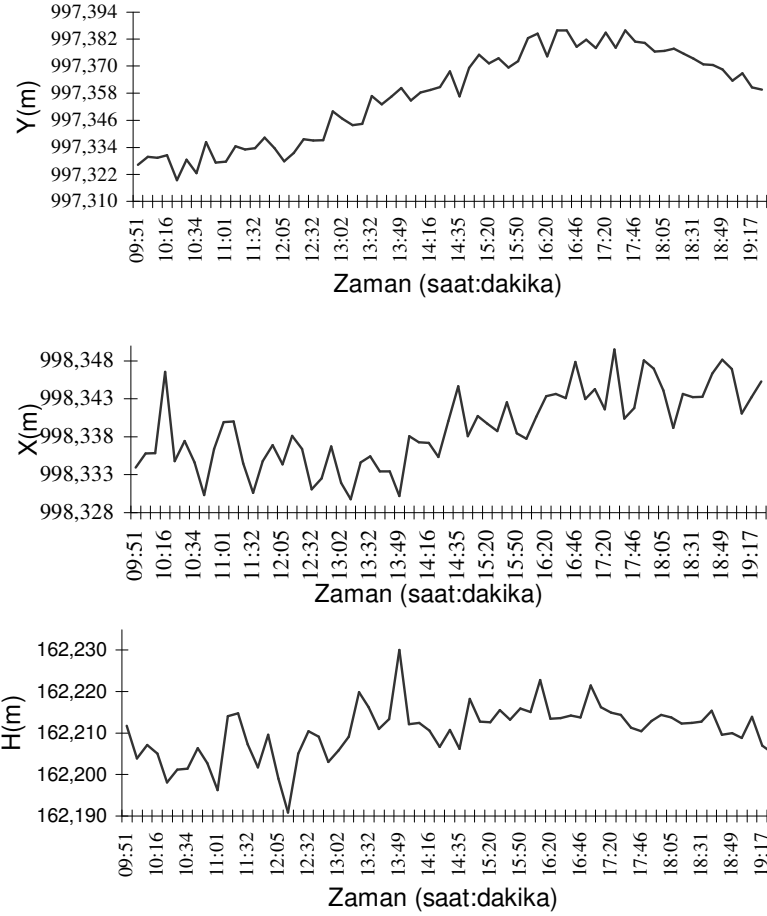
5.4.3 Obje Noktaları Koordinatları Değişimleri (Yapı Hareketleri) İle Etki Büyüklüklerinin Yorumlanması

- Kulelerin hareketi

Boğaziçi Köprüsü'nün Avrupa tarafındaki kulesi (14 numaralı obje noktası) ile Anadolu tarafındaki kulesi (18 numaralı obje noktası) yaklaşık aynı zaman aralığı içinde gözlemlendiğinden, bu kulelerin davranışlarının birbirleri ile karşılaştırılması mümkün olmaktadır.



Şekil 5.14 14 Numaralı noktanın Y, X ve H yönündeki hareketleri



Şekil 5.15 18 Numaralı noktanın Y, X ve H yönündeki hareketleri

Avrupa tarafındaki kulenin yanal hareketi (Y yönü) ölçüm başlangıcından itibaren 17:30'a kadar bir artış göstermekte ve daha sonra ise bu harekette bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 5.14). Koordinat eksenlerine göre ise, ilk olarak (+) yönde daha sonra ise (-) yönde bir hareket gözlenmektedir. Köprünün Anadolu tarafındaki kulesi yanal hareketleri de yaklaşık aynı zamanlarda aynı hareketi göstermektedir (Şekil 5.15). Ancak hareketin artışı 12:00'da daha belirgin olarak kendini göstermekte ve 17:30'dan sonra ise bir düşüş gözlenmektedir. Buna göre her iki kulede de yanal hareketin yönünün aynı olduğu ifade edilebilir.

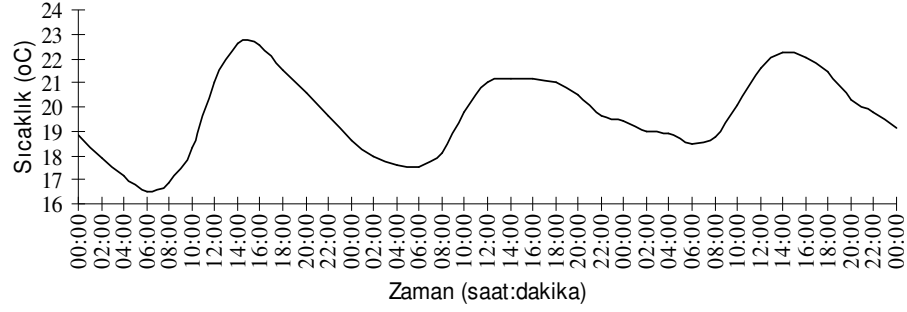
Avrupa tarafındaki kulenin boylamasına hareketi (X yönü) ölçü başlangıcından 15:30'a kadar hemen hemen azalma (-) yönünde olup, daha sonra ise (+) yönünde artmaktadır. Buna karşılık, Anadolu tarafındaki kulenin yanal hareketinin ise tam ters yönde olduğu gözlenmektedir (Şekil 5.14–Şekil 5.15). Böylece her iki kulenin birbirlerine göre boylamasına hareketinin ters yönde olduğu söylenebilir. Yani; her iki kulede de boylamasına hareket; ölçme süresi içerisinde, ilk olarak açıklık yönünde, daha sonrada açıklığın ters yönünde gözlenmiştir.

Kulelerin hareketleri ile ilgili bazı bilgiler Çizelge (5.6)'da verilmiş ve açıklık yönündeki (X) maksimum değişimin Y ve H maksimum değişimlerinden küçük olduğu görülmüştür.

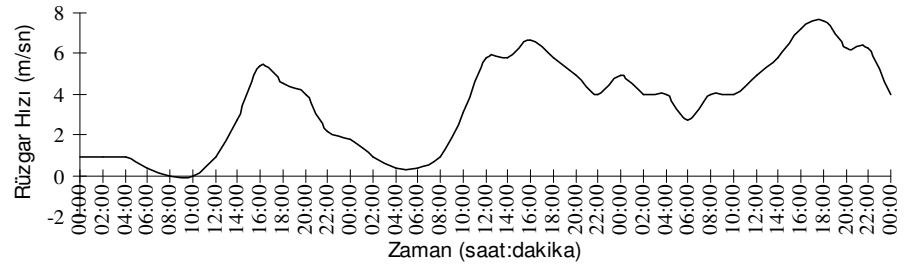
Çizelge 5.6 Kulelerdeki obje noktaları hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler

Nokta No		Mak. (m)	Min. (m)	Fark(mm)	Standt Sapma (mm)
14	Y	995,957	995,877	80	23
	X	2072,567	2072,554	13	3
	H	162,081	161,982	99	18
18	Y	997,386	997,327	59	18
	X	998,350	998,330	20	5
	H	162,230	162,191	39	6

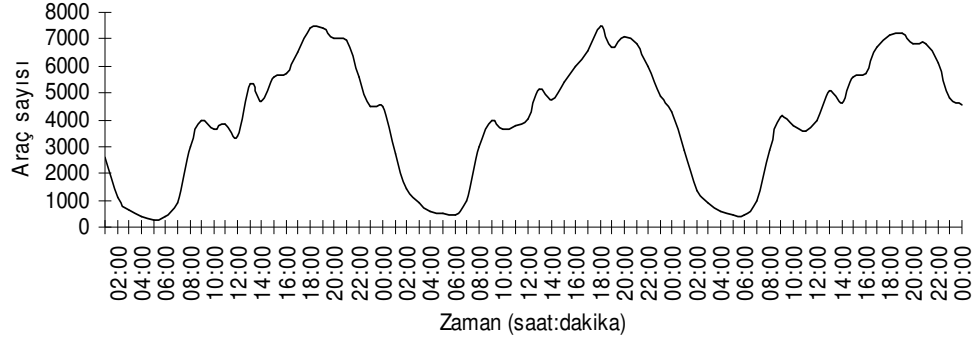
Gözlem süresi içerisinde köprü de etkili olan sıcaklık, rüzgar ve araç yükü büyüklüklerindeki değişimlerin grafikleri Şekil (5.16), Şekil (5.17) ve Şekil (5.18)'de verilmiştir



Şekil 5.16 72 saatlik sıcaklık değişimleri (24–25–26.09.2003)



Şekil 5.17 72 saatlik rüzgar hızı değişimleri (24–25–26.09.2003)



Şekil 5.18 72 Saatlik trafik akışı değişim (24–25–26.09.2003)

Kulelerde yapılan ölçüm süresi içinde; sıcaklık, ölçme başlangıcından 12:00’a kadar değişim göstermekte, 17:30’kadar değişmemekte ve daha sonra da düşüş göstermektedir (Şekil 5.16). Böylece kulelerin yanal hareketinde sıcaklığın etkisi olabileceği ifade edilebilir. Diğer yandan rüzgarın hızı ve araç sayısı da ölçüm başlangıcından 17:30’a kadar belirgin bir şekilde artış, daha sonra ise bir azalma göstermektedir (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18). Araç sayısı ve rüzgarın kulelerde yanal hareketin oluşumunda etkisi olabileceği ifade edilebilir. Rüzgarın yönü ise çalışma süresince Kuzey ve Doğu yönleri arasındadır (360^0-90^0).

Ölçü süresi içerisinde, sıcaklığın artış gösterdiği zaman aralığında (ölçü başlangıcından 16:30’a kadar) kulelerde boylamasına yönde bir genleşme (açıklığın tersi yönünde), daha sonrada (16:30’dan sonraki) sıcaklığın azalması ile de büzülme (açıklık yönünde) hareketinin olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, yapılan teorik çalışmalarla da desteklenmektedir. Çünkü sıcaklık değişimleri köprü ayaklarının tepesini açıklık doğrultusunda hareket etmeye zorlamakta ve ayakların bir konsol gibi eğilmesine neden olmaktadır.

Trafik sayısındaki değişimin zaman aralıkları da yaklaşık olarak kulelerin hareket yönlerini değiştirdiği zaman aralıkları ile uyushmaktadır.

Kulelerin yükseklik (H) değerlerinde uzun zamanlı çok belirgin bir değişim görülmemektedir. Değişimlerin daha çok lokal olduğu görülmektedir. Hareket yönleri de hemen hemen aynı olup, sıcaklık, rüzgar ve araç sayısı ile herhangi ilişki kurulamamıştır.

Ayrıca, dinamik sistemler, sistem teorisine göre enerji depolayan ve zamanla depoladığı enerjiyi veren sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, değerlendirme sırasında geçmişteki belirli bir zaman noktasındaki etkiyen büyüklükler de olaya açıklık getirmesi

açısından dikkate alınması gerekmektedir (grafiklerin yorumlanmasında). Bu amaçla köprüde etkili olan büyüklüklerin grafik değerleri jeodezik ölçümlerin yapıldığı zaman noktasından daha önceki değerleri de verilmiştir. Örneğin; 12:00’a kadar ki sıcaklık artışı, kulelerdeki yanal hareketin 12:00’dan sonraki belirgin artışına neden olmuş olabilir. Diğer yandan sıcaklığın azalması ve yanal hareketin yön değiştirmesi yaklaşık olarak aynı zaman aralıkları içerisinde gerçekleştiği görülmektedir.

- **Tabliyenin hareketi**

21 numaralı obje noktasının bulunduğu ¼’lik tabliye kesiminin, hem zaman aralıkları içerisindeki hem de bütün bir ölçme zaman içerisindeki hareketleri incelenmiştir. Tabliyenin bu bölümü ile ilgili bazı bilgiler Çizelge (5.7)’de verilmiştir.

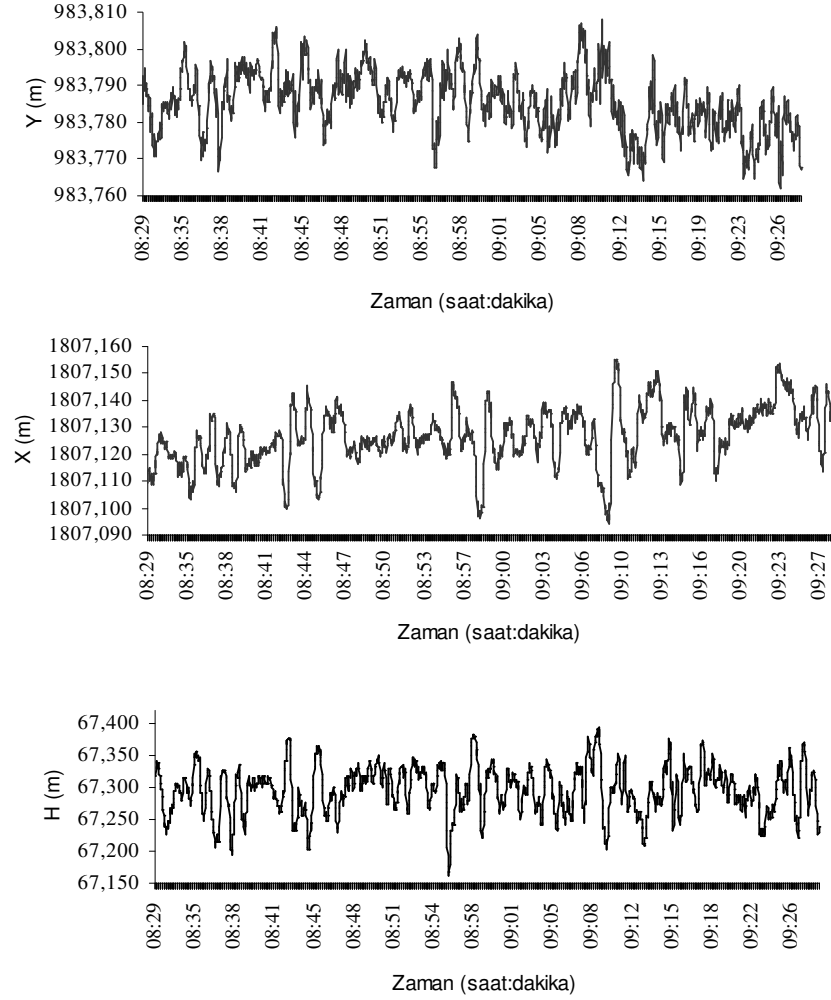
Çizelge 5.7 21 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler

Nokta No		Mak. (m)	Min. (m)	Fark (mm)	Standt Sapma (mm)
21	Y	983,808	983,762	46	8
	X	1807,155	1807,094	61	11
	H	67,392	67,163	230	37

Şekil (5.19)’da 21 numaralı noktanın Y yanal ve H düşey yönündeki hareketleri hemen hemen aynı zaman aralıklarında, aynı yönde gerçekleşmektedir. Çünkü tabliye kirişinin, yanal rüzgar kuvvetlerine karşı çok esnek olduğu, bunun özellikle de açıklık ortasındaki yanal deplasmanı, üstte genişmez kablolardan dolayı, tabliyenin ortasında bir yükselme ortaya çıkaracak kadar büyük olacağı yapılan teorik çalışmalarla tespit edilmiştir (Dumanoglu ve Adanur, 1998). Çizelge (5.7)’de görüldüğü gibi tabliyenin ¼’lük kesimi maksimum değişimi yükseklikte ortaya çıkmıştır

X boylamasına hareket yanal ve düşey hareketlerin tersi yönde gerçekleşmektedir. Yani; aynı zaman aralıklarında yanal ve düşey hareket aynı yönde, boylamasına hareket de tam ters yönde meydana gelmektedir.

21 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesiminde ölçme zamanı içerisinde sıcaklık artış gösterirken, rüzgar ve araç sayısında düşüş gözlenmektedir. Rüzgar hızı ölçüm süresince NE (45°) yönündedir. Sıcaklık, rüzgar ve araç sayısı ile ilgili bazı bilgiler Çizelge (5.4)’de, grafikleri de Şekil (5.16), Şekil (5.17) ve Şekil (5.18)’de verilmektedir

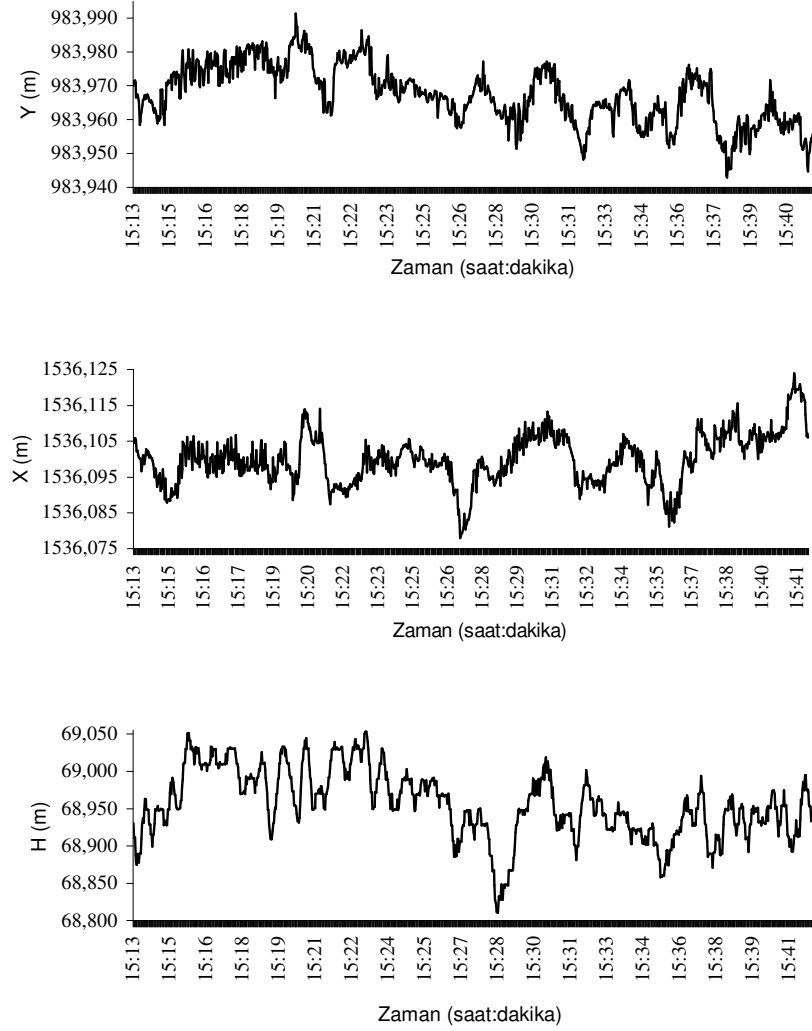


Şekil 5.19 Tabliyenin ¼'lük kesimi (21 numaralı nokta) Y, X ve H yönündeki hareketleri

22 numaralı obje noktası tabliyenin orta noktası olup, özellikle H yönünde belirgin değişimlerin beklendiği hatta bu değişimlerin gözlemlendiği noktadır. Çizelge (5.8)'de bu noktanın Y, X ve H yönündeki hareketleri ile ilgili bazı bilgiler verilmiş ve maksimum değişimin yükseklikte ortaya çıktığı görülmüştür (24,3cm). X ve Y yönündeki maksimum koordinat değişimlerinin ise hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.8 22 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler

Nokta No		Mak.(m)	Min. (m)	Fark (mm)	Standt Sapm(mm)
22	Y	983,991	983,943	48	9
	X	1536,124	1536,078	46	7
	H	69,053	68,810	243	46



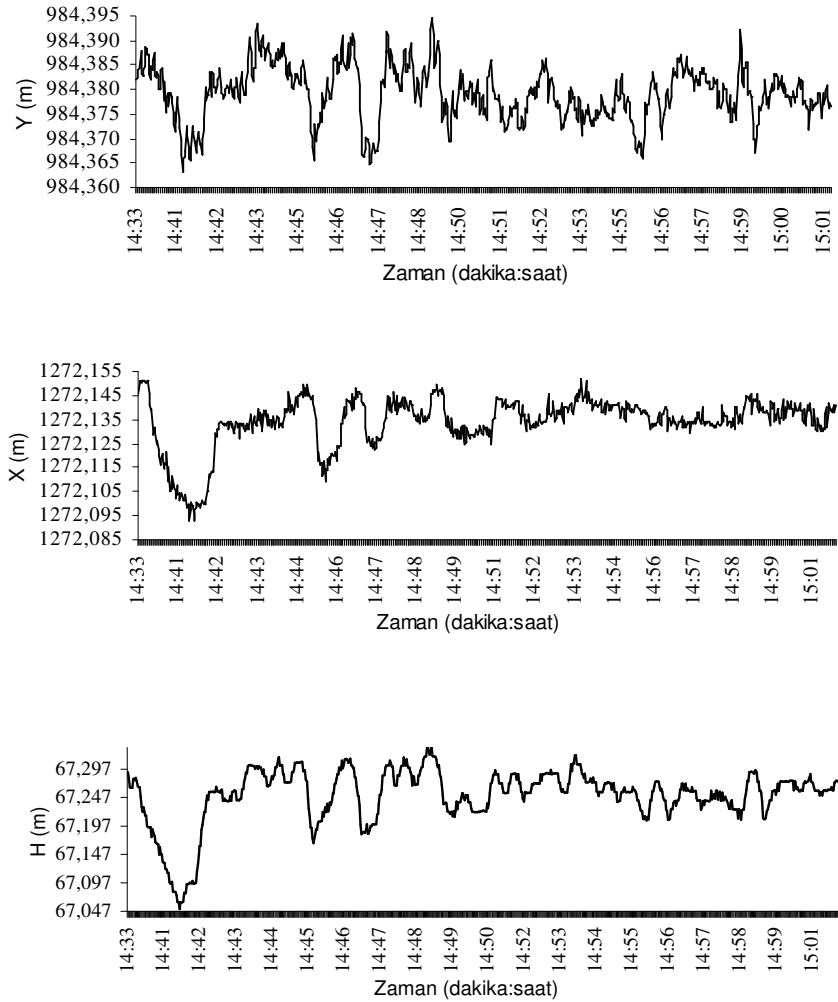
Şekil 5.20 Tabliye orta noktasının (22 numaralı nokta) Y, X ve H yönlerindeki hareketleri

Şekil (5.20) incelendiğinde, tabliye orta noktasının yanal (Y) ve düşey (H) yönlerdeki hareketlerinin benzer olduğu, yanal hareket (+) yönde iken, düşey hareketinde (+) yönde değişim gösterdiği görülmektedir. Ya da bunun tersi olmaktadır. Boylamasına (X) harekette, yanal ve düşey yöndeki hareketlere az da olsa benzemektedir. Ancak düşey yöndeki hareketlerin yanal ve boylamasına yönlerdeki hareketlere göre daha fazla ve ani yön değişimlerine sahip olduğu da görülmektedir. Yanal ve boylamasına yönlerdeki hareketlerde, bazı zaman aralıklarında durağanlık görülmektedir.

Tabliye orta noktasının ölçme zamanı içerisindeki yapıyı etkileyen büyüklüklerin grafikleri incelendiğinde; 06:00-14:00 arasında bir sıcaklık artışı olup, değişim 4.75°C 'dir. Daha sonra ise bir düşüş görülmektedir. Rüzgar hızı ise ölçüm süresinde bir değişim göstermemiştir. Rüzgar yönü NNE (12.5°) olup, hızı da çok düşüktür. Araç sayısı da ölçüm süresince artış

göstermiştir. Bu etkilerin artışı ile tabliyenin orta noktasında düşey, yanal ve boylamasına hareketlerin meydana geldiği söylenebilir. Ancak, ölçüm süresi içerisinde etkiyen büyüklüklerden rüzgar aynı hızda ve düşük, sıcaklıkta ise bir azalma görülmektedir. Sadece araç sayısında bir artış gözlenmektedir. Bu nedenlerden dolayı, grafikler de incelendiğinde, yanal ve boylamasına yönlerdeki değişimlerin daha küçük olduğu, düşey yönde ise trafik yükünden dolayı maksimum bir hareket meydana geldiği söylenebilir.

Şekil 5.21’de tabliyenin ¼’lük kesiminde yer alan 24 numaralı noktanın Y, X ve H yönlerindeki hareketlerinin büyük bir benzerlik gösterdiği görülmektedir. Hareket yönleri de aynı olup, değişim 14:50’den sonra boylamasına ve düşey yönlerde azalma göstermektedir. Yanal yönde ise değişim biraz daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Grafikler, ölçüm süresi içinde bir bütün olarak incelenirse, boylamasına ve düşey yönlerdeki değişimlerin büyük bir benzerlik gösterdiği ifade edilebilir



Şekil 5.21 Tabliye ¼’lük kesimi (24 numaralı nokta) Y, X ve H yönlerindeki hareketleri

Çizelge (5.9)'da 24 numaralı noktanın Y, X ve H hareketleri ile ilgili bazı bilgiler verilmiş ve maksimum değişim yükseklikte ortaya çıkmıştır (28,5cm). Ayrıca, Y ve X yönündeki maksimum değişimleri de 21 numaralı obje noktası değişimleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.9 24 numaralı obje noktası hareketleri ile ilgili istatistik bilgiler

Nokta No		Mak. (m)	Min. (m)	Fark (mm)	Standt Sapm (mm)
24	Y	984,394	984,363	32	6
	X	1272,152	1272,092	59	11
	H	67,335	67,050	285	49

Tabliyede etkili olan büyüklükler Şekil (5.16), Şekil (5.17) ve Şekil (5.18)'de gösterilmiştir. Ölçüm süresi içerisinde sıcaklık maksimum seviyede iken, rüzgar hızında hiç bir değişim gözlenmemektedir. Trafik akışı da yavaşlamaktadır. Bu durumda, sıcaklık değişimleri ve trafik yükünün tabliye hareketlerinde etkili olduğu ifade edilebilir. Ancak, rüzgar hızının düşük ve ölçüm süresince aynı olması nedeniyle, köprüye etkisini grafiksel olarak açıklamak mümkün olmamıştır. Gerçekte ise rüzgar hızı tabliyeyi en çok etkileyen büyüklüktür.

5.5 Köprü Hareketlerinin Etki-Tepki Büyüklükleri İle Modellenmesi

Bu bölümde, kule hareketlerinin tabliyeye göre daha uzun zamanlı izlenmesi sonucu yapıya etkileyen büyüklüklerde belirgin değişimler gözlemlendiğinden, köprünün sadece kulelerinin etki-tepki büyüklüklerine bağlı analizleri yapılmıştır. Oysa tabliye hareketlerinin daha az zaman süresi içerisinde izlenmesi yüzünden yapıya etkileyen büyüklüklerde belirgin değişimler tespit edilemediğinden köprü tabliyesi için etki-tepki analizleri yapılmamıştır.

5.5.1 ARX Model ve Çapraz-Korelasyon Analizi

Bölüm 5.3'de belirlenen sıcaklık değişimleri, trafik yükü ve rüzgar kuvveti büyüklükleri, sistem tanımlamasında, parametrik olmayan tanımlamaya göre transfer fonksiyonunun oluşturulmasında giriş büyüklüğü, yapının tepkisi (yapının tepkisi; ölçülen doğrultu, mesafe vs. büyüklüklerden hesaplanan koordinatlar) de çıkış büyüklüğü olarak kullanılmıştır. Her bir etki büyüklüğü ile her bir tepki büyüklüğü arasında oluşturulan fonksiyonlarla sistemi tanımlayan matematiksel modeller elde edilmiştir. Yani sistem “SISO” olarak düşünülmüştür.

Matematiksel modelin elde edilmesi için, (3.7) ve (3.8) eşitliklerinden yararlanılarak çok sayıda farklı derecelerde ARX model seçimi yapılmış ve modelin katsayıları En Küçük

Kareler Yöntemi'ne göre (3.11) eşitliği ile hesaplanmıştır. Farklı derecelerde seçilen modeller içerisinde, (3.15) eşitliğine göre AIC değeri ve (3.13) eşitliği ile de kayıp fonksiyon (J_N) değeri en küçük olan model, en uygun model olarak seçilmiş ve bu modele ait katsayılar ($A(q)$ ve $B(q)$ polinomları) Çizelge (5.11-a) ve Çizelge (5.11-b)'de verilmiştir. Ayrıca, seçilen modelden hesaplanan tepkilerle yapının ölçülen tepkisi arasındaki farkın (prediksiyon hataları) otokorelasyon katsayıları, $k=0,1,2,\dots,20$ gecikme değerleri için (3.16) eşitliği ile hesaplanmış ve bu katsayıların (3.18) eşitliği ile %95 güven düzeyinde $\pm u_{1-\alpha/2} S_{rk}$ sınır değerleri içerisinde kalıp kalmadığı test edilmiştir. Seçilen modellerin prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayılarının Ek-2'de verilen grafiklerde de görüldüğü gibi Çizelge (5.10)'da verilen sınır değerleri içerisinde kaldığı ve seçilen modellerin uygun olduğu görülmüştür.

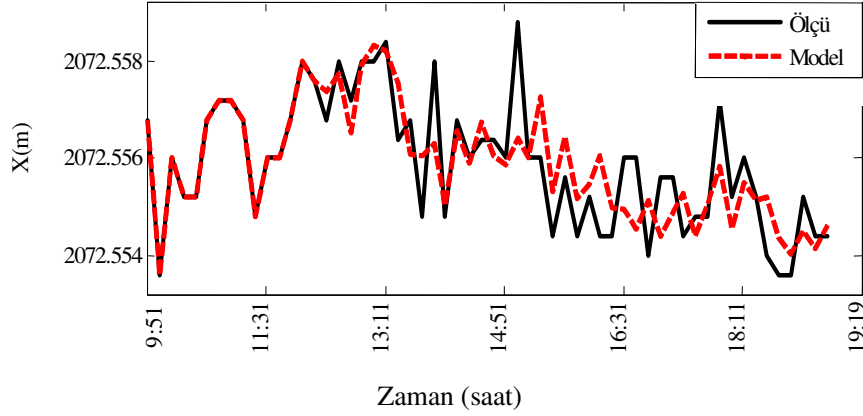
ARX model için belirlenen gecikme zamanının (yapının modelden hesaplanan tepki ile ölçülen tepkisi arasındaki değişimin ortaya çıktığı zaman noktası) çapraz-korelasyon fonksiyonu ile hesaplanan gecikme zamanı ile uyumlu olup olmadığını göstermek açısından çapraz-korelasyon katsayıları ve grafikleri ARX model analizi içerisinde incelenmiştir. Bunun için etki ve tepki büyüklükleri arasında (3.25) eşitliği ile çapraz korelasyon katsayıları hesaplanarak, sistemin etkiye karşılık tepkisinin gecikip gecikmediği belirlenmeye çalışılmış ve çapraz-korelasyon katsayılarının sınır değerleri de (3.18) eşitliğine benzer şekilde hesaplanmıştır. Çapraz-korelasyon katsayıları ve sınır değerleri grafikleri de Ek-2'de verilmiş ve bu katsayıların çok küçük olduğu, maksimum 0,2 sınır değerleri içerisinde kaldığı görülmüştür.

Farklı derecelerde çok sayıda model, aynı işlem süreci ile gerçekleştirildiğinden benzer açıklamalardan kaçınmak için burada konuya açıklık getirmesi için 14 numaralı noktanın X yönündeki değişimleri ile sıcaklık değişimleri arasında belirlenen en uygun ARX(7,9) modeli hakkında açıklamalar yapılmıştır. Bu noktanın X yönündeki değişimleri ile sıcaklık değişimleri arasında gerçekleştirilen ARX(7,9) modeli, $A(q)$ ve $B(q)$ polinomlarının (3.8) eşitliğinde $(A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t))$ yerine konulması ile

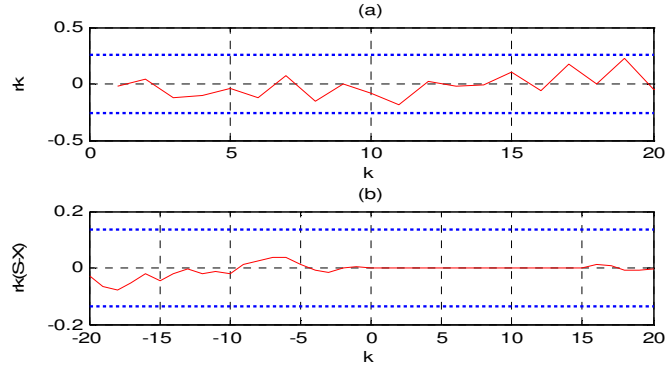
$$(1-0,2358.q^{-1}-0,3423q^{-2}+0,1229q^{-3}-0,2685q^{-4}-0,04129q^{-5}+0,0915q^{-6}-0,3264.q^{-7}).y(t)= \\ (0,1370q^{-1}-0,0547q^{-2}-0,0339q^{-3}-0,0219q^{-4}-0,0238q^{-5}-0,00002q^{-6}-0,04217q^{-7}+0,0049q^{-8} \\ +0,0496q^{-9}).u(t)+e(t)$$

fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Burada, $A(q)$ derecesi 7 olan tepki büyüklüğü değerleri, $B(q)$ de derecesi 9 olan etki büyüklüğü değerleri ile ifade edilen polinom şeklindeki fonksiyonlardır.

Şekil (5.23-a)'da prediksyon hatalarının otokorelasyon katsayılarının %95 güven düzeyinde (3.18) eşitliği ile hesaplanan sınır değerleri içerisinde kalması, (3.13) eşitliği ile belirlenen kayıp fonksiyonun $J_N=0,003569$ mm ve $AIC=0,00000063$ gibi seçilen modeller içerisinde en küçük değerler olması seçilen ARX modelin sıcaklık değişimleri ile X yönündeki değişimleri arasındaki ilişkiyi tanımlamada yeterli olduğunu göstermektedir. Şekil (5.22)'de ARX(7,9) modelden hesaplanan ve ölçülen tepki büyüklükleri gösterilerek, ölçülen ve hesaplanan tepkilerin uyumlu oldukları, aralarındaki değişimin (k=gecikme zamanı) yaklaşık 150 dakika sonra ortaya çıktığı hem grafiklerden hem de ölçülen ve hesaplanan tepki büyüklüklerinin farklarından tespit edilmiştir. Başka bir ifade ile yapının sıcaklık değişimine 150 dakika sonra tepki gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.22 14 numaralı noktanın ölçülen ve ARX(7,9) modelden hesaplanan X yönü tepkileri



Şekil 5.23 Prediksyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

Şekil (5.23-b)'de de çapraz-korelasyon katsayılarının sınır değerleri içerisinde çok küçük değerler almasına rağmen değişim gösterdiği zaman noktasının k'nın (+) değerleri için yaklaşık 15 birim olduğu görülmüştür. Kulelerde ölçülerin örnekleme aralığı 10 dakika olduğundan k gecikme zamanı $15 \times 10 = 150$ dakika olarak belirlenmiştir. Çapraz korelasyon

analizinde hesaplanan katsayıların öngörülen sınır değerlerinden büyük çıkması ya da maksimum bir değer alması, sistemin anlamlı katsayıya ait k 'değerinde etkiye olan tepkisinin geciktiğini gösterir. Ancak, $k=0$ değerinde çapraz korelasyon katsayısı maksimum çıkarsa, sistemin etkiye karşılık tepkimesinde gecikme söz konusu değildir.

Çizelge (5.10)'da kuleler için belirlenen ARX modellere ait etki-tepki büyüklükleri, en küçük AIC kriterleri ve kayıp fonksiyon (J_N) değeri, en uygun model dereceleri (n_a ve n_b), prediksyon hatalarının otokorelasyon katsayılarının sınır değerleri ve gecikme zamanları verilmiştir. (Ek-2'de verilen grafiklerde yapının ARX modellerden hesaplanan tepkileri ile ölçülen tepkileri arasındaki ilişki ve gecikme zamanları görülmektedir).

Çizelge 5.10 Etki-tepki büyüklüklerine bağlı ARX modele ait analiz sonuçları

N. No	Etki Büyüklüğü	Tepki Büyüklüğü	AIC	J_N (mm)	Model ve Derecesi	$\pm u_{1-\alpha/2} S_{rk}$ ($\pm 1,96 / \sqrt{N}$)	k (dk)
14	TRAFİK YÜKÜ	Y	0,0000850	0,06030	ARX(7,3)	0,2574	60
		X	0,0000068	0,00504	ARX(7,2)	0,2574	80
		H	0,0003902	0,25640	ARX(8,4)	0,2574	80
	SICAKLIK DEĞİŞİMİ	Y	0,0000976	0,04945	ARX(9,10)	0,2574	150
		X	0,0000063	0,00356	ARX(7,9)	0,2574	140
		H	0,0001889	0,10332	ARX(9,8)	0,2574	170
	RÜZGAR KUVVETİ	Y	0,0001044	0,07373	ARX(8,2)	0,2574	70
		X	0,0000067	0,00454	ARX(7,4)	0,2574	60
		H	0,0001493	0,07858	ARX(9,9)	0,2574	200
18	TRAFİK YÜKÜ	Y	0,0000202	0,01427	ARX(5,6)	0,2431	75
		X	0,0000092	0,00630	ARX(7,5)	0,2431	120
		H	0,0000281	0,02116	ARX(5,4)	0,2431	120
	SICAKLIK DEĞİŞİMİ	Y	0,0000217	0,01485	ARX(4,8)	0,2431	100
		X	0,0000085	0,00578	ARX(7,5)	0,2431	110
		H	0,0000325	0,02698	ARX(4,2)	0,2431	50
	RÜZGAR KUVVETİ	Y	0,0002107	0,01587	ARX(3,6)	0,2431	80
		X	0,0000082	0,00492	ARX(7,9)	0,2431	170
		H	0,0000160	0,02003	ARX(5,10)	0,2431	200

ARX modellere ait çizelgeler ve Ek-2’de verilen grafikler incelendiğinde, kulelerin Y ve H yönündeki değişimleri ile etkiyen büyüklükler arasındaki ilişkiyi belirleyen modellerin derecelerinin farklılık gösterdiği, ancak, her bir yük etkisi ile X yönündeki değişimlerin arasındaki ilişkiyi belirleyen modellerin derecelerinin yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.

Böylece, kulelerin daha önceki tepki büyüklükleri ile sıcaklık değişimleri, rüzgar kuvveti ve trafik yükü büyüklükleri arasındaki matematiksel ilişki her nokta için farklı derecelerde parametreler içeren ARX modeli ile belirlenmiştir.

Diğer yandan, çapraz korelasyon katsayılarının öngörülen sınır değerleri içerisinde kalması sistemin etkiye olan tepkisinin geciktiği anlamına gelmemelidir. Çünkü etkiyen büyüklükler sistemin tepkisine neden olmamış da olabilir. Ayrıca, çapraz korelasyon katsayıları değerleri çok küçük olup (maksimum ± 0.2 sınır değerleri içerisinde), sınır değerleri içerisinde belli zaman noktalarında değişimler göstermiş ve bu değişimin görüldüğü zaman noktası ile ARX modelin gecikme zamanı büyük oranda uyumlu çıkmıştır.

Çizelge 5.11-a ARX modeller için hesaplanan A(q) ve B(q) polinomları

14 Numaralı Obje Noktası:**ARX(7,3):Trafik yükü-Y yönünde hareket**

$$A(q) = 1 - 0.3431 q^{-1} - 0.2628 q^{-2} - 0.09393 q^{-3} - 0.1745 q^{-4} - 0.1739 q^{-5} - 0.3063 q^{-6} + 0.3545 q^{-7}$$

$$B(q) = 0.0008428 q^{-1} - 0.001683 q^{-2} + 0.0007909 q^{-3}$$

ARX(7,2): Trafik yükü-X yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.2515 q^{-1} - 0.3567 q^{-2} + 0.1480 q^{-3} - 0.1222 q^{-4} - 0.1008 q^{-5} - 0.01513 q^{-6} - 0.3016 q^{-7}$$

$$B(q) = 0.000212 q^{-1} - 0.0002224 q^{-2}$$

ARX(8,4): Trafik yükü-H yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.1031 q^{-1} - 0.2803 q^{-2} - 0.3382 q^{-3} - 0.2412 q^{-4} - 0.003984 q^{-5} + 0.3895 q^{-6} - 0.05502 q^{-7} - 0.3677 q^{-8}$$

$$B(q) = -0.001841 q^{-1} + 0.002287 q^{-2} + 0.001427 q^{-3} - 0.001904 q^{-4}$$

ARX(9,10):Sıcaklık değişimi-Y yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.2649 q^{-1} - 0.3711 q^{-2} + 0.1402 q^{-3} - 0.0759 q^{-4} - 0.3193 q^{-5} - 0.1780 q^{-6} + 0.2430 q^{-7} - 0.0816 q^{-8} - 0.0905 q^{-9}$$

$$B(q) = 0.1583 q^{-1} - 0.1699 q^{-2} + 0.2272 q^{-3} - 0.0875 q^{-4} + 0.1655 q^{-5} - 0.1494 q^{-6} - 0.2491 q^{-7} + 0.1487 q^{-8} + 0.1843 q^{-9} - 0.1360 q^{-10}$$

ARX(7,9): Sıcaklık değişimi-X yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.2358 q^{-1} - 0.3423 q^{-2} + 0.1229 q^{-3} - 0.2685 q^{-4} - 0.04129 q^{-5} + 0.0915 q^{-6} - 0.3264 q^{-7}$$

$$B(q) = 0.1370 q^{-1} - 0.0547 q^{-2} - 0.0339 q^{-3} - 0.0219 q^{-4} - 0.0238 q^{-5} - 0.00002 q^{-6} - 0.04217 q^{-7} + 0.0049 q^{-8} + 0.0496 q^{-9}$$

ARX(9,8): Sıcaklık değişimi-H yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.1125 q^{-1} - 0.0461 q^{-2} - 0.4215 q^{-3} - 0.0881 q^{-4} - 0.09439 q^{-5} + 0.4155 q^{-6} - 0.2453 q^{-7} - 0.1204 q^{-8} - 0.2805 q^{-9}$$

$$B(q) = -0.0485 q^{-1} + 0.3631 q^{-2} + 0.7944 q^{-3} - 0.5389 q^{-4} - 0.9305 q^{-5} - 0.0797 q^{-6} + 0.0181 q^{-7} + 0.4730 q^{-8}$$

ARX(8,2):Rüzgar kuvveti-Y yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.4187 q^{-1} - 0.3102 q^{-2} - 0.009201 q^{-3} - 0.2155 q^{-4} - 0.2241 q^{-5} - 0.1849 q^{-6} + 0.3474 q^{-7} + 0.01517 q^{-8}$$

$$B(q) = 0.00025 q^{-1} - 0.0003 q^{-2}$$

ARX(7,4): Rüzgarkuvveti-X yönünde hareket

$$A(q) = 1 - 0.2833 q^{-1} - 0.4098 q^{-2} + 0.2036 q^{-3} - 0.1581 q^{-4} - 0.0500 q^{-5} + 0.0026 q^{-6} - 0.3051 q^{-7}$$

$$B(q) = -0.0005 q^{-1} + 0.0010 q^{-2} + 0.00009 q^{-3} - 0.0006 q^{-4}$$

ARX(9,9): Rüzgar kuvveti-H yönünde hareket

$$A(q) = 1 + 0.0957 q^{-1} - 0.0123 q^{-2} - 0.3917 q^{-3} - 0.0936 q^{-4} - 0.1244 q^{-5} + 0.2252 q^{-6} - 0.2541 q^{-7} - 0.1964 q^{-8} - 0.2505 q^{-9}$$

$$B(q) = -0.0051 q^{-1} + 0.004 q^{-2} + 0.0086 q^{-3} - 0.0011 q^{-4} - 0.00963 q^{-5} - 0.0058 q^{-6} - 0.0017 q^{-7} + 0.0062 q^{-8} + 0.0023 q^{-9}$$

Çizelge 5.11-b ARX modeller için hesaplanan A(q) ve B(q) polinomları

18 Numaralı Obje Noktası:**ARX(5,6):Trafik yükü-Y yönündeki hareket**

$$A(q) = 1 - 0.4488q^{-1} - 0.1705q^{-2} - 0.3185q^{-3} + 0.1194q^{-4} - 0.1816q^{-5}$$

$$B(q) = -0.0003q^{-1} + 0.00089q^{-2} - 0.0007q^{-3} - 0.0004q^{-4} + 0.0009q^{-5} - 0.0004q^{-6}$$

ARX(7,5): Trafik yükü-X yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.3344q^{-1} + 0.0652q^{-2} - 0.2977q^{-3} - 0.1234q^{-4} - 0.2078q^{-5} + 0.1738q^{-6} - 0.2757q^{-7}$$

$$B(q) = 0.0002q^{-1} - 0.0003q^{-2} + 0.0002q^{-3} - 0.0004q^{-4} + 0.0003q^{-5}$$

ARX(5,4): Trafik yükü-H yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.4520q^{-1} - 0.0768q^{-2} - 0.2094q^{-3} - 0.2618q^{-4} - 0.000006q^{-5}$$

$$B(q) = -0.0003q^{-1} + 0.0004q^{-2} + 0.0002q^{-3} - 0.0003q^{-4}$$

ARX(4,8):Sıcaklık değişimi-Y yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.3386q^{-1} - 0.2561q^{-2} - 0.3060q^{-3} - 0.0985q^{-4}$$

$$B(q) = 0.1329q^{-1} - 0.0336q^{-2} - 0.1696q^{-3} - 0.0403q^{-4} + 0.1323q^{-5} + 0.1391q^{-6} - 0.0720q^{-7} - 0.0507q^{-8}$$

ARX(7,5): Sıcaklık değişimi-X yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.3047q^{-1} - 0.0186q^{-2} - 0.1002q^{-3} - 0.2841q^{-4} - 0.1391q^{-5} + 0.1381q^{-6} - 0.2913q^{-7}$$

$$B(q) = 0.0759q^{-1} - 0.0023q^{-2} - 0.1361q^{-3} - 0.0080q^{-4} + 0.0747q^{-5}$$

ARX(4,2): Sıcaklık değişimi-H yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.4561q^{-1} - 0.0368q^{-2} - 0.2249q^{-3} - 0.2820q^{-4}$$

$$B(q) = 0.0133q^{-1} - 0.0112q^{-2}$$

ARX(3,6):Rüzgar kuvveti-Y yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.4005q^{-1} - 0.1962q^{-2} - 0.4032q^{-3}$$

$$B(q) = 0.0018q^{-1} - 0.0013q^{-2} - 0.0012q^{-3} + 0.00006q^{-4} + 0.0009q^{-5} - 0.0003q^{-6}$$

ARX(7,9): Rüzgar kuvveti-X yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.3085q^{-1} - 0.0501q^{-2} - 0.1100q^{-3} - 0.3171q^{-4} - 0.0974q^{-5} + 0.2312q^{-6} - 0.3481q^{-7}$$

$$B(q) = -0.00008q^{-1} + 0.0012q^{-2} - 0.0012q^{-3} - 0.0002q^{-4} - 0.0004q^{-5} - 0.0002q^{-6} + 0.0009q^{-7} + 0.0005q^{-8} - 0.0005q^{-9}$$

ARX(5,10): Rüzgar kuvveti-H yönündeki hareket

$$A(q) = 1 - 0.1610q^{-1} - 0.4804q^{-2} - 0.0757q^{-3} - 0.0388q^{-4} - 0.2436q^{-5}$$

$$B(q) = 0.0003q^{-1} - 0.0015q^{-2} + 0.00005q^{-3} + 0.0007q^{-4} + 0.0029q^{-5} + 0.0009q^{-6} - 0.0035q^{-7} - 0.002q^{-8} + 0.0013q^{-9} + 0.0009q^{-10}$$

5.5.2 Regresyon Analizi

Regresyon analizinde ilk adım olarak bağımlı değişken (Y, X ve H yönündeki değişimleri) ve bağımsız değişken (Trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimleri) arasındaki sebep-sonuç ilişkisine bakılarak (daha önceki bölümlerde grafikleri verilmiştir), tepki büyüklüğü ile etki büyüklükleri arasındaki ilişkiyi temsil eden matematiksel modelin polinom fonksiyonlarla belirlenebileceğine karar verilmiştir. Kulenin Y, X ve H yönündeki değişimi için her bir yük ayrı ayrı ele alınarak (3.19) eşitliğine göre matematiksel model öngörülmüştür. Öngörülen matematiksel modelin derecesi başlangıçta küçük seçilmiş ve modelin parametreleri En Küçük Kareler Yöntemine göre (3.11) eşitliği ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametrelerin anlamlı olup olmadıkları (3.20) eşitliği ile belirlenen test büyüklüğünün (parametre/parametrenin standart sapması), serbestlik derecesi $f=n-u$ ve anlamlılık düzeyi $\alpha=0.05$ için t-dağılımının güven sınırı $t_{f,1-\alpha/2}$ ile karşılaştırılması sonucu belirlenmiştir. Modelin derecesi modelin parametreleri istatistiksel olarak anlamsız çıkana kadar artırılmış ve böylece anlamsız katsayılara ait değişkenler modelden çıkartılarak, model en az parametre ile en uygun şekilde belirlenmiştir. Ancak, modele ait katsayıların testi, modelin uygunluğu için yeterli görülmediğinden modelin belirlilik katsayısı (R^2) (3.21) eşitliği ile hesaplanmıştır. En son olarak da ölçülen ve modelden hesaplanan tepkiler değerleri arasındaki farkın yani prediksyon hatalarının grafikleri çizilerek, düzeltmelerin sıfır çizgisi etrafında yer aldığı görülmüştür.

Boğaziçi Köprüsü kulelerinin Y, X ve H yönündeki değişimleri ile köprüde etkili olan yükler arasında gerçekleştirilen regresyon analizi sonuçları Çizelge (5.12)'de gösterilmiştir. Çizelge (5.12)'de etki-tepki büyüklükleri, regresyon analizi sonucu istatistiksel olarak kabul edilen polinom şeklindeki matematiksel modeller ve belirlilik katsayıları yer almaktadır.

Çizelge (5.12) incelendiğinde, kulelerin Y, X ve H yönündeki değişimleri ile rüzgar kuvveti, trafik yükü ve sıcaklık değişimleri arasında oluşturulan modellerin belirlilik katsayıları (R^2), 14 numaralı ve 18 numaralı noktalar için uyumlu olduğu görülmektedir (Y yönündeki değişimleri ile rüzgar kuvveti arasında belirlenen modellerin belirlilik katsayıları hem 14 hem de 18 numaralı noktalar için yaklaşık aynı). Her iki kule için de rüzgar kuvveti ve trafik yüküne bağlı modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri, ölçülen Y yönündeki tepkilerini sırası ile %79, %77, %77 ve %90 oranında yansıtmaktadır. Başka bir ifade her iki kulenin yanal yöndeki hareketleri ile trafik yükü ve rüzgar kuvveti arasındaki korelasyon oldukça yüksek çıkmıştır. Böylece belirlenen modelin trafik yükü ve rüzgar kuvveti için tahminde bulunmada yeterince doğru olduğu söylenebilir. Ancak, kulelerin X ve H yönündeki değişimleri ile yükler arasında belirlenen modellere ait belirlilik katsayıları oldukça

küçük olduğundan bu modellerden belirlenen tepkilerin ölçülen tepkileri yansıtırma oranı da zayıf olacağı düşünülmüştür.

Çizelge 5.12 Regresyon analizi sonuçları

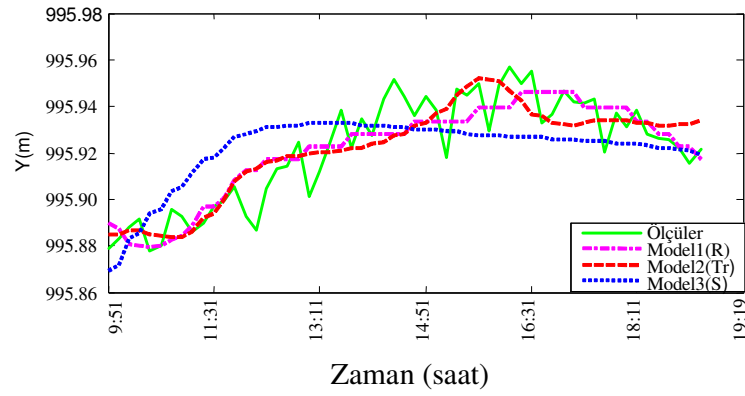
N. No	Etki Büyüklüğü (Bağımsız Değişken)	Tepki Büyüklüğü (Bağımlı Değişken)	Regresyon Analizi Sonucu Belirlenen Matematiksel Modeller	R ²
14	Trafik Yüğü (Tr)	Y	$Y_{Tr}=999,2944+15,9493Tr+26,9097Tr^2+19,3464Tr^3+5,0437Tr^4$	0,7731
		X	$X_{Tr}=457,1100+228,9624Tr-10,8164Tr^2+0,1703Tr^3$	0,4141
		H	Modele ait bütün katsayılar anlamsız	-----
	Sıcaklık Değişimi (S)	Y	$Y_S=994,0864+0,0857S$	0,4238
		X	$X_S=2072,40+0,4826S-0,5335S^2+0,1878S^3$	0,1958
		H	Model ait bütün katsayılar anlamsız	-----
	Rüzgar Kuvveti (R)	Y	$*Y_R=996,0856-11,3803R+156,6809R^2$	0,7896
		X	$X_R=2072,50-1,9305R-22,3470R^2$	0,1566
		H	Model ait bütün katsayılar anlamsız	-----
18	Trafik Yüğü (Tr)	Y	$Y_{Tr}=1000,372-14,055Tr+23,481Tr^2-16,809Tr^3+4,389Tr^4$	0,9026
		X	$X_{Tr}=998,4238-0,3151Tr+0,3534Tr^2-0,1217Tr^3$	0,6686
		H	$*H_{Tr}=162,1598+0,0979Tr-0,0441Tr^2$	0,1664
	Sıcaklık Değişimi (S)	Y	$Y_S=996,0674+0,0603S$	0,2490
		X	$X_S=973,3656+2,3495S-0,0552S^2$	0,1761
		H	$H_S=161,9258+0,0133S$	0,3944
	Rüzgar Kuvveti (R)	Y	$Y_R=997,5369-11,5915R-155,4635R^2$	0,7656
		X	$X_R=999,3237+0,3009R$	0,1653
		H	$H_R=162,2615-3,0261R+39,00R^2$	0,4698

14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri ile etkiyen büyüklükler arasında herhangi bir sebep-sonuç ilişkisi kurulamamış ve öngörülen regresyon ve çoklu regresyon modellerinin katsayıları da istatistiksel olarak anlamsız çıktığından bu noktanın düşey yöndeki değişimlerinde yüklerin herhangi bir etkisi olmadığı düşünülmektedir.

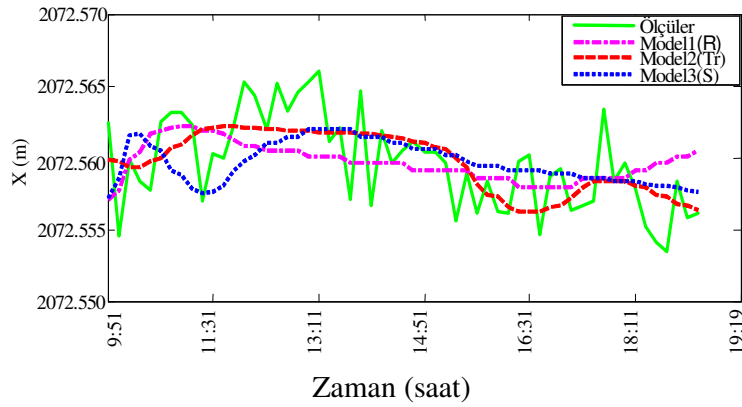
* Geçerli model (Çizelge 5.13'deki geçersiz modeller)

18 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri ile etkiyen yükleri arasında katsayıları istatistik olarak anlamlı olan regresyon modelleri oluşturulmuş, ancak bu modellere ait belirlilik katsayı (R^2) değerleri oldukça küçük çıkmış ve böylece etki-tepki arasındaki korelasyonun zayıf olduğu görülmüştür.

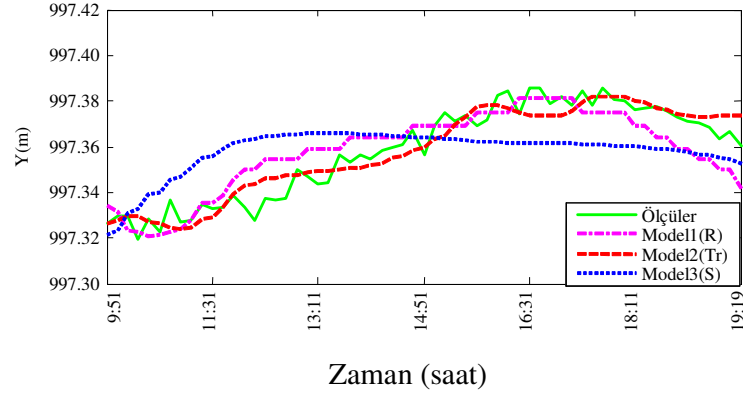
Ayrıca, Şekil (5.24), Şekil (5.25), Şekil (5.26), Şekil (5.27) ve Şekil (5.28)'de kulelerin Y, X ve H yönündeki değişimleri ile rüzgar yükü, trafik kuvveti ve sıcaklık değişimleri arasında belirlenen modellerden hesaplanan ve ölçülen tepki büyüklükleri arasındaki ilişki grafik olarak da gösterilmiştir. Burada, rüzgar kuvvetine bağlı model; model1, trafik yüküne bağlı model; model2 ve sıcaklık değişimlerine bağlı model; model3 olarak ele alınmıştır.



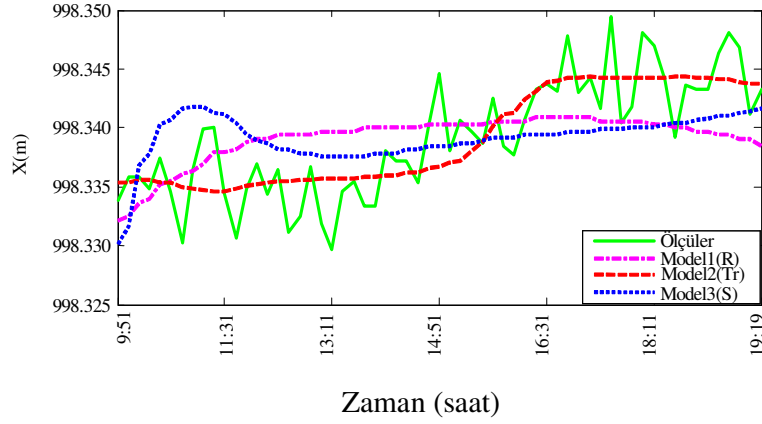
Şekil 5.24 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri



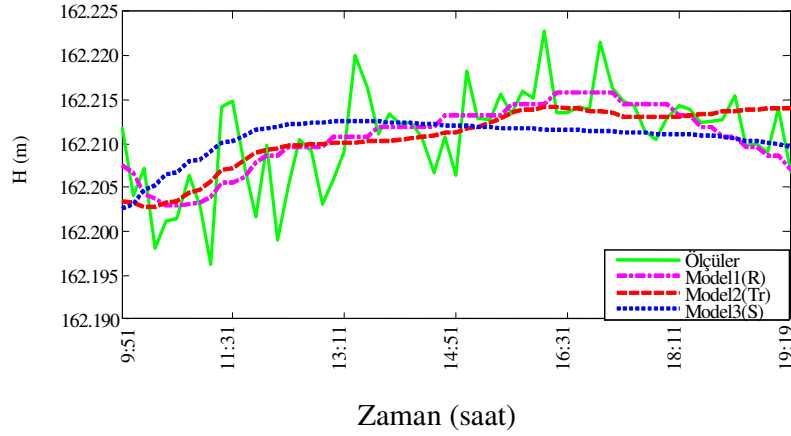
Şekil 5.25 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.26 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri



Şekil 5.27 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.28 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri

Bu bölümde her bir etki büyüklüğü ile her bir tepki büyüklüğü arasında yapılan regresyon analizi ile polinom şeklinde matematiksel modeller elde edilmiştir. Oysa karmaşık bir yapıya sahip olan asma köprüleri kulelerinin tepki büyüklüklerinin tek bir etki büyüklüğüne bağlı olarak ortaya çıkması ihtimal çok zayıf olmasına karşılık, elde edilen bu modellerle tek bir

etki büyüklüğünün yapı tepkimesini açıklamada etkin olup-olmadığı açıklanmaya çalışılmıştır. Ancak, yapının farklı yüklerin kombinasyonu olarak ele alınan yüklere tepkisinin araştırılması için çoklu regresyon analizinin yapılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

5.5.3 Çoklu Regresyon Analizi

Çoklu regresyon analizinde, her bir tepki büyüklüğü için ikili ve üçlü yükler ele alınarak (3.22) eşitliğine göre matematiksel modeller öngörülmüştür. Öngörülen matematiksel modellere ait katsayıların belirlenmesi de regresyon analizine benzer şekilde (3.11) eşitliği ile En Küçük Kareler Yöntemine göre yapılmış ve (3.20) eşitliğine göre de test edilmiştir. Test sonucu anlamsız çıkan katsayılara ait yükler modelden çıkartılmıştır. Bu durumda, başlangıçta ikili yüke göre öngörülen modelde anlamsız çıkan katsayıya ait yük modelden çıkartıldığı için modelde geriye tek bir yükün etkisi kalmıştır. Bu durumda regresyon analizi ile belirlenen Çizelge (5.12)'deki polinom fonksiyonlar geçerli model olarak kabul edilmiştir.

Çoklu regresyon analizinin, tek yüke bağlı regresyon analizinden en belirgin farkı ise (3.21) eşitliğindeki belirlilik katsayısı (R^2) yerine (3.23) eşitliği ile gösterilen düzeltilmiş belirlilik katsayısı ($\bar{R}^2$)'nin kullanılmasıdır.

Yapılan analizlerde, 14 numaralı noktanın Y yönündeki değişimleri ile rüzgar kuvveti ve trafik yüküne (R+Tr) bağlı olarak öngörülen modelde trafik yüküne ait katsayı %95 güven düzeyinde anlamsız çıktığından ($1,7208 < t_{f,1-\alpha/2} = 2,00$) trafik yükünün bu noktanın Y yönündeki değişimleri için ikili yüke bağlı model belirlemede çok fazla etken bir büyüklük olmadığı sonucuna varılmıştır.

Benzer şekilde 18 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri ile trafik yükü ve sıcaklık değişimlerine (Tr+S) bağlı olarak öngörülen modelde sıcaklık değişimlerine bağlı katsayı istatistik olarak anlamsız çıktığından, sıcaklık değişimlerinin 18 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri için ikili yüke bağlı model belirlemede etken bir büyüklük olmadığına karar verilmiştir. Böylece, Çizelge (5.13)'de “***” olarak verilen modeller geçerliliğini kaybetmiş ve Çizelge (5.12)'de “*” verilen modeller kulenin etki-tepki arasındaki ilişkiyi tanımlamada esas alınmıştır. Çizelge (5.13)'de çoklu regresyon analizi sonuçları ile ilgili etki (ikili)-tepki büyüklükleri, en uygun model ve düzeltilmiş belirlilik katsayısı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge (5.13)'de verilen düzeltilmiş belirlilik katsayıları ve modeller incelendiğinde, 18 numaralı noktanın Y yönündeki değişimleri ile öngörülen bütün olası ikili yükler arasında belirlenen modellerden hesaplanan tepkilerin ölçülen tepkileri sırası ile %85, %82 ve %93

oranında temsil ettiği ve aralarında yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Böylece, bu noktanın Y yönündeki değişimlerinin ikili yüklere göre belirlenen modellerinden farklı büyüklükteki yükler için yapılacak tahminleri daha doğru olacağı düşünülmüştür.

Çizelge 5.13 Çoklu (iki farklı yük ile) regresyon analizi sonuçları

N. No	Etki Büyüklüğü (Bağımsız Değişken)	Tepki Büyüklüğü (Bağımlı Değişken)	Çoklu Regresyon Analizi Sonucu Belirlenen Matematiksel Modeller	$\bar{R}^2$
14	R+ Tr	Y	$^{**}Y_{RTr} = 995,7934 + 2,1590R + 0,0189Tr$	0,7251
		X	$X_{RTr} = 2072,60 + 0,1929R - 0,0113Tr$	0,3389
		H	Fonksiyona ait bütün katsayılar anlamsız	-----
	Tr+S	Y	$Y_{TrS} = 994,6054 + 0,0473Tr + 0,0594S$	0,6071
		X	$X_{TrS} = 2072,4117 - 0,0094Tr + 0,0073S$	0,3735
		H	Fonksiyona ait bütün katsayılar anlamsız	-----
	S+R	Y	$Y_{SR} = 997,7397 - 0,0963S + 4,7587R$	0,6704
		X	$^{*}X_{SR} = 2071,9057 - 0,0324S - 0,7940R$	0,4282
		H	Fonksiyona ait bütün katsayılar anlamsız	-----
18	R+ Tr	Y	$Y_{RTr} = 997,2536 + 0,9184R + 0,0607Tr$	0,8476
		X	$X_{RTr} = 998,3276 - 0,0150R + 0,0203Tr$	0,6506
		H	$H_{RTr} = 162,1890 + 0,2889R + 0,0073Tr$	0,3728
	Tr+S	Y	$Y_{TrS} = 996,8167 + 0,0732Tr + 0,0220S$	0,8230
		X	$X_{TrS} = 998,4547 + 0,0189Tr - 0,0062S$	0,6649
		H	$^{**}H_{TrS} = 162,0391 + 0,0111Tr + 0,0075S$	0,3463
	S+R	Y	$^{*}Y_{SR} = 1001,0198 - 0,1866S + 6,4898R$	0,9289
		X	$X_{SR} = 999,4488 - 0,0555S + 1,5569R$	0,6759
		H	$^{*}H_{SR} = 162,7482 - 0,0277S + 1,0878R$	0,4347

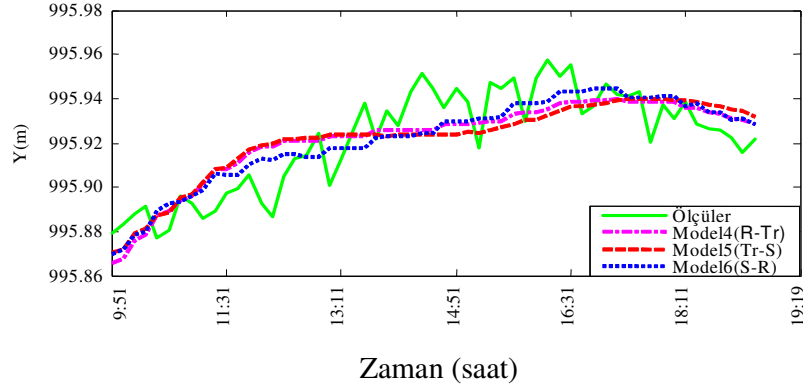
Kulelerin diğer yönlerdeki değişimleri ile yükler arasında gerçekleştirilen modellerin düzeltilmiş belirlilik katsayıları küçük değerler olduğundan bu modeller farklı büyüklükteki

^{**} Geçersiz model (Çizelge 5.12'deki modeller geçerli)

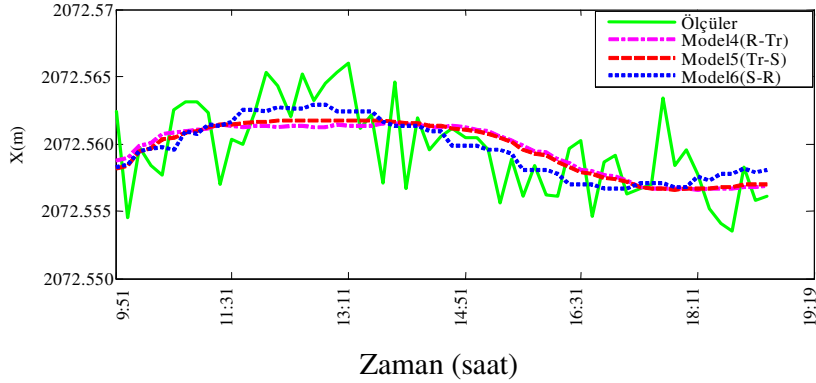
^{*} Geçerli model (Çizelge 5.14'deki modeller geçersiz)

yükler için yapılacak tahminlerde olması gereken ölçü değerlerini yansıtmada yetersiz kalacağı söylenebilir.

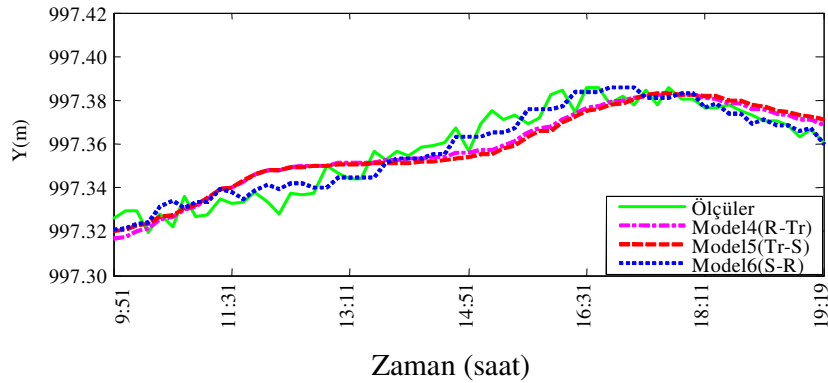
Ayrıca, Şekil (5.29), Şekil (5.30), Şekil (5.31), Şekil (5.32) ve Şekil (5.33)'de kulelerin Y, X ve H yönlerdeki değişimleri ile rüzgar kuvveti + trafik yükü (Model4), trafik yükü + sıcaklık değişimleri (Model5) ve sıcaklık değişimleri + rüzgar kuvveti (Model6) arasında belirlenen modellerden hesaplanan ve ölçülen tepkiler arasındaki ilişki grafik olarak da gösterilmiştir.



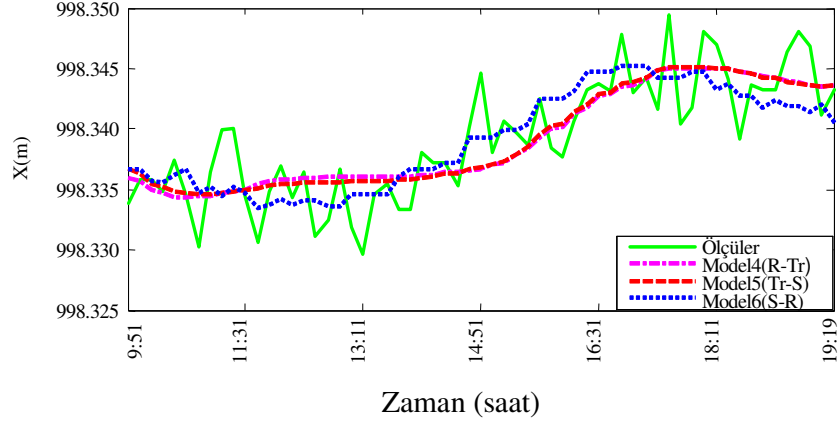
Şekil 5.29 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri



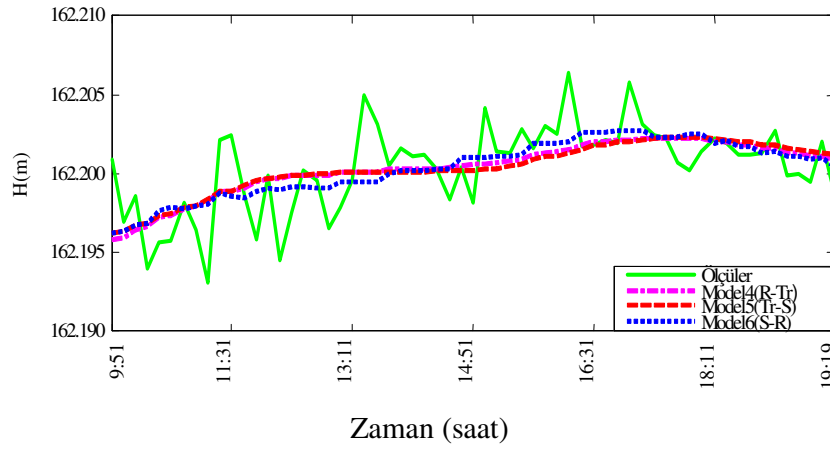
Şekil 5.30 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.31 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri



Şekil 5.32 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.33 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri

Gerek tekli yüklere bağlı regresyon analizi gerekse ikili yüklere bağlı çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen modeller istatistik olarak yeterli görünseler de, kulelerde Y, X ve H yönlerindeki değişimlerine her üç yükün de aynı anda etkili olması olasılığı yüksek görülmektedir. Bunun için öngörülen modellerde üç büyüklüğün etkisi de dikkate alınarak model katsayıları hesaplanır ve daha sonra da anlamsız çıkan katsayıya ait yük ya da yükler modelden çıkartılır. Böylece kulelerde tepkiye neden olan ya da olmayan tepki büyüklükleri de tespit edilmiş olacaktır.

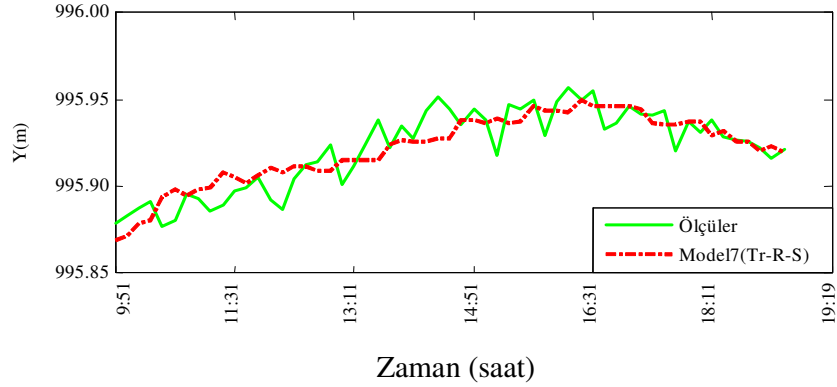
Çizelge (5.14)'de çoklu regresyon analizi sonuçları ile ilgili üçlü etki-tepki büyüklükleri, en uygun model ve düzeltilmiş belirlilik katsayısı değerleri gösterilmektedir. Çizelge (5.14) incelendiğinde “***” işaretli modellerde trafik yüküne ait katsayı istatistik olarak anlamsız çıktığından bu etki büyüklüğü modelden çıkartılmıştır. Böylece bu modellerden hesaplanacak tepki büyüklüklerinde trafik yükünün olmadığı diğer iki yüke bağlı Çizelge (5.13)'de “*” verilen modeller kullanılmıştır (14 numaralı nokta için X, 18 numaralı nokta için Y ve H

yönlerindeki değişimlerinde trafik yükünün etkisi ihmal edilmiştir).

Çizelge 5.14 Çoklu (üç farklı yük) regresyon analizi sonuçları

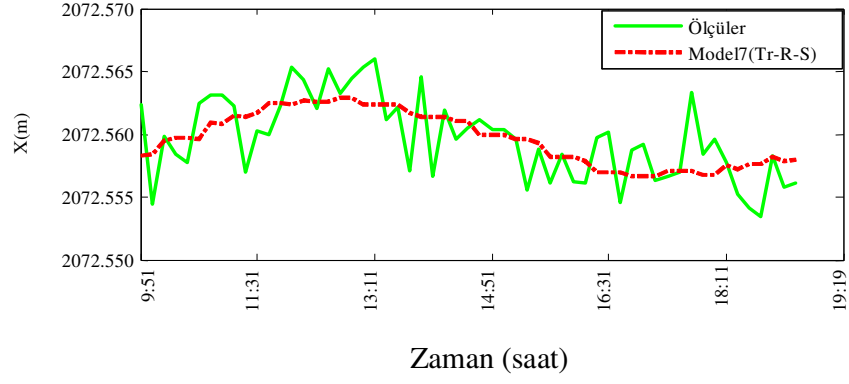
N.No	Etki Büyüklüğü (Bağımsız Değişken)	Tepki Büyüklüğü (Bağımlı Değişken)	Çoklu Regresyon Analizi Sonucu Belirlenen Matematiksel Modeller	$\bar{R}^2$
14	Tr +R+S	Y	$Y_{TrRS} = 1000,50 - 0,1000Tr - 9,300R + 0,200S$	0,7704
		X	** $X_{TrRS} = 2071,9244 - 0,0004Tr - 0,7634R + 0,0315S$	0,4283
		H	Fonksiyona ait bütün katsayılar anlamsız	-----
18	Tr +R+S	Y	** $Y_{TrRS} = 1001,0224 - 0,0000Tr - 6,4939R + 0,1867S$	0,9289
		X	$X_{TrRS} = 999,0300 + 0,0089Tr + 0,8884R - 0,0348S$	0,6983
		H	** $H_{TrRS} = 163,0767 - 0,0070Tr + 1,6022R - 0,0440S$	0,4347

Ayrıca, Şekil (5.34), Şekil (5.35), Şekil (5.36), Şekil (5.37) ve Şekil (5.38)'de kulelerin Y, X ve H yönlerindeki değişimleri ile trafik yükü+rüzgar kuvveti+sıcaklık değişimleri (Model7) arasında belirlenen modellerden hesaplanan ve ölçülen tepkiler arasındaki ilişki grafik olarak da gösterilmiştir. Çizelge ve grafikler incelendiğinde kulelerin üç farklı yük için modellerden hesaplanan tepkilerinin ölçülen tepkileri büyük oranda yansıttığı görülmektedir.

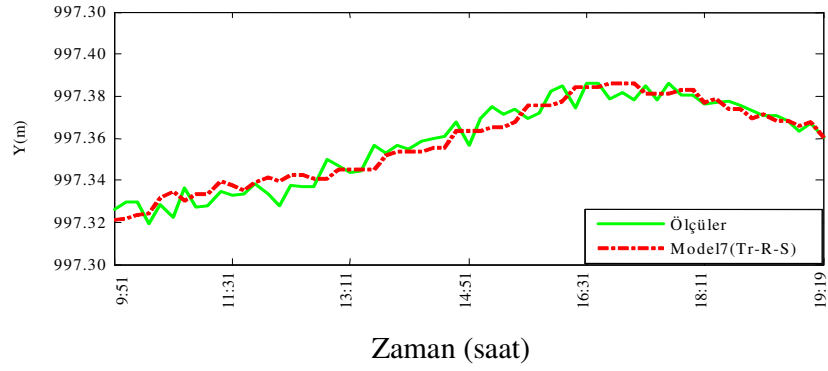


Şekil 5.34 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri

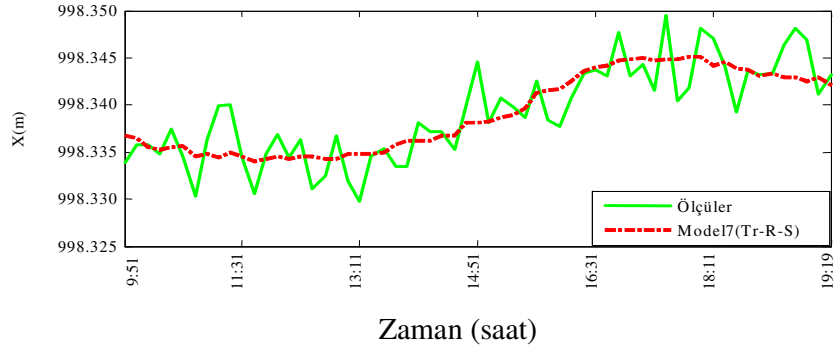
** Geçersiz model (Çizelge 5.13'deki modeller geçerli)



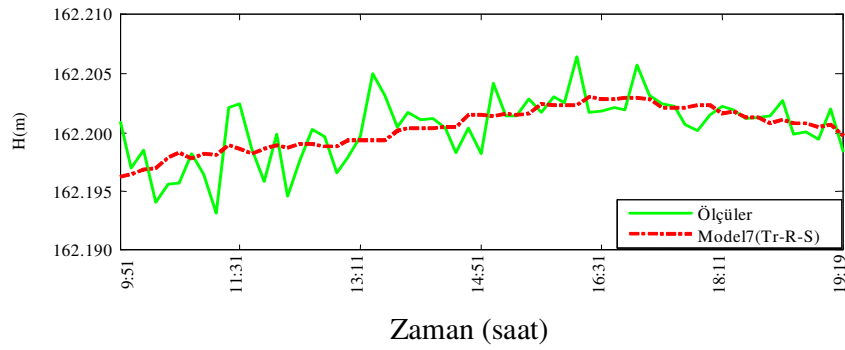
Şekil 5.35 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.36 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan Y yönündeki tepkileri



Şekil 5.37 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan X yönündeki tepkileri



Şekil 5.38 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerden hesaplanan H yönündeki tepkileri

5.6 Köprü Hareketlerinin Tepki Büyüklüğü ile Modellenmesi

Dinamik yapı “Boğaziçi Köprüsü”nün tepki büyüklüğüne bağlı zaman serileri ile sunduğu bilgiyi anlamak ya da serilerin temsil ettiği “Boğaziçi Köprüsü”nün davranışlarını tanımlamak ve geleceğe ilişkin doğru tahminlerin yapılmasını sağlamak amacıyla zaman serileri analizinden yararlanılmıştır.

Köprünün tabliye üzerindeki obje noktalarına (21, 22, 24) yapılan gözlemler sırasında köprüye etkiyen büyüklüklerde belirgin değişimler tespit edilemediğinden (örneğin, tabliye orta noktasında yapılan ölçme sürecinde, sıcaklık değeri 22,55°C, rüzgar hızı ise 5,4 m/sn’dir) bu noktalar için etki-tepki büyüklüğüne bağlı ARX, regresyon analizi ve çoklu regresyon analizi yapılamamıştır. Bu yüzden tabliyenin hareketleri de tepki büyüklüğüne bağlı zaman serileri analizi ile yapılmıştır. İlave olarak, kulelerin de zaman serileri analizi ile tanımlaması yapılmıştır.

Ayrıca, zaman serileri analizinde harmonik bileşen analizi içerisinde tabliyenin ve kulelerin yüksek ve alçak frekansları, genlik ve faz açıları da belirlenerek yapının hareketleri frekans bölgesinde incelenmiştir.

Zaman serileri analizinde ilk olarak serinin zamana bağlı grafiğinin oluşturulması gerektiğinden, kulelerin ve tabliyenin Y, X ve H yönündeki değişimlerinin zaman serileri Bölüm 5.4.3’de verilen grafiklerde gösterilmiş ve görsel olarak etkiyen büyüklükleri de dikkate alarak genel olarak yorumlaması yapılmıştır.

Daha sonra ise, yapının Y, X ve H yönündeki değişimlerinin ya da tepki büyüklüklerinin zaman serileri analizinde, deterministik kısmı oluşturan trend ve periyodik bileşen analizleri yapılmıştır. Trend ve periyodik bileşen ya da bileşenler giderilerek elde edilen durağan gözlem serilerinin stokastik analizi yapılarak matematiksel modelleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları sırası ile izleyen bölümlerde verilmiştir.

5.6.1 Trend Bileşeni Analizi

Obje noktalarına ait Y, X ve H koordinatlarının zaman serilerinin herhangi bir yöndeki eğilimini gösteren trend bileşeni (4.5), (4.6) ve (4.7) eşitlikleri ile verilen Mann-Kendall testi ile analiz edilerek, serilerde lineer bir trend bileşeni olup olmadığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar Çizelge (5.15) ile verilmiş ve yapının 14 ve 21 numaralı noktalarının bulunduğu kesimin H yönündeki değişimleri zaman serilerinin $\alpha=0,05$ yanlışma olasılığı ile lineer bir trend bileşeni içermediği, ancak diğer obje noktaları koordinatlarının lineer bir trend

bileşeni içerdiği tespit edilmiştir.

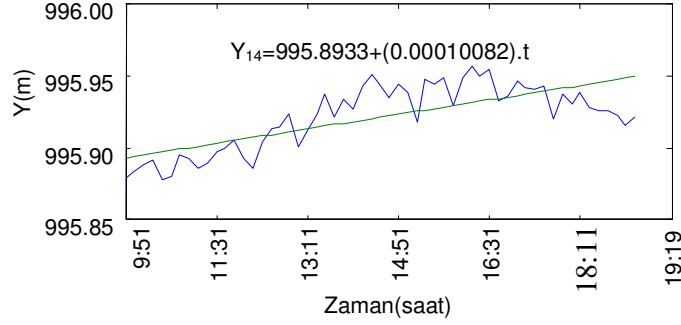
Çizelge 5.15 Yapı tepkimelerinin zaman serileri Mann- Kendall trend testi sonuçları

Yapı	N.No	Koordinat Bileşenleri	S	Var(S)	Z _{Hesap}	Sonuç $ Z_{hesap} \geq u_{1-\alpha/2}$
Kule	14	Y	758	145,26	5,21	5,21>1,96
		X	-630	145,26	-4,32	4,32>1,96
		H	-144	145,26	-0,98	*** 0,98<1,96
	18	Y	1166	160,69	7,24	7,24>1,96
		X	1054	160,69	6,55	6,55>1,96
		H	602	160,69	3,74	3,74>1,96
Tabliye	21	Y	-510013	28098	-18,15	18,15>1,96
		X	627959	28098	22,35	22,35>1,96
		H	33047	28098	1,18	*** 1,18<1,96
	22	Y	-226572	10187	-22,24	22,24>1,96
		X	101384	10187	9,95	9,95>1,96
		H	-164148	10187	-16,11	16,11>1,96
	24	Y	-35669	7198,6	-4,95	4,95>1,96
		X	54898	7198,6	7,62	7,62>1,96
		H	22095	7198,6	3,06	3,06>1,96

Trend bileşeni içerdiği tespit edilen zaman serilerinde ise bu bileşenin seriden giderilmesi için (3.19) eşitliği ile ölçülerin zamana bağlı regresyon fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Bu fonksiyonlara ait katsayılar (a ve b) (3.11) eşitliği ile hesaplanmış, daha sonra da bu katsayıların (3.20) eşitliği ile hesaplanan test büyüklüklerinden yararlanılarak, anlamlılık düzeyi $\alpha=0,05$ için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2}=1,96$ için “0” beklenen değerinden sapmalarının anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge (5.16)’da verilmiş olup, örnek olması açısından 14 numaralı noktanın Y yönündeki değişimlerinin zaman serisinin içerdiği lineer trend bileşeni ve regresyon fonksiyonu grafiği de Şekil (5.39)’da verilmiştir.

*** Lineer trend bileşeni yok

Çizelge (5.16)'da da görüldüğü gibi 14 numaralı noktanın ve 21 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesimi hareketlerinin H yönündeki zaman serilerine ait lineer trend fonksiyonlarına ait b katsayıları istatistik olarak “0” beklenen değerinden olan sapmaları anlamsız, diğer noktalara ait fonksiyonların katsayıları ise istatistik olarak “0” beklenen değerinden olan sapmaları anlamlı çıkmıştır. Diğer noktalar için grafikler ve regresyon fonksiyonları Ek-3’de verilmiştir.



Şekil 5.39 14 numaralı noktanın Y yönündeki zaman serisi lineer trend bileşeni

Ayrıca, Çizelge (5.15)'de verilen Z_{Hesap} değerleri ile trend bileşenin yönü hakkında elde edilen bilgiler Çizelge (5.16)'da gösterilen fonksiyonlara ait b katsayısının işaretleri ile doğrulanmıştır.

Diğer yandan, Boğaziçi Köprüsü'ndeki hareketlerin herhangi bir yönde sürekli artması ya da azalması söz konusu olamayacağından, köprü üzerindeki obje noktalarına ait zaman serilerinde de sürekli artan ya da azalan lineer bir trend bileşeni olması beklenemez. Bu nedenle, var olan trendlerinde, özellikle kulelerdeki obje noktalarında, bu noktalara ait ölçülerin elde edilme süreçlerinin yapının hareketini tamamlama sürecinden küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, belirlenen fonksiyonlardaki eğilimi gösteren “b” katsayılarının da yeterince küçük değerler alması, köprü üzerindeki obje noktalarına ait zaman serilerinde sürekli artan ya da azalan lineer bir trend bileşeni olması beklentisi ortadan kaldırmaktadır. Ancak, yapılan analizlerde istatistik olarak var olan trend bileşeni dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.16 Zaman serilerindeki trend bileşeni regresyon fonksiyonları

Model: $Y=a+b \cdot t$			Katsayı Testi $t_a, t_b > \pm u_{1-0,005/2}$
Yapı	N.No	Fonksiyon	
Kule	14	$Y_{14}=995,8933 + 0,00010 \cdot t$	$t_a, 7,909 > \pm 1,96$
		$X_{14}=2072,5625 - 0.00001 \cdot t$	$t_a, -4,560 > \pm 1,96$
		$H_{14}=162,0355 - 0,000016 \cdot t$	*** $t_a, 1,0936 < \pm 1,96$
	18	$Y_{18}=997,3266 + 0,000097 \cdot t$	$t_a, 14,768 > \pm 1,96$
		$X_{18}=998,3332 + 0,000019 \cdot t$	$t_a, 7,368 > \pm 1,96$
		$H_{18}=162,2053 + 0,000018 \cdot t$	$t_a, 4,335 > \pm 1,96$
Tabliye	21	$Y_{21}=983,7912 - 0.00000058 \cdot t$	$t_a, -19,039 > \pm 1,96$
		$X_{21}=1807,1186 + 0,0000087 \cdot t$	$t_a, 22,422 > \pm 1,96$
		$H_{21}=67,2931 + 0,0000026 \cdot t$	*** $t_a, -1,6831 < \pm 1,96$
	22	$Y_{22}=983,9770 - 0,000020 \cdot t$	$t_a, -28,067 > \pm 1,96$
		$X_{22}=1536,0962 + 0,0000078 \cdot t$	$t_a, 10,370 > \pm 1,96$
		$H_{22}=68,9929 - 0,000076 \cdot t$	$t_a, -16,894 > \pm 1,96$
	24	$Y_{24}=984,3805 - 0,0000034 \cdot t$	$t_a, -3,858 > \pm 1,96$
		$X_{24}=1272,1266 + 0,000019 \cdot t$	$t_a, 12,031 > \pm 1,96$
		$H_{24}=67,2270 + 0,000062 \cdot t$	$t_a, 8,162 > \pm 1,96$

5.6.2 Periyodik Bileşen Analizi

Yapının Y, X ve H yönlerindeki hareketlerinin zaman serilerindeki trend bileşeni giderildikten sonra, seride var olan uzun zamanlı periyodik bileşenlerin belirlenip, bu bileşeninde seriden giderilmesi gerekmektedir. Ayrıca, belirlenen bu periyodik bileşenler köprünün etkiyen yükler karşısında periyodik bir tepki gösterdiğini de açıklayacaktır. Zaman serilerindeki periyodik bileşenlerin belirlenebilmesi için zaman bölgesinde tanımlanan ölçülerin frekans bölgesine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm ise (4.11) eşitliği ile verilen HFD ile yapılmıştır. Ancak, HFD dönüşümü sonucu alçak ve yüksek frekansların belirlenebilmesi için zaman serilerinin zaman bölgesinde filtrelenmesi, spektral sızma etkisini

*** Lineer trend bileşeni yok

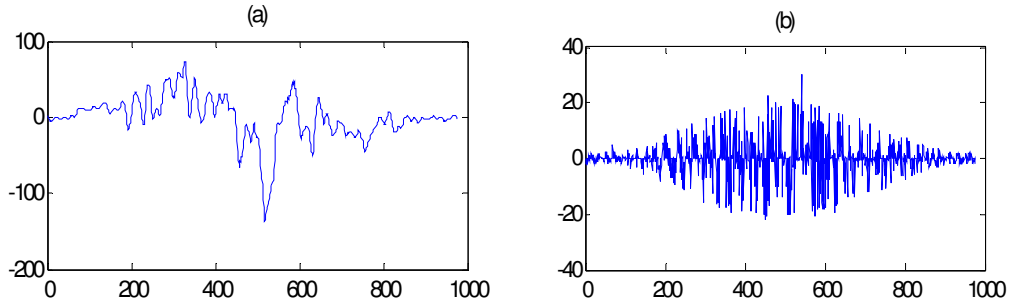
azaltmak için de serinin bir pencere fonksiyonu ile çarpılması sağlanmıştır. Daha sonra da HFD sonucu serinin genlik ve güç spektrumları hesaplanarak periyodik analizi yapılmıştır. Yapılan işlem adımları aşağıda verilmiştir.

5.6.2.1 Ölçülerin Filtrelenmesi ve Pencerenlenmesi

Köprünün Y, X ve H yönlerindeki hareketleri zaman serilerinde var olan uzun zamanlı (gözlem süresi kadar) değişimlerin ya da alçak-frekansların belirlenebilmesi için (4.13) eşitliği ile verilen kayan ağırlıklı ortalamalar yöntemi ile 5. dereceden yumuşatılması sağlanmıştır. Yani serilere alçak-geçişli bir filtreleme uygulanmıştır. Bu tür bir filtreleme sonucu belirlenen periyodik hareket ya da hareketler yapının uzun zamanlı periyodik değişimlerini açıklamaktadır.

Köprünün uzun zamanlı periyodik değişimleri yanında, lokal değişimlerinin ya da yüksek-frekanslarının da belirlenebilmesi için Y, X ve H yönlerindeki değişimlerin zaman serilerine 1. dereceden (4.14) eşitliği ile fark alma yöntemi uygulanmış ve böylece serilerin yüksek-geçiş bir filtreden geçişi sağlanmıştır.

Zaman serilerinde yapılan bu tür filtreler ile serilerde var olan gürültü bileşenleri de az da olsa giderilmektedir.



Şekil 5.40 Yumuşatma (a) ve farklandırma (b) işlemi yapılmış, Hanning Pencere Fonksiyonu ile çarpılmış 22 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri zaman serileri

Filtreleme sürecinden sonra zaman serilerinde HFD sonucu meydana gelen spektral sızmanın etkisini azaltmak için de, Y, X ve H yönlerindeki değişimlerin zaman serileri, HFD öncesi (4.15) eşitliği ile tanımlanan Hanning Fonksiyonu ile çarpılmıştır. Örnek olması bakımından, Şekil (5.40)'da 5. dereceden yumuşatma (a) ve 1.dereceden farklandırma (b) işlemi yapılmış, Hanning Pencere Fonksiyonu ile çarpılmış 22 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri zaman serileri gösterilmiştir. Bu grafiklerde dikey eksen yumuşatma (a) ve farklandırma (b) işlemi yapılarak Hanning Pencere Fonksiyonu ile çarpılmış değerleri, yatay eksen ise ölçü

sayısını göstermektedir.

5.6.2.2 Ölçülerin HFD ve Güç Spektrumu

Filtrelenmiş, pencere fonksiyonu ile çarpılmış bütün Y, X ve H yönlerindeki yapı değişimleri zaman serilerinin HFD (4.11) eşitliği ile hesaplanmıştır. Daha sonra da HFD sonucu elde edilen karmaşık sayılardan (4.20) eşitliği ile güç spektrumları, (4.23) eşitliği ile genlikleri ve (4.24) eşitliği ile de faz açıları hesaplanmıştır. Analizlerde dikkate alınan frekans aralığı tabliyedeki obje noktaları için 0-0,5 Hz, kuledeki obje noktaları içinde 0-0,00083 Hz arasındadır. Serilerin hem alçak frekanslara hem de yüksek frekanslara göre güç, genlik ve faz açıları spektrumları hesaplanmıştır. Böylece, frekans bölgesinde yapılan analizlerle köprünün gösterdiği tepkiler frekans bileşenleri ile açıklanarak, yapı hareketlerinde frekans bileşenlerinin hangi yoğunlukta olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

- **Yapının yüksek frekans bileşenleri**

Yüksek-frekans değerleri, yüksek frekanslı, rasgele ya da anlık olarak değişen trafik yükü ve rüzgar kuvvetinin köprüyü etkimesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Yüksek-frekans değerlerinin oluşumunda, araçların ani fren yapmaları, farklı yüklerde farklı hızlarda hareket etmeleri de önemli etkenler olarak düşünülmektedir. Yapının Y, X ve H yönlerindeki değişimleri yüksek frekans bileşenleri aralığı, maksimum frekans değeri, periyodu ve genlik değerleri Çizelge (5.17)'de gösterilmiştir.

Çizelge (5.17), incelendiğinde kulelerin Y, X ve H yönlerindeki hareketlerinin frekansları yaklaşık aynı olup, maksimum genlikler Y yönündeki değişimlerde ve 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimlerinde ortaya çıkmıştır. Tabliyenin maksimum yüksek frekansları ise 22 ve 24 numaralı noktaların bulunduğu tabliye kesiminin Y yönündeki değişimleri hariç diğer yönlerdeki değişimler için yaklaşık aynı olduğu görülmüş ve maksimum genlikler beklenildiği gibi H yönündeki değişimlerde ortaya çıkmıştır.

Diğer yandan, Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ¼'lük ve orta kesimi H yönündeki hareketlerinin hesaplanan frekans bileşenlerinin Çizelge (5.17)'deki maksimum frekans değerlerinin, Çizelge (2.4)'de verilen Boğaziçi Köprüsü'nün ilk 6 moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri ile uyumlu olduğu da görülmektedir. 21 ve 24 numaralı noktaların bulunduğu ¼'lük tabliye kesimi maksimum frekansları 5. modun, 22 numaralı noktanın bulunduğu tabliye orta noktasının frekansı da 4. modun frekans ve periyotları ile uyumaktadır.

Boğaziçi Köprüsü'nün kule ve tabliye kesiminin Y, X ve H yönlerdeki hareketleri için elde edilen güç-yüksek frekans, genlik-frekans ve faz açısı-frekans grafikleri Ek-4'de verilmiştir.

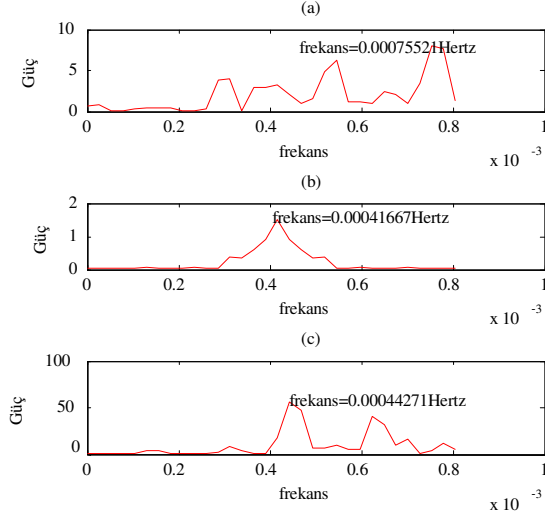
Çizelge 5.17 Tabliye ve kulelerin yüksek frekans-periyot ve genlik değerleri

Yapı	N.No	Koordinat Bileşenleri	Belirgin Frekans Aralığı (Hz)	Maksimum Frekans (Hz)	Maksimum Periyot (sn)	Belirgin Genlik Aralığı(mm)
Kule	14	Y	0,0002-0,00082	0,0007552	1324	0-90
		X	0,0006-0,00085	0,0004166	2400	0-40
		H	0,0004-0,00080	0,0004427	2258	0-200
	18	Y	0,0003-0,0008	0,0007292	1372	0-120
		X	0,0003-0,00082	0,0007031	1422	0-50
		H	0,0002-0,00080	0,0006901	1449	0-50
Tabliye	21	Y	0-0,2/0,3-0,5	0,37695	2,62	0-200
		X	0,25-0,5	0,31787	3,15	0-200
		H	0,3-0,5	0,37428(5.mod)	2,90	0-300
	22	Y	0,1-0,5	0,14355	7,14	0-50
		X	0,2-0,5	0,35352	2,86	0-50
		H	0-0,07/0,25-0,3	0,28027(4.mod)	3,57	0-250
	24	Y	0,08-0,12/0,25	0,10449	9,57	0-50
		X	0,15-0,5	0,48145	2,08	0-50
		H	0.25-0.5	0,37207(5.mod)	2,69	0-250

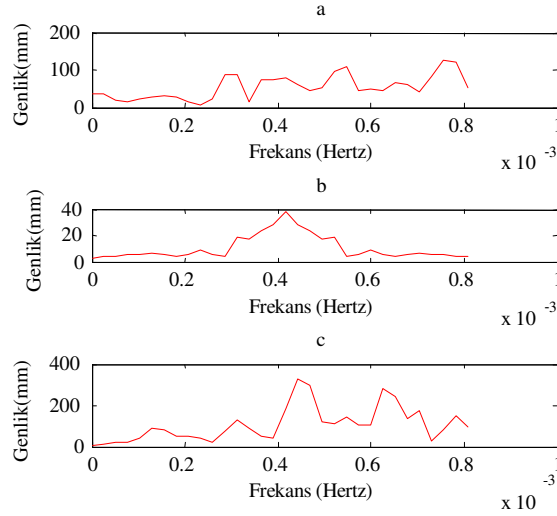
Yapının kule ve tabliye kesimi değişimleri zaman serilerinin faz açıları, Ek-4’de verilen grafiklerde görüldüğü gibi farklı derecelerde elde edilmiştir. Eğer $\pm 120^\circ$ faz açısı için bir sınır değeri olarak seçilirse, yapı hareketleri faz açılarının bu sınır değeri içerisinde farklı büyüklüklerde ortaya çıktığı ifade edilebilir.

Bu bölümde, sadece 14 numaralı noktanın ve tabliye orta noktasının (22 numaralı nokta) hareketlerinin güç-frekans, genlik-frekans ve faz açısı-frekans grafikleri verilmiş olup, yapının diğer yönlerdeki hareketleri frekans grafikleri Ek-4’de verilmiştir. Yapının diğer yönlerdeki hareketlerine ait frekans bilgileri için sadece bazı açıklamalar yapılmıştır.

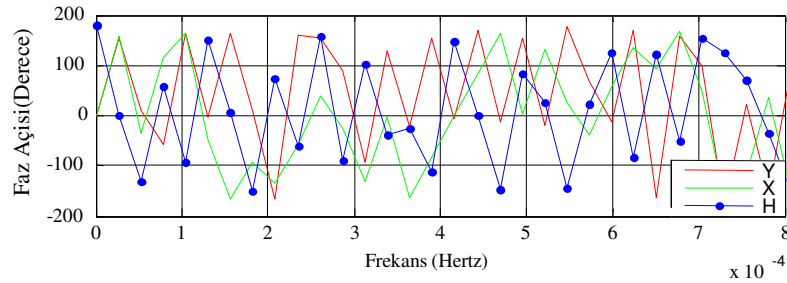
- **Kule**



Şekil 5.41 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri



Şekil 5.42 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki genlik-frekans değişimleri



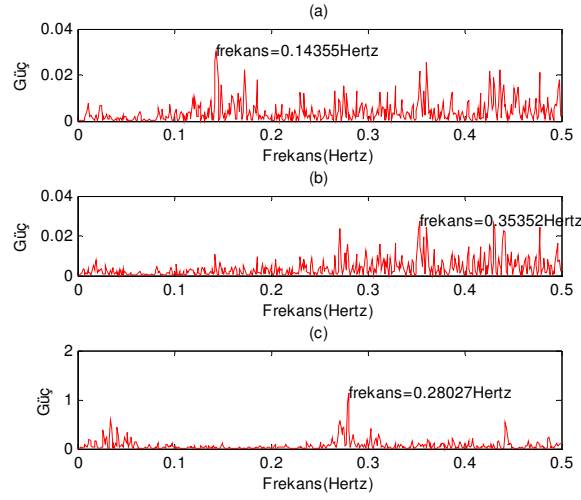
Şekil 5.43 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri

Grafikler incelendiğinde, 14 numaralı noktanın Y, X ve H yönlerindeki değişimlerinin sahip olduğu farklı frekans değerleri içerisinde en büyük lokal değişimin (yüksek-frekans) ya da

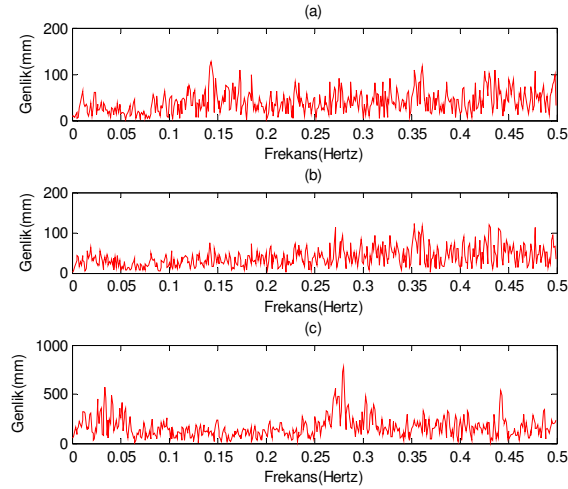
hareketin frekanslarına ait bilgiler Çizelge (5.17)'de verilmiştir. H ve X yönlerindeki maksimum lokal değişimler daha yavaş, ancak H yönündeki değişimin sahip olduğu güç diğer yönlere göre daha büyüktür. X yönündeki değişimlerin gücü oldukça küçüktür. Bu durum, genlik-frekans ilişkisinde de görülmektedir.

Benzer şekilde, 18 numaralı noktanın Y, X ve H yönlerindeki değişimlerinin sahip olduğu yüksek-frekans değerleri içerisinde en büyük lokal değişimin ya da hareketin frekanslarına ait bilgiler Çizelge (5.17)'de verilmiştir. Y, X ve H yönlerindeki değişimler için yüksek-frekanslar yaklaşık aynı büyüklüktedir. Ancak Y yönündeki değişimin gücü diğer yönlere göre daha büyüktür. X ve H serileri için ise değişimin büyüklüğü yaklaşık aynıdır.

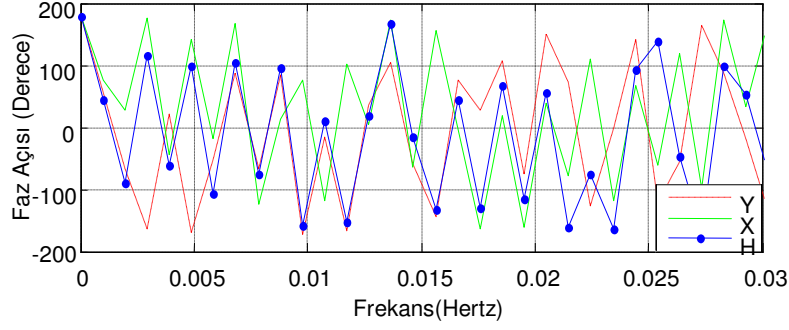
- **Tabliye**



Şekil 5.44 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri



Şekil 5.45 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki genlik-frekans değişimleri



Şekil 5.46 Tabliye orta noktasının Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri

Şekil (5.44)'de köprünün tabliye orta noktasının lokal değişimlerinin çok sayıda yüksek frekans bileşenine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle Y ve X yönlerindeki değişimlerinin hemen hemen aynı güç aralıklarında çok sayıda frekans yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. H yönündeki değişimin yüksek-frekans değerlerinin sahip oldukları güç, Y ve X yönlerindeki değişimlerin frekans değerlerine göre oldukça büyük olup, X yönündeki titreşimlerin (değişim) daha hızlı olduğu söylenebilir. En yavaş titreşim ise Y yönünde gerçekleşmiştir. H yönündeki titreşim de X yönündeki seriye yakın kabul edilebilir. Maksimum genlik grafiklerde de görüldüğü gibi H yönünde ortaya çıkmıştır. Bu durum, asma köprülerde, düşey yöndeki hareket ya da hareketlerin diğer yönlere göre daha büyük olması koşulunu yansıtmaktadır.

Çizelge (5.17) ve Ek-4'deki grafikler incelendiğinde, 21 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesiminin Y ve H yönlerindeki frekansları yaklaşık aynı değerlerdir. H yönündeki frekansın gücü de diğer yönlere göre oldukça büyük elde edilmiştir. Bu durum genlik-frekans ilişkisinde de görülmektedir.

24 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesimi lokal değişimlerinin çok sayıda yüksek-frekans bileşenine sahip olduğu görülmektedir (Ek-4). Y yönündeki değişimin maksimum güce sahip yüksek-frekans bileşeni diğer yönlerdeki değişimlerin frekanslarına göre oldukça düşük çıkmıştır. Diğer noktalarda olduğu gibi, bu noktada da maksimum genlik H yönünde ortaya çıkmıştır.

- **Yapının alçak-frekans bileşenleri**

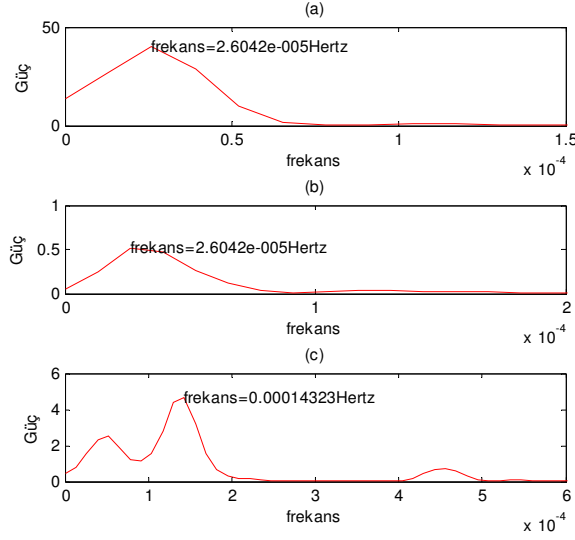
Yapının alçak-frekans bileşenleri; trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimlerinin uzun zamanlı değişimlerine köprünün uzun zamanlı (ölçü süresi kadar) tepkime göstermesi sonucu ortaya çıktığı söylenebilir. Yapının Y, X ve H yönlerdeki değişimleri alçak frekans bileşenleri aralığı, maksimum frekans değeri ve periyot değerleri Çizelge (5.18) 'de gösterilmiştir.

Çizelge (5.18) incelendiğinde maksimum alçak frekansların kulelerde, 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri hariç, aynı olduğu, tabliye değişimleri frekanslarında ise bazı benzerlikler olsa da herhangi bir uyum olmadığı görülmüştür. Ancak, kuleler için (14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri hariç) hesaplanan alçak frekanslardan maksimum frekans değeri, bu noktalarda yapılan ölçme süresine eşit çıkmıştır. Bunun en büyük nedeni, ölçüm süresinin ölçülerde var olan maksimum alçak frekans değerinin periyodik hareketini tamamlama süresinden az olmasından kaynaklanmaktadır. Kule ve tabliye hareketleri için elde edilen güç-alçak frekans bileşenleri ve faz açıları grafikleri Ek-4’de verilmiş olup, bu bölümde sadece 14 numaralı nokta ve tabliye orta noktası alçak frekans grafikleri verilerek, diğer yönlere ait frekans değerleri ile ilgili açıklamalar yapılmıştır.

Çizelge 5.18 Tabliye ve kulelerin alçak frekans ve periyot değerleri

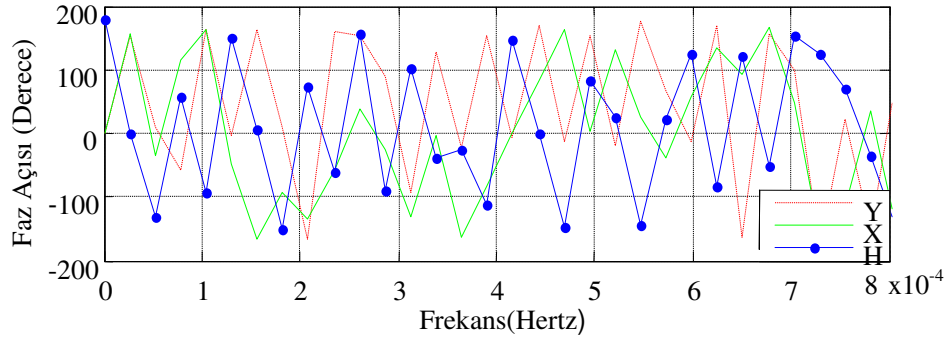
Yapı	N.No	Koordinat Bileşenleri	Belirgin Frekans Aralığı (Hz)	Maksimum Frekans (Hz)	Maksimum Periyot
Kule	14	Y	0-0,000055	0,000026	10,68(sa)
		X	0-0,000010	0,000026	10,68(sa)
		H	0-0,000020	0,000143	1,93(sa)
	18	Y	0-0,000006	0,000026	10,68(sa)
		X	0-0,000054	0,000026	10,68(sa)
		H	0-0,000010	0,000026	10,68(sa)
Tabliye	21	Y	0-0,025	0,000488	34,13(dk)
		X	0-0,025	0,019531	51,20(sn)
		H	0-0,35	0,019531	51,20(sn)
	22	Y	0-0,015	0,000977	17,07(dk)
		X	0-0,02	0,005859	2,84(dk)
		H	0-0,02	0,0009766	17,07(dk)
	24	Y	0-0,03	0,009766	1,71(dk)
		X	0-0,025	0,0009766	17,07(dk)
		H	0-0,035	0,0058594	2,84(dk)

- **Kule**



Şekil 5.47 14 numaralı noktanın Y(a), X(b) ve H(c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri

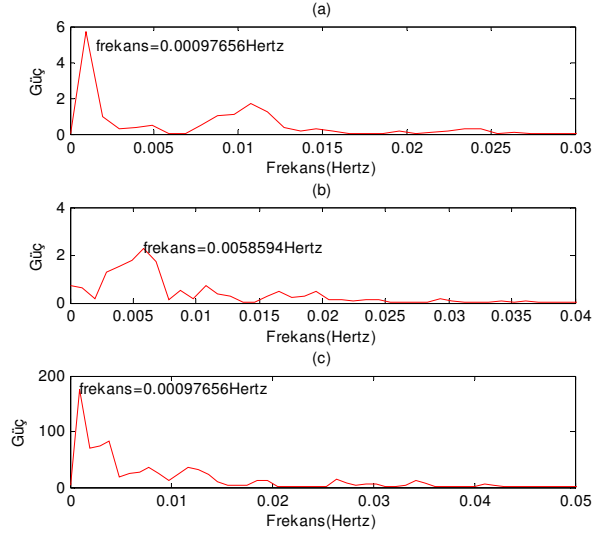
Şekil (5.47)'de 14 numaralı noktanın Y ve X yönlerindeki değişimleri belirgin frekansları aynı büyüklüktedir. H yönündeki değişimler Y ve X 'e göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Grafikler incelendiğinde, H yönünde üç tane, Y ve X için ise birer tane kısa gözlem süresine göre belirgin periyodik hareketler gözlenmektedir.



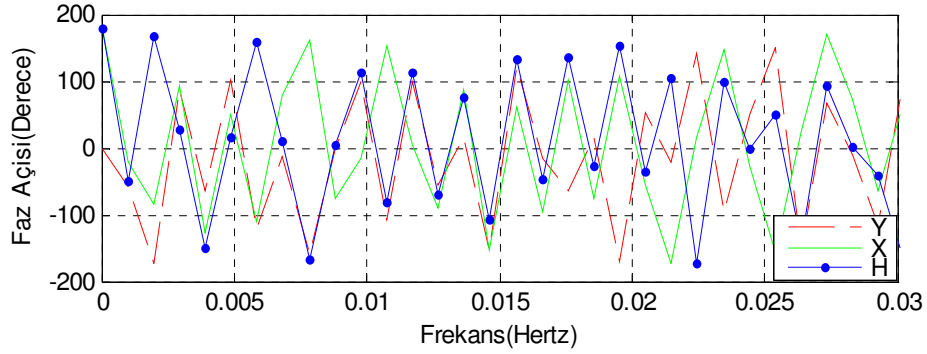
Şekil 5.48 14 numaralı noktanın Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri

18 numaralı noktanın kısa gözlem sürelerine göre belirlenen alçak-frekansları Y, X ve H yönlerinde aynıdır. Ancak Y yönündeki değişimin gücü (hareketin büyüklüğü) X ve H yönüne göre daha büyüktür (Ek-4).

- **Tabliye**



Şekil 5.49 Tabliye orta noktasının Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki güç-frekans değişimleri



Şekil 5.50 Tabliye orta noktasının Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki faz-frekans değişimleri

Şekil (5.49)'da alçak-frekans değişimlere göre tabliye orta noktası değişimlerinin frekans bileşenleri görülmektedir. Özellikle Y ve H yönlerdeki değişimlerin aynı alçak-frekans değerine sahip oldukları görülmektedir. Hareketlerin değişim hızına göre alçak-frekanslar $X > Y = H$ olarak sıralanabilir. Tabliye orta noktasının Y ve H yönlerdeki değişimlerinin X yönündeki değişimlere göre daha uzun zamanlı bir hareket özelliği yansıttığı görülmektedir.

21 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesiminin Ek-4'de görüldüğü üzere, X ve H yönlerindeki değişimi Y yönüne göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Hareketlerin değişim hızına göre alçak-frekanslar $H = X > Y$ olarak sıralanabilir. Ayrıca tabliyenin bu kesiminde çok sayıda alçak-frekans değerlerinin bulunması, bu noktada kısa gözlem süresi içerisinde gerçekleşen çok sayıda uzun zamanlı periyodik hareketlerin varlığını göstermektedir. Özellikle X ve H yönlerindeki değişimlerinde bu durum açıkça görülmektedir.

Ek-4’de, 24 numaralı noktanın bulunduğu tabliye kesiminin Y, X ve H yönlerindeki maksimum değişimleri farklı zamanlarda gerçekleşmiştir. Hareketlerin değişim hızına göre alçak-frekanslar $Y > H > X$ olarak sıralanabilir. Bu kesim için en uzun zamanlı hareket X yönünde ortaya çıkmıştır. Ayrıca 24 numaralı noktada çok sayıda alçak-frekans değerlerinin bulunması, bu noktada kısa gözlem süresi içinde gerçekleşen çok sayıda periyodik hareketlerin oluştuğunu göstermektedir.

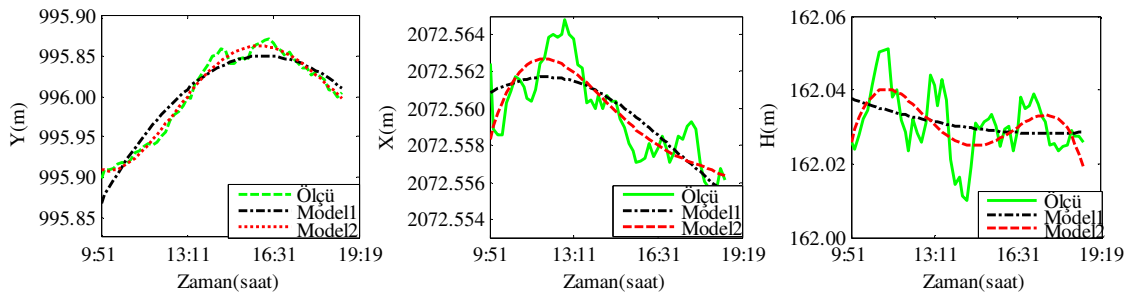
5.6.2.3 Harmonik Analizi

Boğaziçi Köprüsü’nün Y, X ve H yönlerindeki hareketleri zaman serilerinin frekans bölgesinde yapılan spektrum analizleri sonucu, serilerde çok sayıda yüksek ve alçak frekansların var olduğu yani serinin uzun ve kısa zamanlı periyodik hareket ya da hareketlere sahip olduğu bir önceki bölümde açıklanmış, maksimum frekans-periyot-genlik değerleri Çizelge (5.17) ve Çizelge (5.18)’de verilmiştir. Ancak, belirlenen bu frekanslardan alçak-frekansların, köprünün uzun-zamanlı davranışlarını açıklaması ve zaman serileri analizinde de periyodik bileşenin giderilmesinde dikkate alınması açısından önemli olduğundan bu frekansların anlamlı olup-olmadıklarının test edilmesi gerekmektedir. Hesaplanan alçak-frekanslar (4.22) eşitliği ile tanımlanan harmonik fonksiyonda yerine konulmuş ve bu fonksiyona ait x^T bilinmeyen parametreleri En Küçük Kareler Yöntemine göre (3.11) eşitliği ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametrelerin (3.20) eşitliği ile test büyüklükleri belirlenmiş ve bu test büyüklüklerinin, anlamlılık düzeyi $\alpha=0,05$ için standart normal dağılımın güven sınırı $\pm u_{1-\alpha/2}=1,96$ için “0” beklenen değerinden sapmalarının anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Test büyüklükleri güven sınırından büyük olan katsayılara ait frekanslar ya da periyodik hareketler anlamlı kabul edilmiştir. Güven sınırından küçük olan test büyüklüklerinin katsayıları da “0” değerinden olan sapmaları anlamsız olduğundan, bu katsayılara ait frekanslar (4.22) eşitliği ile tanımlanan harmonik fonksiyondan çıkartılmıştır. Analiz sonucu, köprüde var olan anlamlı periyodik hareket ya da hareketlerin sayısı zaman aralıkları ile Çizelge (5.19) ‘da gösterilmiştir. Ayrıca, çizelgede köprünün maksimum alçak frekans değerine göre belirlenen harmonik modeli de gösterilmiştir.

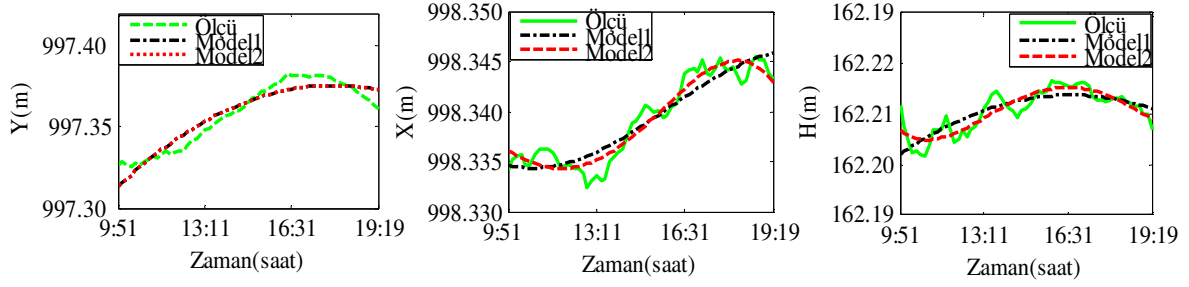
Çizelge 5.19 Periyodik analizi sonucu elde edilen anlamlı frekans sayısı-maksimum alçak-frekansa göre harmonik modeller

Yapı	Koordinat Bileşenleri	Anlamlı Frekans Sayısı	Maksimum Alçak-Frekansa Bağlı Harmonik Model
Kule	Y ₁₄	2	$Y_{14}=958.358+37.5092\cos(2\pi ft)+2.3405\sin(2\pi ft)$
	X ₁₄	2	$X_{14}=2070.558+0.0030.\cos(2\pi ft)+0.0025\sin(2\pi ft)$
	H ₁₄	2	$H_{14}=162.132-0.0940\cos(2\pi ft)-0.0431\sin(2\pi ft)$
	Y ₁₈	1	$Y_{18}=978.415+18.899\cos(2\pi ft)+1.537\sin(2\pi ft)$
	X ₁₈	2	$X_{18}=998.340-0.0056\cos(2\pi ft)+0.0016\sin(2\pi ft)$
	H ₁₈	2	$H_{18}=156.881+5.3210\cos(2\pi ft)+0.3535\sin(2\pi ft)$
Tabliye	Y ₂₁	21	$Y_{21}=983,785-0,0028\cos(2\pi ft)+0,0050\sin(2\pi ft)$
	X ₂₁	22	$X_{21}=1807,785-0,0026\cos(2\pi ft)-0,0015\sin(2\pi ft)$
	H ₂₁	24	$H_{21}=67,295+0,0127\cos(2\pi ft)+0,0035\sin(2\pi ft)$
	Y ₂₂	10	$Y_{22}=983.967+0.0003\cos(2\pi ft)+0.0079\sin(2\pi ft)$
	X ₂₂	18	$X_{22}=1536.100-0.0010\cos(2\pi ft)+0.0018\sin(2\pi ft)$
	H ₂₂	11	$H_{22}=68.956+0.0101\cos(2\pi ft)+0.0364\sin(2\pi ft)$
	Y ₂₄	19	$Y_{24}=984.379+0.0012\cos(2\pi ft)+0.0014\sin(2\pi ft)$
	X ₂₄	11	$X_{24}=1272.132-0.0073\cos(2\pi ft)+0.0005\sin(2\pi ft)$
	H ₂₄	18	$H_{24}=67.253+0.0135\cos(2\pi ft)-0.0271\sin(2\pi ft)$

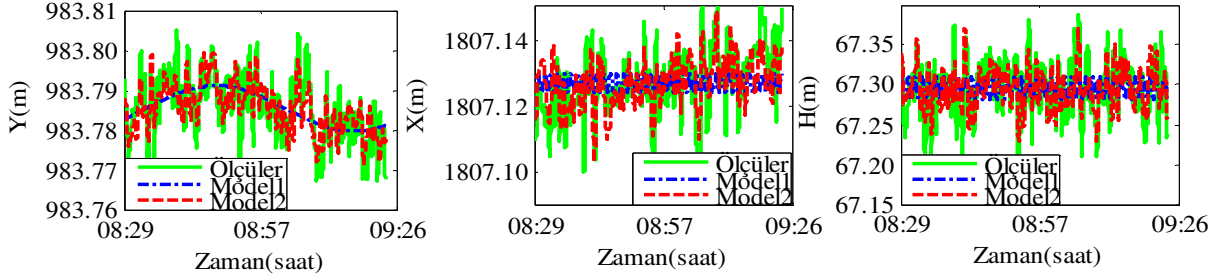
Köprü hareketlerinde var olan anlamlı frekanslara ait harmonik modeller(Model2), frekans sayısının çokluğu nedeniyle burada verilmemiş, ancak anlamlı frekanslar Ek-4’de verilmiştir. Ayrıca, Model2’den, Model1’den (maksimum frekansa göre belirlenen model) hesaplanan periyodik ve ölçülen tepki değerleri grafikleri aşağıda gösterilmiştir. Grafiklerde harmonik modellerden elde edilen tepki değerlerinin sergilediği periyodik hareketlerin ölçülerde var olan anlamlı periyodik hareketleri yansıttığı görülmektedir.



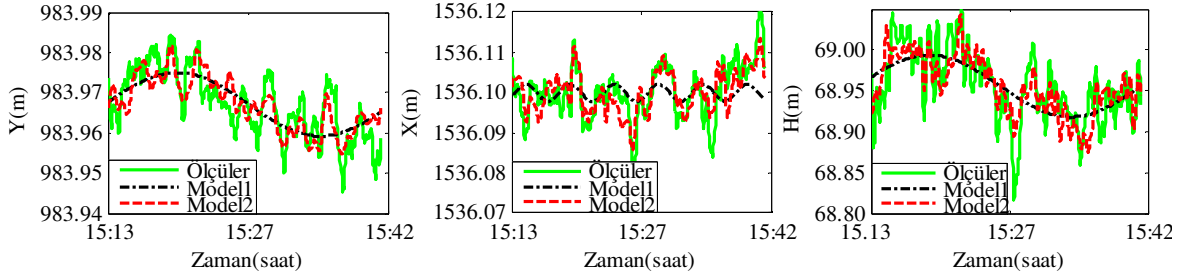
Şekil 5.51 14 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri



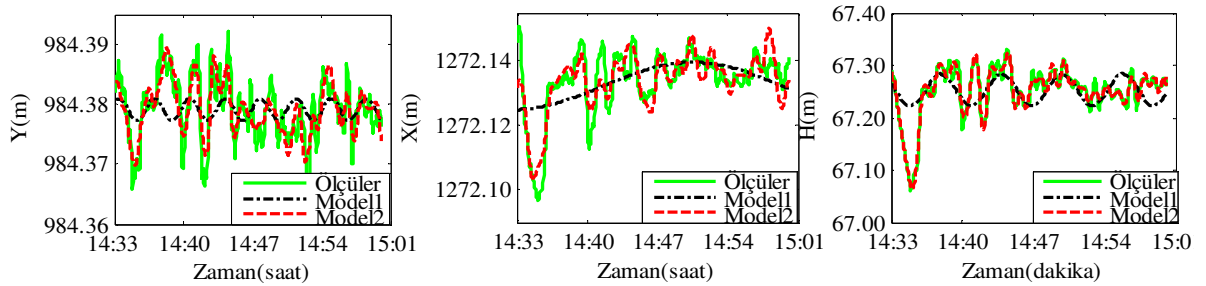
Şekil 5.52 18 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri



Şekil 5.53 21 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri



Şekil 5.54 Tabliye orta noktasının ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri



Şekil 5.55 24 numaralı noktanın ölçülen ve modellerinden hesaplanan tepki grafikleri

Diğer yandan, çok sayıda anlamlı frekans içeren periyodik modellerden hesaplanan tepki değerlerinden yararlanılarak (4.27) eşitliği ile trend bileşeni giderilmiş serilerden periyodik bileşenler de giderilerek, yapı hareketleri zaman serilerinin stokastik kesimleri de elde edilmiştir. Başka bir ifade ile yapı hareketlerine ait zaman serilerindeki deterministik kesim belirlenmiştir.

5.6.3 Stokastik Bileşen Analizi

Harmonik analiz ile hesaplanan Y, X ve H yönlerindeki değişimler zaman serilerinden (4.27) eşitlik ile giderilerek, durağan seri Z_p elde edilmiştir. Durağan hale getirilen zaman serileri stokastik sürecin ortalama ve standart sapma değerleri yeniden hesaplanarak Çizelge (5.20)'de verilmiştir. Çizelgede de görüldüğü gibi, harmonik analiz ile serilerdeki anlamlı periyodikler giderildikten sonra elde edilen stokastik bileşenin ortalamasının "0" ve standart sapmasının "1" olmadığı belirlenmiştir (ortalama sıfır kabul edilebilir). Çünkü belli bir zaman süreci içinde köprüde yapılan gözlemlerle (örnek değerlerden) analizler yapıldığı için bu durum ortaya çıkmıştır. Eşitlik (4.28) yardımıyla seriler yeniden standardize edilerek ortalaması "0" ve standart sapması "1" olan tam standardize stokastik bileşen elde edilmiştir.

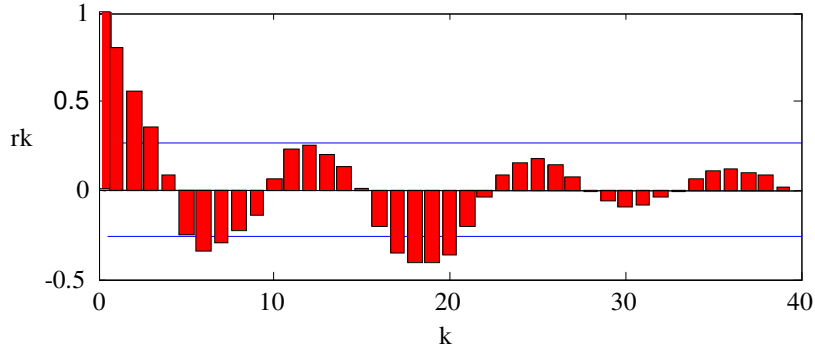
Çizelge 5.20 Periyodik bileşenden arındırılmış serilerin ortalama ve standart sapma değerleri

Yapı	N.No	Koordinat Bileşeni	Ortalama	Standart Sapma
Kule	14	Y	2,4805e-011	1,008
		X	8,1981e-011	1,158
		H	-3,2267e-010	1,737
	18	Y	2,9410e-013	1,050
		X	1,4888e-011	1,040
		H	-1,5049e-010	1,118
Tabliye	21	Y	-2,3039e-010	1,253
		X	-2,0823e-010	1,447
		H	-3,2490e-012	1,431
	22	Y	9,8233e-011	1,251
		X	1,2690e-010	1,273
		H	2,1821e-012	1,256
	24	Y	3,6517e-010	1,191
		X	1,6645e-010	1,211
		H	1,2316e-012	1,022

5.6.3.1 Stokastik Bileşenin İç Bağımlılığının Belirlenmesi

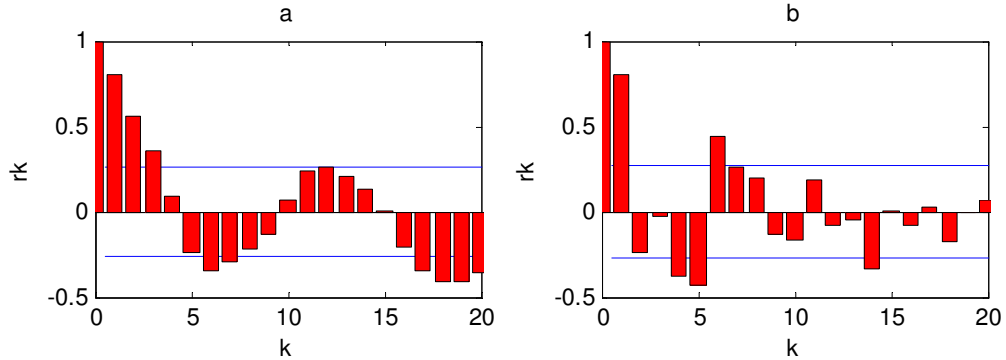
Köprü hareketleri zaman serilerinin ve periyodiklikten arındırılmış tam standardize stokastik sürecin iç bağımlılıkları (3.16) eşitliği ile tanımlanan otokorelasyon katsayılarının hesaplanması ile belirlenmiştir. Kısmi-otokorelasyon katsayıları da (4.29), (4.30) ve (4.31) eşitliklerinden hesaplanarak, hem otokorelasyon hem de kısmi-otokorelasyon katsayılarının (3.18) eşitliği ile belirlenen, %95 güven düzeyinde, güven aralıkları içinde kalıp kalmadıkları test edilmiştir.

Örneğin; 14 numaralı noktanın ölçülen H yönündeki değişimleri zaman serilerinin otokorelasyon katsayıları (3.16) eşitliği ve katsayılarının %95 güven düzeyi için güven aralıkları (3.18) eşitliği ile hesaplanmış ve Şekil (5.56)'da gösterilmiştir.



Şekil 5.56 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri zaman serileri stokastik kesimi otokorelasyon katsayıları

Şekil 5.56 'da zaman serisinin otokorelasyon katsayılarının %95 güven düzeyinde anlamlı salınımlar yaptığı görülmektedir. Bu anlamlı salınımlar harmonik analiz ile serilerden giderilmiş ve otokorelasyon fonksiyonundaki periyodik hareketler de ortadan kaldırılmıştır. Daha sonra, durağanlaştırılmış 14 numaralı noktanın H yönündeki zaman serisinin hesaplanan otokorelasyon fonksiyonu Şekil (5.57-a)'da sinüzoidal olarak azalma göstermesi, bu serinin modelinde otoregresif terimlerinin bulunabileceğini göstermiştir. Aynı şekilde durağan serinin hesaplanan kısmi-otokorelasyon fonksiyonunun da anlamlı olması, modelde hareketli ortalama terimlerinin de var olabileceğini göstermiştir (Şekil 5.57-b). Ancak, serilerdeki periyodik hareketlerin tamsayı frekanslarda olmasından dolayı ölçülerdeki periyodik hareketler tam olarak giderilemediğinden periyodik hareketler otokorelasyon fonksiyonunda etkisini göstermiştir.



Şekil 5.57 14 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri durağan zaman serileri otokorelasyon (a) ve kısmi otokorelasyon (b) katsayıları

Çalışmada yer alan yapının diğer yönlerdeki değişimleri durağan serilerinin de otokorelasyon ve kısmi-otokorelasyon katsayıları grafikleri çizilerek olası otoregresif veya hareketli ortalamalı otoregresif modellerin belirlenmesi için ön fikirler edinilmiştir. Ayrıca (Çizelge 4.1)'de verilen otokorelasyon ve kısmi-otokorelasyon fonksiyonları özelliklerinden de yararlanılmıştır.

5.6.3.2 Model Derecelerinin Belirlenmesi ve Prediksiyon Hatalarının Analizi

Yukarıda anlatılan bilgiler doğrultusunda zaman serilerinin stokastik bileşenini en iyi şekilde tanımlayabilecek AR(p) ve ARMA(p,q) modelleri araştırılmıştır. Şekil (4.6)'da verilen zaman serilerinde model belirleme aşamalarından da yararlanılarak, AR(p) için (4.36) eşitliği, ARMA(p,q) için (4.44) eşitliği kullanılarak oluşturulan modellerin parametreleri En Küçük Kareler Yöntemi ile (4.39) eşitliğinden tahmin edilmiştir. Bu tahminlerle en iyi modeli seçebilmek için AIC (4.46) eşitliği ve SBC (4.47) eşitliği kullanılarak en küçük AIC ve SBC değerlerini veren p ve q, model derecesi olarak seçilmiş ve Çizelge (5.21)'de stokastik bileşen için AIC kriterleri, en uygun modeller ve Q-istatistiği değerleri verilmiştir. Modelin uygunluğu Ljung-Box Q-istatistiği kullanılarak $\alpha=0,05$ yanılma olasılığında test edilmiştir. Bunun için modelin (4.49) eşitliği ile hesaplanan prediksyon hatalarının otokorelasyon katsayılarının (4.51) eşitliği ile hesaplanan $Q(k)$ değerlerinin, k-p-q gibi bir serbestlik derecesi ile χ^2 dağılımından küçük olduğu görülmüş ve (4.52) eşitliği ile tanımlanan modelin uygun olduğu H_0 hipotezi kabul edilmiştir. Başka bir ifade ile belirlenen prediksyon hataları k sayıdaki gecikme için $\alpha=0,05$ yanılma olasılığında anlamsız bulunmuştur.

Ayrıca, belirlenen modellere ait parametrelerin anlamlı olup olmadıklarını test etmek için de, her bir parametre değerinin “0” olduğu H_0 hipotezi ileri sürülmüş ve (3.20) eşitliği ile katsayıların test büyüklükleri hesaplanarak, f serbestlik derecesinde, $\alpha=0,05$ yanılma olasılığında t-dağılımının güven sınırı, $t_{f,1-\alpha/2}$ ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu, $\hat{t} > t_{f,1-\alpha/2}$ olduğundan modellerin parametrelerinin “0” beklenen değerinden sapmalarının anlamlı olduğu görülmüştür.

Ek-5'de Zaman serilerinin stokastik kesim için elde edilen modeller, modellerin parametreleri, standart hataları ve model dereceleri verilmiştir.

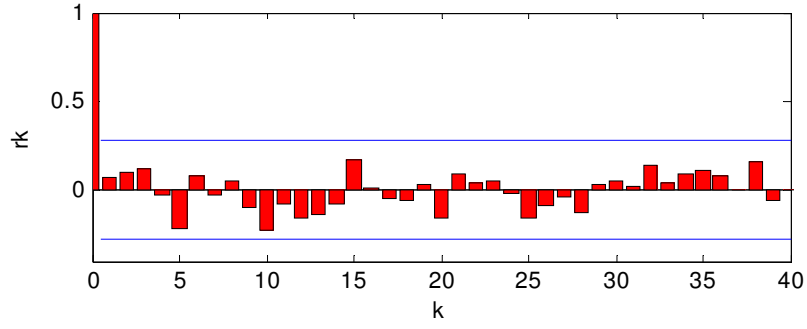
Çizelge 5.21 Zaman serilerinin stokastik bileşenleri için en uygun modeller ve kriterler

N.No	Koordinat Bileşeni	AIC/SBC Değerleri	Model Tipi	Ljung-Box Q-istatistiği $Q(k) < \chi^2_{1-\alpha, k-p-q}$
14	Y	128.587/ 135.574	AR(5)	$Q(25)=30.836 < \chi^2_{1-0,05, 25-5}=31,41$
	X	125.992/ 126.822	AR(1)	$Q(21)=19.060 < \chi^2_{1-0,05, 21-1}=31,41$
	H	88.353/97.854	AR(5)	$Q(25)=19.060 < \chi^2_{1-0,05, 25-5}=31,41$
18	Y	2.388/29.076	AR(8)	$Q(28)=31.291 < \chi^2_{1-0,05, 28-8}=31,41$
	X	119.133/120.440	AR(1)	$Q(21)=29.752 < \chi^2_{1-0,05, 21-1}=31,41$
	H	118.746/117.932	AR(5)	$Q(25)=29.408 < \chi^2_{1-0,05, 25-5}=31,41$
21	Y	-836.247-678.539	AR(22)	$Q(42)=26.718 < \chi^2_{1-0,05, 42-22}=31,41$
	X	-1218.06/-1074.417	AR(18)	$Q(38)=30.996 < \chi^2_{1-0,05, 38-18}=31,41$
	H	-1087.659/-952.476	AR(17)	$Q(37)=31.139 < \chi^2_{1-0,05, 37-17}=31,41$
22	Y	-2662.022/-2552.477	ARMA(3,9)	$Q(32)=31.402 < \chi^2_{1-0,05, 32-3-9}=31,41$
	X	-1522.596/-1465.969	ARMA(3,6)	$Q(29)=20.863 < \chi^2_{1-0,05, 29-3-6}=31,41$
	H	-2414.948/-2229.928	AR(22)	$Q(42)=30.262 < \chi^2_{1-0,05, 42-22}=31,41$
24	Y	-793.123/-707.017	ARMA(7,7)	$Q(34)=31.118 < \chi^2_{1-0,05, 34-7-7}=31,41$
	X	-1286.875/-1228.473	ARMA(3,6)	$Q(29)=25.017 < \chi^2_{1-0,05, 29-3-6}=31,41$
	H	-2274.189/-2128.162	ARMA(7,11)	$Q(38)=30.369 < \chi^2_{1-0,05, 38-7-11}=31,41$

Boğaziçi Köprüsü'nün Y, X ve H yönlerindeki değişimleri zaman serilerinin stokastik bileşeni analizinde, bu bileşenin anlamlı kesiminin AR ve ARMA tipi modellerle izah edilebileceği belirlenmiştir. Yapının farklı yönlerdeki değişimlerden, 3 tanesi AR(5) modeline, 2 tanesi AR(1) modeline, 2 tanesi ARMA(3,6) modeline, 2 tanesi AR(2) modeline ve diğer noktalarda birer tane olmak üzere farklı derecelerdeki modellere uydukları görülmüştür (Çizelge 5.21). Bazı noktalarda model derecelerinin çok büyük çıkması, daha önceden de açıklandığı gibi, serilerde geriye kalan periyodik hareketlerin stokastik bileşeni etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bununla birlikte modellere ait hataların otokorelasyon katsayıları (3.16) eşitliği ile hesaplanmış ve (3.18) eşitliği ile test edilerek %95 güven aralığı belirlenmiştir. Bütün modellerin hatalarının hesaplanan otokorelasyon katsayılarının öngörülen sınır değerleri içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Şekil (5.58)'de 14 numaralı noktanın H yönündeki zaman serisinin stokastik kesiminin AR(5) modelinden (4.49) eşitliği ile elde edilen hatalarının otokorelasyon katsayıları gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi otokorelasyon

katsayılarının $\pm 0,2596$ sınır değerleri içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Başka deyişle seçilen modelin uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 5.58 14 numaralı noktanın H yönündeki zaman serilerinin AR(5) modeli prediksyon hataları otokorelasyon katsayıları

Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin zaman serileri analizinde, stokastik kesim AR ve ARMA tipi modellerle deterministik olarak belirlenmiş ve böylece serilere ait modellerin matematiksel ifadesi daha da güçlendirilmiştir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Mühendislik yapıları rüzgar kuvveti, sıcaklık değişimleri ve trafik yükü gibi büyüklüklerin değişimlerine bağlı olarak farklı yönlerde, farklı büyüklükte ve şekillerde tepki göstermektedirler. Yapılarda meydana gelen bu tepkilerin ve etkiyen büyüklüklerin doğruluğu ve örnekleme frekansı yüksek olan uygun ölçüm donanımları ile izlenmesi sonucu yapı hareketlerinin doğru ve ayrıntılı tanımlanması yapılabilmektedir. Ölçülen etki ve tepki büyüklüklerinin zamana bağlı grafiklerinin elde edilmesi ile de yapı davranışları hakkında genel bir bilgi elde edilmektedir. Özellikle çok yoğun ölçülerle çalışılması durumunda grafiksel yorumlamalar çok daha faydalı bilgiler içermektedir.

Mühendislik yapılarının etki ve tepki büyüklüklerine bağlı olarak tanımlanmasında çok sayıda analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her biri farklı yaklaşımlarla sistemi farklı şekillerde tanımlamakta ve birbirlerini tamamlayıcı özellikler göstermektedirler.

Analiz yöntemlerinden ARX model ile sistemin transfer fonksiyonu sistemin hem geçmiş dönem tepkileri ile hem de geçmiş dönem etki büyüklükleri ile belirlenmektedir. Bu durumda sistem etkiye karşılık gecikmeli olarak tepki göstermekte ve böylece sistemin dinamik yapısını ortaya koymaktadır. Sistemin gecikme zamanlarının belirlenmesinde ise etki ve tepki büyüklükleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyan çapraz korelasyon analizinden yararlanılmaktadır. Ayrıca, ARX modelin regresyon analizine benzer bir çözüm özelliği göstermesi de dinamik sistemlerin transfer fonksiyonları için ARX modelin daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır.

Etki-tepki büyüklükleri ile sistemin transfer fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise regresyon ve çoklu regresyon analizidir. Regresyon analizinde ölçülen etki ve tepki büyüklüklerinin geçmiş dönem değerleri dikkate alınmamakta ve fonksiyonun çözümü geçmiş dönem değerlerinin olmadığı bir ARX modelin belirlenmesi şeklini almaktadır. Sistemin gecikme zamanları da belirlenmemektedir. Ancak regresyon analizinde etki ve tepki büyüklükleri arasındaki korelasyon belirlenmekte ve etkiyen büyüklüğün tepkimeye olan etkisi yüzde olarak ifade edilmektedir.

Bazı durumlarda sisteme etkiyen büyüklükler bilinmesine rağmen ölçülememektedir. Bu durumda sistem sadece tepki büyüklüğüne bağlı analizlerle ele alınmaktadır. Bu analizlerden zaman serileri analizi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Serinin bileşenleri olan trend, periyodik ve stokastik bileşenlerin çözümü ile sistem davranışının şekli ve fonksiyonları hem zaman hem de frekans bölgesinde belirlenebilmektedir.

Mühendislik yapılarının zaman serileri analizi ile tanımlamasında serideki trend bileşeni, sistemin çok daha uzun zamanlı periyodik hareketinin kısa zamanlı ölçü aralığı içerisinde trend şeklinde ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle seride var olan trend bileşeninin neden kaynaklandığının tespit edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde sistem tanımlamada kullanılacak model ve frekans değerleri beklenen değerlerden farklılık gösterecektir.

Zaman serilerinin analizinde özellikle periyodik bileşen analizinde sistem bilgisi frekans-genlik ve faz açıları ile ifade edilmektedir. Özellikle sistemin ölçülerle hesaplanan frekans değerlerinin, sistemin doğal frekansları ile karşılaştırılarak sistemin kalibrasyonu yapılabilmektedir.

Zaman serileri analizinde stokastik kesimin matematiksel olarak ifade edilmesi, sistemin transfer fonksiyonu ile hesaplanan değerlerinin beklenen değerlere yaklaşımadaki başarısını artırmaktadır. Stokastik kesimin AR, MA ve ARMA modellerinde tepkilerin geçmiş dönem değerlerinin dikkate alınması ile model etki büyüklüğünün olmadığı bir ARX model şekli almaktadır. Ancak, zaman serisinde periyodik bileşenler var ise bu bileşenler seriden tam olarak giderilemediğinden stokastik kesimin model dereceleri artırmaktadır.

Gerek ARX, AR, MA ve ARMA modellerin yeterliliğinde gerekse zaman serilerinin stokastik kesiminin anlamlı olup olmadığının belirlenmesinde otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının kullanılması, özellikle çok sayıda ölçülerle çalışılması durumunda karar verme aşamasında büyük yararlar sağlamaktadırlar.

Böylece etki ve tepki büyüklüklerine bağlı olarak dinamik sistemlerin parametrik olmayan yöntemlerle tanımlanmasında kullanılan analiz yöntemlerinin birbirlerini tamamlayıcı özellikler gösterdiği görülmüş ve bu yöntemler dinamik bir sistem olan İstanbul Boğaziçi Köprüsü'nün tanımlanmasında kullanılmıştır. Köprü'nün obje noktalarında sıcaklık değişimleri, rüzgar kuvveti ve trafik yüküne bağlı olarak gösterdikleri tepkileri uzaklık ölçme doğruluğu 1mm+1ppm, açı ölçme doğruluğu da 0,15 mgon olan TCA2003 ile eşit aralıklı ve ardışık olarak yapılmıştır (Çizelge 5.3).

Bütün obje noktaları için belirlenen etki ve tepki büyüklükleri grafiklerden yararlanılarak, köprü'nün gösterdiği tepkinin etkiyen büyüklüklerden kaynaklandığı, köprü'nün simetrik olmasından da yararlanılarak özellikle etkiyen yükler altında kulelerin benzer davranışlar sergilediği ve tabliyenin düşey yöndeki hareketlerinin Y ve X yönlerindeki hareketlerine göre daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Boğaziçi Köprüsü'nün her bir etki büyüklüğü her bir tepki büyüklüğü arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade eden, Çizelge (5.10)'daki ARX modellerin kulelerin davranışlarını tanımlamada uygun olduğu görülmüştür. Boğaziçi Köprüsü kulelerinin etkiye karşılık tepkimelerinde gecikme olduğu (Çizelge 5.10), bu gecikme zamanının ARX modelden hesaplanan ve ölçülen tepki büyüklükleri arasındaki farkın belirgin olarak ortaya çıktığı zaman noktası ile (Ek-2) uyumlu olduğu görülmüştür.

Boğaziçi Köprüsü kulelerinin Y, X ve H yönlerindeki değişimleri ile köprüde etkili olan her bir yük arasındaki matematiksel ilişki polinom fonksiyonlarla da belirlenmiştir (Çizelge 5.12). Yapının Y, X ve H yönlerindeki değişimleri ile rüzgar kuvveti, trafik yükü ve sıcaklık değişimleri arasında oluşturulan modellerin belirlilik katsayılarının (R^2), kulelerde aynı yükler için benzer elde edilmiştir. Ayrıca, her iki kule için de rüzgar kuvveti ve trafik yükü etkileri ile Y yönündeki değişimler arasında yüksek bir korelasyon olduğu, böylece köprünün yanal yöndeki hareketlerinin oluşumunda rüzgar kuvveti ve trafik yükünün çok daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. İkili yük durumunda yapılan analizlerde, 14 numaralı noktanın Y yönündeki değişimleri ile rüzgar kuvveti ve trafik yüküne (R+Tr) bağlı olarak öngörülen modelde trafik yükünün, 18 numaralı noktanın H yönündeki değişimleri ile trafik yükü ve sıcaklık değişimlerine (Tr+S) bağlı olarak öngörülen modelde de, sıcaklık değişimlerinin istatistiksel olarak etken bir büyüklük olmadığı sonucuna varılmıştır. 18 numaralı noktanın yanal yöndeki değişimleri ile ikili yükler arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Üç farklı yük (sıcaklık değişimleri, rüzgar kuvveti ve trafik yükü) durumuna bağlı çoklu regresyon analizinde, 14 numaralı nokta için X, 18 numaralı nokta için de Y ve H yönlerinde trafik yükünün çok fazla etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tabliye ve kulelerin zaman serileri analizinde, (Çizelge 5.15 trend bileşeninin, özellikle kulelerde, yapılan ölçülerin elde edilme süreçlerinin yapının periyodik hareketini tamamlama sürecinden küçük olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Yapının Y, X ve H yönlerindeki zaman serilerinin HFD analizinde dikkate alınan frekans aralığı tabliye için 0-0.5 Hz, kuleler içinde 0-0.00083 Hz arasında ele alınmıştır. Yapının yüksek frekans bileşenleri, (Çizelge 5.17) kulelerde yaklaşık aynı olup, maksimum genlikler Y yönündeki değişimlerde ve 14 numaralı noktanın H yönündeki serisinde ortaya çıkmıştır. Tabliye hareketlerinin maksimum yüksek frekansları ise 22 ve 24 numaralı noktaların bulunduğu Y yönündeki frekansları hariç diğer yönlerdeki değişimler için yaklaşık aynı olduğu görülmüş ve maksimum genlikler beklenildiği gibi H yönünde ortaya çıkmıştır. Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye orta noktasının yüksekliğine (H) ait (Çizelge 5.17)'deki

yüksek-frekans değerlerinin, Boğaziçi Köprüsü'nün düşey yöndeki ilk 6 moduna ait doğal frekans ve periyot değerlerini (Çizelge 2.4) yansıttığı görülmüştür. Bu noktalardan 21 ve 24 numaralı noktaların bulunduğu tabliye kesimi düşey yöndeki değişimleri ölçüsünden hesaplanan maksimum frekansları ($f_{21}=0,37428\text{Hz}$, $f_{24}=0,37207\text{Hz}$) 5. modun ($f=0,378\text{Hz}$), tabliye orta noktasının frekansı ($f_{22}=0,28027\text{Hz}$) da 4. modun frekans ($0,288\text{Hz}$) ve periyotları ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapı hareketlerinin istatistiksel test sonucu anlamlı alçak frekansları sayısı Çizelge (5.19) 'da gösterilmiştir. Ayrıca, köprünün hem maksimum frekans hem de anlamlı bütün frekans değerine göre belirlenen harmonik modelleri elde edilmiştir (Şekil 5.51, 5.52, 5.53, 5.54, ve 5.55'de anlamlı frekans bileşenlerine göre belirlenen harmonik modellerin grafikleri ve Ek-4'de de frekans değerleri verilmiştir). Elde edilen harmonik modellerden hesaplanan tepkilerle, ölçülen tepkilerin grafikleri incelendiğinde (Şekil 5.51 ve Şekil 5.52), kulelerin yanal (Y) ve boylamasına (X) yönlerdeki periyodik hareketlerini ölçü süresi içerisinde tamamlamadığı görülmüş ve kulelerin tam periyodik hareketleri için ölçülerin daha uzun zaman içerisinde alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Harmonik analiz ile serilerdeki anlamlı periyodikler giderildikten sonra elde edilen stokastik bileşen değerleri standardize edilerek tam standardize stokastik bileşen elde edilmiştir. Standartlaştırılan serilerin otokorelasyon ve kısmi-otokorelasyon katsayılarının ilk gecikmelerde %95 güven sınırlarının dışına çıktığı gözlenmiştir. Serilerin ilk gecikmelerde %95 güven sınırları dışına çıkması, serilerin iç bağımlılığının olduğunu gösterdiğinden otoregresif modeller denenmiş olup; noktalardan 3 tanesi AR(5), 2 tanesi AR(1), 2 tanesi ARMA(3,6), 2 tanesi AR(2) ve diğer noktalarda birer tane olmak üzere farklı derecelerdeki modellerine uyduğu "Akaike Bilgi kriteri ve %5 yanılma olasılığında Ljung-Box Q-istatistiği ile belirlenmiştir (Çizelge 5.21). Bazı noktalarda model derecelerinin çok büyük çıkması, serilerde tam olarak giderilemeyen periyodik hareketlerin stokastik bileşeni etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ek-5'de obje noktalarının stokastik bileşen modelleri parametrelerine ait bilgiler verilmiştir.

Son olarak da, mühendislik yapılarında meydana gelebilecek olası kazaların önceden belirlenerek zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak amacıyla yapıların sürekli olarak izlenmesi ve bu izlenme sürecinde farklı disiplinlerle çalışılması gerektiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abo-Hamid, M., Utku, S., (1978), “ Analytical Study of Suspension Bridge Flutter”, Journal of Engineering mechanics, ASCE, Vol. 104, p.537-550
- Akaike, H., (1973), “Contribution to the Discussion of Chatfield and Prothero”, J. R. Statist. Soc., A, 136, 330
- Allen, R. ve Milles, D., (2004), “Signal Analysis”, Wiley Interscience, John Wiley&Sons
- Anderson, T. W., (1971), “The Statistical Analysis of Time Series”, New York, Wiley
- Ashkenazi, V.,(1997), “Experimental Monitoring of the Humber Bridges Using GPS”, Instn. Of Civil Engrs., 120, p.178-182
- Arsoy, S., (1999), “Experimental and Analytical Investigations of Piles and Abutments of Integral Bridges”, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University
- Bayazıt, M., (1996), “İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri”, İTÜ, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul
- Bergland, G. D., (1969), “A Guide Tour of the Fast Fourier Transform”, IEEE Spectrum, Vol. 6, pp. 41-55
- Bilirgen, F. ve Kahraman, F., (2001), “Otokorelasyonlu Verilerde Proses Kontrol Tekniklerinin Uygulanması”, Ç.Ü., Endüstri Müh. Böl. ABD, Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M.,(1970), “Time Series Analysis, Forecasting and Control”, San Francisco
- Box, G. E. P., Pierce, D. A., (1970), “Distribution of Residual Autocorrelations in Autoregressive-integrated Moving Average Time-Series Models”,J. Amer. Statist. Ass., 65,1509-26
- Bloomfield, P.,(1976), “Fourier Analysis of Time Series”, An Introduction, New York, Wiley
- Boljen, J., (1983), “Ein Dynamisches Modeli zur Analyse und Interpretation von Deformationen”, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, No. 122
- Boljen, J., (1984), “Statische, Kinematische und Dynamische Deformationsmodelle”, Zeitschrift Vermessungswesen 109, pp. 461-468
- Bosch, P. P. J. Ve Klauw, A. C.,(2000), “Modeling, identification ve Simulation of Dynamical Systems”, CRS Press, p. 195.
- Bulson, P. S., Caldwell, J. B., Severn, R. T., (1983), “Engineering Structures Developments in the Twentieth Century”, The University of Bristol Press, Bristol
- Celasun, H. S., (1981), “Asma Köprüler”, İ.D.M.M. Akademisi Yayın Müd. Basımevi, İstanbul
- Chatfield, C., (1996), “The Analysis of Time Series, An Introduction” , Fifth Edition, Chapman & Hall/Crc
- Chatfield, C., (1992), “Analysis of Time Series”, An Introduction, 4th Edition, London, Chapman and Hall/Crc
- Cheng, P., John, W., Zheng, W., (2002), “Large Structure Health Dynamic Monitoring Using

GPS Technology”, FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA

Chen, Y. Q., /1983), “Analysis of Deformation Surveys, A Generalised Method”, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Technical Report No.94

Chen, Y. Q. ve A. Chrzanowski, (1986), “An Overview of the Physical Interpretation of Deformation Measurements Workshop Modern Methodology in Precise Engineering and Deformation surveying” II. MIT, Cambridge, Mass., USA. Proceedings, pp. 207-220

Chrzanowski, A., J., Secord, (1983), “Report of the Ad-Hoc Committee on the analysis of Deformation Surveys”, XVII. FIG Congress, Toronto, p. 605.2

Chrzanowski, A., (1981), “With Contributions by Members of the FIG Ad-Hoc Committee”, A Comparison of Different Approaches into the Analysis of Deformation measurements”, FIG- XVI Congress, Montreux, p. 602.3

Chrzanowski, A., Y. Q., Chen, (1986), “Report of the Ad-Hoc Committee on the analysis of Deformation Surveys”, XVIII. FIG Congress, Toronto, p. 608.1

Cooper, R., G. ve McGillem, D. C., (1971), “İşaret ve Sistem Analizinde Olasılık Yöntemleri” (Prof. Yücel, M. tarafından 1998’de çevirisi yapılmıştır), YTÜ Yayınları, Sayı 28, İstanbul

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

Çetin, M., (1996), “Jeoistatistiksel Yöntem ile Nokta ve Alansal Yağışların Saptanması ve Stokastik Olarak Modellenmesi Örnek Havza Uygulamaları”, Doktora Tezi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 127, Adana

Delurgio, S. A., (1998), “Forecasting Principles and Application”, New York, Irving McGraw Hill Comp

Dumanoglu, A. A., Brownjohn, J. M. W., Severen, R. T., (1992), “Seismic Analysis of Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) Suspension Bridge”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, p. 881-906

Dumanoglu, A. A., Adanur, S., (1998), “Asma Köprülerin Dinamik Analizi”, İTÜ, İnşaat Fak., İstanbul

Dumanoglu, A. A. ve Severn, R. T., (1989), “Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Longitudinal and Lateral Ground Motion”, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, Vol. 87, p. 73-86

Dumanoglu, A. A. ve Severn, R. T., (1987), “Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Asynchronous Vertical Ground Motion”, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, Vol. 83, p. 701-730

Dumanoglu, A. A. ve Severn, R. T., (1985), “Asynchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges”, Part 1: Free Vibration , University of Bristol, Bristol, 1985

Eichhorn, A. ve Möhlenbrink, W., (2001), “Identification of Physical Parameters by Means of Differential Equations in the Adaptive Dynamic Filter Model”, The 10th FIG International Symposium on Deformation measurements, California

Ellmer, W., (1987), “Untersuchung Temperaturinduzierter Höhenänderung Eines Grobturbinenstisches”, Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der

Bundeswehr München, No.26, Neubiberg

Erkaya, H., (1987), “Mühendislik Yapılarındaki Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle Saptanması ve Bir Model Üzerinde Uygulanması” Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul

Ertürk, S., (2004), “Sayısal İşaret İşleme”, Kocaeli Üniversitesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 293 p

Fagan, F., Duniak, J., Xiaoning, G. ve Smith, D., (2004), “System Identification of Wind Loads on Low-Rise Buildings”, Texas University

Felgendreher, N.,(1981), “Studie Zur Erfassung und Verarbeitung von Mebdaten Dynamischer Systeme”, Deutsche Geodatische Kommission, Reihe B, No. 25, München

Felgendreher, N.,(1982), “Zu Modellierungsproblemen bei Dynamischen Systemen, Zeitschrift Für Vermessungswesen 107”, s. 125-129

Fuh, C., (2003), “ARMA ve Time Series Modeling”, Institute of Statistical Science Academia Sinica, Spring

Guo, J. J., Sang, R. B., Guo, S. J., Bai, T., (1997), “Big Building Displacement Monitoring of Tall Stucture Using GPS Technology”, Journal of Surveying Engineering, Vol. 121(1), p. 16-22

Grewal, M. S. ve Andrews, A. P., (2001), “Kalman Filtering theory and Practice Using Matlab”, Second Edition, Wiley İnterscience, New York

Gülal, E., (1997), “Geodaetische Überwachung einerTalsperre; eine Anwendung der Kalman Filtertechnik”, Doktora Tezi, Hannover Üniversitesi

Gülal, E., (1999), “Deformasyon Ölçülerinin Analizinde Dinamik Modelleme”, YTÜD

Gülal, E., (2001), “Some New Aspect In The geodetic Monitoring ”, Türkisch-German Days, Berlin

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

Gülal, E., (2004), “Sistem Teorisi Perspektifiyle Mühendislik Yapılarındaki Deformasyon Ölçülerinin Modellenmesi”, TUJK Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Zonguldak

Günel, A., (2003), “Regresyon Denkleminin Başarısını Ölçmede Kullanılan Belirleme katsayısı ve Kritiği”, Doğu Üniversitesi Dergisi, 4(2), p. 133-140

Hekimoğlu, Ş., (1981), “Rasgele Süreçler”, KTÜ Yayınları, Trabzon

Heck, B., J.J. Kok, W., Welsch, R., Baumer, (1982), “Report oh the FIG Working Group on the Analysis of Deformation Measurements”, pp. 337-415, Budapest.

Hesse, C., Heunecke, O., M. Speth, I. Stelzer, (2000), “Belastungsversuche an Einem Schalentragerwerk aus Ziegelsteinen”, XII. Internationaler Kurs für Ingeniervermessung München, pp. 340-345

Hespanha, J., (2005), “ System Identification”, ECE147C Lecture Notes,

Heunecke, O., (1995), “Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman- Filterung”, Doktora, Hannover Üniversitesi Jeodezi Enstitüsü

Heunecke, O., (2000), “Ingenieurgeodatische Beiträge zur Überwachung von Bauwerken,

- Workshop Dynamische Probleme-Modellierung und Wirklichkeit”, Proceeding, pp. 159-176
- Henchi, K., Fafard, M., (1997), “Dynamic Behaviour of Multi-Span Beams Under Moving Loads”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 199(1), p. 33-50
- Hipel, K. W. and McLeod, A. I., (1994), “Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems”, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands,
- Karabörk, M.Ç. ve Kahya, E., (1999), “Sakarya Havzasındaki Aylık Akımların Çok Değişkenli Stokastik Modellemesi”, J. Of Engineering and Enviromental Science, Vol. 23, p.133-147, Tübitak
- Kendall, M. ve Ord, J. K., (1990), “Time Series”, (3rd edn), Sevenoaks: Edward Arnold
- Kersting, N., (1992), “Zur Analyse Rezenter Krustenbewegungwn bei Vorliegen Seismotektonischer Dislokationen”, Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr, No. 42, Neubiberg
- Korürek, M., (2000), “Biyomedikal Mühendisliğinde Özel Konular”, Ders Notları, İTÜ, İstanbul
- Kuhlman, K., (2001), “Importance of Autocorrelation for Parameter Estimation in Regression Models”, Theory and Deformation Analysis, The 10th International Symposium on Deformation Measurements, California
- Kuhlman, H., (1996), “Ein beitrage zur Überwachung von Brückenbauwerken mit Kontinuierlich Regifrierten Messungen”, Nr. 218, Hannover
- 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
- Ljung, L., (1999), “System Identification Theory for the User”, Second Edition, Prentice Hall Ptr, Sweden
- Michaltsos, G. T., (2002), “Dynamic Behaviour of A Single-Span Beam Subjected to Loads Moving With Variable Speede”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 258(2), p. 359-372
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim Y., Poggi J., (1997), “Wavlet Toolbox User’s Guide the MathWorks”, Inc
- Montgomery, D. C., (1990), “Forecasting and Time Series Analysis”, Second Edit., New York, McGraw-Hill
- Nelles, O., (2000), “Nonlinear System Identification”, Springer, Verlag Berlin Heidelberg New York
- O’Connor, C. Ve Shaw., P., (2000), “Bridge Loads”, Spon Press, London, p.350
- Ochshorn, J., (1981), “Building Code, Wind Loads”, Department of Architecture, Cornell University, New York
- Özbek, L., (1996), “Dinamik Modellerde Ardışık Tahmin, Geri Beslemeli Kontrol ve Kamu Kesimi Madencilik Sektörü Üzerine Bir Uygulama”, Araştırma Sempozyumu, Ankara
- Özkara, T. S., (2005), “Uyku EEG’inde Karşılaşılan İlgiciklerin Sezimi Üzerine Bir Çalışma”, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara
- Pelzer, H., (1977a), “Zur Analyse Geodatischer Deformationsmessungen”, Deutsche

Geodatische Kommission, Reihe C, No. 164, München

Pelzer, H., (1977b), "Ein Modell zur Meßtechnischen und Mathematischen Erfassung Kontinuierlicher Deformationsvorgänge", XV. FIG Congress, Stockholm, p. 607.

Pelzer, H., (1978), "Geodatische Überwachung dynamischer Systeme", 2th International Symposium on Deformation measurements, Bonn,

Pelzer, H., (1987), "Ingenieurvermessung", Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 15, Stuttgart

Pindyck, R. ve Rubinfeld, D. L., (1991), "Economic Models and Economic Forecast", Third Edit., McGraw-Hill International Edit.

Polikar, R., (1996), "Wavelet Tutorial", Part I, Part II, Part III, Iowa State University, USA

Pugsley, S. A., (1968), "The Theory of Suspension Bridges", Second Edition, Edward Arnolds, London

Pocock, S. J., (1974), "Harmonic Analysis Applied to Seasonal Variations in Sickness Absence", Appl. Statist., p.103-20

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. 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., 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

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. Ve Lane, W. L., (1980), "Applied Modeling of Hydrologic Time Series", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, p. 484

Sevüktekin, M. ve Nargeleçekenler, M., (2005), "Zaman Serileri Analizi", Nobel Yayınları, s. 341, İstanbul

Shane, C., ve Jha, Ratneshwar, (2005), "Structural Damage Detection Using AR-ARX Models", Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University

Shin, G., (2004), "Health Monitoring for Base Isolated Structures Using Parameter Models", Research Experiences for Undergraduates in Japon in Advanced Technology, University California, Irvine

Soyluk, K., (1997), "Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Şen, Z., (2002), "İstatistik Veri İşleme Yöntemleri", Su Vakfı Yayınları, İstanbul

Taşcı, L., Yıldırım, B., Gökalp, E., (2004), "Kaya Dolgu Barajda Deformasyonların Jeodezik ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi", F.Ü, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,

16(2), 2005-219

Teskey, F., (1988), "Integrierte Analyse Geodatischer und Geotechnischer daten Sowie Physikalischer Modelldaten zur Beschreibung des Deformationsverhaltens Grober Erddamme unter Starischer Belastung", Deutsche Geodatische Kommission, Reihe C, No.341, München

Teskey, W. F., (1986), "Integrated Analysis of Deformation", Open Fie Report to the Department of Surveying Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada

Tülücü, K., (1996), "Uygulamalı Hidroloji", Ç.Ü. Ziraat Fakültesi, Genel Yayın No.138, Adana

Wenzel, H. Ve Picher, D., (2005), "Ambient Vibration Monitoring", John Wiley & Sons, Ltd.

Welsch, M. W. ve Heunecke, O., (2001), "Models and Terminology For the Analysis of geodetic Monitoring Observations", Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Grup 6.1, p. 21.

Welsch, W., (1996), "Geodetic Analysis of DynamicProcesses", Classification and Terminology", 8th International FIG-Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, pp. 147-156

Welsch, W., Heunecke, O., (1999), "Terminology and Classification of Deformation Models", 9th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Olsztyn, pp.416-429

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 İmplementation of the structural Health Monitoring System for Cable-Supported Bridges in Hong Kong", Proceeding of SPIE, Vol.3395, p. 266-276

Wolf, P. R.ve Ghilani, D. C., (1997), "Adjustment Computations, Statistics and Least Squares in Surveying and GIS", Wiley Series

Yaman, K., (2001), "Dinamik Çizelgeleme için Görüntü İşleme ve ARIMA Modeller", Gazi Ü., Müh. Mim. Fak.Der. Cilt 16, No:1, Ankara

Yu, Y. S.,Zou, S., Whittemore, D.,(1993), "Non-parametric Trend Analysis of Water Quality Data of Rivers in Kansas", Journal of Hydrology, 150, p. 61-80

Standart Specifications for Higway Bridges, AASHTO, 1998

Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, TCK Yay., No: 207, 1973

İnternet kaynakları:

International Federation of Surveyors (FIG) , <http://www.fig.net/>

Matlab, Version 7.0.0.19920 (R14), <http://www.mathworks.com/>

EKLER**EK 1 Referans Noktaları Dengeleme Sonuçları****1. Yersel Ölçülerin Dengeleme Sonuçları**(Y_s, X_s H_s ölçülerin standart sapması anlamındadır)

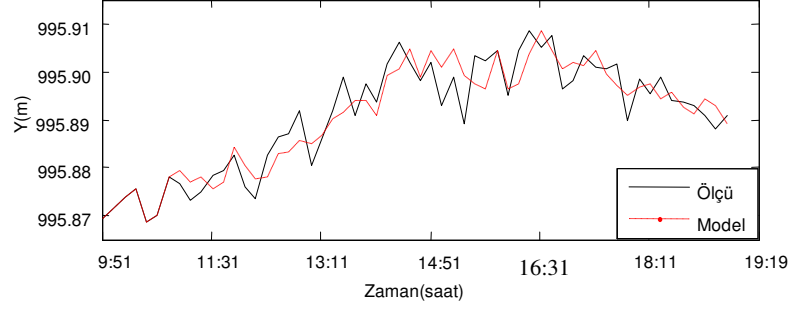
N.No	Y(m)	Y _s (mm)	X(m)	X _s (mm)	H(m)	H _s (mm)
1	644,6286	0,7	2023,5209	0,9	1,9591	6,1
3	945,7181	12,9	2723,1391	2,3	50,0556	22,0
4	424,0404	2,9	1006,6229	0,7	3,7652	6,8
5	1408,8481	2,5	950,9872	0,8	2,1967	7,8
6	902,2225	15,2	519,6878	1,9	67,3876	14,7
11	985,0486	2,9	2068,4458	1,7	4,5690	12,7
12	1015,9977	4,1	2068,4849	2,5	4,6256	17,2
13	999,9962	2,9	2070,0700	1,7	56,9251	12,8
15	985,1550	5,0	1001,7169	2,6	4,0392	17,4
16	1016,3681	5,0	1001,7611	2,7	4,9185	18,5
17	999,9989	4,7	1000,0061	2,3	56,9362	16,7
31	981,8302	4,9	2302,4777	2,5	50,2163	19,4
32	1013,4915	6,1	2302,4668	3,6	50,1921	23,9
33	989,1212	6,2	743,7398	2,8	49,4819	22,2
34	1015,7944	6,2	743,8070	2,9	49,4779	22,3

2.Yersel ve GPS Ölçülerin Dengeleme Sonuçları

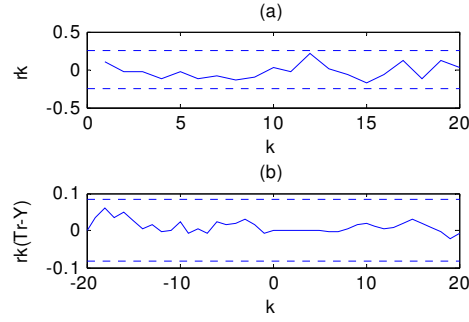
N.No	Y(m)	Ys (mm)	X(m)	X _s (mm)	H(m)	H _s (mm)
1	644,6294	3,5	2023,5233	2,4	1,9591	6,1
2	1552,4763	4,8	2186,3020	4,8	-	-
3	945,7160	4,3	2723,1435	2,5	50,0556	22,0
4	424,0423	3,4	1006,6250	2,8	3,7652	6,8
5	1408,8502	3,5	950,9904	3,1	2,1967	7,8
6	902,2382	4,4	519,6922	2,3	67,3876	14,7
11	985,0497	4,0	2068,4493	2,4	4,5690	12,7
12	1015,9978	4,4	2068,4891	2,7	4,6256	17,2
13	999,9972	4,0	2070,0722	2,5	56,9251	12,8
15	985,1579	4,7	1001,7200	2,9	4,0392	17,4
16	1016,3711	4,7	1001,7642	3,0	4,9185	18,5
17	1000,0036	4,2	1000,0100	2,6	56,9362	16,7
31	981,8320	5,2	2302,4786	2,7	50,2163	19,4
32	1013,4921	6,1	2302,4695	3,4	50,1921	23,9
33	989,1247	5,8	743,7428	3,0	49,4819	22,2
34	1015,7979	5,8	743,8101	3,1	49,4779	22,3

EK 2 Kule Hareketlerinin Tanımlanması İçin Belirlenen ARX Modeller, Otokorelasyon ve Çapraz-Korelasyon Analizi Grafikleri

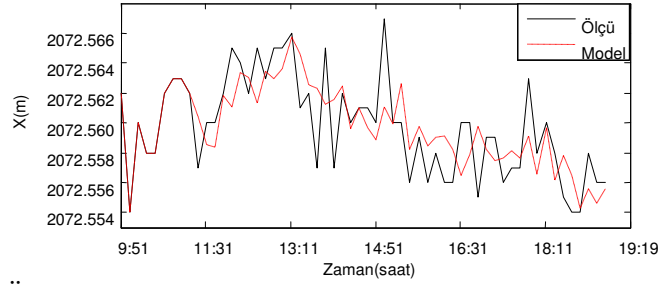
- 14 numaralı noktanın Y, X ve H yönlerindeki değişimleri ile trafik yükü arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri



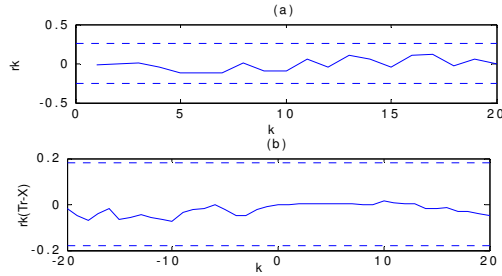
Şekil 2.1 Ölçülen ve ARX(7,3) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



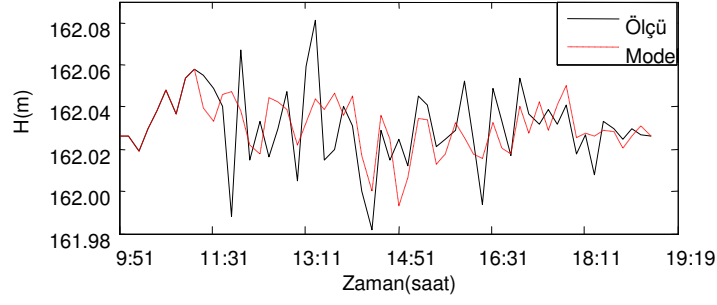
Şekil 2.2 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



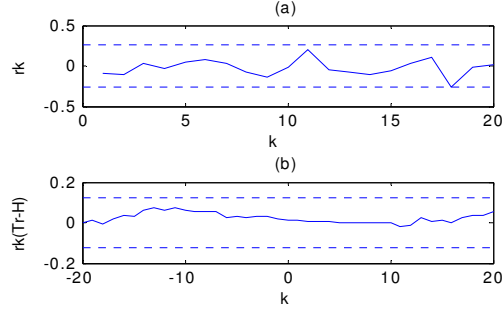
Şekil 2.3 Ölçülen ve ARX(7,2) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.4 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

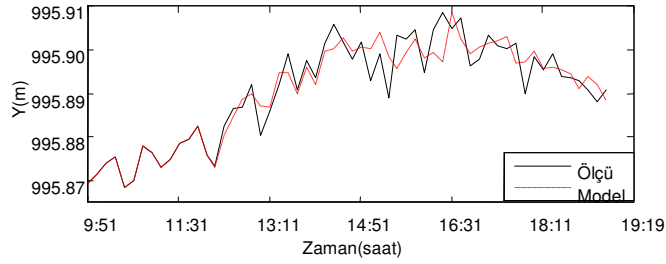


Şekil 2.5 Ölçülen ve ARX(8,4) modelden hesaplanan H yönündeki tepkiler

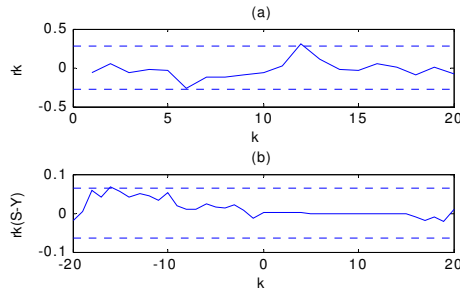


Şekil 2.6 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

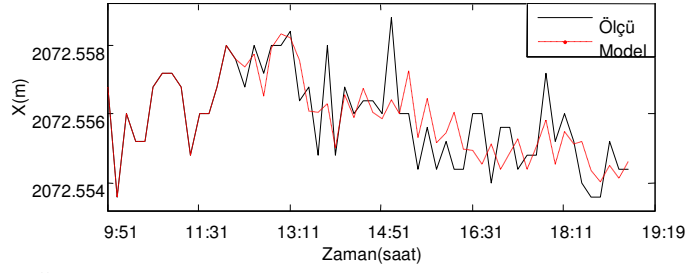
- 14 numaralı noktanın Y,X ve H yönlerindeki değişimleri ile sıcaklık değişimleri arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri



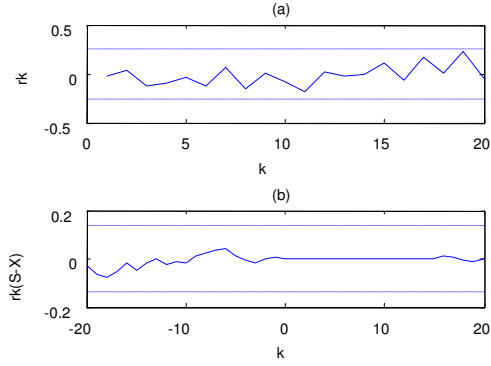
Şekil 2.7 Ölçülen ve ARX(9,10) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



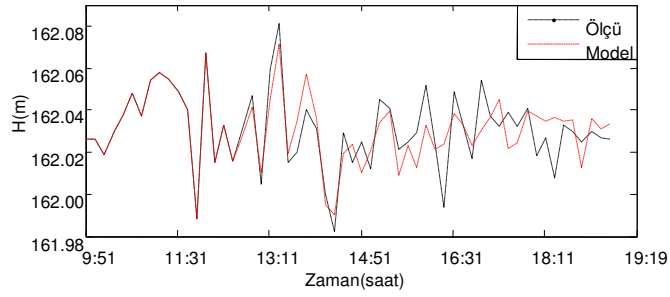
Şekil 2.8 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



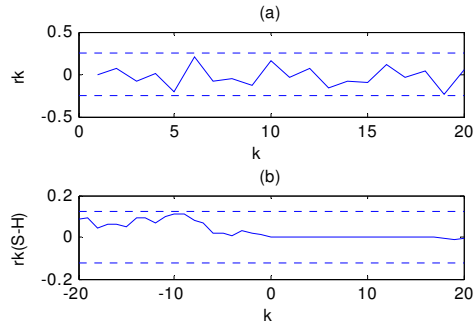
Şekil 2.9 Ölçülen ve ARX(7,9) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.10 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

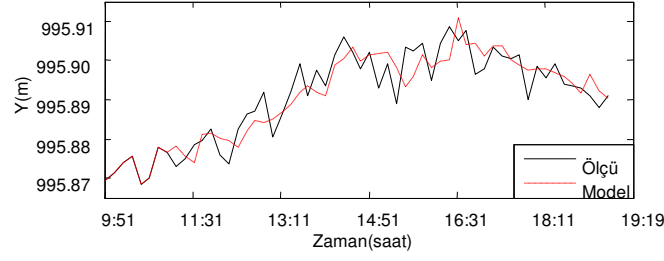


Şekil 2.11 Ölçülen ve ARX(9,8) modelden hesaplanan H yönündeki

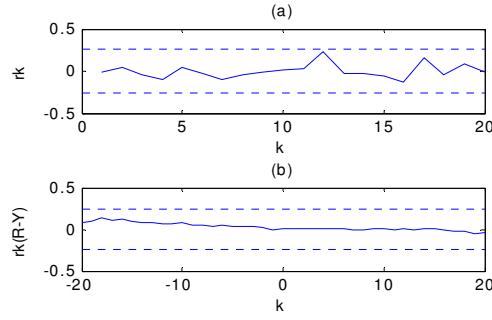


Şekil 2.12 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

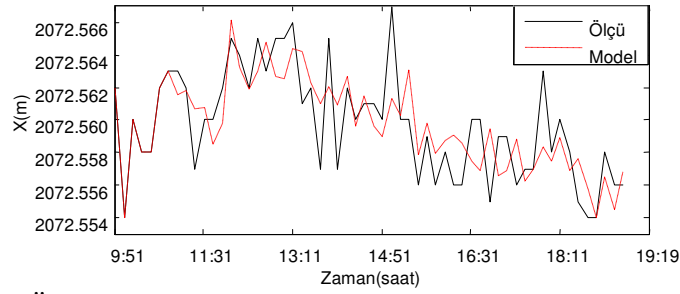
- 14 numaralı noktanın Y,X ve H yönlerindeki koordinat değişimleri ile rüzgar kuvveti arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri



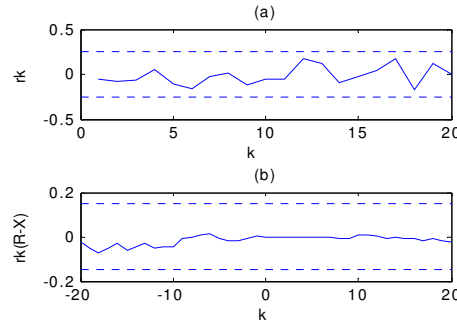
Şekil 2.13 Ölçülen ve ARX(8,2) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



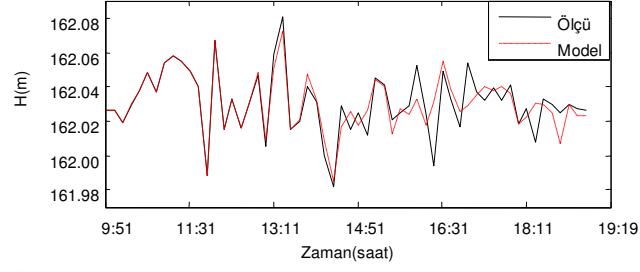
Şekil 2.14 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



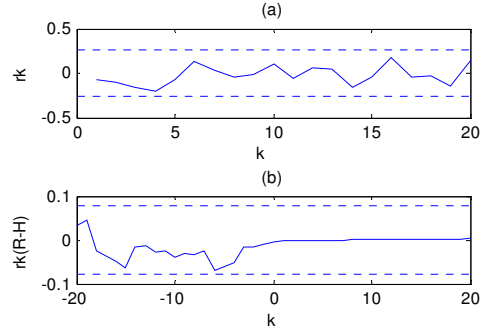
Şekil 2.15 Ölçülen ve ARX(7,4) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.16 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

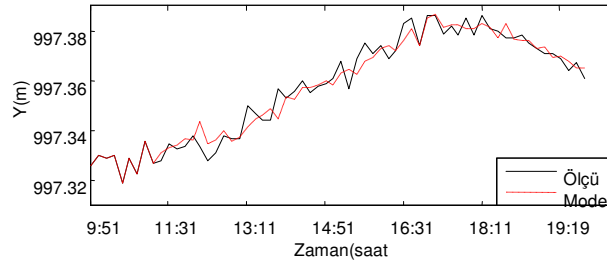


Şekil 2.17 Ölçülen ve ARX(9,9) modelden hesaplanan H yönündeki tepkiler

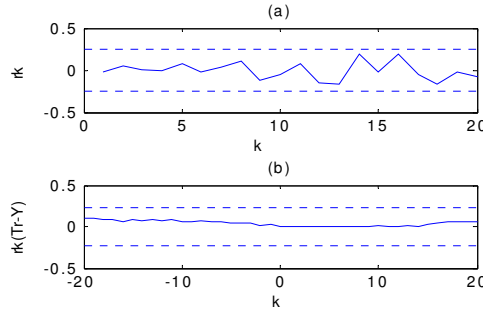


Şekil 2.18 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

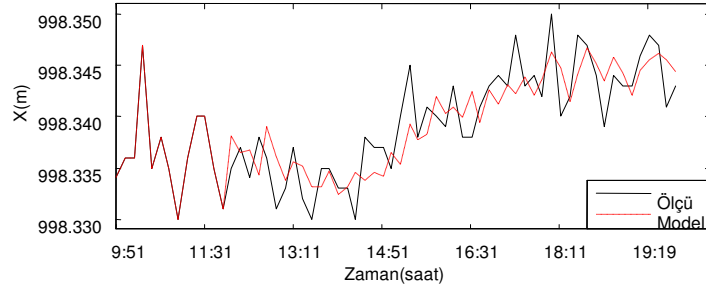
- **18 numaralı noktanın Y,X ve H yönlerindeki değişimleri ile trafik kuvveti arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri**



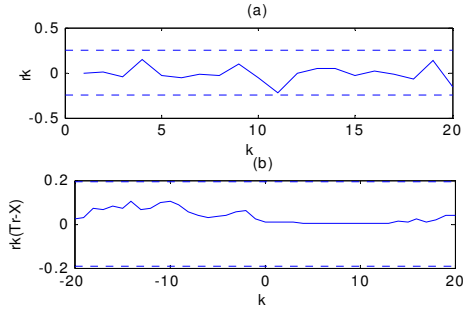
Şekil 2.19 Ölçülen ve ARX(5,6) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



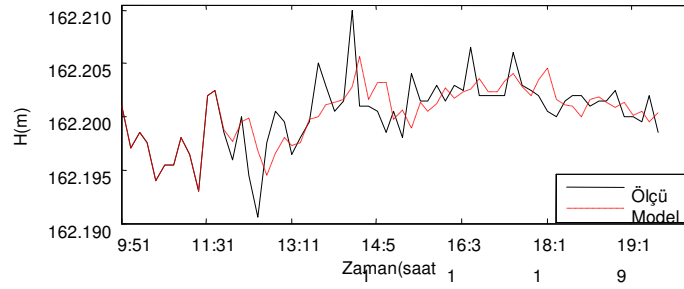
Şekil 2.20 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



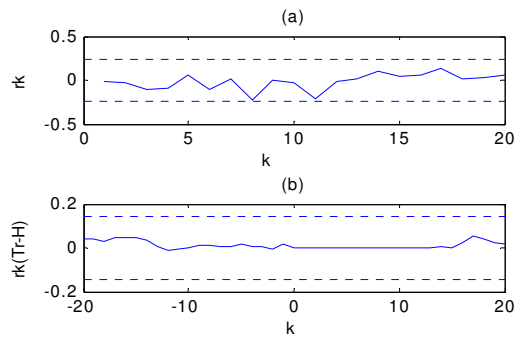
Şekil 2.21 Ölçülen ve ARX(7,5) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.22 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

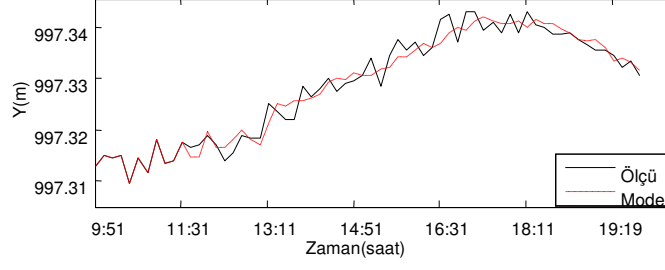


Şekil 2.23 Ölçülen ve ARX(5,4) modelden hesaplanan H yönündeki tepkiler

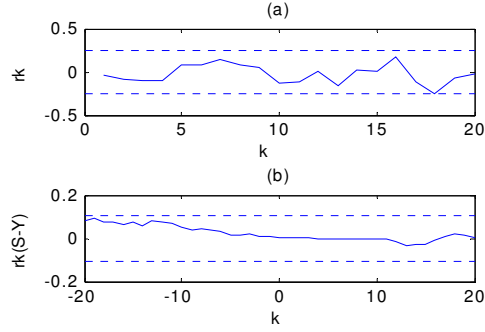


Şekil 2.24 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

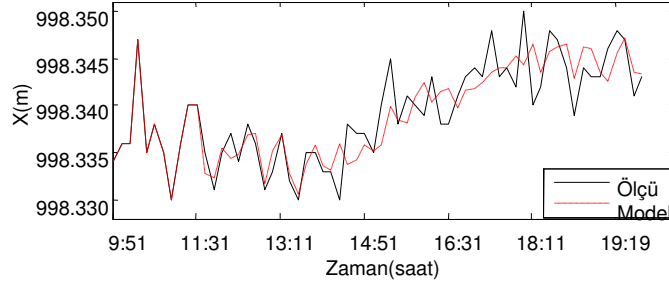
- 18 numaralı noktanın Y,X ve H yönlerindeki değişimleri ile sıcaklık değişimleri arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri



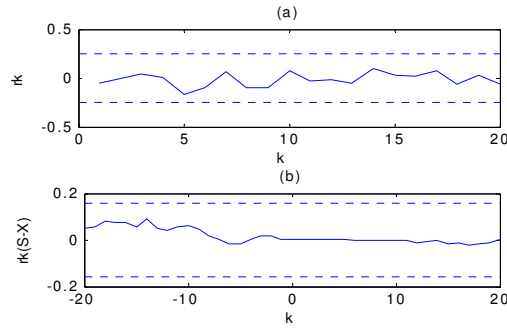
Şekil 2.25 Ölçülen ve ARX(4,8) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



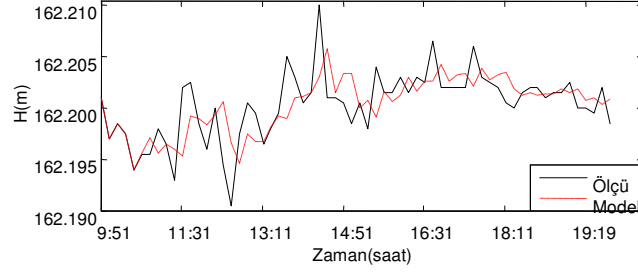
Şekil 2.26 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



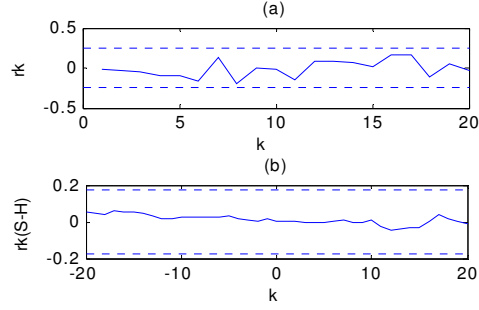
Şekil 2.27 Ölçülen ve ARX(7,5) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.28 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

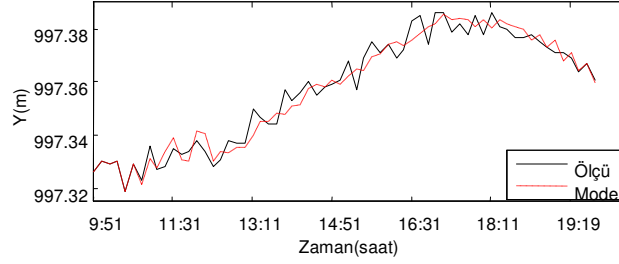


Şekil 2.29 Ölçülen ve ARX(4,2) modelden hesaplanan H yönündeki tepkiler

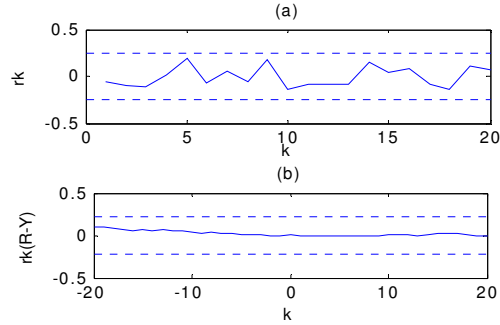


Şekil 2.30 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

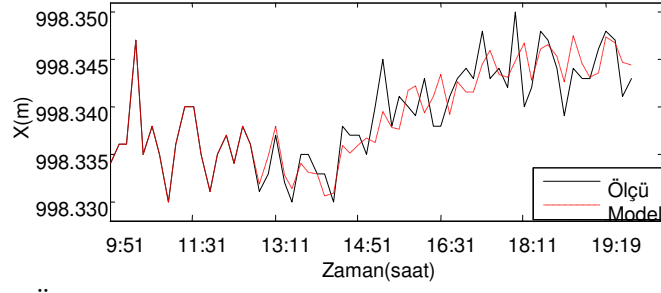
- 18 numaralı noktanın Y,X ve H yönlerindeki değişimleri ile rüzgar kuvveti arasındaki modeller, otokorelasyon ve çapraz-korelasyon grafikleri



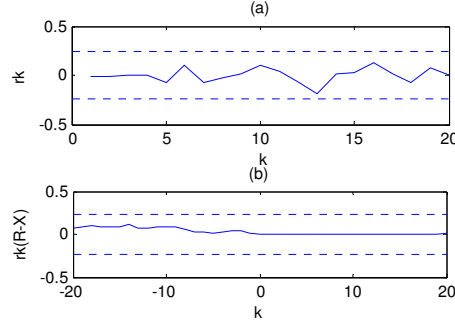
Şekil 2.31 Ölçülen ve ARX(3,6) modelden hesaplanan Y yönündeki tepkiler



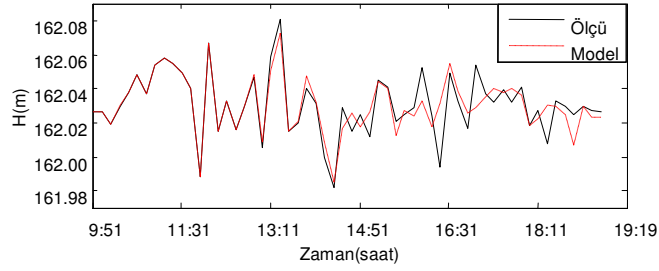
Şekil 2.32 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)



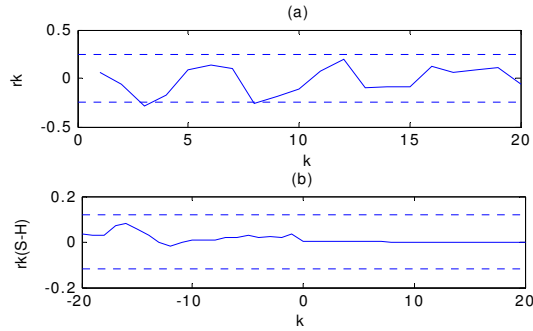
Şekil 2.33 Ölçülen ve ARX(7,9) modelden hesaplanan X yönündeki tepkiler



Şekil 2.34 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

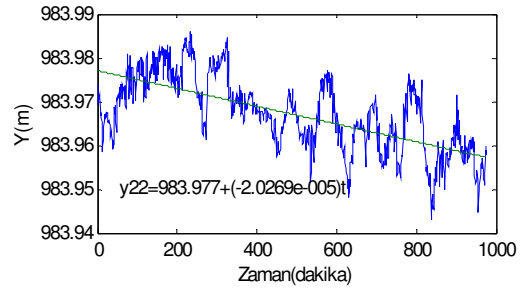
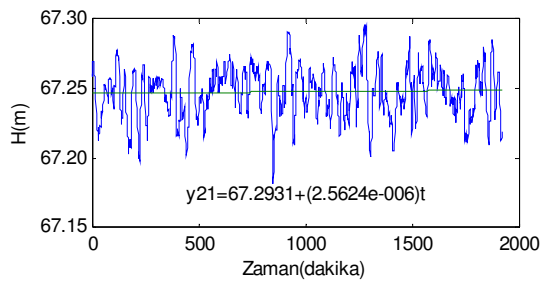
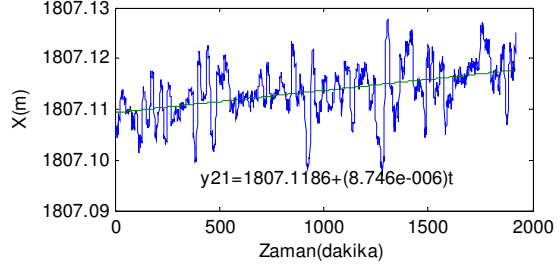
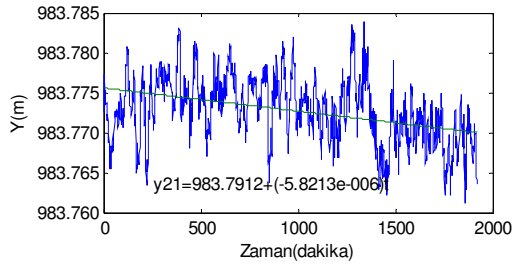
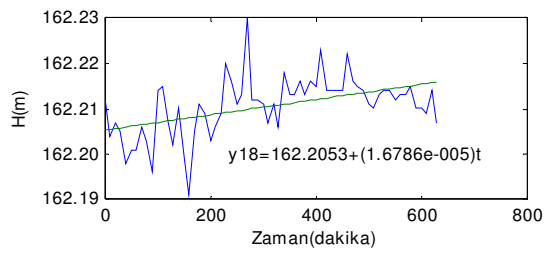
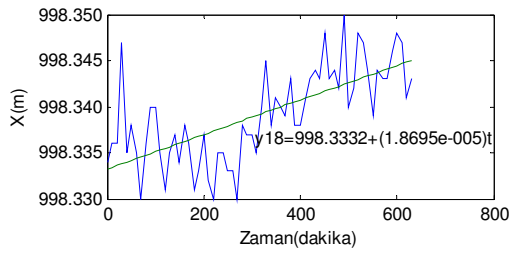
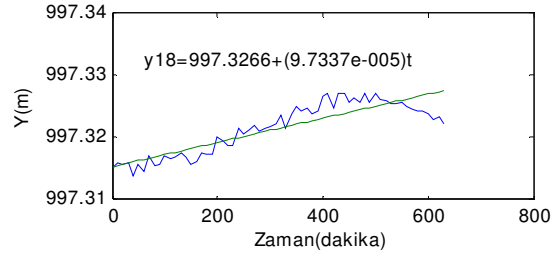
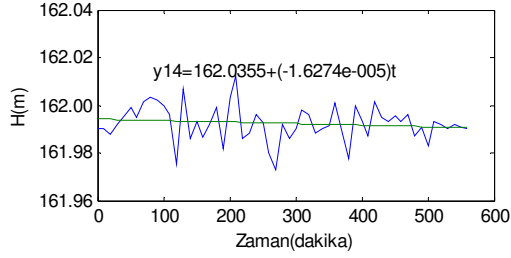
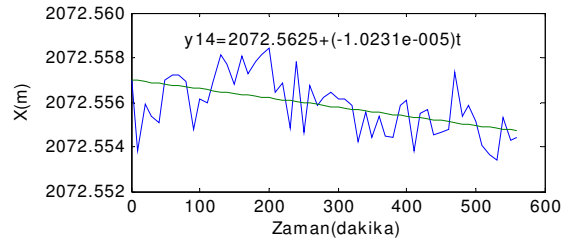
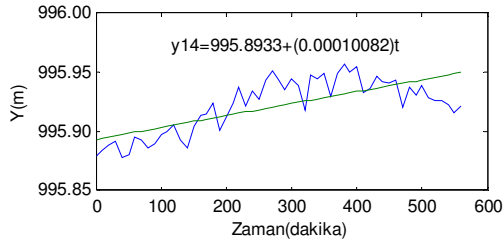


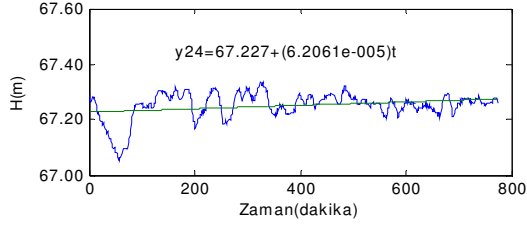
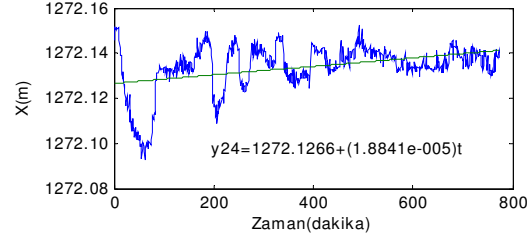
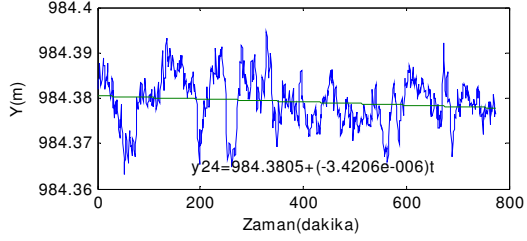
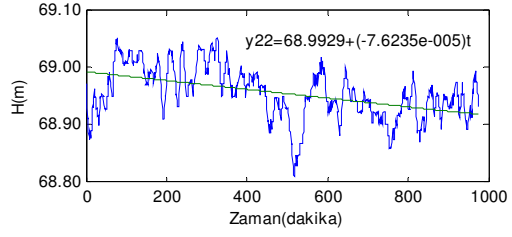
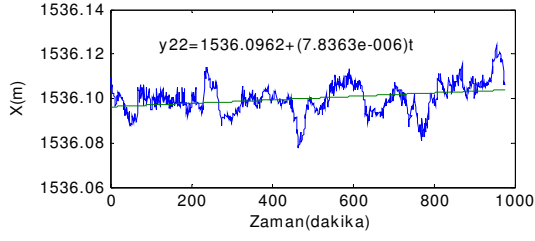
Şekil 2.35 Ölçülen ve ARX(5,10) modelden hesaplanan H yönündeki tepkiler



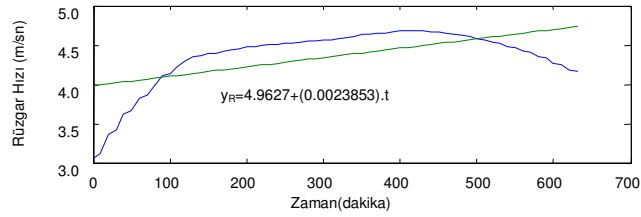
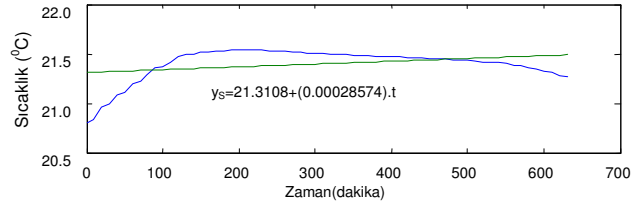
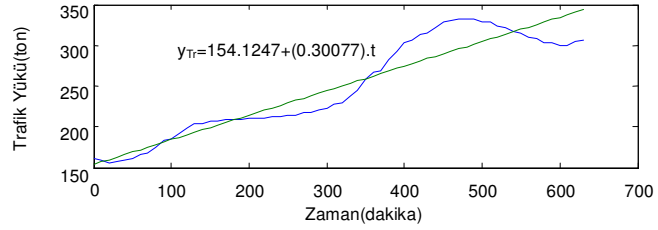
Şekil 2.36 Prediksiyon hatalarının otokorelasyon katsayıları (a) ve etki-tepki büyüklükleri çapraz korelasyon katsayıları (b)

EK 3 Yapının Y, X ve H Yönlerindeki Hareketleri ve Tepki Büyüklükleri Zaman Serileri Lineer Trend ve Zamana Bağlı Regresyon Fonksiyonları





• **Etkiyen Büyüklüklerin Lineer Trend ve Zamana Bağlı Regresyon Fonksiyonları**

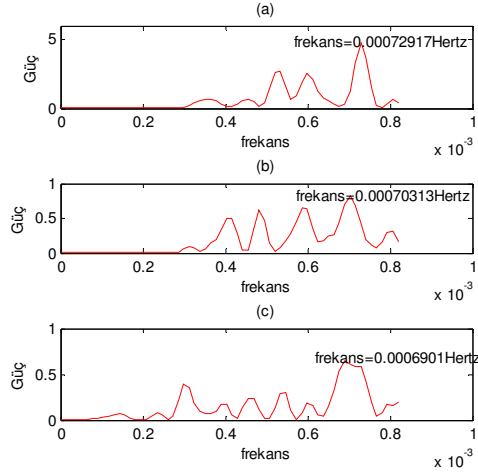


EK 4 Yapı Hareketlerinin Harmonik Analiz Sonucu Belirlenen Anlamlı Frekansları
(%95 Güven Düzeyi)

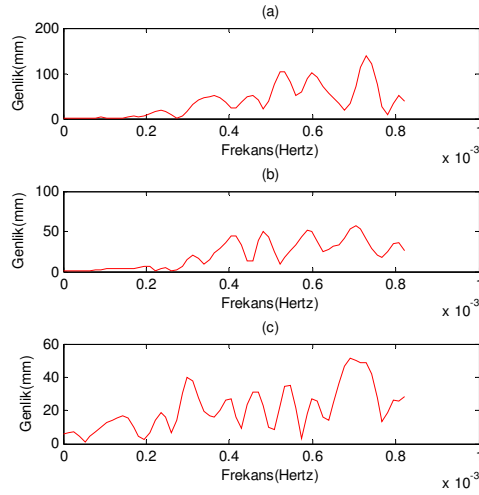
N.No	Anlamlı Frekanslar (Hz)		
	Y	X	H
14	0.00002604 0.00041670	0.0000260 0.0001302	0.0000521 0.0001302 0.0004557
18	0.00002604	0.0000260 0.0001042	0.0000260 0.0001042
21	0.00439	0.00049	0.00098
	0.00588	0.00293	0.00195
	0.00683	0.00586	0.00342
	0.00878	0.00879	0.00586
	0.01025	0.01025	0.00879
	0.01123	0.01123	0.01123
	0.01318	0.01367	0.01367
	0.01563	0.01611	0.01563
	0.01758	0.01758	0.01758
	0.01953	0.01953	0.01953
	0.02246	0.02246	0.02246
	0.02344	0.02393	0.02393
	0.02588	0.02588	0.02588
	0.02734	0.02686	0.02686
	0.03125	0.02783	0.02783
	0.03320	0.03125	0.02979
	0.03613	0.03369	0.03125
	0.04785	0.03564	0.03369
		0.03809	0.03564
		0.03906	0.03809
		0.04004	0.03906
	0.04736	0.04006	
		0.04443	
		0.04736	

N.No	Anlamlı Frekanslar (Hz)		
	Y	X	H
22	0.00098	0.00098	0.00098
	0.00488	0.00293	0.00391
	0.00879	0.00488	0.00781
	0.01074	0.00586	0.01172
	0.01465	0.00879	0.01855
	0.01953	0.01074	0.02637
	0.02344	0.01270	0.03027
	0.02637	0.01660	0.03418
	0.03027	0.01953	0.03711
	0.03320	0.02148	0.04102
		0.02441	0.04883
		0.02930	
		0.03418	
		0.03613	
		0.04102	
		0.04297	
		0.04492	
		0.04688	
24	0.000977	0.0009766	0.0009766
	0.002930	0.0029300	0.002930
	0.003906	0.005859	0.004883
	0.004883	0.006839	0.005859
	0.006836	0.008789	0.008789
	0.007813	0.009766	0.009766
	0.009766	0.01270	0.01172
	0.012700	0.01465	0.01270
	0.013670	0.01855	0.01465
	0.01465	0.02246	0.01855
	0.0166	0.03223	0.02051
	0.01758		0.02148
	0.02051		0.02246
	0.02344		0.02734
	0.02539		0.03027
	0.02832		0.03320
	0.03125		0.03910
	0.03809		0.04400
	0.04395		

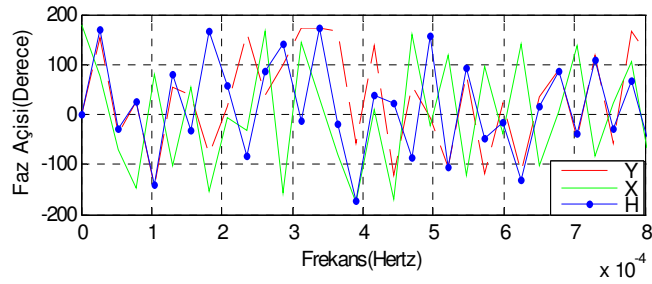
- **Boğaziçi Köprüsü Yüksek Frekans Bileşenleri**
- 18 numaralı nokta



Şekil 4.1 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri frekansları

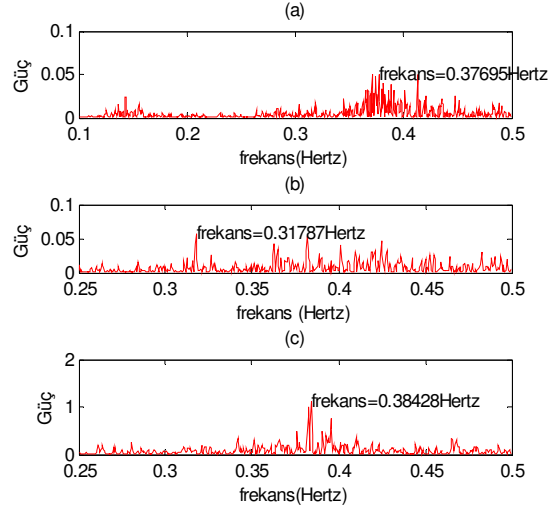


Şekil 4.2 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri genlikleri

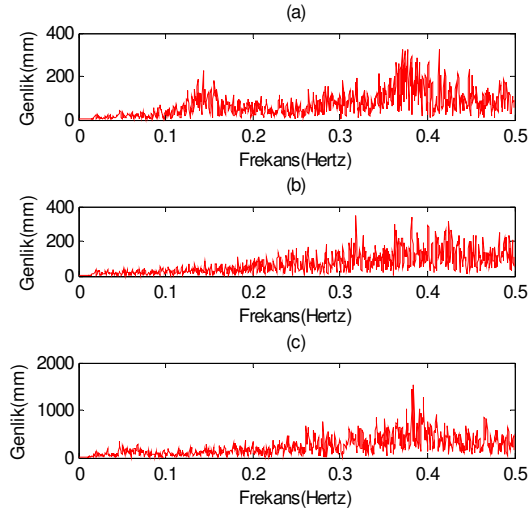


Şekil 4.3 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açıları

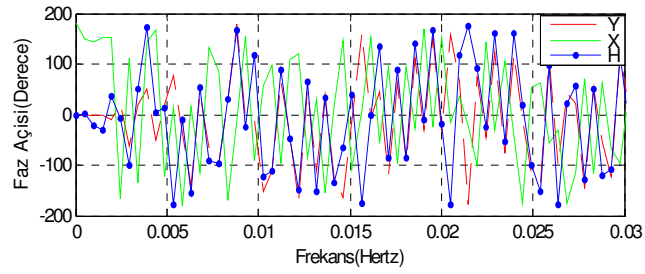
- Tabliye ¼'lük kesimi (21 numaralı nokta)



Şekil 4.4 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri frekansları

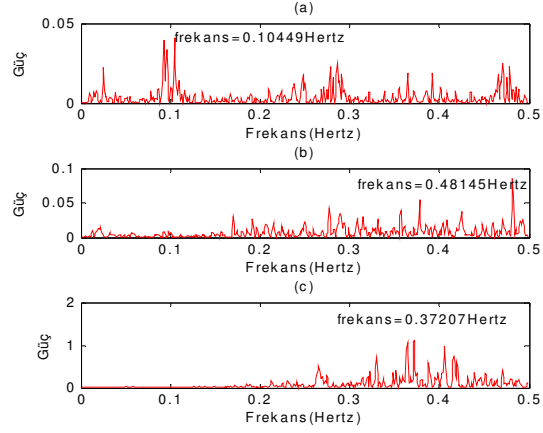


Şekil 4.5 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri genlikleri

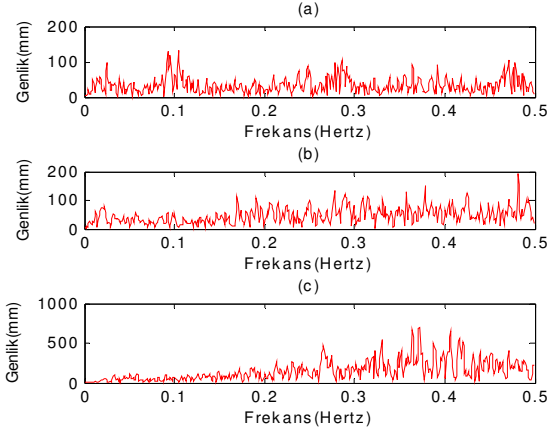


Şekil 4.6 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açıları

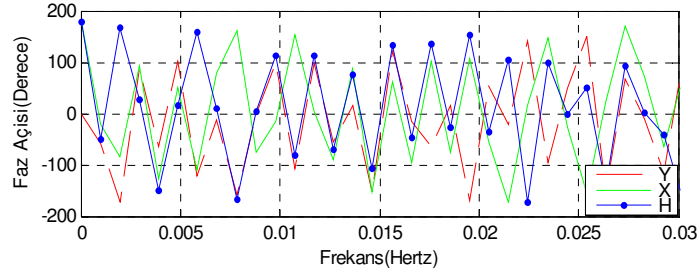
- Tabliye ¼'lük kesimi (24 numaralı nokta)



Şekil 4.7 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri genlikleri

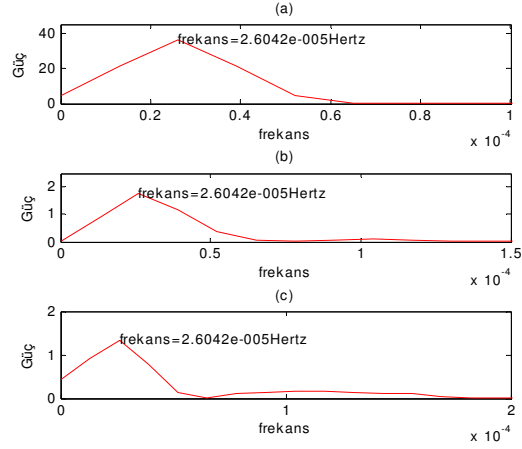


Şekil 4.8 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri genlikleri

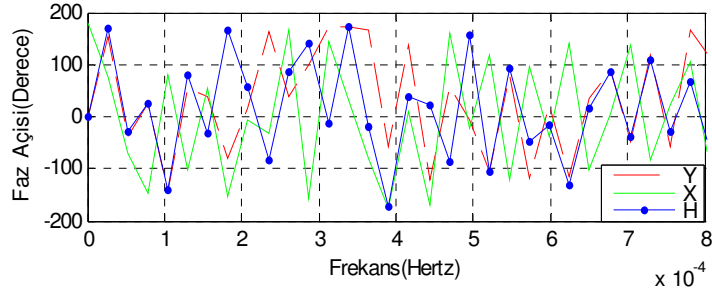


Şekil 4.9 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açısı

- Boğaziçi Köprüsü Alçak Frekans Bileşenleri
- 18 numaralı obje noktası

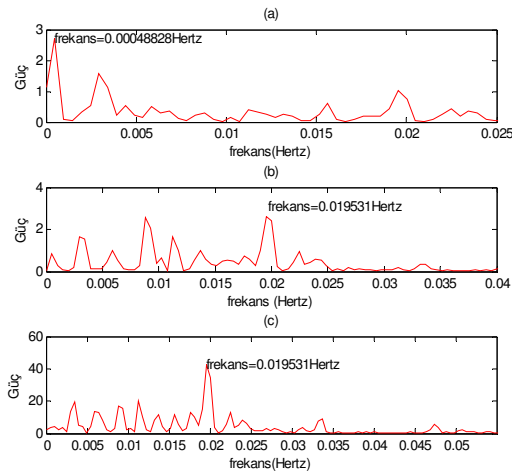


Şekil 4.10 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri frekansları

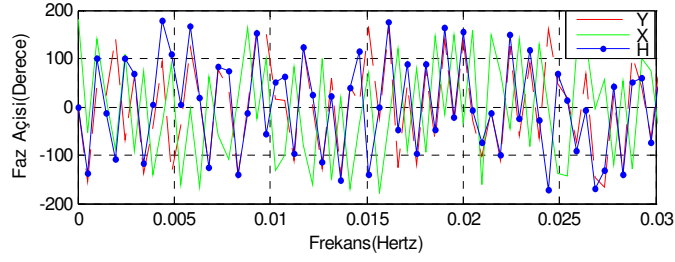


Şekil 4.11 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açısı

- Tabliye 1/4'lük kesimi (21 numaralı nokta)

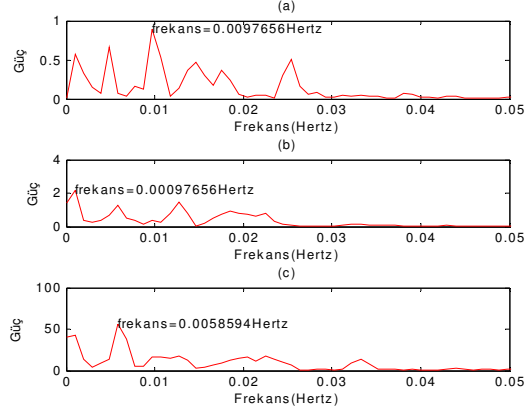


Şekil 4.12 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri frekansları

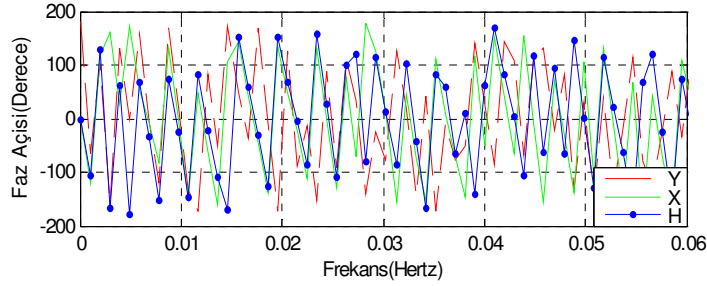


Şekil 4.13 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açısı

- Tabliye ¼'lük kesimi (24 numaralı nokta)



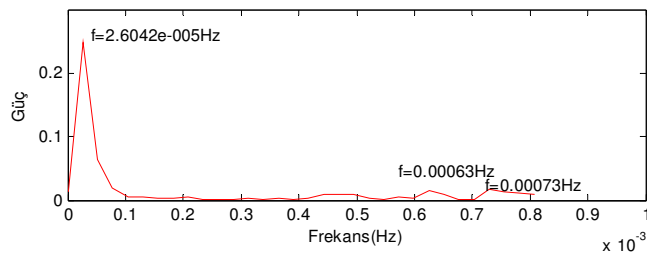
Şekil 4.14 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri frekansları



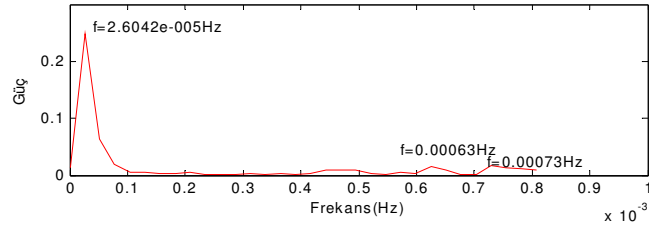
Şekil 4.15 Y (a), X (b) ve H (c) yönlerindeki değişimleri faz açısı

- Etkiyen Büyüklüklerin Yüksek Frekansları

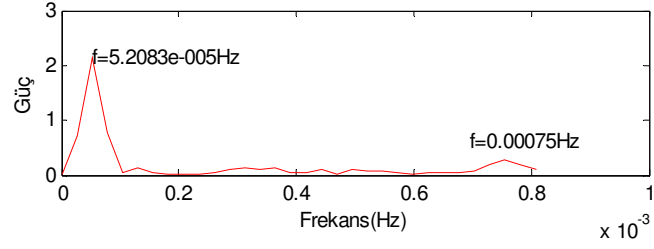
(Rüzgar Kuvveti)



(Sıcaklık Değişimi)

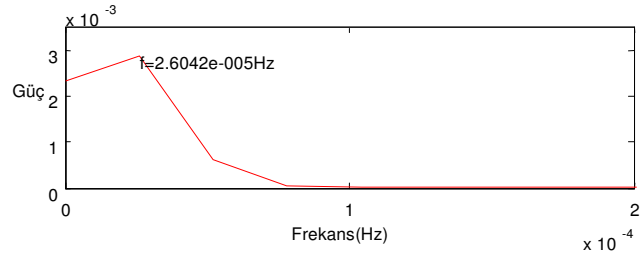


(Trafik Yüğü)

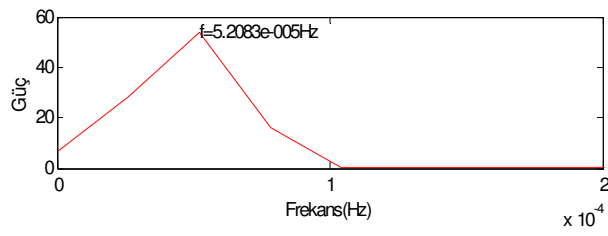


- **Etkiyen Büyüklüklerin Alçak Frekansları**

(Sıcaklık Değişimi)



(Trafik Yüğü)



EK 5 Yapının Y, X ve H Yönlerindeki Hareketleri Zaman Serileri Stokastik Bileşen Analizi Sonuçları

14-Y

1. AR(5) Model:

$$Z(t) = 0.5747 Z(t-1) + 0.0870 Z(t-2) + 0.0042 Z(t-3) - 0.0112 Z(t-4) - 0.3916 Z(t-5) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.1336, 0.1582, 0.1587, 0.160, 0.1371$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = 128.587$$

$$SBC = 135.574$$

$$FPE = 0.554$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(25) = 30.836 < \chi^2_{1-0.05, 25-5} = 31.410$$

14-X

1. AR(1) Model;

$$Z(t) = 0.7881 Z(t-1) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.1036$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$AICC = 125.992$$

$$SBC = 126.822$$

$$FPE = 0.513$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(21) = 19.060 < \chi^2_{1-0.05, 21-1} = 31.410$$

14-H

1. AR(5) Model;

$$Z(t) = 0.5615 Z(t-1) - 0.0842 Z(t-2) + 0.1411 Z(t-3) + 0.0989 Z(t-4) - 0.6710 Z(t-5) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.1009, 0.1257, 0.1249, 0.1263, 0.1029$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = 88.353$$

$$SBC = 97.854$$

$$FPE = 0.258$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(25) = 19.060 < \chi^2_{1-0.05, 25-5} = 31,410$$

18-Y

1. AR(8) Model;

$$Z(t) = 1.067 Z(t-1) - 0.0510 Z(t-2) + 0.1093 Z(t-3) + 0.0375 Z(t-4) - 0.1552 Z(t-5) + 0.1438 Z(t-6) - 0.0608 Z(t-7) - 0.1632 Z(t-8) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.1381, 0.2274, 0.2064, 0.2265, 0.2084, 0.2318, 0.2408, 0.1866$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = 2.388$$

$$SBC = 29.076$$

$$FPE = 0.0554$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(28) = 31.291 < \chi^2_{1-0.05, 28-8} = 31,410$$

18-X

1. AR(1) Model;

$$Z(t) = 0.8036 Z(t-1) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.0814$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = 119.133$$

$$SBC = 120.440$$

$$FPE = 0.397$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(21) = 29.752 < \chi^2_{1-0.05, 21-1} = 31,410$$

18-H

1. AR(5) Model;

$$Z(t) = 0.7238 Z(t-1) - 0.0713 Z(t-2) - 0.0339 Z(t-3) + 0.06596 Z(t-4) - 0.5358 Z(t-5) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

0.1081, 0.1421, 0.1423, 0.1421, 0.108106

3. Model derecesi kriterleri;

AIC = 118.746

SBC = 117.932

FPE = 0.333

4. Modelin onaylanması;

$Q(25) = 29.408 < \chi^2_{1-0,05, 25-5} = 31,410$

21-Y

1. AR(22) Model;

$Z(t) = 1.803 Z(t-1) - 0.6361 Z(t-2) - 0.1933 Z(t-3) - 0.3086 Z(t-4) - 0.2296 Z(t-5) + 1.320 Z(t-6) - 0.7349 Z(t-7) + 0.1103 Z(t-8) - 0.4678 Z(t-9) - 0.1191 Z(t-10) + 0.8397 Z(t-11) - 0.2492 Z(t-12) + 0.0278 Z(t-13) - 0.4337 Z(t-14) - 0.0849 Z(t-15) + 0.6004 Z(t-16) - .1837 Z(t-17) - .03840 Z(t-18) - .1867 Z(t-19) + .0319 Z(t-20) + 0.2431 Z(t-21) - 0.1331 Z(t-22) + e(t)$

2. Katsayıların standart hataları;

0.0632, 0.1251, 0.1118, 0.1098, 0.1157, 0.1359, 0.1603, 0.1419, 0.1349, 0.1380, 0.1442, 0.1537, 0.1413, 0.1365, 0.1388, 0.1330, 0.1188, 0.1156, 0.1136, 0.1152, 0.1084, 0.0511

3. Model derecesi kriterleri;

AIC = -836.247

SBC = -678.539

FPE = 0.011

4. Modelin onaylanması;

$Q(42) = 26.718 < \chi^2_{1-0,05, 42-22} = 31,410$

21-X

1. AR(18) Model;

$Z(t) = 1.820 Z(t-1) - 0.6394 Z(t-2) - 0.1606 Z(t-3) - 0.0468 Z(t-4) - 0.7597 Z(t-5) + 1.466 Z(t-6) - 0.6648 Z(t-7) - 0.0320 Z(t-8) + 0.0864 Z(t-9) - 0.6659 Z(t-10) + 0.9836 Z(t-11) - 0.2643 Z(t-12) - 0.0933 Z(t-13) - 0.1158 Z(t-14) - 0.2390 Z(t-15) + 0.4693 Z(t-16) - 0.1392 Z(t-17) - 0.0175 Z(t-18) + e(t)$

2. Katsayıların standart hataları;

0.0482, 0.0999, 0.1020, 0.1017, 0.1016, 0.1079, 0.1283, 0.1235, 0.1192, 0.1192, 0.1235, 0.1283, 0.1079, 0.1016, 0.1017, 0.1020, 0.0999, 0.0482

3. Model derecesi kriterleri;

AIC = -1218.065

SBC = -1074.417

$$\text{FPE} = 0.003$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(38) = 30.996 < \chi^2_{1-0.05, 38-18} = 31,410$$

21-H

1. AR(17) Model;

$$Z(t) = 1.897 Z(t-1) - .7135 Z(t-2) - .03877 Z(t-3) - .5698 Z(t-4) - .1319 Z(t-5) + 1.142 Z(t-6) - .4813 Z(t-7) + .0028 Z(t-8) - .4973 Z(t-9) + .04617 Z(t-10) + .8179 Z(t-11) - .4472 Z(t-12) + .06787 Z(t-13) - .3620 Z(t-14) + .007126 Z(t-15) + .4973 Z(t-16) - .2618 Z(t-17) + e(t)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$0.0482, 0.1034, 0.1094, 0.1079, 0.1116, 0.1095, 0.1165, 0.1190, 0.1164, 0.1190, 0.1165, 0.1095, 0.1116, 0.1079, 0.1094, 0.1034, 0.0482$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$\text{AIC} = -1087.659$$

$$\text{SBC} = -952.476$$

$$\text{FPE} = 0.003$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(37) = 31.139 < \chi^2_{1-0.05, 37-17} = 31,410$$

22-Y

1. ARMA(3,9) Model;

$$Z(t) = 1.561 Z(t-1) - 0.6614 Z(t-2) + 0.0933 Z(t-3) + e(t) - 0.05796 e(t-1) + 0.2118 e(t-2) + 0.1803 e(t-3) + 0.0188 e(t-4) - 0.3553 e(t-5) + 0.1660 e(t-6) + 0.0655 e(t-7) + 0.0858 e(t-8) + 0.1382 e(t-9)$$

2. Katsayıların standart hataları;

$$\text{AR katsayıları: } 0.2451, 0.4416, 0.2185$$

$$\text{MA katsayıları: } 0.2433, 0.1376, 0.0685, 0.0575, 0.0548, 0.1145, 0.0634, 0.0378, 0.0394$$

3. Model derecesi kriterleri;

$$\text{AIC} = -2662.022$$

$$\text{SBC} = -2552.477$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(32) = 31.402 < \chi^2_{1-0.05, 32-3-9} = 31,410$$

22-X

1. ARMA(3,6) Model;

$$Z(t) = 1.519 Z(t-1) - 0.5861 Z(t-2) + 0.0554 Z(t-3) + e(t) - 0.0566 e(t-1) + 0.2655 e(t-2) + 0.2388 e(t-3) + 0.1963 e(t-4) - 0.7063 e(t-5) + 0.2463 e(t-6)$$

2. Katsayıların standart hataları;

AR katsayıları; 4.8180, 5.2044, 0.4842

MA katsayıları; 4.8187, 1.8351, 2.0467, 2.0173, 1.7961, 2.6514

3. Model derecesi kriterleri;

AIC = -1522.596

SBC = -1465.969

4. Modelin onaylanması;

$Q(29) = 20.863 < \chi^2_{1-0,05,29-3-6} = 31,41$

22-H

1. AR(22) Model;

$Z(t) = 1.805 Z(t-1) - 0.6468 Z(t-2) + 0.0300 Z(t-3) - 0.2497 Z(t-4) - 1.001 Z(t-5) + 1.632 Z(t-6) - 0.2431 Z(t-7) - 0.2422 Z(t-8) - 0.2030 Z(t-9) - 0.6584 Z(t-10) + 1.217 Z(t-11) - 0.2427 Z(t-12) - 0.1492 Z(t-13) - 0.0269 Z(t-14) - 0.6185 Z(t-15) + 0.9285 Z(t-16) - 0.2945 Z(t-17) + 0.0103 Z(t-18) + 0.0420 Z(t-19) - 0.4255 Z(t-20) + 0.4865 Z(t-21) - 0.1645 Z(t-22) + e(t)$

2. Katsayıların standart hataları;

0.0315, 0.0639, 0.0658, 0.0658, 0.0662, 0.0730, 0.0847, 0.0827, 0.0830, 0.0832, 0.0854, 0.0854, 0.0832, 0.0830, 0.0827, 0.0847, 0.0730, 0.0662, 0.0658, 0.0658, 0.0639, 0.0315

3. Model derecesi kriterleri;

AIC= -2414.948

SBC = -2229.928

FPE = 0.004

4. Modelin onaylanması;

$Q(42) = 30.262 < \chi^2_{1-0,05,42-22} = 31,41$

24-Y

1. ARMA(7,7) Model;

$Z(t) = 1.452 Z(t-1) - 0.0495 Z(t-2) - 0.7736 Z(t-3) + 0.0558 Z(t-4) + 0.4298 Z(t-5) - 0.0169 Z(t-6) - 0.1863 Z(t-7) + e(t) + 0.2726 e(t-1) - 0.0466 e(t-2) + 0.3095 e(t-3) + 0.2056 e(t-4) - 0.7322 e(t-5) - 0.01685 e(t-6) + 0.2406 e(t-7)$

2. Katsayıların standart hataları;

AR katsayıları; 1.1313, 2.3578, 1.4905, 0.1254, 0.1808, 0.4063, 0.3091

MA katsayıları; 1.1336, 0.4202, 0.1453, 0.2822, 0.0906, 0.8740, 0.5561

3. Model derecesi kriterleri;

AIC = -793.123

BIC = -707.017

4. Modelin onaylanması;

$$Q(34) = 31.118 < \chi^2_{1-0,05,34-7-7} = 31,41$$

24-X

1. ARMA(3,6) Model;

$$Z(t) = 1.991 Z(t-1) - 1.186 Z(t-2) + 0.1838 Z(t-3) + e(t) - 0.4870 e(t-1) + 0.2187 e(t-2) + 0.1696 e(t-3) + 0.0299 e(t-4) - 0.6971 e(t-5) + 0.4785 e(t-6)$$

2. Katsayıların standart hataları;

AR katsayıları; 0.1095, 0.1876, 0.0967

MA katsayıları; 0.1001, 0.0661, 0.0609, 0.0654, 0.0623, 0.0710

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = -1286.875$$

$$SBC = -1228.473$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(29) = 25.017 < \chi^2_{1-0,05,29-3-6} = 31,41$$

24-H

1. ARMA(7,11) Model;

$$Z(t) = 1.751 Z(t-1) - 0.7575 Z(t-2) + 0.4639 Z(t-3) - 0.6040 Z(t-4) - 0.3611 Z(t-5) + 0.6670 Z(t-6) - 0.1660 Z(t-7) + e(t) + 0.0763 e(t-1) + 0.2903 e(t-2) + 0.0057 e(t-3) + 0.0154 e(t-4) - 0.3139 e(t-5) + 0.0980 e(t-6) - 0.0458 e(t-7) + 0.2868 e(t-8) + 0.2355 e(t-9) - 0.3903 e(t-10) + 0.0696 e(t-11)$$

2. Katsayıların standart hataları;

AR katsayıları; 2.9099, 4.2630, 1.1326, 1.2612, 0.5359, 1.4030, 1.378307

MA katsayıları; 2.9113, 1.0618, 1.2621, 0.4070, 0.2281, 0.868, 0.1396, 0.1742, 0.8522, 0.9562, 0.7844

3. Model derecesi kriterleri;

$$AIC = -2274.189$$

$$BIC = -2128.162$$

4. Modelin onaylanması;

$$Q(38) = 30.369 < \chi^2_{1-0,05,38-7-11} = 31,41$$

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	20.09.1972	
Doğum yeri	Aksaray	
Lise	1986-1989	Aksaray Lisesi
Lisans	1989-1993	Yıldız Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Böl.
Yüksek lisans	1996-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı
Doktora	1999-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

1994-1996	Yiğidim Harita Müh. Mim. Ltd
1996-1999	Niğde Üniversitesi Aksaray Müh. Fak. Arş. Gör.
1999-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı'nda Arş. Gör. (35. madde)