

Boğaziçi Köprüsü Hareketlerinin Zaman Dizileri Analizi İle Belirlenmesi

Hediye ERDOĞAN¹, Engin GÜLAL²

Özet

Bu makalede; Asya ile Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan İstanbul Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ve kulelerinin rüzgar kuvveti, sıcaklık değişimleri ve trafik yükü gibi etkiyen yükler altındaki yanıl, boylamasına ve düşey hareketleri, zaman dizileri analizi ile araştırılmış ve belirlenmiştir. Analiz sonucu, dizilerdeki trend bileşenlerinin, köprünün kısa süreli gözlemlerinde uzun zamanlı periyodik hareketinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Dizilerin periyodik bileşen analizinde ise, köprünün frekanslarını belirleyebilmek için dizilere alçak geçişli filtreleme işlemi uygulanmıştır. Dizilerin zaman alanından frekans alanına geçişi ise Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile sağlanmış ve dizilerin güç spektrumları hesaplanmıştır. Güç spektrumlarından tespit edilen frekansların köprünün beklenen davranışını yansıttığı görülmüştür. Özellikle köprü tabliyesinin rüzgar kuvveti ve trafik yükünden kaynaklanan çok sayıda anlamlı periyodik hareketlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Son olarak da zaman dizilerinin stokastik bileşenleri Otoregresif (AR) ve Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) modellerle belirlenmiştir. Sonuç olarak, zaman dizileri analizi ile köprünün gözlenen hareketlerinde beklenmedik herhangi bir durum tespit edilememiştir.

Anahtar Sözcükler

Boğaziçi Köprüsü, Zaman Dizileri Analizi, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), Güç Spektrumu, AR, ARMA

Abstract

Determining Movements of Bosphorus Bridge Using Time Series Analysis

In this paper, the movements of the apron and pylons of Istanbul Bosphorus Bridge, which connects Asia to Europe, were observed under different stress factors such as wind speeds, temperature changes and traffic load, and time series analyses were conducted to determine and examine the lateral, longitudinal and vertical movements of bridge's apron and pylons. In the analysis of time series trend, periodical and stochastic components in the series representing the movements of the bridge were determined. As a result of the analysis made for the short termed observations it was determined that the trend components in the series originated from the long term periodical movements of the bridge. In the analysis of the periodical components of the series on the other hand, the low-pass filtering processes were applied to the series to determine frequencies of the bridge. The transformation of the series from time domain to frequency domain was carried out using Fast Fourier Transform (FFT), and the power spectrums of series were also computed. It has been found that the frequencies obtained from power spectrums reflect the expected movements of the bridge. It has also been found out that the bridge deck sustains significant periodical movements resulting from wind force and traffic load. Finally the stochastic components of time series has been determined

with the use of Auto-Regressive (AR) and Auto-Regressive Moving Average (ARMA) models. As a result, no unexpected condition has been determined with the time series analysis in the observed movements of the bridge.

Key Words

Bosphorus Bridge, Time Series Analysis, Fast Fourier Transform, Power Spectrum, AR, ARMA

1. Giriş

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 en aza indirilmekte ve böylece bakım giderleri de olabildiğince azaltılmaktadır.

Diğer yandan, potansiyel risk ve tehlikelerle birlikte ekonomik beklentiler de en uygun analiz yönteminin seçimi için önemli olmaktadır. Özellikle zaman dizilerinin analizi ile mühendislik yapılarının, etkiyen yük/yüklere bağlı tepkimeleri kestirilmekte ve modellerle tanımlanabilmektedir. Zaman dizileri analizi ve modellemesi ile tek bir diziye ait gözlemlerin, dinamik veya zamana bağlı yapısını anlamak mümkün olmaktadır. Dinamik yapının sunduğu bilgi, dizilerin temsil ettiği sistemi kontrol etmek ve geleceğe ilişkin doğru tahminlerin yapılmasını sağlaması açısından önemli olmaktadır.

Ancak, mühendislik yapılarının tepkimelerinin zaman alanında, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi bazı uygulamaları için genelde yetersiz kalabilmektedir. Çünkü uygulamalar için gerekli olan asıl bilgi, sinyalin içerdiği frekans bilgisinde yer almaktadır. Bu durumda sinyalin zaman-güç gösterzimi yerine frekans spektrumu incelenmektedir. Frekans spektrumu, sinyalin içerdiği frekans bileşenlerini yani sinyalde mevcut olan frekansları göstermektedir ve frekans alanında belirlenmektedir (REN vd. 2004).

Mühendislik yapılarının özellikle köprülerin, jeodezi ölçme yöntemleri ile izlenmesi ile ilgili olarak yapılan önemli çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmaktadır. Kanada'da Calgary kulesinin dinamik deformasyon ölçmelerinin GPS ile belirlenmesi (LOVSE vd. 1995), Humber Köprüsü'nde yapılan çalışmalar (ROBERTS vd. 1999), mühendislik yapılarındaki hareketlerin GPS ile izlenebileceği, özellikle de gözlemlerin örnekleme frekansının seçimi üzerine yapılan araştırmalar (ROBERTS vd. 2000), Hong-Kong'da yer alan Tsing-Ma, Kap Shui Mun ve Ting Kua Köprüleri'nin hareketlerinin GPS ile izlenmesi (WONG 2000), Nottingham Human Köprüsü'nde, rüzgar kuvveti ve yaya yükünün köprüye etkisinin GPS ile

¹ Yrd. Doç. Dr., Aksaray Ü., Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Böl., Aksaray

² Doç. Dr., YTÜ, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Böl., Beşiktaş/İstanbul

ivme ölçer ölçümleri ile belirlenmesi (ROBERTS vd. 2001), Almanya'da, Nesenbachtal Köprüsü hareketlerinin reflektörsüz total station ile ölçülmesi (KUHLMAN 2001), Tulu/Avustralya'daki asma köprünün kısa süreli deformasyonlarının belirlenmesi ve tabliye üzerindeki GPS alıcılarının kablolarının varlığından dolayı etkilendiği ve bu yüzden yüksek presizyolu GPS ölçümleri elde edilemediği (WIESER ve BRUNNER 2002), İstanbul Boğaziçi Köprüsü titreşimlerinin hem ölçümlerle hem de teorik olarak belirlenmesi (DUMANOĞLU ve SEVERN 1985) ve İstanbul Boğaziçi Köprüsü'nün dinamik davranışlarının hem GPS hem de Otomatik Hedef Tanıma (ATR) sistemine sahip total station ile izlenmesi ve parametrik olmayan yöntemlerle belirlenmesidir. (ERDOĞAN 2006; ERDOĞAN vd. 2007; ERDOĞAN ve GÜLAL 2009; ERDOĞAN ve GÜLAL 2009).

Bu çalışma; Yıldız Teknik Üniversitesi Ölçme Tekniği Anabilim Dalı araştırma grubu tarafından, İstanbul Boğaziçi Köprüsünde, köprü davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılan araştırma çalışmalarının bir kısmını içermektedir. Bu proje kapsamında oluşturulan jeodezik izleme ağı yardımı ile köprünün karakteristik yerlerine tesis edilen obje noktaları, yersel (ATR sistemli elektronik total station) ve uydu teknikleri (GPS) ile izlenmiştir. Böylece Boğaziçi Köprüsü'nün kule ve tabliyesinin sıcaklık değişimi, rüzgâr kuvveti ve trafik yükü etkisi altındaki yanal, boylamasına ve düşey yönlerindeki hareketleri hem parametrik yöntemlerle hem de parametrik olmayan yöntemlerden zaman dizileri analizi ile belirlenmiştir. Boğaziçi Köprüsü hareketlerinin zaman dizilerinin analizi ile araştırılmasında, dizilerdeki trend, periyodik ve stokastik bileşenler tespit edilmiştir. Periyodik bileşen analizi kısmında dizinin zaman alanından frekans alanına HFD yapılmış ve spektrum analiz ile köprünün frekansları hesaplanmıştır (JENKINS ve WATTS 1968; RABINER ve GOLD 1975). Belirlenen frekanslardan yararlanılarak istatistiksel olarak köprünün tabliye kesiminde çok sayıda anlamlı periyodik hareketler tespit edilmiştir. Ayrıca, zaman dizisinin stokastik bileşeni Otoregresif (AR) ve Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) modellerle belirlenmiş ve belirlenen bu modellerin köprünün davranışlarını temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

1. Metot

Mühendislik yapılarının izlenmesinde elde edilen zaman dizilerinin analizi ile sistemin farklı yük etkileri altında gösterdiği davranış biçimi açıklanabilmektedir. Genel olarak t_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) zamanlarında bir yapıda yapılan gözlemlerin $y(t_i)$ zaman dizisi üç bileşene ayrılabilir. -

$$y(t_i) = y(t_i)_{Trend} + y(t_i)_{Periyodik} + y(t_i)_{Stokastik} \quad (1)$$

Zaman dizileri analizinde, ilk olarak dizinin zamana bağlı grafiği çizilerek genel bir trend yorumu yapılabilir. Daha sonra ise dizideki gürültü etkisinin kısmen giderilmesi, trend ve periyodik bileşenlerin daha belirgin bir şekilde ortaya çıkartılması için diziyeye filtreleme işlemi uygulanır. Filtreleme işleminde özellikle kısa süreli gözlemlerdeki periyodikliklerin ortaya çıkartılmasında aşağıda ifade edilen beşinci dereceden kayan ağırlıklı ortalamalar (KAO) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (ŞEN 2002). Bu işlem aynı zamanda

bir çeşit alçak-geçiş filtreleme özelliği göstermektedir:

$$y_{KAO}(t_i) = [y(t_i) + 4y(t_{i+1}) + 6y(t_{i+2}) + 4y(t_{i+3}) + y(t_{i+4})] / 16 \quad (2)$$

Filtreleme işleminden sonra dizide trend bileşeni olup olmadığı tespit edilir. Dizideki trend bileşeni, dizinin zamana bağlı uzun peryotlu değişimlerini temsil eder ve polinom şeklindeki fonksiyonu, eşitlik (3) ile zaman alanında belirlenebilir (YONG ve CHRZANOWSKI 1996; HEKİMOĞLU 1989).

$$y(t_i)_{Trend} = \sum_{k=1}^m c_k t_i^{k-1} \quad (3)$$

Burada c_k ($k=1, 2, \dots, m$) fonksiyonun derecesine bağlı parametrelerdir. Fonksiyon derecesi m başlangıçta küçük seçilir ve istatistik olarak anlamsız olana kadar artırılır. Bu parametrelerin kestirimi ve test edilmesi ileri bölümlerde ifade edilmiştir.

Trend bileşeni analizinden sonra dizide periyodik bileşen(ler)in analizi yapılır. Eğer trend belirlenmezse, periyodik bileşenin Fourier spektrumu bundan etkilenir (HEKİMOĞLU 1989). Mühendislik yapılarının izlenmesiyle elde edilen dizideki periyodik bileşenler, yapının, sıcaklık değişimleri, trafik yükü gibi periyodik yükler altında yapının periyodik tepki göstermesinden kaynaklanmaktadır. Dizideki periyodik bileşen(ler), bilinen f_s ($s=1, 2, \dots, p$) frekansları ile $y(t_i)$ ölçülerine bağlı olarak

$$y(t_i)_{Periyodik} = \sum_{s=1}^p [a_s \cos(2\pi f_s t_i) + b_s \sin(2\pi f_s t_i)] \quad (4)$$

trigonometrik fonksiyonu ile modellenebilir.

Eşitlik (3)'de bilinmeyen trend bileşeni parametreleri c_k ile eşitlik (4)'de bilinmeyen periyodik bileşen(ler) parametreleri a_s, b_s ve bu parametrelerin kovaryans matrisi En Küçük Kareler Yöntemine (EKKY) göre kestirilir. Hesaplanan c_k, a_s ve b_s parametreleri ve bu parametrelerin m_{ck}, m_{as} ve m_{bs} standart sapmaları ile her bir parametre için test büyüklükleri hesaplanır. Bu test büyüklükleri öngörülen $1-\alpha$ güven düzeyi ve f serbestlik derecesine bağlı t -dağılımının $t_{f, 1-\alpha/2}$ güven sınırı ile karşılaştırılır. Test sonucu istatistiksel anlamsız parametreler fonksiyondan çıkartılır ve parametreler anlamlı olana kadar bu işleme devam edilir. Ancak eşitlik (4)'de ifade edilen fonksiyonda anlamlı periyodik bileşenlerin belirlenebilmesi için f_s frekanslarının bilinmesi gerekir. Eğer f_s frekansları önceden bilinmiyorsa, bunlar zaman dizisinin Fourier dönüşümünden, yani Fourier genlik spektrumundan belirlenebilir. Eğer spektrumda tepe (peak) yapan frekanslar var ise bu frekanslar zaman dizisi içindeki periyodik sinyalin frekanslarına karşılık gelirler (JENKINS ve WATTS 1968). Trend bileşeni giderilmiş dizinin zaman alanından frekans alanına Ayrık Fourier dönüşümü (AFD), HFD yöntemi ile daha hızlı yapılmaktadır (RABINER ve GOLD 1975).

Ayrık zaman dizisinde yer alan bir periyodik titreşimin (sinyalin) Fourier Spektrumu frekans ortamında tek bir çizgi şeklinde değil bir asıl tepe (band) ile bunun yanında ve sonunda giderek küçülen tepeler ortaya çıkar. Bu küçük tepelere yan band etkisi denir. Eğer birden fazla titreşim varsa bu yan band etkileri asıl bantları bozar. Bu yan bant etkisini azaltmak için sinyalin dönüşüm öncesi, genliği kenarlara doğru

yavaşça sifira yaklaşan bir pencere fonksiyonu ile çarpılması öngörülür. Bu amaçla kullanılan pencereleme fonksiyonlarından Hanning Pencere Fonksiyonu, n ölçü sayısı olmak üzere

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

eşitliği ile ifade edilmektedir (JENKINS ve WATTS 1968). Pencerelemiş, $y(t_p) = y(t_i)w(i)$ ölçülerinin HFD $x(k)$ eşitlik (6) ile tanımlanmaktadır (RABINER ve GOLD 1975):

$$x(k) = \sum_{t_i=0}^{n-1} y(t_i) e^{-jk \frac{2\pi}{n} t_i} \quad (6)$$

HFD'nün doğrudan hesaplanmasında her bir $x(k)$ değeri için n karmaşık çarpma ve $n-1$ karmaşık toplama işlemi kullanılır. Bu durumda n adet HFD değeri hesaplanırken, n^2 çarpma ve $n(n-1)$ toplama işlemi yapılmaktadır. HFD sonucu elde edilen değerlerin modül karesi, Fourier spektrum $P_{xx}(k)$ olarak adlandırılmaktadır:

$$P_{xx}(k) = |x(k)|^2 \quad (7)$$

Eşitlik (7) ile hesaplanan $P_{xx}(k)$ ile bir sinyalin enerjisinin hangi frekanslarda yoğunlaştığı tespit edilerek, dizide var olan periyodik hareketlerin frekansları belirlenir. Eşitlik (7) ile belirlenen f_s frekansları eşitlik (4) de yerine konularak frekansa ait a_s ve b_s parametreleri EKKY ile kestirilebilmektedir. Kestirilen parametrelerin "0" beklenen değerinden sapmalarının anlamlı olup olmadığı test edilir. Test sonucu anlamsız çıkan parametreye ait frekans fonksiyondan çıkarılır. Bu işleme anlamlı frekanslar (parametrelerden birisinin anlamlı olması yeterli) tespit edilene kadar devam edilir. Böylece, zaman dizisinin anlamlı periyodik hareketleri ve trend bileşeni toplamı ile de deterministik kısmı belirlenir.

Zaman dizilerinin analizinde trend ve periyodik bileşen(ler) belirlendikten sonra dizinin geriye kalan stokastik bileşeninin nasıl bir özellik gösterdiği araştırılır. Periyodik bileşeni giderilen $y(t)$ zaman dizisinin ortalaması sıfır ve standart sapması bire eşit olan bir süreç olmadığı, bu nedenle dizinin $\bar{y}(t_i)$ ortalama ve m_y standart sapması kullanılarak;

$y(t_i)_{Stokastik} = (y(t_i) - \bar{y}(t_i)) / m_y$ eşitliği ile standartlaştırılmış sürece dönüştürülmesi gerektiği önerilmektedir (HIPEL ve MCLEOD 1994). Standartlaştırılmış hale dönüştürülen $y(t_i)_{Stokastik}$ dizisi, otoregresif, hareketli ortalamalar ya da doğrusal regresyon eşitlikleri ile ifade edilebilen bir özelliğe sahiptir. Standartlaştırılmış değişkene otoregresif bir modelin uyuymadığına, değişkenin dizisel bağımlılığının incelenmesiyle karar verilmektedir. Durağan dizilerde ardışık gözlemler arasındaki iç bağımlılığın ölçülmesinde otokorelasyon katsayısı kullanılır. $y(t)$ stokastik bileşeninin k gecikmeli otokorelasyon katsayısı r_k

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n y(t_i) y(t_{i+k})}{\sum_{i=1}^n y(t_i)^2} \quad (8)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Otokorelasyon katsayıları ($k > 0$ için) yaklaşık olarak sıfır ortalamalı ve $s_{rk} \approx 1/\sqrt{n}$ standart sapmalı normal bir dağılıma sahiptir. r_k 'lerin güven aralıkları

$$-u_{1-\alpha/2} s_{rk} < r_k < +u_{1-\alpha/2} s_{rk} \quad (9)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (CHATFIELD 1996). Burada, α =öngörülen anlamlılık düzeyi, $u_{1-\alpha/2}$ ise $1-\alpha/2$ olasılığındaki standart normal değışkendir. r_k 'lerin güven aralığının ($\alpha=0,05$ için $\pm 1,96/\sqrt{n}$) dışında kalması, r_k 'lerin sıfırdan sapmalarının istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda, $y(t_i)$ stokastik bileşeni otoregresif modellerle ifade edilebilir. Otoregresif modellerde bir diğere önemli parametre de durağan sürece ait kısmi otokorelasyon

katsayılarıdır. Kısmi otokorelasyon katsayıları $\phi_{k,k}$, r_k otokorelasyon katsayılarına bağılı olarak $\phi_{1,1} = r_1$

$$\phi_{k,k} = \frac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} r_j} \quad (10)$$

$$\phi_{k,j} = \phi_{k-1,j} - \phi_{k,k} \phi_{k-1,k-j}, k \neq j$$

eşitlikleri ile katsayılarının güven aralığı da (9) eşitliğine benzer şekilde hesaplanmaktadır (BOX VE JENKINS 1976).

Otoregresif (AR(p)) modeller, standartlaştırılmış durağan zaman dizilerinin modellenmesinde kullanılan doğrusal modellerden birisidir. AR(p) modelinde $y(t)_{Stokastik}$ değeri, dizinin p dönem geçmiş değerlerinin ağırlıklı toplamının ve rastlantısal hata teriminin doğrusal fonksiyonudur. Ancak, bazı durumlarda $y(t)_{Stokastik}$ değeri, dizinin geriye doğru q dönem geçmiş $\varepsilon(t)$ hata terimlerinin ve ortalamasının doğrusal fonksiyonu olarak da ifade edilebilmektedir. Bu durumda otoregresif modellere bir de hareketli ortalama MA(q) bileşenin de katılması gerekmektedir. Modele hareketli ortalama bileşeninin eklenmesiyle, aynı süreç daha az parametrelili modellerle izah edilebilmektedir. Otoregresif modele, hareketli ortalama bileşenin katılmasıyla "otoregresif-hareketli ortalama" ARMA(p,q) modeli ortaya çıkmaktadır (CHATFIELD 1996). Eşitlik (11)'de bir ARMA(p,q) modelinin genel hali verilmiştir.

$$y(t_i)_{Stokastik} = \sum_{j=1}^p \phi_j y(t_{i-j})_{Stokastik} - \sum_{m=1}^q \theta_m \varepsilon(t_{i-m}) + \varepsilon(t_i) \quad (11)$$

Burada ϕ_j ve θ_m parametreleri EKKY ile kestirilir. $\varepsilon(t_i)$ ise rasgele hata terimidir. Eşitlikteki p ve q model derecelerine ise Akaike Bilgi Kriteri (AIC)

$$AIC = n \log(\varepsilon(t_i)^T \varepsilon(t_i)) + 2(p+q) \quad (12)$$

veya Schwartz Bayesian Kriteri (SBC)

$$SBC = n \ln(\varepsilon(t_i)^T \varepsilon(t_i)) + (p+q) \ln(n) \quad (13)$$

kullanılarak karar verilmektedir (ENDERS 1995). Hem AIC hem de SBC negatif değerler alabilmekte ve bunlardan en

küçük değeri veren p ve q değerleri model dereceleri olarak seçilmektedir. Ayrıca, otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları da model derecelerinin seçiminde faydalı olmaktadır. $y(t_p)_{Stokastik}$ sürecini temsil eden model derecesi belirlendikten sonra $\varepsilon(t_p)$ aynı denklemden elde edilebilmektedir. $\varepsilon(t_p)$ 'nin otokorelasyon katsayılarının (9) eşitliği ile güven aralığının içinde kalması ya da $k=1, 2, 3, \dots, h$ gecikmeleri için değiştirilmiştir,

$$Q = n(n+2) \sum_{k=1}^h r^2(k) / (n-k) \quad (14)$$

Q istatistiğinin

$$Q(k) < \chi_{1-\alpha, k-p-q}^2 \quad (15)$$

olması durumunda $\varepsilon(t_p)$ 'nin iç bağımlılığının olmadığına karar verilmekte ve seçilen modelin uygun olduğu sonucuna varılmaktadır (CHATFIELD 1996).

3. Materyal

3.1 Boğaziçi Köprüsü'ne ilişkin özet bilgiler

Boğaziçi Köprüsü İstanbul'da Asya'yı ve Avrupa'yı bağlamaktadır. İnşaatına 1970 yılında 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, içi boş kapalı kutu kesit tabliyelili, narın kuleli ve eğik askılı modern bir asma köprüdür. Şekil (1)'de Boğaziçi Köprüsü'nün genel bir durumu görülmektedir.



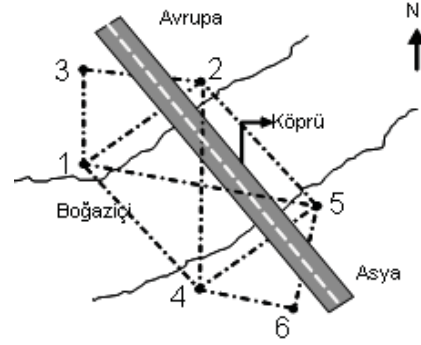
Şekil 1: Boğaziçi Köprüsü

Boğaziçi Köprüsü 6 şeritli bir karayolu trafiğini taşıyacak şekilde yapılmış 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.

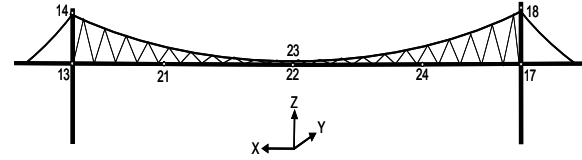
3.2 Boğaziçi Köprüsü'nde Yapılan Jeodezik Çalışmalar

Boğaziçi Köprüsü Jeodezik Kontrol Ağını oluşturmak için 6 adet referans noktası tesis edilmiştir, (Şekil 2). Köprü'nün etkileyen yükler altındaki hareketlerini belirlemek amacıyla yapının karakteristik noktalarında 8 tane obje noktası tesis edilmiştir, (Şekil 3). Objelerden 3 tanesi köprü

tabliyesinin güney tarafına (21, 22 ve 24 numaralı noktalar), 1 tanesi kuzey tarafına (23 numaralı nokta) tesis edilmiştir. Bunlardan 22 ve 23 numaralı noktalar köprü'nün orta noktasına karşılıklı olarak, diğer 21 ve 24 numaralı noktalar ise köprü'nün dörtte bir'lik kısımlarına tesis edilmiştir. Objelerden 13 ve 17 tabliyenin altında yer alan kule girişinin orta noktasına, 14 ve 18 de kulenin en üst girişine tesis edilmiştir.



Şekil 2: Boğaziçi Köprüsü jeodezik kontrol ağı



Şekil 3: Boğaziçi Köprüsü obje noktalarının konumları ve köprü koordinat sistemi (KKS)

Referans ve obje noktalarındaki ölçümlerde Leica TCA2003 otomatik hedefleme yapabilen motorize total station kullanılmıştır. Objelerden kule üzerindeki 14 ve 18 numaralı noktalarda ölçümler eşzamanlı olarak 10 dakika zaman aralıkları ile 10 saat, tabliye üzerindeki obje noktalarında ise (21, 22, 24), TCA2003'ün maksimum örnekleme frekansı olan 1 sn zaman aralıklarında sırası ile 60, 30 ve 30 dakika yapılmıştır. Ayrıca, ölçülerin yapıldığı zaman aralığı için, Boğaziçi Köprüsü'nde etkili olan sıcaklık değişimleri, rüzgar hızı ve araç sayısı büyüklükleri de ölçülmüştür.

Yapılan ölçümlerin analiz ve değerlendirme işlemleri için lokal bir köprü koordinat sistemi (KKS) seçilmiştir, (Şekil 3). Bu koordinat sisteminde; X eksen (boylamasına) köprü'nün açıklık doğrultusu, Y eksen köprü'nün yanal doğrultusu ve Z' de düşey doğrultudur. Bu şekilde seçilen koordinat sistemi, yapının hareket yönleri ile ilişkili olduğundan yapılan ölçümlerin değerlendirilmesine, yapı hareketlerinin açıklanmasına ve analiz sonuçlarının daha iyi yorumlanmasına büyük yarar sağlayacağı düşünülmüştür.

4. Ölçülerin Değerlendirilmesi ve Analiz Sonuçları

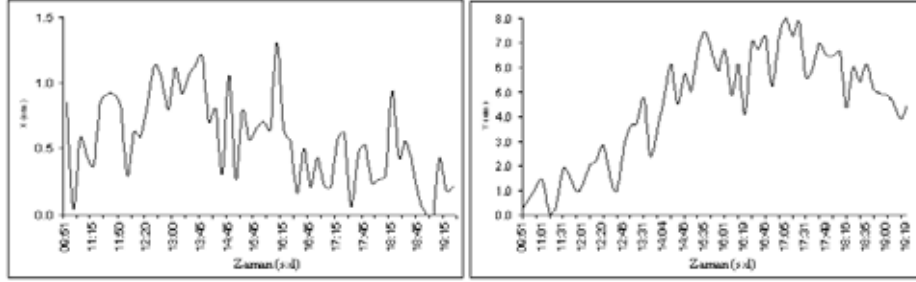
4.1 Kulelerin Hareketi

Boğaziçi Köprüsü'nün Avrupa tarafındaki kulesi (14 numaralı obje noktası) ile Asya tarafındaki kulesi (18 numaralı obje noktası) aynı zaman aralığı içinde gözlemlendiğinden, bu

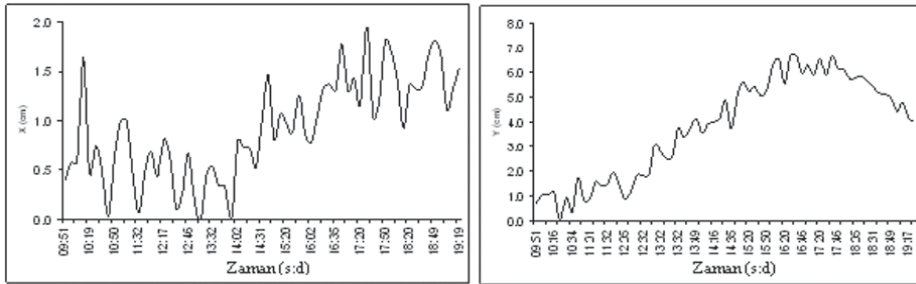
kulelerin hareketlerinin birbirleri ile karşılaştırılması mümkün olmaktadır. Ölçülerin değerlendirilmesi KKS'nde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, değişimlerin daha rahat yorumlanması için grafiklerde ölçü başlangıç zamanı referans alınarak gösterilmiştir.

Avrupa tarafındaki kulenin yanal hareketi (Y) ölçüm başlangıcından itibaren 17:30'a kadar bir artış göstermekte (8

cm) ve daha sonra ise bu harekette bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 4). Köprü'nün Asya tarafındaki kulesi yanal hareketleri (7,2 cm) de yaklaşık aynı zamanlarda benzer hareketi göstermektedir (Şekil 5). 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.



Şekil 4: 14 Numaralı noktanın X (boylamasına) ve Y (yanal) hareketleri



Şekil 5: 18 Numaralı noktanın X (boylamasına) ve Y (yanal) hareketleri

Avrupa tarafındaki kulenin boylamasına hareketi (X) ölçü başlangıcından 14:00'a kadar artmakta, daha sonra ise azalmaktadır (değişim 1,4 cm). Buna karşılık, Asya tarafındaki kulenin boylamasına hareketinin (değişim 2,0 cm) Avrupa tarafındaki kulenin boylamasına hareketinin tam tersi yönde olduğu gözlenmektedir. Böylece her iki kulede de boylamasına hareket; ölçme süresi içerisinde, ilk olarak açıklık yönünde (tabliyenin kuleler arasındaki bölümü), daha sonra da açıklığın ters yönünde gözlenmiştir. Kulelerin yanal hareketlerinin aynı yönde, boylamasına hareketlerinin de önce açıklık yönünde daha sonra da açıklığın ters yönünde olması, Boğaziçi Köprüsü'nün yaklaşık olarak simetrik olmasından kaynaklanmaktadır.

4.2 Tabliyenin Hareketi

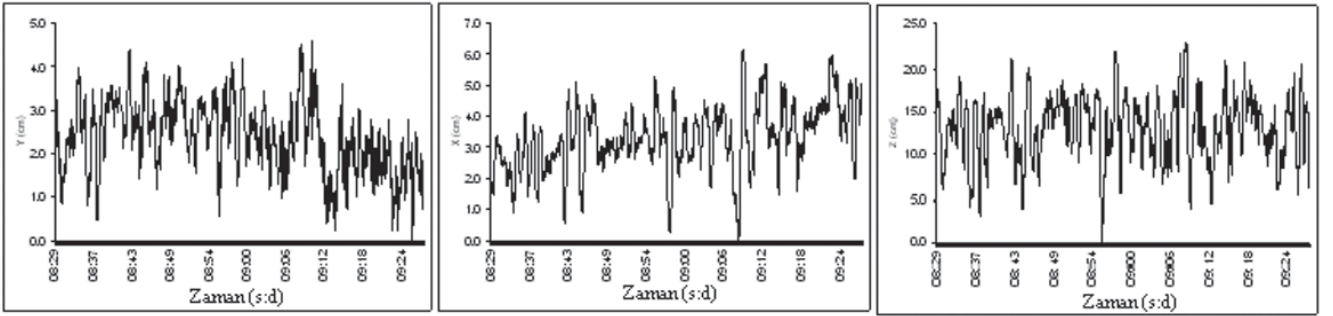
21 numaralı obje noktasının bulunduğu dörtte birlik tabliye kesiminin yanal (Y) ve düşey (Z) hareketleri hemen hemen aynı zaman aralıklarında, aynı yönde gerçekleşmektedir (Şekil 6). Boylamasına (X) hareket yanal ve düşey hareketlerin tersi yönde gerçekleşmektedir. Yani; aynı zaman aralıklarında yanal ve düşey hareket aynı yönde, boylamasına hareket de tam ters yönde meydana gelmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi tabliyenin dörtte birlik kesimi maksimum değişimi yükseklikte ortaya çıkmıştır (23 cm).

22 numaralı obje noktası tabliyenin orta noktası olup, özellikle düşey (Z) yönünde (24,3cm) belirgin değişimlerin beklediği hatta bu değişimlerin gözlemlendiği noktadır (Şekil 7).

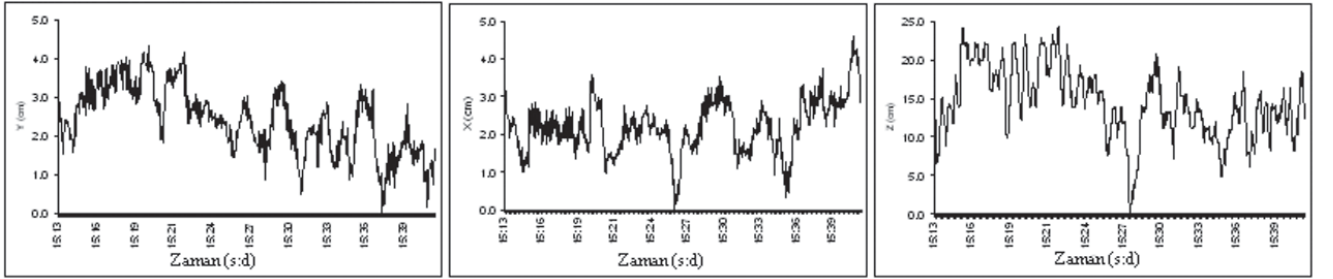
Boylamasına (X) ve yanal (Y) hareketlerin maksimum değişimlerinin ise hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Şekil (7) incelendiğinde, tabliye orta noktasının yanal ve düşey hareketlerinin benzer olduğu, yanal hareket (+) yönde iken, düşey hareketin de (+) yönde değişim gösterdiği görülmektedir. Boylamasına hareket de, yanal ve düşey hareketlere az da olsa benzemektedir. Ancak düşey hareketlerin yanal ve boylamasına hareketlere göre daha fazla ve ani yön değişimlerine sahip olduğu da görülmektedir. Yanal ve boylamasına hareketlerde, bazı zaman aralıklarında durağanlık da görülmektedir.

Şekil 8'de tabliyenin dörtte birlik kesiminde yer alan 24 numaralı noktanın boylamasına (X), yanal (Y) ve düşey (Z) hareketlerinin büyük bir benzerlik gösterdiği görülmektedir. Hareket yönleri de aynı olup, 14:50'den sonra daha düzenli değişmektedir. Grafikler, ölçüm süresi içinde bir bütün olarak incelenirse, boylamasına ve düşey yönlerdeki değişimlerin büyük bir benzerlik gösterdiği ifade edilebilir. 24 numaralı noktanın düşey yönündeki maksimum değişimi de 28,5cm'dir. Ayrıca, boylamasına ve yanal hareketlerin mak-

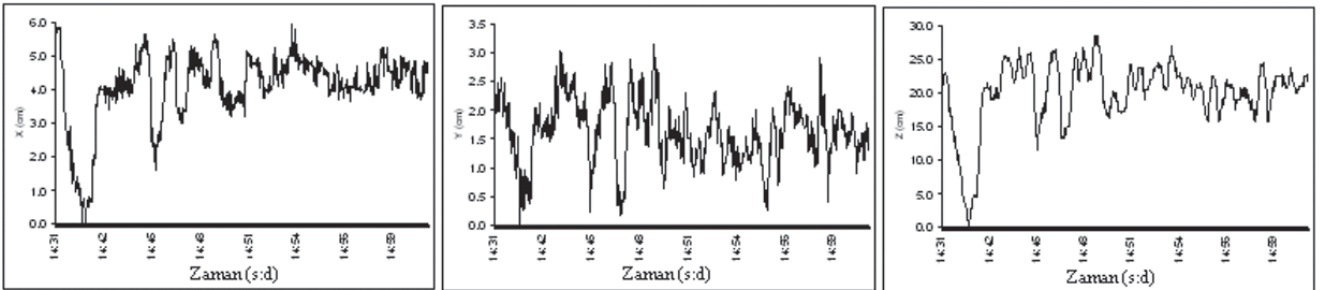
simum değerleri de 21 numaralı obje noktasının boylamasına ve yanıl maksimum değerleri ile uyuşumlu olduğu da görölmüşür.



Şekil 6: Tabliyenin dörtte birlik kesimi (21 numaralı nokta) X (boylamasına), Y (yanıl) ve Z (düşey) hareketleri



Şekil 7: Tabliye orta noktasının (22 numaralı nokta) X (boylamasına), Y (yanıl) ve Z (düşey) hareketleri



Şekil 8: Tabliye dörtte birlik kesimi (24 numaralı nokta) X (boylamasına), Y (Yanal) ve Z (düşey) hareketleri

4.3 Kule ve Tabliye Hareketlerinin Zaman Dizileri ile Analizi

Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini tanımlamak ve geleceğe ilişkin doğru tahminlerin yapılmasını sağlamak amacıyla zaman dizileri analizinden yararlanılmıştır. Köprü'nün her üç yöndeki hareketinin zaman dizileri analizinde, (1) eşitliğinde gösterilen bileşenlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.3.1 Trend Bileşeni Analizi

Köprü'nün tabliye ve kulelerinin boylamasına (X), yanıl (Y) ve düşey (Z) hareketlerini temsil eden zaman dizilerinin lineer bir trend bileşeni içerip-içermediği (3) eşitliğinde öngörülen fonksiyondan yararlanılarak tespit edilmiştir. Bu fonksiyonlara ait c_1 ve c_2 parametreleri ile bu parametrelerin standart sapmaları EKKY ile kestirilmiştir. Kestirilen

parametrelerin %95 güven düzeyinde f serbestlik derecesine bağlı t-dağılımının $t_{f,1-0,05/2}$ güven sınırına göre "0" beklenen değerinden sapmalarının anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Bunun için parametrelerin test değerlerinden " $(\hat{t}_{ck} = \text{parametre} / \text{parametrenin standart sapması})$ " yararlanılmıştır. Test sonucu 21 numaralı noktanın düşey hareketlerinin zaman dizilerinin $\alpha=0,05$ yanılma olasılığı ile lineer bir trend bileşeni içermediği, ancak diğer noktaların zaman dizilerinin lineer bir trend bileşeni içerdiği tespit edilmiştir (Tablo 1).

Köprü'nün tabliye ve kulelerinin boylamasına, yanıl ve düşey yönlerindeki hareketlerinin lineer olarak değişim göstermesi beklenemez. Ancak, bunların çok uzun zamanlı periyodik hareketi, kısa süreli gözlemlerde lineer trend bileşeni olarak ortaya çıkmıştır. Bu trend bileşeni spektral analiz sonuçlarını etkilemekte ve sıfır frekansında peak vermektedir.

Bu nedenle zaman dizileri analizinde istatistiksel olarak dizilerde var olan lineer trend bileşeni dikkate alınmıştır.

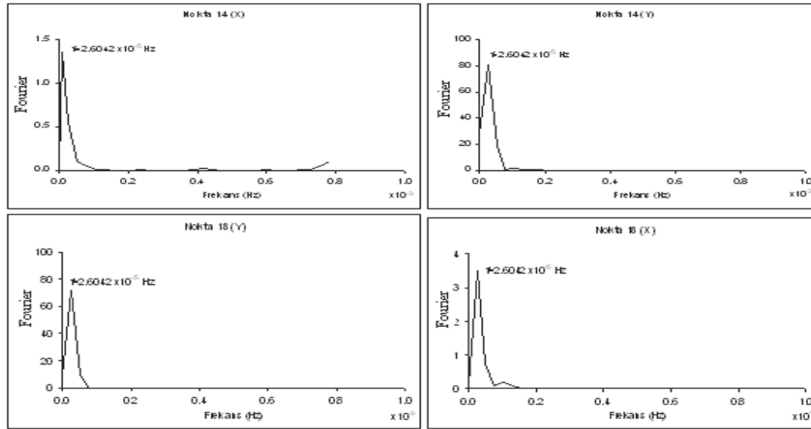
Tablo 1: Zaman serilerindeki lineer trend bileşeni fonksiyonları ve parametre testi (\hat{t}_{ck} test değeri, serbestlik derecesi f kuleler için sırası ile 56 ve 62, tabliye için ise 500'den büyüktür).

Fonksiyon	Parametre Testi	
	$ \hat{t}_{ck} > t_{f,1-0,05/2}$ yada	$ \hat{t}_{ck} < t_{f,1-0,05/2}$
$y(t_i) = c_1 + c_2 \cdot t_i$	$ \hat{t}_{c_1} $	$ \hat{t}_{c_2} $
$Y_{14} = 995,893 + 0,000100 \cdot t$	6,820 > 2,00	7,909 > 2,00
$X_{14} = 2072,562 - 0,000010 \cdot t$	3,906 > 2,00	4,560 > 2,00
$Y_{18} = 997,326 + 0,000097 \cdot t$	12,739 > 2,00	14,768 > 2,00
$X_{18} = 998,333 + 0,000019 \cdot t$	6,356 > 2,00	7,368 > 2,00
$Y_{21} = 983,791 - 0,00000058 \cdot t$	16,486 > 1,96	19,039 > 1,96
$X_{21} = 1807,118 + 0,0000087 \cdot t$	19,416 > 1,96	22,422 > 1,96
$Z_{21} = 67,293 + 0,0000026 \cdot t$	1,457 < 1,96	1,683 < 1,96
$Y_{22} = 983,977 - 0,000020 \cdot t$	24,301 > 1,96	28,067 > 1,96
$X_{22} = 1536,096 + 0,0000078 \cdot t$	8,979 > 1,96	10,370 > 1,96
$Z_{22} = 68,992 - 0,000076 \cdot t$	14,627 > 1,96	16,894 > 1,96
$Y_{24} = 984,380 - 0,0000034 \cdot t$	3,340 > 1,96	3,858 > 1,96
$X_{24} = 1272,126 + 0,000019 \cdot t$	10,416 > 1,96	12,031 > 1,96
$Z_{24} = 67,2270 + 0,000062 \cdot t$	7,066 > 1,96	8,162 > 1,96

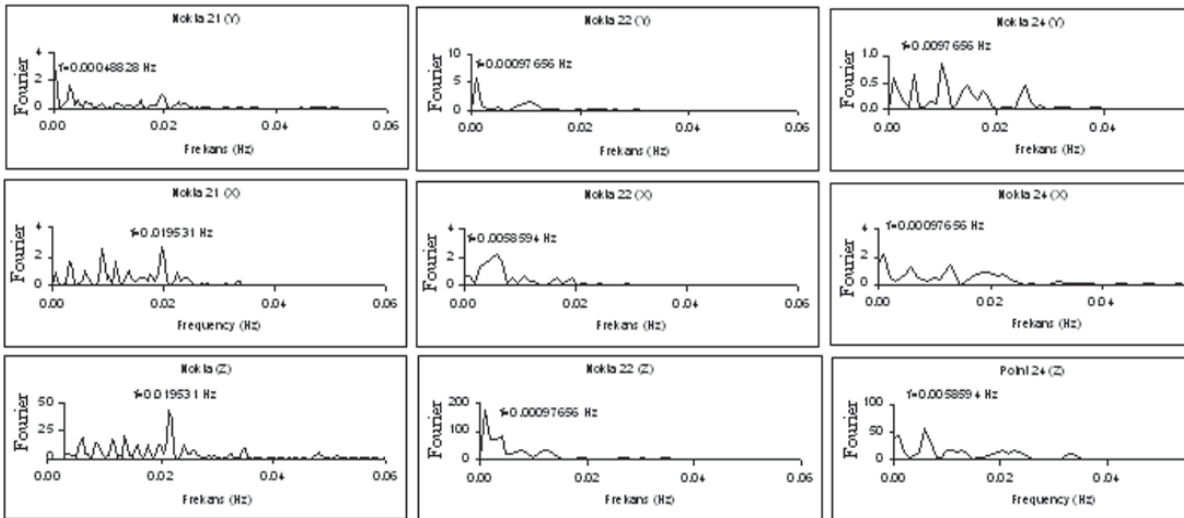
4.3.2 Periyodik Bileşen Analizi

Köprü'nün tabliye ve kulelerinin boylamasına (X), yanal (Y) ve düşey (Z) hareketlerinin zaman dizilerindeki lineer trend bileşeni giderildikten sonra, dizide var olan periyodik bileşenler tespit edilmiştir. Periyodik bileşenler anlık, saatlik, yarım günlük vs. etkiyen sıcaklık, rüzgar ve trafik yüküne bağlı olarak köprüde ortaya çıkan periyodik değişimlerdir. Köprü'nün tabliye ve kulelerinin frekans bileşenleri sırası ile 0-0,5Hz ile 0-0,00083Hz aralığında hesaplanmıştır.

Köprü'nün kısa süreli gözlemlerdeki uzun periyotlu titreşimlerini elde etmek için dizilerin (2) eşitliği ile beşinci dereceden KAO değerleri hesaplanmıştır. Yani dizilere alçakgeçişli bir filtreleme uygulanmıştır. Filtreleme uygulanan dizi Hanning Pencere Fonksiyonu ile çarpılarak HFD ile frekans alanına dönüştürülmüş ve (7) eşitliği ile de Fourier Spektrumu hesaplanmıştır. Köprü'nün kulelerinin ve tabliyesinin hesaplanan kısa süreli gözlemlerinin Fourier Spektrumu Şekil 9 ve Şekil 10 'da verilmiştir.



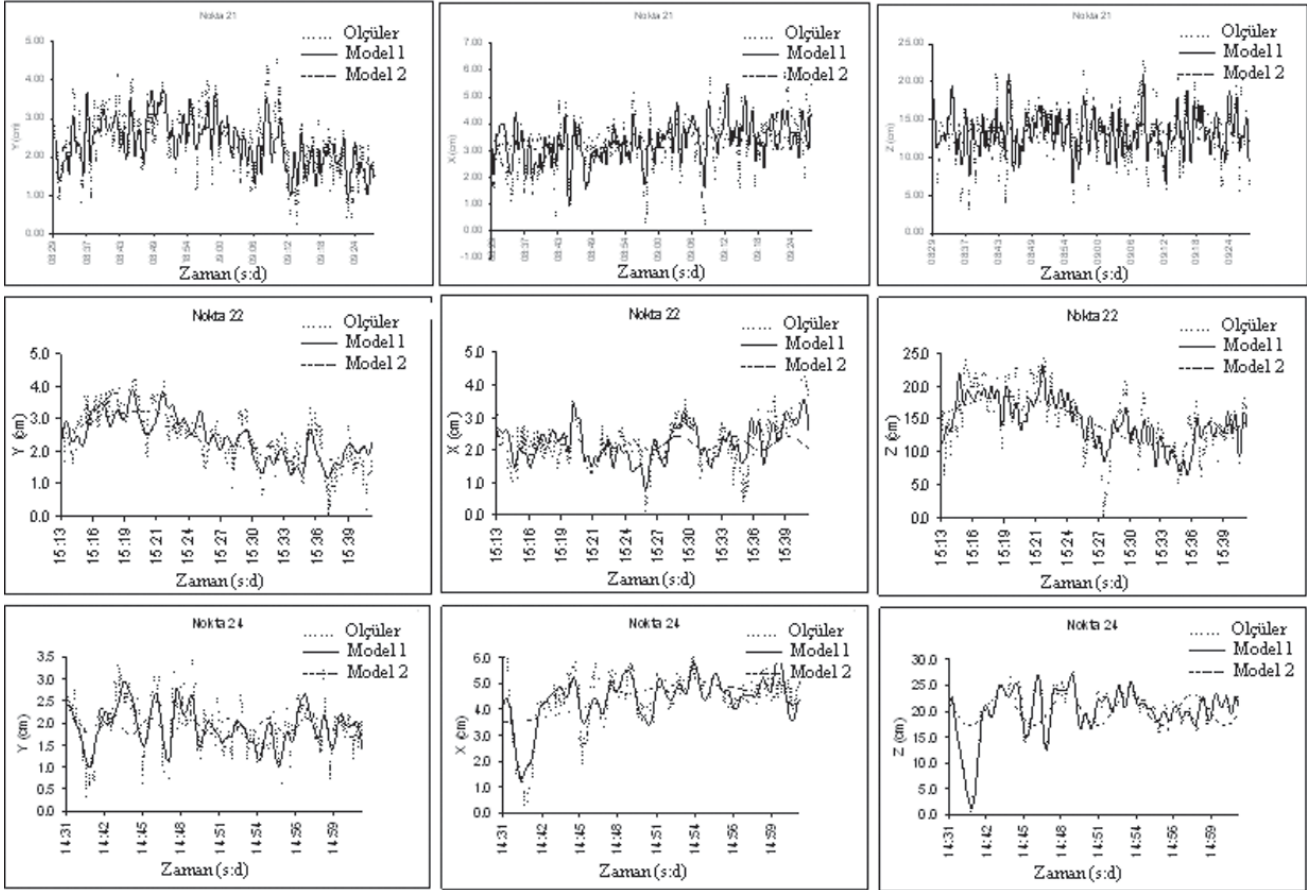
Şekil 9: Kulelerin X (boylamasına) ve Y (yanal) hareketlerinin Fourier Spektrumu



Şekil 10: Tabliyedeki 21, 22 ve 24 noktalarının X (boylamasına), Y (yanal) ve Z (düşey) hareketlerinin Fourier Spektrumu

Şekil 9 incelendiğinde, maksimum Fourier Spektrumuna sahip frekansların kulelerde aynı olduğu tespit edilmiştir. Tabliyede ise 21 numaralı noktanın boylamasına ve düşey, 22 numaralı noktanın da yanal ve düşey titreşim hareketlerinin benzer olduğu görülmüştür. 24 numaralı noktanın boylamasına, yanal ve düşey yönlerindeki maksimum Fourier Spektrumuna sahip frekanslarının ise farklı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10). Ayrıca köprünün dörtte birlik kesimi ile orta noktasının yanal, boylamasına ve düşey yönlerin-

deki frekanslarının 0-0,3Hz aralığında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Ancak, kuleler için hesaplanan frekansların maksimum Fourier Spektrumuna sahip frekansın periyod süresi, bu noktalarda yapılan ölçme süresine eşit çıkmıştır. Bunun en büyük nedeni, kulelerdeki ölçüm süresinin (10 saat) kulelerde var olan uzun zamanlı (10 saatten daha fazla) periyodik hareketlerin belirlenme süresinden az olmasıdır. Bu nedenle köprü kuleleri için anlamlı periyodik hareketlerin varlığı araştırılmamıştır.



Şekil 11: Tabliyedeki 21, 22 ve 24 noktaların X (boylamasına), Y (yanal) ve Z (düşey) yönlerinde ölçülen, Model 1, ve Model 2'den hesaplanan hareketleri

Boğaziçi Köprüsü tabliyesinin boylamasına, yanal ve düşey hareketlerinden hesaplanan frekanslar, köprü tabliyesinin kısa süreli gözlemlerinde çok sayıda periyodik hareketlere sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 10). Bu periyodik hareketlerin kaç tanesinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Hesaplanan frekanslar (4) eşitliğinde yerine konularak, periyodik hareketlerin a_s ve b_s parametreleri ve bu parametrelerin standart sapmaları EKKY ile kestirilmiştir. Kestirilen bu parametreler %95 güven düzeyinde f serbestlik derecesine bağlı t -dağılımının $t_{f,1-0,05/2}$ güven sınırına ($f > 500$ için, $t_{f,1-0,05/2} = 1,96$) göre "0" beklenen değerlerinden sapmalarının anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Parametrelerin hesaplanan test değerlerinin $t_{f,1-0,05/2} = 1,96$ güven sınırından büyük olması durumunda parametrelere ait titreşimler (frekanslar) istatistik olarak anlamlı kabul edilmiştir. Test değerlerinin $t_{f,1-0,05/2} = 1,96$ güven sınırından küçük

olması durumunda ise parametrelere ait frekansların istatistik olarak anlamsız olduğu sonucuna varılmıştır. Bu anlamsız frekanslar (4) eşitliğinden çıkartılmış ve bu işlem anlamlı frekanslar tespit edilene kadar tekrarlanmıştır. Böylece köprü tabliyesindeki anlamlı periyodik hareketler tespit edilmiştir. Bu anlamlı periyodik hareketler zaman dizileri analizinde de periyodik bileşenin belirlenmesinde dikkate alınmıştır. Analiz sonucu köprü tabliyesinin çok sayıda anlamlı periyodik hareketlere sahip olduğu görülmüştür. Periyodik hareket sayısının çok olması nedeniyle, köprü tabliyesinin anlamlı periyodik hareketlere ait (4) eşitliği ile tanımlanan trigonometrik fonksiyonları burada verilmemiştir. Tabliyenin model 1 ve model 2'den hesaplanan ve ölçülen hareketlerinin grafikleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Model 1 ve model 2 şöyle tanımlanmıştır.

$Model1=trend+köprüdeki\ anlamlı\ frekanslarla\ belirlenen\ model$

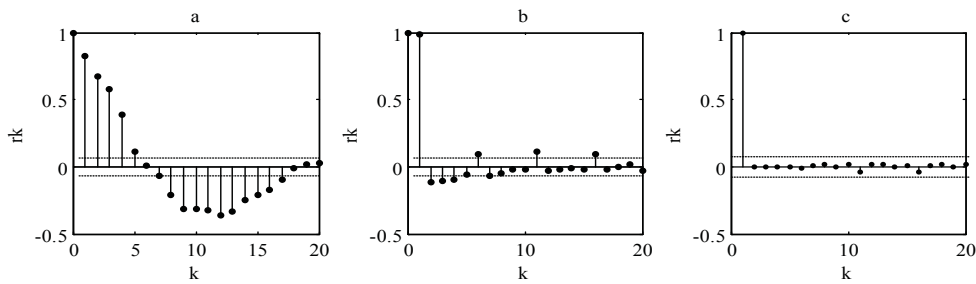
$Model2=trend+köprüdeki\ maksimum\ güce\ sahip\ frekansla\ belirlenen\ model$

Grafiklerde, tabliyenin modellerden hesaplanan hareketlerinin yaklaşık olarak ölçülen hareketleri yansıttığı görülmektedir.

4.3.3 Stokastik Bileşen Analizi

Köprü tabliyesinin (4) eşitliği ile hesaplanan boylamasına (X), yanal (Y) ve düşey (Z) yönlerindeki periyodik hareketleri zaman dizilerinden giderilmiş ve durağan dizi elde edilmiştir. Belli bir zaman süreci içinde yapılan gözlemlerle (örnek değerlerden) analizler yapıldığı için durağan hale getirilen zaman dizileri stokastik sürecinin ortalaması-

nın "0" ve standart sapmasının "1" olmadığı belirlenmiştir. Periyodik hareketleri giderilen dizilerin $\bar{y}(t_i)$ ortalaması ve m_y standart sapması kullanılarak; ortalaması "0" ve standart sapması "1" olan standartlaştırılmış stokastik bileşeni elde edilmiştir. Köprü hareketleri zaman dizilerinin standartlaştırılmış stokastik sürecin iç bağımlılıkları hem otokorelasyon hem de kısmi otokorelasyon katsayılarının %95 güven düzeyinde, $\pm 1,96/\sqrt{n}$ güven aralıkları içinde olmadığı görülmüştür. Zaman dizisinin hesaplanan otokorelasyon fonksiyonunun Şekil (12-a)'da sinüzoidal olarak azalma göstermesi, bu dizinin modelinde otoregresif terimlerinin bulunabileceğini göstermiştir. Aynı şekilde durağan dizinin hesaplanan kısmi-otokorelasyon fonksiyonunun da anlamlı olması, modelde hareketli ortalama terimlerinin de var olabileceğini göstermiştir (Şekil 12-b).



Şekil 12: 22 numaralı noktanın düşey yönündeki değişimleri durağan zaman serileri otokorelasyon (a), kısmi otokorelasyon (b) ve bu nokta için belirlenen en uygun modelin rasgele hatalarının otokorelasyon katsayıları (c)

Tablo 2. Zaman serilerinin stokastik bileşenleri için en uygun modeller ve ölçütleri

N.No	Hareketin Yönü	AIC/SBC Değerleri	Model Tipi	Ljung-Box Q-istatistiği $Q(k) < \chi^2_{1-\alpha, k-p-q}$
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)	$Q(38)=30,996 < \chi^2_{1-0,05,38-18}=31,41$
	Z	-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)	$Q(29)=20,863 < \chi^2_{1-0,05,29-3-6}=31,41$
	Z	-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)	$Q(29)=25,017 < \chi^2_{1-0,05,29-3-6}=31,41$
	Z	-2274,189/-2128,162	ARMA(7,11)	$Q(38)=30,369 < \chi^2_{1-0,05,38-7-11}=31,41$

Zaman dizilerinin stokastik bileşeni için (11) eşitliği ile çok sayıda oluşturulan modellerin parametreleri EKKY ile kestirilmiştir. Bu kestirimlerle en iyi modeli seçebilmek en küçük AIC ve SBC değerlerini veren p ve q , model derecesi olarak seçilmiştir. Modelin uygunluğu Ljung-Box Q-istatistiği kullanılarak $\alpha=0,05$ yanılma olasılığında test edilmiştir (CHATFIELD 1996). Bunun için modelin hesaplanan $\varepsilon(t)$ rasgele hata terimlerinin otokorelasyon katsayılarının hesaplanan $Q(k)$ değerlerinin, $k-p-q$ gibi bir serbestlik derecesi ile χ^2 dağılımından küçük olduğu görülmüş ve modelin uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca belirlenen modellerden elde edilen rasgele hatalarının otokorelasyon katsayıları k sayıdaki gecikme için $\alpha=0,05$ yanılma olasılığında anlamsız bulunmuştur (Şekil 12c). Tablo 2'de stokastik bileşen için AIC ve SBC kriterleri, en uygun modeller ve Q-istatistiği değerleri verilmiştir.

Boğaziçi Köprüsü tabliyesinin boylamasına, yanal ve düşey yönlerindeki hareketlerinin zaman dizileri analizinde, stokastik kesim AR ve ARMA tipi modellerle belirlenmiştir.

Böylece zaman dizileri analizi ile belirlenen modellerin, köprünün hareketlerini bilgi kaybı olmaksızın daha doğru temsil edebileceği sonucuna varılmıştır. Bazı noktalarda model derecelerinin büyük çıkması [AR(22) gibi] dizilerde geriye kalan periyodik hareketlerin stokastik bileşeni etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada 1973 yılından beri hizmet veren İstanbul Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ve kulelerinin boylamasına, yanal ve düşey hareketleri, zaman dizileri analizi ile araştırılmıştır. Zaman dizisi grafiklerinden, tabliye ve kulelerin

ölçülen hareketlerinin (tepkilerinin) yapıya etkileyen trafik yükü, rüzgar kuvveti ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Köprünün simetrik olmasından da yararlanılarak özellikle etkileyen yükler altında kulelerin benzer hareketler sergilediği ve tabliyenin düşey yöndeki hareketlerinin boylamasına ve yanal yönlerindeki hareketlerine göre daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Köprünün boylamasına, yanal ve düşey hareketlerinin frekans değerleri tabliye için 0-0,5 Hz, kuleler içinde 0-0,00083 Hz arasındadır. Ayrıca, tabliyenin sıcaklık, rüzgar ve trafik yükünden kaynaklanan kısa süreli gözlemlerinde çok sayıda periyodik hareketlere (titreşimlere) sahip olduğu istatistiksel test sonucu tespit edilmiştir. Tespit edilen anlamlı titreşimlerden elde edilen trigonometrik ve lineer trend modellerinin toplamından hesaplanan hareketlerin ölçülen hareketlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, tabliye ve kulelerdeki uzun periyotlu hareketler zaman dizileri analizinde lineer trend olarak ortaya çıkmıştır.

Son olarak dizilerin stokastik bileşeninin otokorelasyon katsayılarının ilk gecikmelerde %95 güven sınırlarının dışına çıktığı gözlenmiştir. Bu sonuç, dizilerin iç bağımlılığının olduğunu gösterdiğinden otoregresif modeller denenmiş olup; noktalardan 2 tanesi AR(22), 2 tanesi ARMA(3,6) ve diğer noktalarda birer tane olmak üzere farklı derecelerdeki modellerine uyduğu sonucuna varılmıştır.

Böylece, zaman dizilerinin analizi ile dizilerdeki trend, periyodik ve stokastik bileşenler tespit edilerek, Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ve kulelerinin etkileyen yükler altındaki yanal, boylamasına ve düşey yönlerdeki tepkilerinin şekli ve fonksiyonları hem zaman hem de frekans alanında belirlenmiştir. Ayrıca, köprünün hareketlerinde beklenmedik herhangi bir duruma da rastlanmamıştır.

Teşekkür

İstanbul Boğaziçi Köprüsünde yapılan bu çalışma 25-05-03-02 YTUBAPK numaralı, "Asma Köprülerin İç ve Dış Yükler Altında Davranışlarının Sürekli Ölçü Yöntemleri ile İzlenmesi" konulu proje kapsamında yapılmıştır. Bu projeye destek veren Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne, ölçme çalışmalarına bizzat katılarak yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Otto Heuncke'ye, Arş. Gör. B. Akpınar'a, Ercenk Ata'ya, Fatih Poyraz'a ve N. Onur Aykut'a, köprüde yapılan ölçmeler esnasında yardımcı olan başta Dr. Nurdan Apaydın olmak üzere T.C.K 17. Alan Müdürlüğü'ne ve donanım olarak destek veren Universitaet Bundeswehr'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- BOX G. E. P., JENKINS G. M.: **Time Series Analysis Forecasting And Control**, San Fransisco, Holden-Day Inc., 1976.
- CHATFIELD C.: **The Analysis Of Time Dizes**, Chapman & Hall/CRC, 1996, 283 pp.
- DUMANOĞLU A. A., SEVERN R. T.: **Asynchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges, Part 1: Free Vibration**, 1985, University of Bristol, Bristol.
- ENDERS W.: **Applied Econometric Time Dizes**, John Wiley & Sons, Inc., Newyork, USA, 1995, 433 pp.
- ERDOĞAN H.: **Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Jeodezik Ölçmelerle Belirlenmesi**, Doktora Tezi, YTÜ, FBE, 2006.

- ERDOĞAN H., AKPINAR B., GÜLAL E. and ATA E.: **Monitoring the dynamic behaviors of the Bosphorus Bridge by GPS during Eurasia Marathon**, Nonlinear Processes in Geophysics, 14, 4, 2007, 513-523.
- ERDOĞAN H., GÜLAL E.: **The Application of Time Dizes Analysis to Describe the Dynamic Movements of Suspension Bridges**, Nonlinear Analysis: Real World Applications, 10 (2009) 910-927.
- ERDOĞAN H., GÜLAL E.: **Identification of dynamic systems using multiple input-single output (MISO) models**, Nonlinear Analysis: Real World Applications, 10 (2009) 1183-1196.
- HEKİMOĞLU Ş.: **Zaman Dizilerinde Trend Belirleme ve Trendin Periyodik Kesime Etkisi Üzerine**, "Sivil Harita Mühendisliği Eğitim ve Öğretiminde 40. Yıl Sempozyumu", 11-13 Ekim 1989, İstanbul, 71-88.
- HIPEL K. W., MCLEOD A. I.: **Time Dizes Modelling of Water Resources and Environmental Systems**, Elsevier Science, 1994, Amsterdam, Netherlands.
- JENKINS G.M. ve WATTS D.G.: **Spektral Analysis and Its Application**, Holden-Day, San Francisco, 1968.
- KUHLMAN K.: **Importance of Autocorrelation for Parameter Estimation in Regression Models, Theory and Deformation Analysis**, The 10th International Symposium on Deformation Measurements, 2001, California.
- LOVSE J. W., TESKEY W. F., LACHAPPELLE G. and CANNON M. E.: **Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology**, Journal of Surveying Engineering, Vol. 121(1), 1995, 16-22.
- RABINER L.R. ve GOLD B.: **Theory and Application of Digital Signal Processing**, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- REN W. X., HARIK I. E., BLANDFORD G. E., LENETT M. and BASEHEART T. M.: **Roebing Suspension Bridge. II: Ambient Testing and Live-Load Response**, Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No. 2, 2004, 119-126 pp.
- ROBERTS G. W., DODSON A.H., ASHKENOZI V., BROWN C. V. and KARUNA R.: **Comparison of GPS measurements and Finite Element Modelling for the Deformation Measurements of the Humber Bridge**, Proc ION GPS, 1999, Nashville, USA.
- ROBERTS G. W., MENG X. and DODSON A.: **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, 2000, USA.
- ROBERTS G. W., MENG X. and DODSON A. H.: **The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges**, 10th International Symposium on Deformation Measurements, 2001, California, USA, (CD-ROM).
- ŞEN Z.: **İstatistik Veri İşleme Yöntemleri**, Su Vakfi Yayınları, 2002, İstanbul.
- WIESER A. and BRUNNER F. K.: **Analysis of Bridges Deformations Using Continuous GPS measurements**, INGE02002, 2nd Conference Surveying, Bratislava, 2002, pp. 45-52.
- WONG K. Y.: **Planning and Implementation of the structural Health Monitoring System for Cable-Supported Bridges in Hong Kong**, Proceeding of SPIE, Vol.3395, 2000, p. 266-276.
- YONG C. and CHRZANOWSKIA.: **Identification of Deformation Models in Space and Time Domain**, Survey Review, 33, (262 October), 1996, 518-528.