

FARKLI ZAMAN NOKTALARI İÇİN (1973-2006) BOĞAZIÇI KÖPRÜSÜ DAVRANIŞLARININ TANIMLANMASI

H. Erdoğan¹, E. Güla², B. Akpınar², E. Ata²

¹Aksaray Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Aksaray, hediye.erdogan@gmail.com

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, egulal@yildiz.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Asya ve Avrupa'yı birbirine bağlayan Boğaziçi Köprüsü tabliyesinin trafik, rüzgar, yaya ve ritmik koşu gibi yüklerin etkisi altındaki yanal ve düşey yöndeki davranışları zaman ve frekans bölgesinde araştırılmıştır. Bu amaçla, köprü davranışları 2003, 2005/1, 2005/2 ve 2006 da yersel ve uydu teknikleri kullanılarak sırası ile 1Hz, 5Hz, 2Hz ve 10Hz örnekleme frekanslarında ölçülmüştür. 2005 de iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bunlardan 2005/2 ölçümleri, 02.10.2005'de yapılan ve 75 bin kişinin katıldığı Avrasya Maratonu sırasında yapılmıştır. Maraton sırasında RTK GPS ile köprünün ritimli koşu, yaya yürüyüşü ve araç geçişi gibi yükler altındaki tepkileri ölçülmüştür. Bu ölçülerle köprünün 5 farklı yük durumu altındaki davranışları incelenmiştir. Tüm ölçümler Hızlı Fourier Dönüşümü ile zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştürülmüştür. Güç spektrumlarından yararlanılarak Köprü tabliyesi düşey ve yanal yöndeki frekansları 0-1.5 Hz aralığında tespit edilmiştir. Düşey frekansları, 2003 ölçümleri için 8 tane, 2005/2 ölçümlerinin 1., 2. ve 3. kısımları için 12 tane, 2005/1, 2005/2'nin 2., 4. ve 5. kısımları ve 2006 ölçümleri için 13 tane hesaplanmıştır. Yanal frekansları ise; 2003 ve 2005/2'nin 3. kısmı ölçümleri için 8 tane, 2005/1 ve 2005/2 nin 1.,2.,4. ve 5. kısımları ve 2006 ölçümleri için 9 tane hesaplanmıştır. Bu ölçümlerden tespit edilen frekanslar 1973 (Köprü'nün trafiğe açılışı) ve 1987'deki ölçümlerden ve Köprü'nün Sonlu Elemanlar modelinden hesaplanan 13 düşey ve 9 yanal frekanslarla da karşılaştırılmıştır. Köprü farklı zaman noktalarında farklı yükler altında olsa da elde edilen bütün frekansların uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Boğaziçi Köprüsü, Hızlı Fourier Dönüşümü, Frekans, Güç Spektrumu, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

ABSTRACT

DESCRIPTION OF BEHAVIORS OF BOSPORUS BRIDGE FOR DIFFERENT TIME POINTS (1973–2006)

In this study, vertical and lateral behaviors of Bosphorus Bridge deck, which connects Asia to Europe, were investigated under stress loads such as traffic, wind, pedestrian and rhythmic in both time domain and frequency domain. For this purpose, bridge behavior is measured in the 2003, 2005 /1, 2005 /2 and 2006 by the terrestrial and satellite techniques in the 1Hz, 5Hz, 2Hz and 10Hz sampling frequencies, respectively. The two measurements were carried out in 2005. 2005/2 measurements were made during the Eurasia Marathon on 2 October 2005, in which 75 000 pedestrians participated. Responses of the bridge to loads such as rhythmic running, pedestrian walking, vehicle passing during the marathon were measured by a real-time kinematic (RTK) Global Positioning System (GPS). Behaviors of Bridge were investigated under five different load cases using this measures. Measures were transformed by Fast Fourier Transform (FFT) from time domain to frequency domain. Vertical and lateral frequencies of bridge deck were determined by power spectrums in the range 0–1.5Hz. For the bridge deck, vertical frequencies are 8 (in 2003), 12 (in the 1st and 3rd parts in 2005/2) ve 13 (in 1987, in 2005/1, in the 2nd, 4th and 5th parts in 2005/2 and in 2006). Lateral frequencies are 8 (in 2003 and in the 3rd part in 2005/2) and 9 (in 2005/1, in the 1st, 2nd, 4th and 5th parts in 2005/2 and in 2006). These frequencies were compared with 13 vertical and 9 lateral frequencies which calculated from in 1973 (Bridge opened to traffic) and in 1987 measurements and Finite Element Model of Bridge.

Keywords: Bosphorus Bridge, Fast Fourier Transform, Frequency, Power Spectrum, Finite Element Method.

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının sayısındaki artış, bu yapıların bakımı ve kontrolü ile ilgili problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu tür yapılarda periyodik ya da sürekli olarak yapılan kontrollerle yapının güvenlik riski minimuma indirgenmekte ve böylece bakım giderleri de olabildiğince azaltılmaktadır. Bu nedenle, mühendislik yapılarında sıcaklık değişimleri, rüzgar kuvveti, yaya ve trafik yükü gibi iç ve dış yükler altında oluşan hareket ve şekil değişikliklerinin uygun ölçüm donanımı ile ölçülmesi, değerlendirilmesi ve analiz edilmesi mühendislik ölçmelerinin başlıca ilgi alanları arasında yer almaktadır.

Mühendislik yapılarının etkiyen yüklere bağlı tepkimelerinin sürekli izlenmesi sonucu elde edilen zaman serilerinin analizi ile yapının davranışı zamana bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Ancak, mühendislik yapılarının tepkimelerinin zaman bölgesinde, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi bazı uygulamaları için genelde yetersiz kalabilmektedir. 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. Frekans bölgesine dönüşüm için kullanılan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ise

$$X(k) = \sum_{t=0}^{N-1} X(t)e^{-jk\frac{2\pi}{N}t} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

ile tanımlanır. Burada, N ölçü sayısı, t zamanı, $j = \sqrt{-1}$ ve $X(k)$ ise $X(t)$ sinyalinin Fourier dönüşümüdür. 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. İşlem sonucu elde edilen $X(k)$ değerleri karmaşık sayılardır. Karmaşık sayıları frekansları belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden HFD sonucu elde edilen değerlerin modül karesi alınır ve spektrum $P_{xx}(k)$ olarak adlandırılır (Allen ve Mills, 2004).

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

Eşitliği ile hesaplanan $P_{xx}(k)$ ile bir sinyalin enerjisinin hangi frekanslarda yoğunlaştığı tespit edilerek, seride var olan hareketlerin frekansları belirlenir.

Köprüler trafik, rüzgar ya da deprem gibi doğal ya da çevresel yüklerin etkisi altında tepki göstermektedirler. Bu tepkilerin ölçülmesi sonucu, köprülerin titreşimleri belirlenebilmektedir. Bu tür ölçümlerin en büyük avantajı köprüde titreşim oluşturabilmesi için herhangi bir donanım ihtiyacı duyulmaması nedeniyle pahalı olmaması ve işletmeye açık iken ölçümlerin yapılabilmesidir. Bu yüzden, trafik, rüzgar ve deprem gibi yükler altında yapı titreşimlerinin GPS ve örnekleme frekansı çok daha yüksek accelerometer gibi aletlerle izlenmesi üzerine, örneğin; Lovse vd., (1995), Roberts vd., (1999), Roberts vd., (2000), Roberts vd., (2001), Radovanovic ve F. Teskey (2001); Wieser ve Brunner (2002) ve Cheng vd., (2002), Roberts vd., (2004) tarafından yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır.

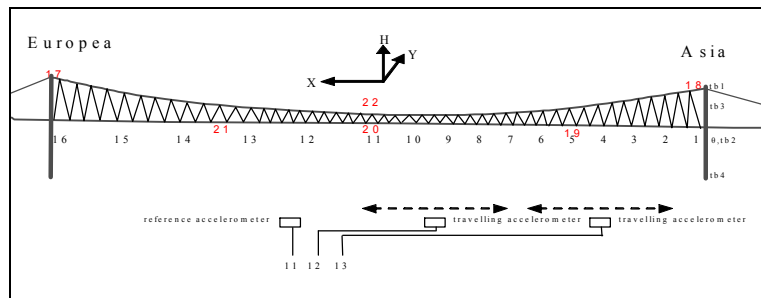
Bu çalışmada ise Boğaziçi Köprüsü'nün frekansları, 1973, 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 (27th Intercontinental Eurasia Marathon) ve 2006 yıllarında farklı örnekleme frekanslarında yapılan ölçümlerinden hesaplanmıştır. Hesaplanan frekansların 0–1.5Hz aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hesaplanan frekansların FE modelinden hesaplanan frekanslarla da uyumlu olduğu görülmüştür. .

2. BOĞAZIÇI KÖPRÜSÜ

Boğaziçi Köprüsü'nün yapımına 1970 yılında başlanmış ve 1973 yılında da tamamlanarak hizmete açılmıştır. Boğaziçi Köprüsü, 1074 m ana açıklıklı, sırasıyla Avrupa ve Asya yakalarında olmak üzere 231 m ve 255 m kenar açıklıklı, narin kuleli ve eğik askılı modern bir asma köprüdür. Köprü kuleleri çelik kutu kesitli olup 165 m yüksekliğindedir. 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.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ve kulelerinde farklı zamanlarda, farklı yüklerin etkisi altında, farklı tekniklerle farklı örnekleme frekanslarında ölçümler yapılmıştır. Köprüde 1973'den (köprü'nün trafiğe açılması) 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 (27. Uluslar arası Avrasya Maratonu) ve 2006 ya kadar yapılan ölçümlerle ilgili bazı genel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1: 1987 (1-16, tb1, tb2, tb3, tb4)'de bir referans ve iki bağımsız gezici accelerometers ile (Brownjohn vd., 1988), 2003 (17-21)'de TCA2003 ile, 2005/1 (20 ve 22)'de GPS ile, 2005/2 (20) ve 2006 (17, 18 ve 20)'da ise RTK GPS ile yapılan ölçümlerde kullanılan obje noktaları ve Köprü Koordinat Sistemi (KKS)

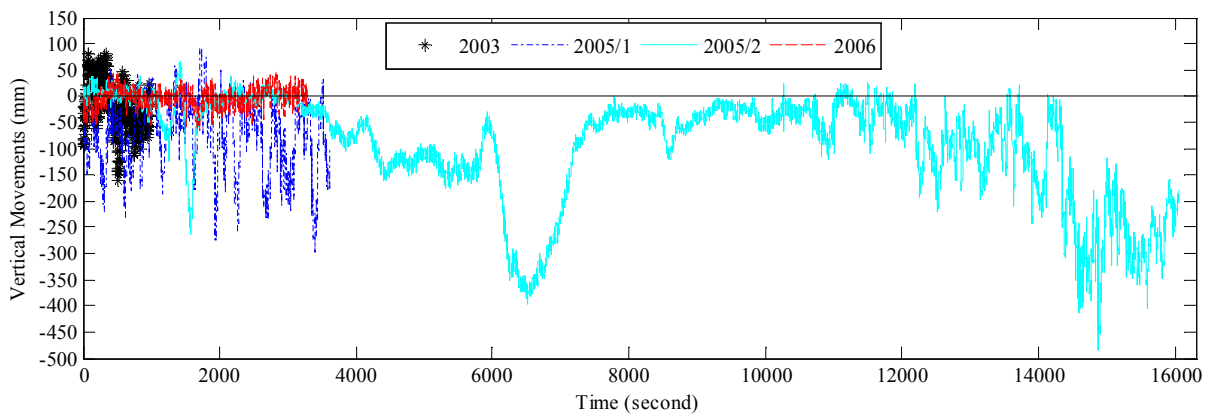
Köprüde 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 ve 2006 yıllarında gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan obje noktalarının konumları ise Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil 1’de gösterilen 1-16, tb1, 0,tb2, tb3, tb4 noktalarında 1987’de [14], 17-21 noktalarında 2003’de, 20 ve 22 noktalarında 2005/1’de, 20 noktasında 2005/2’de, 17, 18 ve 20 noktalarında ise 2006’da ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, Şekil 1’de 1987’deki ölçümlerde kullanılan accelerometer konumu da gösterilmiştir.

Tablo 1: Boğaziçi Köprüsü’nde 1973, 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 and 2006 yıllarında yapılan ölçümler ile ilgili genel bilgiler; donanım, doğruluk, sampling frequency, ölçüm süresi, ölçüm zamanındaki maksimum sıcaklık, rüzgar hızı ve bir saatte köprüden geçen ortalama araç sayısı

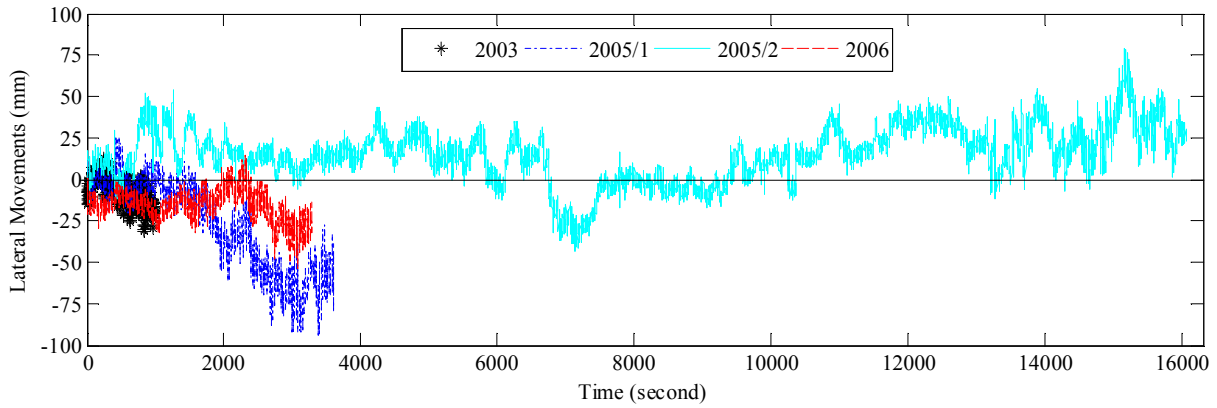
Ölçüm tarihi	20.10.1973	14.04.1987- 22.04.1987	22.09.2003- 26.09.2003	10.04.2005/1	02.10.2005/2	02.06.2006- 12.06.2006
Donanım	Eccentric mass exciter (Teledyne GSV-100)	Schaevitz LSOC-14.5 Accelerometer	TCA2003 ATR sistemli	GPS (ThalesZ-Max) Ölçü Modu: Static	GPS (Thales Z-Max) Ölçü Modu: Real-Time Kinematic (RTK)	GPS (Thales Z-Max) Ölçü Modu: Real-Time Kinematic (RTK)
Doğruluk	-	İşlem aralığı: +/-0.25g for an output of +/-5V, from DC to approximately 32Hz	Açı: 0.15mgon Uzunluk: 1mm+1ppm	Konum: 5mm+0.5ppm Düşey: 1cm+0.5ppm	Konum: 1cm+1ppm Düşey: 2cm+1ppm	Konum: 1cm+1ppm Düşey: 2cm+1ppm
Örnekleme frekansı	-	2Hz	1Hz	5Hz	2Hz	10Hz
Tabliye için ölçüm süresi	-	45min.(düşey) 90dk. (yanal)	30min. (düşey ve yanal)	45min. (düşey ve yanal)	270min. (düşey ve yanal)	10 gün (yanal ve düşey)
maksimum Sıcaklık	-	12.1 °C	19.4 °C	16.7 °C	15.6 °C	18 °C
maksimum rüzgar hızı	-	3.7m/sec	2 m/sec	3 m/sec	2.5 m/sec	4 m/sec
Bir saatteki ortalama araç sayısı	Trafığe kapalı	5400	7302	7753	6590 (marathon dan sonra köprünün trafığe açılması)	8064

Bu çalışmada, 2003, 2005/1, 2005/2 ve 2006’da tabliye orta noktasındaki 20 numaralı noktanın yanal ve düşey yönlere hareketleri değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Ayrıca 1973 ve 1987 de yapılan ölçümler ve bu ölçümlerden hesaplanan frekanslar hakkında da detaylı açıklamalar yapılmıştır. Sadece 1973 ve 1987 deki ham ölçüler elde edilemediği için bu yıllara ait ölçüler Şekil 2 ve 3’de gösterilememiştir. Şekil 2 ve 3’de köprünün 20 numaralı noktasının 2003, 2005/1, 2005/2 ve 2006 da farklı ölçüm yöntemleri ve farklı örnekleme frekansları ile elde edilen düşey ve yanal hareketleri gösterilmiştir. Bu hareketler, farklı zamanlarda gerçekleştirilen her bir ölçümün başlangıç değeri referans alınarak belirlenmiştir. Grafiklerde, her bir ölçümün yapıldığı zaman, ölçüm süresince köprüye etkiyen yükler (rüzgar, trafik, ritimli koşu, yaya) ve örnekleme zamanları farklıdır. Bu nedenle bu ölçüler arasında doğrudan bir karşılaştırma yapmak çok doğru olmayacaktır. Ancak, bu ölçümlerden hesaplanan ve Sonlu Eleman Modelinden predikte edilen frekansların uyumlu olup-olmadığı araştırılabilir. Bununla ilgili çalışmalar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

Şekil 2 ve 3’den yararlanılarak her bir ölçüm kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Bu grafiklerde tabliyenin düşey ve yanal hareketlerinin değişim değerleri de görülmektedir.



Şekil 2: Köprü tabliyesinin farklı zaman noktalarında (2003, 2005/1, 2005/2 and 2006) farklı örnekleme frekansları ile (sırası ile 1, 5, 2 and 10Hz) elde edilen düşey hareketleri



Şekil 3: Köprü tabliyesinin farklı zaman noktalarında (2003, 2005/1, 2005/2 and 2006) farklı örnekleme frekansları ile (sırası ile 1, 5, 2 and 10Hz) elde edilen yanal hareketleri

1973 ve 1987 Ölçümleri: 1973 ve 1987 ölçümleri ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. 1973 ölçümleri köprünün inşaatı tamamlandıktan sonra, trafiğe açılmadan önce yapılmıştır (ayrıntılı bilgi için, Brownjohn vd., 1988; Petrovski vd., 1974 ve Tezcan vd., 1975’e bakınız).

2003 Ölçümleri: Boğaziçi Köprüsü’nün tabliye ve kulelerinde 22.09.2003 and 26.09.2003 tarihleri arasında Şekil 1’de gösterilen noktalarda (17, 18, 19, 20 and 21) total station (TCA2003) ile ölçümler yapılmıştır. Bu noktalardan 20 numaralı noktanın ölçümler 1 ve 4 numaralı referans noktalarından yararlanılarak yapılmıştır (Şekil 4). Ölçümlerin örnekleme frekansı 1Hz olup, ölçüm süresi 30 dakikadır. 20 numaralı obje noktasının düşey hareketlerinin yanal hareketlere göre daha belirgin olduğu görülmüştür ve bu da beklenen bir durumdur. Maksimum düşey hareketler, referans değerinin altında -161.3 mm ve üstünde ise 81.4mm’dir. (Şekil 2). Şekil 2 ve 3 incelendiğinde yanal ve düşey hareketlerin benzer ve aynı yönlerde (hareketin artış ve azalma yönü) olduğu görülmektedir. Maksimum yanal hareket referans değerinin altında -30.9 mm, üstünde ise 12.4 mm’dir (Şekil 3).



Şekil 4: 20 numaralı noktanın 4 ve 1 numaralı referans noktalarına bağlı olarak TCA2003 ile ölçülmesi

2005/1 Ölçümleri: Boğaziçi Köprüsü’nün kuzey (Asya’dan Avrupa’ya geçiş) ve güney (Avrupa’dan Asya’ya geçiş) yönlerinde farklı zamanlarda farklı büyüklükte trafik akışı görülmektedir. Bu farklı büyüklükteki trafik akışı sonucu, tabliyenin her iki yöndeki hareketlerinde ortaya çıkabilecek farklı değişimleri belirleyebilmek amacıyla tabliyede ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, maksimum hareketlerin beklendiği tabliye orta noktasının güney (20 numaralı nokta) ve kuzey yönlerdeki (22 numaralı nokta) noktalarında (Şekil 1 ve 5) yanal, boylamasına ve düşey yönlerde yapılmıştır. Ölçümler 10.04.2005 tarihinde GPS ile eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Örnekleme frekansı 5Hz dir. Ölçümler sırasında sıcaklık 16.7°C, rüzgar hızı N yönünde 3m/sn olarak kayıt edilmiştir (Tablo 1). Referans noktası 6 ise obje noktalarından yaklaşık 1.5 km uzaklıkta deniz seviyesinden 66 m yükseklikteki bir tepe üzerinde pilye şeklinde tesis edilmiştir (Şekil 5).

Tabliyenin 20 numaralı obje noktasına göre düşey ve yanal hareketlerinin değişimleri Şekil 2 ve 3 de verilmiştir. Tabliyenin referans değerine göre maksimum hareketleri düşey için -296 mm and 93 mm yanal için ise -94.3mm and +26 mm’dir. (+) ve (-) işaretleri tabliyenin referans değerinin altında ve üstünde kalan hareketlerini göstermektedir. Tabliyenin kuzey tarafının yanal ve düşey hareketlerinin tabliyenin güney tarafının hareketleri ile aynı yönlerde ve hemen hemen aynı büyüklükte olduğu görülmüştür. Bu nedenle, tabliyenin etkiyen yükler altındaki frekansları 20 numaralı noktadan elde edilen ölçümlerden hesaplanmıştır. Şekil 2 ve 3’de tabliyenin 2005/1 düşey ve yanal yönlerindeki hareketleri diğer zamanlardaki hareketlerden farklıdır. Bu da beklenen bir durumdur.



Şekil 5: 6 numaralı referans noktasından 20 ve 22 numaralı obje noktalarının GPS ile ölçülmesi

2005/2 (27. Uluslararası Avrasya Maratonu) Ölçümleri: 2005/2'de köprüde gerçekleştirilen ölçümler 1973, 1987, 2003, 2005/1, 2006 da gerçekleştirilen ölçümlerden oldukça farklıdır. Köprü vb yapılar sıcaklık değişimleri, kar yükü, deprem yükü, rüzgar kuvveti, yaya yükü ve trafik yükü gibi büyüklükler dikkate alınarak dizayn edilirler. Ancak, bu tür yapıların çok özel, karmaşık ve farklı yük durumlarının etkisi altında kalabileceği genellikle tahmin edilemez. Bu nedenle bu tür yüklere yapıların nasıl bir tepki göstereceği ve bu tür yüklerin yapılar da herhangi bir tehlike durumu oluşturup-oluşturmadığı da bilinmez. Böyle özel bir durum, Boğaziçi Köprüsü'nde 02.10.2005'de yapılan ve 75 bin kişinin katıldığı 27. Uluslararası Avrasya Maratonu sırasında gerçekleşmiştir. Maraton süresince köprü rüzgar kuvvetinin (maraton için köprünün trafiğe kapatılması), ritimli koşunun (Şekil 6a ve 6c), yaya yürüyüşünün (Şekil 6b), farklı sayıda ve büyüklükte araç geçişinin oluşturduğu yüklerin etkisi altında kalmıştır. Bu yükler altında köprünün hareketleri RTK GPS ile ölçülmüştür. Örneklem frekansı 2Hz dir.



Şekil 6: Maraton koşusu kapsamında ortaya çıkan farklı yükler (a-b-c) altında 20 numaralı noktanın P7 numaralı referans noktasından RTK-GPS ile ölçülmesi (d)

Ölçümlerde kullanılan referans noktası P7 (Şekil 6d) köprüye yaklaşık 1 km uzaklıktaki bir binanın üzerindedir. Objeye noktası olarak da düşey yönde maksimum hareketlerin beklendiği tabliyenin orta noktası (20) seçilmiştir (Şekil 1 ve 6d). Ölçümler 8:52 ile 13:15 zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında maksimum sıcaklık 15.6°C, rüzgar ise Kuzey (N) yönde 2,5 m/sn'dir. Ayrıca, ölçüm süresince farklı yoğunluklarda yağmur şeklinde yağış gözlenmiştir.

Tablo 2: Maraton sürecinde köprüye etkiyen yükler, yüklerin etkili olduğu zaman aralığı, köprünün boş başlangıç zamanındaki değere göre maksimum düşey ve yanal hareketleri

Part no.	Yük Tipi	Yük etkisinin görüldüğü zaman aralığı (h:m:s)	Referans değerinin üstünde/altında kalan maksimum hareketler (mm)	
			Vertical	Lateral
2005/2-1	Boş1(sadece rüzgar yükü)	08:52:15-09:00:05	39/-21	44/-17
2005/2-2	Maraton(ritmik yük)	09:00:05-09:08:43	38/-85	56/---
2005/2-3	Otobüs+farklı aktiviteler	09:08:43-11:17:18	66/-396	45/-43
2005/2-4	Boş2(sadece rüzgar yükü)	11:17:18-11:56:15	25/-121	45/-17
2005/2-5	Trafik +rüzgar yükü	11:56:15-13:21:06	23/-483	79/-12

Maraton süresince tabliyede görülen farklı bütün yük durumları zaman aralıkları ile tespit edilmiştir (Tablo 2). Elde edilen bu bilgilerden yararlanılarak köprü tabliyesinin Şekil 2 and 3 deki hareketleri; köprünün trafiğe kapatıldığı (1, rüzgar kuvveti), sporcuların ritimli koşuları (2), köprü üzerinde farklı aktivitelerin gerçekleştiği (3), köprünün tekrar trafiğe açılması için yayaların köprüyü terk etmesi (4, rüzgar kuvveti), köprünün her iki yönde de trafiğe açılması (5) olarak 5 bölüme ayrılmıştır. Maraton süresince Şekil 2'ye ve Tablo 2'ye göre köprü tabliyesinin düşey hareketleri genel olarak açıklanmıştır.

Farklı Zaman Noktaları İçin (1973-2006) Boğaziçi Köprüsü Davranışlarının Tanımlanması

- 1. bölümde köprü trafiğe kapatılmış ve tabliye, köprünün kendi ağırlığına ilave olarak rüzgar kuvvetinin etkisi altında referans değerinin üzerinde düzenli olarak maksimum 39 mm, altında ise maksimum -21mm hareket etmiştir.
- 2. bölüm de ise köprünün farklı bir yük etkisi ile karşılaştığı durumdur. Bu bölümde köprü, ritimli bir koşunun oluşturduğu yükün etkisi ile referans değerinin üzerinde maksimum 38mm, altında ise maksimum -85mm hareket etmiştir. Ritimli yük tabliyede sürekli artan titreşim hareketlerine neden olmuştur. Ancak, bu etki hem kısa sürmüş hem de bu etkiden sonra düzensiz halk koşusu başlamıştır. Bu nedenle ritimli yükten dolayı köprüde tehlikeli bir durum ortaya çıkmamıştır.
- Ritimli koşunun hemen sonrasında düzensiz halk koşusu başlamış ve bu koşucuların bir kısmı köprüyü terk etmeyip köprü üzerinde farklı aktiviteler (yürüme, oturma, gösteri) yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca bu esnada 11 adet otobus de koşucularla birlikte yapıda referans değerinin altında maksimum-396 mm, üstünde ise maksimum 166mm'lik harekete sebep olacak bir yük etkisi oluşturmuştur (3. bölüm). Bu bölüm de tabliyenin referans değerinin altında belirgin bir hareket göstermesi, köprüde trafik yükünün etkili olabileceğini göstermektedir. Çünkü 5. bölümde de tabliye de referans değerinin altında -483mm'lik belirgin bir hareket tespit edilmiştir. Bu değişimler Şekil 2'de 12000 saniyeden sonraki ölçülerde belirgin olarak görülmektedir. Bu tepkilerin oluştuğu zaman aralığında köprü trafiğe açılmıştır.
- 4. bölüm de ise köprünün trafiğe açılması için yaya yükünün azaltıldığı yani köprünün sadece rüzgar kuvvetinin etkisi altında kaldığı zaman aralığıdır. Bu bölümde tabliye referans değerinin altında maksimum -121mm hareket etmiştir.

Ayrıca, Şekil 3'e Tablo 2'ye göre tabliyenin yanal yöndeki hareketleri ise aşağıda açıklanmıştır.

- Yanal hareketler düşey hareketlere göre daha düzenli ve değişim değerleri de daha küçüktür.
- Trafik yükünün etkili olmadığı 1. ve 4. bölümlerdeki maksimum hareketleri eşittir (referans değerinin üstünde ortalama; $(44+45)/2=+44.5$ mm, altında -17mm).
- Ritimli koşunun oluşturduğu yük etkisi ile referans değerinin üzerinde (56mm) hareketler gözlenmiştir (Tablo 2).
- Maksimum hareketler 3. (farklı aktiviteler) ve 5. (trafik yükü) bölümlerde ortaya çıkmıştır. Başka deyişle trafik yükü, yanal yönde de diğer yüklere oranla köprüde belirgin hareketlerine neden olmuştur.

2006 Ölçümleri: 2006 ölçümleri tabliye orta noktasında (20) ve kulelerde (17-18) 10 gün devam etmiştir. Ölçüm RTK GPS ile gerçekleştirilmiş ve referans noktası olarak da P7 kullanılmıştır (Şekil 6d). Ölçülerin örnekleme frekansı 10Hz'dir. Bu ölçümlerle köprünün hem kısa zamanlı hem de uzun zamanlı hareketlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kısa zamanlı köprü hareketlerinin belirlenmesinde köprünün trafik yüküne ve rüzgar hızına bağlı anlık ya da rasgele titreşim hareketleri araştırılmaktadır. Uzun zamanlı köprü hareketlerinin belirlenmesinde ise köprünün sıcaklık değişimleri ve trafik yüküne bağlı yarım günlük, günlük ya da haftalık periyodik hareketlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ölçülerin değerlendirme ve analizi halen devam etmektedir. Özellikle tabliye orta noktasındaki ölçümlerde kablolarından kaynaklanan signal kesilmesi ve multipath etkisi yüzünden büyük oranda hatalar meydana gelmiştir. Özellikle 11, 12 ya da 13 saatte bir, ölçümlerde sıçrama hareketleri görülmüştür. Bu ölçümlerden köprü hareketini yansıtan hatasız yaklaşık 1 saatlik ölçüler bu çalışmada dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu ölçümlerin diğer ölçümlerden farklı olması için trafiğin çok az olduğu 04:00 ile 05:00 saatleri arasından seçilmiştir. Şekil 2 ve 3'de tabliyenin düşey ve yanal hareketleri görülmektedir. Şekillerde tabliyenin trafiğin az olduğu zamanlardaki değişim hareketlerinin diğer zamanlardaki değişim hareketlerine göre daha düzenli ve daha küçük olduğu gözlenmektedir. Tabliyenin referans değerine göre düşey yöndeki maksimum hareketi -65mm ve 46mm, yanal yöndeki maksimum hareketi ise -53.3mm ve 42.2mm'dir.

3.1 Ölçülen ve Sonlu Eleman Modelinden Hesaplanan Frekanslar

Köprüde gerçekleştirilen ölçümler zaman bölgesinde frekans bölgesine HFD ile dönüştürülmüştür. Frekans bölgesine dönüştürülen ölçümlerin power spectrumu hesaplanmış ve belirgin peak değerleri veren frekans değerleri tespit edilmiştir. Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini tanımlayan frekanslar 0-1.5Hz aralığında seçilmiştir. Ölçümlerden ve Brownjohn vd., (1987) tarafından köprünün Sonlu Eleman Modeli'nden (SEM) hesaplanan yanal ve düşey frekansları Tablo 3 ve 4 de verilmiştir.

2003 ölçümleri ile tabliyenin düşey ve yanal frekansları 0-0.5Hz aralığındadır. Bunun nedeni ise ölçümlerde kullanılan TCA2003 ün örnekleme frekasının maksimum 1Hz olmasıdır. Nyquist kriterine göre 1 Hz örnekleme frekansı ile köprünün maksimum 0.5Hz'lik frekansa sahip hareketi belirlenebilir. Bu değer üzerinde frekansa sahip köprü hareketleri belirlenmemektedir. Analiz sonucu, tabliyenin düşey frekanslarının gücü yanal frekanslarına göre oldukça büyük elde edilmiştir. Tabliyenin ölçülerden hesaplanan 8 düşey ve 8 yanal frekansları Tablo 3 ve 5 de gösterilmiştir.

2003 ölçümlerinden hesaplanan bu frekanslarla diğer zamanlardaki ölçümlerden ve SEM'den hesaplanan frekanslarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3: SEM ve Ölçülerden hesaplanan düşey frekanslar

Mod. No.	SEM hesaplanan frekanslar (Hz)	Ölçümlerden hesaplanan frekanslar (Hz)									
		1973	1987	2003	2005/1	2005/2 (Avrasya Maratonu)					2006
						1	2	3	4	5	
V1	0.126	-	0.129	0.129	0.159	-	0.136	-	0.121	0.135	0.096
V2	0.165	-	0.160	0.149	0.161	0.155	0.150	0.162	0.182	0.160	0.151
V3	0.180	-	0.182	0.189	0.180	0.170	0.186	0.214	0.190	0.192	0.175
V4	0.225	0.233	0.217	0.216	0.230	0.229	0.260	0.235	0.215	0.214	0.272
V5	0.284	0.282	0.277	0.280	0.253	0.263	0.300	0.282	0.250	0.278	0.346
V6	0.372	0.357	0.362	0.377	0.383	0.359	0.367	0.388	0.382	0.385	0.397
V7	0.454	0.444	0.446	0.443	0.451	0.479	0.476	0.449	0.493	0.472	0.438
V8	0.556	-	0.544	0.495	0.533	0.560	0.524	0.539	0.588	0.536	0.538
V9	0.658	-	0.637	-	0.644	0.660	0.667	0.628	0.624	0.654	0.631
V10	0.765	-	0.739	-	0.782	0.748	0.795	0.751	0.751	0.750	0.789
V11	0.883	-	0.830	-	0.873	0.863	0.857	0.843	0.864	0.880	0.827
V12	0.883	-	0.852	-	0.953	0.879	0.900	0.863	0.912	0.881	0.938
V13	1.011	-	0.959	-	1.029	0.981	0.979	1.000	0.988	0.957	1.148

Tablo 4: SEM ve ölçülerden hesaplanan yanal frekanslar

Mod No.	SEM hesaplanan frekanslar (Hz)	Ölçümlerden hesaplanan frekanslar (Hz)								
		1987	2003	2005/1	2005/2 (Avrasya Maratonu)					2006
					1	2	3	4	5	
L1	0.073	0.070	0.084	0.073	0.095	0.083	-	0.151	0.095	0.123
L2	0.218	0.209	0.211	0.210	0.198	0.205	0.229	0.227	0.248	0.267
L3	0.294	0.284	0.288	0.288	0.282	0.283	0.271	0.255	0.294	0.298
L4	0.301	0.294	0.305	0.302	0.320	0.338	0.314	0.335	0.345	0.382
L5	0.408	0.365	0.404	0.415	0.457	0.448	0.467	0.443	0.453	0.416
L6	0.437	0.382	0.437	0.435	0.464	0.476	0.475	0.468	0.491	0.458
L7	0.471	0.440	0.478	0.471	0.488	0.491	0.500	0.495	0.506	0.492
L8	0.539	0.525	0.498	0.536	0.538	0.524	0.537	0.549	0.537	0.576
L9	0.753	0.672	-	0.729	0.788	0.795	0.769	0.750	0.690	0.692

2005/1'de yapılan ölçümlerden tabliyenin düşey ve yanal frekansları Tablo 3 ve 4'de gösterilmiştir. Tablo 3 ve 4'de tabliyenin düşey için 0.159–1.029Hz, yanal için ise 0.079–0.729Hz aralığında belirgin frekanslara sahip olduğu görülmüştür. 2005/1 frekanslarını diğer frekanslardan ayıran önemli bir özellik ise, 2005/1 frekanslarının GPS ile gerçekleştirilen ölçümlerden belirlenmesidir. GPS ölçümlerinden hesaplanan düşey ve yanal frekanslarında diğer zamanlarda yapılan ölçümlerden hesaplanan frekanslarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yük tipine bağlı olarak 2005/2 ölçümleri beş bölüme ayrılmıştı. Bu bölümlerin her biri için ayrı ayrı güç spektrumları hesaplanmış ve belirgin frekanslar tespit edilmiştir. Bu frekanslardan, köprünün trafiğe kapatıldığı 1.bölüm ile trafik yükü ve farklı aktivitelerin gerçekleştiği 3.bölümlerde düşey hareket için ilk frekans belirlenememiştir. Ayrıca, 3.bölümde de yanal hareket için ilk frekans belirlenememiştir.

2005/2'deki 1.ve 4. bölümler köprünün trafiğe kapalı olduğu ve rüzgarın etkili olduğu bölümlerdir. Bu bölümler için hesaplanan frekanslar diğer zamanlardaki ölçümlerden hesaplanan frekanslarla uyumaktadır. Özellikle 1.bölüm için elde edilen frekanslar 1973'deki frekanslarla (köprünün trafiğe açılmadan önceki ölçümlerinden) daha çok uyumaktadır. Çünkü köprünün trafiğe kapatıldığı 1.bölümden önce köprüden çok az araç geçmiştir. Bu araçların oluşturduğu yük etkisi köprünün 1.bölümünde devam etmemiştir (köprü sadece rüzgar kuvveti altında). Bu durum köprünün 1973'deki trafiğe açılmadan önceki konumuna daha çok benzemektedir. 4.bölümde ise köprünün trafiğe açılması için yaya, farklı aktiviteler ve birkaç araç geçişinin olduğu 3.bölümün etkisinin hala devam etmiş olabileceğidir.

Ayrıca, köprünün ritimli bir yükün etkisi altında kaldığı 2.bölüm için belirlenen frekansların düzenli titreşim hareketi gösterdiği de tespit edilmiştir. Ancak bu yükün etkisi hem kısa sürmüş hemde hemen ardından düzensiz halk koşusu başlamıştır. Bu nedenle bu bölüm de diğer bölümlerden farklı frekanslar tespit edilememiştir. Örneğin, ritimli koşunun

titreşimi ile köprünün doğal titreşiminin çakışması sonucu, köprüde önemli titreşim sorunları ortaya çıkabilirdi. Böylesi durumlarda zorlayıcı kuvvetlerin etkisi artmakta ve köprü için tehlike oluşturabilmektedir.

4. SONUÇLAR

Boğaziçi Köprüsü'nde 1973, 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 ve 2006'da gerçekleştirilen ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Farklı zamanlarda ve farklı yüklerin etkisi altında, Boğaziçi Köprüsü'nün SEM ve ölçümlerden hesaplanan frekanslarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir.
- Köprünün etkiyen yükler altındaki titreşimlerinin frekanslarının güç spektrumaları ile belirlenmesi süreci; pratik, ucuz ve hızlıdır.
- Ana açıklık için ölçümlerden hesaplanan düşey frekans sayısı ve aralığı; 1973'de 4 (0.233-0.444Hz), 1987'de 13 (0.129-0.959Hz), 2003'de 8 (0.129-0.495Hz), 2005/1'de 13 (0.159-1.029Hz), 2005/2'de 1. ve 3. bölümlerde 12 (0.155-1Hz), 2005/2'de 2. 4. ve 5. bölümlerde 13 (0.121-1Hz) ve 2006'da 13 (0.096-1.148Hz) dir. Yanal frekanslar ise; 1987'de 9 (0.070-0.672Hz), 2003'de 8 (0.084-0.498Hz), 2005/1'de 9 (0.073-0.729Hz), 2005/2'de 3. bölümde 8 (0.073-0.729Hz), 2005'de diğer bölümlerde 9 (0.083-0.795Hz) ve 2006'da 9 (0.123-0.692Hz) dir.
- 2003 ölçümlerinden hesaplanan frekanslar 0.5 Hz altındadır. Bu değer üzerindeki frekanslara sahip köprü hareketleri belirlenmemektedir. Bunun nedeni ise ölçümlerde kullanılan TCA2003 ün maksimum örnekleme frekansının 1Hz olmasıdır. 2005/1, 2005/2 ve 2006 ölçümlerinden hesaplanan frekanslar ise köprünün anlamlı tüm hareketlerini yansıtabilecek niteliktedir. Bilgi kayıpları oluşmamıştır. Çünkü GPS in örnekleme aralığı TCA2003 e göre çok daha yüksektir (5, 10 even 20 Hz).

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 ve çalışmalar sırasında desteklerini esirgemeyen Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Allen, R., L., Mills, D., W., 2004. *Signal Analysis, Time, Frequency, Scale, and Structure*, IEEE Press, USA, 2004.

Brownjohn, J.M.W., Dumanoglu, A.A., Severn, R.T., Blakeborough, A. 1988. *Ambient vibration survey of the Bosphorus Suspension Bridge*, Report No. UBCE-EE-88-1, University of Bristol.

Petrovski, Paskalov, Stojkovi, Jurakovski, 1974. *Vibration studies of Istanbul Bogazici Suspension Bridge*, Report OIK 74-7, IZIIS Skopje.

Tezcan, S.S., Ipek, M., Petrovski, J ve Paskalov, T., 1975. *Forced vibration survey of Istanbul Bogazici Suspension Bridge*, Proc.5ECEE Vol.2, Istanbul

Cheng, P., John, W., Zheng, W., 2002. *Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology*, FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA.

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

Radovanovic, R. S., Teskey, W. F., 2001. *Dynamic Monitoring of Deformation Structure: GPS verses Robotic Tacheometry Systems?*, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA

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

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

Roberts, G. W., 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

Wieser, A., Brunner, F. K., 2002. *Analysis of Bridges Deformations Using Continuous GPS measurements*, INGEO2002, 2nd Conference Surveying, Bratislava, pp. 45-52.