

# Farklı Zaman Noktaları için (1973-2006) Boğaziçi Köprüsü Davranışlarının Belirlenmesi

Hediye ERDOĞAN<sup>1</sup>, Engin GÜLAL<sup>2</sup>, Burak AKPINAR<sup>3</sup>, Ercenk ATA<sup>3</sup>

## Özet

Bu çalışmada, Boğaziçi Köprüsü tabliyesinin trafik, rüzgar, yaya ve ritmik koşu gibi yüklerin etkisi altındaki yanal ve düşey davranışları zaman ve frekans alanında 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 köprü'nün ritimli koşu, yaya yürüyüşü ve araç geçişi gibi yükler altındaki tepkileri ölçülmüştür. Bu ölçülerle köprü'nün 5 farklı yük durumu altındaki davranışları incelenmiştir. Tüm ölçümler Hızlı Fourier Dönüşümü ile zaman alanından frekans alanına dönüştürülmüştür. Fourier 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 tespit edilmiştir.

## Anahtar Sözcükler

Boğaziçi Köprüsü, Hızlı Fourier Dönüşümü, Fourier Spektrumu.

## Abstract

### Description of Behaviors of Bosphorus Bridge at Different Time Points (1973-2006)

In this study, vertical and lateral behaviors of Bosphorus Bridge deck 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 Fourier spectrums in the range 0–1.5Hz. For the bridge deck, vertical frequencies are 8 (in 2003), 12 (in the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> parts in 2005/2) ve 13 (in 1987, in 2005/1, in the 2<sup>nd</sup>, 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> parts in 2005/2 and in 2006). Lateral frequencies are 8 (in 2003 and in the 3<sup>rd</sup> part in 2005/2) and 9 (in 2005/1, in the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> 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. In general the agreement among frequencies is good.

## Key Words

Bosphorus Bridge, Fast Fourier Transform, Fourier Spectrum.

## 1. Giriş

Mühendislik yapılarının sayısındaki artış, bu yapıların bakımı ve kontrolü ile ilgili problemleri de beraberinde getirmiştir. 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 yüklere bağlı tepkimelerinin sürekli izlenmesi sonucu elde edilen zaman dizilerinin analizi ile yapının davranışı zamana bağlı olarak belirlenir. Ancak, mühendislik yapılarının tepkimelerinin zaman alanında, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi bazı uygulamalar için genelde yetersiz kalabilmektedir. Çünkü uygulamalar için gerekli olan asıl bilgi sinyalin içerdiği frekans bilgisinde saklıdır. Bu durumda sinyalin zaman-genlik gösterimi yerine frekans spektrumu incelenir. Frekans spektrumu sinyalin içerdiği frekans bileşenlerini yani sinyalde mevcut olan frekansları göstermektedir ve frekans alanında belirlenmektedir. Frekans alanına dönüşüm için kullanılan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) Eşitlik (1) ile tanımlanır.

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

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

<sup>1</sup> Yrd. Doç. Dr., Aksaray Ü., Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Böl., Aksaray

<sup>2</sup> Doç. Dr., YTÜ, İnşaat Fakültesi, Harita Müh. Böl., Beşiktaş/İstanbul

<sup>3</sup> Arş. Gör., YTÜ, İnşaat Fakültesi, Harita Müh. Böl., Beşiktaş/İstanbul

durumda  $N$  adet HFD değeri hesaplanırken,  $N^2$  çarpma ve  $N(N-1)$  toplama işlemi yapılmaktadır. Dönüşüm sonucu elde edilen  $X(k)$  değerleri ise karmaşık sayılardır. Karmaşık sayılar frekansları belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden HFD sonucu elde edilen karmaşık sayıların mutlak değerlerinin karesi alınır ve Fourier spektrum  $P_{xx}(k)$  olarak adlandırılır (ALLEN ve MILLS 2004, RABINER ve GOLD 1975).

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

Eşitliği ile hesaplanan  $P_{xx}(k)$  ile bir sinyalin enerjisinin hangi frekanslarda yoğunlaştığı tespit edilerek, dizide 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 ivme ölçer gibi aletlerle izlenmesi üzerine, örneğin: LOVSE vd. (1995), ROBERTS vd. (1999), ROBERTS vd. (2000), ROBERTS vd. (2001), RADOVANOVIC ve TESKEY (2001), WIESER ve BRUNNER (2002), CHENG vd. (2002) ve ROBERTS vd. (2004) tarafından yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada ise Boğaziçi Köprüsü'nün frekansları, 1973, 1987, 2003, 2005/1, 2005/2 (27 Uluslararası Avrasya Maratonu) 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

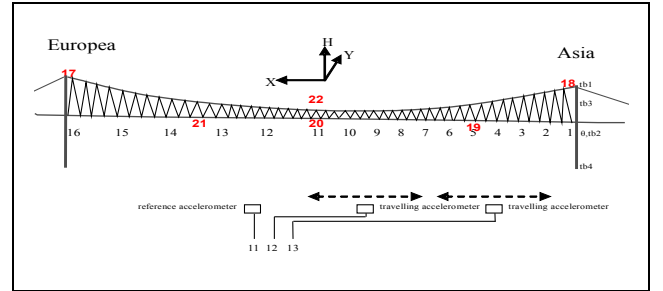
Boğaziçi Köprüsü İstanbul'da Asya'yı ve Avrupa'yı bağlamaktadır. İnşaatına 1970 yılında başlanmış ve 1973 yılında trafiğe açılmıştır. Boğaziçi Köprüsü 1074 m ana açıklıklı, sırasıyla Avrupa ve Asya yakalarında olmak üzere 231 m ve 255 m kenar açıklıklı, içi boş kapalı kutu kesit tabliyeli, narin kuleli ve eğik askılı modern bir asma köprüdür. Şekil (4)'de Boğaziçi Köprüsü'nün genel bir durumu görülmektedir.

Boğaziçi Köprüsü 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. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Boğaziçi Köprüsü'nün tabliye ve kulelerinde farklı zamanlarda, farklı yüklerin etkisi altında, farklı tekniklerle farklı örnekleme frekanslarında ölçümler yapılmıştır. 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 (BROWNJOHN vd. 1988), 17-21 noktalarında 2003'de (ERDOĞAN 2006, ERDOĞAN ve GÜLAL 2009, ERDOĞAN ve GÜLAL 2009), 20 ve 22 noktalarında 2005/1'de, 20 noktasında 2005/2'de (ERDOĞAN vd. 2007), 17, 18 ve 20 noktalarında ise 2006'da ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, Şekil 1'de 1987'deki ölçümlerde kullanılan ivme ölçerlerin konumu da gösterilmiştir.

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.



Şekil 1: 1987 (1-16, tb1, 0, 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)

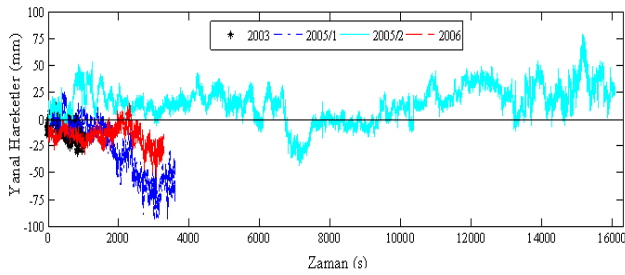
Ayrıca 1973 ve 1987 de yapılan ölçümler ve bu ölçümlerden hesaplanan frekanslar hakkında da detaylı açıklamalar yapılmıştır. Sadece 1973 ve 1987'deki ham ölçüler elde edilemediği için bu yıllara ait ölçüler Şekil 2 ve 3'de gösterilememiştir. Şekil 2 ve 3'de köprü'nün 20 numaralı noktasının 2003, 2005/1, 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 içinde değerlendirilmiştir. Bu grafiklerde tabliyenin düşey ve yanal hareketlerinin değişim değerleri de görülmektedir.

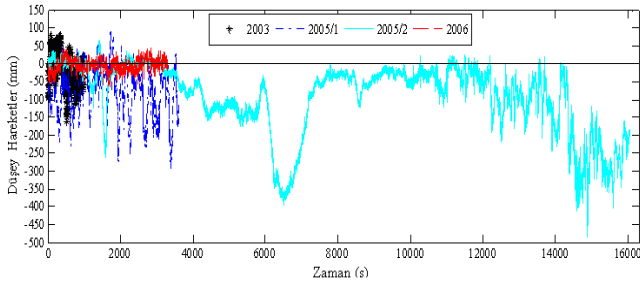
**1973 ve 1987 Ölçümleri:** 1973 ölçümleri köprü'nün inşaatı tamamlandıktan sonra, trafiğe açılmadan önce

yapılmıştır (ayrıntılı bilgi için, BROWNJOHN vd. 1988, PETROVSKI vd. 1974 ve TEZCAN 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). Ölçülerin 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 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 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 yanal ve düşey hareketleri



Şekil 3: 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 4) 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. Referans noktası 6 ise obje noktalarından yaklaşık 1.5 km uzaklıkta deniz seviyesinden 66 m yükseklikteki bir tepe üzerinde pilye şeklinde tesis edilmiştir (Şekil 4).

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 -94.3 mm and +26 mm'dir. (+) ve (-) işaretler 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 4: 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 köprü'nün trafiğe kapatılması), ritimli koşunun (Şekil 5a ve 5c), yaya yürüyüşünün (Şekil 5b), farklı sayıda ve büyüklükte araç geçişinin oluşturduğu yüklerin etkisi altında kalmıştır. Bu yükler altında köprü'nün hareketleri RTK GPS ile ölçülmüştür. Örnekleme frekansı 2Hz dir.

Ölçümlerde kullanılan referans noktası P7 (Şekil 5d) köprüye yaklaşık 1 km uzaklıktaki bir binanın üzerindedir. Obj e noktası olarak da düşey yönde maksimum hareketlerin

beklendiği tabliyenin orta noktası (20) seçilmiştir (Şekil 1 ve 5d). 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.



Şekil 5: Maraton sırasında ortaya çıkan farklı yükler (a-b-c) altında 20 numaralı noktanın P7 numaralı referans noktasından RTK-GPS ile ölçülmesi (d)

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

- 1. bölümde köprü trafiğe kapatılmış ve tabliye, köprüün kendi ağırlığına ilave olarak rüzgar kuvvetinin de etkisi altında referans değerinin üzerinde düzenli maksimum 39 mm, altında ise maksimum -21mm hareket etmiştir.
- 2. bölüm de ise köprüün 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 kısmının köprüyü terk etmeyip köprü üzerinde farklı aktiviteler (yürüme, oturma, gösteri) yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca bu esnada 11 adet otobüs 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 3'de 12000 saniyeden sonraki ölçülerde belirgin olarak görülmektedir. Bu tepkilerin oluştuğu zaman aralığında köprü trafiğe açılmıştır.

- 4. bölüm de ise köprüün trafiğe açılması için yaya yükünün azaltıldığı yani köprüün sadece rüzgar kuvvetinin etkisi altında kaldığı zaman aralığıdır. Bu bölümde tabliye referans değerinin altında maksimum -121mm hareket etmiştir.

Ayrıca, Şekil 2 ve Tablo 1'e göre tabliyenin yanal yöndeki hareketleri de 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;  $(44+45)/2=+44.5\text{mm}$ , altında -17mm).
- Ritimli koşunun oluşturduğu yük etkisi ile referans değerinin üzerinde (56mm) hareketler gözlenmiştir.
- 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.

Tablo 1: Maraton sürecinde köprüye etkileyen yükler, yüklerin etkili olduğu zaman aralığı, köprüün boş1 başlangıç zamanındaki değere göre maksimum düşey ve yanal hareketleri

Bölüm no.	Yük Tipi	zaman aralığı (s:d:sn)	Referans değerinin üstünde/altında kalan maksimum düşey hareketler (mm)	Referans değerinin üstünde/altında kalan maksimum yanal hareketler (mm)
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

**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 5d). Ölçülerin örnekleme frekansı 10Hz'dir. Bu ölçümlerle köprüün hem kısa zamanlı hem de uzun zamanlı hareketlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Kısa zamanlı köprü hareketlerinin belirlenmesinde köprüün trafik yüküne ve rüzgar hızına bağlı anlık ya da rasgele titreşim hareketleri araştırılmaktadır. Uzun zamanlı köprü hareketlerinin belirlenmesinde ise köprüün sıcaklık değişimleri ve trafik yüküne bağlı yarımlık, günlük ya da haftalık periyodik hareketlerinin belirlenmesi

amaçlanmıştır. Ölçülerin değerlendirme ve analizi halen devam etmektedir. Özellikle tabliye orta noktasındaki ölçümlerde kablolarından kaynaklanan sinyal 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 yanal ve düşey 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.

#### 4. Ölçülen ve Sonlu Eleman Modelinden Hesaplanan Frekanslar

Köprüde gerçekleştirilen ölçümler zaman alanından frekans alanına HFD ile dönüştürülmüştür. Frekans alanına dönüştürülen ölçümlerin Fourier spectrumu hesaplanmış ve belirgin peak değerleri veren frekans değerleri tespit edilmiştir. Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini tanımlayan frekanslar 0-1.5Hz aralığında seçilmiştir. Ölçümlerden ve BROWNHOHN vd. (1987) tarafından köprünün Sonlu Eleman Modeli'nden (SEM) hesaplanan yanal ve düşey frekansları Tablo 2 ve 3 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 üzerindeki 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 2 ve 3 de gösterilmiştir. 2003 ölçümlerinden hesaplanan bu frekanslarla diğer zamanlardaki ölçümlerden ve SEM'den hesaplanan frekanslarla uyumlu olduğu görülmektedir.

2005/1'de yapılan ölçümlerden tabliyenin düşey ve yanal frekansları Tablo 2 ve 3'de gösterilmiştir. Tablo 2 ve 3'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 ayrılmıştır. Bu bölümlerin her biri için ayrı ayrı Fourier 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 uyusmaktadır. Özellikle 1.bölüm için elde edilen frekanslar 1973'deki frekanslarla (köprünün trafiğe açılmadan önceki ölçümlerinden) daha çok uyusmaktadır. 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 hem de 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.

Tablo 2: 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 3: 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

## 5. 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.
- Köprü'nün etkileyen yükler altındaki titreşimlerinin frekanslarının Fourier spektrumları 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 köprü'nün

anamlı 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, ölçme çalışmalarına bizzat katılarak yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Otto Heunecke'ye, Arş. Gör. 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

- ALLEN, R., L., MILLS, D., W.: **Signal Analysis, Time, Frequency, Scale, and Structure**, IEEE Press, USA, 2004.
- BROWNJOHN, J.M.W., DUMANOĞLU, A.A., SEVERN, R.T., BLAKEBOROUGH, A.: **Ambient vibration survey of the Bosphorus Suspension Bridge**, Report No. UBCE-EE-88-1, University of Bristol, 1998.
- CHENG, P., JOHN, W., ZHENG, W.: **Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology**, FIG XXII International Congress, Washington, D.C. USA, 2002.
- 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 Series 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.
- LOVSE, J. W., TESKEY, W. F.: **Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology**, Journal of Surveying Engineering, 1995, Vo. 121(1), 16-22.
- PETROVSKI, PASKALOV, STOJKOVI, JUROKOVSKI.: **Vibration Studies of Istanbul Bogazici Suspension Bridge**, Report OIK 74-7, IZIIS Skopje, 1974.
- TEZCAN, S.S., IPEK, M., PETROVSKI, J VE PASKALOV, T.: **Forced Vibration Survey of Istanbul Bogazici Suspension Bridge**, Proc.5ECEE Vol.2, Istanbul, 1975.
- RABINER L.R. ve GOLD B.: **Theory and Application of Digital Signal Processing**, Prentice-Hall.Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- RADOVANOVIC, R. S., TESKEY, W. F.: **Dynamic Monitoring of Deformation Structure: GPS verses Robotic Tacheometry Systems**, The 10<sup>th</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 2001.
- ROBERTS, G. W., DODSON, A.H., ASHKENOZI, V. BROWN, C. V, KARUNA, R.: **Comparison of GPS Measurements and Finite Element Modelling for the Deformation Measurements of the Humber Bridge**, Proc ION GPS, Nashville, USA, 1999.