

MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARININ ÇOKLU GİRİŞ-TEKLİ ÇIKIŞ MODELLERLE TANIMLANMASI

H. Erdoğan¹, E. Güla²

¹Aksaray Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, Aksaray, hediye.erdogan@gmail.com
²Yıldız Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Ölçme Tekniği Anabilim Dalı, İstanbul, egulal@yildiz.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, İstanbul Boğaziçi Köprüsü kulelerinin gözlenen giriş büyüklükleri (sıcaklık, rüzgar hızı ve trafik yükü) ile çıkış büyüklükleri (yanal ve boylamasına hareketler) arasındaki transfer fonksiyonu Çoklu giriş-Tekli çıkış (Multiple input-Single output-MISO) Auto-Regressive with eXogenous input (ARX) modeli ile tanımlanmıştır. Gözlemler jeodezik yöntemlerle TCA2003 ile gerçekleştirilmiştir. Karmaşık bir yapısı olan MISO ARX modelin belirlenmesi aşamasında yapı hareketinde etkisi olmayan giriş büyüklüklerinin de belirlenmesi süreci, bu modelin kestirimini daha da güçleştirmiştir. Bu güçlüğü kısmen gidermek için de çoklu regresyon modelinden yararlanılmıştır. Bu model En Küçük Kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Regresyon analizinde kulelerin boylamasına hareketlerinde rüzgar hızının etkisi istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Regresyon analizi sonuçlarından yararlanılarak belirlenen MISO ARX512, ARX511, ARX411 ve ARX415 modellerin çoklu regresyon modellerine (ARX010) göre yapının hareketlerini bilgi kaybına neden olmadan tanımladığı tesbit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Boğaziçi Köprüsü, Giriş Büyüklüğü, Çıkış Büyüklüğü, Çoklu Regresyon, MISO ARX, Otokorelasyon

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF BEHAVIOURS ON ENGINEERING STRUCTURES USING MULTIPLE INPUT-SINGLE OUTPUT MODELS

In this study, the transfer functions relating the input quantities (traffic load, wind speed and temperature variations) and output quantities (lateral and longitudinal movements) of the towers of the Bosphorus Suspension Bridge were defined with the parametric MISO ARX (Multiple Input-Single Output Auto-Regressive with eXogenous input) model. Observations were made by geodetic methods using TCA2003. Multiple regression model was primarily used to identify the input quantities that have a significant contribution to the structural movements since insignificant input quantities increases the difficulty of the defining the parameters of the inherently complex MISO ARX model. Least square method was used to determine the parameters of the multiple regression models. Regression analysis showed that the effect of wind speed on the longitudinal movements was statistically insignificant. Finally, it was also observed that the MISO ARX512, ARX511, ARX411 and ARX415 models defined by taking into account the results of regression analyses estimate structural displacements more accurately than the multiple regression models ARX010.

Keywords: Bosphorus Bridge, Input Quantity, Output Quantity, Multiple Regression, MISO ARX, Autocorrelation.

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde köprü, baraj ve kule gibi mühendislik yapıları sistem olarak ele alınmaktadır (Ren, Harik, Blandford, Lenett ve Baseheart, 2004). Tanımlama tekniğinde bu sistemlerin giriş ve çıkış büyüklüklerine bağlı olarak davranış modelinin elde edilebilmesi için, yapılara etkiyen büyüklüklerin belirlenmesi ve ölçülmesi gerekmektedir. Elastik yapılarda, özellikle köprülerde hareketli yüklerin, örneğin; trafik yükünün, dinamik etkisinin belirlenmesi karmaşık bir problemdir. Bu amaçla çalışmalar, ya teorik ya da deneysel olarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalarda, hareketli yüklerin bazı parametrelerini indirgemek, genellikle de ihmal etmek suretiyle köprülerin dinamik davranışlarına etkisi araştırılmıştır (Michaltsos, 2002). Diğer yandan hareketli yüklerin, köprü titreşimine neden olan en önemli parametresinin hız olduğu yapılan araştırmalarda belirtilmiştir (Henchi ve Fafard, 1997). Ayrıca, köprüler hem yıllık hem de günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedirler. En büyük uzama, yaz günleri, en büyük kısalma ise kış geceleri meydana gelmektedir. Rüzgar hızı ise köprülerin yapısal tasarımında her zaman çok önemli olmuştur. Fakat rüzgar yükünün güvenilirlik ve doğruluk tanımı için rüzgarın özelliklerini ifade etmede belirsizlikler bulunmaktadır. Yapılan rüzgar analizi çalışmalarında, rüzgarın yatay olarak her yönde esebileceği ve yüksekliğe bağlı olarak da değişim gösterebileceği ifade edilmektedir (Ochshorn, 1981).

Model belirlemede, sistemle ilgili, fiziksel yasalara dayalı öncül bilgilerden ve sisteme etkiyen büyüklüklerle (giriş büyüklüğü ya da giriş sinyali) sistemin bu büyüklüklere olan tepkilerinden (çıkış büyüklüğü ya da çıkış sinyali) yararlanılmaktadır. Fiziksel yasalar diferansiyel ya da cebirsel eşitlikler yardımı ile tanımlanmaktadır. Bu şekilde model, sadece giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki ilişki ile değil, aynı zamanda model yapısının da belirlenmesi ile ifade edilmektedir (Hesse, Heunecke, Speth ve Stelzer, 2000; Roeck, Peeters ve Maeck, 2000; Shane ve Ratneshwar,

Mühendislik Yapılarının Davranışlarının Çoklu Giriş-Tekli Çıkış Modellerle Tanımlanması

2005). Diğer yandan, sistemle ilgili herhangi bir öncül bilginin olmaması ya da sistemin çok fazla karmaşık bir yapıya sahip olması durumlarında, sistemin modelini belirlemede tanımlama metodlarından (parametrik tanımlama gibi) yararlanılmaktadır. Bu durumda model giriş ve çıkış büyüklüklerinden yararlanılarak elde edilmektedir. Bu teknik, sistem derecesi, giriş ve çıkış büyüklüklerinin seçimi ile ilgili olarak bazı öncül varsayımlar yapılarak uygulanabilmektedir (Gevers, Miskovic, Bonvin ve Karimi, 2005; Koulocheris, Dertimanis ve Vrazopoulos, 2003; Maruki, 2004). Bu amaçla yaygın olarak kullanılan parametrik modeller ARX (Auto-regressive with eX-ogenous Input; ekstra girişli otoregresif model), ARMAX (Auto-regressive Moving average with eX-ogenous Input; ekstra girişli ortalama hareketli otoregresif model), OE (Output Error; hata çıkışlı model) ve BJ (Box-Jenkins) modellerdir.

Bu çalışmada ise, Boğaziçi Köprüsü kulelerinin yanal ve boylamasına hareketleri ile köprüye etkileyen sıcaklık değişimleri, rüzgar hızı ve araç sayısı büyüklükleri arasındaki transfer fonksiyonunun çoklu regresyon modeli ve MISO ARX modeli ile belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. SİSTEM TANIMLAMASI

2.1 Çoklu Regresyon

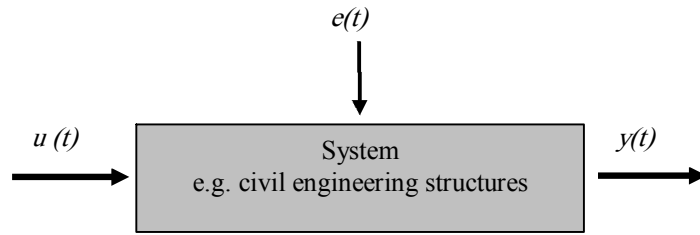
Çoklu regresyon modeli genel olarak Eşitlik (1) ile tanımlanabilir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + e_i \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

Burada, y_i gözlenen çıkış büyüklükleri ya da sinyaller, x_{1i}, \dots, x_{pi} gözlenen giriş büyüklükleri ya da sinyalleri, β_0, \dots, β_p bilinmeyen parametreler, $u=p+1$ bilinmeyen sayısı, p giriş büyüklüklerinin sayısı ve e_i ise $E(e_i)=0$, $\text{Var}(e_i)=\sigma^2$ olan rasgele hatalardır. Eşitlik (1)'deki bilinmeyen parametreler En Küçük Kareler Metodu ile tahmin edilir ve istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları test edilir. Test sonucu, anlamsız parametrelere ait giriş büyüklükleri Eşitlik (1)'den çıkartılır ve analiz süreci anlamlı parameter(ler) kalana kadar devam eder (Erdoğan ve Güral, 2009).

2.2 ARX Model

Giriş-çıkış büyüklükleri arasındaki temel ilişki Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Giriş- çıkış büyüklükleri arasındaki temel ilişki

Eşit zaman aralıklı olarak ölçülen giriş büyüklüğü ya da sinyali $u(t)$ ile çıkış büyüklüğü ya da sinyali $y(t)$, $t=1,2,\dots,N$ arasındaki lineer ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (2)$$

Burada, q geciktirme işlemcisi (shift operator), $G(q)$ sistemin deterministik kısmının transfer fonksiyonu ve $v(t)$ ise sistemin filtrelenmiş beyaz gürültü olarak ifade edilen bozucu etkilerini tanımlar.

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (3)$$

Eşitlik (3)'daki $e(t)$, λ varyanslı beyaz gürültü ve $H(q)$ sistemin stokastik kısmının transfer fonksiyonudur. Eşitlik (2) ve (3) düzenlenerek Eşitlik (4) elde edilir ve bu eşitlik sistemin zaman bölgesindeki tanımını verir.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (4)$$

Bu eşitliğin transfer fonksiyonları, nk girişin çıkışa göre gecikme zamanı olmak üzere, çoğunlukla tercih edilen ARX model için Eşitlik (5)'de verilmiştir.

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}; \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (5)$$

$A(q)$ ve $B(q)$ q^{-1} geciktime işlemcisine bağlı olarak tanımlanan ARX modelin polinom fonksiyonlarıdır.

$$A(q) = 1 + \alpha_1 q^{-1} + \dots + \alpha_{na} q^{-na} \quad (6)$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & \dots \\ b_{21} q^{-1} & b_{22} q^{-1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{nb1} q^{-nb+1} & b_{nb2} q^{-nb+1} & \dots & b_{nbnu} q^{-nb+1} \end{bmatrix}$$

Burada, $B(q)$, $nb \times nu$ boyutlu bir matris, na ve nb polinom fonksiyonların dereceleri ve nu giriş büyüklüğünün sayısıdır. Genel olarak, SISO (Single Input- Single Output; tekli giriş-tekli çıkış) ya da MISO ARX modeller Eşitlik (7)'deki gibi ifade edilir (Ljung, 1999).

$$A(q).y(t) = B(q).u(t-nk) + e(t) \quad (7)$$

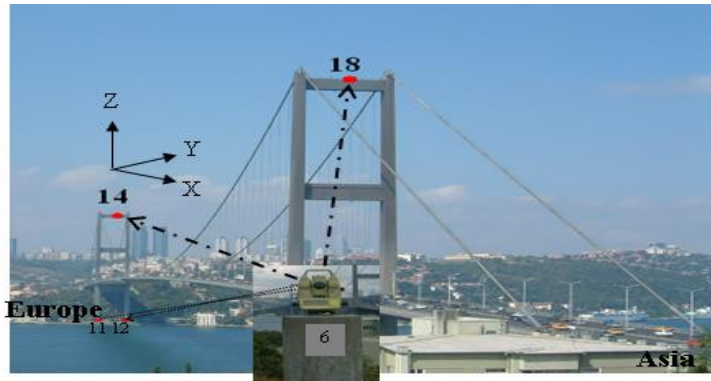
ARX modelin a ve b parametreleri En Küçük Kareler Metodu ile çözülür. Çok sayıda öngörülen modellerin gözlemler için en uygun olanı ise kayıp fonksiyon ve Final Prediksiyon Hatası (Final Prediction Error ; FPE) kullanılarak belirlenir (Ljung, 1999).

3. BOĞAZIÇI KÖPRÜSÜ'NÜN TANIMI

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, narın 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. Ayrıca İstanbul'un deprem bölgesinde olduğu düşünülerek köprü, temel zemin ivmesi yatayda 0,1 g'lik ivmesine dayanacak şekilde hesaplanmıştır. Düşey için ise 0,05 g olarak hesaplanmıştır.

3.1 Ölçümlerin yapılması ve değerlendirilmesi

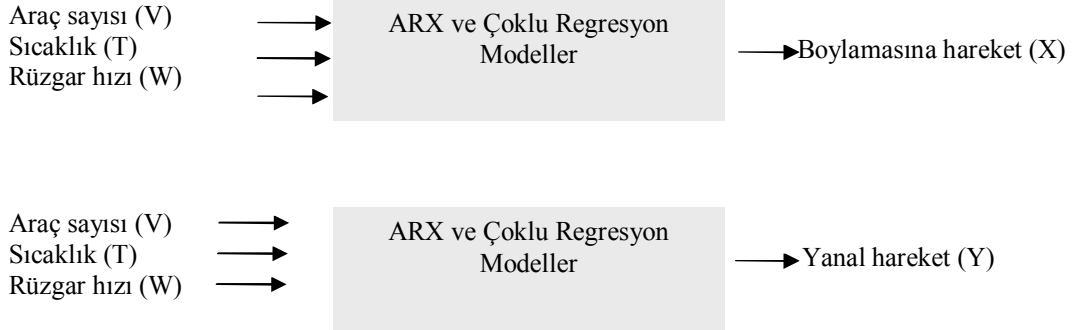
Bu çalışmada, Boğaziçi Köprüsü kulelerinin yanal ve boylamasına hareketleri ile köprüde etkili olan sıcaklık değişimleri, trafik yükü ve rüzgar hızı büyüklükleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Yanal ve boylamasına hareketler kulelerin üstüne tesis edilen 14 ve 18 numaralı obje noktalarına 6 numaralı referans noktasından yapılan gözlemlerden elde edilmiştir. 11 ve 12 numaralı noktalar ise açılı bağlamak için kullanılmıştır. Gözlemler Leica TCA2003 motorize total station ile 10 dakika örnekleme periyodunda 10 saat olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu zaman aralığında sıcaklık değişimleri, araç sayısı ve rüzgar hızı da gözlenmiştir. Gözlemler seçilen Köprü Koordinat Sisteminde (KKS) değerlendirilmiştir. Bu sistemde X eksen köprü'nün boylamasına yönü (trafik akışı yönü), Y eksen X eksenine dik köprü'nün yanal yönü ve Z eksen de düşey yönü olarak seçilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Boğaziçi Köprüsü, Köprü Koordinat Sistemi (KKS) ve 6, 11 ve 12 nolu referans noktaları yardımıyla kule üzerindeki 14 ve 18 numaralı obje noktalarına TCA2003 ile yapılan gözlemler

3.2 Çoklu Regresyon ve ARX Model Analizi

Boğaziçi Köprüsü dinamik bir sistemdir. Köprünün kuleleri ise bu sistemin birer parçalarıdır. Köprü kulelerine etkiyen sıcaklık değişimleri (T), araç sayısı (V) ve rüzgar hızı (W) sistemin giriş büyüklüğü ya da giriş sinyali, kulelerin bu giriş büyüklüklerine boylamasına ve yanal yönlerdeki tepkileri ise sistemin çıkış büyüklüğü ya da çıkış sinyali olarak ele alınmıştır. Giriş ve çıkış büyüklükleri gözlenen kulelerin transfer fonksiyonları için ARX modeller (13) ve çoklu regresyon modelleri (1) öngörülmüştür. Kulelerin transfer fonksiyonları için öngörülen modeller Şekil (3)'de ifade edilen MISO modellerdir.



Şekil 3: Boğaziçi Köprüsü kulelerinin transfer fonksiyonu için öngörülen giriş - çıkış büyüklükleri ve MISO modeller

Model belirleme sürecinde ilk olarak, kulelerin gözlenen hareketlerinden ortalama değerleri çıkartılmıştır. Daha sonra ise (1) eşitliği ile tanımlanan çoklu regresyon modelindeki bilinmeyen parametreler ve bu parametrelerin kovaryans matrisleri En Küçük kareler Metodu ile tahmin edilmiştir. Ayrıca, modellerin model değerlendirme kriterlerinden λ_0 kayıp fonksiyon ve FPE değerleri de hesaplanmıştır. Table 1 de λ_0 kayıp fonksiyon ve FPE değerleri ile belirlenen modeller verilmiştir.

Tablo 1: Köprü kulelerinin araç sayısı (V), sıcaklık değişimleri (T) ve rüzgar hızı (W) ile ortalama değerleri çıkartılmış boylamasına (X) ve yanal (Y) hareketleri arasındaki ilişkinin çoklu regresyon modelleri, λ_m ve FPE kriterleri

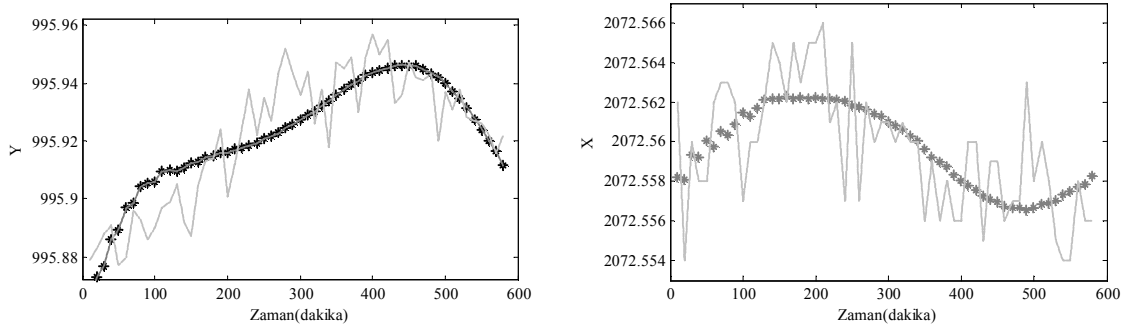
Kule	Model; $y_i = \beta_0 + \beta_1 V_i + \beta_2 T_i + \beta_3 W_i$	λ_0	FPE
Kule Avrupa	$Y_{14} = 1.2002 + 0.00013V - 0.0668T + 0.0346W$	0.1365	0.1567
	$X_{14} = -0.2745 - 0.000036V + 0.0136T - 0.0014W$	0.0066	0.0075
Kule Asya	$Y_{18} = 0.7950 + 0.0798V - 0.0443T + 0.0137W$	0.0359	0.0407
	$X_{18} = 0.1669 + 0.0190V - 0.0087T + 0.00005W$	0.0079	0.0089

Tablo 1’de belirlenen modellerin katsayılarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları 95% güven düzeyinde f serbestlik derecesine bağlı t -dağılımının güven sınırı $t_{f,1-0.05/2}$ ile karşılaştırılmıştır. Test sonucu kulelerin boylamasına yönlerindeki hareketini temsil eden modeldeki rüzgar hızına ait katsayısı istatistiksel olarak; $|t_{Kule\ Avrupa}^{14}| < t_{54,1-0.05/2} = 0.88 < 2$ ve $|t_{Kule\ Asya}^{18}| < t_{61,1-0.05/2} = 0.04 < 2$ olduğundan anlamsız çıkmıştır. Böylece rüzgar hızının kulelerin boylamasına yönlerindeki hareketlerine etkisi ihmal edilmiştir. Rüzgar hızının ihmal edilmesi sonucu, kulelerin boylamasına hareketlerini tanımlayan modelleri sıcaklık değişimleri ve araç sayısı büyüklükleri ile belirlenmiştir (Table 2). Table 1 ve Table 2’de kulelerin boylamasına hareketlerini tanımlayan modellerin parametrelerinin, λ_0 kayıp fonksiyon ve FPE değerlerinin hemen hemen aynı oldukları görülmektedir. Bu da rüzgar hızının kulelerin boylamasına hareketlerinde etkili bir değişken olmadığını göstermiştir. Böylece kulelerin boylamasına hareketini tanımlayan model iki giriş büyüklüğü ile belirlenmiştir.

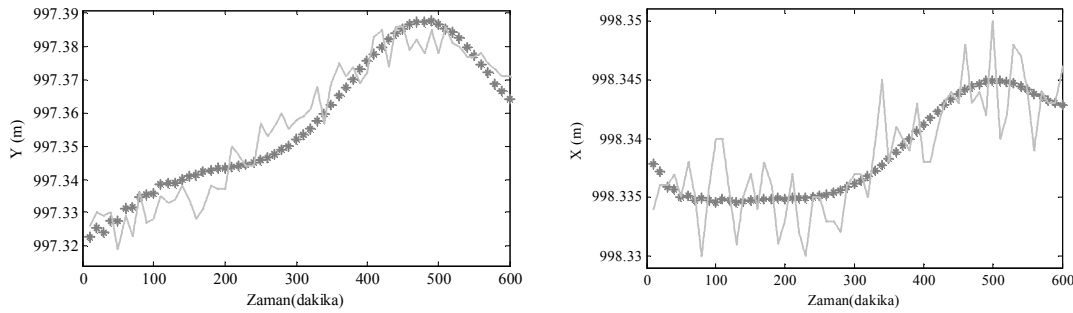
Tablo 2: Köprü kulelerinin araç sayısı (V) ve sıcaklık değişimleri (T) ile ortalama değeri çıkartılmış boylamasına (X) hareketleri arasındaki ilişkinin çoklu regresyon modelleri, λ_m ve FPE kriterleri

Kule	Model; $y_i = \beta_0 + \beta_1 V_i + \beta_2 T_i$	λ_0	FPE
Avrupa	$X_{14} = -0.1716 - 0.00004V + 0.0084T$	0.0066	0.0074
Asya	$X_{18} = 0.1634 + 0.0190V - 0.0085T$	0.0079	0.0087

Böylece, kulelerin yanal hareketleri araç sayısı, sıcaklık değişimleri ve rüzgar hızına bağlı modellerle, boylamasına hareketleri de araç sayısı ve sıcaklık değişimlerine bağlı modellerle belirlenmiştir. Table 1 and Table 2’de verilen çoklu regresyon modellerinden hesaplanan (gözlemlerin ortalama değeri eklenmiştir) ve gözlenen çıkış büyüklükleri Şekilleri (4) ve (5)’da verilmiştir. Şekillerde, modellerden hesaplanan ve gözlenen çıkış büyüklüklerinin uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4: Avrupa tarafındaki kulenin gözlenen (....) ve En Küçük Kareler Metodu (*) ile kestirilen çoklu regresyon modellerinden hesaplanan boylamasına ve yanal hareketleri (gözlemlerin ortalama değeri eklenmiştir)



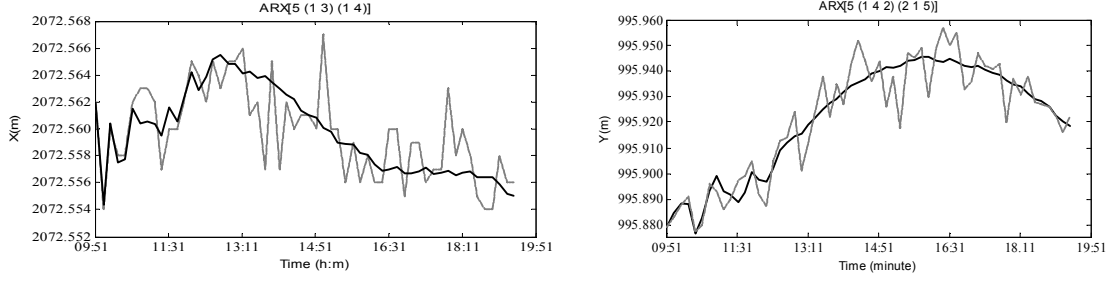
Şekil 5: Asya tarafındaki kulenin gözlenen (....) ve En Küçük Kareler Metodu (*) ile kestirilen çoklu regresyon modellerinden hesaplanan boylamasına ve yanal hareketleri (gözlemlerin ortalama değeri eklenmiştir)

Kulelerin boylamasına ve yanal hareketlerine ait modellerin (1) eşitliğindeki çoklu regresyon ile belirlenmesi aşamasında, modeldeki giriş büyüklüklerinin anlamlı olup-olmadıkları tespit edilmiştir. Bu tür modellerde, model t_i zamanındaki giriş büyüklüklerine t_i zamanında tepki göstermektedir. Bu durumda sistem “kulelerin” giriş büyüklüğüne gecikmeden tepki gösterdiği ve bu yüzden statik yapıda olduğu düşünülmektedir. Bu durumda kulelerin çoklu regresyon modelleri “statik çoklu regresyon modeli” olarak ifade edilebilir. Ayrıca, modeldeki hem giriş büyüklüğünün hem de çıkış büyüklüğünün daha önceki değerleri de dikkate alınmamaktadır. Bu şekilde elde edilen statik çoklu regresyon modellerini (6) ve (7) eşitliklerinde ifade edilen ARX modelin na , nb ve nk parametreleri ile gösterebiliriz. Bu durum da kulelerin yanal hareketlerini tanımlayan statik çoklu regresyon modellerinin Otoregresif derecesi $na=0$, değişken sayısı $nu=3$ (araç sayısı, sıcaklık değişimleri ve rüzgar hızı) için X derecesi $nb=[1 \ 1 \ 1]$ ve gecikme değerleri $nk=[0 \ 0 \ 0]$, boylamasına hareketlerini tanımlayan statik çoklu regresyon modelinin de $na=0$, $nu=2$ için (araç sayısı, sıcaklık değişimleri) $nb=[1 \ 1]$ ve $nk=[0 \ 0]$ ’dır. Böylece, kulelerin hareketlerini tanımlayan “statik çoklu regresyon modeli” ARX010 model ($[na, nb, nk]=[0 \ 1 \ 0]$) şeklinde ifade edilebilir.

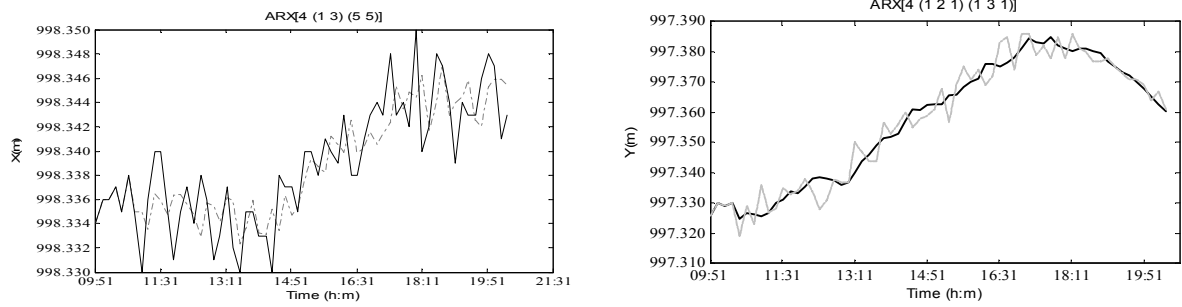
Köprü kulelerinin hem geçmiş dönem giriş ve çıkış büyüklüklerini hem de giriş büyüklüğüne çıkış büyüklüğünün gecikmeli olarak tepki göstermesini dikkate alan MISO ARX modellerle transfer fonksiyonları belirlenmiştir. Bu tür modeller giriş büyüklüğü birden fazla olduğundan oldukça karmaşık yapıdadırlar. Bu nedenle, statik çoklu regresyon analizi ile elde edilen sonuçlardan yararlanılarak kulelerin (7) eşitliğindeki MISO ARX modellerle tanımlaması yapılmıştır. (7) eşitliğindeki MISO ARX modellerde model derecelerinin ve gecikme değerlerinin belirlenebilmesi için çok sayıda farklı derecelerde ve gecikme değerlerinde modeller öngörülmüştür. Bu modellerin parametreleri ise En Küçük Kareler Metodu ile tahmin edilmiştir. Öngörülen modeller içerisinde en küçük λ_0 ve FPE değerlerini alan model, kulelerin hareketlerini tanımlayabilecek en uygun MISO ARX modeller olarak kabul edilmiştir (Tablo 3). Tablo 3’de kuleler için belirlenen modellerin her birinin farklı derecelerde ve gecikme zamanlarında olduğu da görülmektedir. Tablo 3’deki MISO ARX modellerden hesaplanan boylamasına ve yanal çıkış büyüklükleri ile kulelere yapılan gözlemler Şekil (6) ve (7)’da gösterilmiştir. Şekillerde, modellerden hesaplanan çıkış büyüklüklerinin kulelere yapılan gözlemleri yansıttığı görülmektedir.

Boğaziçi Köprüsü kulelerinin hareketlerinin MISO ARX modellerle tanımlanmasında, kulelerin hem geçmiş dönem giriş ve çıkış büyüklükleri hem de gecikme zamanları dikkate alınmıştır. Bu tür modeller dinamik sistemlerin “sistem teorisine göre enerji depolayan ve zamanla (gecikmeli olarak) depoladığı enerjiyi veren sistemler” tanımını yansıtmaktadır. Böylece, dinamik sistem köprü’nün kuleleri, dinamik davranışları tanımlama özelliği gösteren Tablo 3’deki MISO ARX modellerle tanımlanmıştır.

Mühendislik Yapılarının Davranışlarının Çoklu Giriş-Tekli Çıkış Modellerle Tanımlanması



Şekil 6: Avrupa tarafındaki kulenin X için MISO ARX511, Y için MISO ARX512 modellerinden hesaplanan çıkış büyüklükleri (—) ile gözlenen değerleri (- - -)



Şekil 7: Asya tarafındaki kulenin X için MISO ARX415, Y için MISO ARX411 modellerinden hesaplanan çıkış büyüklükleri (—) ile gözlenen değerleri (- - -)

Tablo 3: Kulelerin boylamasına ve yanal hareketleri için elde edilen ARX modeller, dereceleri (n_a , n_b ve n_k) ve polinom değerleri (A , B_1 , B_2 , B_3)

Kulelerin Hareket Yöntü	MISO ARX[n_a (n_b) (n_k)]	Model: $A(q).y(t)=B(q).u(t-nk)+e(t)$ A, B_1, B_2, B_3 Polinom Değerleri
Y	ARX[5 (1 4 2) (2 1 5)]	$A(q)=1-0,2381q^{-1}-0,2435q^{-2}+0,0488q^{-3}-0,2758q^{-4}-0,2889q^{-5}$ $B_1(q)=0,0201q^{-2}$ $B_2(q)=-0,0539q^{-1}-0,0735q^{-2}+0,1571q^{-3}+0,0896q^{-4}$ $B_3(q)=0,1000q^{-5}-0,1174q^{-6}$ $\lambda_0=0,000068733$, $FPE=0,000104595$
X	ARX[5 (1 3) (1 4)]	$A(q)=1-0,3450q^{-1}-0,4324q^{-2}+0,1558q^{-3}-0,1766q^{-4}-0,2017q^{-5}$ $B_1(q)=0,0040q^{-1}$ $B_2(q)=0,0618q^{-4}-0,0209q^{-5}-0,03265q^{-6}$ $\lambda_0=0,00000559$, $FPE=0,000007650$
Y	ARX[4 (1 2 1) (1 3 1)]	$A(q)=1-0,1666q^{-1}-0,2045q^{-2}-0,3382q^{-3}-0,2906q^{-4}$ $B_1(q)=-0,0096q^{-1}$ $B_2(q)=0,0109q^{-3}-0,0100q^{-4}$ $B_3(q)=0,0056q^{-1}$ $\lambda_0=0,000018528$, $FPE=0,000023822$
X	ARX[4 (1 3) (5 5)]	$A(q)=1-0,4012q^{-1}+0,0463q^{-2}-0,2495q^{-3}-0,3956q^{-4}$ $B_1(q)=-0,0029q^{-5}$ $B_2(q)=-0,0293q^{-5}+0,0055q^{-6}+0,02062q^{-7}$ $\lambda_0=0,000007915$, $FPE=0,000010176$

Ayrıca, statik çoklu regresyon modellere ait λ_0 ve FPE değerleri (Table 1 and 2) MISO ARX modellerin λ_0 ve FPE değerlerinden (Table 3) büyüktür. Bu da, kuleler için en uygun modelin MISO ARX modeller olması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, bu değerler statik çoklu regresyon modellerinin bilgi kaybına neden olduğunu da göstermektedir. Çünkü çoklu regresyon modeli, gözlenen yapı hareketlerini tam olarak yansıtmadığı için gözlemlerin düzeltmeleri, λ_0 ve FPE değerleri büyük elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dinamik bir sistem olan Boğaziçi Köprüsü kulelerinin transfer fonksiyonları modelleri belirlenmiştir. Belirlenen modeller, kulelerin araç sayısı, rüzgar hızı ve sıcaklık değerlerinin artış gösterdiği 9:51-19:45 zaman aralığındaki hareketlerini yansıtmaktadır. Transfer fonksiyonları için çoklu regresyon modelleri ve MISO ARX modelleri öngörülmüştür. Çoklu regresyon analizinde, çoklu regresyon modelinin statik davranış özelliği gösterdiği tespit edilmiş ve sistem tanımlamasına göre ARX010 olarak ifade edilmiştir. Bu tür modellerin kulelerin hareketlerini

tanımlamada bilgi kayıpları içerebileceği de λ_0 ve *FPE* kriterlerinin MISO ARX modelin λ_0 ve *FPE* kriterlerinden büyük çıkması ile tespit edilmiştir.

ARX010 çoklu regresyon analizi ile elde edilen bilgilerden yararlanılarak köprü kulelerinin farklı derecelerde ve gecikme zamanlarındaki MISO ARX modelleri daha kolay elde edilmiştir. Elde edilen MISO ARX512, ARX511, ARX411 ve ARX415 modellerin (Tablo 3) kulelerin hareketlerini bilgi kaybı olmaksızın tanımlayan en uygun modeller olduğu da görülmüştür. Çünkü, MISO ARX modellerin λ_0 ve *FPE* değerleri de statik modelin λ_0 ve *FPE* değerlerinden küçük elde edilmiştir.

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

- Erdoğan, H., Gülal, E., 2009. *Identification of dynamic systems using multiple input-single output (MISO) models*, Nonlinear Analysis:Real World Applications, 10, pp. 1183-1196.
- Gevers, M., Miskovic, L., Bonvin, D., Karimi, A., 2005. Identification Of A Two-Input System: Variance Analysis, In: 16th IFAC World Congress, Prague, Tchequie, July 4-8, pp.CD-Rom paper 02720.
- Hesse, C., Heunecke, O., Speth, M., Stelzer, I., 2000. *Belastungsversuche an Einem Schalentragwerk aus Ziegelsteinen*, XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung München, pp. 340-345
- Henchi, K., Fafard, M., 1997. *Dynamic Behaviour of Multi-Span Beams Under Moving Loads*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 199(1), p. 33-50
- Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory For The User. Second Edition*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Koulocheris, D., Dertimanis, V., Vrazopoulos, 2004. Evolutionary Parametric Identification of Dynamic Systems, Forschung im Ingenieurwesen 68, 173-181, Springer-Verlag, 173-181pp.
- Maruki, T., 2004. Structural Health Monitoring Using Parametric Models in System Identification, University of California, Irvine, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Michaltsos, G. T., 2002. *Dynamic Behaviour of A Single-Span Beam Subjected to Loads Moving With Variable Speede*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 258(2), p. 359-372
- Ochshorn, J., 1981. *Building Code, Wind Loads*, Department of Architecture, Cornell University, New York
- Roeck, G., Peeters, B., Maeck, J., 2000. *Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures, Computational Methods For Shell and Spatial Structures*, IASS-IACM, Athens, Greece.
- Ren, W. X., Harik, I. E., Blandford, G. E., Lenett, M., Baseheart, T. M., 2004. *Roebing Suspension Bridge. II: Ambient Testing and Live-Load Response*, Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No. 2, 119-126 pp
- Shane, C., Ratneshwar, J., 2005. *Structural Damage Detection Using AR-ARX Models*, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University.