

Çelik Model Köprünün Sistem Tanımlama Yöntemleri ile Modal Parametrelerinin Tahmini

Özgür ÖZÇELİK*
Merve GÜNDOĞAN**
Serap KAHRAMAN***

ÖZ

İnşaat mühendisliği yapıları ekonomik ömürleri boyunca, yapının dinamik özelliklerini değiştiren etkilere maruz kalırlar. Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemlerinin temelinde hasarın yapının rijitlik, kütle veya enerji yutma özelliklerini değiştirdiği ve bunun da yapının ölçülebilen dinamik tepkisinde değişikliklere yol açtığı gerçeği yatmaktadır. YSİ sürecinin önemli bir basamağı dinamik sistemin modal parametrelerinin tahminidir. Çalışmada, çelik model bir köprüye ERA, NExT-ERA sistem tanımlama yöntemleri uygulanarak modal parametreler tahmin edilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak tahmin edilen modal parametreler kullanılarak köprünün kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Hasar tespitinin doğru yapılabilmesi için modal parametrelerin doğru tahmini son derece önemlidir. Bu model ileride modal parametrelerin dolayısıyla hasarın tahminini etkileyen faktörlerin incelenmesinde kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Modal parametre tahmini, model çelik köprü, sistem tanımlama, deneysel/operasyonel modal analiz, yapı sağlığının izlenmesi

ABSTRACT

Modal Parameter Estimation of Model Steel Bridge Using System Identification Methods

Civil engineering structures are exposed to different external effects which change their dynamic characteristics. The fact that damage can alter stiffness, and/or energy dissipation capacity of a structure which in turn results in detectable changes in its vibration signature is the underlying principle of vibration-based structural health monitoring (SHM). An important step of SHM process is the estimation of modal parameters. In this study, modal parameters of a steel bridge are estimated using ERA and NExT-ERA system identification techniques. A calibrated finite element model of the bridge is obtained using the estimated modal parameters. Accurate damage identification of a structure depends on accurate

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 12.07.2012 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ozgur.ozcelik@deu.edu.tr

** Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - gundoganmerve@yahoo.com

*** Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - serap.kahraman@deu.edu.tr

estimation of modal parameters. The calibrated model in the future can be used to assess the parameters affecting modal parameter estimation therefore accurate damage identification.

Keywords: Estimation of modal parameters, steel model bridge, system identification, experimental/operational modal analysis, structural health monitoring

1. GİRİŞ

Kuvvetli bir deprem, fırtına ya da benzeri doğal felaketlere veya şiddetli bir çarpışma, patlama gibi insan-kaynaklı etkilere maruz yapıların hasar durumlarının güvenilir bir şekilde tespiti kritik bir önem taşımaktadır. Hasar, bir sistemin yapısal performansını etkileyen değişimler olarak tanımlanabilir. Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi (YSİ) yöntemlerinin temelinde hasarın yapının rijitlik, kütle veya enerji yutma özelliklerini değiştirdiği ve bunun da yapının ölçülebilir dinamik tepkisinde değişikliklere yol açtığı gerçeği yatmaktadır [1]. YSİ mevcut yapıların değerlendirilmesi, hasar tespiti, model kalibrasyonu, yapıların güçlendirme öncesi ve sonrası durumlarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilen önemli bir araç haline gelmiştir.

Deneyisel modal analiz, düşük düzeyli titreşimlere maruz bırakılan bir sistemin modal parametrelerinin tahminde kullanılan bir teknolojidir. Yapının tahmin edilen modal parametreleri doğal titreşim frekansları, mod şekilleri, modal sönüm oranları ve modal katılım faktörleridir. Yapı sağlığının izlenmesi işlemlerinde kullanılan sistem tanımlama yöntemlerini girdi-çıkı ve sadece-çıkı yöntemleri diye ikiye ayırmak mümkündür [2]. İnşaat mühendisliği yapıları büyük ölçekli yapılar olduğundan, bu yapıları doğru bir şekilde ölçülebilir kuvvetler ile tahrik etmek pratik olmamaktadır. Bu durumda mikro tremor, trafik, rüzgâr, yapının normal kullanım durumundan doğan titreşimler gibi ortamsal titreşim etkilerini kullanmak tek yol olmaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliği yapılarının modal parametrelerinin tahmininde sadece-çıkı yöntemleri de denilen operasyonel modal analiz yöntemlerini kullanmak daha uygun olmaktadır. Sohn v.d.'lerinin hazırladığı, 1996-2001 yılları arasında YSİ alanında yapılan çalışmaları kapsayan raporda, YSİ alanında kullanılan yöntemler özetlenmektedir [3]. Yapı sağlığının izlenmesi alanında ve dolayısıyla modal parametrelerin tahmininde birçok zorlukla karşılaşılmaktadır. Bunlar arasında, hasar gören sistemin doğrusal olmayan tepkisi, sensörlerin yeri ve sayısının belirlenmesi, yapıların düşük titreşim düzeylerinde hasara hassas özelliklerinin belirlenmesi, bu özelliklerdeki değişimin çevresel faktörlere (sıcaklık ve nem değişimi vb.) ve deney yöntemine bağlı değişimlerden ayıklanması sayılabilir [3].

Sunulan çalışmada, model çelik bir köprünün modal parametreleri NExT-ERA ve ERA yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Bir sistemin modal parametrelerinin tahmini, YSİ sürecinin önemli bir basamağını oluşturmaktadır. Bu nedenle, bir ilk aşama olarak modal parametrelerin doğru tahmini önemlidir. Tahmin edilen modal parametreler kullanılarak köprünün kalibre edilmiş bir sonlu elemanlar modeli de oluşturulmuştur. Bu model ileride gerçekleştirilecek modal parametrelerin tahminini etkileyen parametrelerin sistematik bir şekilde incelenmesi amacıyla kullanılacaktır.

2. NATURAL EXCITATION TECHNIQUE (NEXT) VE EIGENSYSTEM REALİZATION ALGORITHM (ERA)

Birçok inşaat mühendisliği yapısının kontrollü olarak tahrik edilmesi gerek boyutların çok büyük olması gerekse de yapıları tahrik eden dış kuvvetlerin karmaşıklığı nedeniyle zordur. Ayrıca, yapı sahipleri ekonomik nedenlerle yapılarını test amacıyla kullanım dışına almak konusunda çekimser kalmaktadırlar. Tüm bu nedenlerle ortamsal titreşim tepkisinin kullanıldığı sadece-çıkı sistem tanımlama yöntemlerini kullanmak inşaat mühendisliği yapıları için en uygun seçenek olmaktadır. NExT yöntemi, geniş spektrumlu ortamsal titreşim etkisi altındaki bir yapının bir referans noktasında ölçülen tepkisi ile farklı diğer noktalarından ölçülen tepkileri arasında bulunan çapraz korelasyon fonksiyonlarının, sistemin serbest titreşim verisi ile aynı özelliğe sahip olduğu gerçeğine dayanmaktadır [4, 5]. Çapraz korelasyon fonksiyonları kullanılarak modal parametreler tahmin edilebilmektedir. Deneysel veriler kullanılarak çapraz korelasyon fonksiyonlarının hesaplanması için Welch-Bartlett yöntemi kullanılmıştır [6]. Çalışmada, NExT yöntemi Matlab® ortamında programlanmıştır.

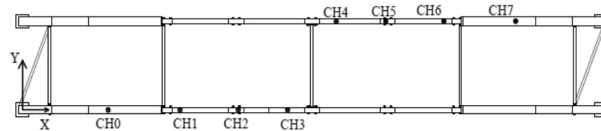
Serbest titreşim tepkisini (darbe tepkisi) kullanan birçok sistem tanımlama yöntemi mevcuttur [3]. Bu çalışmada Juang ve Pappa tarafından geliştirilen lineer çok serbestlik dereceli sistemlerin modal parametrelerinin tahmininde kullanılan ERA yöntemi kullanılmıştır [7]. ERA yöntemi özellikle düşük sönümlü yapıların modal parametrelerinin tahmininde uygun sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bunun için önce serbest titreşim tepki değerleri kullanılarak Hankel matrisi oluşturulur. Bu matris tekil değerlerine ayrıştırılarak, matrisin orto-normal özvektörleri ve diyagonal tekil değer matrisi kullanılarak sistemin durum-uzay matrisleri cinsinden azaltılmış dinamik modeli tahmin edilir. Durum-uzay sistem matrisinin özdeğer ve özvektörleri ile örnekleme zaman aralığı kullanılarak sistemin modal parametreleri hesaplanır. Eğer sistemin serbest titreşim tepkisi biliniyorsa, bu veri direkt olarak ERA yönteminde kullanılabilir. Bu veri mevcut değilse ise ERA yönteminde çapraz korelasyon fonksiyonları kullanılır. Gerekli bu fonksiyonlar NExT yöntemi kullanılarak bulunmaktadır. ERA yöntemi Matlab® ortamında programlanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada, 6.30 m açıklığında, 2.05 m yüksekliğinde ve 2.42 kN ağırlığında Şekil 1'de gösterilen model çelik köprü kullanılmıştır. Köprü döşemesini temsilen her biri 1.32 kN ağırlığında 8 adet betonarme blok Şekil 1(a)'daki gibi köprü üzerine yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

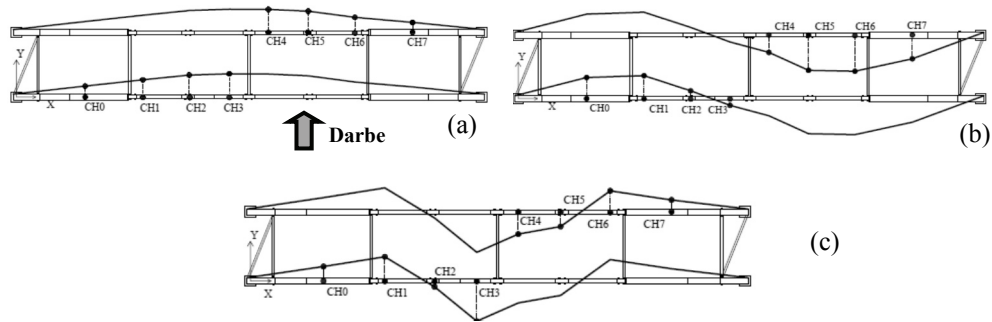
Şekil 1. (a) Çelik model köprü ve döşeme ağırlıkları; (b) XY düzlemine yerleştirilen ivmeölçerin plandaki görünümü.

Köprü bağlantıları cıvatalıdır. Her bir cıvata tork anahtarı ile 30 N.m'lik sabit tork değerine sıkılmıştır. Cıvata tork değerlerinin zamana bağlı değişimi köprünün modal parametrelerini de değiştirmektedir; bu nedenle tork değerleri periyodik olarak deney süresi boyunca kontrol edilmiş ve değişimin olmadığı görülmüştür. Deneylerde $\pm 4g$ ivme aralığına sahip 8 adet kapasitif tipte tek-eksenli ivmeölçer kullanılmıştır ve frekans bant-genişliği DC-100 Hz arasındadır. Sayısallaştırma için 8 kanallı 16-bit çözünürlüğe sahip veri toplama kartı kullanılmıştır. Köprü üzerinde ani-darbe ve ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Sekiz adet ivmeölçer y-ekseni doğrultusunda veri alacak şekilde köprü döşemesini taşıyan profiller üzerine Şekil 3(b)'deki gibi sabitlenmiştir.

4. ERA YÖNTEMİ İLE BULUNAN MODAL PARAMETRELER

Köprü üzerinde hem ortamsal titreşim hem de darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Ortamsal titreşim testlerinden elde edilen veri NExT-ERA, darbe deneylerinden elde edilen veri ise ERA yöntemleri kullanılarak modal parametreler tahmin edilmiştir. Gürültü düzeyi/sinyal oranının yüksek olmasından dolayı, ortamsal titreşim verisi kullanılarak tahmin edilen modal parametreler anlamlı değerler olarak tahmin edilememiştir. Bu nedenle, NExT-ERA yöntemi, köprünün kalibre edilmiş analitik modelinden elde edilen simülasyon verisi ile birlikte kullanılarak ileride gerçekleştirilecek modal parametrelerin tahminini etkileyen faktörlerin incelenmesi çalışmasında NExT-ERA yöntemi de kullanılabilir.

Darbe etkisi çelik profillerin Şekil 2(a)'da gösterilen noktasına y-yönünde ani bir şekilde vurularak verilmiştir. Bu şekilde elde edilen darbe tepkisi, ERA yönteminde kullanılarak modal parametreler tahmin edilmiştir. 1., 2. ve 3. modlar için doğal titreşim frekansları ve sönüm oranları, sırasıyla, 2.6 Hz, 8.2 Hz, 15.2 Hz ve %6.0, %1.1, %0.4 olarak bulunmuştur. Bu modlara karşılık gelen mod şekilleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. ERA yöntemi ile bulunan: (a) 2.63 Hz, (b) 8.16 Hz, (c) 15.22 Hz'e karşılık gelen mod şekilleri (içi dolu daireler sensör noktalarını temsil etmektedir).

Bu modlar darbe etkisi ile tahrik edilebilmiş modlardır. Modlara karşılık gelen sönüm oranları arasında 1. modun sönüm oranının fazla olduğu düşünülmektedir. Sönüm oranları üzerinde ileriki bölümlerde daha ayrıntılı olarak durulmuştur.

5. ANALİTİK KÖPRÜ MODELİ

ERA yöntemi ile bulunan modal parametreler dikkate alınarak, model köprünün SAP2000® programında kalibre edilmiş analitik modeli oluşturulmuştur. Bunun için önce köprünün geometrisi, köprü elemanlarının geometrik, malzeme ve bağlantı noktalarının özellikleri dikkate alınmış ve bir ilk model oluşturulmuştur [8]. Döşeme ağırlıkları modelin ilgili noktalarına nokta kütle kaynağı olarak etkilmiştir. Köprüyü oluşturan elemanlar elastik kiriş-kolon elemanları, mesnetler sabit mesnet olarak modellenmiştir. ERA'dan elde edilen sönüm oranları ilgili modlara atanmıştır. Analitik modelin modal parametreleri, fiziksel köprünün ERA ile elde edilen modal parametreleri ile iteratif bir şekilde eşleştirilmiştir. Modelde yapılan değişikliklerin belirli fiziksel limitler içinde kalmasına dikkat edilmiştir. Analitik mod şekilleri ile ERA'dan tahmin edilen mod şekillerinin benzerliği MAC değerleri hesaplanarak gösterilmiştir [9]. Tablo 1'de kalibrasyonu tamamlanmış modelin doğal titreşim frekansları, MAC değerleri ve modal kütle katılım oranları verilmektedir. Sonuçlardan görüldüğü üzere sistemin y-ekseni doğrultusundaki hareketine en çok katkıda bulunan modların ERA ile tahmin edilen modlar olduğu açıktır. Analitik modelin diğer modlarına ait modal kütle katılım oranları çok küçük değerler olarak bulunmuştur.

Tablo 1. Kalibrasyonu yapılmış analitik model ile fiziksel modelin tahmin edilen modal parametreleri.

Mod Sıralaması	Frekans (ERA)	Frekans (Kalibre Model)	MAC	Modal Kütle Katılım Oranı
	[Hz]	[Hz]		
1	2.63	2.74	0.99	0.728
2	8.16	8.20	0.80	0.000098
3	15.22	15.12	0.86	0.079

5.1 NExT-ERA Yöntemi Kullanılarak Bulunan Mod Şekilleri

Köprünün fiziksel modeli üzerinden elde edilen ortamsal titreşim verisinde gürültü-sinyal oranı yüksek olduğundan deneysel ortamsal titreşim verisi ile NExT yöntemi kullanılamamıştır. Ancak inşaat mühendisliği yapılarının bilinen tahrik fonksiyonları ile tahrik edilmesinin zor olması nedeniyle, ortamsal titreşim verisinin kullanıldığı sistem tanımlama yöntemlerinden biri olan NExT-ERA'yı kullanmak önemlidir. Bunun için kalibre edilmiş analitik model 0.5 Hz – 30 Hz frekans bant genişliğine sahip, %5.0g RMS şiddetinde Gaussyan beyaz gürültü ile yatay y-ekseni doğrultusunda tahrik edilmiştir. Analitik model üzerinden sensör yerlerine karşılık gelen noktalardan (Şekil 1) ivme tepkisi kayıt edilmiştir. Sensör gürültüsünü temsilen sistem tepkisi üzerine istatistiksel olarak birbirinden bağımsız %2.0g RMS şiddetinde Gaussyan beyaz gürültü eklenmiştir. NExT-ERA yöntemi ile tahmin edilen modal parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. ERA, NExT-ERA ve kalibre edilmiş analitik modelin modal analizi ile bulunan frekans ve MAC değerleri.

Mod Sıralaması	Frekans (ERA)	Frekans (NExT-ERA)	Frekans (Analitik model)	MAC (NExT-ERA ve Analitik Model)
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	
1	2.63	2.73	2.74	1
2	8.16	8.2	8.20	0.90
3	15.22	15.12	15.12	0.99

Tüm değerler her üç mod için de birbirine son derece yakındır. Ayrıca NExT-ERA ile bulunmuş mod şekilleri ile kalibre edilmiş analitik modelin modal analizi sonucu bulunmuş mod şekilleri arasında hesaplanan MAC değerleri her üç mod için de 1 değerine yakındır. Bu da NExT-ERA ile bulunan mod şekillerinin analitik modelin mod şekillerine çok yakın olduğunu göstermektedir.

6. SÖNÜM ORANLARI

DeneySEL veriler kullanılarak sönüm oranı tahminleri logaritmik azalma ve ERA yöntemleri ile yapılmıştır. NExT-ERA yöntemi ile sönüm oranı tahmini ise analitik modelden elde edilen simülasyon verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analitik modelde kullanılan sönüm oranı değerleri ERA ile bulunan değerlerdir. Simülasyon verisine gürültü etkisi için Gausyen beyaz gürültü eklenmiştir. Böylece, NExT-ERA yönteminin sönüm oranlarının tahminindeki etkinliği incelenebilmiştir. Köprünün farklı noktalarında ölçülen darbe ivme tepkisi, daha önce ERA ile bulunan doğal titreşim frekans değerleri dikkate alınarak yüksek dereceli bant-geçirgen dijital filtreler ile filtrelenmiş ve sadece tek modun tepkisini içeren serbest titreşim tepkisi bulunmuştur. Sonra bu tepkiler kullanılarak logaritmik azalma denklemleri ile de sönüm tahmin edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Logaritmik azalma, ERA ve NExT-ERA ile tahmin edilen sönüm oranları.

Mod Sıralaması	Sönüm Oranı (ξ)		
	Logaritmik Azalma (DeneySEL Veri)	ERA (DeneySEL Veri)	NExT-ERA (Simülasyon Verisi)
	[%]	[%]	[%]
1	4.1	6.0	6.2
2	3.8	1.1	1.0
3	2.3	0.4	0.5

Sistem modal parametrelerinden biri olan sönüm oranının tahmini sönüm mekanizmalarının karmaşık yapısından dolayı daha zordur. Bir yapıdaki sönüm değeri farklı sönüm mekanizmalarının (viskoz sönüm, Coulomb sürtünme etkisi, histeretik sönüm vb.) oluşturduğu eşdeğer sönümdür. Logaritmik azalma yöntemi, viskoz sönüm oranının tahmini için kullanılır. Bu durumda, daha karmaşık sönüm mekanizmasına sahip fiziksel köprünün sönüm oranı değerlerinin hesabında yanıltıcı sonuçlar vermektedir. Simülasyon verisi kullanılarak NExT-ERA yöntemi ile yapılan sönüm oranı tahmininde, analitik modele atanan sönüm oranları mükemmel yakın doğrulukta tahmin edilebilmiştir. Bu sonuçlara göre yöntemin sönüm oranlarının tahmininde kullanılabilirliği açıktır. Ancak, gerçek deneysel verilerin kullanıldığı durumlarda, örneğin klasik olmayan sönüme sahip sistemler, zemin-yapı etkileşiminin önemli olduğu durumlar vb. NExT-ERA'nın sönüm oranı tahmininde bu kadar kesin sonuçlar vermediği bilinmektedir [10].

7. SONUÇLAR

Sunulan çalışmada, çelik model köprünün sistem tanımlama yöntemleri ile modal parametreleri tahmin edilmiştir. Bir sistemin modal parametrelerinin tahmini, sistemde farklı nedenler ile meydana gelebilecek hasar tespiti için kullanılan yapı sağlığının izlenmesi sürecinin önemli bir ayağını oluşturmaktadır. Sunulan çalışmada, model köprünün sistem tanımlaması için ERA ve NExT-ERA yöntemleri kullanılmıştır. Tüm bu yöntemler Matlab® ortamında programlanmıştır. ERA yöntemi ile köprünün tahmini yapılabilen üç moduna ait doğal titreşim frekansları, sırasıyla, 2.63 Hz, 8.16 Hz ve 15.22 Hz olarak bulunmuştur. Köprünün ilgili modlarına karşılık gelen sönüm oranları ise, sırasıyla, 0.06, 0.011 ve 0.004 olarak tahmin edilmiştir. Gürültü/sinyal oranının ortamsal titreşim testlerinde yüksek olmasından dolayı NExT-ERA yöntemi kullanılarak doğru sonuçlar elde edilememiştir. Bu nedenle, ERA yöntemi ile elde edilen modal parametreler kullanılarak köprünün kalibre edilmiş sayısal modeli oluşturulmuş ve sayısal modele ait dinamik tepki elde edilerek üzerine sensör gürültüsünü temsilen beyaz gürültü sinyali eklenmiştir. Bu veriler kullanılarak sayısal modelin NExT-ERA yöntemi ile modal parametreleri mükemmel yakın doğrulukta elde edilmiştir. Böylece, inşaat mühendisliği yapıları için daha uygun bir çerçeveye sunan sadece-çıkıtı sistem tanımlama yöntemi olan NExT-ERA da incelenebilmiştir.

Sönüm oranının tahmini için ERA yönteminin yanı sıra logaritmik azalma yöntemi uygulanmış, gerçek model köprüye ait sönüm oranları tahmin edilerek, ERA yöntemiyle bulunan değerler ile karşılaştırılmıştır. Sönüm tahminine ilişkin genel olarak sönüm oranı tahmin edilirken kullanılan yöntemin dikkatli seçilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Farrar, C.R., Lieven, N.A.J., Damage Prognosis: the Future of Structural Health Monitoring, Phil. Trans. R. Soc. A, 365, 623–632, 2007.
- [2] Peeters, B., De Roeck, G., Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, ASME, 123, 659-667, 2001.

- [3] Sohn H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R., A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, Los Alamos, NM, 2003.
- [4] James, G.H. III, Carne, T.G., Lauffer, J.P., The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction From Operating Wind Turbines, Sandia Report SAND92-1666, UC-261, 1993.
- [5] Farrar, C.R., James, G.H. III, System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge, Journal of Sound and Vibration, 205, 1, 1-18, 1997.
- [6] Bendat, J.S., Piersol, A.G., Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis (2), John Wiley&Sons, USA, 1993.
- [7] Juang, J.N., Pappa, R.S., Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics , 8 (5), 620-627, 1985.
- [8] Gündoğan, M., Çelik Model Köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2012.
- [9] Allemang, R.J., Brown, D.L., A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, Proc. Of 1st International Modal Analysis Conference, Society of Experimental Mechanics, Bethel, Conn., 110-116, 1982.
- [10] Moaveni, A.R., Barbosa, A.R., Conte, J.P., Hemez, F.M., Uncertainty Analysis of Modal Parameters Obtained from Three System Identification Methods, Proc. of 23th International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, FL, 2007.