

Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları

Cemalettin DÖNMEZ*
Eyyüb KARAKAN**

ÖZ

Deneysel modal analiz son 30 yıldır çeşitli araştırmacılar tarafından yapısal sistemlerin durum tespiti/izlemesi ve hasar tanınması amacıyla kullanılmaktadır. Ölçüm ve analizlerin tekniğine uygun olarak tasarlanıp uygulanması durumunda bu teknik ile yapısal bir sistemin dinamik özellikleri (frekanslar, sönüm oranları ve modal şekilleri) kestirilebilmektedir. Sistemde oluşacak herhangi bir hasarın sistemin sıklığı ve aynı zamanda dinamik özelliklerini değiştireceği gerçeğinden yola çıkılırsa, hasar öncesi ve sonrası dinamik özelliklerin izlenmesi sayesinde yapıda oluşan hasarlar tahribatsız bir biçimde tespit edilebilir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE), İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bir TÜBİTAK projesi kapsamında deneysel modal analiz tekniğinin kullanılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Bu bildiri kapsamında deneysel modal analiz tekniklerinin köprülerin durum tespiti ve hasar tanınmasında ne şekilde uygulanabileceği konusunda kısa bir özet verilecek ve İYTE'de bugüne kadar öğrendiğimiz teknikleri uygulamada gösterebilmek amacı ile laboratuvarında imal, basitleştirilmiş bir köprü maketi üzerinde modal analiz teknikleri kullanılacak ve sonuçlar sergilenecektir. Ayrıca maket köprüünün sonlu elemanlar modeli kurularak analiz ve deney sonuçları karşılaştırılacak ve sonuçlar irdelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Modal analiz, sonlu elemanlar, köprü, yapısal tanılama.

ABSTRACT

Applications of Experimental Modal Analysis for Bridges

Experimental modal analysis is used by researchers for the purpose of condition assessment and damage detection of structural systems. If the experiment and analysis are performed accordingly, it is possible to identify the dynamic parameters of the systems such as natural frequencies, damping ratios and the modal vectors. Since any damage in the system changes the stiffness and at the same time dynamic parameters of the system, it is possible to detect and locate the damage in the system. System parameters should be identified before and after the damage for such an evaluation. Experimental modal analysis technique is under study in İYTE, Civil Engineering Department. Through the paper a limited

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.11.2007 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - cemalettindonmez@iyte.edu.tr

** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - ekarakan20@hotmail.com

literature survey will be presented in relation with the application of modal analysis techniques for condition assessment and damage detection of bridges. Also a simple bridge model will be tested and analyzed with techniques that we have acquired in IYTE up to now. In order to discuss the results of the modal analysis results, a finite element model of the model bridge will also provided.

Keywords: Modal analysis, finite elements, bridge, system identification.

1. GİRİŞ

Köprüler işlevleri gereği buldukları bölgedeki toplumların sosyal ve iktisadi hayatları üzerinde çok büyük öneme sahiptirler. Büyük su yollarını yada derin yarıları geçen köprüler, alternatif ulaşım yollarının sınırlı olması sebebi ile daha da önemlidirler. Servis hayatlarının uzunluğu göz önüne alındığında köprülerin yapısal durumlarının izlenmesinin can güvenliği ve bulunduğu bölge ekonomilerine etkileri açısından önemi çok açıktır. Yaygın mevcut uygulamada köprülerin yapısal durumlarının izlenmesi, kritik olduğu düşünülen ve mevcut imkanlarla izlenebilen bölgelerin gözlemlenmesi şeklindedir. Sistemin bütününe mekanik özelliklerini izleyerek potansiyel sorun bölgelerin yerinin düzenli bir izleme süreci sayesinde saptanabilmesi yolunda yoğun bir araştırma çabası vardır. Bu şekilde işleyecek bir yöntem sorunlu bölgeyi tespit edebileceği için eldeki diğer olanaklar ile sorunlu bölge çok daha detaylı olarak incelenip, bütünsel değişimlerde göz önünde bulundurularak sistem için mühendislik kararlarının alınmasına kılavuz olabilir. Sistemin bütününe mekanik özelliklerini tanımlayabilme çabası yapısal tanılama olarak adlandırılır.

Büyük ve karmaşık sistemler olan inşaat mühendisliği yapılarının, -ki köprülerde bu gruba dahildir- bütünsel mekanik özelliklerinin tespiti amacıyla yapısal tanılama kavramı son 30 yıldır inşaat mühendisliği düşüncesine girmiştir [1]. Yapısal tanılama, mühendislik kararlarının alınabilmesi için, sistemin davranışını ve etkileyen mekanizmaları sayısal olarak saptayabilmek amacı ile istenen değişkenleri ölçebilecek deneylerin tasarlanıp uygulanmasıdır. İnşaat mühendisliği yapılarının yapısal tanınması amacı ile kullanılacak araçlardan birisi deneysel modal analizdir. Deneysel modal analiz teknikleri ile sistemin dinamik değişkenleri olan doğal frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen modal şekiller ve sönüm oranları kestirilebilir. Sistemin dinamik değişkenleri, sistemdeki kütle miktar ve dağılımı ile sistemi oluşturan elemanların sıklığı ve bunun dağılımı arasındaki ilişki sonucu ortaya çıkar. Sönüm oranları ise harekete maruz kalan sistemin malzemesi dahilinde ve elemanları arasında oluşan iç sürtünmelerin veya tüketilen enerjinin bir ölçüsü olarak ortaya çıkar. Modal analizin diğer tekniklere göre avantajı yapı-temel-zemin etkileşimini de içerecek şekilde sistemi tanınmasıdır.

Bu bildiri kapsamında deneysel modal analizin temel varsayımları tanımlandıktan sonra bu tekniğin literatürde köprüler ile ilgili olarak ne şekilde kullanıldığı özetlenecektir. Ayrıca İYTE’de bugüne kadar özümşenen teknikleri uygulamada gösterebilmek amacı ile laboratuvarında imal basitleştirilmiş bir köprü maketi üzerinde modal analiz teknikleri kullanılacak ve sonuçlar sergilenecektir. Maket köprüünün SAP2000 ile sonlu elemanlar modeli kurularak analiz ve deney sonuçları karşılaştırılacak ve sonuçlar irdelenecektir.

2. DENEYSEL MODAL ANALİZ

Deneysel modal analiz için doğrulanması gereken iki temel varsayım vardır: doğrusallık ve zamanda değişmezlik [2, 3, 4] Doğrusallık modal analizin temelini oluşturur. Aynı modların üst üste bindirilerek sistemin davranışının tanımlanabilmesini sağlar. Deneysel modal analiz için gerekli ölçümler belirli bir zaman zarfında yapılabildiğinden ölçümlerde bir bütünlük sağlanabilmesi için sistemin zamanda değişmez olması gereklidir. Deneysel modal analiz açısından, zamanda değişmezliğin en azından belirli bir süre için değişmezlik olması kabul edilebilir. Gerçek hayattaki yapıların ne doğrusal ne de zamanda değişmez oldukları göz önüne alındığında modal analiz yapılmadan önce bütün olası hatalara ve belirsizliklere rağmen bu yöntemin yapıların mevcut durum tahlilinde kullanılıp kullanılmayacağı kararının verilmesi gereklidir.

Zamanda değişmezlik temel bir kabul olmak ile beraber sistemde ölçüm zamanı dışında oluşan değişimler sayesinde iki ölçüm arasındaki değişimler izlenerek, örneğin değişim bir hasar sebebi ile oluşuyor ise, hasar ve yeri tespit edilebilir. Bu noktada belirtmekte fayda var ki çevre ısı ve neminde oluşan oynamalar sebebi ile sistemlerin sınır ve süreklilik durumları değişmekte ve bu sebeple de yapının dinamik özellikleri değişebilmektedir.

Modal analizde çözümleme sistemin davranışının birbirine dikgen (İng. orthogonal) modlar vasıtası ile tanımlanabileceği kabulüne dayanır. Bu kabul ile birim dürtü uyarısı için zaman uzayında bir sistemin ötelenme fonksiyonu Denklem 1 şeklinde yazılabilir.

$$x(t) = \sum_{k=1}^N e^{\sigma_k t} [A_k e^{j\omega_k t} + A_k^* e^{-j\omega_k t}] \quad (1)$$

burada; A : sistemin modal şekilleri ile bağlantılı değişken,
 N : sistemi tanımlayan serbestlik derecesi sayısı,
 t : zaman,
 w : sistemin sönümlü frekansları,
 σ : sönüm katsayısıdır.

Modal analiz tekniğinde en baştan sistemi tanımladığı kabul edilen bir fonksiyon vardır. Bu sebeple deneysel olarak elde edilmiş olan verileri tanımlanan fonksiyona en iyi uyduran değişkenlerin kestirilmesi amacıyla eğri oturtma yöntemleri kullanılarak sistem değişkenleri tanımlanır. Bu amaçla çok sayıda yöntem geliştirilmiştir [2, 3, 5].

Deneysel modal analiz deneylerinin tasarlanabilmesi için ön ölçümlere ihtiyaç vardır. Bu ölçümler sayesinde daha başlangıç aşamasında karşılıklılık (İng. reciprocity), doğrusallık ve zamanda değişmezlik (en azından test süresi boyunca) hakkında karar verilerek, modal analizin söz konusu yapı için uygun olup olmadığına karar verilebilir. Ön ölçümler sayesinde tetikleme, ortalama sayıları, kayıt süresi, frekans çözünürlüğü, ölçülecek frekans aralığı, kullanılacak pencereler gibi kayıt değişkenleri ve ölçüm noktalarının tasarımı/doğrulanması ve optimal veri kayıt değişkenleri tanımlanır [2, 3, 6]. Tanılanması gereken sistemin sonlu elemanlar modeli kurularak ön ölçümler sayesinde tanımlanan deney tasarım değişkenlerinin sınaması yapılabilir.

Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları

Deneysel modal analiz sonucu elde edilen dinamik değişkenler sistemlerin öz özellikleri oldukları için birçok farklı amaca hizmet edebilmektedirler. Bunlar arasında inşaat mühendisliği yapıları ile ilgili olarak mevcut yapıların durum tespiti, yapıların durumunun izlenmesi, yapısal model düzeltme/doğrulama/ilintilendirme ve aktif titreşim kontrolü sayılabilir [5].

3. DENEYSEL MODAL ANALİZİN KÖPRÜLERDEKİ UYGULAMALARI

Modal analiz yöntemleri köprülerde temel olarak iki şekilde kullanılmaktadır:

- a. Köprülerin hizmet yeterliliğinin izlenmesi (İng. health monitoring) konusunda temel verilerin üretilmesi,
- b. Köprülerin sayısal modellerinin doğrulanması.

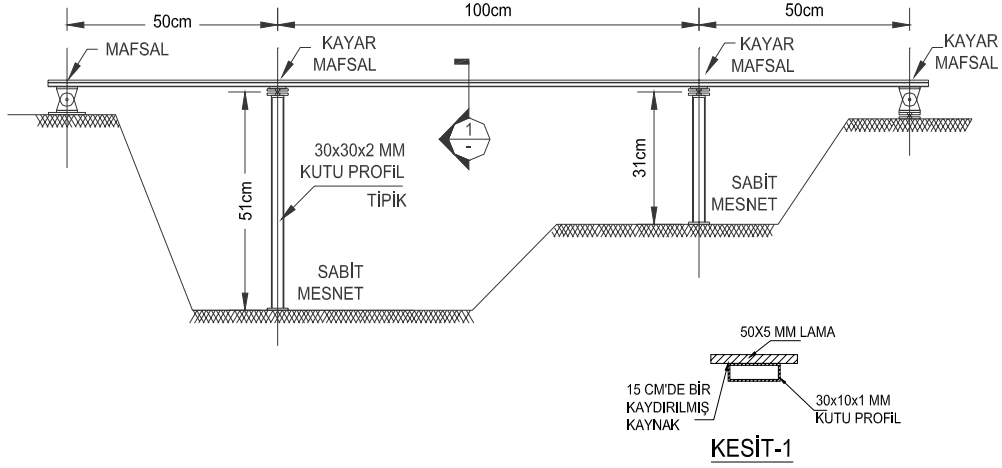
Köprülerin hizmet yeterliliğinin izlenmesi konusu çeşitli boyutlarda incelenmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda, tipik olarak, yapıdan belirli aralıklarla ölçümler alınıp yapının durumu izlenir. Araştırmacılar tarafından teorik olarak mümkün olan yöntemi doğrulamak ve kalibre etmek maksadı ile yoğun olarak kontrollü deneyler yapılmaktadır. Bu amaçla birçok araştırmacı [4, 6-11] tarafından model veya hizmet dışına çıkacak köprülere hasarlar verilerek, sistemlerde meydana getirilen hasarın deneysel modal analiz yöntemleri ile kestirimi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan gözlemlendiği üzere mevcut teknik kapasite ile bir köprüde hasarın varlığı göreceli olarak daha kolay saptanabilmektedir. Hasar yerinin tayin edilmesi için daha fazla hasara ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut teknikler dahilinde, ölçüm ve analizdeki diğer bütün belirsizlikler ile beraber, çevresel faktörlerin toplu etkisinin dinamik değişkenlerde %10'a kadar değişimlere sebep olduğu belirtilmekte ve ancak bu miktardan sonraki değişimler yapıda oluşan bir hasara ilintilendirilmektedir. [6, 9].

Köprüler çok önemli yapılar oldukları için özellikle büyük açıklıklı köprülerde kurulmuş olan sayısal modellerin saha ölçümleri ile doğrulanması ihtiyacı vardır. İmalat gerçekleşmeden saha ölçümleri alınmayacağından, bu tip doğrulamalar yük tanımlarının değiştirilmek istendiği mevcut köprülerde, yapıda oluşan bir değişim sonucu sistemin bütününe yeniden analize ihtiyaç duyduğu köprülerde ve imalat sürerken yarı mamül halindeki köprülerde aşırı çevresel yükler altında sistemin nasıl davranacağını kontrol edilmek istendiğinde kullanılmaktadır [12-18]. Bu amaçla saha ölçümleri ile doğrulanan sayısal modeller daha sonra köprünün çeşitli yük birleşimleri altındaki davranışı ortaya çıkarılmasında kullanılmakta ve çıkan sonuçlar mühendislik kararlarının verilmesinde temel veri olmaktadır.

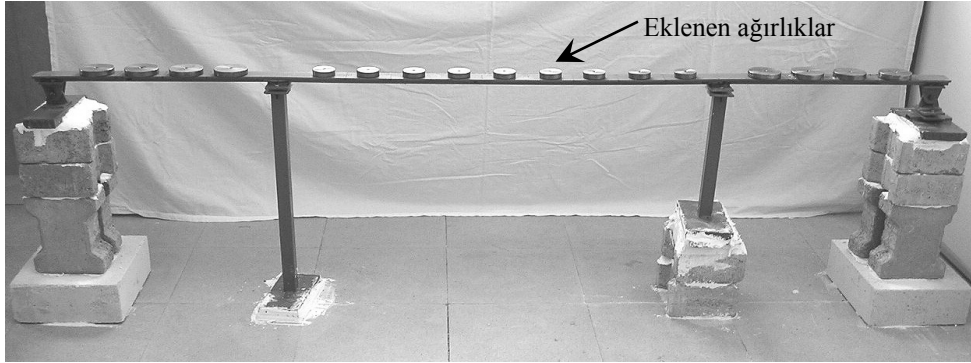
4. MAKET KÖPRÜ

Deneysel modal analizin yapısal bir sistem üzerindeki uygulamasını sergileyebilmek maksadı ile bir maket köprü tasarlanıp imal edilmiştir. Maket tasarlanırken tam boyutlu köprülere benzetim çabasına girilmemiştir. Elde mevcut olan malzemeler kullanılarak uç mesnetlerde aynı kotta zemine oturan, ara mesnetlerde ise iki farklı kotta yere basan kule ayaklara sahip üç açıklıklı bir köprü oluşturulmuştur. Boyutları ve genel yerleşimi Şekil 1'de verilen maket, çelik malzeme kullanılarak imal edilmiştir. Gövde kesiti oluşturulurken

ve mesnetlerde gerekli yerlerde metal kaynağı kullanılmıştır. Maketin titreşim frekanslarını aşağı çekebilmek amacı ile Şekil 2’de gösterildiği üzere maketin açıklığı boyunca silikon tutkal ile yapıştırılmış çelik ağırlıklar kullanılmıştır.



Şekil 1. Maket köprü yerleşimi ve boyutları

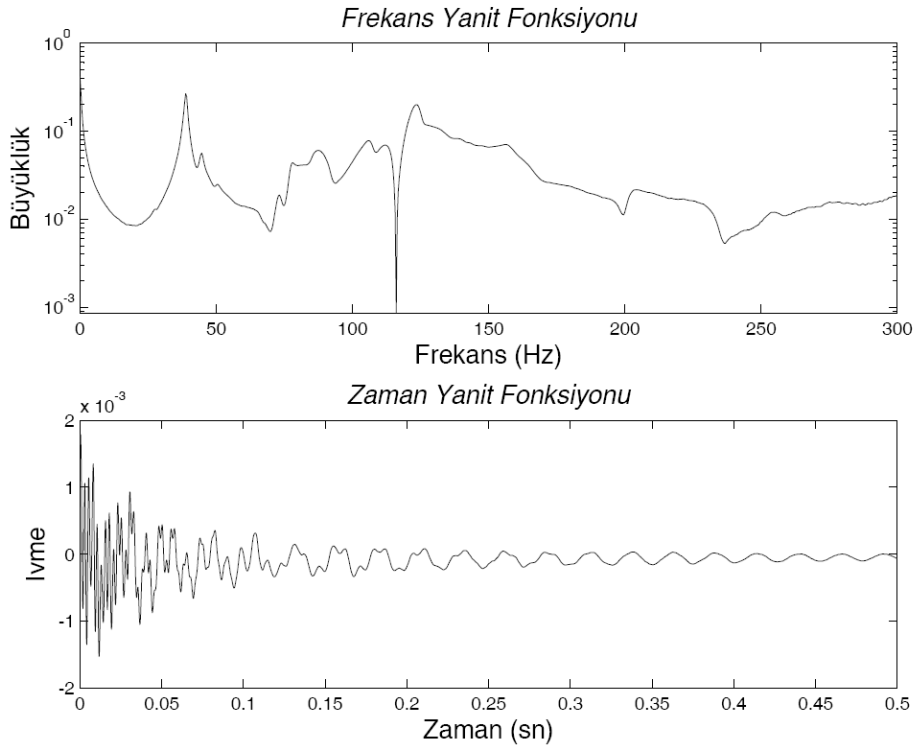


Şekil 2. İmalat sonrası maket köprü ve ağırlıklar

İmalat aşamasında en zor kısım mesnetlerin imalatı ve montajı olmuştur. Yapının hafifliği ve detayların fiziksel ufaklığı sebepleri ile kayar mesnetlerde aynı anda serbestlik yönünde harekete izin verirken, diğer serbestlik derecelerini sınırlamak sorun yaratmıştır. İmalat sırasındaki paylar ve kusurlar sebebi ile mesnetlerin iç yük dağılımlarında dengesizlikler olduğu gözlenmiştir. İmalat konusunda karşılaşılan zorlukların modal deney/analiz ve sonlu elemanlar modellerine yansımaları olmuştur. Bu konu fiziksel ölçüm ve hesapların karşılaştırılması sırasında irdelenecektir.

5. MODAL DENEY VE ANALİZ

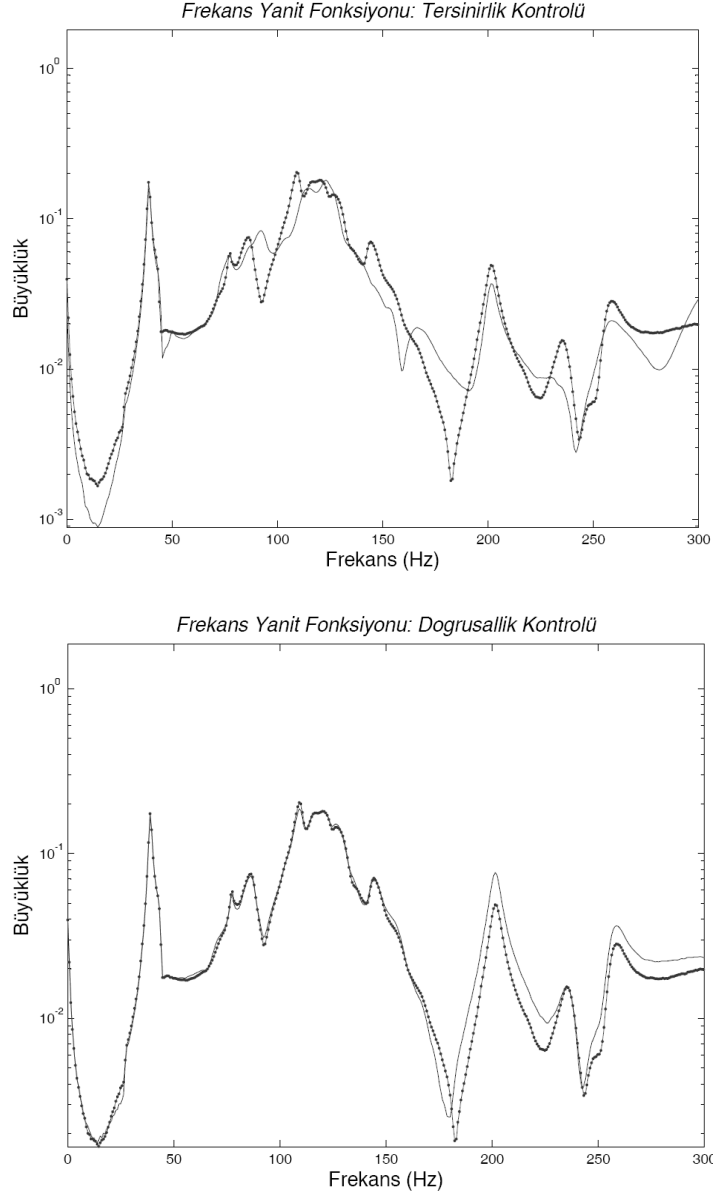
Maketin dinamik özelliklerini belirleme yönünde ilk olarak ölçüm yerlerinin belirlenmesi, frekans çözünürlüğü ve üst sınırının tanımlanması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla sistemden ön ölçümler alınarak frekans yanıt fonksiyonları incelenmiştir. Ayrıca sistemin ideal hali için bir sonlu elemanlar modeli kurulmuş ve doğal frekanslar ve modal şekiller hakkında bir ön bilgi sahibi olunmuştur. Ön çalışmalar sonrasında güvenli frekans üst sınırı 500Hz olarak belirlenmiştir. Asıl ilgilenilen bölge 300Hz altındadır. Elimizdeki mevcut ölçüm teçhizatının analog alçak geçiren filtresinin 2.5kHz olması sebebi ile 6kHz'lik bir örnekleme hızı seçilmiştir. Ölçümlerin frekans üst sınırı daha sonra sayısal bir alçak-geçiren filtre ile 500Hz seviyesine indirilmiştir. Filtrelendikten sonra sistemin tipik frekans ve zaman yanıt fonksiyonları Şekil 3'de gösterildiği gibidir. Sisteme darbe çekici vasıtası ile -modal şekil çözünürlüğü için yerleri tespit edilen 14 noktadan- uyarılar verilip sistemin tepkileri üç eksenli bir ivmeölçer vasıtası ile kayıt edilmiştir.



Şekil 3. Maket köprü tipik frekans ve zaman yanıt fonksiyonları örnekleri (verilen grafikler uyarı ve ivme ölçümünün düşey yönde olduğu bir duruma karşılıktır)

Ölçüm sonuçları modal analizin ana varsayımları olan tersinirlik ve doğrusallık yönünden incelendiğinde, sistemin bu temel varsayımlarda sorunlu olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4).

Sistemdeki kütle miktarının az olması sebebi ile mesnetlerdeki ideal dışı davranışın orantısız bir biçimde sistemin genel davranışına yansiyarak bu sonuca yol açtığı düşünülmektedir. Gerçek yapılarda her zaman için doğrusallık dışına bir sapma olacağı düşünüldüğünde maket davranışındaki bu durum modal analiz yöntemini bu şartlar altında sınamak için bir fırsat yaratmıştır.



Şekil 4. Tersinirlik ve doğrusallık kontrolleri

Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları

Bu çalışma kapsamında sistemi tanımlayan bir fonksiyon kestirimi yapılmamış, sistemin doğal frekansları ve modal şekilleri frekans yanıt fonksiyonunun kompleks kısmı kullanılarak saptanmıştır. Bu frekanslara karşılık gelen sönüm oranları ise yarı güç bandı genişliği kullanılarak saptanmıştır. Bu yöntem Ek 1’de kısaca özetlenmiştir. Bölümümüzde Öz Geçekleştirme Algoritması (İng. Eigenvalue Realization Algorithm), En Küçük Üstel Kompleks Kareler Tekniği (İng. Least Square Complex Exponential) ve Çok Referanslı Zaman Uzayı (İng. Polyreference Time Domain) gibi kestirim algoritmalarını kullanmak üzere çalışmalar sürmektedir.

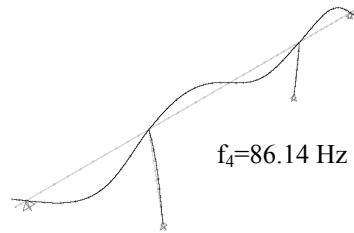
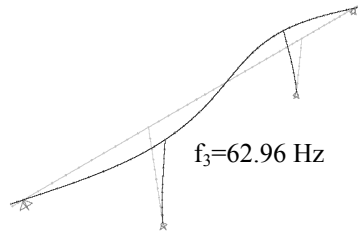
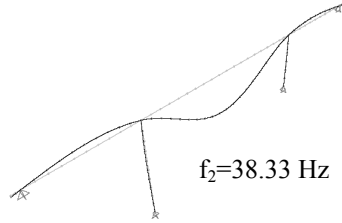
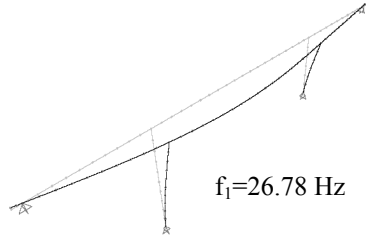
6. MODAL ANALİZ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Sistemden kestirimi yapılan doğal frekans ve modal şekiller, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sistemin modelinin kalibrasyonunda kullanılarak sayısal model ile ölçüm sonuçlarının mümkün merteye birbirlerine yaklaştırılmasına çalışılmıştır. Bu amaçla sonlu elemanlar modelinde iki konuda değişiklik yapılmıştır. Bunlardan birincisinde gövde kesitinin eylemsizlik momenti, modelin köprü tablasının düzlemine dik yönde %10 azaltılmış, tabla düzleminde ana aksa dik yönde ise %10 arttırılmıştır. İkincisinde ise kule ayakların sabit mesnetlerinde yaylar kullanılarak gevşeme, kayar mesnetlerinde de mafsal yerine yaylar kullanarak serbestlik yönünde sıkılaşma diğer iki yönde ise gevşeme sağlanmıştır. Bu değişiklikler ile birlikte maket köprü SAP2000 vasıtası ile tel-çerçeve (İng. wireframe) şeklinde modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere sistemin ilk iki doğal frekansı ölçüm ve analiz sonuçlarıyla uyum içindedir. Sonraki frekanslar büyük farklılıklara sahiptir. Şekil 5’den izlenebileceği gibi her ne kadar yüksek frekanslarda farklılıkları oluşsa da her iki yöntem ile elde edilen modal şekiller benzerlik içindedir.

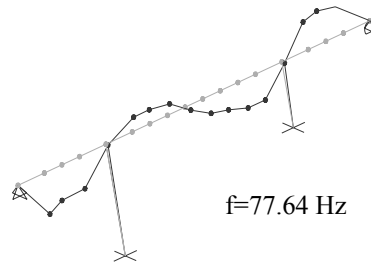
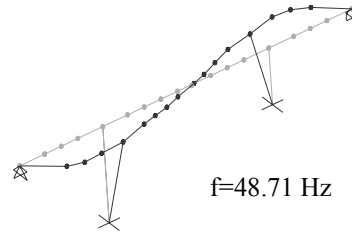
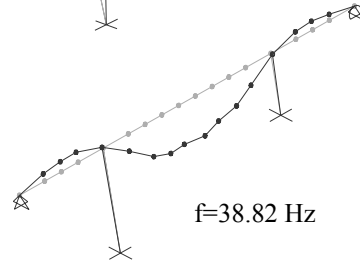
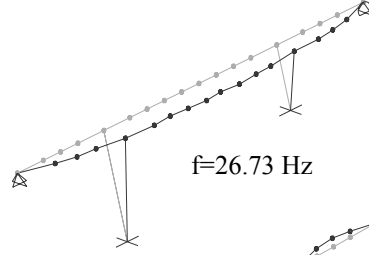
Tablo 1. Sonlu elemanlar ve modal analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve sönüm değerleri

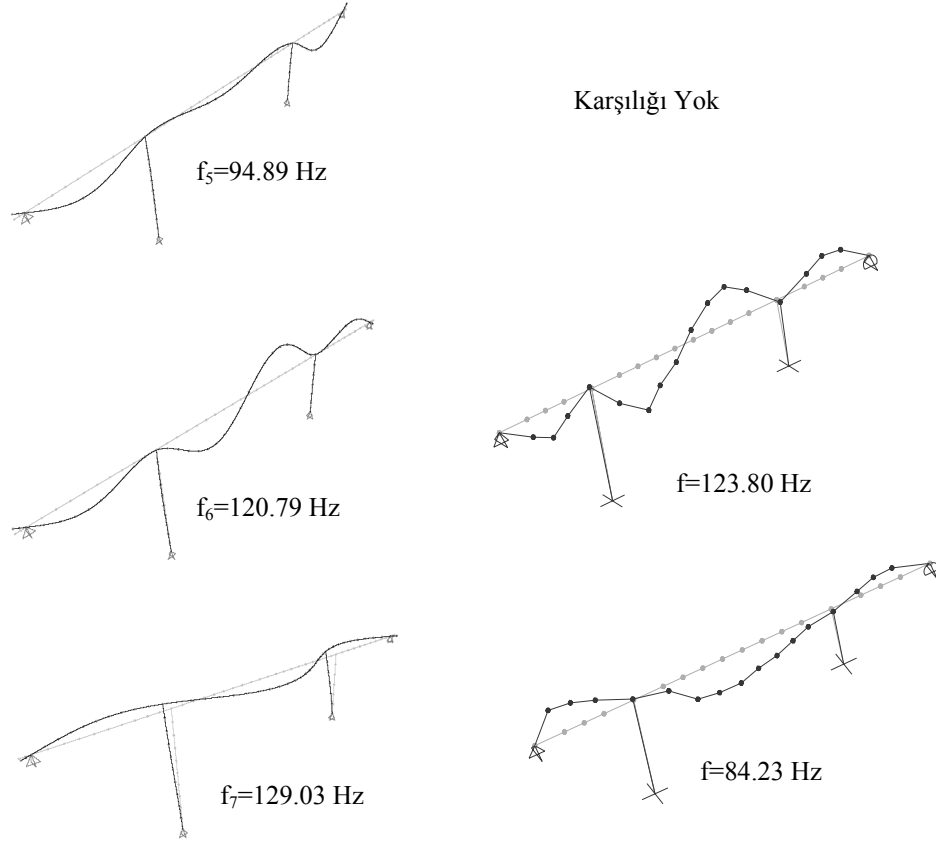
Mod Sayısı	Sonlu Elemanlar Modeli Sonucu (Hz)	Modal Analiz Sonucu (Hz)	Hata Payı	Sönüm Oranı
1	26.78	26.73	%0.2	%0.9
2	38.83	38.82	%0.03	%1.7
3	62.96	48.71	%29	%5.6
4	86.14	77.64	%11	%2.4
5	94.89	Karşılığı yok	-	-
6	120.79	123.8	%2.5	%2.3
7	129.03	84.23	%53	%2.1

SONLU ELEMENLAR



MODAL ANALİZ





Şekil 5. Sonlu elemanlar analizi ve modal analiz sonucu elde edilen modal şekiller ve frekansları

7. SONUÇLAR VE KAPANIŞ

Deneysel modal analiz, tahribatsız bir biçimde yapısal sistemlerin durumlarını tespit etmekte kullanılabilir. Sistemin durumunun düzenli zaman aralıkları ile izlenerek değişimler tespit edilebilir. Yöntemin sağlıklı bir biçimde kullanılabilmesi için analiz edilecek olan sistemin, tekniğin temel varsayımlarına uygunluğunun doğrulanması gerekir. Bu bildiride İYTE İnşaat Mühendisliği Bölümünde deneysel modal analizin kullanılması yönünde yapılan çalışmalara örnek olacak şekilde laboratuvarında imal edilmiş bir maket köprü üzerinde çalışılmıştır. Modal analiz sonucu elde edilen dinamik değişkenler sistemin sonlu elemanlar analizinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Maketin kayar mafsallı mesnetlerindeki ideal dışı davranış sebebi ile sistem, yüksek frekans değerlerinde modal analizin temel varsayımlarının dışına çıkmaktadır. Ayrıca maket köprüünün kütlelerinin az olmasının mesnetlerden kaynaklanan sapmaların gerçek boyutlarda bir yapıya göre daha

etkin olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Bunlara bağlı olarak modal analiz ve sonlu elemanlar analizi sonuçları yüksek frekanslarda sapmalar göstermiştir. Buna rağmen sistemin modal şekilleri her iki analiz sonucunda benzer bir biçimde elde edilebilmiştir. Sapmaların oldukça yüksek olduğu bu çalışmada dahi ilk iki mod büyük başarı ile kestirilmiştir. Buradan modal analiz tekniğinin temel varsayımlardan olan sapmanın sınırlı olduğu sistemlerde sistem tanılamasını başarılı bir şekilde yapılabileceği sonucunu çıkarılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK-MAG 104I107 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

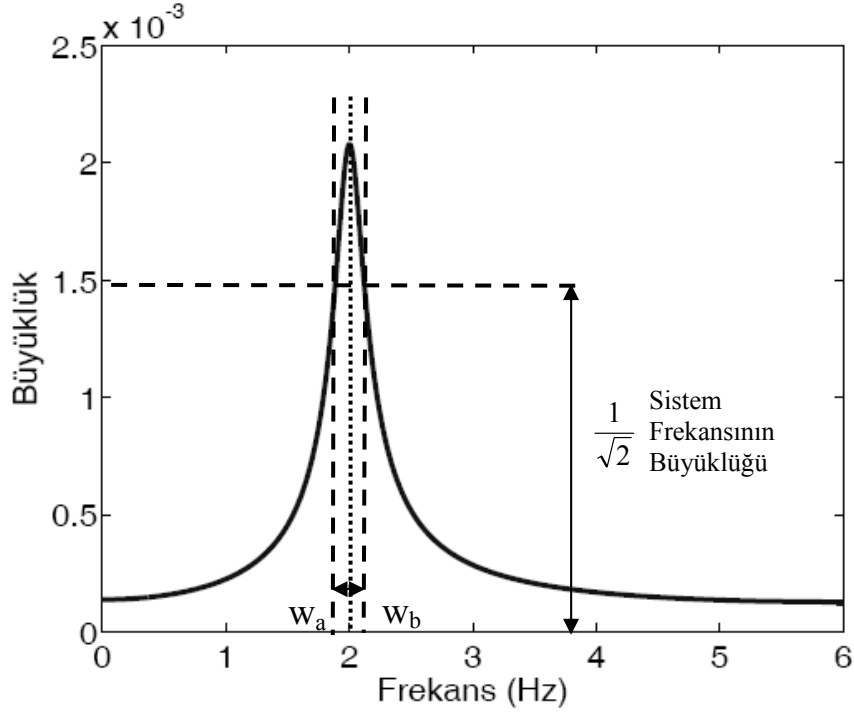
- [1] Liu, S.C., and Yao, J.T P. “Structural identification concept”, *J. Of Struct. Div.*, ASCE, 104(12)1845-1858
- [2] Allemang, R. J., 1999 Vibrations: Analytical and Experimental Modal Analysis, UC-SDRL-CN-20-263-662, University of Cincinnati
- [3] Allemang, R. J., 1999 Vibrations: Experimental Modal Analysis, UC-SDRL-CN-20-263-663/664, University of Cincinnati
- [4] Catbas, F.N., Aktan, A.E , “Condition and damage assessment: Issues and some promising indices”, *Journal of Structural Engineering*, v 128, n 8, August, 2002, p 1026-1036
- [5] Ewins D.J., 2000, Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd., 2nd Edition, ISBN 0-86380-218-4
- [6] Aktan, E., Farhey, D. N., Helmicki, A. J., Brown, D. L., Hunt, V. J., Lee, K., Levi, A., “Structural Identification for Condition Assessment”, *Journal of Structural Engineering*, v 123, n 12, Dec., 1997, p 1674-1684
- [7] Alampalli S., Fu G., Dillon E. W., “Signal versus noise in damage detection by experimental modal analysis”, *Journal of Structural Engineering*, v 123, n 2, Feb, 1997, p 237-245
- [8] Catbas, F. N, Brown, D.L.; Aktan, A.E., “Parameter estimation for multiple-input multiple-output modal analysis of large structures ”, *Journal of Structural Engineering*, v 130, n 8, 2004, p 921-929
- [9] Catbas, F.N., Brown, D.L.; Aktan, A.E., “Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: Case studies and demonstrations on large structures”, *Journal of Structural Engineering*, v 132, n 11, 2006, p 1699-1712
- [10] Farrar C.R., Doebling S.W., “Structural health monitoring at los alamos national laboratory”, IEE Colloquium (Digest), n 34, Apr 23, 1999, p 3-6

Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları

- [11] Maeck J., De Roeck G., “Damage assessment using vibration analysis on the Z24-bridge”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, v 17, n 1, January, 2003, p 133-142
- [12] Chen, C., Yan, D., “Dynamic analysis and modal test of long-span cable-stayed bridge based on ambient excitation”, *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, v 14, n 1, January, 2007, p 135-139
- [13] Clemente P., Marulo F., Lecce L., Bifulco A., “Experimental modal analysis of the Garigliano cable-stayed bridge”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v 17, n 7-8, Oct-Dec, 1998, p 485-493
- [14] Farrar, C.R., Duffey T.A., “Bridge modal properties using simplified finite element analysis”, *Journal of Bridge Engineering*, v 3, n 1, Feb, 1998, p 38-46
- [15] Farrar C.R., Jauregui D.A., “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I Experiment”, *Smart Materials and Structures*, v 7, n 5, Oct, 1998, p 704-719
- [16] Farrar Charles R., Jauregui D.A., “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study”, *Smart Materials and Structures*, v 7, n 5, Oct, 1998, p 720-731
- [17] Ren W., Peng, X., “Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests”, *Computers and Structures*, v 83, n 8-9, March, 2005, p 536-550
- [18] Xu Y.L., Ko J.M.; Yu Z. , “Modal analysis of tower-cable system of Tsing Ma long suspension bridge”, *Engineering Structures*, v 19, n 10, Oct, 1997, p 857-867
- [19] Chopra, A.K., 1995, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, ISBN 0-13-855214-2

EK 1: Yarı Güç Bandı Genişliği Kullanılarak Sönüm Oranı Tespiti

Sistem frekanslarının birbirinden göreceli olarak uzak olduğu ve düşük sönüm oranlarına sahip sistemlerde sönüm oranları tek serbestlik dereceli sistemlerin sönüm oranlarını bulmakta kullanılan yarı güç bandı genişliği yöntemi olarak tespit edilebilir.



Şekil E.1 Tek serbestlik dereceli bir sistem için Frekans Yanıt Fonksiyonu örneği

Bu amaçla sistemin frekans yanıt fonksiyonunun (FYF) sistem frekansına karşılık gelen zirve büyüklüğü ($1/\sqrt{2}$) ile çarpılarak bir büyüklük değeri elde edilir, Şekil E.1, ve sistem FYF'si üzerinde bu büyüklüğe karşılık gelen frekans değerleri saptanır, w_a ve w_b . Sönüm oranı

$$\zeta = \frac{w_b - w_a}{2w_n} \quad (E.1)$$

formülü ile elde edilir. Burada ζ sönüm oranına, w_n ise sistemin frekansına karşılık gelmektedir. Yukarıdaki formülasyonun tam türetimi muhtelif kaynaklarda bulunabilir [2, 19].