



XVII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
5-9 Eylül 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ

BETONARME KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN YAPISAL TİTREŞİMLERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE ELDE EDİLMESİ

Ahmet Can Altunışık* ve Alemdar Bayraktar†
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Barış Sevim‡
Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane

ÖZET

Bu çalışmada, betonarme karayolu köprülerinin yapısal titreşimlerinin deneysel yöntemlerle elde edilerek dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla örnek olarak, Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri'nin taşıyıcı sistemleri örnek olarak seçilmiş ve sabit en kesitli üstyapı taşıyıcı sisteme sahip bir karayolu köprü modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Laboratuvar ortamında inşa edilen köprü, kenar açıklıkları 1.5'şer m ve orta açıklığı 3 m olmak üzere toplam üç açıklıklı ve 6 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Köprü'nün yapısal titreşimlerini elde etmek amacıyla Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bu titreşimler frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemi kullanılarak işlenmiş, dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

GİRİŞ

Betonarme karayolu köprülerinin yüksek yapım maliyetleri ve buldukları bölgelerdeki lojistik önemleri dikkate alındığında, bu tür mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Özellikle, Ülkemizin aktif bir deprem kuşağı üzerinde bulunması, karayolu köprülerinin projelendirilmesinde ve uygulanmasında depremin önemli bir dinamik parametre olarak dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Çünkü bu tür köprülerin depremlerden zarar görmesi, can ve mal kaybının yanında şehirlerarası ulaşım bağlantısının da yok olması anlamına gelmektedir [1].

Mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışları, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir. Günümüzde dinamik karakteristikler, yapıların proje verileri dikkate alınarak belirlenen eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal (serbest titreşim) analizleri sonucunda analitik olarak belirlenmektedir. Fakat yapı dinamik karakteristiklerinin analitik yöntemlerin yanında deneysel yöntemlerle de belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulandığından elde edilen dinamik karakteristiklerde yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır [2].

Yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak belirlenmesinde Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapı üzerinde sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen modal hareket noktalarına hassas ivmeölçerler yerleştirmektedir. İvmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmakta ve güncel

* Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: ahmetcan8284@hotmail.com

† Prof. Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: alemdar@ktu.edu.tr

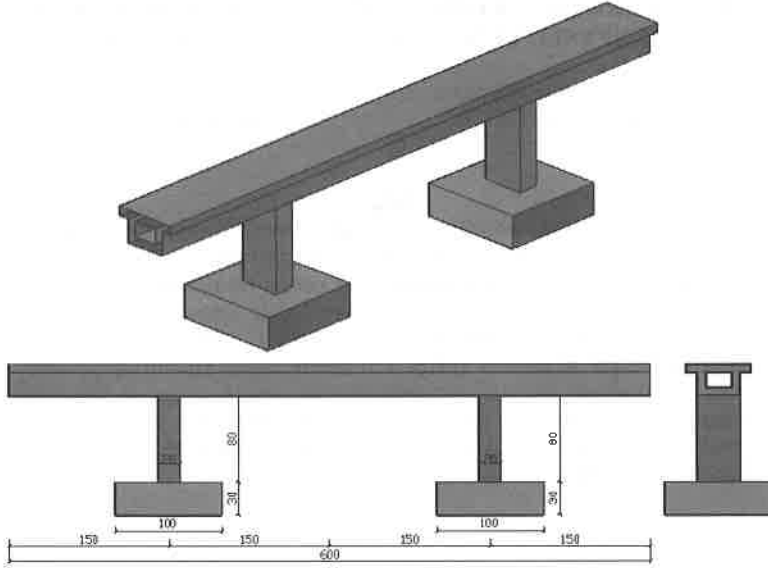
‡ Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: bsevim18@hotmail.com

yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, Zorlanmış Titreşim Yöntemi ve Çevresel Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [3].

BETONARME KÖPRÜ MODELİ

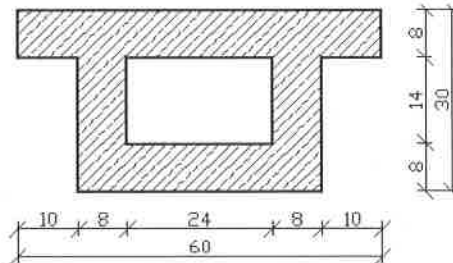
Model Köprünün Geometrik Özellikleri ve Boyutlandırılması

Laboratuar ortamında inşa edilen model köprü, kenar açıklıkları 1.5'şer m ve orta açıklığı 3 m olmak üzere toplam üç açıklıklı ve 6 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Model köprü başlıca temel, ayak ve tabliyeden oluşmaktadır. Köprünün zemine ankastre olarak bağlanması amacıyla temeller $1 \times 1 \text{ m}^2$ alanında ve 30 cm yüksekliğinde dikkate alınmıştır. Ayaklar $20 \times 40 \text{ cm}^2$ en kesitinde ve 80 cm yüksekliğindedir. Kutu kesitli tabliye 6 m uzunluğunda olup 30 cm kesit yüksekliğine sahiptir. Model köprünün iki ve üç boyutlu görünüşleri Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1: Model Köprünün Üç ve İki Boyutlu Görünüşleri (Boyutlar cm Cinsindedir)

Model köprünün tabliyesi tek hücreli kutu kesit taşıyıcı sisteme sahiptir. Kutu kesit genişliği tabliye üzerinde 60 cm ve ayaklar üzerinde 40 cm'dir. Kutu kesit yüksekliği tabliye boyunca sabit olup 30 cm'dir. Tabliye üst ve alt tabla kalınlığı ile yan duvar cidar kalınlıkları tabliye boyunca sabit olup 8 cm'dir (Şekil 2).

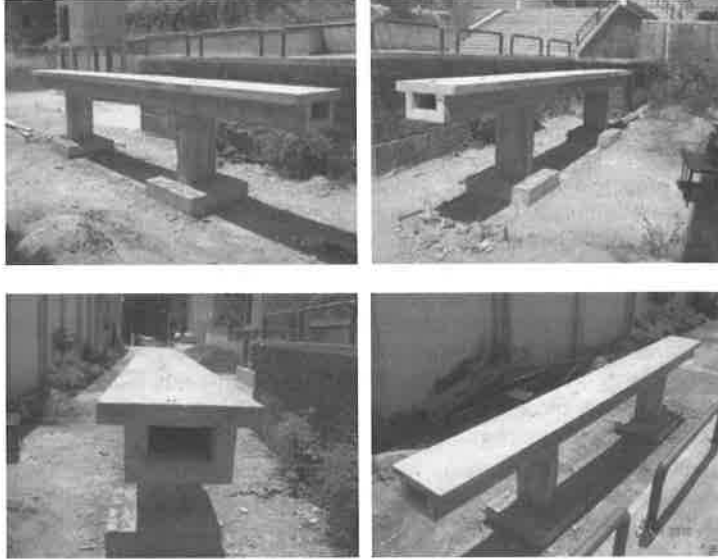


Şekil 2: Sabit Kesitli Tabliye Üst Yapısı (Boyutlar cm Cinsindedir)

Model Köprünün İnşasında Kullanılan Malzeme Özellikleri

Model köprünün inşası için kullanılan betonun bir kısmı laboratuar ortamında bir kısmı ise hazır beton santralinde üretilmiştir. Temeller, ayaklar ve kutu kesit alt tablası ile yan cidarları laboratuar ortamında üretilen beton ile kutu kesit üst tablası ise hazır beton santralinde üretilen beton ile inşa edilmiştir. Model köprünün inşasında C30 betonu kullanılması amaçlanmıştır. İstenilen beton

sınıfını elde etmek amacıyla hesaplanan malzeme karışımları uygun olarak seçilmiştir. Temeller, kolonlar ve tabliyede donatı olarak değişik çapta S420 çeliği kullanılmıştır. Model köprünün inşası tamamlandıktan sonra bitmiş haline ait bazı fotoğraflar ise Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3: Model Köprünün Bitmiş Haline Ait Bazı Fotoğraflar

DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE MODEL KÖPRÜNÜN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

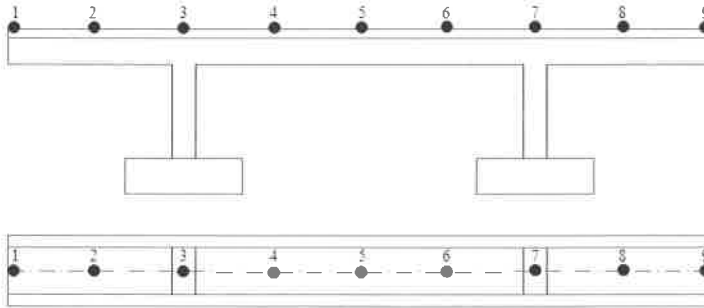
Model köprünün deneysel ölçümlerinde B&K 4507 tipi tek eksenli ve B&K 4506 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirilmiş ve PULSE [4] yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA [5] yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve köprünün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Model köprünün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprüye altı farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Çevresel titreşim testleri tabliye üst tablasının beton dökümünden (köprü inşasının bitişi) 30 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler sırasında Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Laboratuarda inşa edilen model köprünün deneysel ölçümlerinde ortamda rüzgar, taşıt, deprem vs., gibi herhangi bir çevresel etki olmadığından köprüyü titreştirmek için APS 400 tipi titreştirici ve B&K 8210 tipi darbe çekiçleri kullanılmıştır. Uygulamada zorlanmış titreşim testi için kullanılan bu sarsıcılar model köprünün çevresel titreşim testlerinde veri toplama sistemine tanıtılmamış, dolayısıyla değeri ölçülmeyen doğal bir etki gibi dikkate alınmıştır.

Deneysel ölçümlerin köprünün hangi noktalarından alınacağı dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) doğru olarak belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle köprünün muhtemel hareket noktaları analitik olarak belirlenmiş ve karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için altı farklı ölçüm testi kurulmuştur. Analitik olarak elde edilen mod şekilleri dikkate alındığında yatay doğrultuda her iki yönde (boyuna ve enine) ve düşey doğrultuda modların elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle deneysel ölçümler sırasında kurulan ölçüm testlerinde her üç yöndeki modlarında elde edilmesi amaçlanmıştır. Köprü kutu kesit boşluğunun küçük olması ve köprü uzunluğu boyunca kutu kesit içerisine uzanılmaması nedeniyle deneysel ölçümler tabliye üzerinden alınmıştır. Bu ölçüm testleri:

- **Birinci Ölçüm Testi:** Model köprünün düşey doğrultudaki modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca düşey doğrultuda yerleştirilmiştir.
- **İkinci Ölçüm Testi:** Model köprünün yatay doğrultudaki enine modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü enine doğrultusunda) yerleştirilmiştir.
- **Üçüncü Ölçüm Testi:** Model köprünün yatay doğrultudaki uzama modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü uzunluğu doğrultusunda) yerleştirilmiştir.
- **Dördüncü Ölçüm Testi:** İlk üç ölçüm testi ile elde edilen modların tek ölçüm ile elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir. Ölçüm alınması istenilen nokta sayısı veri toplama ünitesindeki kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümler gerçekleştirilmiştir.
- **Beşinci Ölçüm Testi:** Beşinci ölçümde, bütün doğrultudaki modların elde edilebilmesi amacıyla üç eksenli ivmeölçerler yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir. Ölçüm alınması istenilen nokta sayısı veri toplama ünitesindeki kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümler gerçekleştirilmiştir.
- **Altıncı Ölçüm Testi:** Altıncı ölçümde, sadece iki ayak arasında kalan orta açıklık üç eksenli ivmeölçer ile birlikte ölçülmüş, yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultudaki modların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Köprünün iki boyutlu görünüşleri üzerinde ivmeölçerlerin yerleşim planı Şekil 4'te, ölçümlere ait detaylı bilgiler ise Tablo 1'de verilmektedir. Model köprüde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 4: Model Köprünün Çevresel Titreşim Testlerinde Kullanılan İvmeölçerlerin Yerleşim Planı

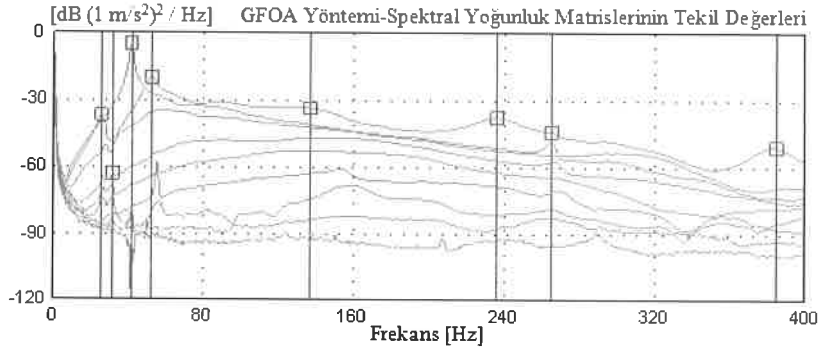
Tablo 1: Model Köprünün Deneysel Ölçüm Testlerine Ait Genel Bilgiler

Ölçüm Testi	Nokta	İvmeölçer			Frekans Aralığı	Toplam Süre	Adım
		Düşey	Doğrultu Enine	Boyuna			
1	1-9	✓	-	-	0-400Hz	5 dak	1
2	1-9	-	✓	-	0-400Hz	5 dak	1
3	1-9	-	-	✓	0-400Hz	5 dak	1
4	1-9	-	✓	-	0-400Hz	15 dak	3
	1-9	✓	-	-			
5	1-3	✓	✓	✓	0-400Hz	15 dak	3
	4-6	✓	✓	✓			
	7-9	✓	✓	✓			
6	4-6	✓	✓	✓	0-400Hz	5 dak	1

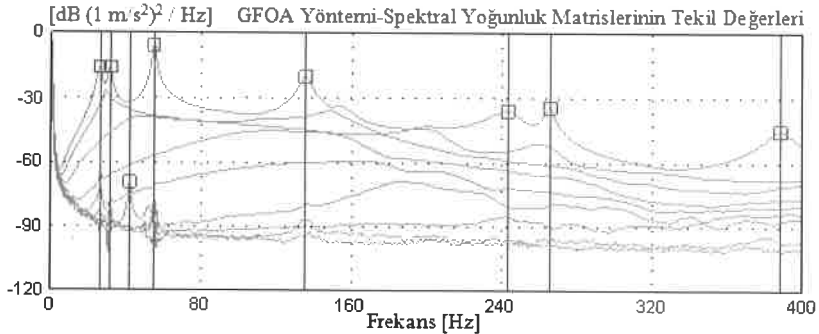


Şekil 5: Model Köprüde Gerçekleştirilen Çevresel Titreşim Testlerine Ait Bazı Fotoğraflar

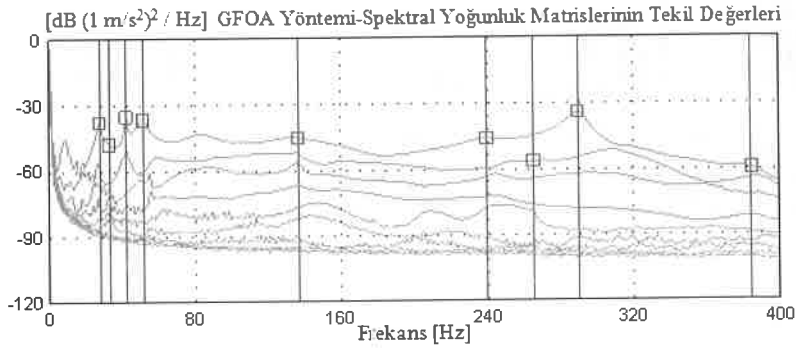
Model köprüye uygulanan altı farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 6 incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2 ve 3'te verilmektedir. Tablo 2 ve 3 incelendiğinde, frekans değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu ve ilk sekiz frekansın 25.32-297.0 Hz arasında elde edildiği görülmektedir. Sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.239-5.715 arasında değişkenlik göstermektedir.



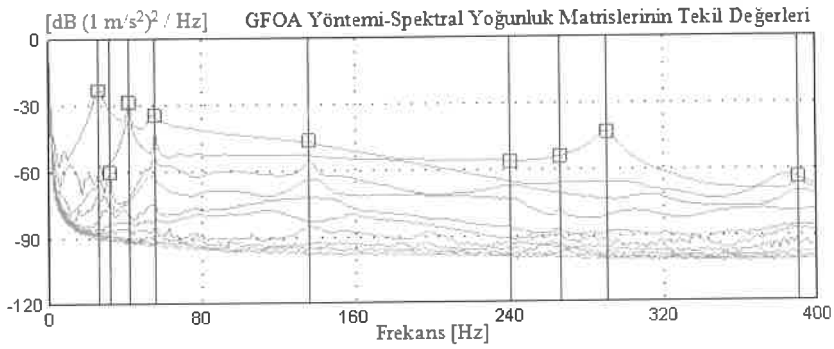
a). Birinci Ölçüm Testi



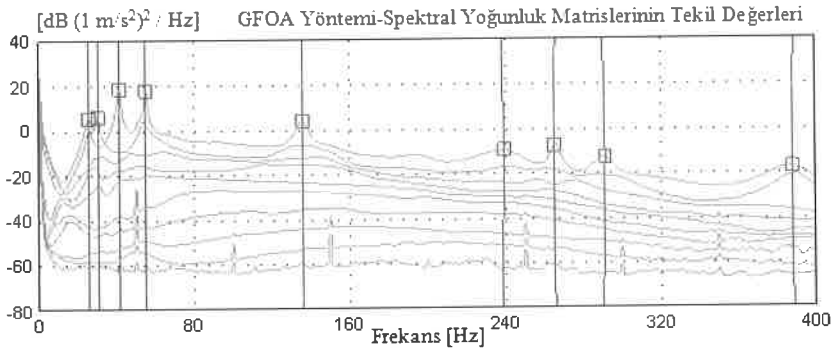
b). İkinci Ölçüm Testi



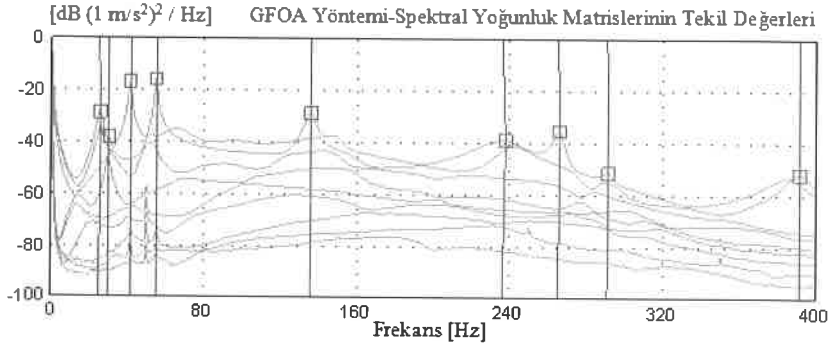
c). Üçüncü Ölçüm Testi



d). Dördüncü Ölçüm Testi



e). Beşinci Ölçüm Testi



f). Altıncı Ölçüm Testi

Şekil 6: Model Köprünün Deneysel Ölçümlerinden Elde Edilen Spektral Yoğunluk Matrisleri

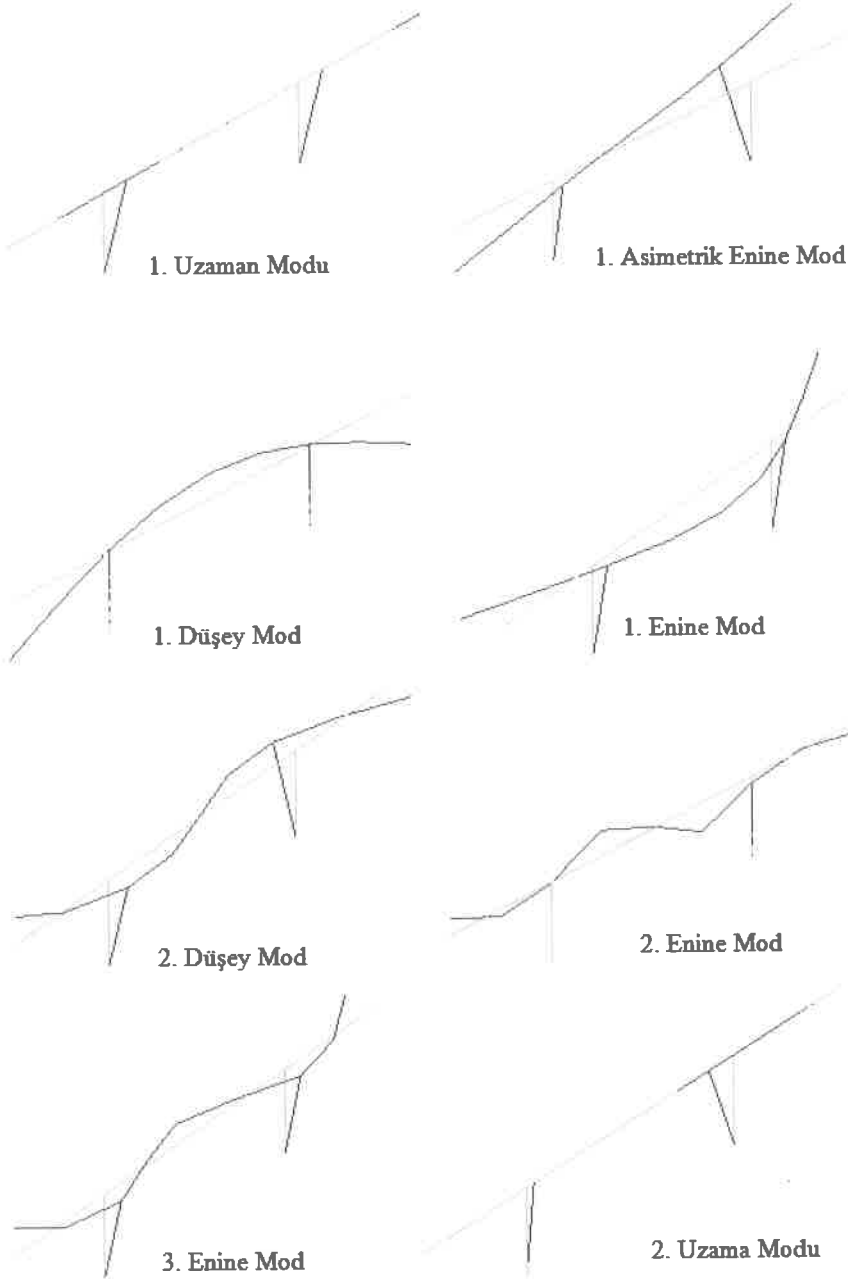
Tablo 2: Model Köprünün GFOA Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen İlk Sekiz Doğal Frekans Değerleri

Mod Sayısı	Deneysel Modal Analiz-GFOA Yöntemi-Doğal Frekanslar					
	1. Ölçüm Testi (Hz)	2. Ölçüm Testi (Hz)	3. Ölçüm Testi (Hz)	4. Ölçüm Testi (Hz)	5. Ölçüm Testi (Hz)	6. Ölçüm Testi (Hz)
1	25.32	25.84	27.30	25.79	25.34	25.36
2	31.51	31.13	32.45	30.50	30.17	30.44
3	41.47	41.90	42.25	41.50	41.40	41.46
4	52.18	54.91	51.37	54.34	55.01	55.09
5	139.0	135.4	133.9	138.0	135.5	135.8
6	235.0	241.7	240.0	240.5	238.1	236.2
7	264.8	265.1	265.0	266.0	265.6	265.4
8	295.5	297.0	288.8	291.0	290.4	290.9

Tablo 3: Model Köprünün GFOA Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen İlk Sekiz Sönüm Oranı Değerleri

Mod Sayısı	Deneysel Modal Analiz-GFOA Yöntemi-Sönüm Oranları					
	1. Ölçüm Testi (%)	2. Ölçüm Testi (%)	3. Ölçüm Testi (%)	4. Ölçüm Testi (%)	5. Ölçüm Testi (%)	6. Ölçüm Testi (%)
1	2.488	4.008	4.263	4.659	2.363	2.295
2	1.402	2.987	2.532	3.720	3.514	2.392
3	1.472	0.941	1.368	1.159	1.406	1.392
4	5.631	1.004	1.265	1.695	1.043	0.963
5	2.315	2.184	2.302	0.239	1.996	1.721
6	5.715	2.423	2.693	2.620	3.232	1.855
7	0.492	0.673	0.783	0.944	0.761	0.813
8	1.420	1.112	1.856	2.661	1.253	0.626

Model köprüye uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisinde. Bu nedenle sadece bir ölçüme ait mod şekilleri Şekil 7’de verilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde, birinci ve sekizinci modların uzama; ikinci, dördüncü, altıncı ve yedinci modların enine; üçüncü ve beşinci modların ise düşey mod olduğu görülmektedir.



Şekil 7: Model Köprü'nün Deneysel Ölçümlerinden GFOA Yöntemi İle Elde Edilen Mod Şekilleri

Model köprü üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçüm düzenekleri ve ivmeölçerlerin yerleşim planları incelendiğinde ilk üç ölçümün sadece tek doğrultuda sinyal aldığı görülmektedir. Altıncı ölçüm ise sadece iki ayak arasında kalan orta açıklık davranışının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle köprünün bütün olarak yapısal davranışının elde edilmesinde ve elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde dördüncü ve beşinci ölçümler oldukça önem kazanmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, betonarme karayolu köprülerinin yapısal titreşimlerinin deneysel yöntemlerle elde edilerek dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, sabit en kesitli üstyapı taşıyıcı sisteme sahip bir karayolu köprü modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Köprünün yapısal titreşimlerini elde etmek amacıyla Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bu titreşimler frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma yöntemi kullanılarak işlenmiş, dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Çalışma elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilmektedir;

- ✓ Model köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakındır. Bu durum deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.
- ✓ Model köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucunda elde edilen ilk sekiz doğal frekans değerleri 25.32-297.0 Hz arasında değişmektedir.
- ✓ Model köprünün deneysel ölçüm testlerinden elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisinde. Mod şekilleri başlıca uzama, düşey ve enine modlardır.
- ✓ Model köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk sekiz sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.239-5.715 arasında değişkenlik göstermektedir.

Kaynaklar

- [1] Altunışık, A.C., *Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, Kasım 2010.
- [2] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., *Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi*, Yapı Dünyası Dergisi, 150, 44-57, 2008.
- [3] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, A., *Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi*, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700, 2009.
- [4] PULSE, *Analyzers and Solutions*, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark, 2006.
- [5] OMA, *Operational Modal Analysis*, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.