

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

Alemdar BAYRAKTAR*
Ahmet Can ALTUNİŞİK**
Barış SEVİM***
Temel TÜRKER****

ÖZ

Bu çalışmada, Malatya-Elazığ karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü'nün analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması ve köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuş ve dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak köprünün dinamik karakteristikleri deneysel ölçümlere dayalı olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümler sırasında titreşim hareketi olarak taşıt yükünden yararlanılmıştır. Ölçüm verilerinin karşılaştırılabilmesi için hem kutu kesit içerisinde hem de tabliye üzerinden ölçümler alınmıştır. Ölçüm süresi, frekans aralığı ve etkin mod sayısı daha önce yapılmış benzer ölçümlerden faydalanılarak belirlenmiştir. Ölçümlerin değerlendirilip dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde frekans ortamında Piklerin Seçilmesi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonunda, analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış, malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik karakteristik, Kömürhan köprüsü, Operasyonel modal analiz

ABSTRACT

Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge

In this paper, it is aimed to compare the analytically and experimentally identified dynamic characteristics and obtain updated finite element model of Kömürhan Highway bridge located on Elazığ-Malatya highway. Analytical model of the bridge is constituted using SAP2000 software and dynamic characteristics are determined. The experimental

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21.07.2008 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Karadeniz Teknik Üni., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - alemdar@ktu.edu.tr

** Karadeniz Teknik Üni., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - ahmetcan8284@hotmail.com

*** Karadeniz Teknik Üni., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - bsevim18@hotmail.com

**** Karadeniz Teknik Üni., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - temelturker@hotmail.com

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

measurements are carried out by Operational Modal Analysis under traffic loads and dynamic characteristics are obtained experimentally. Vibration data are gathered from both box girder and bridge deck. Measurement time, frequency span and effective mode number are determined by consider similar studies and literature. Peak Picking method in the frequency domain is used for the output-only modal identification. At the end of the study, analytical and experimental dynamic characteristic are compared with each other and finite element model of the bridge is updated by changing some uncertainties parameters such as material properties and boundary conditions.

Keywords: Dynamic characteristic, Kömürhan Bridge, Operational modal analysis

1. GİRİŞ

Kömürhan Köprüsü Elazığ-Malatya karayolu'nun Fırat Nehri ile kesiştiği nokta olan 51. kilometresinde geçişi sağlayan köprüdür. Fırat'ın bu kesimindeki tek köprü olduğu için de lojistik önemi büyüktür. Köprü'nün yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanılmış ve 08.04.1986 tarihinde tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Kömürhan köprüsü yapılmadan önce Elazığ-Malatya illeri arasındaki ulaşım bağlantısı çeşitli yollarla yapılmaktaydı. 1930 yıllara kadar ulaşım sadece sal ve kayıklarla, daha sonra ise 1. Dünya savaşı yıllarında yapılmış olan ahşap bir köprüyle sağlanmıştır. Fakat suların yükselmesi ile birlikte ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşım tekrar dönülmüştür. Bu nedenle Kömürhan Boğaz'ında betonarme bir köprü yapılması kararlaştırılmıştır. 1 Ağustos 1930 tarihinde başlayan betonarme köprü inşaatı 3 Nisan 1932 tarihinde tamamlanmıştır. Köprü, esasında İsmet Paşa Köprüsü olarak isimlendirilmesine rağmen, Kömürhan Köprüsü olarak da anılmaktadır. Kömürhan Köprüsü 109.60m orta açıklık uzunluğuyla kemer tipinde yapıldığı dönem itibariyle dünyanın en büyük altıncı betonarme köprüsü olma özelliğini kazanmıştır. Uzun yıllar bölgeye hizmet eden bu ilk köprü'nün, Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında inşaa edilmiş olan Karakaya Baraj Gölünün suları altında kalacağı öngörüldüğü için, boğaza yeni bir köprü'nün yapılması gerekmiştir. Bu amaçla köprü'nün hemen yanına 1983–1986 yılları arasında bir yenisi inşaa edilmiştir. Bu yeni yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile imal edilmiş köprüsü olma özelliğini taşımaktadır. Şekil 1'de yeni ve eski Kömürhan köprüleri gözükmektedir. Karakaya Barajı yapıldıktan sonra orijinal Kömürhan köprüsü suyun altında kalmıştır.



a) İlk betonarme kemer köprü (1930–1932)

b) Mevcut kutu kesitli köprü (1983–1986)

Şekil 1. Kömürhan köprüsünün ilk ve mevcut durumuna ait bazı görüşler

Kömürhan köprüsü gibi önemli mühendislik yapılarının, mevcut davranışını yansıtan ve dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu dinamik karakteristikler genellikle yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması ve analitik çözümlenmeleri ile elde edilmektedirler. Fakat analizler sırasında dikkate alınan ve yapının tasarımı sırasında kabul edilen malzeme özellikleri, sınır şartları ve eleman boyutları gibi bazı parametreler yapının inşaatı sırasında gerçekleşen işçilik hataları, yapının maruz kaldığı farklı yükleme sonucunda oluşan çatlamlar, yorulmalar ve sıcaklık değişimleri gibi nedenlerden dolayı değişime uğramış olabilmektedir. Bu nedenle analitik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel ölçüm metotlarına da bağlı olarak belirlenmesi ve sonuçların birbirleriyle karşılaştırılarak yapının gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelinin oluşturulması gerekmektedir.

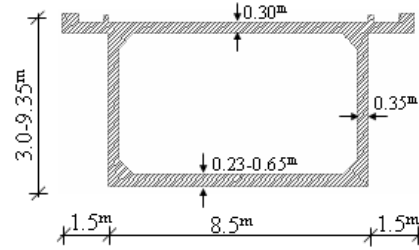
Deneysel ölçüm metotlarına bağlı mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel Modal Analiz yönteminde yapı bilinen bir etkiyle titreştirilip (sarsma tablası, darbe çekici ve shaker), yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmektedir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapı bilinmeyen çevresel etkiler ile titreştirilmekte (rüzgâr, insan hareketi, taşıt yükü) ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmektedir. Uygulama basitliği, ölçüm sırasında trafik akışının kesilmemesi, ucuz maliyet gibi sebeplerden dolayı Operasyonel Modal Analiz yöntemi köprülerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz yönteminin asma köprüler, kablolu köprüler, karayolu köprüleri, tarihi yığma köprüler, yaya üst geçitleri ve demiryolu köprüleri üzerindeki birçok başarılı uygulaması literatürde mevcuttur. Bu çalışmalarda, Ren ve diğ. [1], Ohio'da bulunan ve 321.9m ana açıklığa sahip Roebling asma köprüsünün titreşim testlerini gerçekleştirmişler ve köprünün dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir. Ren ve diğ. [2], Çin'de bulunan Qingzhou kablolu köprüsünün analitik ve deneysel modal analizlerini gerçekleştirmişler ve elde ettikleri değerleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Qingzhou köprüsü 605m ana açıklığı ile tamamlandığı sırada dünyadaki en uzun açıklıklı kompozit tabliyeli köprüsüdür. Watson Wash and Vincent Thomas karayolu köprülerinin titreşim testlerinin yapılması ve hasar seviyelerinin belirlenmesi Guan'sın doktora tezinde [3] detaylı olarak yer almaktadır. Bayraktar ve diğ. [4], Trabzon'da bulunan ve yaklaşık 200 yıllık tarihli kemer taşıyıcı sisteme sahip Şinik köprüsünün dinamik karakteristiklerini deneysel ölçüm metotlarına bağlı olarak belirlemişlerdir. Bayraktar ve diğ. [5], Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak Trabzon'da bulunan Pelitli yaya üst geçidinin gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Köprü 35m açıklıklı olup, yoğun trafik akışının bulunduğu bir bölgede yer almaktadır. Kemer tipli yay üst geçidinin tabliyesi kompozit malzemeye sahiptir. Xian ve diğ. [6], yüksek hızlı demiryolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmaların dışında literatürde birçok çalışma da mevcuttur. Fakat, önerilmeli ve değişken kutu kesitli betonarme karayolu köprülerinin analitik operasyonel modal analizi hakkında yeterince çalışma mevcut değildir. Bu nedenle, bu çalışmada Türkiye'de bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle ilk olarak inşa edilmiş olan Kömürhan köprüsünün dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi ve köprünün mevcut durumu yansıtan gerçek sonlu eleman modelinin oluşturulması amaçlanmıştır.

2. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜNÜN TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI

2.1 Köprü Tabliyesi

Kömürhan köprüsünün tabliyesi 287m uzunluğunda ve 11.5m genişliğindedir. Tabliye üzerinde trafik biri gidiş ve biride geliş olmak üzere iki şeritten sürdürülmektedir. Köprünün üst yapısı dengeli konsol ve öngerilmeli kutu kesit sistemiyle inşa edilmiştir. Mevcut dengenin muhafazası, orta ayaklarda her iki tarafa doğru aynı zamanda inşa edilen segmentlerin yan yana getirilip, öngerilme ile bağlanmaları sonucu yapılmıştır. Her bir segment donatılı kutu kesite sahiptir. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayak üzerinde 9.35m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda 3.50m' ye, ortadaki genişleme derzinde ise 3.00m' ye düşmektedir. Değişken kutu kesitin şematik olarak gösterimi Şekil 3 'de verilmektedir.



Şekil 2. Değişken kesitli tabliye üst yapısı

2.2 Kenar ve Orta Ayaklar

Kömürhan köprüsünün, Elazığ taraf kenar ayağı 60 adet 25m boyunda, Malatya tarafı kenar ayağı ise 60 adet 40 m boyunda Ø 36'lık kaya ankraj çubukları ile kayaya ankre edilmiştir. Ayrıca, köprü üstyapısını kenar ayak perdesine bağlamak amacıyla her bir ayakta 40 adet olmak üzere, yağ dolu polietilen boru içinden geçirilen, S420 kalitesinde Ø50 çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Her biri 59,50m yüksekliğinde olan orta ayaklar 3 gözlü değişken kesitten oluşmaktadırlar. Kesit genişliği alt tarafta 14.40 m olmakla beraber, lineer şekilde azalarak üstte 8.50m' ye düşmektedir. Hidrostatik dengenin korunması için ayak çeper ve göz duvarlarında su geçişine imkân veren boşluklar bırakılmıştır.

2.3 Orta Açıklık Mafsal Düzenegi

Köprünün orta açıklığında, üstyapı orta açıklık konsollarını birbirine bağlamak amacı ile kutu kesitin içinde çelik kirişlerden oluşan ve moment aktarmayan mafsal şeklinde tasarılan bir düzenek oluşturulmuştur. Bu şekilde, orta açıklıktaki konsol uçları serbest bırakılmış ve ısı değişimi sebebiyle üstyapıda oluşacak genişlemelere izin verilmiştir. Ayrıca, iki uç arasında bir bağlantı oluşturularak düşey yükler altında üstyapının ortak hareket etmesini sağlanmıştır. Çelik kirişler Elazığ tarafında üstte ve altta ikişer adet sabit mesnetle, Malatya tarafında ise yine üstte ve altta birer adet düşey yük kapasiteli, enine ve boyuna yönde kayıcı mesnet ile üstyapıya bağlanmıştır. Bu şekilde Elazığ tarafında çelik

kirişin dönme ve hareket serbestlikleri engellenerek tam ankastre bir bağlantı oluşturulmuştur. Malatya tarafındaki mesnetlerde ise dönmelere ve yatay yöndeki hareketlere izin verilmiş ve bu kısmın mafsal olarak hareket etmesi sağlamıştır.

3. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜNÜN SONLU ELEMAN MODELİ

Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 [7] programında, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak iki ve üç boyutlu olarak oluşturulmuştur.

- Köprü üstyapısı ve ayakları çubuk elemanlardan oluşturulmuştur. İki boyutlu modelde değişken yükseklikli üstyapı segmentlerinin ve ayakların her biri ortalama kesit özellikleri dikkate alınarak modele katılırken, üç boyutlu modellemede ise değişken kesitli elemanlar direk olarak tanımlanmıştır.
- İki boyutlu modelde tüm elemanlar kendi geometrik merkezlerinden geçirilmiş ve ara bağlantılar rijit çubuk elemanlar yardımı ile sağlanmıştır. Üç boyutlu modelde ise direk değişken kesitli eleman tipleri kullanılmıştır. Her bir orta ayak 50 adet sonlu elemana bölünmüş olup, üstyapı segmentleri ise 0.5m uzunluğunda parçalara ayrılmıştır.
- Ardgerme kabloları moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak simüle edilmiştir ve üstyapı segment uçlarına proje verilerinde belirtilen düşey lokasyonlarında bağlanmıştır. Ardgerme yükleri birim uzamalar cinsinden etki ettirilmiştir.
- Kenar ayak mesnetleri yüksek rijitliklere sahip yaylarla ve mesnetlerle tanımlanmıştır.
- Orta açıklık genleşme derzindeki mafsal düzeneği yay eleman ile simüle edilmiştir. Yay elemanı boyuna yönde serbest olup, enine ve düşey hareketi yüksek rijitliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir.

Köprünün modellenmesi sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Yukarıda belirtilen modelleme kriterleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri Şekil 3'de verilmektedir.

Tablo 1. Köprünün modellenmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri

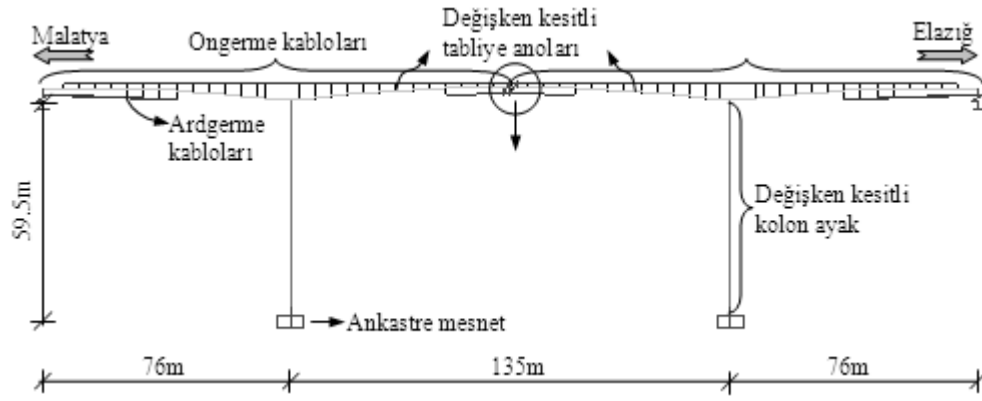
Malzeme	Elastisite Modülü (N/m²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)
Tabliye	4.25E10	0.2	2500
Ayaklar	4.25E10	0.2	2500
Kablolar	1.95E11	0	0
Rijit Elemanlar	1.00E11	0.3	0

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

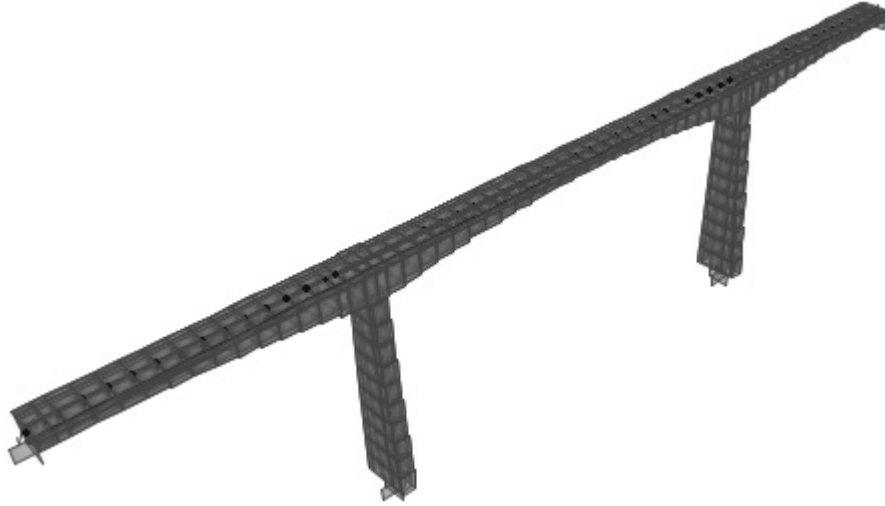
Köprünün iki ve üç boyutlu modal analizleri sırasında dikkate alınan başlıca yük çeşitleri;

- **Ölü Yük:** Tüm elemanların ölü yükleridir ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- **Eklenmiş Kütle:** Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ölü yüklerdir. 8-10cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 31kN/m olarak etki ettirilmiştir.

Kömürhan köprüsünün SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen frekans değerleri ve mod şekillere Şekil 4'de verilmektedir.

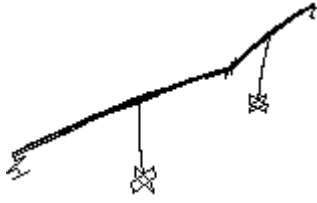


a) İki boyutlu sonlu eleman modeli



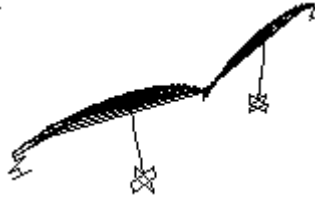
b) Üç boyutlu sonlu eleman modeli

Şekil 3. Kömürhan köprüsünün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri.



$$f_1=0.790\text{Hz}$$

1. Enine Mod Şekli



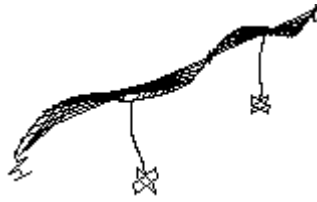
$$f_2=1.106\text{Hz}$$

1. Düşey Mod Şekli



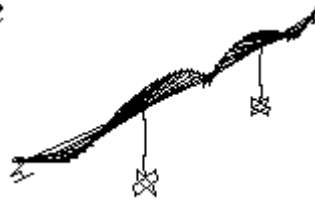
$$f_3=1.845\text{Hz}$$

2. Enine Mod Şekli



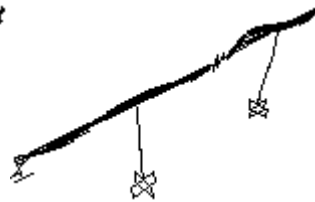
$$f_4=2.315\text{Hz}$$

2. Düşey Mod Şekli



$$f_5=2.685\text{Hz}$$

3. Düşey Mod Şekli



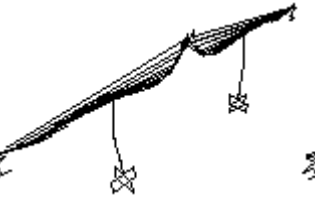
$$f_6=3.346\text{Hz}$$

1. Boyuna Mod Şekli



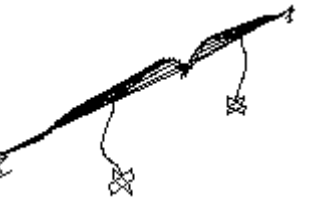
$$f_7=3.588\text{Hz}$$

2. Boyuna Mod Şekli



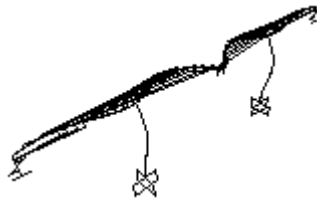
$$f_8=4.847\text{Hz}$$

4. Düşey Mod Şekli



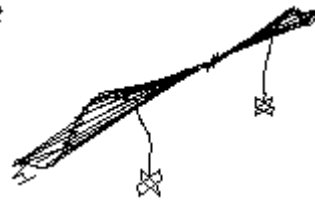
$$f_9=6.398\text{Hz}$$

5. Düşey Mod Şekli



$$f_{10}=7.880\text{Hz}$$

3. Enine Mod Şekli



$$f_{11}=8.168\text{Hz}$$

6. Düşey Mod Şekli



$$f_{12}=9.785\text{Hz}$$

4. Enine Mod Şekli



Şekil 4. Kömürhan köprüsünün analitik frekans değerleri ve mod şekilleri

4. DENEYSEL ÖLÇÜM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

Deneysel ölçümlerin köprüünün hangi noktalarından yapılacağı dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) doğru olarak belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle köprüünün analitik olarak muhtemel hareket noktaları belirlenmiş ve karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için 6 farklı ölçüm testi kurulmuştur. Bu ölçüm testlerinde;

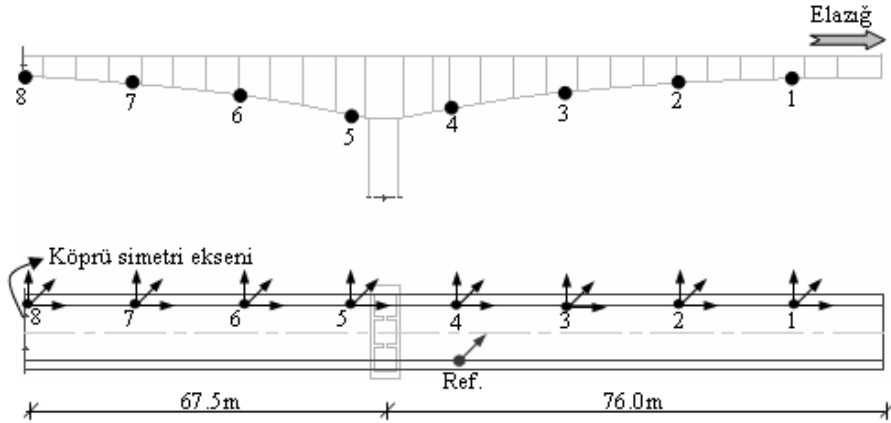
- **Ölçüm Testi 1:** Kömürhan köprüsünün orta açıklığında bulunan mafsal düzeneği dikkate alındığında köprü Elazığ ve Malatya tarafı olmak üzere iki eşit ve her bakımdan simetrik parçaya ayrılabilir. Bu nedenle, bu iki parçanın kendi arasında karşılaştırılması gerekliliği orta çıkmıştır. İlk ölçüm, kutu kesiti içerisinde ve Elazığ tarafındaki parçadan tek sıra halinde alınmıştır.
- **Ölçüm Testi 2:** İkinci ölçüm testi, birinci ölçümün tam simetrisi olacak şekilde köprü kutu kesiti içerisinde ve Malatya tarafındaki parçadan tek sıra halinde alınmıştır. Bu ölçüm ile birlikte Elazığ ve Malatya taraflarında bulunan ayrı iki parçanın dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması sağlanabilecektir.
- **Ölçüm Testi 3:** Birinci ve ikinci ölçümler sonrasında her bir parçanın davranışı büyük ölçüde belirlenebilecektir. Fakat ölçümler tek sıradan yapılacağından burulma modlarının tam olarak belirlenemeyeceği düşünülmektedir. Bu nedenle üçüncü ölçümde, köprü kutu kesiti içerisinde ve Elazığ tarafındaki parçadan karşılıklı noktalar halinde titreşim ölçümleri alınmıştır.
- **Ölçüm Testi 4:** Köprüünün Elazığ ve Malatya tarafında kalan parçalarının birbirleriyle karşılaştırılması için dördüncü ölçümde, üçüncü ölçümün simetrisi olarak köprü kutu kesiti içerisinde ve Malatya tarafındaki parçadan karşılıklı noktalar halinde titreşim ölçümleri alınmıştır.
- **Ölçüm Testi 5:** Köprüünün Elazığ ve Malatya tarafında kalan parçalarının kendi aralarında ve birbirleriyle karşılaştırılmasından sonra beşinci ölçüm olarak kutu kesiti içerisinde köprüünün boydan boya karşılıklı olarak ölçülmesi gerçekleştirilmiştir.
- **Ölçüm Testi 6:** Köprüünün kutu kesiti içerisinde ölçümleri tamamlandıktan sonra tabliye üzerinden ölçümlere geçilmiştir. Bu ölçümde, orta ayaklar arasında kalan ana açıklık tabliye üzerinden tek sıra halinde yerleştirilen ivmeölçerlerle ölçülmüştür.

5. DENEYSEL TİTREŞİM TESTLERİ

Kömürhan köprüsünün dinamik karakteristiklerinin titreşim testleri yapılarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz [7] yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm testlerinde dört adet üç eksenli ve bir adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE yazılımına aktarılmıştır. Burada sinyaller işlendikten sonra OMA yazılımı kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Köprüyü titreştirmek amacıyla taşıt yükü, rüzgâr ve yaya hareketi gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.

5.1. Birinci Ölçüm Testi

Köprünün dinamik karakteristiklerini elde edebilmek amacıyla ilk ölçüm testinde biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Veri alınması istenilen nokta sayısı kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümlerin yapılmasına karar verilmiştir. Bunun için ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 5’de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına, ikinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir. Birinci ölçümün alınması sırasında ölçüme ait bazı görüntüler Şekil 6’da verilmektedir.



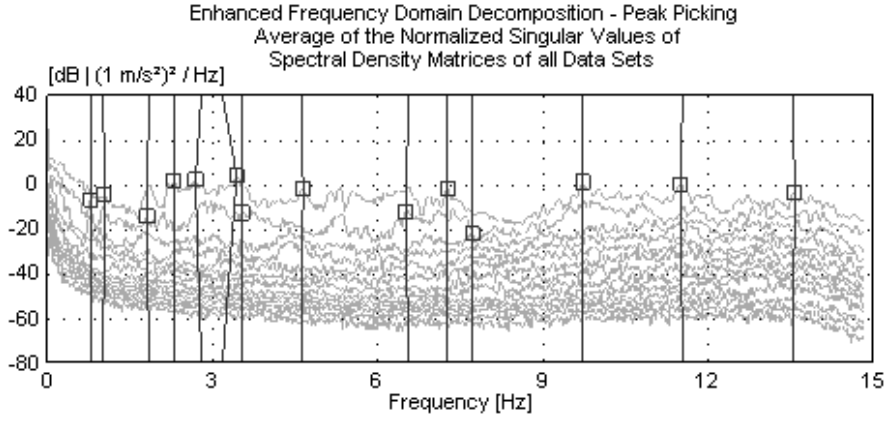
Şekil 5. Referanslı olarak gerçekleştirilen ilk ölçüm düzeneği



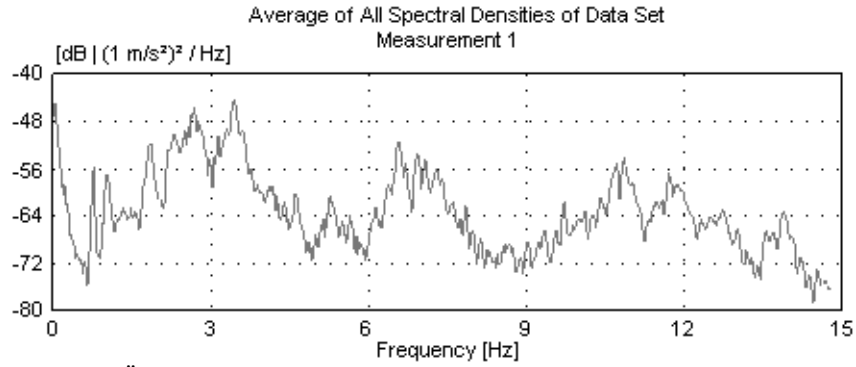
Şekil 6. Birinci ölçüm sistemine ait bazı görüntüler

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

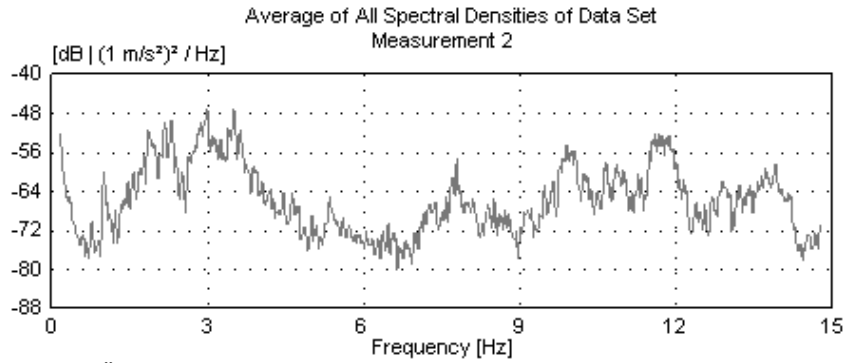
Köprünün dinamik karakteristikleri, frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemiyle elde edilmiştir. Modal parametreler, PP yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilmiştir. Şekil 7’de bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve bütün titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir.



a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler



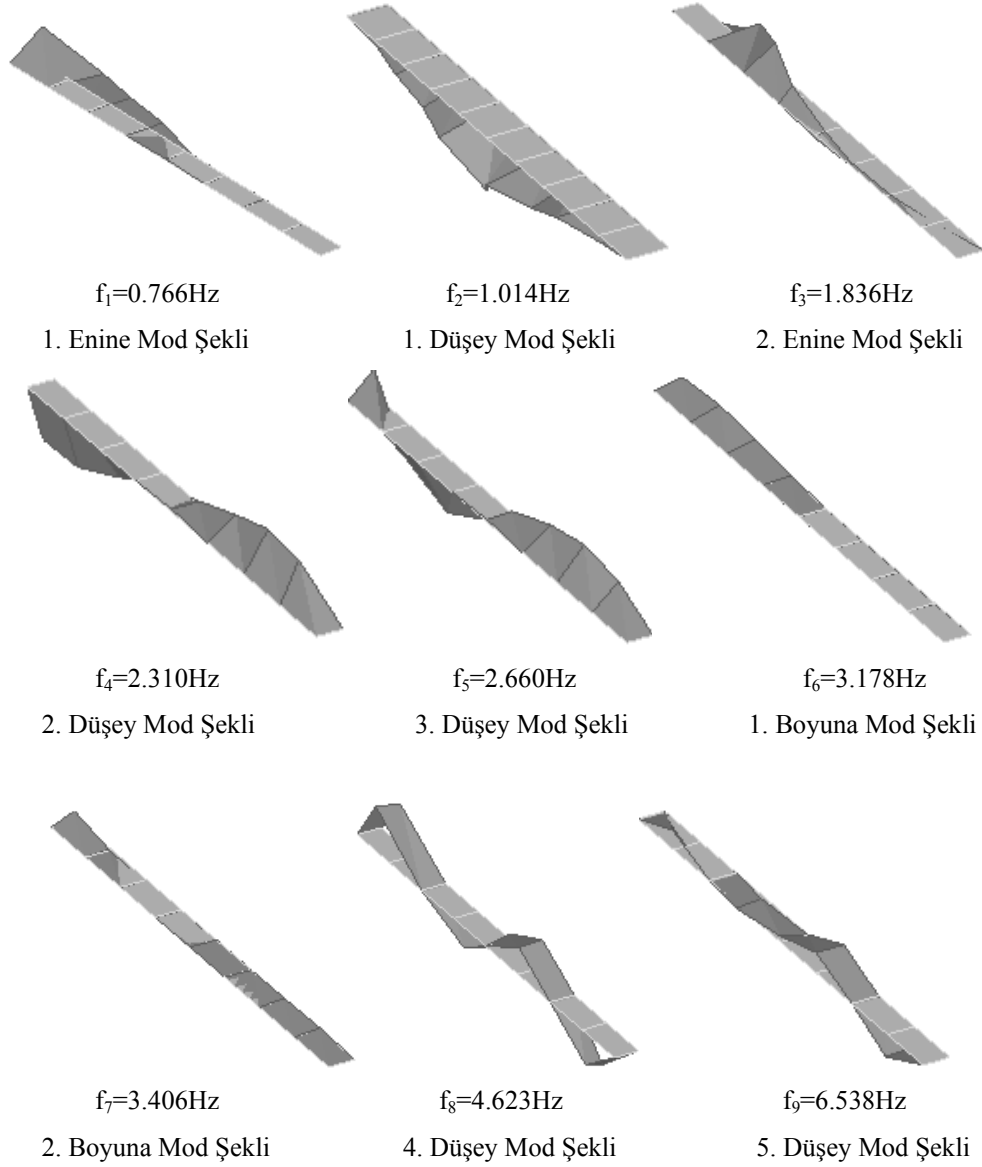
b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları



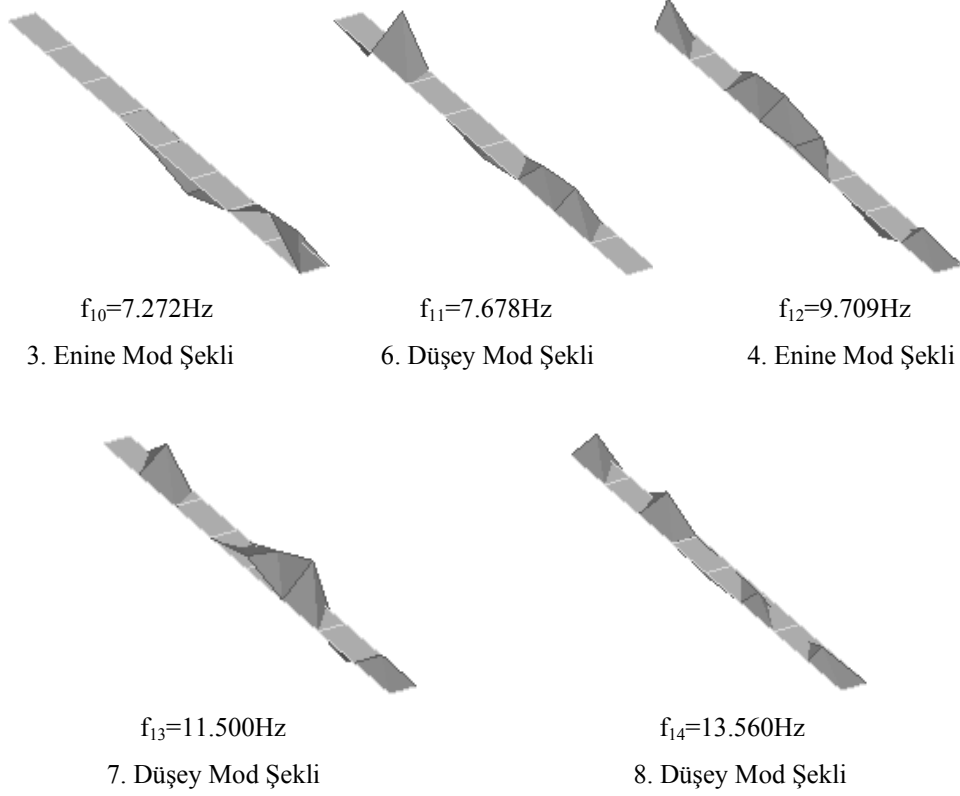
c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 7. Birinci ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamaları

Köprü'nün deneysel ölçümlerinden elde edilen ilk on dört mod şekli Şekil 8'de verilmektedir. Deneysel mod şekilleri dikkate alındığında 1., 3., 10. ve 12. modların köprü'nün enine doğrultudaki hareketi olarak, 2., 4., 5., 8., 9., 11., 13. ve 14. modların köprü'nün düşey doğrultudaki hareketi olarak, 6. ve 7. modların ise köprü'nün boyuna doğrultudaki hareketi olarak elde edildiği görülmüştür.



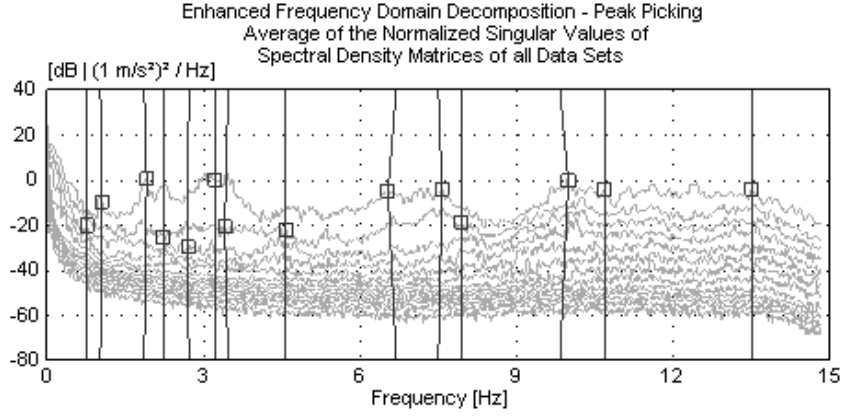
Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi



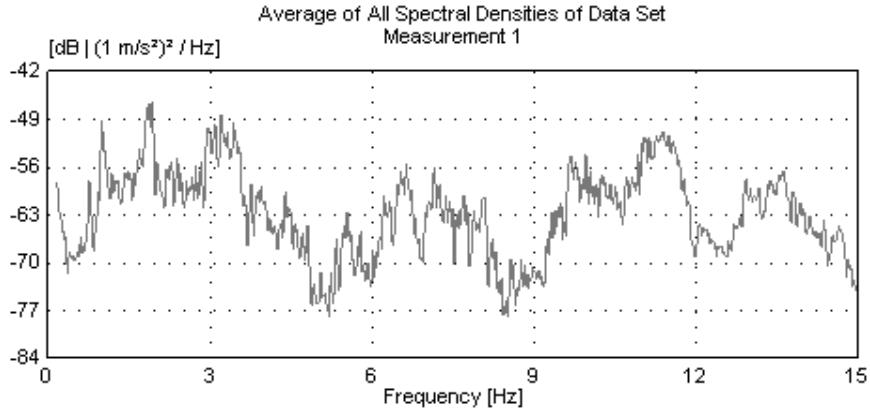
Şekil 8. Deneysel olarak elde edilen ilk on dört mod şekli

5.2. İkinci Ölçüm Testi

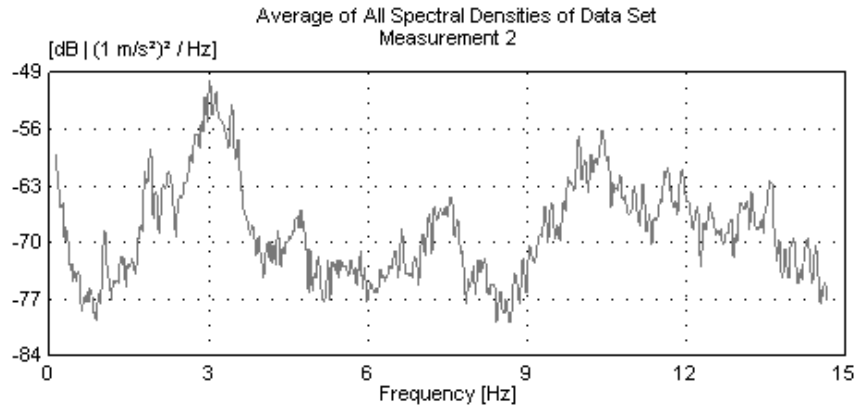
İkinci ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktalar birinci ölçüm sisteminin simetrisi olacak şekilde seçilmiştir. Bunun amacı, köprü'nün orta açıklığında bulunan mafsal düzeneğiyle iki eşit parçaya ayrılan kısımlarının aynı hareketi yapıp yapmadığının kontrol edilmesini sağlamaktır. Şekil 9'da ikinci ölçüm testine ait bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve bütün titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir. İkinci ölçümden elde edilen mod şekilleri de ilk ölçümden elde edilen mod şekilleri ile paralellik göstermektedir.



a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler



b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

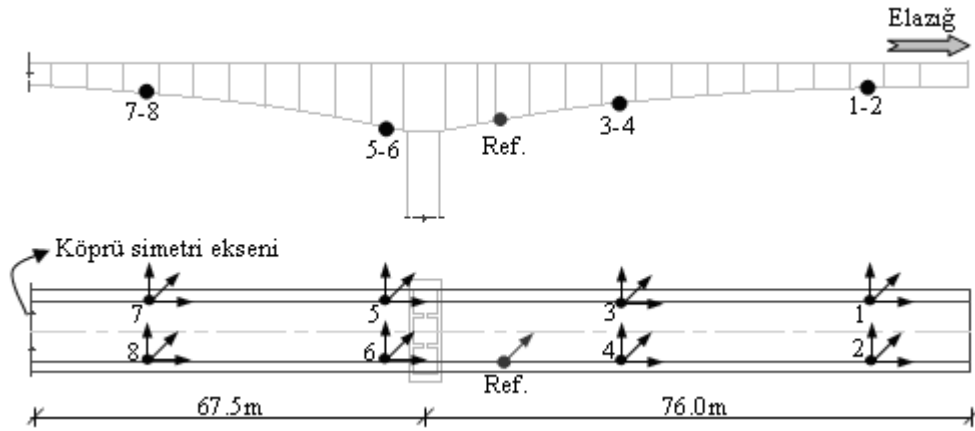


c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 9. İkinci ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamaları

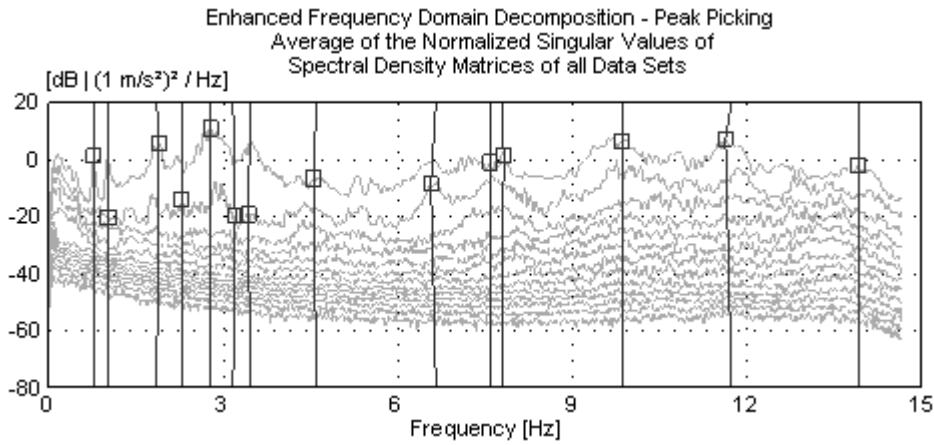
5.3. Üçüncü Ölçüm Testi

Üçüncü ölçüm olarak, köprünün Elazığ tarafındaki parçasından karşılıklı noktalar halinde titreşim ölçümleri alınmış ve burulma etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ölçüm testinde de biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 10'da gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.

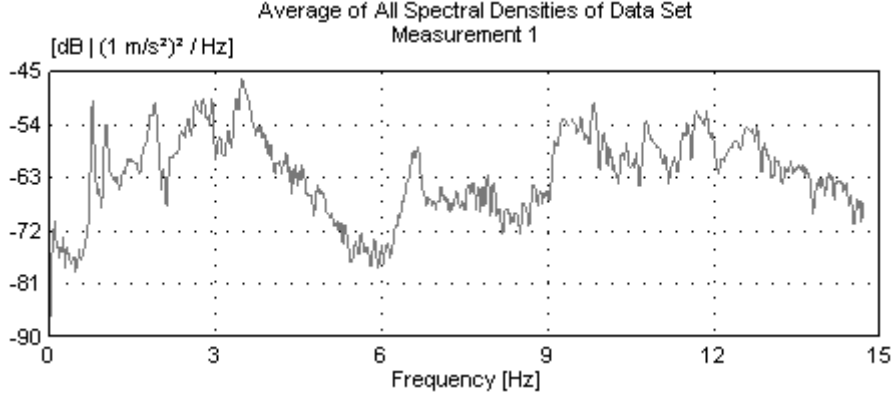


Şekil 10. Referanslı olarak gerçekleştirilen üçüncü ölçüm düzeneği

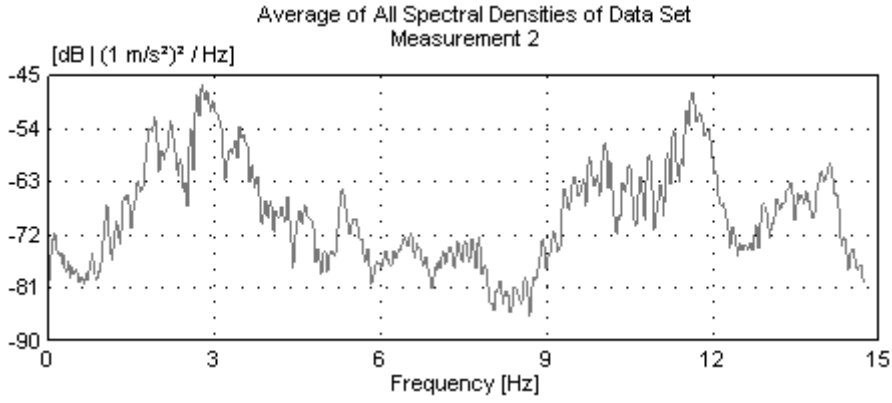
Şekil 11'de üçüncü ölçüm testinin bütün sinyallerinden elde edilen tekil değerler ve titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir. Üçüncü ölçümden elde edilen mod şekilleri ilk iki ölçümden elde edilen mod şekilleri ile paralellik göstermektedir.



a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler



b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları



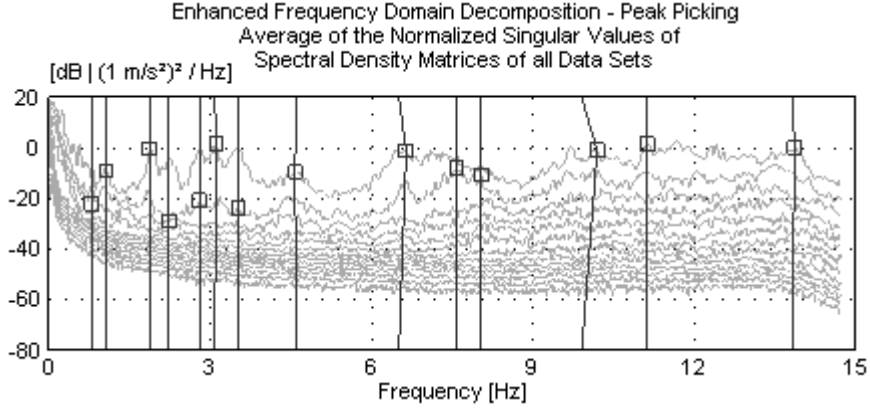
c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 11. Üçüncü ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamaları

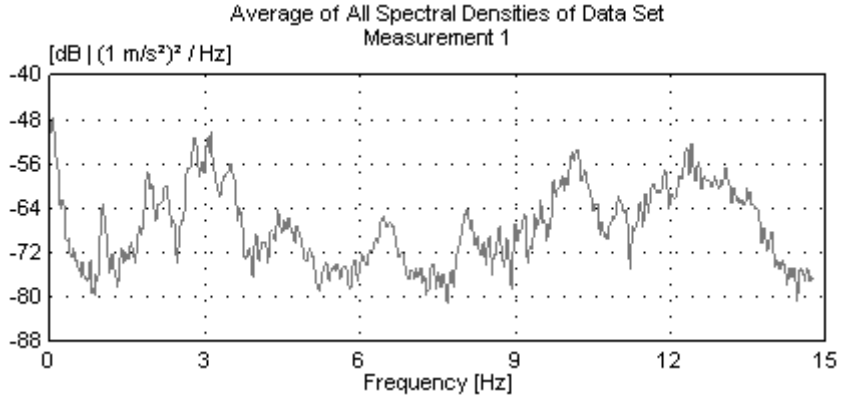
5.4. Dördüncü Ölçüm Testi

Dördüncü ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktalar üçüncü ölçüm sisteminin simetrisi olacak şekilde seçilmiştir. Bunun amacı, hem köprünün orta açıklığında bulunan mafsal düzeneğiyle iki eşit parçaya ayrılan kısımlarının aynı hareketi yapip yapmadığının kontrol edilmesini sağlamak hem de köprünün Malatya tarafında kalan parçasını burulma açısından incelemektir. Şekil 12'de dördüncü ölçüm testine ait bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve bütün titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir. Dördüncü ölçümden elde edilen mod şekilleri ilk üç ölçümden elde edilen mod şekilleri ile paralellik göstermektedir.

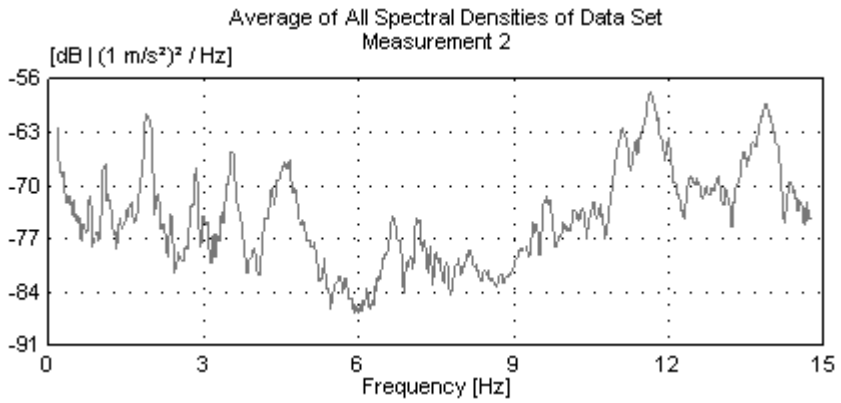
Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi



a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler



b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

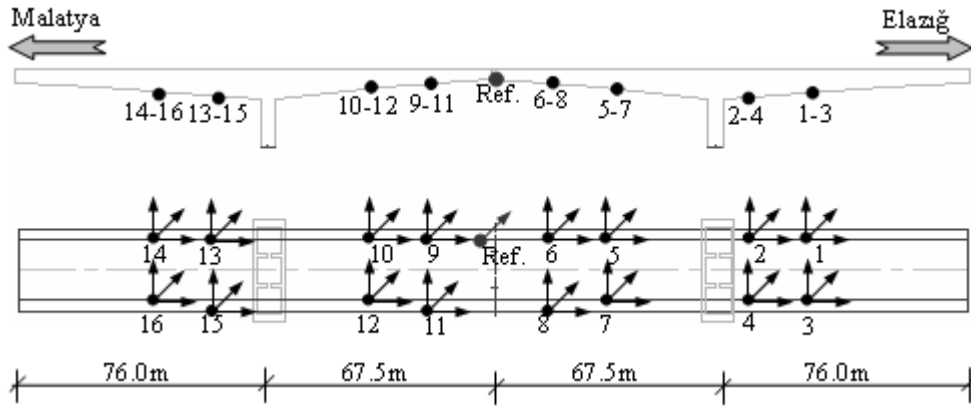


c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 12. Dördüncü ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamalar

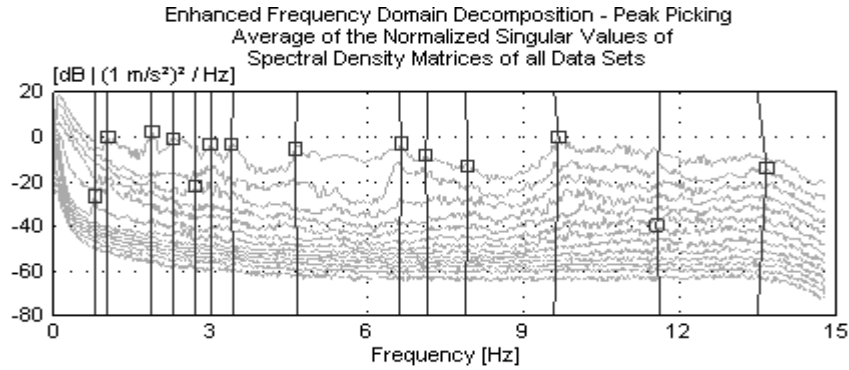
5.5. Beşinci Ölçüm Testi

İlk dört ölçüm ile köprünün Elazığ ve Malatya parçalarının davranışları ayrı ayrı incelendikten sonra beşinci ölçüm olarak, köprünün toplam uzunluğu boyunca ölçülüp hâkim davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktaların köprünün olası analitik mod şekillerinin belirlenebileceği yerlere yakın olmasına özen gösterilmiştir. Ölçüm testi dört adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 13'de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına, ikinci adımda 5, 6, 7 ve 8 noktalarına, üçüncü adımda 9, 10, 11 ve 12 noktalarına, dördüncü adımda ise 3, 14, 15 ve 16 noktalarına yerleştirilmiştir. Titreşim sinyalleri köprü orta noktasına yerleştirilen ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



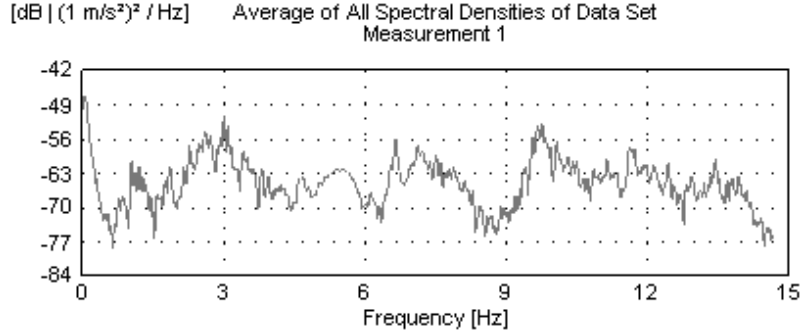
Şekil 13. Referanslı olarak gerçekleştirilen beşinci ölçüm düzeni

Şekil 14'de beşinci ölçüm testine ait bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve bütün titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir. Beşinci ölçümden elde edilen mod şekilleri ilk dört ölçümden elde edilen mod şekilleri ile paralellik göstermektedir.

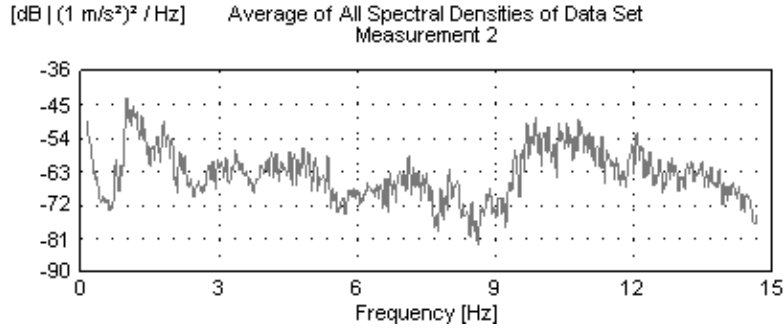


a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler

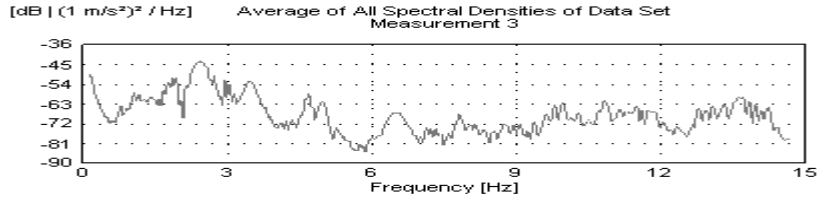
Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi



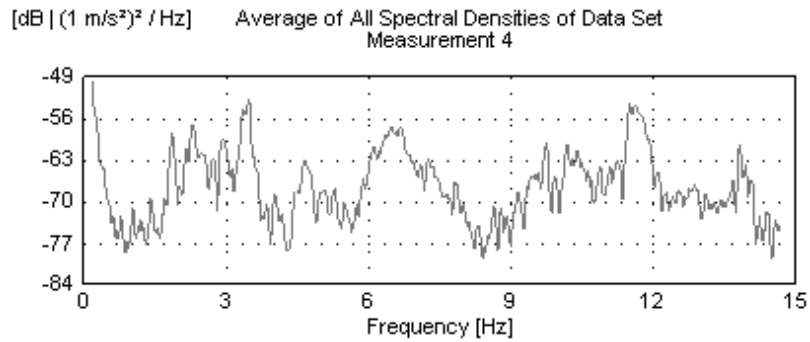
b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları



c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları



d) Ölçüm testinin üçüncü adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

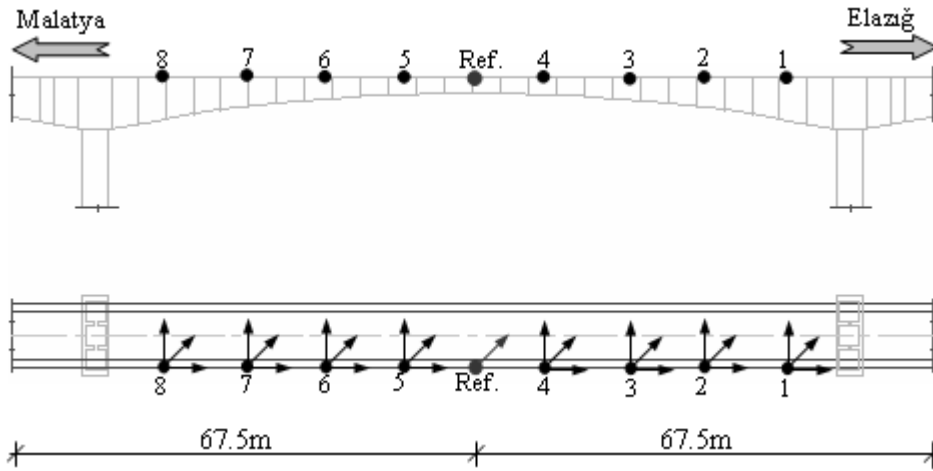


e) Ölçüm testinin dördüncü adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 14. Beşinci ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamaları

5.6. Altıncı Ölçüm Testi

Altıncı ölçüm testi köprünün orta ayaklar arasında kalan ana açıklığının davranışını belirlemek amacıyla kurulmuştur. Bu ölçümde diğer ölçümlere benzer olarak biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 15’de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına, ikinci adımda ise 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki adımdaki titreşim sinyalleri köprü orta noktası olan ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir..



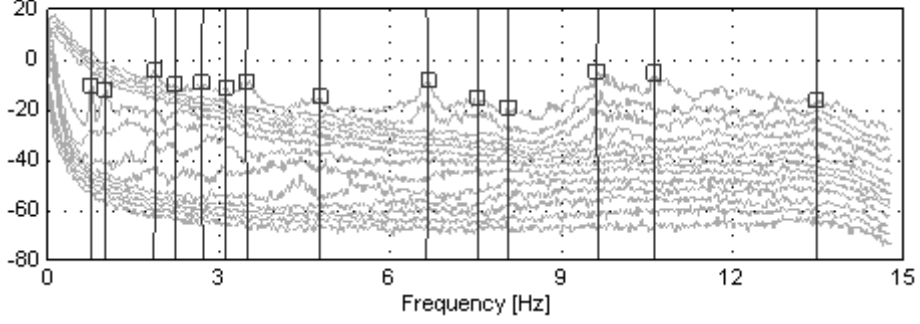
Şekil 15. Referanslı olarak gerçekleştirilen altıncı ölçüm düzeneği

Şekil 16’da altıncı ölçüm testine ait bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler ve bütün titreşim sinyallerinin ortalama spektral yoğunluk değerleri gösterilmektedir. Altıncı ölçümden elde edilen mod şekilleri ilk beş ölçümden elde edilen mod şekilleri ile paralellik göstermektedir.

Kömürhan köprüsünün, SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden ve deneysel ölçümlerinden elde edilen dinamik karakteristikleri Tablo 2’de karşılaştırılmalı olarak verilmektedir.

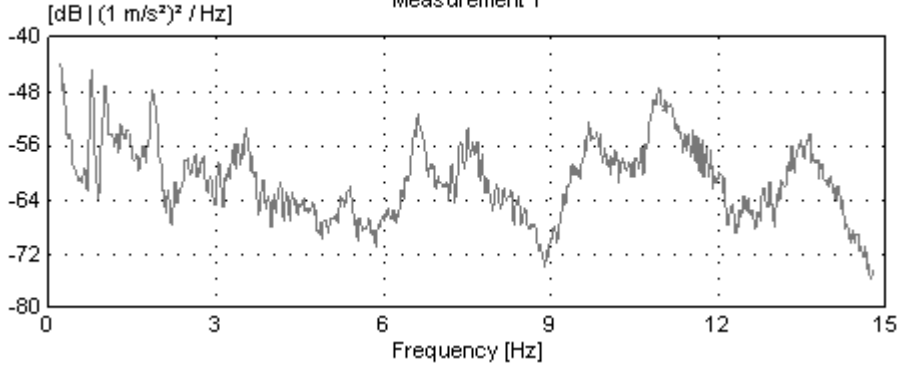
Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

[dB] (1 m/s²)² / Hz Enhanced Frequency Domain Decomposition - Peak Picking
Average of the Normalized Singular Values of
Spectral Density Matrices of all Data Sets



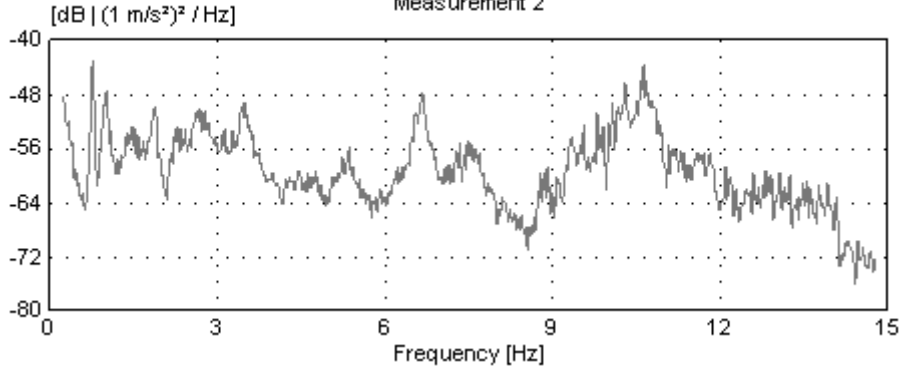
a) PP yönteminden elde edilen tekil değerler

Average of All Spectral Densities of Data Set
Measurement 1



b) Ölçüm testinin ilk adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Average of All Spectral Densities of Data Set
Measurement 2



c) Ölçüm testinin ikinci adımına ait spektral yoğunluk ortalamaları

Şekil 16. Altıncı ölçüme ait tekil değerler ve titreşimlerin spektral yoğunluk ortalamaları

Tablo 2. Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler

Frekans No	Analitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)						Deneysel Sönüm Oranları (%)
		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	
1	0.790	0.766	0.766	0.766	0.797	0.788	0.764	1.961
2	1.106	1.014	1.020	1.016	1.049	1.027	1.010	3.211
3	1.845	1.836	1.861	1.851	1.894	1.850	1.862	2.170
4	2.315	2.310	2.230	2.290	2.234	2.291	2.219	1.329
5	2.685	2.660	2.714	2.773	2.807	2.703	2.710	2.141
6	3.346	3.178	3.211	3.162	3.090	3.001	3.118	1.937
7	3.588	3.406	3.467	3.465	3.528	3.440	3.491	1.750
8	4.847	4.623	4.575	4.595	4.586	4.665	4.754	1.826
9	6.398	6.538	6.690	6.651	6.421	6.612	6.636	1.236
10	7.880	7.272	7.494	7.571	7.587	7.176	7.528	0.962
11	8.168	7.678	7.935	7.793	7.985	7.896	8.079	0.650
12	9.785	9.709	9.825	9.872	9.907	9.584	9.648	0.400
13	11.563	11.500	10.690	11.700	11.120	11.620	10.630	0.420
14	13.809	13.560	13.500	13.910	13.820	13.480	13.480	0.100

6. SONLU ELEMAN MODEL İYİLEŞTİRİLMESİ

Kömürhan köprüsünün analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırıldığında elde edilen mod şekillerinin birbirlerine paralellik gösterdiği, doğal frekans değerlerinin ise birbirine yakın olduğu fakat aralarında biraz farklılıkların bulunduğu görülmüştür. Bu farklılıkların nedenleri arasında analitik modellemeler sırasında dikkate alınan ve yapının tasarımı sırasında kabul edilen malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler olduğu düşünülmektedir. Bu kriterler dikkate alınarak yapının sonlu eleman modelinin köprüsünün mevcut durumunu yansıtacak şekilde iyileştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

6.1. Malzeme Özelliklerinin İyileştirilmesi

Analizler sırasında dikkate alınan ve Tablo 1’de detaylı olarak verilen malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenebilmesi için köprü kutu kesit içerisindeki çeşitli bölgelerden karot numuneleri alınmış, ayrıca Schmidt çekici kullanılarak hem karot

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

numunelerinin alındığı bölgelerden hem de köprünün birçok farklı bölgesinden okumalar yapılarak beton dayanımı ve elastisite modülünün mevcut değeri belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1.1. Karot numunelerinin alınması ve beton sınıfının belirlenmesi

Karot numuneleri, köprünün 8 farklı segmentinden ve kutu kesit içerisinden 15*30cm boyutlarında Elazığ Belediyesi ekipleri tarafından uygun numune alma bölgeleri belirlenerek alınmıştır. Bu numunelerin yarısı Ankara’ da, yarısı da Elazığ’ da kırılmış ve beton dayanımı 29MPa olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri dikkate alınarak köprü tabliyesine ait nihai beton elastisite modülü 32000MPa olarak hesaplanmıştır. Karot numunelerinin alınması sırasında elde edilen bazı görüntüler Şekil 17’de verilmektedir.



Şekil 17. Karot numunelerinin alınması sırasında elde edilen bazı görüntüler

6.1.2. Schmidt çekici ile beton sınıfının belirlenmesi

Schmidt çekici kullanılarak, karot numunelerinin alındığı segmentlerden ve kolon ayak uç noktalarının tabliye ile birleştiği bölgelerden gerekli ölçümler alınmış ve beton dayanımı belirlenmiştir. Ölçümler hem kutu kesit yan cidarlarından hem de kutu kesit alt tabliyesinden alınmıştır. Ölçüm alınan segmentlerden elde edilen ölçüm değerleri Tablo 3 ve 4’de, ölçüme ait bazı görüntüler Şekil 18’de verilmektedir.



Şekil 18. Schmidt çekici ile yapılan ölçümlere ait bazı görüntüler

Alemdar BAYRAKTAR, Ahmet Can ALTUNIŞIK, Barış SEVİM, Temel TÜRKER

Her bir segmentten elde edilen ölçüm verilerinin minimum ve maksimumları çıkarılıp ortalamaları alınmış ve ortalama değerler karbonlaşma katsayısı (bu çalışmada 0.63 olarak belirlendi) ile çarpılarak 15*30cm'lik numuneler için basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları dikkate alınarak köprü tabliyesi ve köprü ayağı için mevcut elastisite modülleri sırasıyla 32000MPa ve 37500MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Köprünün Malatya tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri

Ölçüm	Segment 0		Segment 12		Segment 22		Segment 27	
	Yan	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan
1	54.0	58.0	36.0	54.0	40.0	46.0	43.0	44.0
2	56.0	58.0	38.0	56.0	43.0	46.0	43.0	44.0
3	58.0	58.0	40.0	56.0	43.0	47.0	43.0	45.0
4	58.0	58.0	40.0	56.0	43.0	50.0	43.0	46.0
5	59.0	58.0	40.0	56.0	44.0	50.0	44.0	46.0
6	60.0	58.0	42.0	56.0	44.0	50.0	44.0	46.0
7	60.0	58.0	44.0	58.0	45.0	51.0	46.0	46.0
8	60.0	58.0	44.0	58.0	48.0	52.0	46.0	46.0
9	60.0	60.0	48.0	60.0	50.0	52.0	47.0	48.0
10	60.0	60.0	48.0	60.0	52.0	54.0	50.0	48.0

Tablo 4. Köprünün Elazığ tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri

Ölçüm	Segment 0		Segment 12		Segment 22		Segment 27	
	Yan	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan
1	50.0	48.0	44.0	48.0	42.0	47.0	39.0	40.0
2	52.0	50.0	44.0	50.0	42.0	48.0	40.0	43.0
3	54.0	54.0	46.0	50.0	42.0	50.0	42.0	48.0
4	54.0	58.0	46.0	54.0	43.0	52.0	44.0	48.0
5	56.0	58.0	46.0	54.0	44.0	52.0	44.0	48.0
6	56.0	58.0	48.0	54.0	45.0	54.0	45.0	48.0
7	58.0	58.0	48.0	54.0	48.0	54.0	46.0	48.0
8	58.0	58.0	48.0	54.0	50.0	54.0	48.0	52.0
9	58.0	60.0	50.0	54.0	50.0	54.0	50.0	52.0
10	60.0	60.0	52.0	56.0	52.0	56.0	52.0	52.0

6.2. Sınır Şartlarının İyileştirilmesi

Deneysel ölçümlerden önce oluşturulan ilk analitik modelde Elazığ ve Malatya taraflarında kalan kenar ayaklar lineer elastik yay elemanlar ile simule edilmiştir. Bu elemanların rijitlikleri ve diğer özellikleri hesap edilerek programa aktarılmıştır. Fakat köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelinin oluşturulmasında kenar ayak mesnetleri çekme ve basınçta farklı özellikler gösteren multi elastik yay elemanlar ile simule edilmiştir. Bunun nedeni ise çekme anında çekme çubuklarına, basınç anında ise elastomere uygulanan kuvvetlerin ayrı ayrı dikkate alınmasını sağlamaktır. İlgili yay elemanların rijitlik ve diğer özellikleri benzer hesaplamalar ile programa katılmıştır.

6.3. Diğer İyileştirmeler

Beton sınıfı ve sınır şartlarının yanında Kömürhan köprüsünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelinin oluşturulması için yapılan diğer iyileştirmeler şu şekildedir;

- Karot numuneleri ve paftalardaki ortalama donatı yüzdeleri dikkate alınarak ayak betonu birim hacim ağırlığı 2400kg/m^3 , tabliye betonu birim hacim ağırlığı ise 2300kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikler

Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilen Analitik Frekans (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)					
		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
0.790	0.760	0.766	0.766	0.766	0.797	0.788	0.764
1.106	1.032	1.014	1.020	1.016	1.049	1.027	1.010
1.845	1.815	1.836	1.861	1.851	1.894	1.850	1.862
2.315	2.214	2.230	2.230	2.290	2.234	2.291	2.219
2.685	2.551	2.660	2.714	2.773	2.807	2.703	2.710
3.346	3.238	3.178	3.211	3.162	3.090	3.001	3.118
3.588	3.439	3.406	3.467	3.465	3.528	3.440	3.491
4.847	4.480	4.623	4.575	4.595	4.586	4.665	4.754
6.398	6.370	6.538	6.690	6.651	6.421	6.612	6.636
7.880	7.392	7.272	7.494	7.571	7.587	7.176	7.528
8.168	7.718	7.678	7.935	7.793	7.985	7.896	8.079
9.785	9.553	9.709	9.825	9.872	9.907	9.584	9.648
11.563	10.609	11.500	10.690	11.700	11.120	11.620	10.630
13.809	13.532	13.560	13.500	13.910	13.820	13.480	13.480

- Köprünün orta ayak uç noktaları ile tabliyesi arasında ters “v” şeklinde rijit bağlantı elemanları mevcuttur. Bu elemanların alanları, rijitlikleri, atalet momentleri ve kütleleri hesaplanarak ayak üstü segmentlere (her bir ayak üzerinde sağa ve sola birer segment olmak üzere toplam dört segmente) düzeltme faktörleri şeklinde etkilmiştir.
- Köprü kenar ayaklarında ve orta açıklığındaki segment sonu perde duvarlarının ağırlıkları diyafram yükü olarak köprüye ilave edilmiştir. Hesap Kontrol Raporunda hesaplandığı şekliyle, her bir kenar ayakta 1117kN, açıklık ortasında köprünün Elazığ ve Malatya parçalarının 26. segment sonlarında ise 150kN olarak modele katılmıştır.

Kömürhan köprüsünün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen doğal frekanslarının deneysel ölçümlerden ve ilk analitik modelden elde edilen doğal frekanslarla karşılaştırması Tablo 5’ de verilmektedir. Tablo 5 incelendiğinde sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra deneysel ve analitik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerinin birbirleriyle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu, elde edilen analitik modelinde köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelini yansıttığı belirlenmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Malatya-Elazığ devlet yolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü’nün dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel modal analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmesi ve birbirleriyle karşılaştırılarak köprünün mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modelinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Deneysel ölçümler sırasında hem köprü kutu kesit içerisinden hem de köprü tabliyesi üzerinden çeşitli titreşim ölçümleri alınmış olup, elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel ölçümler sırasında titreşim hareketi olarak taşıt yükünden yararlanılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlara varılabilmektedir;

- Köprünün analitik ve deneysel modal analizleri sonucunda elde edilen frekans değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve ilk on dört frekansın 0-14Hz aralığında bulunduğu görülmüştür.
- Analitik ve deneysel mod şekilleri dikkate alındığında, 1., 3., 10. ve 12. modların köprünün enine doğrultudaki hareketi, 2., 4., 5., 8., 9., 11., 13. ve 14. modların köprünün düşey doğrultudaki hareketi, 6. ve 7. modların ise köprünün boyuna doğrultudaki hareketi olarak elde edildiği görülmüştür.
- Birinci ve ikinci ölçümler ile üçüncü ve dördüncü ölçümler birbirleriyle karşılaştırıldığında, köprünün orta açıklığında bulunan mafsal düzeneği ile birbirinden ayrılan Elazığ ve Malatya parçalarının dinamik karakteristiklerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasındaki küçük farklılıklar malzeme özellikleri, sınır şartları ve diğer yapısal özelliklerdeki değişimler dikkate alınarak giderilmiş ve köprünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

- Deneysel olarak belirlenen sönüm oranı değerlerinin köprünün ileri dinamik analizlerinde dikkate alınması, yapının gerçek davranışının belirlenmesinde daha etkili olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 106M038 numaralı TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi ve 2005.112.001.1 ve 2006.112.001.1 numaralı Karadeniz Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Deneysel ölçümler sırasında her türlü lojistik destek sağlayan Karayolları 8. Genel Müdürlüğü Köprüler Birimi Proje Müdürü Sayın Mehmet FİDAN'a, İnşaat Mühendisi Yavuzhan TAŞ'a ve bütün Karayolları çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Ren, W. X., Harik, I. E., Blandford, G. E., Lenett, M., Baseheart, T. M., Roebling Suspension Bridge II: Ambient Testing and Live-Load Response, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 9(2), 119-126, 2004.
- [2] Ren, W. X., Peng, X. L., Lin, Y. Q., Experimental and Analytical Studies on Dynamic Characteristics of a Large Span Cable-Stayed Bridge, *Engineering Structures*, 27, 535-548, 2005.
- [3] Guan, H., Vibration-Based Structural Health Monitoring of Highway Bridges, Doktora Tezi, University of California, San Diego, USA, 2006.
- [4] Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B., Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 2007.
- [5] Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T., Modal Testing and Finite Element Model Updating of an Arch Type Steel Footbridge, *Steel and Composite Structures*, 7(6), 487-502, 2007.
- [6] Xia, H., Xu, Y. L., Chan, T. H. T., Dynamic Interaction of Long Suspension Bridges with Running Trains, *Journal of Sound and Vibration*, 237(2), 263-280, 2000.
- [7] SAP2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA, 1998.
- [8] OMA, Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.