UZUN AÇIKLIKLI BETONARME KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN DEPREM GÜVENLİKLERİNİN HASARSIZ DİNAMİK DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ: BİRECİK KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ

A. Bayraktar[1], A.C. Altunışık[2] ve T. Türker[3]

[1] *Profesör, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon*
[2] *Doçent Doktor, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon*
[3] *Yardımcı Doçent, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon*
Email: ahmetcan8284@hotmail.com

ÖZET:

Bu çalışmada, yapıldığı tarih itibariyle Türkiye'nin en uzun betonarme karayolu köprüsü olma özelliği taşıyan, Şanlıurfa'nın Birecik ilçesinde, Şanlıurfa İli, Gaziantep yolu Fırat nehri üzerinde bulunan Birecik Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Birecik Köprüsü'nün toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 720m ve 10m'dir. Köprünün taşıyıcı sistemi iki kısma ayrılmaktadır. Birecik tarafında kalan ilk kısım alttan kemer taşıyıcı sisteme sahip olup, Gaziantep tarafında kalan ikinci kısmı ise değişken kesitli kirişli taşıyıcı sisteme sahiptir. Birecik Köprüsü'nün yapısal dinamik davranışını deneysel olarak belirlemek amacıyla köprü üzerinde çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde köprü üzerindeki araç trafiği titreşim verisi olarak kullanılmıştır. Birecik Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini analitik olarak elde etmek amacıyla, köprünün proje çizimleri ve yerinde ölçüm verileri kullanılarak üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur. Analizler sonucunda doğal frekans ve mod şekilleri elde edilmiş, elde edilen analitik değerler deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar köprünün malzeme özellikleri, mesnet şartları ve kesit özellikleri gibi parametreler dikkate alınarak minimum düzeye indirgenmiş, bu şekilde köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli oluşturularak köprü güvenliği kendi ağırlığı, trafik ve deprem yükleri altında tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Birecik köprüsü, dinamik karakteristik, sonlu eleman model kalibrasyonu, çevresel titreşim testi, köprü güvenliği, hasarsız deneysel yöntemler.

1. GİRİŞ

Köprüler geçmişi günümüze bağlayan önemli mühendislik yapılarının başında gelmektedir. Bulundukları bölgelerde lojistik olarak ta önemli olan köprülerin yapısal davranışlarını ve mevcut güvenliklerini belirlemek, meydana gelecek can ve mal kayıplarının önceden engellenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaç doğrultusunda, günümüzde mühendislik yapılarının mevcut durumlarını ve güvenliklerini belirlemek amacıyla hasarsız dinamik deneysel yöntemler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yapıların dinamik karakteristiklerinin hasarsız deneysel yöntemlere 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 yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, Zorlanmış Titreşim Yöntemi ve Çevresel Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Ren vd. 2004, Whelan vd., 2009; Bayraktar vd., 2010; Altunışık vd., 2011).

2. KÖPRÜYE AİT GENEL BİLGİLER

Bu çalışmaya konu olan köprü, Şanlıurfa'nın Birecik ilçesinde bulunan Birecik Köprüsü'dür. Birecik Köprüsü, Şanlıurfa İli, Gaziantep yolu üzerinde Fırat nehri üzerinde bulunmaktadır. Birecik Köprüsü, yapıldığı tarih itibariyle Türkiye'nin en uzun betonarme karayolu köprüsüdür. Tüm köprüler ele alındığında ise uzunluk açısından Fırat nehri üzerinde bulunan Karkamış çelik demiryolu köprüsünden sonra gelmektedir.

Birecik Köprüsü'nün toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 720m ve 10m'dir. Köprünün taşıyıcı sistemi iki kısma ayrılmaktadır. Birecik tarafında kalan ilk kısım alttan kemer taşıyıcı sisteme sahip olup, toplam 5 kemerden oluşmaktadır. Kemerlerin her birinin kemer açıklıkları 55m'dir. Köprü kemerleri orta açıklık kısımlarında ve kenar ayaklarda rijit bağlantılı olup, kemerlerin orta noktaları sağ ve sol kenarlarının üst noktalarında derzli olarak inşa edilmiştir. Köprünün kemer kısmının temel ayakları, kolon, kiriş, kemer ve tabliyesi betonarme olarak inşa edilmiştir. Kemer kısmının toplam tabliye uzunluğu yaklaşık 300m'dir. Birecik Köprüsü'nün kemer taşıyıcı sisteme sahip birinci kısmına ait bazı görüntüler Şekil 1'de verilmektedir.

Şekil 1. Birecik Köprüsü'nün kemerli kısmına ait bazı görünüşler

Köprünün Gaziantep tarafında kalan ikinci kısmı ise değişken kesitli kirişli taşıyıcı sisteme sahip olup, toplam 14 açıklıktan oluşmaktadır. Açıklıklar arasında simetrik olarak yerleştirilen 3 mafsal kısmı bulunmakta olup, her bir açıklık ortalama 26m uzunluğundadır. Köprünün kiriş kısmının temel ayakları, kolon, kiriş ve tabliyesi betonarme olarak inşa edilmiştir. Bu kısmın toplam tabliye uzunluğu yaklaşık 380m'dir. Köprü tabliyesinin her iki tarafında yayaların geçmesi için birer metrelik kaldırımlar ayrılmıştır. Birecik Köprüsü'nün kirişli kısmının taşıyıcı sistemine, derz bölgelerine ve ayaklarına ait bazı görüntüler Şekil 2'de verilmektedir.

Şekil 2. Birecik Köprüsü'nün Kirişli kısmına ait bazı görünüşler

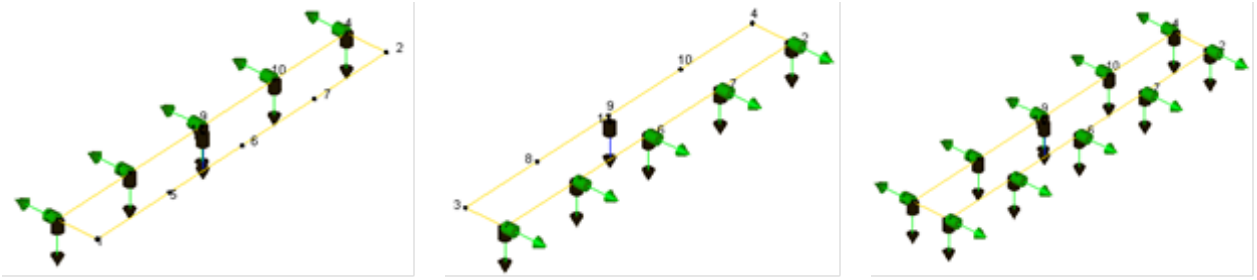
Birecik Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen incelemelerde köprünün kemer taşıyıcı sisteme sahip olan ilk kısmında kemer ayakları ve mesnetlerinde, kemerde, tabliyede, derzlerde ve tabliye yükünü aktaran kolon (dikey) elemanlarda hasar ve bozulmalar gözlemlenmiştir. Köprünün kiriş taşıyıcı sisteme sahip olan ikinci kısmında ise kolon ayakları ve mesnetlerinde, kirişlerde, tabliyede ve derzlerde bozulmalar gözlemlenmiştir.

3. KÖPRÜ DAVRANIŞININ DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Birecik Köprüsü'nün yapısal dinamik davranışını deneysel olarak belirlemek amacıyla köprü üzerinde çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiş ve dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Aktif bir trafik güzergâhı üzerinde bulunan Birecik Köprüsü üzerindeki ölçümlerde, köprüdeki trafik hareketlerinden oluşan titreşimler için, sismik özellikteki sinyalleri ölçme özelliğine sahip hassas ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler, köprünün hem düşey hem de yatay yöndeki hareketlerini ölçebilecek amacıyla Şekil 3'de gösterilen biçimde köprüye yerleştirilmiştir.

Şekil 3. Birecik Köprüsü üzerindeki ivmeölçer yerleşimi

Deneysel ölçümlerde Birecik Köprüsü'nü oluşturan kemerli ve kirişli kısımların dinamik karakteristikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Her bir ölçüm bir (1) saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde köprüdeki trafik akışını engellememek amacıyla referanslı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Toplam on bir (11) adet ivmeölçer kullanılan ölçümlerde ivmeölçerler köprü tabliyesine yatay ve düşey doğrultularda Şekil 4'de gösterilen düzende yerleştirilmiştir. Köprü tabliyesinin memba ve mansap taraflarından ölçülen sinyaller referans ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



(a) Memba tarafına ait ölçüm (b) Mansap tarafına ait ölçüm (c) Toplam ivmeölçer yerleşimi

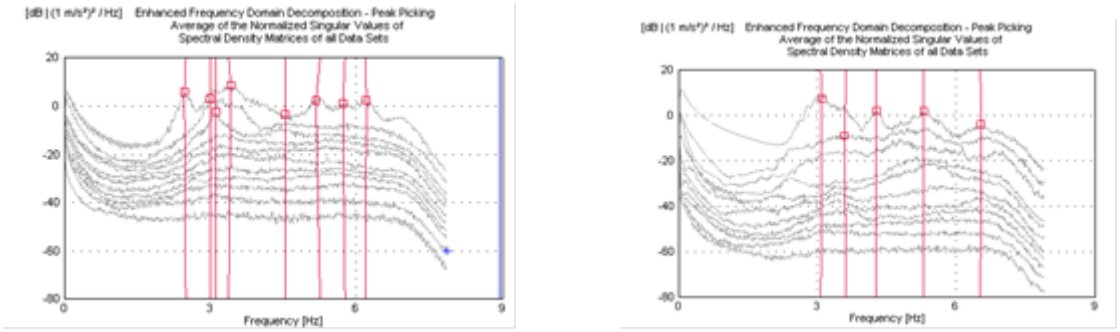
Şekil 4. Birecik Köprüsü'ndeki ivmeölçer yerleşim düzeni

Ölçümden elde edilen sinyaller analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılarak, analiz edilen sinyallerden köprünün doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir (OMA, 2006; PULSE, 2006). Köprünün kemer ve kirişli kısımları için analizler sonucunda elde edilen doğal titreşim frekansları ve modal sönüm oranları Tablo 1'de verilmektedir.

Köprünün kemer ve kiriş taşıyıcı sisteme sahip kısımları için elde edilen tekil değer spektrumları Şekil 5'de verilmektedir. Deneysel ölçümler sonucunda, köprünün kemer taşıyıcı sisteme sahip ilk kısmı için belirlenen mod şekilleri Şekil 6'da, kiriş taşıyıcı sisteme sahip ikinci kısmı için belirlenen mod şekilleri ise Şekil 7'de verilmektedir.

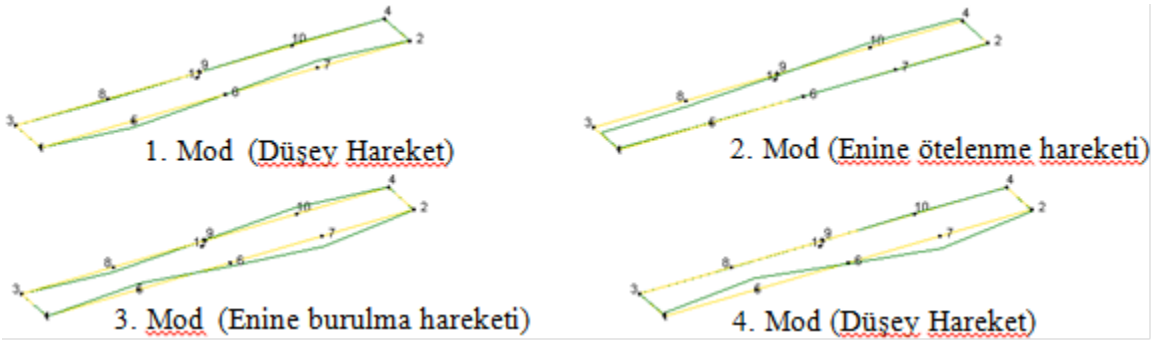
Tablo 1. Köprünün kemer ve kiriş kısımlarına ait doğal frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	Kemer Kısmı		Kiriş Kısmı	
	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı
1	2.496	4.358	3.078	8.046
2	3.115	0.899	4.265	2.078
3	3.378	0.863	5.287	1.453
4	4.545	0.118	6.530	0.783

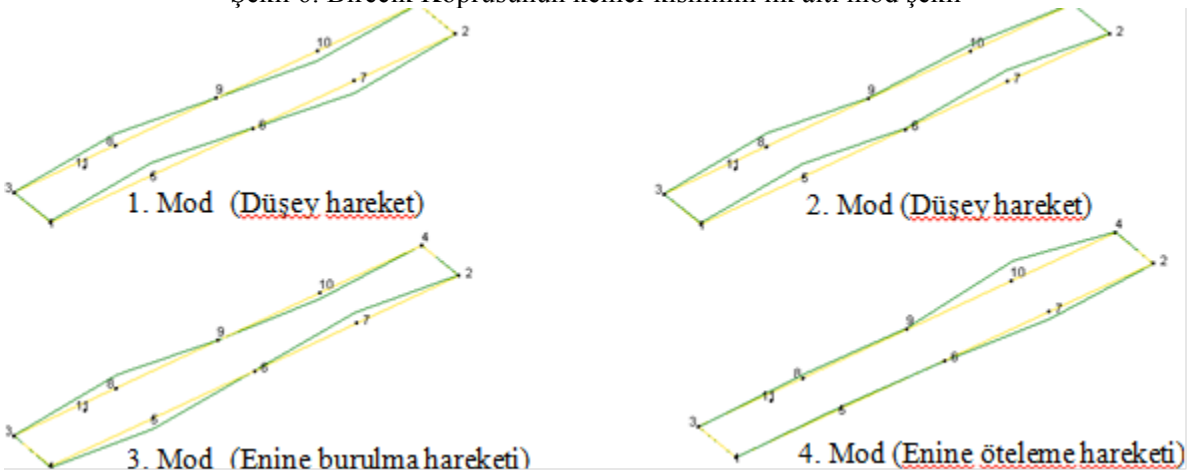


(a) Kemer kısmı (b) Kiriş kısmı

Şekil 5. Birecik Köprüsünün kemer ve kiriş kısımlarına ait elde edilen tekil değerler diyagramı



Şekil 6. Birecik Köprüsünün kemer kısmının ilk altı mod şekli



Şekil 7. Birecik Köprüsünün kiriş kısmının ilk altı mod şekli

4. YAPISAL ANALİZLER VE DEĞERLENDİRMELER

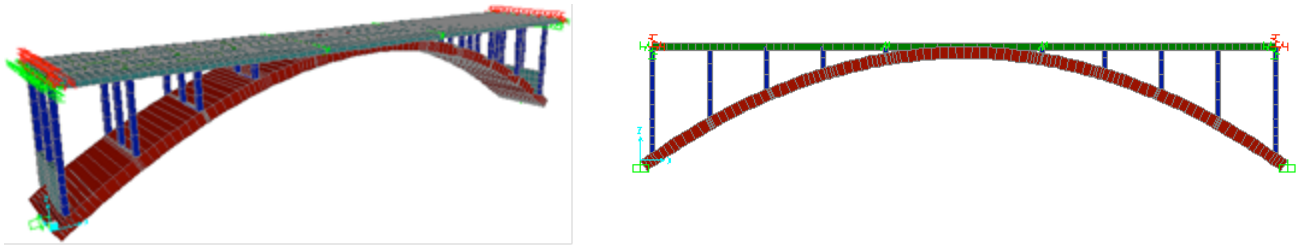
4.1. Köprünün Kemer Kısmının Yapısal Analizleri ve Değerlendirilmesi

Birecik Köprüsü'nün kemer taşıyıcı sisteme sahip ilk kısmının mevcut durumu için SAP2000 programında analitik model oluşturulmuş ve statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu modelin oluşturulmasında, rölöve işlemleri sonucunda elde edilen çizimlerdeki boyutlar dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri olarak ise ULTRA Yapı Malzemeleri ve Kalite Kontrol Beton Laboratuvarı Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerince köprüden alınan beton karot örneklerinden elde edilen basınç dayanımları, elastisite modülü değerleri ve birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınmıştır. Zemin özellikleri için ise ÖZBARAN Mühendislik Hizmetleri tarafından belirlenen zemin parametreleri seçilmiştir. Tablo 2'de köprünün analitik modelinin oluşturulmasında kullanılan malzemeler için dikkate alınan mekanik özellikler verilmektedir.

Tablo 2. Birecik Köprüsü'nün kemer kısmı için dikkate alınan malzeme özellikleri

Taşıyıcı Sistem Elemanları	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m^2)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m^3)
Kemer, Tabliye, Kolon, Kiriş, Temel	3.2E10	0.2	2450
Donatı	2.0E11	0.3	7850

Köprünün kemer kısmının yapısal davranışı en doğru bir şekilde belirlemek ve elde edilen analitik sonuçları deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıp köprünün sonlu eleman modelini hassas bir şekilde iyileştirmek amacıyla köprünün deneysel ölçümleri her bir kemerde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel ölçümler sonucunda her bir kemerin frekans aralığının birbirine paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu denenle, köprünün kemer kısmının başlangıç analitik modeli tek kemer kısım için oluşturulmuştur. Bu kemer kısmında deneysel ölçüm sonuçlarına göre yapılacak iyileştirmeler diğer kemerlere de aynı şekilde uygulanacak ve bütün model elde edilecektir. Köprünün başlangıç modelinde, kemerlerin temel ayaklara rijit olarak bağlandığı ve bu noktaların tam bağlı olduğu düşünülmüştür. Kemerler arasında kalan derz kısımları yatay, enine ve düşey doğrultuda belirli derecede ötelenme rijitliğine sahip bağlantı (link) elemanlarıyla modellenmiştir. Şekil 8'de köprüyü temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model verilmektedir.

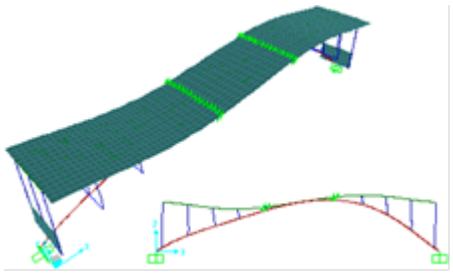


Şekil 8. Birecik Köprüsü'nün kemer kısmının mevcut durumu temsil eden analitik model

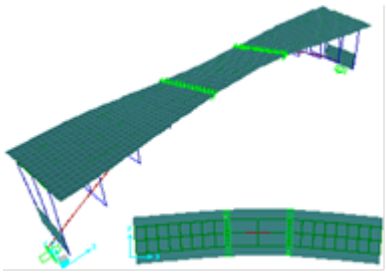
Birecik Köprüsünü temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik modelin modal analizi gerçekleştirilmiş ve köprünün doğal frekansları ile mod şekilleri belirlenmiştir. Tablo 3'te teorik analizlerden elde edilen frekans değerleri, Şekil 9'da teorik analizlerden elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Tablo 3'ten teorik frekanslar ile deneysel frekanslar arasında %34.7-%49.1 düzeyinde fark olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 6 ve 9 incelendiğinde teorik ve deneysel olarak elde edilen mod şekilleri arasında da sıralama açısından farklılıkların bulunduğu görülmektedir.

Tablo 3. Köprünün kemer kısmının başlangıç teorik ve deneysel doğal frekansları

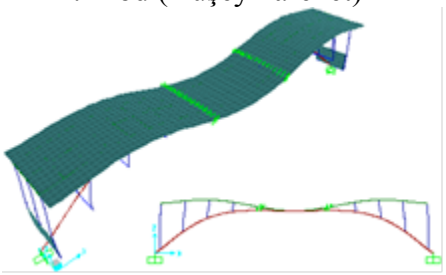
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)		Fark (%)
	Teorik	Deneysel	
1	3.940	2.496	36.7
2	4.770	3.115	34.7
3	5.190	3.378	34.9
4	8.920	4.545	49.1



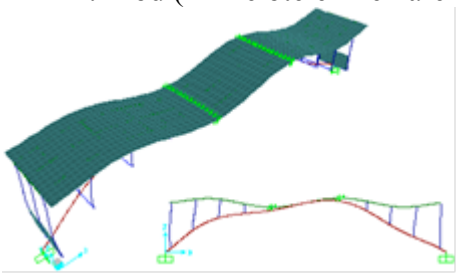
1. Mod (Düşey hareket)



2. Mod (Enine ötelenme hareketi)



3. Mod (Düşey hareket)



4. Mod (Düşey hareket)

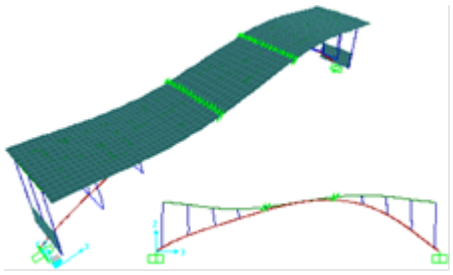
Şekil 9. Birecik Köprüsü'nün kemer kısmının teorik analizden elde edilen mod şekilleri

Birecik Köprüsü'nün kemer kısmını temsil etmek amacıyla oluşturulan başlangıç analitik modelinden elde edilen frekans değerleriyle deneysel frekans değerleri arasında oldukça fazla farklılıklar olduğu görülmektedir. Ayrıca, elde edilen mod şekilleri arasında da farklılıklar mevcuttur. Deneysel ölçüm sonuçları yapının mevcut durumunu yansıttığından dolayı, bu farklılıkları azaltacak şekilde başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işleminde köprünün saha incelemesinde karşılaşılan durumlar dikkate alınarak, kesitlerde, malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında değişiklikler yapılması gerekmektedir.

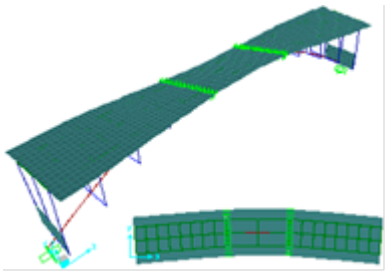
Birecik Köprüsü'nün kemer bölgesinde ve kolonlarından bölgesel çatlaklar, mesnet bölgesi ve derzlerde bozulmalar, kemer ayaklarında temel oyulmaları ve bazı kesitlerde korozyondan dolayı kabuk betonu kayıpları ile donatı erimesi oluşmuştur. Bu durum dikkate alınarak hasarlı bütün elemanların kesit değerleri azaltılmıştır. Ayrıca köprü ayaklarının oturduğu zeminde, kemerlerin oturduğu ayaklarda ve derz kısmındaki bağlılık oranları değiştirilmiştir. Belirtilen uygulamalar sonucunda Birecik Köprüsü'nün kemer kısmının iyileştirilmiş analitik modelinden elde edilen frekans değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Tablo 4'te deneysel ölçülen frekans değerleriyle karşılaştırma yapılmış ve kalibrasyon işleminin etkisi ortaya konulmuştur. Şekil 10'da kalibrasyon sonucu elde edilen analitik modelden elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Tablo 4 ve Şekil 10 detaylı olarak incelendiğinde, kalibrasyon işlemiyle birlikte deneysel ve teorik frekanslar arasındaki farklılıkların kabul edilebilir sınırlar içerisine kadar azaltıldığı ve mod şekillerin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Köprünün kemer kısmının kalibre edilmiş teorik doğal frekansları

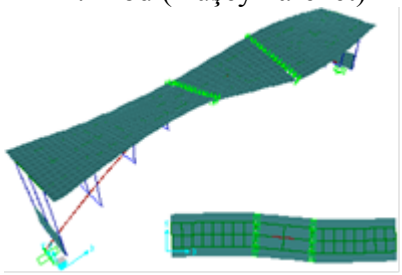
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)		Fark (%)
	Teorik	Deneysel	
1	2.490	2.496	0.60
2	3.050	3.115	2.08
3	3.950	3.378	14.4
4	4.300	4.545	5.39



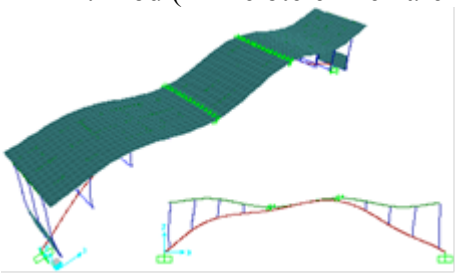
1. Mod (Düşey hareket)



2. Mod (Enine ötelenme hareketi)



3. Mod (Enine burulma hareketi)



4. Mod (Düşey hareket)

Şekil 10. Köprünün kemer kısmının kalibre edilmiş teorik analizden elde edilen mod şekilleri

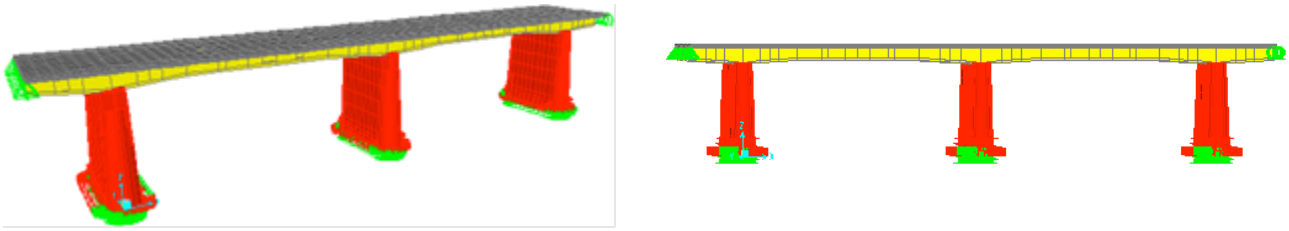
4.2. Köprünün Kiriş Kısmının Yapısal Analizleri ve Değerlendirilmesi

Birecik Köprüsü'nün kiriş taşıyıcı sisteme sahip ikinci kısmının mevcut durumu için SAP2000 programında analitik model oluşturulmuştur. Bu modelin oluşturulmasında, rölöve işlemleri sonucunda elde edilen çizimlerdeki boyutlar dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri olarak ise ULTRA Yapı Malzemeleri ve Kalite Kontrol Beton Laboratuvarı Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerince köprüden alınan beton karot örneklerinden elde edilen sonuçlara göre dikkate alınmıştır. Zemin özellikleri için ise ÖZBARAN Mühendislik Hizmetleri tarafından belirlenen zemin parametreleri seçilmiştir. Tablo 5'de köprünün analitik modelinin oluşturulmasında kullanılan malzemeler için dikkate alınan mekanik özellikler verilmektedir.

Tablo 5. Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmı için dikkate alınan malzeme özellikleri

Taşıyıcı Sistem Elemanları	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m^2)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m^3)
Tabliye, Kolon, Kiriş	3.0E10	0.2	2450
Temel	3.2E10	0.2	2450
Donatı	2.0E11	0.3	7850

Köprünün kiriş kısmının yapısal davranışını en doğru bir şekilde belirlemek ve elde edilen analitik sonuçları deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıp köprünün sonlu eleman modelini hassas bir şekilde iyileştirmek amacıyla köprünün deneysel ölçümleri mafsallar arasında kalan ve iki açıklık ile kenar çıkmalardan oluşan parçalarda ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel ölçümler sonucunda her bir açıklığın frekans aralıklarının birbirine paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu denenle, köprünün kiriş kısmının başlangıç analitik modeli tek parça (iki açıklık ve kenar çıkmalar) için oluşturulmuştur. Bu parça kısmında deneysel ölçüm sonuçlarına göre yapılacak iyileştirmeler diğer parçalara da de aynı şekilde uygulanacak ve bütün model elde edilecektir. Köprünün başlangıç modelinde, kolon ayakların zemine rijit olarak bağlandığı ve bu noktaların tam bağlı olduğu düşünülmüştür. Parça kısımlar arasında kalan derz kısımları yatay, enine ve düşey doğrultuda belirli derecede ötelenme rijitliğine sahip bağlantı (link) elemanlarıyla modellenmiştir. Şekil 11'de köprünün kirişli kısmını temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model verilmektedir.

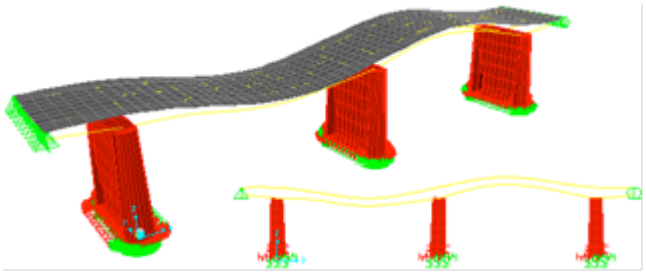


Şekil 11. Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmının mevcut durumu temsil eden analitik model

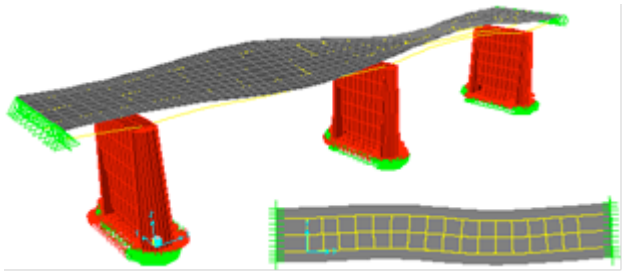
Birecik Köprüsünün kiriş kısmını temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik modelin modal analizi gerçekleştirilmiş ve köprünün doğal frekansları ile mod şekilleri belirlenmiştir. Tablo 6'da teorik analizlerden elde edilen frekans değerleri, Şekil 12'de teorik analizlerden elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Tablo 6'dan teorik frekanslar ile deneysel frekanslar arasında %30.5-%46.7 düzeyinde fark olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 7 ve 12 incelendiğinde teorik ve deneysel olarak elde edilen mod şekilleri arasında da sıralama açısından farklılıkların bulunduğu görülmektedir.

Tablo 6. Köprünün kiriş kısmının başlangıç teorik ve deneysel doğal frekansları

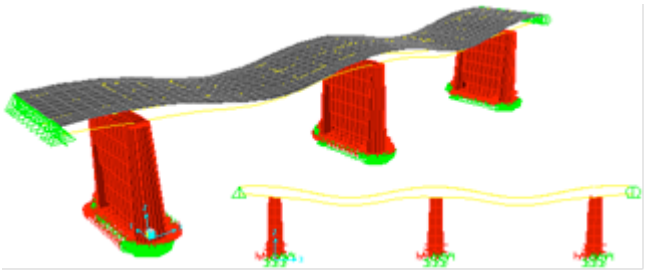
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)		Fark (%)
	Teorik	Deneysel	
1	5.770	3.078	46.7
2	7.470	4.265	42.9
3	8.670	5.287	39.0
4	9.400	6.530	30.5



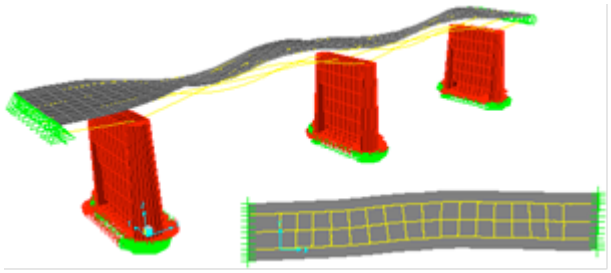
1. Mod (Düşey hareket)



2. Mod (Enine burulma hareketi)



3. Mod (Düşey hareket)



4. Mod (Enine ötelenme hareketi)

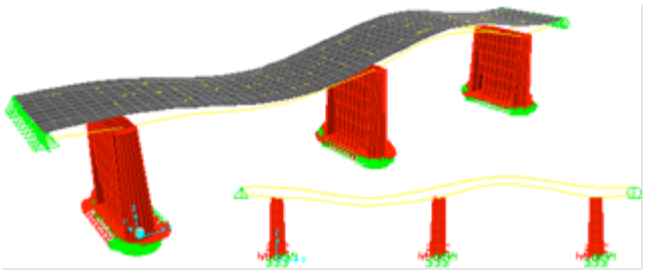
Şekil 12. Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmının teorik analizden elde edilen mod şekilleri

Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmını temsil etmek amacıyla oluşturulan başlangıç analitik modelinden elde edilen frekans değerleriyle deneysel frekans değerleri arasında oldukça fazla farklılıklar olduğu görülmektedir. Ayrıca, elde edilen mod şekilleri arasında da farklılıklar mevcuttur. Deneysel ölçüm sonuçları yapının mevcut durumunu yansıttığından dolayı, bu farklılıkları azaltacak şekilde başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işleminde köprünün saha incelemesinde karşılaşılan durumları dikkate alınarak, kesitlerde, malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında değişiklikler yapılması gerekmektedir. Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmında, kiriş ve kolonlarda bölgesel çatlaklar, mesnet bölgesi ve derzlerde bozulmalar ve bazı kesitlerde korozyondan dolayı kabuk betonu kayıpları ile donatı erimesi oluşmuştur. Bu durumlar dikkate alınarak hasarlı bütün elemanların kesit değerleri azaltılmıştır. Ayrıca köprü ayaklarının oturduğu zeminde, kemerlerin oturduğu ayaklarda ve derz kısmındaki bağlılık oranları değiştirilmiştir.

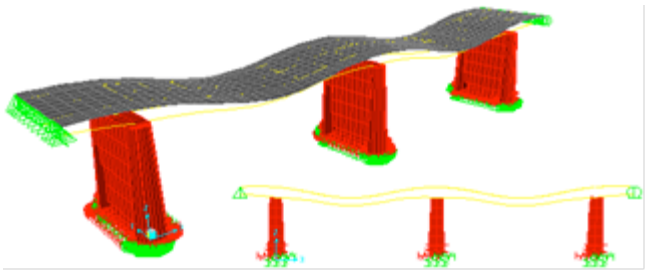
Yukarıda belirtilen uygulamalar sonucunda Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmının iyileştirilmiş analitik modelinden elde edilen frekans değerleri Tablo 7'de verilmektedir. Tablo 7'de deneysel ölçülen frekans değerleriyle karşılaştırma yapılmış ve kalibrasyon işleminin etkisi ortaya konulmuştur. Şekil 13'te kalibrasyon sonucu elde edilen analitik modelden elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Tablo 7 ve Şekil 13 detaylı olarak incelendiğinde, kalibrasyon işlemiyle birlikte deneysel ve teorik frekanslar arasındaki farklılıkların kabul edilebilir sınırlar içerisine kadar azaltıldığı ve mod şekillerin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Köprünün kiriş kısmının kalibre edilmiş teorik doğal frekansları

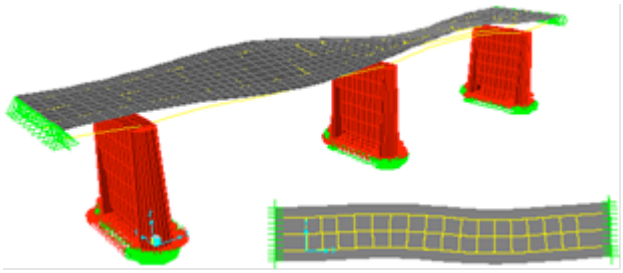
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)		Fark (%)
	Teorik	Deneysel	
1	3.000	3.078	2.53
2	4.920	4.265	13.3
3	4.540	5.287	14.1
4	6.690	6.530	2.39



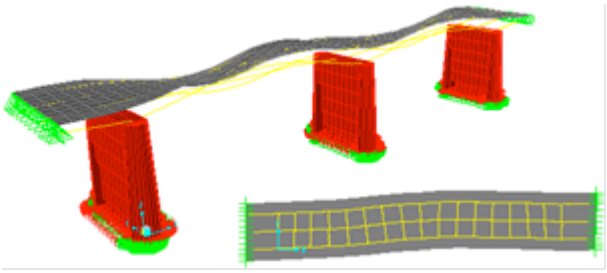
1. Mod (Düşey hareket)



2. Mod (Düşey hareket)



3. Mod (Enine burulma hareketi)

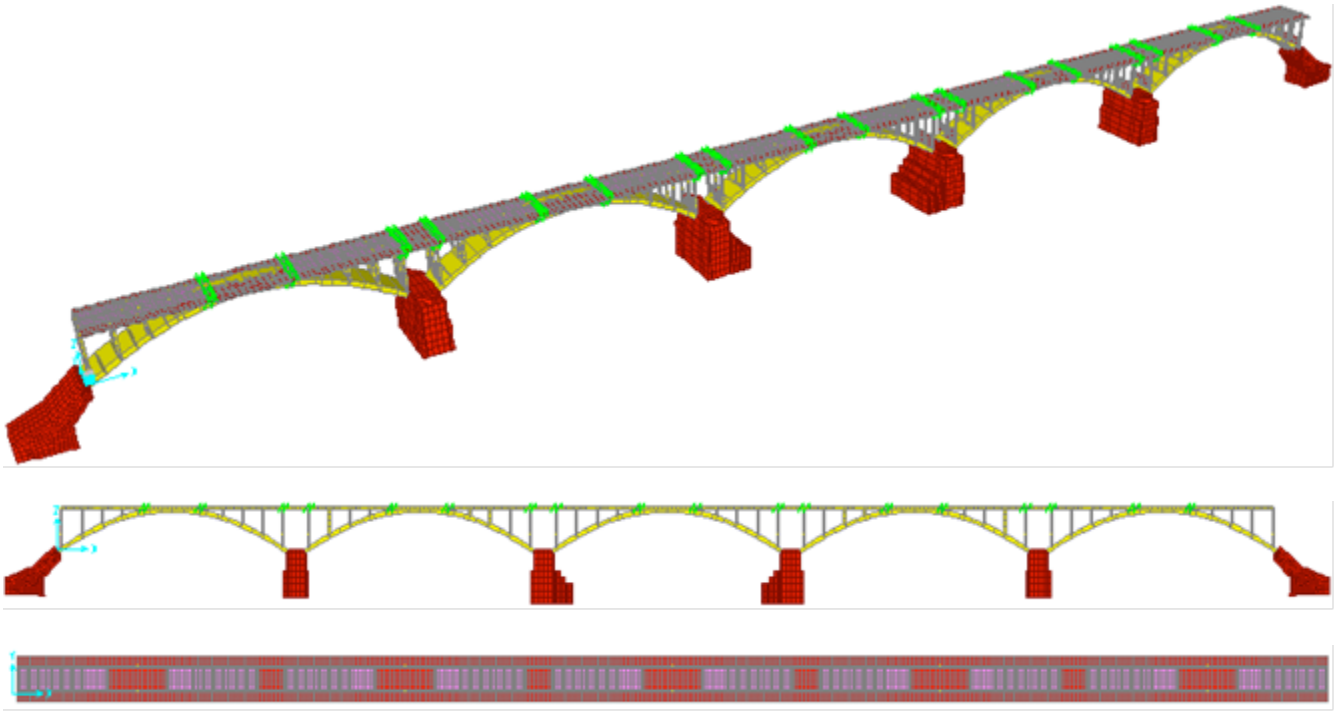


4. Mod (Enine ötelenme hareketi)

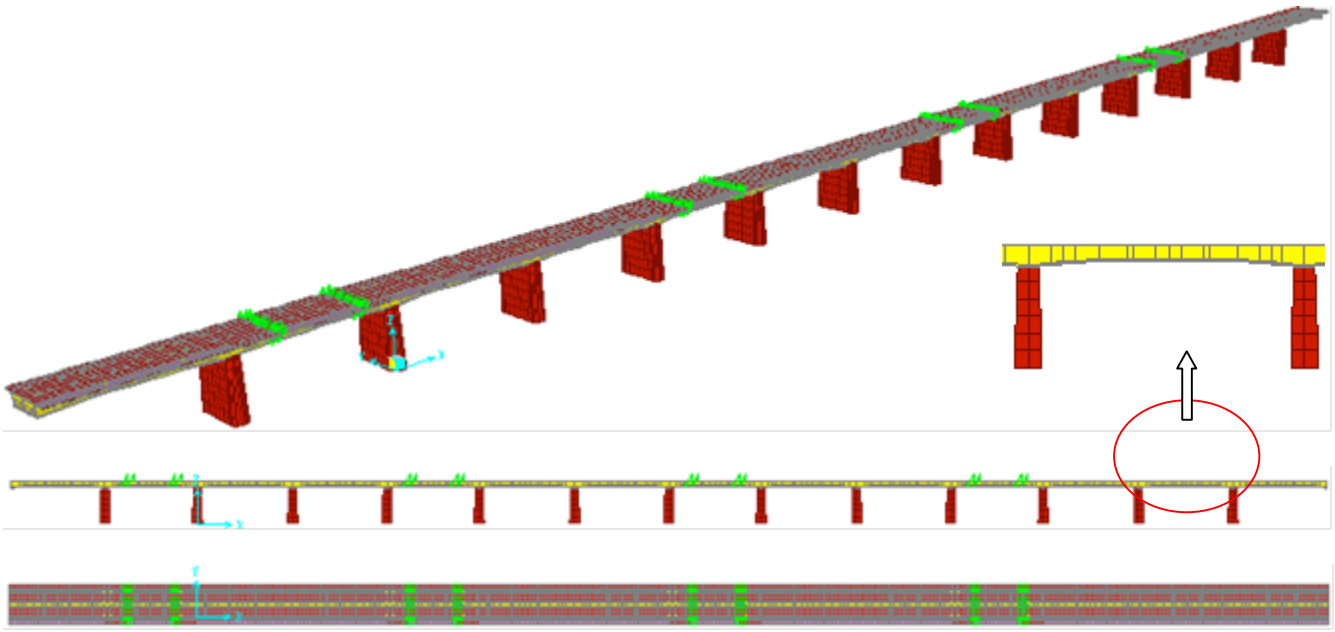
Şekil 13. Köprünün kiriş kısmının kalibre edilmiş teorik analizden elde edilen mod şekilleri

Birecik Köprüsü'nün kemer kısmı 5 adet kemerden oluşmaktadır. Kemerler arasında kalan kısımlar derzli tabliye elemanlarıyla projelendirilmiştir. Yukarıda detaylı olarak açıklanmaya çalışılan, teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda kalibre edilen bir tane köprü kemeri kullanılarak Birecik Köprüsü'nün kemer kısmının (Birecik tarafında kalan ilk kısım) sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kemer kısmının tamamının sonlu eleman modeli ve modele ait çeşitli görünüşler Şekil 14'te verilmektedir. Şekil 14'te verilen sonlu eleman modelinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır.

Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmı ise toplam 14 açıklıktan oluşmaktadır. Açıklıklar arasında simetrik olarak yerleştirilen 3 mafsal kısmı bulunmakta olup, her bir açıklık ortalama 26m uzunluğundadır. Yukarıda detaylı olarak açıklanmaya çalışılan, teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda kalibre edilen bir adet köprü kiriş parçası (iki adet açıklık ve kenar çıkmalar) kullanılarak Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmının (Gaziantep tarafında kalan ikinci kısım) sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kiriş kısmının tamamının sonlu eleman modeli ve modele ait çeşitli görünüşler Şekil 15'te verilmektedir. Şekil 15'te verilen sonlu eleman modelinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır.



Şekil 14. Birecik Köprüsü'nün kemer kısmının kalibre edilmiş tek kemer özellikleri kullanılarak elde edilen sonlu eleman modeli



Şekil 15. Birecik Köprüsü'nün kiriş kısmının kalibre edilmiş kısmı kullanılarak elde edilen sonlu eleman modeli

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Şanlıurfa'nın Birecik ilçesinde bulunan Birecik Köprüsü'nün yapısal davranışlarının teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Birecik Köprüsü, kemer taşıyıcı sisteme sahip ilk kemer kısım ve kiriş taşıyıcı sisteme sahip ikinci kısım olmak üzere başlıca iki kısma ayrılmaktadır. Birecik tarafında kalan ilk kısım alttan kemer taşıyıcı sisteme sahip olup, toplam 5 kemerden oluşmaktadır. Köprünün Gaziantep tarafında kalan ikinci kısmı ise değişken kesitli kirişli taşıyıcı sisteme sahip olup, toplam 14 açıklıktan oluşmaktadır. Köprünün ayakları, kolon, kiriş, kemer ve tabliyesi betonarme olarak inşa edilmiştir. Birecik Köprüsü'nün hazırlanan analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

Köprünün Kemer Taşıyıcı Sisteme Sahip İlk Kısmı İçin Elde Edilen Sonuçlar:

- Günümüze kadar köprü kemer taşıyıcı sistemi üzerinde resmi kayıtlara yansıyan herhangi bir restorasyon çalışması yapılmamıştır. Sadece belirli aralıklar ile köprüde boyama çalışmalarının yapıldığı tespit edilmiştir. Bölgedeki kişilerle de yapılan görüşmelerde köprüde taşıyıcı sistemini iyileştirmek amacıyla herhangi bir restorasyon çalışması yapılmadığı öğrenilmiştir. Gerekli bakımların yapılmamasından dolayı köprüde restorasyon yapılması zorunlu hale gelmiştir.
- Birecik Köprüsü'nden bölgede hizmet veren ULTRA Yapı Malzemeleri ve Kalite Kontrol Beton Laboratuvarı Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerince alınan karot örneklerinden elde edilen mekanik değerlere göre kemer kısmı beton sınıfının C25-C30 arasında olduğu görülmektedir.
- Köprüde çevresel titreşim şartları altında modal test ölçümü gerçekleştirilmiştir. Köprü üzerindeki ölçümde toplam 11 adet sismik ivmeölçer kullanılmıştır. Köprünün 0-12.50Hz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümünden elde edilen sinyallerin Fourier dönüşümleri yapılmış ve spektrumlar elde edilmiştir. Köprünün kemer kısmının deneysel olarak ölçülen ilk beş frekansı 2.496-5.258Hz aralığında belirlenmiştir.
- Köprünün kemer kısmının SAP2000 programında oluşturulan başlangıç analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizden, köprünün ilk beş frekansı 3.940-9.530Hz aralığında belirlenmiştir.

- Teorik ve deneysel frekanslar arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiş ve köprünün başlangıç analitik modeli kalibre edilmiştir. Köprünün kemer kısmının hasar gören kesitleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen işlem sonucunda köprünün mevcut durumunu en iyi yansıtan analitik model elde edilmiştir.

Köprünün Kiriş Taşıyıcı Sisteme Sahip İkinci Kısmı İçin Elde Edilen Sonuçlar:

- Günümüze kadar köprü kiriş taşıyıcı sistemi üzerinde resmi kayıtlara yansıyan herhangi bir restorasyon çalışması yapılmamıştır. Sadece belirli aralıklar ile köprüde boyama çalışmalarının yapıldığı tespit edilmiştir. Bölgedeki kişilerle de yapılan görüşmelerde köprüde taşıyıcı sistemi iyileştirmek amacıyla herhangi bir restorasyon çalışması yapılmadığı öğrenilmiştir.
- Birecik Köprüsü'nden bölgede hizmet veren ULTRA Yapı Malzemeleri ve Kalite Kontrol Beton Laboratuvarı Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. yetkililerince alınan karot örneklerinden elde edilen mekanik değerlere göre kiriş kısmı beton sınıfının C20-C30 arasında olduğu görülmektedir. Sadece, kiriş taşıyıcı sisteme sahip kısmın altıncı açıklığından alınan numunelerin basınç dayanımı 14MPa olarak elde edilmiştir. Yerinde yapılan incelemeler ve çevreden edinilen bilgilerden de köprünün üzerinde 3-4 yıl önce bir kaza meydana geldiği ve benzin yüklü bir aracın bu açıklıktan aşağıya uçup yandığı belirtilmiştir.
- Köprüde çevresel titreşim şartları altında modal test ölçümü gerçekleştirilmiştir. Köprü üzerindeki ölçümde toplam 11 adet sismik ivmeölçer kullanılmıştır. Köprünün 0-12.50Hz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümünden elde edilen sinyallerin Fourier dönüşümleri yapılmış ve spektrumlar elde edilmiştir. Köprünün kiriş kısmının deneysel olarak ölçülen ilk dört frekansı 3.078-6.530Hz aralığında belirlenmiştir.
- Köprünün kiriş kısmının SAP2000 programında oluşturulan başlangıç analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizden, köprünün ilk dört frekansı 5.770-9.400Hz aralığında belirlenmiştir.
- Teorik ve deneysel frekanslar arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiş ve köprünün başlangıç analitik modeli kalibre edilmiştir. Köprünün kiriş kısmının hasar gören kesitleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen işlem sonucunda köprünün mevcut durumunu en iyi yansıtan analitik model elde edilmiştir.

Birecik Köprüsü'nün kemer ve kiriş taşıyıcı sisteme sahip birinci ve ikinci kısımlarının analizleri sonucunda köprüde bulunan mafsal bölgelerinin daha fazla zorlandığı görülmektedir. Köprü üzerinde yapılan incelemeler ve deneysel ölçümler sırasında ağır tonajlı araçların geçişi sırasında bu bölgelerde vuruntuların meydana gelmesi analiz sonuçlarını desteklemektedir.

KAYNAKLAR

Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Sevim, B. (2011). Output-only system identification of post tensioned segmental concrete highway bridge. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, **16:2**, 259-266.

Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T. (2010). Finite element model updating of Kömürhan highway bridge based on experimental measurements. *Smart Structures and Systems*, **6:4**, 373-388.

OMA. (2006). *Operational Modal Analysis*, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.

PULSE. (2006). *Analyzers and Solutions*, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.

Ren, W.X., Zhao, T. ve Harik, I.E. (2004). Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge. *Journal of Structural Engineering* ASCE, **130**, 1022-1031.

Whelan, M.J., Gangone, M.V., Janoyan, K.D. ve Jha, R. (2009). Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge. *Engineering Structures*, **31**, 2224-2235.