

## 199+325 çelik demiryolu köprüsünün sistem tanımlama çalışmaları ve kalibre sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

### System identification work on 199+325 steel railroad bridge and development of its calibrated finite element model

Özgür ÖZÇELİK<sup>1\*</sup>, Özgür GİRGIN<sup>2</sup>, Carmen AMADDEO<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

ozgur.ozcelik@deu.edu.tr, 0909ozgur@gmail.com

<sup>3</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

carmen.amaddeo@ieu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.08.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 18.01.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.67878

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Ülkemizde bulunan demiryolu köprüleri TCDD tarafından işletilen demiryolu ağlarının en önemli bağlantı ve geçit noktalarını oluşturmakta ve bu köprülerin büyük bir kısmı 100 yılı aşkın süredir hizmet vermektedir. Bu köprüler diğer köprülere kıyasla (karayolu, yolu köprüleri) daha ağır yüklerle ve köprünün dinamik özelliklerini değiştirebilen etkilere maruz kalmaktadır. Bu sebeplerden dolayı demiryolu köprülerinin TCDD tarafından rutin olarak gerçekleştirilen bakım ve onarım çalışmaları önem arz etmektedir. TCDD tarafından gerçekleştirilen umumi ve periyodik kontrol yöntemleri, gözleme dayanan ve tekniği uygulayan kişilerin deneyimine bağlı yöntemlerdir. Bu yüzden bu çalışmalarda hata yapma olasılığı fazla olup gizli hasarların tespit edilmesi de güç olmaktadır. Titreşim tabanlı yapı sağlığının izlenmesi yöntemleri gözleme dayalı olarak yapılan demiryolu köprülerinin bakım ve onarım çalışmaları için daha nesnel bir değerlendirme yöntemidir. Bu çalışma Usak il sınırında bulunan ve TCDD tarafından işletilen 199+325 çelik demiryolu köprüsünün yerinde yapılan deneysel çalışmalar ile modal parametrelerinin tahmin edilmesini ve köprünün referans sayısal modelinin geliştirilmesi çalışmalarını içermektedir. Köprünün dinamik tepkisi 2 farklı ortam sıcaklığında ve ortamsal titreşim koşulları altında 4 farklı deney kurulumu ile ölçülmüştür. Modal parametreler ise 2 farklı sadece-çıkıtı tabanlı sistem tanımlama yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Bunlardan ilki İyileştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) ikincisi ise Veri Tabanlı Stokastik Altalan Tanımlama (Data-driven Stochastic Subspace Identification, SSI-DATA) yöntemleridir. İki farklı sıcaklık koşulunda elde edilen sonuçlar, modal parametre tahmin sonuçlarındaki sıcaklık değişiminin etkilerini değerlendirmek için karşılaştırılmıştır. Köprünün başlangıç sonlu elemanlar modeli Matlab tabanlı FEDEASLab sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulmuş ve deneme-yanılma yöntemi ile kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece köprünün mevcut durumunu yansıtan referans bir sayısal model oluşturulmuştur. Bu model ileride sonlu elemanlar modeli güncelleme tabanlı hasar tespitinde kullanılabilir.

**Anahtar kelimeler:** Çelik demiryolu köprüsü, Modal parametre tahmini, Operasyonel modal analiz, Ortamsal titreşim testleri, Sonlu elemanlar modeli güncelleme

#### Abstract

Railroad bridges maintained and operated by the State Road Agency (TCDD) constitute the main passage ways and junction points of the railroad network of the country. Most of these bridges have been under service for more than 100 years. These bridges are exposed to larger service loads as compared to the highway bridges, and are open to external actions leading to changes in their dynamic parameters. Due to these reasons, the railroad bridges must routinely be checked and serviced. The routine checks done by TCDD are based on visual inspection, and highly subjective and dependent on the technician's experience. This increases the chance of making mistakes and missing hidden structural damages. Vibration-based structural health monitoring offers a more objective framework which has the potential to reduce operator dependent nature of the routine checks. This study presents modal parameter estimation studies by in-situ experiments and a developed reference numerical model of the 199+325 steel railway bridge located in Usak. The dynamic response of the bridge was measured in four different test setups and in two different temperature states, and under ambient vibration conditions. Modal parameters of the bridge are estimated using two different output-only system identification methods, namely, Enhanced Frequency Domain Decomposition and Data-driven Stochastic Subspace Identification methods. The identification results obtained under different temperature conditions are compared in assessing the effects of temperature change in identification results. Three dimensional finite element model of the bridge is created using FEDEASLab software. Trial-and-error type model updating study is conducted. Therefore a reference numerical model of the bridge representing its current condition is obtained. This model will be facilitated in the future for damage identification purpose using the sensitivity based finite element modeling updating method.

**Keywords:** Steel railroad bridges, Modal parameter estimation, Operational modal analysis, Ambient vibration tests, Finite element model updating

## 1 Giriş

Ülkemizde demiryolu inşaatları 19. yüzyılda Osmanlı İmparatorluğu zamanında başlamıştır. Demiryolu ağının en önemli bağlantı noktalarından olan köprüler de yine o dönemde inşa edilmeye başlanmıştır. Demiryolu ağı içerisinde 100 yılı aşkın süredir hizmet vermekte olan birçok köprü bulunmaktadır. Bahse konu bu köprülerin çok uzun sürelerdir

kullanımda olmaları, artan dingil basınçları altında çalışmaları ve çevresel koşulların yarattığı zorlayıcı durumlar nedeniyle, yapısal sistemlerini zorlayan etkiler altında kalmaktadırlar. Bu köprülerin işletim, bakım ve onarımından sorumlu olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) farklı sıklıklarda yapılan kontroller ile yapı sağlığının devamlılığı konusunda çalışmalar sürdürmektedir. Yapılan kontroller gözlemsel olup özellikle seyrüseferin duraklamaya

uğramaması açısından önemlidir. Bunlar ilkbahar ve sonbaharda olmak yılda iki kez yapılan umumi kontroller ve altı yılda bir Nisan-Ağustos dönemi arasında yapılan periyodik kontrollerdir. Ayrıca herhangi bir doğal afet sonrasında da afet sonrası köprünün durumu ile ilgili münferit kontroller yapılmaktadır. Gözle yapılan bu tür kontroller doğası gereği saklı/gizli kalmış hasarları gözden kaçırmaktadır. Gözlem yoluyla yapılan bir hasarın bulunabilmesi için hasarın gözle görülebilir boyutlara ulaşması gerekmektedir. Böyle bir durumda ise hasarın tespiti için geç kalınmış olunabilir. Bu duruma örnek olarak 2012 yılında meydana gelen Filyos çayı köprüsünün göçmesi olayı gösterilebilir. Göçme olayı köprüde gelişmiş olan hasarın zamanında tespit edilememesine bağlı gerçekleşmiştir.

Literatürde, titreşim tabanlı yapı sağlığı izleme (YSİ) yöntemleri üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Köprü türü yapılarda gerçekleştirilen yapı sağlığı izleme çalışmaları son 20 yılda popülerliğini artmış olan bir alandır. Konuyla ilgili literatüre ilişkin kısa bir değerlendirme burada sunulmuştur. I-40 köprüsünde yapılan çalışmada [1] köprünün dinamik parametrelerini elde etmede ortamsal titreşim verisinin kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. Köprü üzerindeki trafikten kaynaklanan ortamsal titreşim verisi kullanılarak elde edilen ve köprüde sarsıcılar ile yaratılan zorlanmış titreşim verisi kullanılarak elde edilen köprüye ait modal parametrelerin birbirine yakın olduğu bulgulanmıştır. Bu şekilde tahribatsız olarak köprünün dinamik parametrelerini elde etmek amacıyla ortamsal titreşim verisinin kullanılmasının uygunluğu deneysel olarak doğrulanmıştır.

Tarihi bir demiryolu çelik köprüsünün durum tespiti için gerçekleştirilen deneysel ve analitik bir çalışmada ise tarihi bir köprünün sismik ve deprem yüklerini taşıma kapasitesi belirlenmiş ve köprü analitik modeli statik ve dinamik saha ölçümlerine göre güncellenmiştir [2]. Bir trenin geçişinden hemen sonra oluşan serbest titreşim verisinin kullanılabilirliğine ilişkin değerlendirmelerde bulunulmuştur [3]. Bir başka çalışmada ise yine bir çelik demiryolu köprüsünün modal özelliklerini tahmin etmek için serbest titreşim testleri yapılmış ve daha sonra köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin doğrulaması (validation) gerçekleştirilmiştir [4].

199+325 demiryolu köprüsü üzerinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi tarafından analitik, yerinde dinamik ölçüm ve deneysel çalışmalar yürütülmüş ve sonuçlar [5] yüksek lisans tezinde sunulmuştur. Çalışmada, 2 ve 3 boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, bu modeller kullanılarak kapasite ve güvenilirlik analizleri hesaplamaları gerçekleştirilmiş, tren katar ve deprem yükleri altında köprüdeki yapısal elemanların durumu incelenmiştir. Ancak bunun için kullanılan sonlu elemanlar modelinin yerinde yapılan ölçümler kullanılarak yapılan kalibrasyonuna ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca az sayıda ivmeölçer kullanıldığı için sınırlı sayıda düşey moda ilişkin modal parametre değerleri tahmin edilebilmiştir. Tezde, toplanan ivme verisinin oldukça gürültülü olduğu da belirtilmiştir. Bu durumun modal parametre tahminindeki belirsizliği artıran bir faktör olduğu bilinmektedir [6],[7]. Ölçümler sırasında rüzgâr, sıcaklık ve nem ölçümleri alınmış; ancak bu faktörlerin modal parametrelerin tahmininde oluşturduğu etki incelenmemiştir. Bu çalışmada değerlendirmeye alınmayan çevresel etkiler ve modal analiz amaçlı deneylerin çözünürlüğü göz önüne

alındığında 199+325 köprüsü üzerinde YSİ çalışmalarının yürütülmesinin faydalı olacağı görülmektedir.

199+325 çelik demiryolu köprüsü Uşak il sınırında TCDD tarafından işletilen Basmane-Dumlupınar hattının 199. kilometresi üzerinde ve maksimum yüksekliği 50 m olan bir vadi geçidinde yer almaktadır. Köprünün projesi Fransızlar tarafından 1896 yılında yapılmış, 19. yüzyılın sonunda ise inşa edilmiştir. Köprü toplamda 6 açıklığa sahip olup, her bir açıklığın uzunluğu 30 m, köprünün toplamdaki uzunluğu ise 180 m'dir. Köprü 3.2 m genişliğinde olup, 5 adet farklı yüksekliğe sahip kolon ayağına ve 300 m yarıçaplı yatay ve %2.5 değerinde düşey kurb eğimlerine sahiptir. Köprü Kurtuluş Savaşı döneminde hasar gördüğü ve ilerleyen dönemlerde yapılan tamir çalışmaları ile yeniden işler duruma getirildiği bilinmektedir.

Köprünün her bir kafes girişinin yüksekliği 4.5 m olup her bir açıklık iki ana makastan oluşmaktadır. Bu makaslar birbirlerine enleme girişleri ve stabilite çaprazları ile bağlanmaktadır. Köprü üzerinde S46 tipi raylar bulunmakta olup köprü girişinden 6 m önce ve köprü çıkışından 6 m sonra olmak üzere trenin köprü üzerinden geçişi esnasında köprü üzerindeyken devrilmesini önlemek amacıyla S30 tipi kontra-raylara sahiptir. Bu ray ve ahşap traversler enleme girişlerinin üzerinde bulunan boylama girişlerin (stringers) üzerine oturmaktadır. Makaslar, bir ucunda sabit bir ucunda hareketli mesnet bulunan basit mesnetli giriş davranışı gösterecek şekilde kolon ayaklarına mesnetlenmiştir. Makasların oturduğu kolon ayakları ise 4 noktadan kâgir mesnetler üzerine oturtulmuş ve bu 4 noktanın ikisi bir yönde hareketli, biri iki yönde hareketli ve biride sabit mesnet olarak tasarlanmış, uzun rotlar/ankraj çubukları ile düşeyde kâgir temele ankre edilmiştir [8]. Köprünün Alaşehir tarafından çekilmiş güncel bir görüntüsü Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 2'de ise köprüyü oluşturan taşıyıcı elemanlar daha detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 1: 199+325 Çelik demiryolu köprüsü genel görünümü.

Bu çalışmada 199+325 çelik demiryolu köprüsü üzerinde ortamsal titreşim testleri yapılmış ve operasyonel modal analiz yöntemleri (sadece-çıkı yöntemleri) ile köprünün modal parametreleri (doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) kış ve ilkbahar mevsim koşulları için tahmin edilmiştir; böylece mevsimsel değişikliklerin tahmin sonuçlarına etkileri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak 199+325 çelik demir yolu köprüsünün sonlu elemanlar modeli deneme-yanılma yöntemiyle kalibre edilerek, köprünün mevcut durumunu gerçekçi olarak yansıtan bir sayısal model oluşturulmuştur. Bu sayısal modelin ileride sonlu elemanlar güncellenmesi tabanlı hasar tespit yöntemi ile kullanılması planlanmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2: 199+325 Çelik demiryolu köprüsü detay görüntüleri.

(a): Açıklık makası mesnet detayı, (b): Köprü'nün tek açıklığına ait taşıyıcı sistem görüntüsü, (c): Kolon ayaklarının oturduğu kâgir temel detayı, (d): Kolon ayaklarının kâgir temel içerisindeki bağlantı detayı.

## 2 Sistem tanımlama yöntemleri

Köprü'nün iki farklı ortamsal sıcaklığa karşılık gelen modal parametrelerini tahmin etmek için iki farklı sadece-çıkı (output-only) tabanlı sistem tanımlama yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan ilki İyileştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) ikincisi ise Veri Tabanlı Stokastik Alt-alan Tanımlama (Data-driven Stochastic Subspace Identification, SSI-DATA) yöntemleridir. EFDD ve SSI-DATA yöntemleri ARTEMIS® operasyonel modal analiz yazılımı içerisinde mevcuttur [9].

### 2.1 İyileştirilmiş frekans tanım alanında ayırıştırma yöntemi (EFDD)

EFDD [10] yöntemine göre, ivmeölçer ile ölçülen ivme tepkisi frekans tanım alanında oluşturulan spektral matrislere tekil değer ayrışımı (SVD) yapılarak modal parametrelerin tahmini yapılmaktadır. Ortamsal titreşim (ambient vibration) gibi yapısal sistemi tahrik eden etkinin geniş-bantlı olduğu kabulü ve sistemin düşük sönüm değerlerine sahip olması durumlarında, her bir tekil değer sistemin tek bir moduna karşılık gelen oto-spektral yoğunluk fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Frekans tanım alanında oluşturulan ve tek serbestlik dereceli sistemlere karşılık gelen oto-spektral yoğunluk fonksiyonlarına, ters Fourier dönüşümü uygulanarak modal parametre tahminleri gerçekleştirilmektedir.

### 2.2 Veri tabanlı stokastik alt-alan tanımlama yöntemi (SSI-DATA)

SSI-DATA [11] yöntemine göre yapısal sistemin ivme tepkisi temel alınarak, state-space formunda oluşturulan matematiksel modelden faydalanılmaktadır. Ölçülen ivme tepkilerinden oluşturulan Hankel matrisinin yatay olarak iki parçaya ayrıştırılmasıyla elde edilen "geçmiş" ve "gelecek" çıktı alt-matrislerinin oluşturduğu projeksiyon matrisi, gözlemlenebilirlik ile Kalman durum matrisinin çarpımından oluşmaktadır. Projeksiyon matrisinin tekil değer ayrışımı ile birlikte elde edilen tekil değerler ve bu tekil değerlere karşılık gelen vektörlerden modal parametrelerin tahminleri gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem model tabanlı olduğundan tahmin aşamasında alt-uzay boyutuna (model order) göre karakterize edilen blok Hankel matrisi, artan alt-uzay boyutları için tekrarlanarak oluşturulan stabilizasyon diyagramı vasıtasıyla sayısal ve fiziksel modlar birbirinden ayrıştırılabilmektedir. Bu yönüyle SSI-Data EFDD'ye göre daha üstündür.

## 3 Saha çalışmaları

Bahsi geçen köprü üzerinde farklı çevresel etkilerin köprü modal parametreleri üzerindeki değişimini inceleyebilmek için iki farklı mevsim koşuluna karşılık gelen ölçümler alınmıştır (Şekil 3). Köprü testlerini gerçekleştirmeden önce ivmeölçerleri köprü'nün hangi kısmına ve hangi doğrultuda yerleştireceğimizi belirleyen ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar köprü'nün ön sonlu elemanlarından elde edilen modal analiz sonuçları dikkate alınarak yapılmıştır. Buradaki önemli nokta ivmeölçerlerin köprü'nün mümkün olduğunca çok sayıda moduna ait hareketini tespit edecek şekilde yerleştirilmesidir. Testlerde kullanılan ivmeölçerler tek eksenli olduğu için köprü'nün hem ana eksenine dik yatay hem de düşey yöndeki modal değerlerini elde edebilmek için oluşturulan ön sonlu



elemanlar modelinden yararlanılarak en uygun çözümü veren sensör yerleşim planı oluşturulmuştur.



(a)



(b)

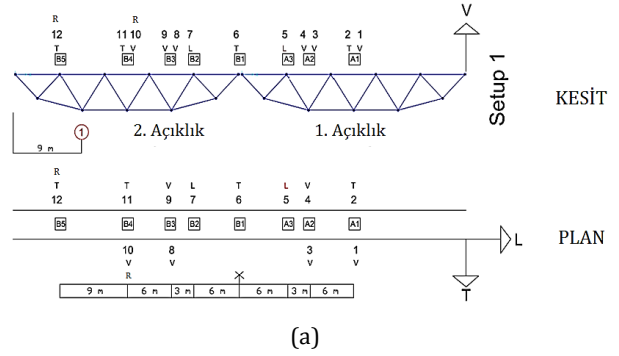
Şekil 3(a): Kış ve (b): İlkbahar dönemlerine karşılık gelen yerinde ölçüm çalışmalarına ait görseller.

Köprü'nün toplam uzunluğu 180 m olduğu için mevcut test altyapısı ile tek seferde ölçüm almak mümkün olmamaktadır. Bu yüzden çalışma planları dört farklı kurulum (setup) için gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışma planları Şekil 4'te gösterilmektedir.

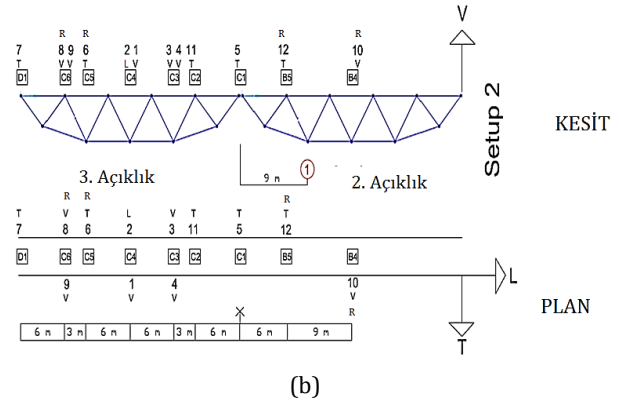
Şekillerde siyah kutucuklar ölçüm istasyonlarını göstermektedir ve bazı istasyonlarda düşey (V), bazı istasyonlarda yatay (T), bazı istasyonlarda da hem yatay hem de düşey yönde ölçüm almak üzere ölçüm istasyonları belirlenmiştir. İstasyonları gösteren siyah kutucukların üstünde, V harfiyle düşey, T harfiyle yatay ve L harfiyle köprü'nün boyuna doğrultusunda ölçüm almak üzere yerleştirilecek olan ivmeölçerler gösterilmektedir. Mevcutta 16 kanaldan veri alabilen ve 12 adet ivmeölçerden oluşan dinamik ölçüm sistemi olduğundan her deney kurulumunda 12 adet ivmeölçer kullanılmış olup numaraları istasyon kutucukları üzerinde gösterilmiştir. Köprü'nün uzunluğundan dolayı tek seferde ölçüm almak mümkün olmadığından, test düzeneği arasında veri bağlantısını sağlayacak referans ivmeölçerler kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterilen ölçüm planlarında R harfi ile ilgili ivmeölçerin referans ivmeölçer olduğunu belirtmektedir.

İki farklı mevsim koşulu için bahsi geçen ve dört farklı deney kurulumundan (setuptan) oluşan saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Her bir test düzeneğinde yaklaşık 25

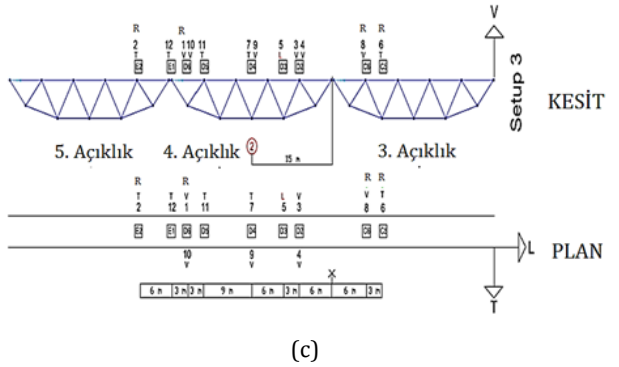
dakikalık ortamsal titreşim verisi setuplara uygun yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla köprü'nün bütününe ilişkin ivme verisi toplanmış ve yine köprü'nün bütününe ait modal parametre tahminleri operasyonel modal analiz uygulamalarında kullanılan ARTeMIS® programı kullanılarak yapılmıştır.



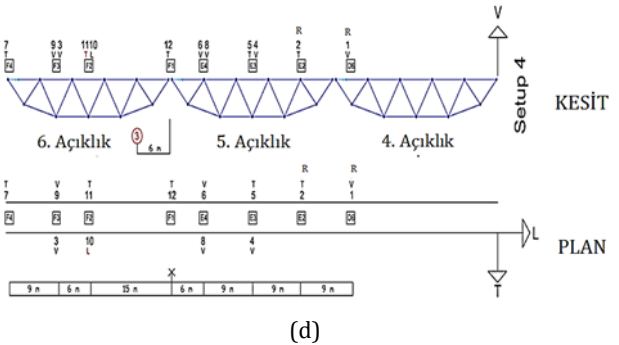
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4(a): Setup 1, (b): Setup 2, (c): Setup 3, ve (d): Setup 4'e ait sensör yerleşim planları.

#### 4 Köprünün modal parametrelerinin belirlenmesi

Ortamsal köprü testlerinden elde edilen köprü ivme tepki verileri ARTeMIS® programında işlenmiştir. Programda öncelikle köprünün geometrisi oluşturulmuş ve köprü üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin istasyon noktaları belirlenmiştir. Oluşturulan geometri üzerinde ilgili noktalara testlerden elde edilen veriler ölçüm yönlerine ve referans olan ivmeölçerlere dikkat edilerek atanmış ve sonrasında EFDD ve SSI-DATA yöntemleri ile köprüye ait 16 modal parametre değeri tahmin edilmiştir. Elde edilen frekans değerleri, sönüm oranları yapılan iki farklı ortam sıcaklığı için Tablo 1’de hem EFDD hem de SSI-DATA yöntemleri için karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Test 1, 4 Aralık 2015 tarihinde gerçekleştirilmiş ve test süresince ortam sıcaklığı ortalama 10.86°C derece olarak köprünün 4 farklı noktasında ölçülmüştür. Test 2, ise 16 Mayıs 2016 tarihinde ortalama 32.18°C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ortalama sıcaklık hesabında hem 1. testlerde hem de 2. testlerde aynı termometreler kullanılmış ve bunlar her iki testte de köprünün aynı noktalarına yerleştirilmiştir. Tablo 1’de mod şekilleri baskın hareket yönünü yansıtacak şekilde yatay, burulma ve düşey olarak gruplandırılmıştır. Aslında modlar birleşik modlar (coupled modes) olup sadece takip kolaylığı açısından baskın hareket yönleri dikkate alınarak gruplama yapılmıştır.

Tablo 1’de verilen sonuçlardan görüleceği üzere, sıcaklık etkisinin bu köprü özelinde modal parametre tahminleri üzerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı bulgulanmıştır.

Modal güvence kriteri (Modal Assurance Criteria, MAC) değerleri mod şekillerinin birbirleriyle olan benzerliğini

saptayabilmek için kullanılan sayısal bir ölçüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$MAC_i((\varphi_a)_i, (\varphi_{exp})_i) = \frac{((\varphi_a^T)_i (\varphi_{exp})_i)^2}{(\varphi_a^T)_i (\varphi_a)_i (\varphi_{exp}^T)_i (\varphi_{exp})_i} \quad (1)$$

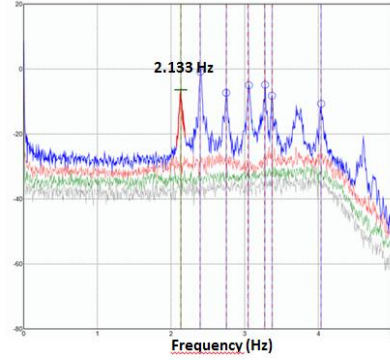
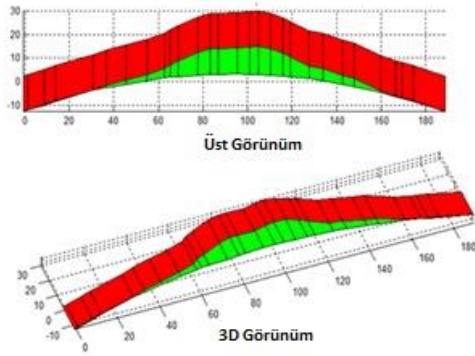
Burada  $MAC_i$  iki mod arasında hesaplanan değeri,  $(\varphi_i)_{y1}$ = yöntem-1 ile bulunmuş i. mod şekli vektörünü ve  $(\varphi_i)_{y2}$ = yöntem-2 ile bulunmuş i. mod şekli vektörünü göstermektedir.

MAC değerinin 1 veya 1’e yakın olması kıyaslanan iki mod şeklinin birbirine benzer olduğunu belirtmektedir. Tablo 1’de verilen MAC değerleri iki farklı yöntem ile bulunmuş olan mod şekillerinin birbirlerine ne kadar yakın olduğu hakkında bilgi vermektedir. Bu durumda MAC değerlerinin 1’e çok yakın olması iki farklı yöntem ile hesaplanan mod şekillerinin çok benzer olduğu anlamına gelmektedir.

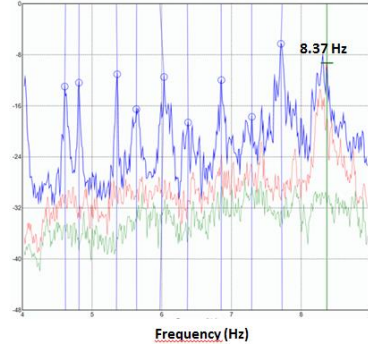
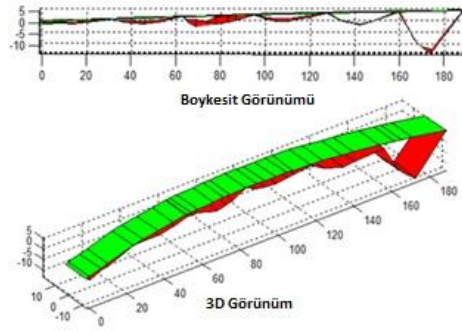
Şekil 5’te EFDD yöntemi ile bulunmuş köprünün 1. yatay ve 3. düşey mod şekilleri ve bunlara karşılık gelen frekans değerleri SVD diyagramları üzerinde gösterilmektedir. Burada vurgulanması gereken bir nokta düşey modların her bir açıklık için ayrı ayrı geliştigi bir başka deyişle düşey modlar altı farklı basit mesnetli kirişte gerçekleşmesi beklendiği gibi oluşmaktadır (Şekil 5b). Oysaki yatay (Şekil 5a) ve burulma (Şekil 5c) modlarındaki hareket tüm açıklıklarda hareket oluşturacak şekilde köprünün bütününde gerçekleşmektedir. Bu şekiller mod şekilleri olup fiziksel sehimlerle direkt ilişkilendirilmemelidir. Burulma modunun görsel olarak gösterimi, bu modun köprü özelinde karmaşık bir durum alması ve bu nedenle sensör sayısında oluşan yetersizlik nedeniyle zor olmuştur.

Tablo 1: Köprünün farklı mevsimsel koşullara karşılık gelen modal parametre tahmin sonuçları.

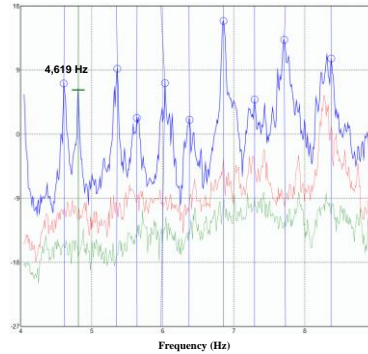
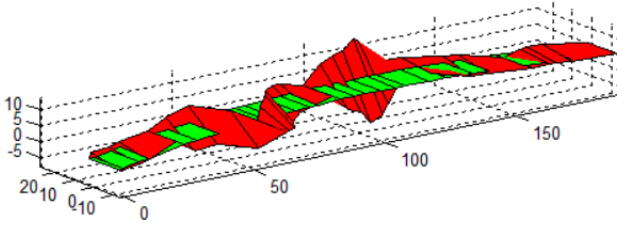
Mod Şekilleri	TEST 1					TEST 2				
	Ortalama Sıcaklık = 10.86°C					Ortalama Sıcaklık = 32.18°C				
	Frekans (Hz)		Sönüm (%)			Frekans(Hz)		Sönüm (%)		
	EFDD	MAC	SSI-Data	EFDD	SSI-Data	EFDD	MAC	SSI-Data	EFDD	SSI-Data
1. Yatay	2.133	0.999	2.134	0.475	0.563	2.123	0.998	2.127	0.25	0.933
2. Yatay	2.396	1	2.396	0.378	0.361	2.389	0.998	2.395	0.419	0.924
3. Yatay	2.753	0.998	2.747	0.271	0.488	2.731	0.997	2.73	0.335	0.566
4. Yatay	3.044	0.994	3.054	0.355	0.464	3.033	0.984	3.038	0.386	0.418
5. Yatay	3.272	0.998	3.266	0.426	0.562	3.232	0.983	3.233	0.277	0.999
6. Yatay	3.372	0.991	3.377	0.252	0.471	3.345	0.992	3.349	0.253	0.525
7. Yatay	4.036	0.999	4.038	0.295	0.406	4.018	0.999	4.021	0.203	0.49
1. Burulma	4.619	0.997	4.631	0.395	0.81	4.561	0.999	4.55	0.423	0.659
2. Burulma	5.35	0.994	5.354	0.357	0.697	-	-	5.318	-	0.412
3. Burulma	5.639	0.989	5.621	0.295	1.892	5.518	0.987	5.54	0.355	1.017
4. Burulma	5.974	0.995	6.021	1.93	0.807	-	-	5.918	-	3.176
5. Burulma	6.368	0.931	6.379	0.195	0.82	6.329	0.622	6.334	0.251	0.871
6. Burulma	6.853	0.993	6.863	0.166	0.345	6.862	-	-	0.155	-
1. Düşey	7.292	0.916	7.285	0.204	1.256	6.909	0.919	6.924	0.417	1.224
2. Düşey	7.729	0.978	7.722	0.379	0.69	7.713	0.839	7.677	0.146	0.399
3. Düşey	8.370	0.918	8.351	0.147	0.758	8.263	0.884	8.254	0.132	0.538



(a)



(b)



(c)

Şekil 5: Köprü'nün. (a): 1. yatay, (b): 3. düşey ve (c): 1. burulma mod şekilleri ile bunlara karşılık gelen frekans değerlerinin SVD diyagramları üzerinde gösterimi.

## 5 Analitik çalışmalar

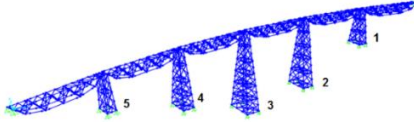
### 5.1 Köprü'nün FEDEASLab sonlu elemanlar modeli

FEDEASLab (Finite Elements in Design, Evaluation and Analysis of Structures) Matlab® (MATrix LABORatory)[12] ortamında çalışan, hem statik hem de dinamik doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yapabilen açık kodlu ve ara yüzü olmayan bir sonlu elemanlar yazılımıdır [13]. Açık kodlu olması ileride yapılacak optimizasyon tabanlı sonlu elemanlar güncellenmesi çalışması için avantajlı bir platform oluşturmaktadır. Köprü'nün sonlu elemanlar modeli, 3 boyutlu kiriş-kolon elemanları, 6 açıklıklı kafes sistemin üzerine oturan ve kolon ayaklarını temsil eden tek boyutlu yay elemanları ve mesnet koşullarını yansıtan rijit bağlantı

elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. FEDEASLab programında veri girişini kolaylaştıracak bir grafiksel ara yüzün olmamasından dolayı 199+325 çelik demiryolu köprüsünün 3 boyutlu 6 açıklıklı sonlu elemanlar modelini oluşturabilmek için her bir elemanın düğüm noktalarının koordinat, iki düğüm noktasına bir eleman tanımlanabilmesi için gerekli olan bağlantı matrisi (connectivity matrix), atalet momenti, burulma sabiti, yay sabiti, her bir düğüm noktası için kütle ve elastisite modülü ve Poisson değerleri ile en kesit özelliklerine ait gerekli bilgilerin tek tek girilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri daha hızlı ve hatasız gerçekleştirmek için köprü'nün SAP2000 (Structural Analysis Program) [14] programında oluşturulan ön sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır (Şekil 6). SAP2000 modeli netleştirildikten sonra ilgili sayısal model parametreleri



FEDEASLab'e aktarılmıştır. Köprünün taşıyıcı sistemi SAP2000 programında 3-boyutlu kiriş-kolon elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. Söz konusu taşıyıcı elemanlar 2 adet yan yana makastan oluşan enleme kirişi ve diyagonal kirişler ile birbirine bağlanan köprü kafesinin elemanları ve köprünün kolon ayaklarındaki elemanlardır.

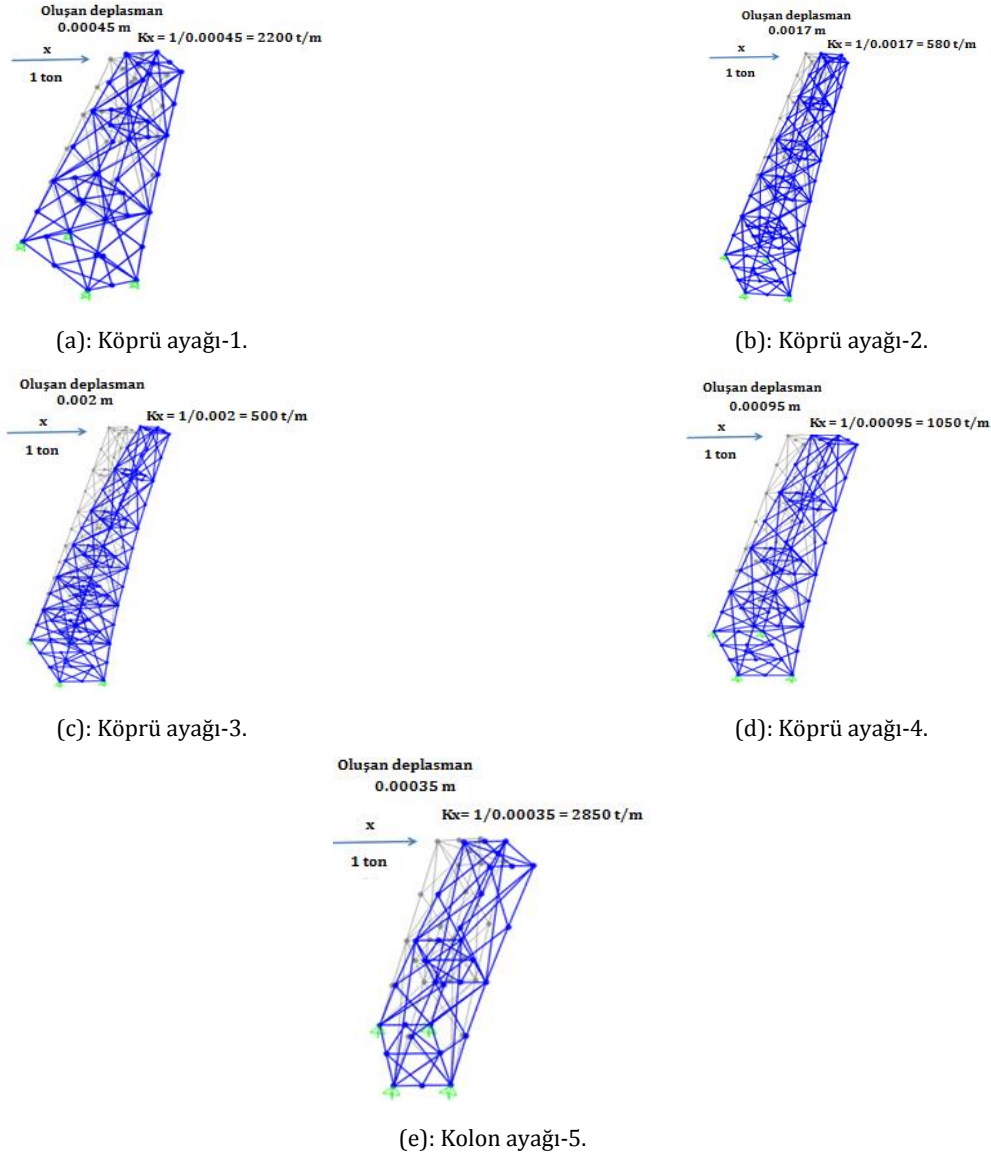


Şekil 6: Köprü ayaklarını da içeren SAP2000'de oluşturulmuş 3-boyutlu sayısal model.

Şekil 6'da görüldüğü üzere ilk oluşturulan model kolon ayaklarının da bulunduğu modeldir. İleride köprünün duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tekniği ile analitik modelinin güncellenmesi çalışmaları da yapılacağından güncellenecek parametrelerin azaltılması amacıyla köprü ayaklarının analitik modelde bulunmamasına

karar verilmiş ve bu nedenle köprü ayaklarının sağladığı yatay ve düşey rijitlikleri temsil eden yay elemanları açıklıkları birbirine bağlamada kullanılmıştır, böylece eleman sayısı da azaltılabilmektedir. Duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi yönteminin makul bir analiz zamanı içerisinde uygulanabilmesi için sonlu elemanlar modelinin eleman sayılarının mümkün olduğunca azaltılması son derece önemlidir.

Duyarlılık tabanlı olarak güncellenecek parametreler arasında farklı yüksekliklerde ve farklı boyutlarda olan kolon ayaklarının sisteme sağladığı rijitlikler (yay rijitlikleri) yer alacaktır. Bu yay elemanların rijitliklerinin belirlenmesinde farklı boyut ve yüksekliklerde olan kolon ayakları SAP2000 programında ayrı ayrı modellenip üç doğrultuda 10 kN'luk yük uygulaması yapılarak yaptıkları deplasmanlar hesaplanmıştır. Beş adet köprü ayağının x, y ve z doğrultularında 10 kN kuvvet altında yapmış oldukları deplasmanlar rijitlik=yük/deplasman bağıntısı ile dikkate alınarak ayakların  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_z$  olan rijitlikleri bulunmuştur (Şekil 7).



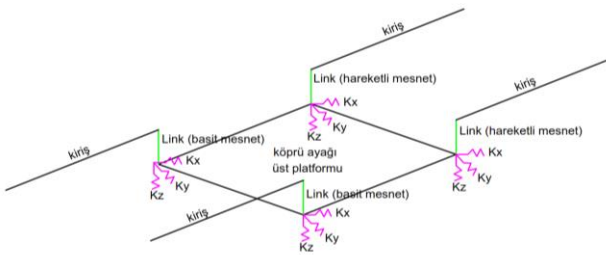
Şekil 7: Köprü kolon ayaklarının X-yönünde 10 kN (1 ton) yük altında şekil değiştirmiş durumları. (a): Köprü ayağı-1, (b): Köprü ayağı-2, (c): Köprü ayağı-3, (d): Köprü ayağı-4, (e): Köprü ayağı-5.

Şekil 7'de gösterildiği şekilde kolon ayaklarına 10 kN'luk kuvvet uygulanarak ayakların X yönündeki rijitlikleri ( $K_x$ ) elde edilmiştir. Benzer şekilde köprü ayaklarına Y ve Z yönlerinde uygulanan 10 kN'luk kuvvetlerle ayakların  $K_y$  ve  $K_z$  yatay rijitlikleri bulunmuştur.

Bir köprü ayağında bulunan mesnetlerin köprüdeki mevcut hali Şekil 8'de ve yine tek bir köprü ayağının yay ve rijit bağlantı elemanları ile sayısal olarak modellenmiş durumu ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Köprü ayaklarının 10 kN'luk yükler altında yaptığı deplasmana göre elde edilen  $K_x$ ,  $K_y$  ve  $K_z$  rijitlik değerleri (Tablo 2) dörde bölünerek Şekil 9'da gösterildiği şekilde iki adet basit ve iki adet hareketli mesnedin altındaki yaylara farklı yönler de dikkate alınarak atanmıştır. Daha uzun olan ayakların özellikle yatay rijitlikleri (x ve y yönleri) daha küçük elde edilmiştir. Dikkat edilirse mesnedin kendisi rijit linklerle, kolon ayaklarının üç farklı yönde sağladığı rijitlikler ise bu yönlerdeki yaylarla temsil edilmiştir. Bir başka deyişle her bir kolon için farklı değerlere sahip olmak üzere 4 adet x, 4 adet y ve 4 adet de z yönünde olmak üzere toplam 12 adet yay kullanılmış ve kolonlar bu şekilde temsil edilmiştir (bk. Şekil 9).



Şekil 8: Köprü ayağı mesnetleri.



Şekil 9: Köprü ayaklarının yaylar ile modellenmesi için kullanılan sayısal model detayı.

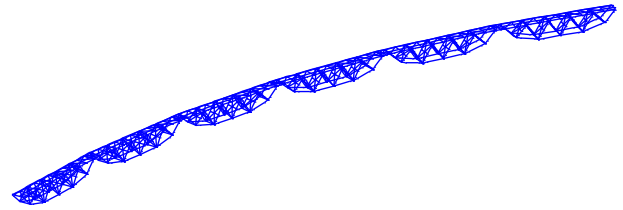
Tablo 2: Köprü ayaklarına ait başlangıç rijitlik değerleri.

	Köprü Ayağı Rijitlikleri [t/m]		
	$K_x$	$K_y$	$K_z$
Köprü ayağı 1	2200	5350	106000
Köprü ayağı 2	580	1700	55000
Köprü ayağı 3	500	1600	50000
Köprü ayağı 4	1050	2850	77000
Köprü ayağı 5	2850	5600	143000

Köprü ayaklarının yaylar ile modellendiği durum (Şekil 10) ile ayakların ayrı ayrı modellendiği durum (Şekil 6) arasında yapılan modal analiz karşılaştırmalarında, bu iki modelden elde edilen sonuçların birbirlerine son derece yakın olduğu bulgulanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3: Kolon ayaklı model ile yaylı modele ait frekans karşılaştırmaları.

Mod Şekilleri	Kolon Ayaklı Model Frekans Değerleri (Hz)	Yaylı Model Frekans Değerleri (Hz)
1. Yatay	1.963	2.000
2. Yatay	2.275	2.295
3. Yatay	2.663	2.680
1. Burulma	4.534	4.795
1. Düşey	7.184	7.194
2. Düşey	7.757	8.087
3. Düşey	-	-



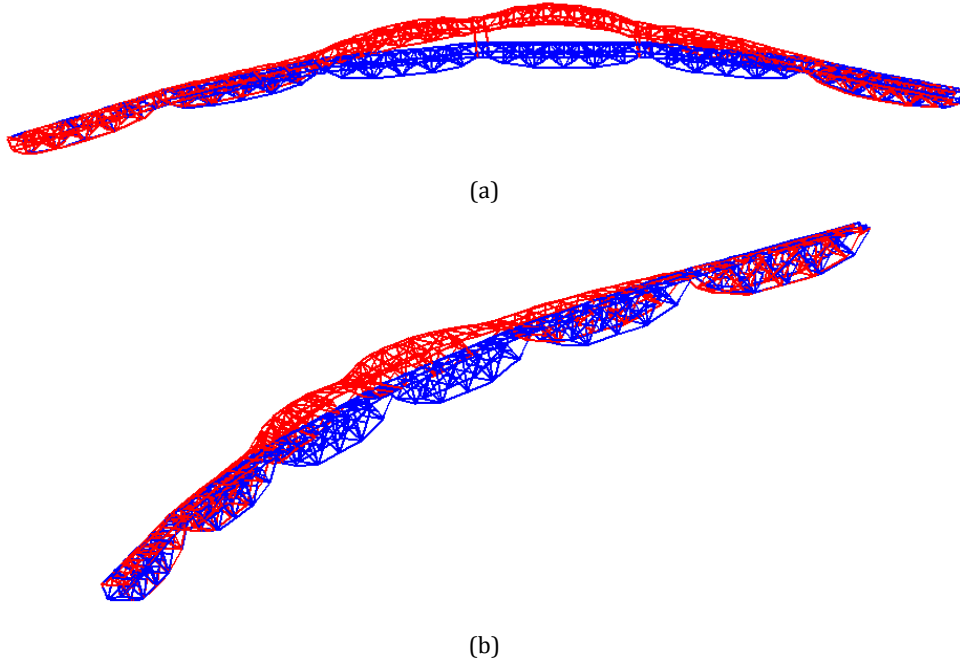
Şekil 10: 199+325 çelik demir yolu köprüsü FEDEASLab programı kullanılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli (köprü ayakları yaylar ile temsil edilmiştir).

Yapılan bu ön SAP2000 çalışmaları neticesinde yay elemanlarının kullanıldığı sonlu elemanlar modelinde 1024 düğüm noktası ve 1610 adet eleman bulunmaktadır. Köprünün ön SAP2000 sonlu elemanlar modelinden yararlanılarak tüm bu model girdilerinin bir Excel dosyasından okutulması ile köprünün 3 boyutlu 6 açıklıklı ve köprü ayaklarının yaylar ile modellendiği sonlu elemanlar modeli FEDEASLab programında oluşturulmuştur (Şekil 10). İlerleyen bölümlerde kalibrasyon için bu model kullanılmıştır.

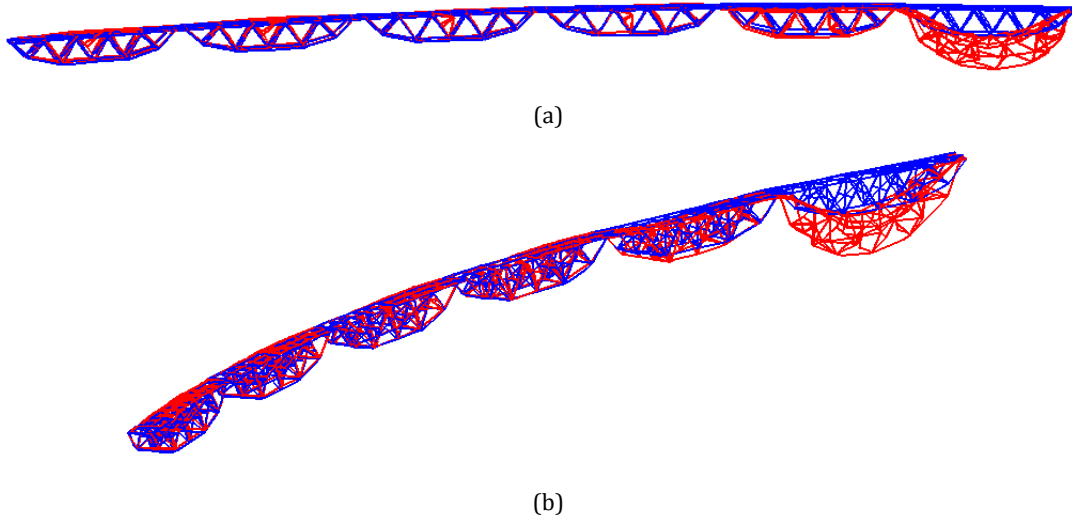
Yay ve rijit bağlantı elemanlarının bulunduğu model FEDEASLab programında oluşturulduktan sonra modal analizler gerçekleştirilmiş ve örnek olması amacıyla 1. yatay ve 3. düşey mod şekil ve frekans değerleri Şekil 11 ve Şekil 12'da gösterilmiştir. Diğer modlara ilişkin çizimler makale hacminin sınırlı olması sebebiyle burada verilmemiştir ancak diğer modlara ilişkin değerler Tablo 5'te sunulmuştur.

Köprünün kalibrasyon işlemini gerçekleştirebilmek için öncelikle hangi parametre veya parametrelerin (elastisite modülü, yay rijitlikleri, elemanların en kesit alanları) güncellenebileceğine ilişkin bir ön çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, gerçek ortam koşulları da düşünülerek, köprünün mevcut durumuna en yakın sonuçları verebilmesi açısından elemanların elastisite modülleri ve kolon ayaklarını temsil eden yay rijitlik değerleri için güncelleme yapılmasına karar verilmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modeli 1610 eleman içerdiği için yapılan deneme-yanılma işleminin hızlı ve pratik olması açısından köprünün hangi elemanlarının elastisite modüllerindeki değişimin köprünün modal analiz sonuçları üzerinde bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Bu çalışmada köprü üzerindeki elemanlar gruplandırılarak hangi eleman gruplarının elastisite modülü değişiminin modal analiz sonuçlarını değiştirip değiştirmediği saptanmıştır.





Şekil 11: FEDEASLab 1. Yatay mod şekline ait. (a): Üstten ve (b): 3-boyutlu genel görünüm, doğal titreşim frekans değeri 2.165 Hz.



Şekil 12: FEDEASLab 3. Düşey mod şekline ait. (a): Yandan ve (b): 3-boyutlu genel görünümü, doğal titreşim frekans değeri 8.283 Hz.

Bu çalışma sonucunda köprünün her bir kafes kirişinde bulunan ve bu kafes kirişleri oluşturan makasları birbirine bağlayan enleme kirişlerinin ve stabilite çaprazlarının elastisite modüllerindeki değişimin modal analiz sonuçlarını değiştirdiği saptanmıştır. Bu kafes kirişleri oluşturan makaslar arasında bağlantı kuran elemanların elastisite modülü ve kolon ayakları temsil eden yay rijitlikleri deneme-yayımla yöntemiyle güncellenerek kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda elemanların fiziksel sınırlar içerisinde kalan elastisite modüllerindeki değişimin sonuçlar üzerinde çok fazla etki etmediği saptanmıştır. Örneğin, elastisite modülündeki değişime duyarlı elemanların bu değerlerinde yapılan %40'lık bir azalmanın (gerçekçi seviyede olmayan bir azalma durumu) köprünün ilk birkaç

moduna ait frekanslarında gerçekleştirdiği değişim yaklaşık olarak %3 azalma mertebesinde. Bunun yanında kolon ayaklarını temsil eden yay sabitlerindeki değişim modal analiz sonuçlarını çok daha fazla etkilemektedir. Tablo 4'te başlangıç modelde kullanılan yay rijitlikleri ve kalibrasyon sonrası kullanılan yay rijitlik değerleri verilmiştir.

Deneme-yayımla çalışmaları neticesinde FEDEASLab programında oluşturulan yay elemanları güncellenmiş ve analitik model deneysel sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Dikkat edilirse en büyük değişiklik  $K_y$  ve  $K_z$  değerlerinde oluşmuştur. Tablo 5'te yay elemanları kullanılarak oluşturulan FEDEASLab modeline ait frekans değerleri ile ARTEMIS® programından elde edilen deneysel frekans değerleri karşılaştırma amacıyla birlikte verilmiştir.

Tablo 4: Başlangıç ve güncellenen/referans modellerde kullanılan yay rijitlik değerleri.

Başlangıç Köprü Ayağı Rijitlikleri [t/m]	Güncellenmiş Köprü Ayağı Rijitlikleri [t/m]		
	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>
Köprü ayağı 1	2200	5350	106000
Köprü ayağı 2	580	1700	55000
Köprü ayağı 3	500	1600	50000
Köprü ayağı 4	1050	2850	77000
Köprü ayağı 5	2850	5600	143000

Tablo 5: Köprünün deneysel ve sayısal modlarına ait değerlerin karşılaştırılması.

Mod Şekilleri	Frekans [Hz]			MAC [-]
	Sistem Tanımlama Sonuçları	Başlangıç Sayısal Model	Güncellenmiş Sayısal Model	
1. Yatay	2.133	2.000	2.165	0.97
2. Yatay	2.396	2.295	2.467	0.94
3. Yatay	2.753	2.680	2.788	0.84
1. Burulma	4.619	4.795	4.626	0.44
1. Düşey	7.292	7.194	7.330	0.88
2. Düşey	7.729	8.087	7.716	0.76
3. Düşey	8.370	-	8.283	0.92

Sonlu elemanlar modeli ve deneysel sonuçlar arasında hesaplanan MAC değerlerine bakıldığında üç yatay ve üç düşey mod şeklinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Tablo 5, son sütun). Ancak burulma mod şekli için daha düşük bir MAC değeri elde edilmiştir. Mod şeklinin daha karmaşık olması sebebiyle köprünün burulma mod şeklinin yeteri doğrulukta elde edilebilmesi için daha yoğun bir sensör ağının köprünün sadece yatay döşeme düzleminde değil düşey düzleminde de kullanılması gerekmektedir.

## 6 Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı Uşak il sınırında bulunan 199+325 çelik demiryolu köprüsünün modal parametrelerini belirleyebilmek ve gelecekte yapılacak duyarlılık tabanlı sonlu elemanlar modeli güncellemesi tabanlı hasar tespiti çalışmaları için kalibre edilmiş referans bir sonlu elemanlar modeli oluşturabilmektir. İki farklı ortam sıcaklığı için köprünün yerinde ortamsal titreşim verileri toplanmış, EFDD ve SSI-Data yöntemleri kullanılarak 16 adet modal parametre değeri tahmin edilmiştir. Köprünün geometrisinden dolayı yatay modlarının daha baskın olduğu görülmektedir. Ortam sıcaklığındaki değişimin bu köprünün modal parametreleri üzerinde önemli bir değişim yaratmadığı yapılan analizler sonucunda ortaya çıkmıştır.

199+325 çelik demiryolu köprüsünün sonlu elemanlar modeli FEDEASLab programında oluşturulmuş ve deneme-yanılma yöntemi ile gelecekte yapılacak olan duyarlılık tabanlı sonlu

elemanlar model güncelleme çalışmaları için deneysel sonuçlar ile iyi korelasyon gösteren referans niteliğinde bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmalar ile kolon ayaklarını temsil eden yay rijitlik değerlerindeki güncelleme işleminin deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların birbirine yaklaştırılması için etkin olduğu bulunmuştur. Köprünün mevcut durumunu gerçekçi olarak yansıtan bir sayısal model FEDEASLab ortamında oluşturulmuş ve bu sayısal modelin ileride sonlu elemanlar modeli güncellenmesi tabanlı hasar tespit yöntemi ile kullanılması için altlık oluşturulmuştur. Bu model ayrıca köprü elemanlarının kapasite analizi için TCDD tarafında da kullanılabilir niteliktedir.

## 7 Teşekkür

Bu çalışma 214M029 No.lu TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmektedir. Köprü ile ilgili proje ve verilerin sağlanmasındaki yardımlarından dolayı TCDD 3. Bölge Müdürlüğü yöneticilerine ve deneysel çalışmalarda gösterdikleri özverili çalışmalarından dolayı Doruk Yormaz, Umut Yücel, Erkan Durmazgezer, Muhammed Emin Demirkıran, Gülser Eryılmaz, Üstün Can Meriç, Onur Başkaya, Mustafa Uslu, Dilan Çankal, Oğuzcan Şahin'e ayrıca proje süresince desteklerinden ötürü Prof. Dr. Serap Kahraman'a, Prof. Dr. Türkay Baran'a ve Doç. Dr. İ. Serkan Mısıra teşekkürü bir borç biliriz.

## 8 Kaynaklar

- [1] Farrar CR, James III GH. "System identification from ambient vibration measurements on a bridge". *Journal of Sound and Vibration*, 205(1), 1-18, 1997.
- [2] Spyarakos CC, Raftoyiannis IG, Ermopoulos JC. "Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge". *Journal of Constructional Steel Research*, 60(8), 1213-1225, 2004.
- [3] Ermopoulos J, Spyarakos CC. "Validated analysis and strengthening of a 19<sup>th</sup> century railway bridge". *Engineering Structures*, 28(5), 783-792, 2006.
- [4] Caglayan O, Tezer O, Ozakgul K, Piroglu F. "In-situ field measurements and numerical model identification of a multi-span steel railway bridge". *Journal of Testing and Evaluation*, 43(6), 1-15, 2015.
- [5] Akın T. Structural Monitoring and Analysis of Steel Truss Railroad Bridges. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2012.
- [6] Bajric A, Brincker R, Georgakis CT. "Evaluation of damping using time domain OMA techniques". *SEM Fall Conference and International Symposium on Intensive Loading and Its Effects*, Beijing, China, 20-21 October 2014.
- [7] Bajrić A, Georgakis CT, Brincker R. *Evaluation of Damping Using Frequency Domain Operational Modal Analysis Techniques*. Editors: Caicedo J, Pakzad S. Dynamics of Civil Structures Volume 2, 351-355 Colombia, SC, USA, Springer Cham, , 2015.
- [8] Yormaz D, Ozcelik O, Kahraman S, Amaddeo C. "Tarihi özellikteki bir çelik demiryolu köprüsünün yapı sağlığının sonlu elemanlar modeli güncellemesi tekniği ile izlenmesi". 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum, Türkiye, Ekim, 2015.

- [9] ARTeMIS Extractor Pro software, Issued by Structural Vibration Solutions ApS. NOVI Science Park, Niels Jernes Vej 10, DK 9220 Aalborg East, Denmark, 2010.
- [10] Brincker R, Zhang L, Andersen P. "Modal identification of output only systems using frequency domain decomposition". *Smart Materials and Structures*, S0964-1726(1), 441-445, 2001.
- [11] Van Overschee P, De Moor B. *Subspace Identification for Linear Systems*. 1<sup>st</sup> ed. Massachusetts, USA, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [12] MathWorks MATLAB: The language of technical computing. Version 7. MathWorks, Natick, Massachusetts, USA, 2005.
- [13] Filippou FC, Constantinides M. "FEDEASLab Getting Started Guide and Simulation Examples". Technical Report, NEESgrid, 2004.
- [14] CSI SAP2000 V. 8, 2002. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual". Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2010.