

TEK AÇIKLIKLI BİR DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNDE MODAL PARAMETRELERİN OPERASYONAL MODAL ANALİZ ve SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

¹ **Ali KOÇAK**, ²**Burak TOYDEMİR**, ³**Başak ZENGİN**

¹Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Davutpaşa Mah.
Davutpaşa Caddesi 34220 Esenler- İstanbul/ Türkiye
E-mail: akocak@yildiz.edu.tr

²Gelişim Üniversitesi Cihangir Mah. Şehit Jandarma Komando Er Hakan Öner Sk. No:1
Avcılar / İstanbul/Türkiye
Tel: 532 691 2775 E-mail: btoydemir@gelisim.edu.tr

³Gelişim Üniversitesi Cihangir Mah. Şehit Jandarma Komando Er Hakan Öner Sk. No:1
Avcılar / İstanbul/ Türkiye
E-mail: zenginbasak@gmail.com

Özet

Yapıların dinamik yükler altında analizini yaparken modal parametrelerin doğru bir şekilde tespit edilmesi sonucun yakınsaklığı için büyük önem teşkil etmektedir. Dinamik karakteristikler sayısal modeller yardımıyla hesaplanabilirken, stratejik veya ekonomik önem arz eden yapıların, tarihi yapıların, hasar görmüş yapıların dinamik karakteristiklerinin hesabı sırasında daha doğru sonuçlar elde etmek açısından modal parametreler diğer metodlar yardımı ile de hesaplanabilmektedir. Bu çalışma esnasında tek açıklıklı bir köprüye ait modal parametrelerin gerek sayısal metodlar yardımı ile gerekse operasyonel modal analiz metodu ile hesabı incelenecektir. Farklı iki yaklaşım sonucu elde edilen sonuçlar kıyaslanacak ve üç boyutlu modelden elde edilen sonuçların doğruluğu ve yakınsaklığı incelenmiştir.

Giriş

Yapıların dinamik karakteristiklerini belirleme yöntemlerinden bir tanesi de Modal Analiz yöntemidir. Sayısal model üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik özelliklerin yeterli yakınsaklıkta olmamasından dolayı modal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Yapıların güvenli bir şekilde tasarlanmasını ve analiz edilmesini sağlamak amacıyla Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (DBYBHY 2007) de detaylı bir şekilde açıklanan bir çok dinamik analiz metodu vardır. Bütün dinamik analiz metodlarında yapıların dinamik karakteristikleri baz alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Sonuç olarak yapının dinamik karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi çok büyük önem arz etmektedir. Yapıların dinamik karakteristiklerinin sayısal metodlar yardımı ile hesaplanabilmesine rağmen bazı

durumlarda sayısal hesaplamalar ve modeller yardımıyla hesaplanan karakteristikler istenilen yakınsaklıkta sonuçlar vermeyebilmektedir. Dinamik analizin doğru ve hassas sonuçlar vermesi açısından yapının dinamik karakteristiklerindeki bu farklılıkların dikkate alınması önemlidir. Örnek olarak yapılan bazı çalışmalarda dinamik analiz sırasında çoğunlukla dikkate alınmayan dolgu duvarların yapının rijitliğini %10 oranında değiştirdiği gösterilmiştir. Özellikle deprem etkisinde veya diğer yükler altında hasar görmüş binalar üzerinde yapılan sayısal hesaplamalar yapının dinamik karakteristikleri hassas ve doğru şekilde hesaplanamayabilirler. Modal analiz bu tip yapıların dinamik karakteristiklerinin hesaplanmasında önemli rol oynamaktadır.

Yapıların tasarımı esnasında sayısal yöntemlerle hesaplanan modal parametreler ile yapıların gerçek modal parametreleri arasında farklılıklar da bulunabilmektedir. Bu farklılıkları tespit etmek ve doğru dinamik parametreler kullanmak deprem bölgelerinde yapılacak yapıların analizleri açısından önemlidir.

Bazı yapılar stratejik veya mali açıdan önem teşkil edebilmektedirler. Yapı maliyetleri, kullanım ve stratejik önem bakımından köprüler bu tip yapıların içinde yer almaktadırlar. Bu öneminden dolayı köprüleri imalat aşamasında ve kullanım aşamasında deprem etkisi bakımından incelemek oldukça önemlidir. Köprülerin imalatı aşamasında sayısal model, modal analiz sonucu elde edilen veriler ışığında daha doğru analiz sonuçları elde etmek açısından düzenlenebilir. Köprülerin kullanım aşamasında ise yapının deprem yükleri altında analizi yapılarak güçlendirme gerekliliği araştırılabilir. Bu hesap esnasında modal analiz sonucu elde edilen veriler sayesinde, yapıda kullanılan malzemelerin yorulma ve zaman içinde gösterdikleri değişkenlikler de dikkate alınır. Costa ve diğ. (2014) çalışmalarında I. Luis köprüsü üzerinde güçlendirme öncesi ve sonrası yapıları analiz sonuçlarını değerlendirerek modal parametreleri daha gerçekçi bir şekilde hesaplamışlardır.

Yapıların dinamik karakteristiklerinin modal analiz sonucu hesaplanması

- Hasar görmüş yapılarının dinamik karakteristiklerinin hasar öncesi ve sonrası kontrol edilmek
- Yapının model üzerindeki dinamik karakteristikleri ile gerçek dinamik karakteristikleri arasındaki kıyaslamayı yapmak,
- Sayısal model üzerinde modal analiz sonucu elde edilen veriler ışığında düzenlemeler yapmak, amacıyla kullanılabilir.

DeneySEL ve Operasyonel Modal Analiz

Yapılar üzerinde yapılan ölçümler DeneySEL Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olmak üzere iki çeşittir (Nanjing ve diğ.. 2005).

Geleneksel olarak kullanılan deneysel modal analiz belirlenmiş bir yükleme karşılığında oluşan tepkilerin ölçülerek yapının dinamik karakteristiklerinin hesaplanması işlemidir. En önemli avantajı ölçümler önceden belirlenmiş ve kontrollü bir kuvvet ile yapılmaktadır. Bazı ender durumlarda patlayıcı ve araç gibi daha kontrolsüz kuvvetler de kullanılabilir. Bu yöntemin kontrollü yükleme gibi büyük bir avantajı olsa da, kontrollü yüklemeyi sağlayacak araçların temini ve yerleştirilmesi açısından bakıldığından daha pahalı olmakla birlikte, bu yöntemin kullanımı esnasında yapının doğal hareketini sınırlı zaman diliminde de olsa engelleyen bir uygulama olduğu unutulmamalıdır.

Bu yöntemin kontrollü yükleme gibi büyük bir avantajı olsa da, kontrollü yüklemeyi sağlayacak araçların temini ve yerleştirilmesi açısından bakıldığından daha pahalı olmakla birlikte, bu yöntemin kullanımı esnasında yapının doğal hareketini sınırlı zaman diliminde de olsa engelleyen bir uygulama olduğu unutulmamalıdır.

Operasyonel modal analiz (OMA) ise 1990'lardan itibaren dikkatleri üzerine çekmeyi başaran bir analiz şeklidir. OMA yapının modal karakteristiklerinin operasyonel pozisyonda çıkarılması işlemidir. OMA sırasında dinamik harekete sebep olan yüklemeler veya hareketleri, araç hareketleri, rüzgâr ve mikro tremorlardır. OMA ölçümlerindeki en önemli farklılık titreşime sebep olan kuvvetler ve büyüklükleri bilinmemektedir. OMA esnasında oluşan tepkiler çok küçük olduğundan yapı her durumda lineer bir hareket içindedir. Yapıda tepkilerden oluşan verilerin analizi ve dinamik parametrelerin hesaplanması dinamik analiz için bir başlangıç oluşturmaktadır.

Operasyonel modal analizde modal parametrelerin elde edilmesi için birçok yöntem bulunurken, sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesi Frekans Ortamında Ayrışım Yöntemi (FOA) dir. Bu yöntem tepe noktası seçimi yöntemi de denir. Bu yöntem hafif sönümlü yapılarda çevresel rastgele titreşimler durumunda spektral yoğunluklardan modların çıkarılmasıdır. Modların çıkarılması her bir spektral yoğunluk matrisinden tekil değerlerin ayrıştırılması yolu ile yapılır. Bu ayrıştırma işlemi her bir tekil değer için tek serbestlik dereceli sistemin tanımlanmasını sağlar. Bu yöntem sırasında izlenen yol sırasıyla Spektral Yoğunluk Fonksiyonlarının hesabı, Tekil Değerlerin Ayrıştırılması, Tekil Değerlerin seçilmesi yapıya ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesidir (Bayraktar et al. 2010).

Lineer bir sistemde $x(t)$ etkisi ve $y(t)$ tepkisi arasında bağıntı

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)] \cdot [G_{xx}(\omega)] \cdot [H(\omega)]^T \quad (1)$$

şeklinde. Burada $[G_{yy}(\omega)]$ etki spektral matrisini, $[G_{xx}(\omega)]$ tepki spektrumu matrisini

$[H(\omega)]$ ise Frekans Yoğunluk Fonksiyonu matrisidir. Buradan yola çıkılarak,

$$[G_{yy}(\omega)] = [V] \cdot [S] \cdot [V]^H \quad (2)$$

elde edilir (Herlufsen ve diğ. 2006). S tekil değerler köşegen matrisi, V tekil uniter matrisidir. Burada tekil vektörler tek serbestlik dereceli sistemin mod şekillerini gösterirken, bunlara karşılık gelen değerler her bir modun modal koordinatlara karşı gelen tepkilerini gösterir. Frekans ortam ayrışım yönteminin yanı sıra kullanılan yöntemlerden bazıları Gelişmiş Frekans Ortam Ayrışım yöntemi ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemidir (SAB) (Altunışık et al. 2012).

Bu tepkilerin ölçülmesi sırasında tek ve çift eksenli ivmeölçerler ve bu ivmeölçerlerden alınan bilgileri toplayıp kaydeden bir sistem kullanılır. Daha önceden sayısal hesap sonucunda belirlenen zaman aralıklarında sisteme ait ivme değerlerini ölçen ivmeölçerler bu bilgileri ana makineye yollayarak ana makine bu bilgileri kayıt etmektedir.

Bilimsel çalışmalar esnasında ister zorlanmış isterse çevresel titreşimler olsun, ölçülen titreşimler sonucunda hesaplanan mod parametreleri her zaman birbirleriyle ve çalışılan sisteme karşılık gelen sayısal modelle uyumlu sonuçlar vermiştir (Huang et al. 1999).

Modal Analiz, binaların incelenmesi dışında tarihi taş binaların dinamik karakteristiklerinin incelenmesinde de kullanılmıştır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde hasar görmüş tarihi Fatih Camii'nin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan araştırmalar da vardır. (Bayraktar ve diğ. 2010).

Köprüler konusunda da deneysel modal analiz ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Japonya Urado köprüsü üzerinde yapılan modal analiz çerçevesinde köprünün dinamik karakteristikleri hesaplanarak olası deprem karşısında zarar göreceği öngörülmüştür. (Cıracık ve diğ., 2012). Diğer bir çalışmada Vasco De Gama Asma köprüsü üzerinde analiz yapılmış ve OMA sonucu çıkan modal parametrelerin sayısal hesaplarla çıkan değerlere yakınsaklığı tespit edilmiştir (Cunha et al. 2004).

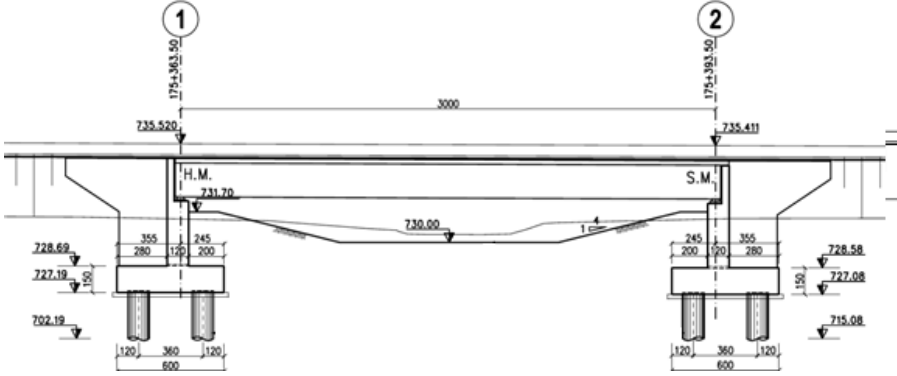
Köprülerle ilgili veri toplama süreleriyle ilgili çalışmalarda kısa süreli tepki toplama sonucunda elde edilen dinamik karakteristiklerin uzun süreli tepki toplama sonucu elde edilen karakteristikler ve analitik inceleme sonucu elde edilen karakteristiklerle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Gentile and Saisi 2001).

Ölçümü Yapılan Köprü (DGK175 Köprüsü)

DGK175 Köprüsü Ankara – Sivas Yüksek hızlı demiryolu hattının Ankara başlangıcından 175. Kilometresinde olup İnandık Deresi üstündedir. Köprü üzerinden 2 adet yüksek hızlı tren hattı geçmektedir.

Şekil 1'de boykesiti verilen ve Şekil 2'de gösterilen köprünün üstyapısı altta öngermeli kirişlerden ve üstte ise tabliye betonundan oluşmaktadır. Köprünün tek açıklıklı oluşundan dolayı köprü üstyapısı iki adet kenar ayak tarafından taşınmaktadır.

Öngermeli kirişler Ankara istikametinde hareketli Sivas istikametinde sabit mesnet ile yük aktarmaktadır.



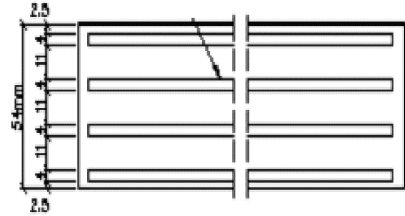
Şekil 1. DGK 175 Köprüsü



Şekil 2. DGK 175 Köprüsü

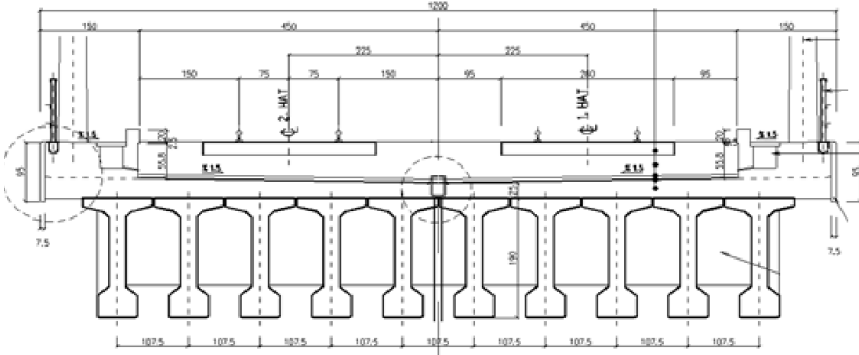


Şekil 3. Elastomerik Mesnet



Şekil4. Elastomerik Mesnet

Şekil 5'te enkesiti verilen köprü üst yapısı öngermeli kirişler, köprü tabliyesi, izolasyon, balast, travers tabakaları, korkuluklar ve raylardan oluşmaktadır. Köprü açıklıkları 10 adet AASHTO Tip VI öngermeli kirişten oluşmuştur. Öngermeli kirişlerin üstünde 25cm kalınlığında betonarme tabliye bulunmaktadır. Tabliyenin üstünde toplamda 56cm kalınlığında 20kN/m³ ağırlığında izolasyon, balast ve travers tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın üstünde ise 4 adet 0.60 kN/m ağırlığında UIC 60 ray bulunmaktadır. Köprü tabliyesinin yaya yolu kenarlarında 1,50 kN/mt ağırlığında korkuluk bulunmaktadır. Tabliye yan cephelerinde çift taraflı 25kN/m³ ağırlığında cephe panelleri bulunmaktadır.



Şekil 5. Köprü Üstyapısı

Deneysel Analiz

Ölçümler esnasında Şekil 6'de gösterilen tek eksenli ve iki eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerler tarafından toplanan ivme değerleri Şekil 7.'de gösterilen veri toplama cihazı tarafından birleştirilerek yerleştirilen kanallardan toplanan ivme değerleri tek bir dosya halinde kaydedilmiştir.



Şekil 6. İvme Ölçer



Şekil 7. Veri Toplama Cihazı

Çalışmamızda sinyaller üzerinde Lineer Trendlerin Kaldırılması fonksiyonu ve 0.5 – 10 Hz frekans aralığı için Butterworth Bandpass filtre kullanılmıştır.

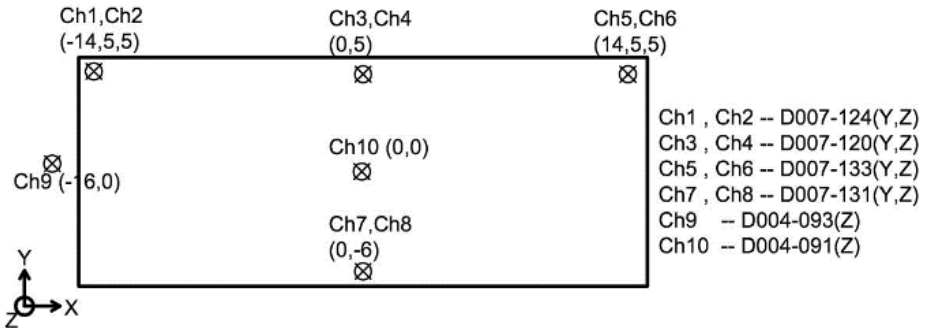
Belirli bir zaman aralığında toplanmış herhangi bir sinyal üzerinde çalışılırken, sinyal zaman ortamından frekans ortamına çevrilmek istendiğinde, sinyal üzerinde olabilecek lineer eğilimlerin kaldırılması frekans ortamında sağlıklı bir sonuç elde etmek için gerekli bir işlemdir. Bunun sebebi fourier dönüşümünü sonlu aralıklara bölünerek uygulama esnasında bu bölünen aralıklarda farklı lineer eğilimlerin olması sonuçlarda sapmaya sebep olabilmektedir.

Lineer eğilimlerin kaldırılması fonksiyonu sinyalden ortalama değeri veya sinyalin içeresine en iyi şekilde yerleşen ortalama çizgiyi çıkararak bulunur.

Modellenen yapıların dinamik karakteristiklerinin doğruluğunun kontrolü esnasında yapının tüm modal frekanslarının çıkarılması gibi bir analize gerek olmadığından yapıdaki başlangıç modların kontrolü çalışmamız açısından yeterlidir. Bu hesaplamaları yaparken grafiklerin ve hesabın sadeliğini korumak amacıyla 3 boyutlu modellerden elde edilen modal frekans değerleri de dikkate alındığında 0.5Hz değerinin altı ve 10Hz değerinin üzerinde kalan sinyalleri elimine etmemizde bir sakınca yoktur. Bunun için Butterworth Bandpass Filtresi uygulanmış ve isminden de anlaşılacağı üzere filtreden sadece 0.5Hz ve 10Hz frekans aralığındaki sinyallerin geçişine izin verilmiştir. Sinyallerde kayıp yaşamamak için filtre düzeyi filtre stabilitesini bozmadan olabildiğince düşük seviyelerde tutulmaya çalışılmıştır.

Filtrelerden geçirilen sinyaller Structural Vibration Solutions firması tarafından üretilen Artemis Modal isimli Operasyonel Modal Analiz Paket programı aracılığıyla incelenmiştir. Analiz esnasında FOA yöntemi kullanılmıştır. Artemis Modal paket programında sinyaller yüklenerek sinyallerin toplandığı koordinatlar belirtildikten sonra program sinyaller üzerinde lineer eğilimlerin kaldırılması fonksiyonunu ve butterwoth bandpass filtrelemeleri yapmakta Spektral yoğunluk fonksiyonlarını hesaplamakta ve tekil değerleri ayrıştırarak frekans ortamında grafik olarak gösterimini yapmaktadır. Son olarak ise bu veriler ışığında modal parametre değerleri elde edilmektedir.

Tek açıklıklı olan DGK175 köprüsünde 4 adet iki eksenli ve 2 adet tek eksenli sensörler kullanılmıştır. Şekil 8'da sensörlere ait detaylı yerleşim planı ve sensör yön ve numaraları gösterilmiştir.

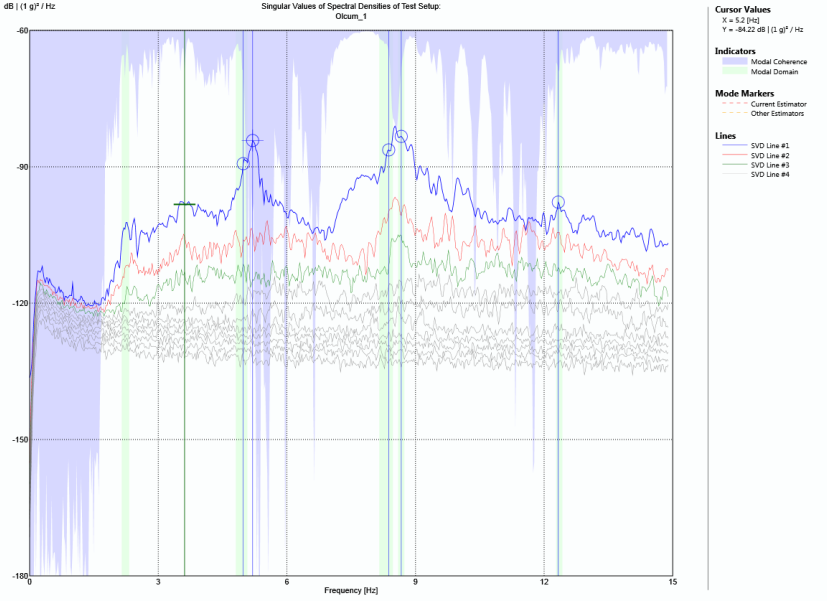


Şekil 8. Köprü Planı Üzerinde İvmeölçer Yerleşimi

Şekilde yerleşimi belirtilen ivmeölçerler ile iki adet on dakikalık ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler öncelikle belirli filtrelerden geçirilmelidir. İlk olarak lineer eğilimlerin kaldırılması fonksiyonu kullanılarak sinyaller içinde bulunan lineer eğilimler ortadan kaldırılmıştır. İkinci olarak

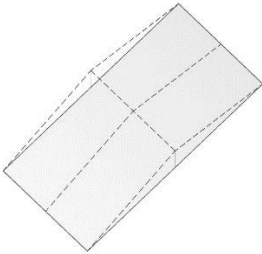
Bandpass filtresi kullanılarak çalışmada takip edeceğimiz, 0.5 – 10 Hz frekans aralıkları ayrıştırılmış ve diğer frekanslar elimine edilmiştir.

Filtrelerden geçirilmiş olan sinyaller üzerinden paket program aracılığıyla, spektral yoğunluk matrisleri çıkarılmış ve mod şekilleri tespit edilmiştir (Şekil 9).

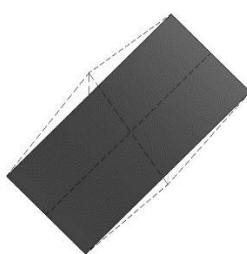


Şekil 9. Tekil Değer Ayrıştırması

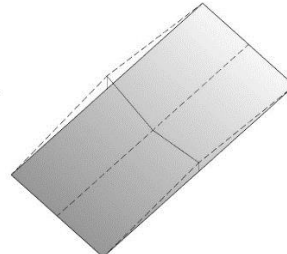
Şekil 9'da görüldüğü üzere 0-10Hz. aralığında 3.61, 5.20, 8.37 ve 8.67 olmak kaydıyla 4 adet mod şekli belirlenmiştir. İlk üç mod şekli Şekil 10., Şekil 11. ve Şekil 12.'de gösterilmiştir.



Şekil 10. 1. Mod Şekli



Şekil 11. 2. Mod Şekli



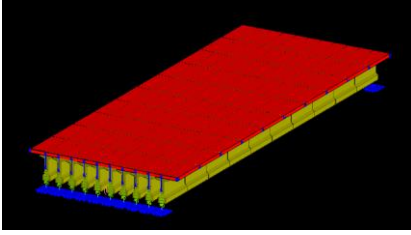
Şekil 12. 3. Mod Şekli

Sayısal Model

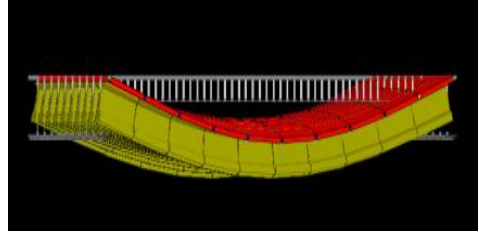
Köprü, TCDD 2. Bölge Müdürlüğünden alınan projelere uygun olarak Larsa4D isimli paket program kullanılarak Şekil 13'de gösterildiği gibi modellenmiştir.

Projede de belirtildiği üzere modelleme esnasında AASHTO Tip 6 önerilmeli kirişler oluşturulmuş, kirişler üzerine C20 betondan oluşan plak yerleştirilerek ve plak ve kirişlerin sürekliliğini sağlayacak sanal bağlantılar eklenmiştir. Mesnet bölgelerinde modellenen her bir kirişin kenararak bağlantısı ayrı ayrı tanımlanmıştır. Elastomerik mesnetler için kullanılan malzeme dikkate alınıp, rijitlikler hesaplanmış ve 3 doğrultuda farklı yaylar kullanılarak yay katsayıları yardımı ile rijitlikler tanımlanmıştır. Sayısal modelde mesnetlere hesaplanan rijitlikler atanmıştır.

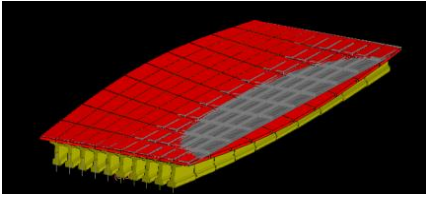
Paket program aracılığı ile çıkartılan mod şekilleri sırasıyla Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir.



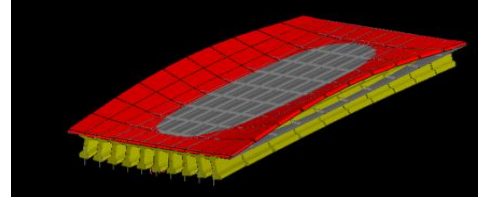
Şekil 13. Köprü Modeli



Şekil 14. 1. Mod Şekli ($T_1=0,2834sn$)



Şekil 15. 2. Mod Şekli ($T_2=0,2833sn$)



Şekil 16. 3. Mod Şekli ($T_3=0,1872sn$)

Larsa paket program aracılığı ile hesaplanan modal parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. DGK 175 Modal Parametreler

Mod Şekli	Frekans (Hz)	Peryot (s)	Kütle Katılım Oranları (X) (%)	Kütle Katılım Oranları (Y) (%)	Kütle Katılım Oranları (Z) (%)	Kümülatif Kütle Katılım Oranları (X)	Kümülatif Kütle Katılım Oranları (Y)	Kümülatif Kütle Katılım Oranları (Z)
M1	3.53	0.28	0.0	9.3	0.0	0.0	9.3	0.0
M2	3.53	0.28	0.1	0.0	78.4	0.1	9.3	78.4
M3	5.34	0.19	0.0	0.0	1.1	0.1	9.3	79.5
M4	8.36	0.12	0.0	3.5	0.0	0.1	12.8	79.5
M5	8.56	0.12	0.0	78.0	0.0	0.1	90.8	79.5
M6	11.08	0.09	0.0	0.0	0.0	0.1	90.8	79.5
M7	11.27	0.09	0.1	0.0	0.0	0.2	90.8	79.5

Operasyonel modal analiz ve sayısal model ile hesaplanan modal periyotların karşılaştırmaları Tablo 2'de gösterilmiş olup, periyot değerleri birbirlerine çok yakın olup aralarında %3'den daha az fark vardır.

Tablo 2. DGK 175 – Peryotlar

Sayısal Model (Hz.)	Operasyonel Modal Analiz (Hz.)	Yakınsaklık (%)
3.53	3.61	2.27%
5.34	5.2	2.69%
8.36	8.37	0.12%
8.56	8.67	1.29%

Sonuçlar

İnceleme yapılan köprü üzerinde Larsa 4D paket programı kullanılarak sayısal analiz yapılmış ve köprü üzerinden ivme ölçerler yardımı ile toplanan veri ışığında Artemis programı yardımı ile operasyonel modal analiz yapılmıştır. Sayısal model sonucu elde edilen sonuçlar ile operasyonel modal analiz sonucu elde edilen modal periyotlar birbirlerine çok yakın çıkmış olup hesaplanan modal periyotlar arasında %0, 12 - %2, 69'luk bir fark vardır. İki farklı yaklaşım sonucu elde edilen modal periyotların birbirine yakınsaklığı dikkate alındığında sayısal modelin kurulumunun başarı ile yapıldığı görülmektedir. Bu yakınsaklığın ana sebepleri incelendiğinde,

- Köprü'nün imalatının veri toplanmasından 3 ay kadar önce tamamlandığı ve imalatın projesine uygun yapıldığı
- İmalatın kısa süre önce tamamlanmasından dolayı malzeme üzerinde yorulma ve zamanla oluşabilecek hasarların henüz oluşmadığı anlaşılmaktadır.

Teşekkürler

Bu araştırma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 2011-08-01-YULAP01." Çalışmalarımıza desteğini sunan Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Altunışık, A.C., Bayraktar A., Sevim, B. and Ates, S. (2011), "Ambient Vibration Based Seismic Evaluation of Isolated Gulburnu Highway Bridge", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31:1496-1510
2. Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A. and Özcan, M. (2010), "Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi", IMO Teknik Dergi İstanbul, 5185-5205.
3. Thien-Phu Le and Patrick Paultre (2013), "Modal Identification Based on the Time-Frequency Domain Decomposition of Unknown-Input Dynamic Tests", International Journal of Mechanical Sciences, 71:41-50
4. Altunışık, A.C., Bayraktar, A. and Sevim, B. (2012), "Operational Modal Analysis of A Scaled Bridge Model Using Efd And Ssi Methods", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 19:320-330
5. Cıtak, S.O., Ohori, M., Nakamura, T., Sakaue, M., Takemura S., Takemoto, T., Furumura, T., Kazuhisa Iwai, K., Kubo, A., Kawatani, K., Tajima, S., Takahashi N. and Kaneda, Y. (2012), "Microtremor measurements and earthquake response analysis on urado bridge, Kochi, Japan", 15th Worlds Conference of Earthquake Engineering, 24-28 September 2012, Lisbon, Portugal
6. Costa, B.J.A., Magalhaes, F., Cunha, A. and Figueiras J. (2014), "Modal Analysis for Rehabilitation Assessment of Luiz I. Bridge", Journal of Bridge Engineering,
7. Cunha, A., Caetano, E., Brincker, R. and Andersen, P. (2004), "Identification from the natural response of Vasco da Gama Bridge", IMAC-XXII: Conference and Exposition on Structural Dynamics, 26-29 January 2004, Michigan, USA
8. Farrar, C. R. and James III, G. H. , (1997), "System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge", Journal of Sound and Vibration, 205(1):1-18
9. Gentile, C. and Saisi, A. (2001), "Bridge Modal Identification From Short Length Ambient Vibration Responses", 26th Our World in Concrete & Structures, 27-28 August 2001, Singapore

10. Herlufsen, H., Gade S. and Møller, N. (2006), "Identification Techniques for Operational Modal Analysis – an Overview and Practical Experiences", IMAC-XXIV: Conference & Exposition on Structural Dynamics - Looking Forward: Technologies for IMAC, 30 January -2 February 2006, Missori, USA
11. Huang, C. S., Yang, Y. B., Lu, L. Y. and Chen, C. H. (1999), "Dynamic Testing and System Identification of a Multi-Span Highway Bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd.; 28:857-878
12. Nanjing, Z.L., Brincker, R and Andersen, P (2005), "An overview of operational modal analysis: major development and issues", 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, pp. 179-190
13. Reynders, E., Degrauwe, D., De Roeck, G., Magalhaes, F and Caetano, E. (2010), "Combined Experimental-Operational Modal Testing of Footbridges", Journal of Engineering Mechanics, 136:687-696
14. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007), Ankara.

Anahtar Sözcükler: Operasyonel Modal Analiz, Köprü, Modal Peryotlar