

KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN DEPREM DAVRANIŞLARININ OPERASYONAL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF EARTHQUAKE BEHAVIOR OF HIGHWAY BRIDGES BY OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

BAYRAKTAR A., ALTUNIŞIK A. C., SEVİM B., TÜRKER T., ATEŞ Ş., ADANUR S.

Posta Adresi: Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Turkey.

E-posta: ahmetcan8284@hotmail.com

Anahtar Kelimeler: Deprem davranışı, Dinamik karakteristik, Karayolu köprüsü, Operasyonel modal analiz, Sonlu eleman model iyileştirilmesi.

ÖZ Bu çalışmada, karayolu köprülerinin deprem davranışlarının Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Uygulama amacıyla Trabzon İlinde bulunan ve ağır araç trafiğine maruz bir karayolu köprüsü seçilmektedir. SAP2000 sonlu eleman programıyla analitik olarak dinamik karakteristikleri belirlenen köprünün, Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle de frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmektedir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde uyarıcı olarak trafik yükü ve yaya hareketi gibi çevresel etkilerden yararlanılmaktadır. Analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar taşıyıcı sistem elemanlarının malzeme özelliklerindeki değişimleri dikkate alınarak sonlu eleman model iyileştirilmesiyle giderilmektedir. Seçilen deprem kaydı için, karayolu köprüsünün iyileştirilen sonlu eleman modeli analiz edilerek olası bir deprem davranışı belirlenmektedir. Çalışmadan, karayolu köprülerinin sonlu eleman modellerinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekliliği ortaya konulmakta ve köprünün en çok zorlanan ve muhtemel çatlakların oluşabileceği kesitler belirlenmektedir.

ABSTRACT In this study, it is aimed to determine the earthquake behavior of highway bridges using Operational Modal Analysis. A highway bridge located in Trabzon is selected as an application. Dynamic characteristics such as frequencies and mode shapes are determined both analytical modal analysis using SAP2000 finite element program and Operational Modal Analyses using ambient vibrations such as traffic load and human walking. By comparing the finite element and Operational Modal Analyses results, updated model of the bridge is created considering uncertainties in the material properties of the structural elements of the bridge. Updated model of the bridge subjected to selected earthquake record is analyzed to evaluate earthquake behavior. It is seen from the results that finite element model updating must be considered in the analyses. Also, maximum stressed sections of bridge are determined.

GİRİŞ

Yapıların dinamik özellikleri olarak adlandırılan frekans, mod şekli ve sönüm oranlarının deneysel ölçüm yöntemleri kullanılarak belirlenmesinde birçok köprü tipinin yanında (yığma köprüler, asma köprüler, kablolu köprüler, yaya üst geçitleri ve kemer köprüler) karayolu köprüleri de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Deneysel ölçüm yöntemleri olarak Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri literatürde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Deneysel Modal Analiz yönteminde yapı, bilinen ve ölçülebilen uyarıcılar ile (elektrodinamik shaker ve çekiç) titreştirilmekte ve yapının bu titreşime verdiği tepki ölçülmektedir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise rüzgâr, taşıt yükü ve yaya hareketi gibi zamana bağlı değişen uyarıcılar dikkate alınmaktadır.

Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak önemli mühendislik yapıları olarak adlandırılan köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, Paultre ve diğ. (1995), trafik yükü altında karayolu köprülerinin dinamik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Pang (1996), "Karayolu Köprülerinin Modellenmesi ve Deneysel Modal Analizi" adlı doktora tezinde Oklahama'da bulunan Walnut Creek köprüsünü incelemiştir. Deneysel ölçümlerde frekans ve zaman ortamındaki yöntemler dikkate alınmış, uyarıcı olarak sarsıcılar kullanılmıştır. Ren ve diğ. (2004) yapmış oldukları çalışmada, Roebling asma köprüsünün doğal uyarıcılar altında dinamik karakteristiklerini belirlemişler ve köprünün sonlu eleman modelini kablo kesit alanlarında %40'lara varan azalmalar yaparak iyileştirmişlerdir. Kwasniewski ve diğ. (2006), karayolu köprülerinin dinamik davranışını değişken yükler altında deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışmanın karayolu köprülerinin gerçek yük kapasitesi ve performans değerlendirmesinin belirlenmesinde etkili ve gerekli olduğu vurgulanmıştır. Bayraktar ve diğ. (2007a-b), Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yığma köprülerin ve yaya üst geçitlerinin dinamik karakteristiklerini belirlemişler, analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikleri karşılaştırarak köprülerin sonlu eleman modellerini iyileştirmişlerdir. Ayrıca bu çalışmalarda, malzeme özellikleri ve sınır şartlarının köprülerin gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelini oluşturmada etkili olduğu vurgulanmış ve olası bir deprem davranışı belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Trabzon ili Of ilçesinde bulunan bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristikleri analitik ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiş, analitik ve deneysel dinamik karakteristikler karşılaştırılarak karayolu köprüsünün sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde trafik yükü uyarıcı olarak dikkate alınmıştır. Köprünün iyileştirilmiş sonlu eleman modeli seçilen deprem yer hareketi kaydı için analiz edilerek deprem davranışı ve en çok zorlanan kesitleri belirlenmiştir.

FORMÜLASYON

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (Peak Picking-PP) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki fonksiyonları arasındaki ilişki Denklem 1'de verilmektedir (Bendat ve Piersol, 1986).

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

Burada; $G_{xx}(\omega)$ etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, $G_{yy}(\omega)$ tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve H frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklemdaki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozunu göstermektedir. Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda Denklem 2'deki şekilde elde edilmektedir.

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=Sub(\omega)} \left(\frac{d_k \psi_k \psi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \psi_k^* \psi_k^H}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (2)$$

Burada, d_k sabit bir değer ve ψ_k ise k. mod şekli vektörüdür. H kompleks eşleniğin transpozunu göstermektedir. Tepki sinyali güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrı değerler olarak Denklem 3'te verilmektedir.

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (3)$$

Burada, U_i u_{ij} tekil vektörlerinden oluşan birim matrisi, S_i s_{ij} tekil değerlerden oluşan diyagonal matrisi göstermektedir. Spektrumlarda k. moda yakın bölgelerde k. mod baskındır ve güç spektral yoğunluk fonksiyonu tek matris olarak Denklem 4'teki şekilde verilebilmektedir.

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = s_i u_{i1} u_{i1}^H, \quad \omega_i = \omega_k \quad (4)$$

Bu yöntemde, doğal frekanslar tekil değerlerin dağılımında pikler olarak, mod şekilleri ise tekil vektörler olarak elde edilmektedir. Modal sönüm oranları ise tekil pik değerlerin hızlı Fourier dönüşümü ile zaman ortamına aktarılması ve logaritmik azalım yönteminin kullanılmasıyla hesaplanmaktadır.

UYGULAMA

Çalışma kapsamında, aktif ve ağır taşıt trafiğine maruz bir karayolu köprüsünün sonlu eleman modelinin analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenen modal parametreler dikkate alınarak iyileştirilmesi ve köprü'nün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelinin oluşturularak olası bir deprem davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Trabzon'un Of ilçesinde bulunan bir karayolu köprüsü seçilmiştir. Birçok köy yolu üzerinde bulunan köprü, tersane şantiyeleri için gerekli olan malzemelerin elde edildiği taş ocağı yolu üzerinde de bulunduğundan yoğun ağır taşıt trafiğine maruz kalmaktadır. Seçilen köprü yaklaşık 20 yıllık geçmişe sahiptir. Şekil 1' de karayolu köprüsüne ait bazı görüşler verilmektedir.



Şekil-1. Karayolu köprüsüne ait bazı görüşler.

Köprünün Analitik Modeli

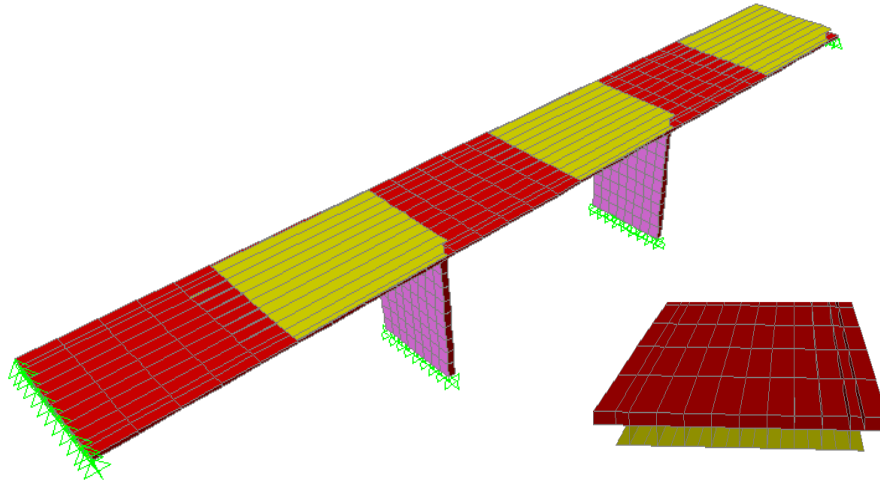
Seçilen karayolu köprüsünün toplam boyu 61,5m olup, 8,5m genişliğe sahiptir. Köprünün tabliye kalınlığı 20cm'dir. Tabliyenin alt kısmında boyuna doğrultuda uzunluğu 20,5m ve yüksekliği 1m olan üç sıra betonarme I profili bulunmaktadır. Her bir sırada enine doğrultuda yan yana dokuz adet I profili yer almaktadır. Profiller kıyıda kenar, ortalarda ise kolon ayaklara oturmaktadır. Her bir kolon 10m yüksekliğinde ve 6,40m x 0,50m kesitlidir. Tabliye kenarlarında 50cm genişliğinde ve 20cm kalınlığında yaya geçişi bulunmaktadır. Köprü kenarlarında 80cm yüksekliğinde korkuluklar mevcuttur. Yaya geçişleri ve kenarlardaki korkulukların kütleleri köprünün iyileştirilmiş sonlu eleman modeli oluşturulurken tabliye kütlesine eklenmiştir.

Çalışma kapsamında seçilen karayolu köprüsü için dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo-1. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri.

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)
Tabliye	2,482E10	0,2	2403
I profilleri	2,482E10	0,2	2403
Ayaklar	2,482E10	0,2	2403

Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı (SAP2000, 1997) kullanılarak oluşturulmuştur. Köprü kolon ayaklarının zemine oturduğu bölümlerin bütün hareketleri (ankastre mesnet), köprü tabliyesinin kıyıdaki kenarlarının ise hem yatay hem de düşey hareketi (sabit mesnet) engellenmiştir. Karayolu köprüsünün SAP2000 programı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2'de verilmektedir.



a) Köprünün 3D sonlu eleman modeli b) Tabliye I profilli birleşimi

Şekil-2. Karayolu köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli.

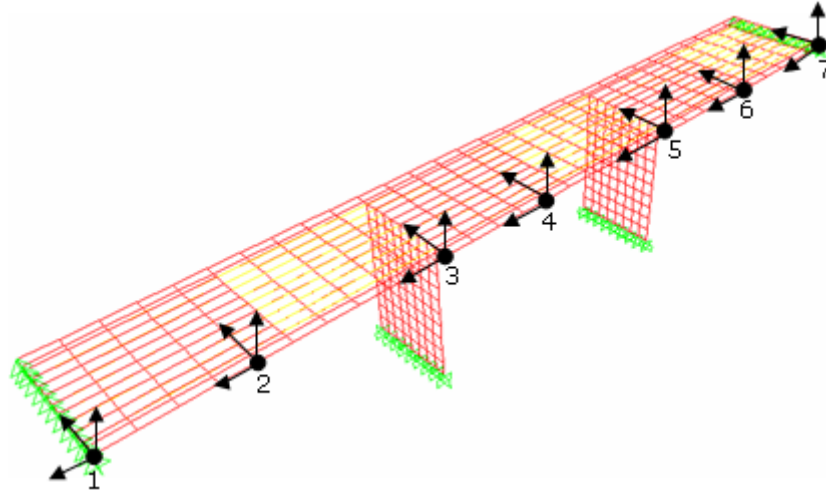
Deneysel Ölçümler

Karayolu köprüsünün modal parametrelerinin titreşim testleri yapılarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçümlerde dört adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Her bir ivmeölçerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesinde birleştirilip ilgili programlarda (Şekil 3) işlenmiştir. İşlenen titreşim sinyalleri burada harmonize edilip Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımına aktarılmış ve modal parametreler belirlenmiştir.

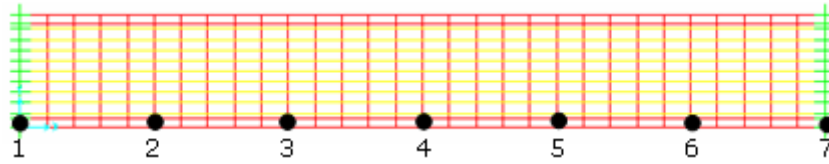


Şekil-3. Deneysel ölçümlerde kullanılan veri toplama ünitesi ve üç eksenli ivmeölçer.

Modal parametrelerin belirlenmesinde yedi farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim sinyalleri toplanmıştır. Köprünün aktif taşıt yüküne maruz kalmasından dolayı referanslı ölçümler alınamamıştır. Ayrıca, seçilen karayolu köprüsü dere yatağı üzerinde bulunduğundan köprü ayaklarından titreşim verileri elde edilememiştir. Bu nedenle deneysel ölçümler köprü tabliyesi üzerinde tek sırada gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerde, iki farklı ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. İlk ölçüm düzeneğinde ivmeölçerler Şekil 4'te gösterilen 1-3-5-7 noktalarına (köprü kenar noktaları ile köprü ayaklarının tabliye üzerindeki izdüşümlerine) yerleştirilmiş, ikinci ölçüm düzeneğinde ise ivmeölçerler 2-4-6 noktalarına (her bir açıklık için orta noktalara) yerleştirilmiş ve titreşim sinyalleri toplanmıştır. Köprüyü titreştirmek amacıyla dışarıdan kuvvet uygulanmış, ağır taşıt yükü gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.



a) Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

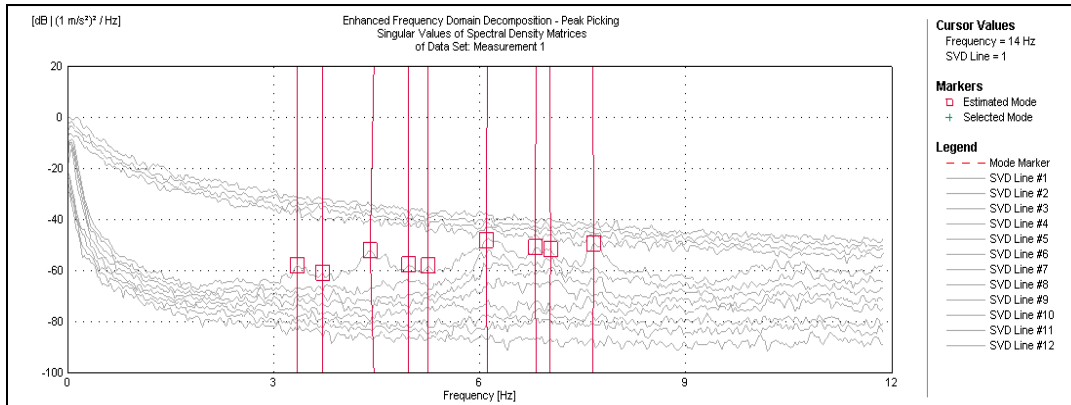


b) Köprü tabliyesi

Şekil-4. Deneysel ölçümlerde kullanılan ölçüm düzeneği.

Analitik ve Deneysel Olarak Elde Edilen Dinamik Parametreler

Deneysel olarak elde edilen titreşim sinyallerinin Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımı kullanılarak işlenip modal parametrelerin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin matematik tabanları hemen hemen benzer olup, denklem indirgeme teknikleri ve matris oluşturma yöntemleri arasında bazı farklılıklar mevcuttur. Her bir yöntemin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Fakat gerek işlem hızı ve kolaylığı, gerekse basitliği gibi nedenlerden dolayı deneysel ölçüm metotlarına bağlı modal parametrelerin elde edilmesinde Piklerin Seçilmesi (Peak Picking-PP) yöntemi kullanılmaktadır. Modal parametreler, Piklerin Seçilmesi yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilmektedir. Şekil 5'te Piklerin Seçilmesi yöntemi için bütün sinyallerden elde edilen değerler gösterilmektedir.



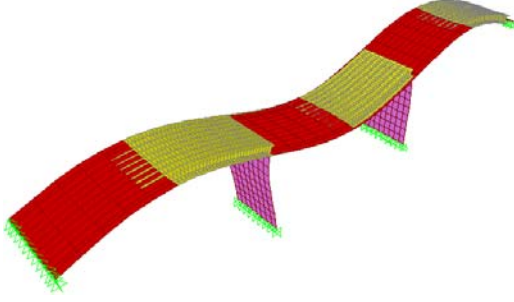
Şekil-5. Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler.

Köprünün analitik ve deneysel olarak elde edilen ilk altı frekans ve sönüm değerleri Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

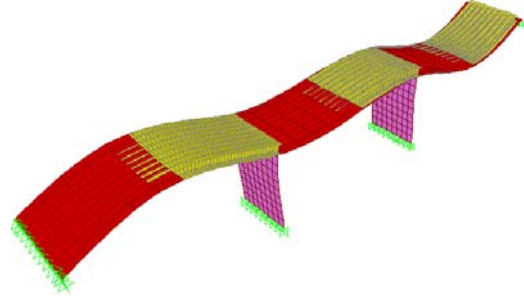
Tablo-2. Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler.

Frekans No	Analitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (PP) (Hz)	Deneysel Sönüm Oranları (%)
1	3,57	3,35	1,336
2	4,33	3,71	0,689
3	4,72	4,46	3,953
4	5,26	4,97	0,535
5	6,12	5,25	0,508
6	6,59	6,11	0,605

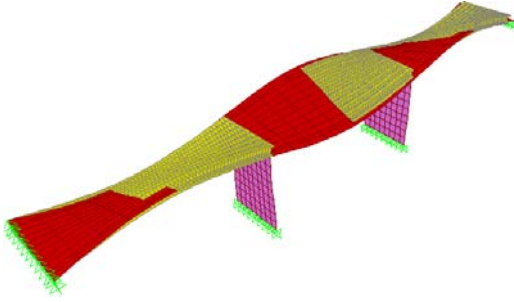
Şekil 6 ve 7'de analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekilleri verilmektedir. Köprünün analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekilleri dikkate alındığında mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu ve ilk altı mod şeklinin eğilme ve burulma modları olarak elde edildiği görülmüştür.



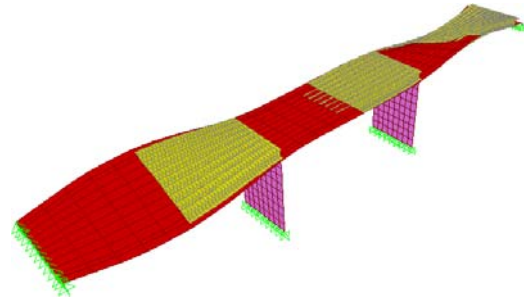
1. Eğilme modu($f= 3,57$ Hz)



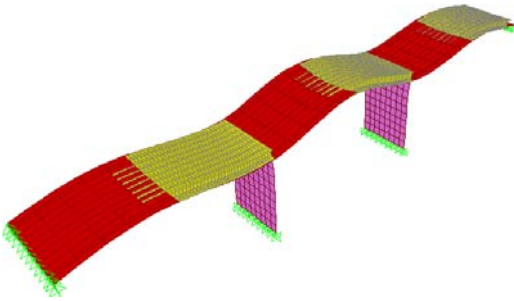
2. Eğilme modu ($f= 4,33$ Hz)



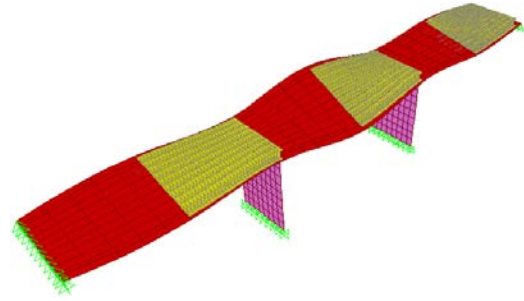
1. Burulma modu($f= 4,72$ Hz)



2. Burulma modu ($f= 5,26$ Hz)



3. Eğilme modu ($f= 6,12$ Hz)



3. Burulma modu ($f= 6,59$ Hz)

Şekil-6. Analitik olarak elde edilen ilk altı mod şekli.

Tablo-3. Sonlu eleman model iyileştirilmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri

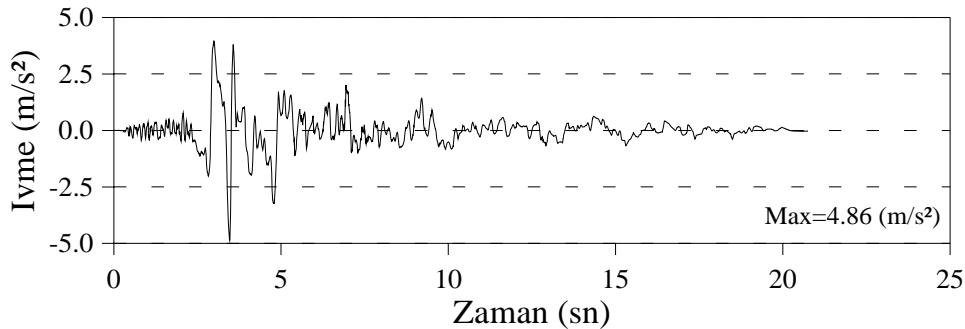
Malzeme	Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinden Önce		Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinden Sonra	
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	Elastisite Modülü (N/m ²)	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)
Tabliye	2,482E10	2403	2,200E10	3500
I propilleri	2,482E10	2403	2,200E10	2000
Ayaklar	2,482E10	2403	2,200E10	2000

Tablo-4. İyileştirilen modelin analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri

Frekans No	Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilen Anallitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (PP) (Hz)
1	3,57	3,35	3,35
2	4,33	4,07	3,71
3	4,72	4,35	4,46
4	5,26	4,85	4,97
5	6,12	5,75	5,25
6	6,59	6,08	6,11

İyileştirilen Sonlu Eleman Modelinin Dinamik Analizi

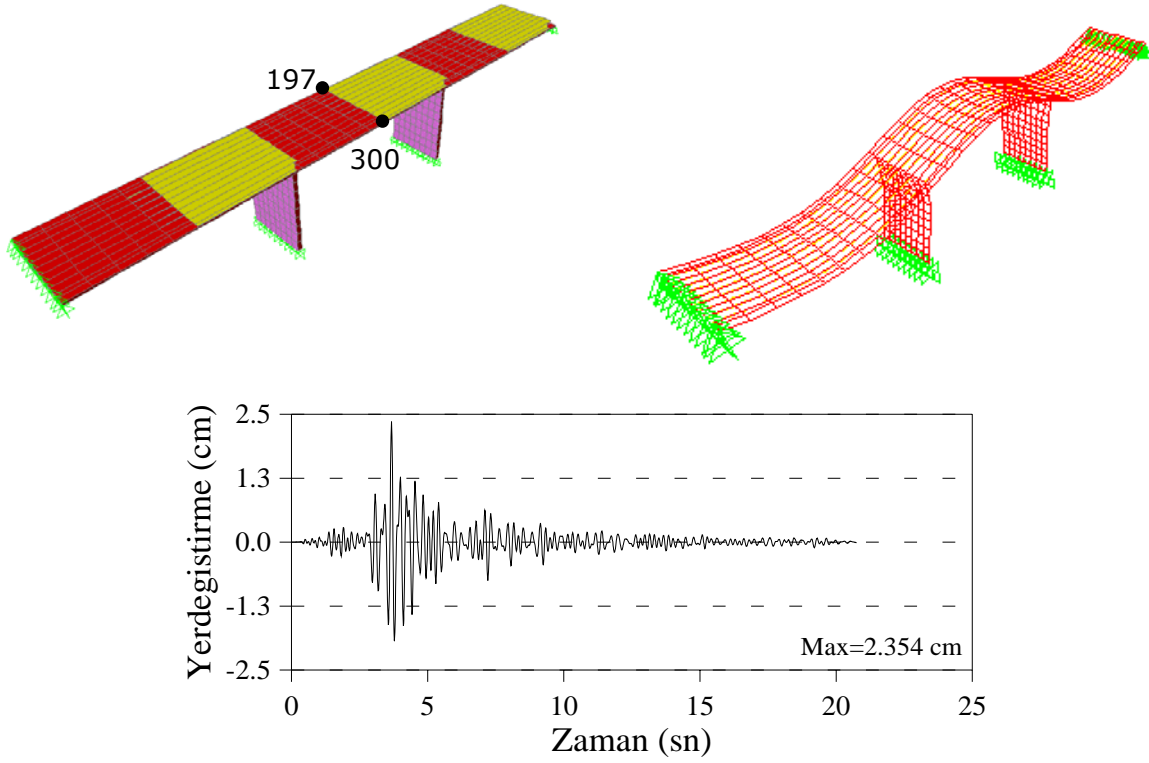
Uygulama olarak seçilen karayolu köprüsünün deneysel ölçüm sonuçlarına göre modal iyileştirmesi yapıldıktan sonraki sonlu eleman modeli, 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin ERZİKAN/ERZ-EW bileşeni (Şekil 8) kullanılarak analiz edilmiştir. Pik değeri 0.496g olan ivme kaydı köprüye düşey doğrultuda uygulanmıştır.



Şekil-8. 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni.

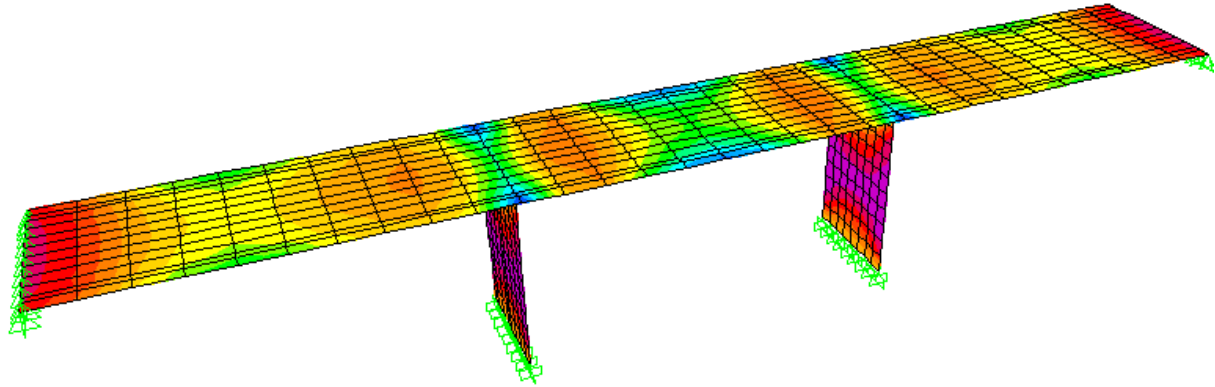
Köprünün dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirmelerin tabliye kenar orta noktalarındaki (197 ve 300 nolu düğüm noktalarından elde edilen yerdeğiştirmeler simetriden dolayı eşit çıkmaktadır) zamana bağlı olarak değişimi, maksimum değeri ve

maksimum yerdeğistirmelerin elde edildiği andaki sistemin yerdeğistirmiş hali Şekil 9'da verilmektedir.

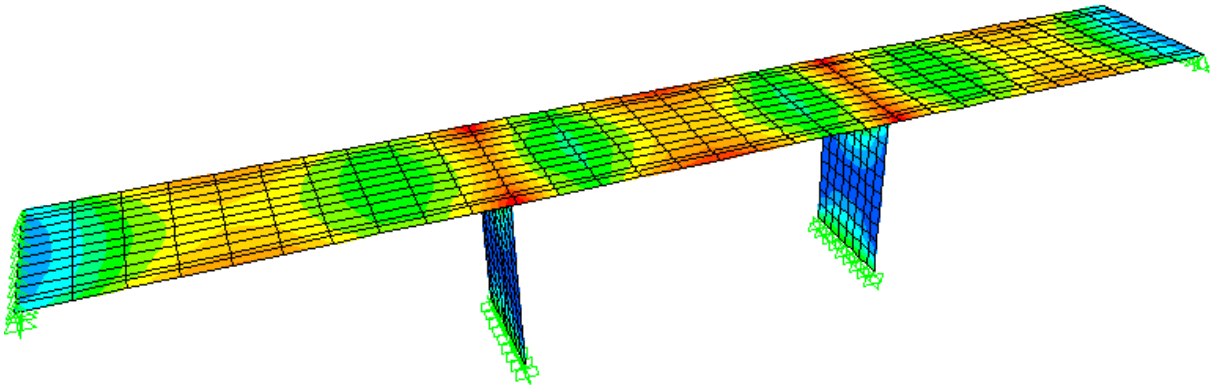


Şekil-9. Analizler sonucu elde edilen deformasyon şekilleri ve yerdeğistirme değerleri.

Köprünün dinamik analizi sonucunda maksimum ve minimum asal gerilmelerin oluştuğu andaki sistemin gerilme diyagramı ve en çok zorlanan kesitleri Şekil 10'da verilmektedir.



a) Maksimum asal gerilmeler



b) Minimum asal gerilmeler

Şekil-10. Maksimum ve minimum asal gerilmelerin oluştuğu andaki diyagramlar.

SONUÇ

Bu çalışmada, karayolu köprülerinin deneysel ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikleri dikkate alınarak sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulama amacıyla, Trabzon ili Of ilçesinde bulunan ve ağır taşıt yüküne maruz bir karayolu köprüsü seçilmiştir.

Analizler ve deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri incelendiğinde mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu ve ilk altı mod şeklinin eğilme ve burulma modu olduğu görülmüştür. Buna rağmen, dinamik karakteristikler arasında bazı farklılıkların bulunduğu ve deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin analitik olarak elde edilen frekans değerlerinden daha küçük olduğu görülmüştür.

Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkların giderilmesi için karayolu köprüsünün sonlu eleman modelin iyileştirilmesinin gerekliliği ortaya konulmuş ve köprünün yapısal elemanlarının malzeme özelliklerindeki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen model iyileştirmesinin sonuçlar arasındaki uyumu arttırdığı görülmüştür.

Köprüler gibi önemli mühendislik yapıları üzerinde yapılacak çalışmalarda hem mod şekillerinin daha iyi belirlenmesi hem de değişik yöntemler kullanılarak dinamik karakteristikler arasında daha iyi bir uyumun elde edilebilmesi için referanslı ölçümlerin alınmasının ve alınacak ölçümler için köprü ayaklarından da ölçümlerin yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Dinamik analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirmeler dikkate alındığında, maksimum yerdeğiştirmelerin tabliye orta açıklıklarında elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, maksimum ve minimum asal gerilmelerin tabliye ile köprü ayaklarının birleşim bölgelerinde olduğu ve muhtemel çatlakların bu bölgelerde oluşabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Programı tarafından desteklenen 106M038 numaralı araştırma projesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi tarafından desteklenen 2005.112.001.1 numaralı araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., ve Sevim, B., 2007a, Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi, **Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı**, 29-40, Ankara, Türkiye.

Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., ve Altunışık, A.C., 2007b, Determination of dynamic characteristics of steel footbridges by analytical and experimental modal analyses, **International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering**, 163-173, Isparta, Turkey.

Bendat, J.S. and Piersol A.G., 1986, **Random Data Analysis and Measurement Procedures**, John Wiley & Sons, 1986.

Kwasniewski, L., Wekezer, J., Roufa, G., Li, H., Ducher, J., ve Malachowski, J., 2006, Experimental evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge, **Journal of Bridge Engineering, ASCE**, 9, 119-126.

Pang, J., 1996, Modelling and experimental modal analysis of Highway Bridge, **Doktora Tezi**, University of Oklahoma, USA.

Paultre, P., Proulx, J., ve Talbot M., 1995, Dynamic testing procedures for Highway Bridges using traffic loads, **Journal of Structural Engineering, ASCE**, 121, 362-376.

Ren, W.X., Harik, I.B., Blanford, G.B., Lenett, M., ve Baseheart, T.M., 2004, Roebling Suspension Bridge II: Ambient Testing and Live-Load Response, **Journal of Bridge Engineering, ASCE**, 9, 2, 119-126.

SAP2000, 1997, Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and structures, Inc., Berkeley, California, USA.

Zivanovic, S, Pavic A., ve Reynolds, P, 2006, Modal testing and FE model tuning of a lively footbridge structure, **Engineering Structures**, 28, 857-868.