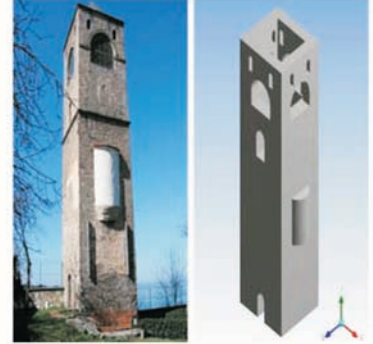


TARİHİ YAPILARIN DEPREM GÜVENLİKLERİNİN TAHRİBATSIZ DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Alemdar BAYRAKTAR, Ahmet Can ALTUNIŞIK, Barış SEVİM, Temel TÜRKER, Fatma BİRİNCİ
Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Özet

Tarihi eserler geçmişî geleceğe bağlayan yapılardır. Bu yapıların güvenlikleri deneysel yöntemler kullanılarak tahribatsız olarak belirlenmelidir. Tahribatsız güvenlik belirlenme yöntemlerinden en yaygın kullanılanı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'dir. Bu çalışmada, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak tarihi yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Uygulama amacıyla, Türkiye'de inşa edilen bir tarihi köprü, bir tarihi minare ve bir tarihi kule seçilmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak bu yapıların dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmiştir. Ölçümlerde titreştirici olarak çevresel etkilerden yararlanılmıştır. Çalışma sonunda, sonlu eleman modeli ve deneysel ölçümlerden elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve yapıların mevcut durumunu yansıtabilecek şekilde sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş sonlu eleman modelleri kullanılarak tarihi yapıların deprem güvenlikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik karakteristik, Deprem güvenliği, Operasyonel modal analiz, Sonlu eleman model iyileştirmesi, Tahribatsız deneysel yöntemler, Tarihi yapılar

Giriş

Modern toplumların temel problemlerinden biri de tarihi değere sahip yapıların korunmasıdır. Tarihi önemlerinin yanında, bu eserler mimari çekiçlilikleriyle de buldukları şehirlerin dolayısı ile ülkelerin ekonomilerine katkı sağlamaktadırlar. Turizm gelirleri ülkelerin temel ekonomik kaynaklarından birisidir ve özellikle son yıllarda kültür turizmine olan ilgi artmıştır. Bu nedenle tarihi yapıların korunmasının gerekliliği sadece kültürel bir ihtiyaç değil, aynı zamanda ekonomik gelişmeye yönelik bir eylemdir (**Ramos, 2007**). Tarihi yapıların günümüze kadar ulaşma sürecinde trafik, rüzgâr, deprem ve dalga hareketleri gibi önemli dinamik etkilere maruz kaldıklarından dolayı ayakta kalabilmeleri için de bazı önlemlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunu sağlamak için de bu yapıların

mevcut yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Tarihi yapıların gerçek yapısal davranışlarını öğrenmek için de sahip oldukları dinamik karakteristiklerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Tarihi yapılar ve bütün mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki davranışları, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir. Günümüzde dinamik karakteristikler, yapıların proje verileri veya arazi üzerinde gerçekleştirilen ölçümler dikkate alınarak belirlenen eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal (serbest titreşim) analizleri sonucunda analitik olarak belirlenmektedir. Fakat analizler sırasında dikkate alınan parametreler, yapı malzemesinin zamanla dayanımını yitirmesi, yapının inşası sırasında gerçekleşen işçilik hataları, yapının maruz kaldığı farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlamlar, yorulmalar, mesnet

çökmeleri gibi nedenlerden dolayı değişime uğramış ve yapı dinamik karakteristikleri zaman içerisinde beklenen değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir. Dolayısıyla, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılmasıyla doğru olmayan analiz sonuçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, yapı dinamik karakteristiklerinin analitik yöntemlerin yanında deneysel yöntemlerle de belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemler ve ölçümler yapının mevcut durumu üzerine uygulandığından, elde edilen dinamik karakteristikler yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır.

Günümüzde yapı dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleridir. Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapılar bilinen ve ölçülebilen bir etki (elektro dinamik sarsıcılar, sarsma tablaları, darbe çekiçleri vb.) ile titreştirilmekte ve yapının bu etkiye karşı göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapı çevresel etkiler ile titreştirilmekte ve yapının bu etkilere göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir (**Chauhan, 2008**). Uygulama basitliği, ölçüm sırasında varsa trafik akışının kesilmemesi, ucuz maliyet gibi nedenlerden dolayı bu yöntem tarihi yapıların ve hemen hemen bütün mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Literatürde tarihi yapıların deneysel ölçümlere dayalı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur. **Mendes ve diğ. (2005)**, 16.yy da

inşa edilen, 1755 Lizbon depreminde hasar gördükten sonra restorasyon çalışmalarına maruz kalan N. Sra. do Carmo kulesinin dinamik karakteristiklerini sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümler sonucunda elde etmişlerdir. **Ivorra ve Pallares (2006)**, Valensiya'da bulunan Nuestra Sra. dela Misericordia kulesinin dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlemişlerdir. Deneysel ölçüm verileri dikkate alınarak kulenin sonlu eleman modeli iyileştirilmiş ve deprem güvenliği belirlenmiştir. **Bayraktar ve diğ. (2007a; 2008; 2010a)**, tarihi minarelerin dinamik karakteristiklerini ve deprem davranışlarını sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçüm verilerini dikkate alarak belirlemişlerdir. **Bayraktar ve diğ. (2007b)**, Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak tarihi bir köprünün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemişlerdir. Köprünün sonlu eleman modeli sınır şartlarındaki değişimler göz önünde tutularak deneysel ölçüm sonuçları yardımıyla iyileştirilmiştir. **Brencich ve Sabia (2008)**, 1866 yılında inşa edilen tarihi Tanaro köprüsünü incelemişlerdir. Köprü üzerinde dinamik testler gerçekleştirilerek doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir. Bu çalışmaların yanında, önemli mühendislik yapılarının deneysel ölçüm verilerine bağlı dinamik karakteristiklerin elde edilmesi hakkında birçok mevcuttur (**Bayraktar ve diğ., 2007c; 2009a-f; 2010a-j**).

Bu çalışmada, tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmesi, deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilen sonlu eleman modelleri üzerinden tarihi yapıların deprem güvenliklerinin

belirlenmesi amaçlanmaktadır. Uygulama amacıyla, Rize ilinde bulunan tarihi Osmanlı köprüsü, Trabzon ilindeki tarihi İskenderpaşa minaresi ve tarihi Ayasofya kulesi seçilmiştir. Deneysel ölçümler Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tarihi yapıların titreşim verileri elde edilmiştir. Verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleri kullanılmıştır.

Operasyonel Modal Analiz Formülasyonu

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleridir. GFOA yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntemdir. Frekans ortamlı yöntemler basitlikleri, işlem hızları ve altyapı gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilmektedirler. GFOA yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak açıklanmıştır (**Brincker ve diğ., 2003**). Bu bağıntılar,

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

denkleminin açılımlarından elde edilmektedir. Burada, $[G_{xx}(\omega)]$ etki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu, $[G_{yy}(\omega)]$ tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu'nu ve $[H(\omega)]$ ise Frekans Davranış Fonksiyonu'nu göstermektedir. **(1)** denklemindeki * ve T sırasıyla fonksiyonun eşleniğini ve transpozisini göstermektedir.

SAB yöntemi zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemde zaman verilerinin korelasyon veya spektral dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalıştırır. Söz konusu yöntemde dikkate alınan bağıntı ve formülasyonlar literatürde detaylı olarak yer almaktadır (**Ren ve diğ., 2004**). Bu bağıntılar,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

hareket denkleminde elde edilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve dış kuvvet vektörlerini ifade etmektedir.

Sonlu Eleman Analizinden Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

Osmanlı Köprüsü

Osmanlı Köprüsü, 19. yüzyılda Rize iline bağlı Çamlıhemşin ilçesindeki Fırtına Deresi üzerinde inşa edilen köprülerden bir tanesidir ve bu köprüyü diğerlerinden ayıran özellik çift kemer açıklıklı olmasıdır. Köprü'nün temel yapısal bölümleri olan taş kemerler, yan duvarlar ve yan duvarlar arasında kalan dolgu malzemesi günümüze kadar herhangi bir restorasyon çalışmasına uğramamıştır. Osmanlı köprüsüne ait bazı görünüşler **Şekil 1**'de verilmektedir.

Köprü toplam 51.7m uzunluğunda olup Fırtına Deresi'ni iki kemer açıklıklı geçmiştir. Taş kemerler dairesel kesitli olup, açıklıkları 25.2m ve 6m'dir. Taş kemer kalınlıkları sırasıyla 58cm ve 15cm'dir. Her iki yan duvar genişliği 50cm olup, duvarlar arasında kalan dolgu duvar genişliği ise 2.5m'dir. Köprü kesit özellikleri **Şekil 2**'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

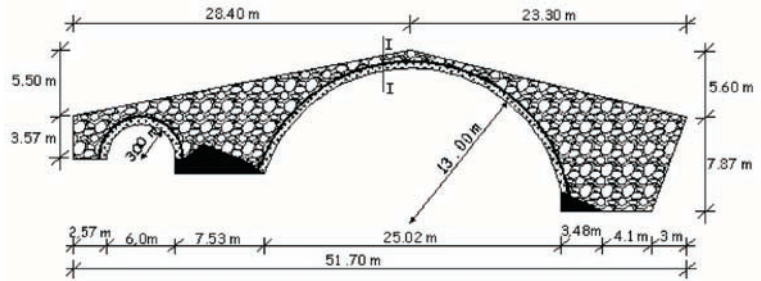
Köprü'nün sonlu eleman

analizlerinde kemer, dolgu ve yan duvarlar için üç farklı malzeme kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor ve pahalı bir süreç olduğu için malzeme özellikleri literatürde daha önce bu konuda yapılan çalışmalardan (**Bayraktar ve diğ., 2007b; Brencich ve Sabia, 2008**) elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri **Tablo 1**'de özetlenmektedir.

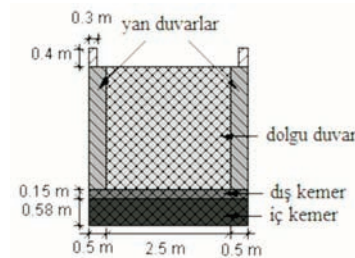
Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli ve analizleri ANSYS programı (**ANSYS, 2008**) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu sadece dinamik karakteristiklerin elde edilmesi istenildiğinden analiz türü olarak Modal Analiz seçilmiştir. Köprü yapısal elemanları SOLID186 eleman tipi seçilerek modellenmiştir. Bu eleman her bir düğüm noktasında üç hareket serbestliğine sahip 20 düğüm



Şekil 1. Tarihi Osmanlı taş kemer köprüsüne ait bazı görünüşler



a) Köprü boyuna kesiti



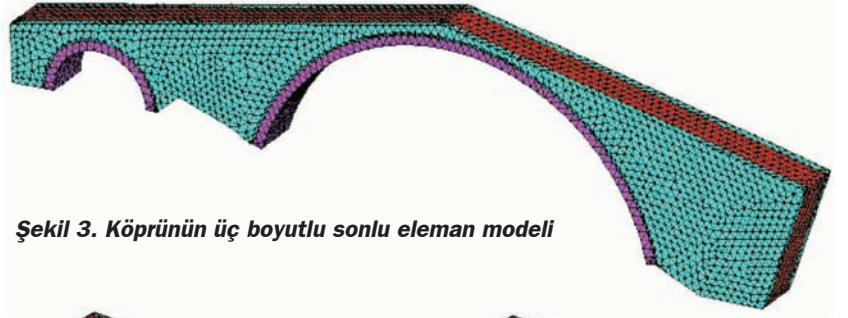
b) Köprü enine kesiti (I-I kesiti)

Şekil 2. Köprü boyuna ve enine kesitleri

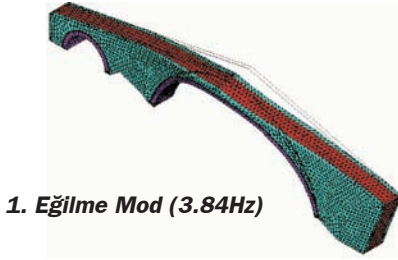
Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Taş Kemerler	3.0E9	0.25	1600
Dolgu Duvar	1.5E9	0.05	1300
Yan Duvarlar	2.5E9	0.20	1400

Tablo 1. Sonlu eleman analizlerinde dikkate alınan malzeme özellikleri

noktalı bir elemandır. Köprü'nün modellenmesi sırasında sınır şartları olarak köprü zemininin bütün doğrultudaki, yan duvarların da enine doğrultudaki bütün serbestliklerinin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli **Şekil 3**'te



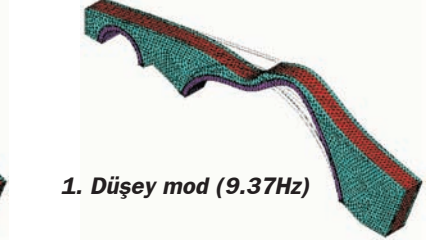
Şekil 3. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli



1. Eğilme Mod (3.84Hz)



2. Eğilme Modu (7.53Hz)



1. Düşey mod (9.37Hz)

Şekil 4. Analizler sonucu elde edilen ilk üç mod şekli

verilmektedir. Sonlu eleman analizleri sonucunda ilk üç doğal frekans 3-10Hz aralığında elde edilmiştir. Elde edilen ilk üç mod şekli **Şekil 4**'te verilmektedir. Mod şekilleri genel olarak eğilme ve düşey modlarından oluşmaktadır.

İskenderpaşa Minaresi

İskenderpaşa minaresi, XVI. yüzyılda (1529) Trabzon Valisi İskender Paşa tarafından yaptırılmıştır. Doğudaki tek şerefeli minare olan yapıda taş ile tuğla bir arada kullanılmıştır (**Şekil 5**). İskenderpaşa minaresinin taban kısmında çapı 2.2m ve yüksekliği 3m olan sekizgen kaide bulunmaktadır. Kaidenin üstünde alt ve üst çapı sırasıyla 2.2m ve 1.5m olan 2m yüksekliğinde küp bulunmaktadır. Küpün üzerinde 1.5m çapında ve 11.5m yüksekliğinde gövde bulunmaktadır. Gövdenin bitim bölgesinde sahanlık genişliği 0.4m ve korkuluk yüksekliği 1m olan şerefe vardır. Şerefenin üzerinde 1.3m çapında ve 3m yüksekliğinde petek bulunmaktadır. Minarenin petek bölgesinin üzerinde kalan en üst kısmını 1m yüksekliğindeki külah oluşturmaktadır. Minarenin iç

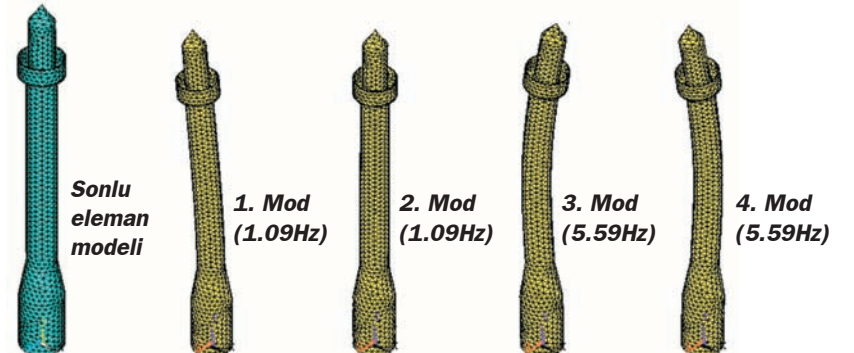
kısımında çapı 0.2m olan taş sütun bulunmaktadır. Taş sütunun etrafında şerefe bölgesine kadar devam eden 0.2m basamak kalınlığında merdivenler yer almaktadır. Her bir merdiven iç ve dış çapı sırasıyla 0.10m ve 0.60m olan daire dilimlerinden oluşmaktadır. Minarenin toplam boyu ise 20.5m'dir.

Minarenin sonlu eleman modelinde 18712 adet üç boyutlu katı eleman kullanılmıştır. Sınır şartları olarak minarenin kaide kısmının alt bölgesindeki bütün serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Minarenin ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak oluşturulan

üç boyutlu sonlu eleman modeli ve analizler sonrasında elde edilen ilk dört mod şekli **Şekil 6**'da verilmektedir. Mod şekilleri dikkate alındığında ilk dört modun yatay doğrultuda ötelenme olduğu görülmektedir.



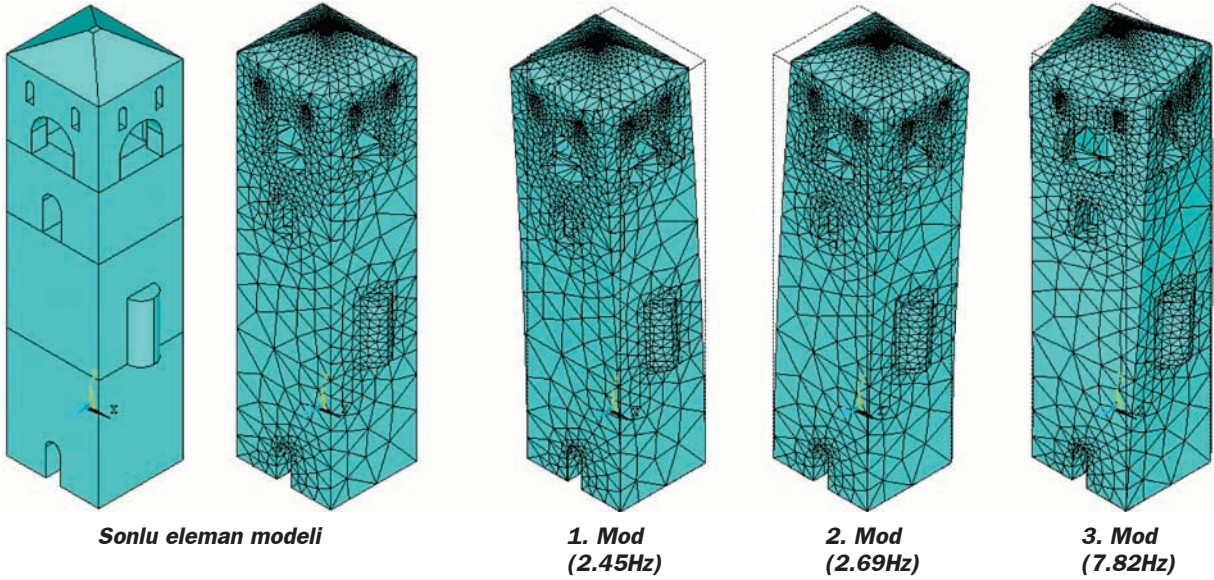
Şekil 5. İskenderpaşa Camii ve minaresi



Şekil 6. Minarenin sonlu eleman modeli ve analizler sonucunda elde edilen ilk dört mod şekli



Şekil 7. Ayasofya müzesi ve kulesine ait görüşler ve kesit özellikleri



Şekil 8. Ayasofya kulesinin sonlu eleman modeli ve analizler sonucu elde edilen mod şekilleri

Ayasofya Kulesi

Ayasofya müzesi ve kulesi, Kral I.Manuel tarafından 1250-1260 yılları arasında yaptırılmıştır. I. Dünya Savaşı yıllarında Ruslar tarafından işgal edilen Ayasofya, askeri karargâh, hastane, depo ve savaştan sonra yine cami olarak kullanılmıştır. 1958-1962 yılları arasında Edinburgh Üniversitesi ve Vakıflar Genel Müdürlüğü işbirliği ile restore edilerek, 1964 yılında müzeye çevrilmiştir. Ayasofya kulesi, 5.0m*5.5m boyutlarında dikdörtgen kesite sahip olup toplam 23m uzunluğundadır. Kule üzerinde dörtgen biçimli küçük ve kemer tipinde büyük pencereler bulunmaktadır (Şekil 7).

Kulenin üç boyutlu sonlu eleman modeli arazi ölçümleri ile belirlenen eleman boyutları ve kesit özellikleri dikkate alınarak ANSYS programında oluşturulmuştur. Modellemelerde sekiz düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmıştır. Kulenin sonlu eleman modeli, toplam 38268 düğüm noktası ve 21484 katı elemandan oluşmaktadır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri bu tür yapılar için literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve Poisson oranı sırasıyla 1.3E9N/m², 1600kg/m³ ve 0.15 olarak seçilmiştir. Sınır şartları olarak kule tabanındaki bütün hareketler tutulmuştur.

Analizler sonucunda ilk üç frekans 2-8Hz aralığında elde edilmiş olup, mod şekilleri eğilme ve burulma modları olarak belirlenmiştir (Şekil 8).

Deneyel Ölçümlerden Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

Osmanlı Köprüsü

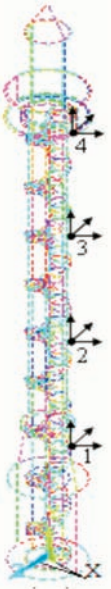
Tarihi kemer köprünün dinamik karakteristiklerini deneyel olarak belirlemek için Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2008) yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler sırasında 15 adet tek eksenli ivmeölçer, yaklaşık 500m tek eksenli sinyal kabloları ve 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 tipi veri toplama ünitesi

kullanılmıştır. İvmeölçerlerin yerleşim planı **Şekil 9**'da gösterilmektedir. Ölçüm sistemine ait bazı görünüşler **Şekil 10**'da verilmektedir. Deneysel ölçümlerde titreştirici olarak, yaya ve rüzgâr yükleri gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.

Dinamik karakteristikler GFOA yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilirken, SAB yönteminde ise elde edilen sinyallerin yığılımlı toplamından tekil değerler olarak elde edilmiştir. Köprü üzerinde birçok ölçüm gerçekleştirilmiş olup, **Şekil 11**'de sadece bir ölçüm için bütün sinyallerden elde edilen değerler gösterilmektedir.

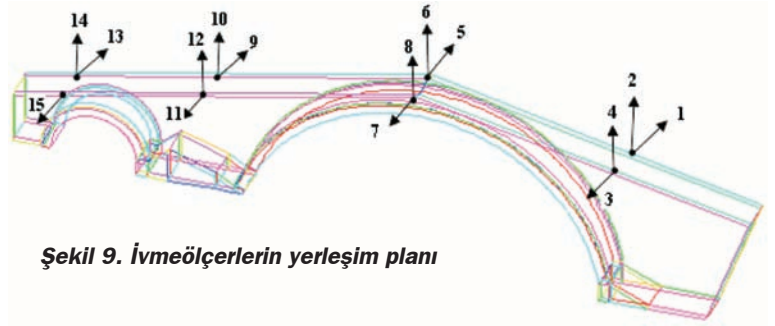
Deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerlerine ait mod şekilleri **Şekil 12**'de verilmektedir. Mod şekilleri eğilme ve düşey modlar olarak elde edilmiştir.

İskenderpaşa Minaresi



Şekil 13.
İvmeölçerlerin yerleşim düzeni

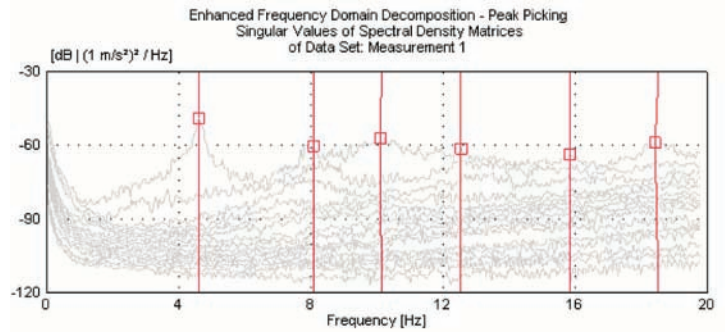
Dinamik karakteristikler GFOA yönteminde her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilirken, SAB yönteminde ise sinyallerin yığılımlı toplamından tekil değerler olarak elde edilmiştir. Minare üzerinde birçok ölçüm gerçekleştirilmiş olup, **Şekil 14**'te sadece



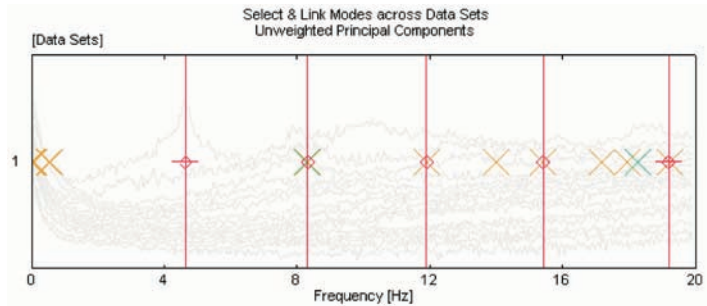
Şekil 9. İvmeölçerlerin yerleşim planı



Şekil 10. Deneysel ölçüm sistemi

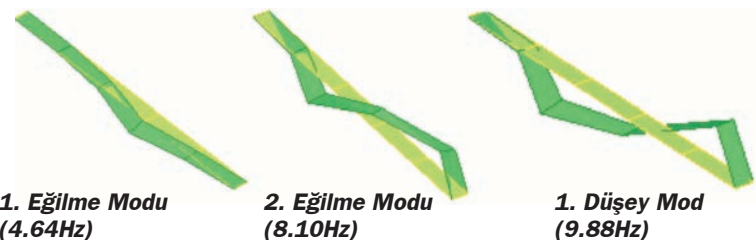


a) GFOA yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler



b) SAB yönteminden elde edilen tekil değerler

Şekil 11. GFOA ve SAB yöntemleriyle elde edilen dinamik karakteristikler



1. Eğilme Modu (4.64Hz)

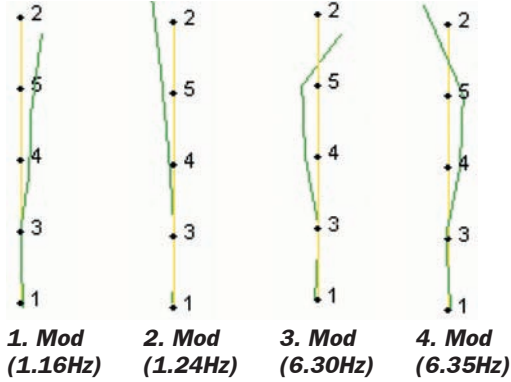
2. Eğilme Modu (8.10Hz)

1. Düşey Mod (9.88Hz)

Şekil 12. Deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

bir ölçüm için bütün sinyallerden elde edilen değerler gösterilmektedir.

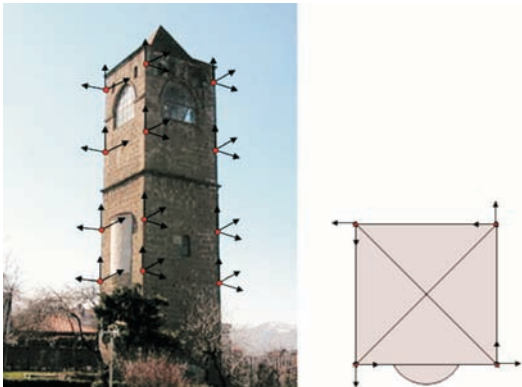
DeneySEL ölçümlerden elde edilen frekans değerlerine ait mod şekilleri **Şekil 15**'te verilmektedir. Mod şekilleri yanal ötelenme modlarıdır.



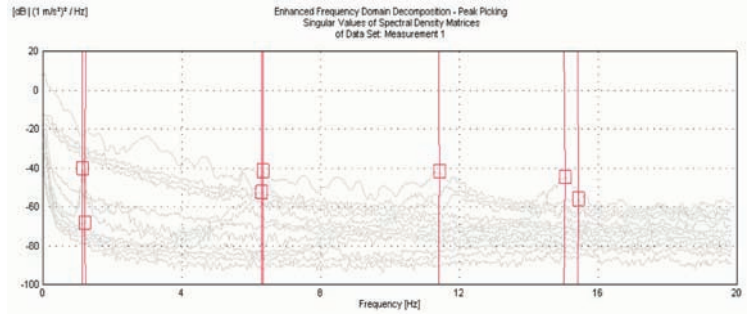
Şekil 15. DeneySEL ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

Ayasofya Kulesi

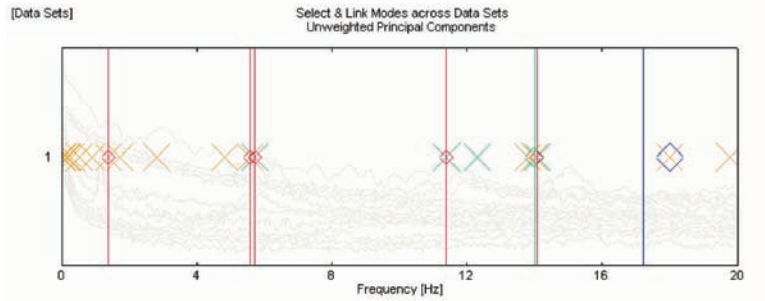
Kulenin doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde edebilmek amacıyla on yedi farklı noktadan üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak titreşim verileri toplanmıştır. Verilerin toplanacağı nokta sayısı, veri toplama ünitesinin kanal sayısından fazla olduğu için deneySEL ölçümler dört adımda gerçekleştirilmiştir. Her bir adımda tek eksenli ivmeölçerlerin yeri değiştirilmemiş, üç eksenli ivmeölçerler ise yükseklik boyunca değişik kotlara taşınmıştır (**Şekil 16**). Kule üzerinde birçok ölçüm gerçekleştirilmiş olup, **Şekil 17**'de sadece bir ölçüm için bütün sinyallerden elde edilen değerler gösterilmektedir.



Şekil 16. İvmeölçerlerin yerleşim planı

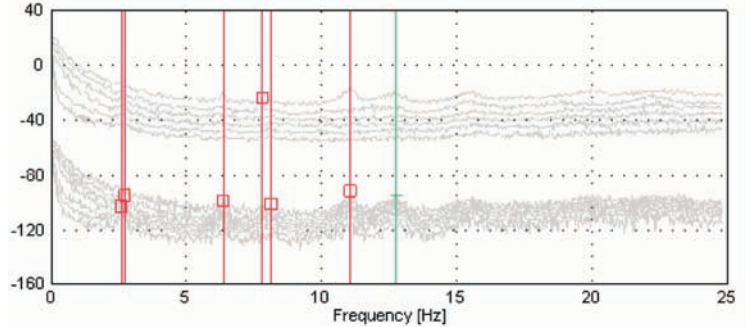


a) GFOA yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler

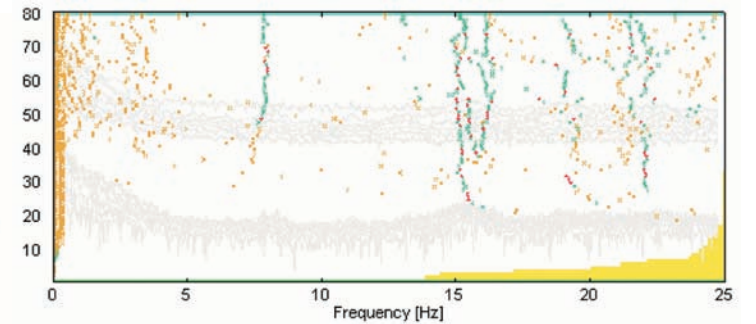


b) SAB yönteminden elde edilen tekil değerler

Şekil 14. GFOA ve SAB yöntemleriyle elde edilen dinamik karakteristikler



a) GFOA yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler



b) SAB yönteminden elde edilen tekil değerler

Şekil 17. GFOA ve SAB yöntemleriyle elde edilen dinamik karakteristikler

DeneySEL ölçümlerden elde edilen frekans değerlerine ait mod şekilleri **Şekil 18**'de verilmektedir. Mod şekilleri başlıca eğilme ve burulma modlarıdır.

Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi

Osmanlı Köprüsü

Analitik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu, fakat doğal frekanslar arasında bazı farklılıkların bulunduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılıkların nedenleri arasında sonlu eleman analizleri sırasında malzeme özellikleri ve sınır şartlarında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamaması yer almaktadır. Bunlara ilaveten köprünün yan duvarlarında zamana bağlı olarak biriken malzemeler bu bölgelerde mesnetleşmelerin oluşmasına neden olmuştur (**Şekil 19**). Bu çalışmada tarihi köprünün malzeme özellikleri literatüre uygun olarak dikkate alındığından, sadece sınır şartlarındaki değişimler göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla köprünün boyuna doğrultuda yan duvarlarında zamanla biriken malzemelerin oluşturduğu mesnetleşmeler dikkate alınarak sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. İyileştirmeden sonra doğal frekanslar arasındaki farklılıklar minimum düzeye getirilirken (**Tablo 2**), mod şekilleri arasındaki uyum devam etmiştir.

İskenderpaşa Minaresi

Analitik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar arasında farklılıkların olduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılıkların nedenleri arasında sonlu eleman analizler sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki belirsizlikler yer almaktadır. Ayrıca



1. Mod (2.60Hz)

2. Mod (2.72Hz)

3. Mod (6.38Hz)

Şekil 18. Deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri



Şekil 19. Yan duvarlarda zamana bağlı gerçekleşen mesnetleşmeler

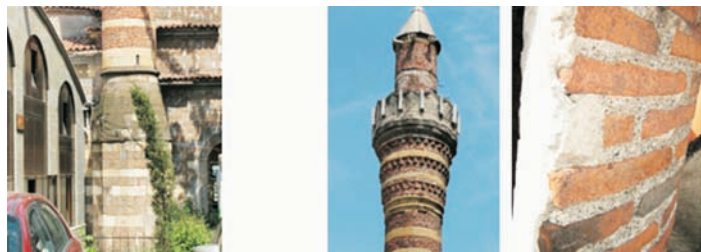
Mod Numarası	Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilmiş Analitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Ölçümler	
			GFOA (Hz)	SAB (Hz)
1	3.84	4.64	4.64	4.64
2	7.53	8.76	8.10	8.33
3	9.37	9.88	9.88	9.74

Tablo 2. Model iyileştirilmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikler

tarihi yığma minareyi oluşturan taşların ve blokların zaman içerisinde tahrip olması ve özelliklerini yavaş yavaş yitirmesi dinamik karakteristikler arasında oluşan farklılıkların nedenlerindedir (**Şekil 20**).

Bu nedenlerle tarihi minarenin analitik modelinin deneysel

sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada da tarihi minarenin malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla,



Şekil 20. Minarenin dış ve iç kısımlarında zamana bağlı gerçekleşen bozulmalar

Mod Numarası	Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilmiş Analitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Ölçümler	
			GFOA (Hz)	SAB (Hz)
1	1.09	1.19	1.16	1.29
2	1.09	1.21	1.24	1.39
3	5.59	6.58	6.30	5.58
3	5.59	6.66	6.35	5.70

Tablo 3. İyileştirilen modelin analitik ve deneysel frekans değerleri

minarenin alt bölgesinde bulunan kaide kısmının yarısı cami duvarına bitişik olduğundan dolayı bu bölgedeki yer değiştirmeler tutulmuştur. Analizlerde dikkate alınan malzeme özelliklerinden elastisite modülü'nde %7.5 ve kütle yoğunluğunda ise %5 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. **Tablo 3**'de malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilen sonlu eleman modelinden ve deneysel sonuçlardan elde edilen frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3 incelendiğinde analitik ve deneysel sonuçların iyileştirmeden sonra birbirleriyle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Mod şekilleri dikkate alındığında, analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin iyileştirmeden sonra da aynı kaldığı belirlenmiştir.

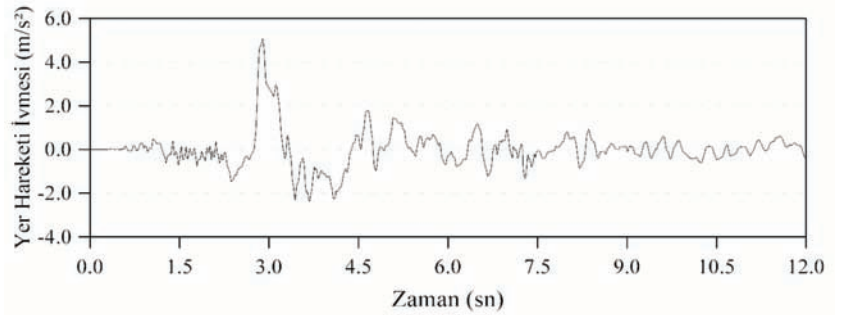
Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi

Tarihi yapıların analizleri 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin ERZIKAN/ERZ-NS bileşeni (**Şekil 21**) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pik değeri 0.515g olan ivme kaydı tarihi yapılara birinci mod hareketi doğrultularında uygulanmıştır.

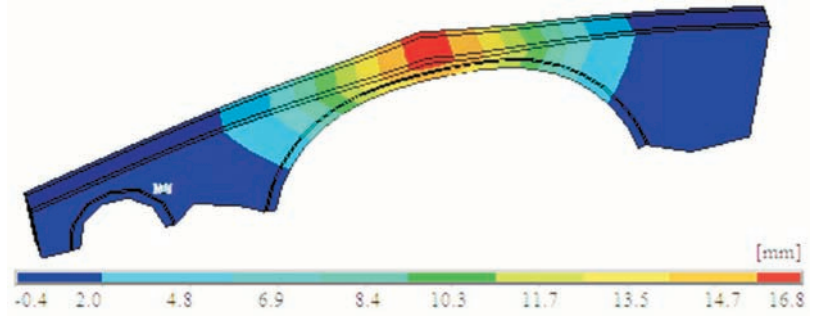
Osmanlı Köprüsü

Tarihi köprünün dinamik analizlerinde her bir mod için deneysel ölçümlerden elde edilen

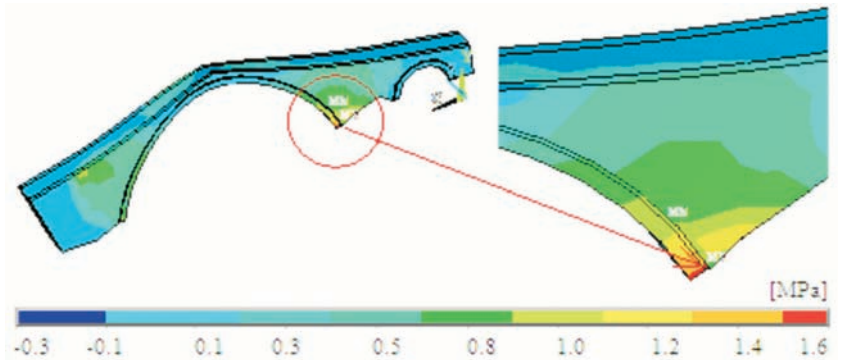
sönüm oranları kullanılmıştır. Analizler sonunda maksimum yer değiştirmenin olduğu andaki kontör diyagramı **Şekil 22**'de verilmektedir. Maksimum



Şekil 21. 1992 Erzincan depreminin ERZIKAN/ERZ-NS bileşeni



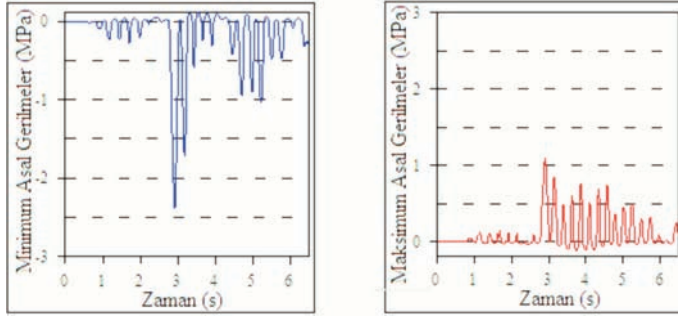
Şekil 22. Maksimum yer değiştirmenin olduğu andaki kontör diyagramı



Şekil 23. Maksimum asal gerilmelerin olduğu andaki kontör diyagramı

yerdeğiştirme köprünün orta noktasında, kemer ile yan duvarların üst bölümünde 16.5mm olarak elde edilmiştir.

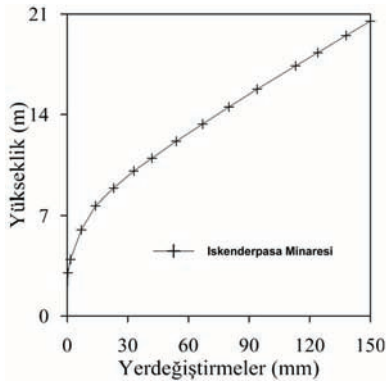
Analizler sonucunda, maksimum asal gerilmelerin olduğu andaki kontör diyagramı **Şekil 23**'te verilmektedir. **Şekil 23**'ten maksimum gerilmelerin kemerin alt bölgesinin yan duvarlar ile birleştiği bölgede olduğu görülmektedir. Maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamana bağlı değişimi **Şekil 24**'te verilmektedir.



Şekil 24. Maksimum ve minimum asal gerilmelerin zaman bağlı değişimleri

İskenderpaşa Minaresi

Minarenin dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca değışimi ve maksimum yerdeğıştirmenin olduğu andaki minarenin yer değıştirmiş hali Şekil 25'te verilmektedir. Şekil 25'ten,



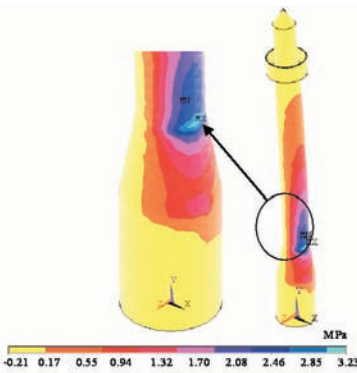
a) Yükseklik boyunca yerdeğıştirmeler

Şekil 25. Analizler sonucu elde edilen yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca değışimi

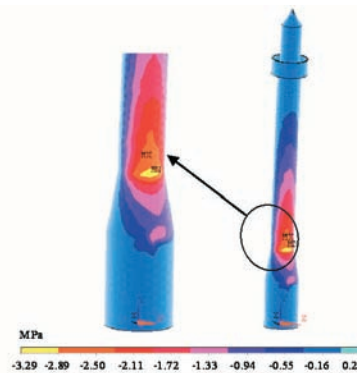
yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum yerdeğıştirme deprem yer hareketi kaydının 3.13sn'sinde, minarenin kûlah kısmının en üstünde, 150mm olarak elde edilmiştir.



b) 3.13sn'de maksimum yerdeğıştirme kontörü



a) Maksimum asal gerilmeler



b) Minimum asal gerilmeler

Şekil 26. Analizler sonucu elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler.

Minarenin dinamik analizi sonucunda maksimum ve minimum asal gerilmelerin olduğu andaki sistemin gerilme diyagramı ve en çok zorlanan kesitlerin detaylı açılımları Şekil 26'da verilmektedir. Şekil 26'dan görülebileceği üzere, özellikle minarenin kûp kısmından gövde kısmına geçiş bölümünde büyük gerilmelerin olduğu görülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, tarihi yapıların deprem güvenliklerinin analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Uygulama amacıyla seçilen Osmanlı köprüsünün, İskenderpaşa minaresinin ve Ayasofya kulesinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek dinamik karakteristikleri analitik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilip, titreşim verilerinin elde edilmesinde çevresel titreşimlerin dikkate alındığı Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel ölçüm verilerine göre tarihi yapıların sonlu eleman modelleri iyileştirilmiş ve seçilen deprem kaydı için deprem güvenlikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile birlikte;

- Osmanlı köprüsünün sonlu eleman analizleri sonucunda ilk üç frekans değeri 3-10Hz aralığında elde edilmiştir. İlk üç mod şekli başlıca eğilme ve düşey modlardır. Deneysel ölçümler sonucunda ise ilk üç frekans 4-10Hz aralığında elde edilmiştir. Analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu, frekanslar arasında ise bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, köprünün sonlu eleman modeli sınır

şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiştir. Köprünün iyileştirilen sonlu eleman modeli üzerinden gerçekleştirilen deprem analizleri sonucunda maksimum yerdeğiştirme köprünün orta noktasında 16.5mm olarak belirlenmiştir. Maksimum asal gerilme kemerin alt bölümünde 1.1MPa olarak elde edilmiştir.

• İskenderpaşa minaresinin sonlu eleman analizleri sonucunda ilk dört frekans değeri 1-6Hz aralığında elde edilmiştir. İlk dört mod şekli yanal ötelenme modlarıdır. Deneysel ölçümler sonucunda ise ilk dört frekans 1-7Hz aralığındadır. Analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu, frekanslar arasında ise bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Bu

nedenle, minarenin sonlu eleman modeli malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiştir. Minarenin iyileştirilen sonlu eleman modeli üzerinden gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda maksimum yerdeğiştirme minarenin tepe noktasında 150mm olarak belirlenmiştir. Yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı, maksimum ve minimum asal gerilmelerin ise minarenin küp kısmından gövde kısmına geçiş bölgesinde olduğu belirlenmiştir.

• Ayasofya kulesinin sonlu eleman analizleri sonucunda ilk üç frekans değeri 2-8Hz aralığında elde edilmiştir. İlk üç mod şekli başlıca eğilme ve burulma modlarıdır. Deneysel ölçümler sonucunda ise ilk üç frekans 2-7Hz aralığındadır.

Analitik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu, frekanslar arasında ise bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

• Yapılan çalışmadan, tarihi yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi için kullanılan sonlu eleman modellerinin tahribatsız deneysel yöntemler kullanılarak iyileştirilmesinin önemi ve bu yöntemlerin tarihi yapıların güvenliklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

Teşekkür

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

Kaynaklar

ANSYS. (2008) Swanson Analysis System, US.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B. (2007a) Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, Bildiriler Kitabı, 27-29 Eylül, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 415-428.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B. (2007b) Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, Bildiriler Kitabı, 27-29 Eylül, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 429-440.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2007c) Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7 (6), 487-502.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M., Çoşkun, N. (2008) Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36 (6), 516-524.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2009a) Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20 (2), 4675-4700.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2009b) Modal Testing, Finite Element Model Updating, and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 23 (2), 81-89.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, K.A., Taş, Y. (2009c) Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 23 (2), 90-99.

Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B. (2009d) Finite Element Model Updating of Şenyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4 (4), 177-185.
Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. (2009e) Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style RC Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 4, 65-75.
Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Yıldırım, F. (2009f) Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Nondestructive Evaluation, 28 (1), 37-47.
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2010) Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a Finite Element Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (Basımda).
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., Sevim, B., Türker, T. (2010b) Finite-Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, (Basımda).
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2010c) Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, (Basımda).
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2010d) Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, (Basımda).
Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. (2010e) Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Smart Structures and System, (Basımda).
Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. (2010f) Earthquake Analysis of RC Minarets using Ambient Vibration Test Results, Structural Design of Tall and Special Buildings, (Basımda).
Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. (2010g) Effect of the model updating

on the earthquake behavior of steel storage tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66 (3), 462-269.
Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B. (2010h) Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (Basımda).
Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A., Özcan, M. (2010i) Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, (Basımda).
Brencich, A., Sabia, D. (2008) Experimental Identification of a Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Materials, 22 (10), 2087-2099.
Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2003) Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proceedings 18th International Modal Analysis, San Antonio, Texas, USA, 625-630.
Chauhan, S. (2008) Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, Doktora Tezi, Bhilai Institute of Technology, Bhilai, India.
Ivorra, S., Pallares, F.J. (2006) Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower, Engineering Structures, 28, 660-667.
Mendes, P., Baptista, M.A., Agostinho, L., Lagomarsino, S., Costav, J.P. (2005) Structural and Dynamic Analysis of N. Sra. do Carmo Church, Lagos Portugal, Proceedings EUROSDYN2005, 311-318.
OMA. (2008) Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
Ramos, L. (2007) Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, Universidade do Minho, Minho, Portugal.
Ren, W.X., Zhao, T., Harik, I.E. (2004) Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE 130 (7), 1022-1031.