





# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Tek Açıklıklı Tarihi Taş Köprülerde Form Değişikliğinin Köprünün Sismik Davranışına Etkisinin Değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü Örneği

 Şahin SÖZEN<sup>a,\*</sup>,  Murat ÇAVUŞ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [sahin.sozen@gop.edu.tr](mailto:sahin.sozen@gop.edu.tr)

DOI : 10.29130/dubited.673898

### ÖZET

Bu çalışmada zaman içerisinde geometrik form değişikliklerine maruz kalmış tarihi Yılanlı (Leylekli) köprüsünün deprem performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, köprünün özgün formu ve değişime uğramış formu 3D katı model olarak ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Her iki yapı için statik ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilerek, gerilme ve deformasyonlar irdelenmiştir. Mimari ve estetik açıdan hiçbir şekilde olumlu karşılanmayacak olan köprü formunun değiştirilmesinin, yapının deprem performansını olumlu yönde etkilediği analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Gerek statik analizden gerekse dinamik analizden elde edilen veriler asimetrik köprü modelinin daha az zorlandığını ortaya koymaktadır. Bu durumun, zaten çok rijit olan köprü yapısının form değişikliğinin yapı rijitliğinde ilave artışa sebep olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elemanlar metodu, Sismik analizi, Yığma köprü

## Evaluation of the Effect of the Form Change on Seismic Behavior of the Single-Arched Historical Stone Bridge: Niksar Yılanlı (Leylekli) Bridge Example

### ABSTRACT

In this study, the seismic performance of the historical Yılanlı (Leylekli) bridge which has been subjected to changes in geometric form over time was evaluated. In the study, the original form and modified form of the bridge were modeled using ANSYS finite element software as a 3D solid model. For both structures, stress and deformations were examined by performing static and time history analyzes. It is understood from the results of the analysis that changing the bridge form, which will not be welcomed in any way in terms of architecture and aesthetics, affects the earthquake performance of the building positively. Data obtained from both static and dynamic analysis show that the asymmetric bridge model is less challenging. This may be because the change in the form of the bridge structure, which is already very rigid, leads to an additional increase in structural rigidity.

**Keywords:** Finite element method, Seismic analysis, Masonry bridge

# I. GİRİŞ

Yığma yapım tekniği insanlık tarihinin belki en eski yapım tekniklerinden birisidir [1-3]. İnşa edildikleri dönemde insanların barınma ihtiyaçlarına cevap vermesinin yanı sıra, tarihi yapıların geçmişle günümüz arasında kültürel değerleri geleceğe taşıma anlamı taşıyan bir fonksiyon icra ettikleri de bilinmektedir. Taş malzeme ile inşa edilmiş ve rijit bir taşıyıcı sisteme sahip olan yığma yapıların bir kısmı, yüzyıllar boyu ayakta kalabilmeyi başarabilmiş olmakla birlikte, birçoğu karşılaştıkları çok sayıda doğal afet ve savaşlar sebebiyle hasar görmüş veya yok olmuştur. Özellikle son çeyrek yüzyılda, Türkiye’de hasar görmüş fakat tamamen yok olmamış tarihi yapılar, onarılarak tekrar eski fonksiyonlarını icra etmelerinin önü açılmıştır. Tarihi yapıların hasar görmesinin en önemli nedenlerinin başında depremlerin geldiği unutulmamalıdır. Birçok medeniyete beşiklik etmiş olan ülkemizin de içinde bulunduğu coğrafyanın, ciddi deprem riskleri taşıyan bir bölge olduğu bilinmektedir.

Tarihi yapı stoku içinde önemli bir yere sahip olan tarihi köprülerin, coğrafyamızdaki geçmiş medeniyetlerin siyasi, sosyal kültürel ve ticari varlıklarının değerlendirilmesinde, ihmal edilemeyecek bir önemi bulunmaktadır. Tarihi köprüler geometrik özellikleri sebebiyle, diğer yığma yapılardan farklı olarak daha az sünektirler. Bu durum, onları güçlü depremler karşısında daha savunmasız bir hale getirmektedir [4]. Beton ve çelik gibi modern yapı malzemelerinin ve modern yapım tekniklerinin bilinmediği tarih dönemlerinde büyük açıklıkları geçmede kemer, tonoz ve kubbelerin kullanıldığı bilinmektedir. Özel olarak köprüler ele alındığında, köprü açıklığına bağlı olmak üzere, bir köprünün ana taşıyıcı sistemini bir veya tekrarlanan kemerlerin oluşturduğu bilinmektedir. Kemer köprüler yalnız trafik yükü için değil, su nakil hatları için de kullanılmışlardır. Ülkemizde, estetik bakımdan son derece kıymetli olup, günümüze kadar ayakta kalabilmiş Bozdoğan, Mağlova, Evvelbent ve Pollio gibi su kemerleri bulunmaktadır.

Çok sayıda yığma köprünün bulunduğu ülkemizde, Adıyaman ili sınırları içinde yer alan ve dünyanın halen kullanılmakta olan en eski köprüsü olarak bilinen Cendere Köprüsü’nün, Roma İmparatoru Septimius Severus (M.S. 193-211) tarafından karısı ve oğulları adına yaptırıldığı, üzerinde bulunan Latince yazıttan anlaşılmaktadır (Şekil 1). Çok sayıda medeniyete ev sahipliği yapmış coğrafyamızda, geçmiş uygarlıklardan Osmanlı Devleti’ne kadar binlerce tarihi köprü inşa edildiği bilinmektedir.



*Şekil 1. Cendere Köprüsü [5]*

Diğer yapı türlerinde olduğu gibi yığma yapıların mekanik davranışını izleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle analizler gerçekleştirilmektedir [6-9]. Frunzio ve ark. [10] kemer köprünün üç boyutlu sayısal modeli üzerinden yan duvarlar ve dolgu malzemesinin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Fanning ve Boothby [11], servis yükleri altında 3 yığma kemer köprüyü modelleyerek, çatlak analizleri gerçekleştirip, köprülerden alınan gerçek verilerle karşılaştırmışlardır. Toker ve Unay [12], yığma kemer köprünün mekanik davranışını farklı yüklemeler altında değerlendirmiştir. Ural [13], Coşandere köprüsünün deprem performansını gerçek bir depremin ivme kaydını kullanarak lineer elastik analiz ile araştırmıştır. Wang ve Melbourne [14], köprü ana taşıyıcıları için yayılı çatlak modelini, zemin için

Drucker-Prager modelini kullanarak oluşturduğu iki farklı sayısal model üzerinden kemer-zemin ilişkisini araştırmıştır. Pelà, vd. 2009 [15], UNI ENV 1998-1, OPCM 3274, ve FEMA 440 standartlarının önerdiği şekilde tarihi bir yığma kemer köprüünün lineer olmayan statik analizlerini gerçekleştirmiştir. Pelà vd. 2013 [16], mevcut 3 açıklıklı tarihi bir köprüünün detaylı sonlu elemanlar analizini gerçek deprem kayıtları kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada lineer olmayan statik analiz etkinliği 84 lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Radnić ve vd. [17], Mostar'daki eski taş köprüünün statik ve dinamik analizini yerçekimi etkisi, sıcaklık değişimi ve deprem etkilerinin göz önünde bulundurularak gerçekleştirmişlerdir. Karaton vd. [18] Türkiyenin en büyük açıklıklı köprülerinden birisi olan Malabadi köprüsünün sismik analizini 3 farklı deprem seviyesi için gerçekleştirmişlerdir. Özmen ve Sayın [19] yaptıkları çalışmada tek açıklıklı taş bir köprü olan Dutpınar köprüsünün performansının belirlenmesi için Bingöl depremi ivme kayıtlarını kullanarak zaman tanım alanında analiz gerçekleştirmişlerdir.

## **II. YILANLI (LEYLEKLİ) KÖPRÜ**

Tokat ili Niksar ilçesi Çanakçı Çayı üzerinde bulunan tarihi Yılanlı (Leylekli) köprüsünün kitabesi günümüze ulaşmadığından yapım tarihi kesin olarak bilinmemekle birlikte, yapı üslubundan Roma veya Bizans döneminde yapıldığı tahmin edilmektedir. Köprü Osmanlı döneminde kullanılmış ve yapılan eklerle de bugünkü şeklini almıştır. Köprüünün kemer kısmındaki kilit taşı üzerindeki bir kabartmada ağzında yılan tutan bir leylek görülmektedir. Bu nedenle de köprüye Leylekli veya Yılanlı Köprü ismi verilmiştir. Tarihi köprü 37 metre uzunluğunda, 4,5 metre genişliğinde, kemer yüksekliği 10,5 metre ve 16 metre kemer açıklığındadır. Köprüye ait fotoğraf Şekil 2'de görülmektedir.

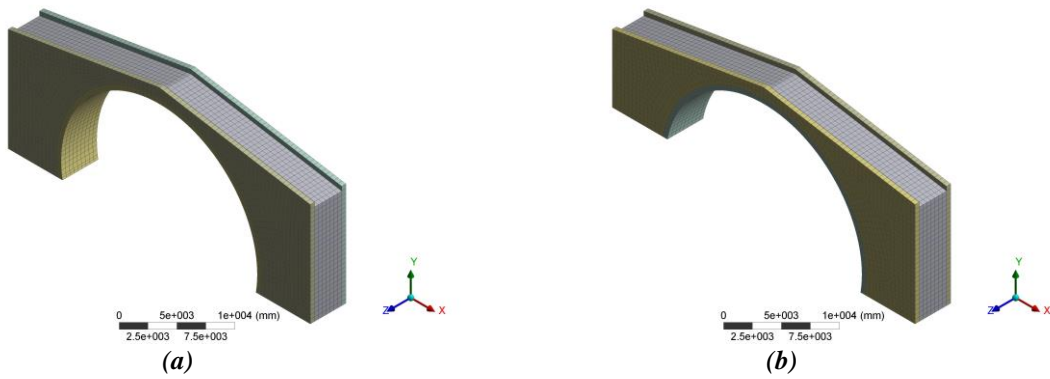
Bu çalışmada, tarihi köprüünün sonlu elemanlar yöntemiyle doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri gerçek deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde iki ayrı model oluşturulmuştur. Bunlar; köprüünün yapıldığı dönemdeki özgün geometrik formunu içeren bir model (Simetrik durum) ile zaman içerisinde köprüünün bir ayağının olduğu bölümün yükseltilmesiyle oluşan geometrisi değişmiş olan modeli (Asimetrik durum) içermektedir. Çalışmanın ana amacı bozulan bu geometrik formun tarihi yapının deprem performansını etkileyip etkilemediğinin araştırılmasıdır. Bununla birlikte çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz neticelerinin karşılaştırılması yapılarak analiz sonuçları irdelenmiştir.



*Şekil 2. Yılanlı (Leylekli) Köprü*

### III. SAYISAL ANALİZ

Bu çalışmada zaman içerisinde geometrik form değişikliklerine maruz kalmış tarihi Yılanlı (Leylekli) köprü'nün deprem performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, köprü'nün olması gereken özgün formu ile birlikte değişime uğramış formu da modellenmiştir. Her iki yapı 3D katı model olarak ANSYS [20] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonlu eleman modelinde ANSYS 17.0 program kütüphanesinde var olan SOLID 186 elemanı kullanılmıştır. Analizlerde, köprü yapısını oluşturan yapı malzemeleri için doğrusal elastik malzeme modeli kullanılırken, geometrik bakımdan doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Şekil 3'te simetrik (Şekil 3a) ve simetrik olmayan (Şekil 3b) yapı modelleri görülmektedir. Sayısal modelde kemer, yan duvarlar ve dolgu ayrı mekanik özellikleri olan malzemeler olarak tanımlanmışlardır. Asimetrik köprü modeli 8559 sonlu elemandan oluşurken, simetrik modelde 9608 sonlu eleman bulunmaktadır. Literatürden alınan malzeme mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [21-23].



Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli (a) Simetrik durum (b) Asimetrik durum

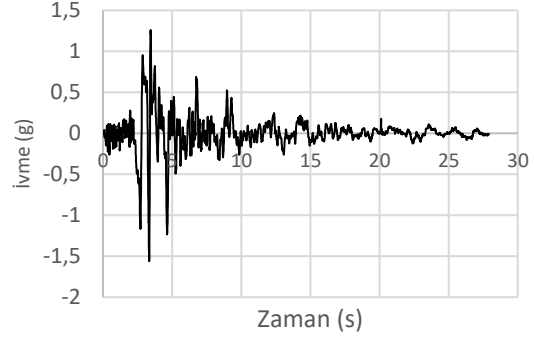
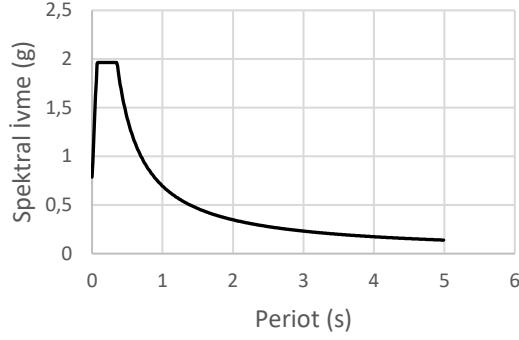
Bilindiği üzere yığma yapıların sayısal modellemesinde, detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme teknikleri kullanılabilir [24]. Detaylı mikro modellemede yığma yapı elemanını oluşturan ana unsur taş veya tuğla ile bunları birleştiren harç ayrı yapı malzemeleri olarak modellenirken, basitleştirilmiş mikro modellemede yığma yapı elemanlarının genişlikleri harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar artırılarak modellenir. Basitleştirilmiş mikro modellemede harç tabakası ihmal edildiğinden, yapı elemanları birbirlerinden temas yüzeyleri ile ayrılacak şekilde modellenirler. Makro modellemede ise yapı elemanı harçla birlikte kompozit bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Büyük yapıların analizinde, bilgisayar çözümü için gerekli süreyi önemli ölçüde kısalttığından, sıklıkla makro modelleme tekniğinin tercih edildiğini görebiliyoruz [7, 9, 25, 26].

Tablo 1. Malzeme mekanik özellikleri

Kemer			Yan Duvarlar			Dolgu Malzemesi		
E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\mu$	E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\mu$	E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\mu$
3500	24	0,18	3500	24	0,18	500	17,50	0,2

E: Elastisite Modülü,  $\gamma$ : Yoğunluk,  $\mu$ : Poisson oranı.

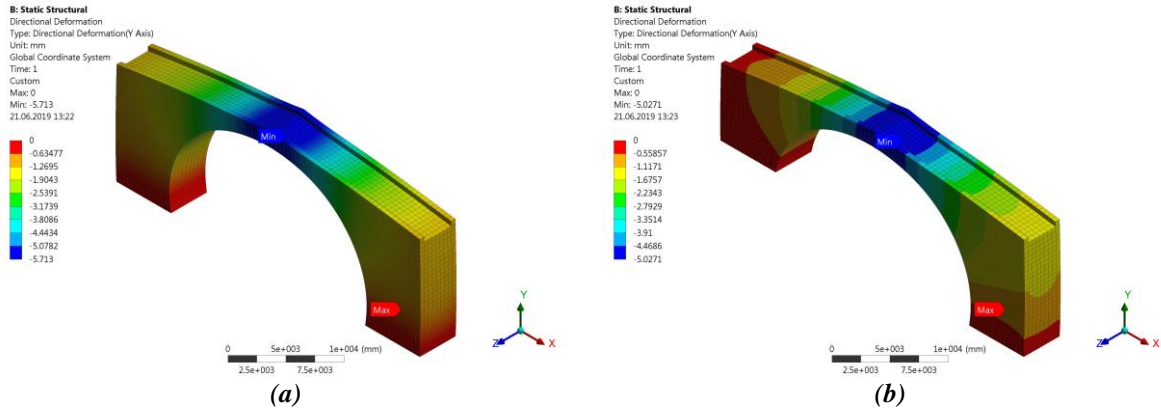
Zaman tanım alanında dinamik hesap için 1992 Erzincan depremine ait ivme kaydının doğu-batı bileşeni kullanılmıştır. İvme kaydı, yapının bulunduğu Niksar ilçesinin deprem riski ve yapının bulunduğu yerin yerel zemin koşulları dikkate alınarak oluşturulan tasarım spektrumuna ölçeklenerek kullanılmıştır. Tasarım spektrumu ve Erzincan depremine ait ivme kaydı Şekil 4'te verilmiştir.



(a) (b)  
Şekil 4. Dinamik analiz verileri (a) Tasarım Spektrumu (b) İvme kaydı.

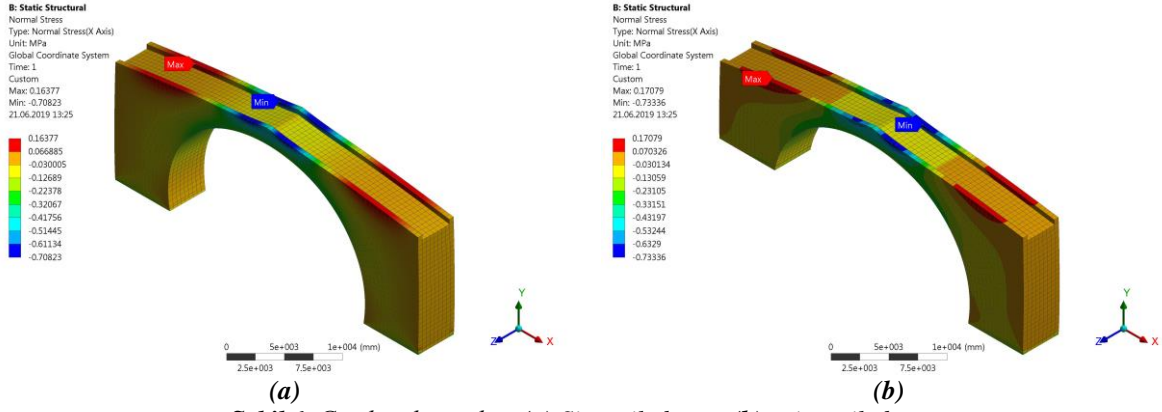
## A. STATİK ANALİZ

Geometrik bakımdan lineer olmayan statik analizden elde edilen düşey yer değiştirmeler Şekil 5'te görülmektedir. Simetrik yapıda en büyük yer değiştirme 5,713 mm olarak hesaplanmışken, asimetrik formlu yapıda bu değer 5,0271 mm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri farklı olmasına karşın, en büyük deplasman değerinin oluştuğu bölgenin her iki modelde de kemer üst noktası olduğu görülebilmektedir.



(a) (b)  
Şekil 5. Yer değiştirme haritaları (a) Simetrik durum (b) asimetrik durum

Şekil 6'da verilen normal gerilme dağılımları incelendiğinde, simetrik modelde en büyük basınç gerilmesi 0,708 MPa olarak hesaplanırken, asimetrik modelde bu gerilme 0,733 MPa olarak hesaplanmıştır. En büyük basınç gerilmelerinin her iki modelde de köprü yan duvarlarının köprü tepe noktasında yakın kısımlarda oluştuğu Şekil 6'da görülmektedir. En büyük çekme gerilmesi simetrik modelde 0,163 MPa olarak hesaplanmışken aynı gerilme asimetrik modelde 0,170 MPa olarak hesaplanmıştır. Her iki model karşılaştırıldığında çekme gerilmelerinin de asimetrik modelde daha büyük olarak hesaplandığı görülmektedir. Asimetrik yapının köprü düşey yer değiştirmesine olumlu yönde katkı sağlamasına rağmen normal gerilmelerin asimetrik köprü modelinde arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. Gerilme haritaları (a) Simetrik durum (b) asimetric durum

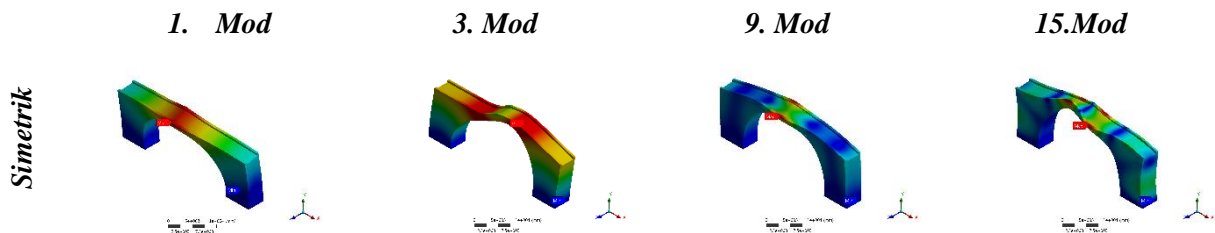
## B. MODAL ANALİZ

Modal analiz, bir yapının titreşim özelliklerini (Doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirler. Diğer ayrıntılı dinamik analizler (Harmonik analiz veya spektrum analizi gibi) için bir ön analiz olarak değerlendirilebilir. Modal analiz neticesinde elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri, dinamik yüklemeye koşulları için bir yapının tasarımında önemli parametrelerdir. Modal analizden elde edilen frekanslar ve etkili kütle katılım oranları her iki yapı için de Tablo 2'de verilmiştir. Frekans değerleri 6her iki yapının oldukça rijit olduğunu doğrulamaktadır. Modal analizde her iki yapı için 30 titreşim modu dikkate alınmış olup, kümülatif kütle katılım oranının her bir doğrultu için 15. Modda %90 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her iki yapıya ait 1., 3., 9. ve 15. Mod şekilleri Şekil 7'de görülmektedir. 15 titreşim modu içerisinde ilk 5 modun kütle katılımının en yüksek olduğu titreşim modları olduğu ifade edilmelidir.

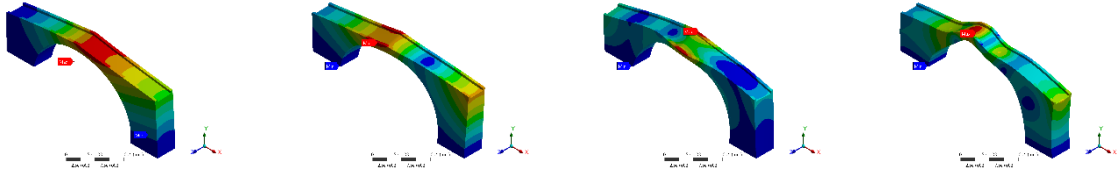
Tablo 2. Modal analiz sonuçları

Mode	Frekans [Hz]		Etkili Kütle Katılım Oranları					
			X aksı		Y aksı		Z aksı	
	Simetrik	Asimetrik	Simetrik	Asimetrik	Simetrik	Asimetrik	Simetrik	Asimetrik
1	2,3676	2,7798	0,0000	0,729E-13	0,421E-15	0,161E-13	0,575499	0,523285
2	3,4642	4,3731	0,917E-10	0,555943	0,0000	0,353E-3	0,213E-10	0,42E-10
3	3,4729	4,3921	0,611910	0,366E-6	0,121E-12	0,225E-9	0,000000	0,916E-4
9	10,885	11,731	0,000000	0,273E-10	0,921E-14	0,148E-11	0,273E-2	0,196E-2
10	13,159	13,648	0,911E-14	0,184E-9	0,614E-14	0,600E-10	0,410E-9	0,638E-1
14	15,877	18,342	0,176E-10	0,764E-9	0,403392	0,165E-8	0,658E-13	0,853E-4
15	16,102	18,798	0,765E-13	0,604E-1	0,494E-12	0,173248	0,691E-13	0,221E-9

Şekil 7 incelendiğinde, her iki yapının ilk titreşim modları z eksenine doğrultusunda, 2. Titreşim modları x eksenine doğrultusunda yer değiştirme şeklinde gerçekleşirken 3. modda burulmanın etkin olduğu bir titreşim karakteristiği gözlemlenmektedir. Etkin kütle katılımının %60 civarında gerçekleştiği ilk 3 mod yapıların genel sismik performansı hakkında önemli bilgileri içermektedir. Titreşim modları olası bir dinamik hasarın kemer orta noktası civarında oluşabileceğini göstermektedir.



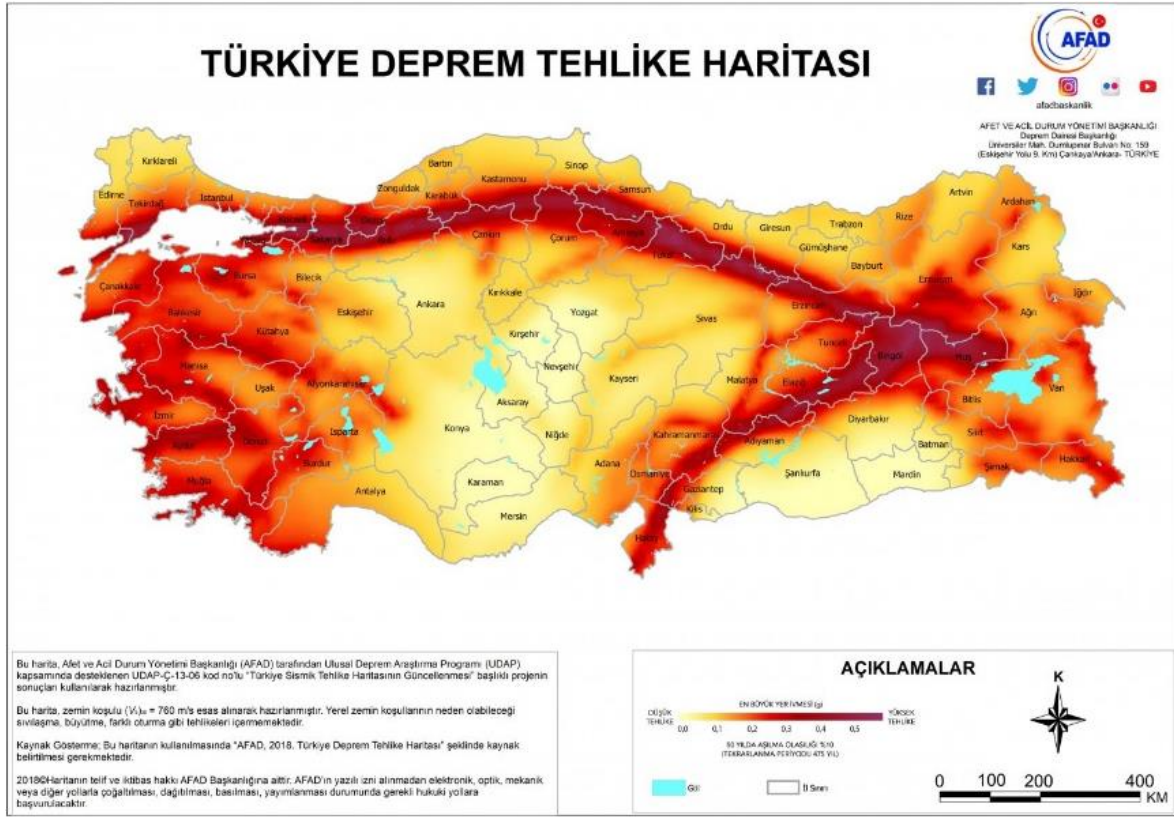
Asimetrik



Şekil 7. Titreşim modu şekilleri

### C. DİNAMİK ANALİZ

Tarihi yapının bulunduğu bölge, İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından hazırlanan ve Şekil 8’de verilen Türkiye Deprem Tehlike Haritası verilerine göre 475 yıllık tekerrür periyodu için en büyük yer ivmesi 0,671g olarak değerlendirilmektedir [27]. Bu ivme değeri ve Şekil 8’den anlaşılacağı üzere yapı, Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde sismik tehlikenin yüksek olduğu bir konumda yer almaktadır.



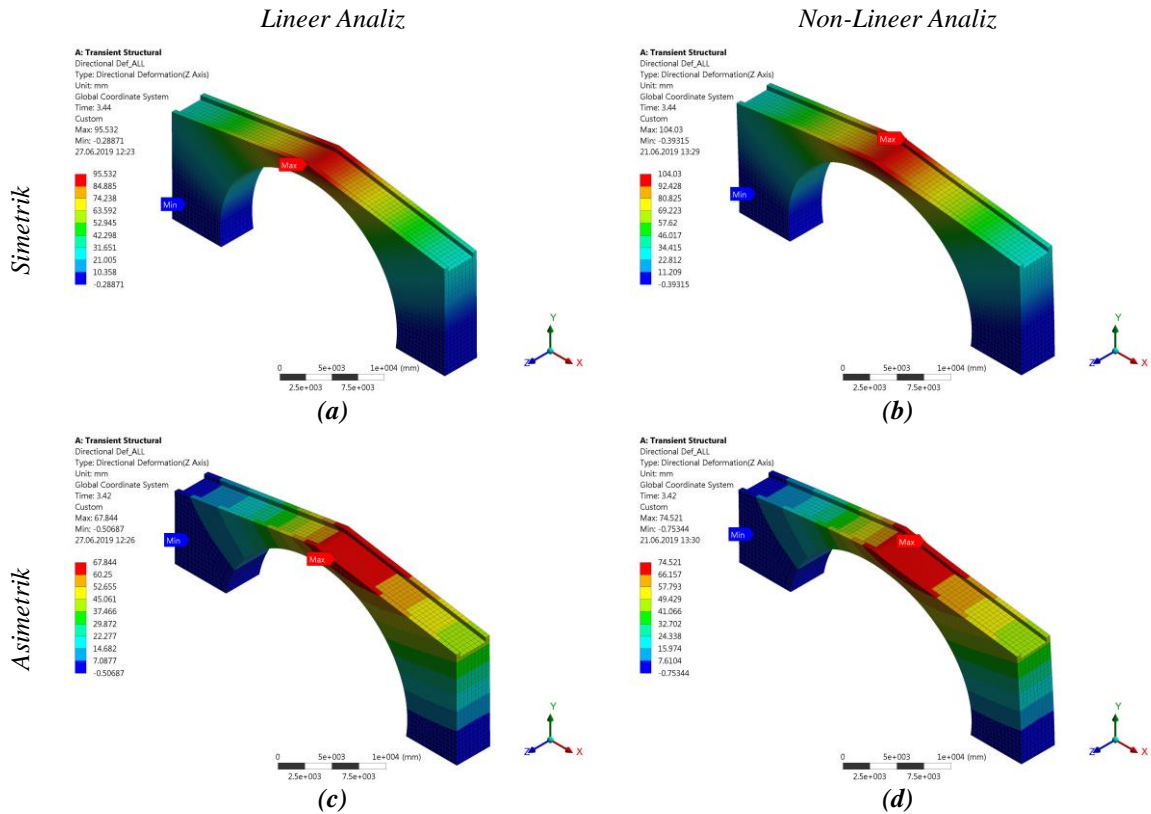
Şekil 8. Türkiye deprem tehlike haritası [27]

Zaman tanım alanında hesap, herhangi bir genel zamana bağlı yükün etkisi altında bir yapının dinamik tepkisini belirlemek için kullanılan bir analizdir. Yapının, zamanın bir fonksiyonu olan yüklemeye altında, yine zamana bağlı olarak değişen yer değiştirme, gerilme, birim deformasyon ve reaksiyon kuvvetleri gibi tepkileri bu analizle belirlenebilir.

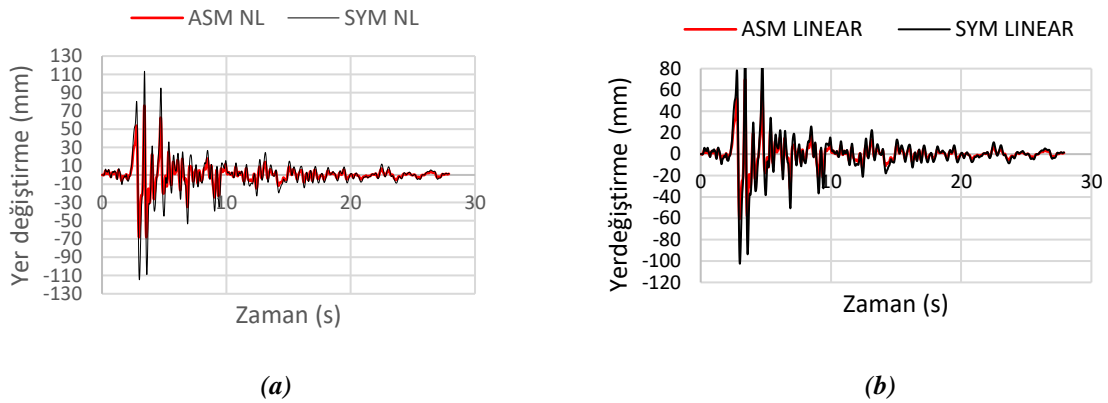
Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz için 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremine ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem bölgesinden elde edilen veriler, yapının bulunduğu bölgenin yerel zemin koşulları da dikkate alınarak oluşturulan tasarım spektrumuna ölçeklendikten sonra sayısal modele eklenmiştir. Zaman tanım alanında hesap lineer ve non-lineer olmak üzere her iki

sistem için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Rijitlik için oransal viskoz sönümlenme oranı hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerde %5 olarak dikkate alınmıştır.

Analizlerden elde edilen yatay yer değiştirme haritaları lineer ve lineer olmayan analizler olmak üzere her iki yapı için Şekil 9'da verilmiştir. Yer değiştirme karakteristikleri her iki yapı için birbirine yakın olmakla beraber hesaplanan en büyük yatay yer değiştirme ve oluştuğu zaman birbirinden farklı olarak hesaplanmıştır. Buna göre, lineer olmayan analizde en büyük yer değiştirme simetrik yapı için 114,61 mm olarak gerçekleşmişken asimetrik yapı için 77,582 mm olarak hesaplanmıştır. Benzer biçimde, lineer analiz için en büyük yer değiştirme simetrik yapı için 105,84 mm olarak hesaplanmışken, asimetrik yapı için en büyük yer değiştirme 71,341 mm olarak hesaplanmıştır. Lineer olmayan hesaplamalardan elde edilen yer değiştirmelerin daha büyük olduğuna dikkat edilmelidir. Köprü kemer tepe noktası baz alınarak oluşturulan yer değiştirme zaman grafiği her iki yapı ve her iki analiz için Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Yer değiştirme haritaları (a) Doğrusal sim. (b) Doğrusal olmayan sim. (c) Doğrusal asim. (d) Doğrusal olmayan asim

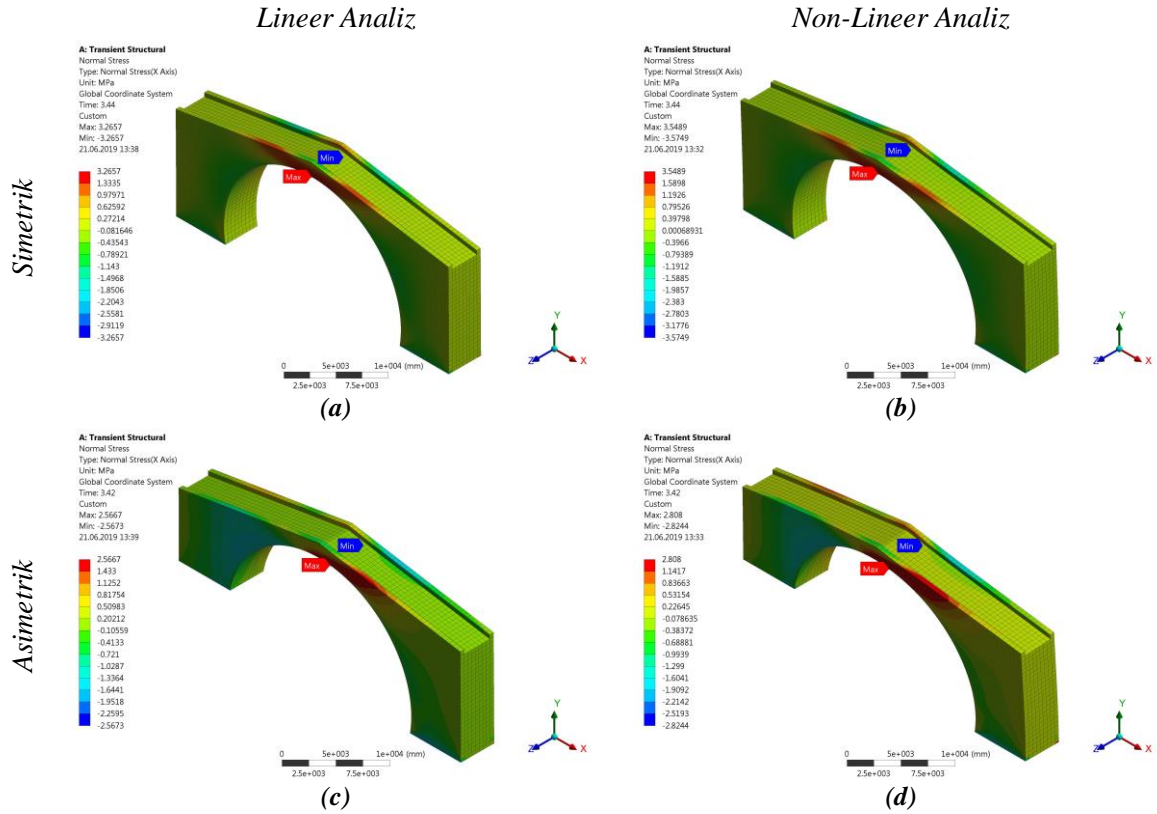


Şekil 10. Kemer tepe noktası yer değiştirmeleri (a) Doğrusal olmayan (b) Doğrusal



Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde yer değiştirme karakterleri bakımından birbirine yakın davranış gösteren iki yapıdan asimetrik olanının daha küçük bir yer değiştirme ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu durumunun asimetrik formun yapı rijitliğini arttırmasından kaynaklandığı söylenebilir. Yine beklendiği üzere lineer olmayan analizlerden elde edilen yer değiştirmeler, lineer analizden elde edilenlere göre daha küçük mertebede hesaplanmışlardır.

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen normal gerilme dağılımları Şekil 11'de verilmiştir. Her iki analiz ve her iki yapı için kritik gerilmelerin kemer tepe noktası civarında olduğu gözlemlenmektedir. Kemer üst noktası ve civarında oluşan çekme ve basınç gerilmelerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olarak simetrik olarak hesaplandığı görülmektedir. Lineer olmayan analizlerden elde edilen gerilme değerlerine göre en büyük normal gerilme simetrik yapı için 3,574 MPa olarak hesaplanmışken asimetrik yapı için 2,824 MPa olarak hesaplanmıştır. Lineer analizlerden elde edilen gerilme değerleri simetrik ve asimetrik yapı için sırasıyla 3,26 MPa ve 2,57 MPa olarak hesaplanmıştır. En büyük gerilme değerlerinin oluşum zamanları her iki analizde simetrik yapı için 3,44 s ve asimetrik yapı için 3,42 s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. Gerilme dağılımları (a) Doğrusal sim. (b) Doğrusal olmayan sim. (c) Doğrusal asim. (d) Doğrusal olmayan asim.

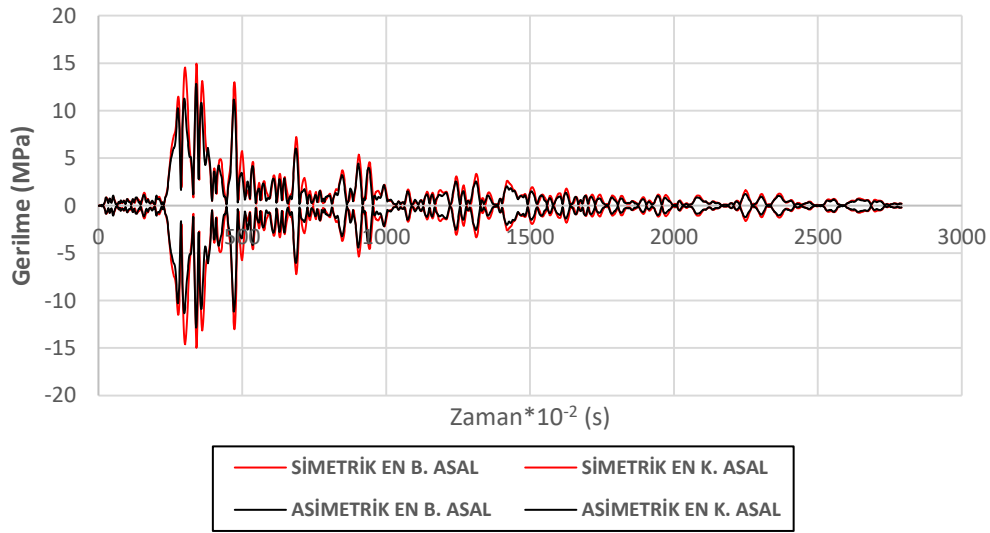
## IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizler, statik, modal ve zaman tanım alanında yapılan analizlerden oluşmaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, yer değiştirme bakımından en riskli kesitin kemer üst noktası ve civarı olduğunu göstermiştir. Statik analizlerden elde edilen en büyük yer değiştirme düşey doğrultuda simetrik ve asimetrik model için sırasıyla 5,713 ve 5,0271 mm olarak hesaplanmıştır. Burada köprü'nün estetik formunu olumsuz yönde etkileyen yapısal müdahalenin yer değiştirmeler bakımından olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Yapının kendi ağırlığı altında oluşan normal gerilme dağılımlarında, en büyük basınç gerilmeleri simetrik ve asimetrik model için sırasıyla 0,708 MPa ve 0,733 MPa, en büyük çekme gerilmeleri yine sırasıyla 0,163 MPa ve 0,170 MPa olarak

gerçekleşmiştir. En büyük basınç gerilmeleri köprü kemer üst noktasına yakın olmak üzere yan duvarlar üzerinde oluşurken, en büyük çekme gerilmelerinin aynı duvarların mesnetlere uzanan orta bölümlerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Köprü mimari yapısı kenar bölümlerinin kemer orta bölümlerine oranla çok daha rijit olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple gerek yer değiştirmeler gerekse gerilmeler bakımından kemer orta bölümlerinin kritik değerlere ulaşması beklenen bir durumdur. Yine de çekme ve basınç gerilmelerinin kullanılan yapı malzemesinin emniyetli değerlerini aşmadığı rahatlıkla söylenebilir.

Modal analizden elde edilen titreşim modlarına ait şekiller değerlendirildiğinde, köprünün olası bir depremde kemer orta bölümlerinden hasar alabileceği söylenebilir. Daha rijit olan kenar kısımların büyük bir risk taşımadığı rahatlıkla ifade edilebilir.

Zaman tanım alanında yapılan analizlerden elde edilen en büyük ve en küçük asal gerilmenin zamana bağlı değişimi her iki model için Şekil 12'de verilmiştir. Gerilme ve zaman grafiğine göre, en büyük çekme gerilmesinin simetrik modelde 14,94 MPa, asimetrik modelde 12,84 MPa olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Her iki modelde de en büyük asal gerilme kemer üzerinde ortaya çıkmıştır. Köprü ana taşıyıcı malzemesi için bu gerilme değerlerinin çok yüksek olduğunu ifade etmek gerekmektedir.



**Şekil 12.** En büyük ve en küçük asal gerilme değişimi

Benzer şekilde en küçük asal gerilme olarak hesaplanan basınç gerilmelerinin simetrik ve asimetrik modelde sırasıyla 14,98 MPa ve 12,853 MPa olarak hesaplanmıştır. Çekme gerilmelerinde olduğu gibi bu gerilmeler de köprü ana taşıyıcı unsuru olan kemer üzerinde oluşmuştur. Her iki modelde de asal gerilmeler, kemerin zemine oturduğu noktalardaki sonlu elemanlar üzerinde hesaplanmıştır.

Mimari ve estetik açıdan hiçbir şekilde olumlu karşılanmayacak olan köprü formunun değiştirilmesinin, yapının deprem performansını olumlu yönde etkilediği analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Gerek statik analiz gerekse dinamik analizden elde edilen veriler asimetrik köprü modelinin daha az zorlandığını ortaya koymaktadır. Bu durumun, zaten çok rijit olan köprü yapısının form değişikliğinin yapı rijitliğinde ilave artışa sebep olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Zira tek açıklıklı bu tür köprülerde kemer orta kısmı hariç olmak üzere diğer bölümlerinin son derece rijit olduğu bilinmektedir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] A. Bayraktar, A.C. Altunışık, B.Sevim, T.Türker, M. Akköse ve N. Coşkun, "Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret," *Journal of Testing Evaluation*, c. 36, s. 6, ss. 516-524, 2008.
- [2] M. Muvafik, "Field Investigation and Seismic Analysis of a Historical Brick Masonry Minaret Damaged During the Van Earthquakes in 2011," *Earthquakes and Structures*, c. 6, s. 5, ss. 457-472, 2014.
- [3] A. Preciado, G. Bartoli ve H. Budelmann, "Fundamental Aspects on the Seismic Vulnerability of Ancient Masonry Towers and Retrofitting Techniques," *Earthquakes and Structures*, c. 9, s. 2, ss. 339-352, 2015.
- [4] Z. Y. İlerisoy ve A. Soyuluk, "Impact of Shallow Earthquakes on the Sehzade Mehmet Mosque," *Grādevinar*, c. 64, s. 9, ss. 735-740, 2012.
- [5] "Cendere Köprüsü - Adıyaman". [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://www.azbibak.com/cenderekoprusu-adiyaman/>.
- [6] A. Brencich ve D. Sabia, "Experimental Identification of A Multi-span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge," *Construction and Building Materials*, c. 22, s. 10, ss. 2087-2099, 2008.
- [7] L. Pela, A. Aprile ve A. Benedetti, "Seismic Assessment of Masonry Arch Bridges," *Engineering Structures*, c. 31, s. 8, ss. 1777-1788, 2009.
- [8] A. Bayraktar, A.C. Altunışık, F. Birinci, B. Sevim ve T.Türker, "Finite Element Analysis and Vibration Testing of A Two-Span Masonry Arch Bridge," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, c. 24, s. 1, ss. 46-52, 2010.
- [9] A.C. Altunışık, A. Bayraktar, B. Sevim ve F. Birinci, "Vibration-Based Operational Modal Analysis of the Mikron Historic Arch Bridge After Restoration," *Civil Engineering and Environmental Systems*, c. 28, s. 3, ss. 247-259, 2011.
- [10] G. Frunzio, M. Monaco ve A. Gesualdo, "3D F.E.M Analysis of a Roman Arch Bridge," *Historical Constructions*, ss. 591-597, 2001.
- [11] P.J. Fanning ve T.E. Boothby, "Three-Dimensional Modelling and Full-Scale Testing of Stone Arch Bridges," *Computers and Structures*, c. 79, s. 29, ss. 2645-2662, 2001.
- [12] S. Toker ve A.İ. Unay, "Mathematical Modelling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges," *Gazi University Journal of Science*, c. 17, s. 2, ss. 129-139, 2004.
- [13] A. Ural, "Finite Element Analysis of Historical Arch Bridge," *International Earthquake Symposium*, Kocaeli, Türkiye, 2005.
- [14] J. Wang ve C. Melbourne, "Finite Element Analyses of Soil-Structure Interaction in Masonry Arch Bridges," *ARCH'07- 5th International Conference on Arch Bridges*, Medeiarra, Portugal, 2007.
- [15] L. Pela, A. Aprile ve A. Benedetti, "Seismic Assessment of Masonry Arch Bridges," *Engineering Structures*, c. 31, s. 8, ss. 1777-1788, 2009.
- [16] L. Pela, A. Aprile ve A. Benedetti, "Comparison of Seismic Assessment Procedures for Masonry Arch Bridges," *Construction and Building Materials*, c. 38, ss. 381-394, 2013.

- [17] J. Radnić, A. Harapin, M. Smilović, N. Grgić ve M. Glibić, "Static and Dynamic Analysis of the Old Stone Bridge in Mostar," *Građevinar*, c. 64, s. 8, ss. 655-665, 2012.
- [18] M. Karaton, H.S. Aksoy, E. Sayın, Y. Calayır, "Nonlinear Seismic Performance of a 12th Century Historical Masonry Bridge Under Different Earthquake Levels," *Engineering Failure Analysis*, c.79, ss. 408-421, 2017.
- [19] A. Özmen, E. Sayın, "Seismic Assessment of a Historical Masonry Arch Bridge," *Journal of Structural Engineering Applied Mechanics*, c. 1, s. 2, ss. 95-104, 2018.
- [20] ANSYS, Release 17.0, Engineering Simulation & 3D Design Software, USA, 2019.
- [21] A. Doğangün, R. Acar, H. Sezen ve R. Livaoglu, "Investigation of Dynamic Response of Masonry Minaret Structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 6, s. 3, ss. 505-517, 2008.
- [22] G. Magenes ve A. Penna, "Existing Masonry Buildings: General Code Issues and Methods of Analysis and Assessment," *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop*, c. 8, ss. 185-198, 2009.
- [23] B. Küçükdoğan, J. Kubin ve A.İ. Ünay, "Seismic Assessment of Monastery of Stoudios (Imrahor Mosque) in İstanbul," *Advanced Materials Research*, c. 133-134, ss. 721-726, 2010.
- [24] P.B. Lourenço, "Computational Strategies for Masonry Structures," Doktora Tezi, Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1996.
- [25] C. Modena, M.R. Valluzzi, F.R. Tongini ve L. Binda, "Design Choices and Intervention Techniques for Repairing and Strengthening of the Monza Cathedral Bell-Tower," *Construction and Building Materials*, c. 16, s. 7, ss. 385-395, 2002.
- [26] K. Bernardeschi, C. Padovani ve G. Pasquinelli, "Numerical Modeling of the Structural Behavior of Buti's Bell Tower," *Journal of Cultural Heritage*, c. 5, s. 4, ss. 371-378, 2004.
- [27] AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı), "Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması". [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>. Erişim Tarihi: 1 Haziran 2019.