

## Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yiğma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi

Kader AKIN<sup>1</sup>, Erkut SAYIN<sup>1\*</sup>, Alper ÖZMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malatya, Türkiye  
<sup>1</sup> kader94@hotmail.com, <sup>\*1</sup> esayin@firat.edu.tr, <sup>2</sup> alper.ozmen@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 21/05/2021;

Kabul/Accepted: 25/10/2021)

**Öz:** Tarihi yapıların kültürel mirasımız içinde önemi büyüktür. Kültürel ve yapısal anlamda büyük öneme sahip mühendislik yapılarından biride tarihi yiğma köprülerdir. Bu köprüler, geçmişten günümüze kadar önemini yitirmeden gelen, insanlığa ulaşım açısından büyük kolaylıklar sağlayan yapılardır. Tarihi yapıların korunması ve onarılması için yapılacak olan çalışmalarda bu yapıların yapısal davranışları belirlenmelidir. Bu çalışmada, tarihi yiğma bir köprünün farklı sönüm tipleri altında sismik tepkisi incelenmiştir. Bu amaçla kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü dikkate alınmıştır. Sayısal örnek olarak tek açıklıklı tarihi yiğma bir köprü seçilmiştir. Köprünün sonlu eleman modeli üç boyutlu katı elemanlarla oluşturulmuştur. Dinamik analizler için SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Köprünün bulunduğu konumda dikkate alınarak dinamik analizler için 1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları kullanılarak farklı sönüm tipleri altında köprünün sismik tepkisi değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarihi Köprüler, Sonlu Elemanlar, Dinamik Analiz.

### Dynamic Analysis of Historical Masonry Bridges Considering Different Damping Types

**Abstract:** Historical structures have great importance in the cultural heritage. Therefore, historical bridges are one of the most important engineering structures in terms of cultural and structural aspects. These bridges, which have come from the past to the present without losing their importance, provide great convenience to humanity in terms of transportation. The structural behavior of the historical structures is vital for the protection and restoration of these structures. In this study, the dynamic analysis of a historical masonry bridge was investigated under different damping types. For this purpose, mass proportional damping, stiffness proportional damping and Rayleigh damping were used. A single-span historical masonry bridge was considered as a numerical example. The finite element model of the bridge was generated using three dimensional solid elements. In order to perform dynamic analysis of the masonry bridge, the SAP2000 finite element program was used. Considering the location of the bridge, the seismic response of the bridge was evaluated under different damping types by using the 1992 Tunceli earthquake acceleration records for dynamic analysis.

**Key words:** Historical Bridges, Finite Element, Dynamic Analysis.

### 1. Giriş

Köprüler yol üzerindeki nehir ve vadileri geçebilmek amacıyla yapılmış olan mühendislik yapılarıdır. Tarihi köprüler, kültürel mirasımızın önemli yapı eserlerindedir. Dünyada farklı dönemlerde inşa edilmiş, yapıldığı kültür ve medeniyetten izler taşıyan, birçok tarihi yiğma köprü mevcuttur. Bu köprülerin bir kısmı, beşerî faktörlerden ve tabiat olaylarından (deprem, sel, rüzgâr vb.) etkilenerek zamanla mukavemetlerini kaybetmiş ve yok olmuştur. Depremler tarihi yapıların hasar görmelerine sebep olan en önemli dış faktörlerden biridir. Ülkemiz birçok medeniyete ev sahipliği yaptığundan geçmişten günümüze ulaşan farklı dönemlere ait, boyutları ve şekilleri farklı çok sayıda tarihi yiğma köprü mevcuttur. Bu köprülerin işlevsel ve yapısal özelliklerinin bozulmasını engelleyebilmek için periyodik olarak bakımlarının yapılması gerekir. Bu bakımlar ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmektedir. Tarihi köprüler birçok ülkede ve ülkemizde halen karayolu, demiryolu ve yaya trafiğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı tarihi yapılar ve köprüler konusunda deneysel ve sayısal çeşitli çalışmalar yapmıştır. Fanning ve Boothby [1], üç yiğma köprüyü modelleyerek köprülerin servis yükleri altında analizlerini yapmışlardır. Taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini, dolgu malzemesi için ise Drucker-Prager malzeme modelini kullanmışlardır. Söz konusu köprülerin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve elde edilen çözümleri köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla

\* Sorumlu yazar: [esayin@firat.edu.tr](mailto:esayin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5648-281X, <sup>2</sup> 0000-0003-0266-759X, <sup>3</sup> 0000-0003-1335-3780

karşılaştırmışlardır. Sevim ve diğ. [2], Rize ilinde bulunan tarihi Mikron köprüsünün operasyonel modal analiz yardımı ile sonlu eleman model iyileştirilmesini yapmışlardır. 1992 Erzincan depremi altında köprünün lineer olmayan davranışını inceleyerek, sonlu eleman iyileştirmesinin lineer olmayan analize etkisini incelemişlerdir. Sayın ve diğ. [3], tarihi Uzunok köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturarak lineer ve lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tetik [4], İstanbul tarihi yarımada da bulunan Şeyh Süleyman Mescidinin sonlu eleman modelini oluşturarak SAP2000 programında yapının statik, dinamik ve zaman tanım alanındaki analizlerini yaparak yapının bu analizler altındaki durumunu incelemiştir. Yılmaz [5], tarihi Göderni Köprüsünün kemer kalınlığını ve kemer yüksekliğini değiştirerek oluşturduğu sonlu eleman modelleri üzerinde kendi ağırlığında, kendi ağırlığı ve hareketli yükler ile kendi ağırlığı, hareketli yükler ve deprem yükleri altında çeşitli analizler yapmıştır. Sonuçları karşılaştırarak tarihi yığma köprülerin ana taşıyıcı elemanı olan kemerlerin, köprünün yapısal davranışını nasıl ve ne düzeyde değiştirdiğini incelemiştir. Günaydın [6], Trabzon da bulunan tarihi İskenderpaşa Camii minaresinin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim yöntemi ile elde etmiş, elde edilen sonuçları literatürde bulunan onarım öncesi sonuçlar ile mukayese ederek ikisi arasındaki farkları incelemiştir. Güllü [7], tarihi Cendere köprüsünün üç boyutlu sayısal modelini oluşturarak deprem etkisindeki davranışını incelemiştir. Deprem etkisi, zaman-tanım analizi uygulanarak lineer elastik davranış modeline göre araştırılmıştır. Özmen ve Sayın [8], Elâzığ ilinde bulunan tarihi Dutpınar köprüsünün zaman tanım alanında lineer dinamik analizini yapmışlardır. Dinamik analizler için 2003 Bingöl depremi dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda köprüde meydana gelen asal gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler ve köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler elde edilerek gerilme yığılmaların olduğu bölgelerde daha detaylı analizler yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Öncü ve diğ. [9], tek açıklığı bulunan tarihi Tuzluca köprüsünü üç boyutlu olarak ANSYS programında modelleyip statik ve dinamik yükler altında doğrusal analizlerini yapmışlardır. Demir [10], Diyarbakır ilindeki Dicle Nehri üzerinde bulunan Dicle Köprüsünü SAP2000 programında makro modelleme tekniğiyle modellemiş, statik ve dinamik analizler yaparak tarihi köprünün deprem davranışını değerlendirmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde 13 Mart 1992 Erzincan deprem ivme kayıtlarını kullanarak tarihi köprünün maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerini tespit etmiştir. Gönül ve Sakçalı [11], tarihi Irgandı köprüsünün doğrusal dinamik analizlerini yaparak köprüde meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Öksüz [12], Rize ilinde bulunan tarihi Timisvat köprüsünü incelemiştir. Köprüyü ANSYS sonlu elemanlar programı ile 3 boyutlu modelleyerek iki farklı deprem ivmesi altında dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Işık ve diğ. [13], Bitlis ilinde bulunan tarihi Bezirhane'ye ait beden duvarını SAP2000 programında modelleyerek deprem etkisi altında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Hökelekli [14], tarihi yığma bir minarenin esnek ve ankastre mesnetlenme durumları için deprem davranışlarını araştırmıştır. Minare ve zemin ortamını üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellemiştir. Oluşturulan sonlu eleman modeli, operasyonel modal analiz yöntemi deney sonuçlarına göre kalibre etmiş ve kalibre edilen sonlu eleman modelini kullanarak minare-zemin etkileşim sisteminin deprem davranışları, farklı zemin ve ankastre mesnetlenme durumları için elde edilerek mukayese edilmiştir. Özmen ve Sayın [15], Kütahya ilinde bulunan tarihi Debboy köprüsünün lineer dinamik analizlerini yaparak köprünün deprem etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Zaman tanım alanındaki analizler için köprünün bulunduğu bölgede meydana gelmiş olan 2002 Sultandağı ve 2011 Simav depremlerini dikkate almışlardır. Yapılan analizlerde ANSYS sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Homaei ve Yazdani [16], yaptıkları çalışmada tarihi kemerli beton demiryolu köprülerinde yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda yapının sismik tepkilerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Dinamik analizlerde artımsal dinamik analiz metodunu kullanmışlardır. Çalışma sonucunda yapı zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda yapının kapasitesinin daha yüksek çıktığı sonucuna varmışlardır. Literatür incelendiğinde tarihi yığma bir köprünün farklı sönüm tipleri ve oranları altında değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

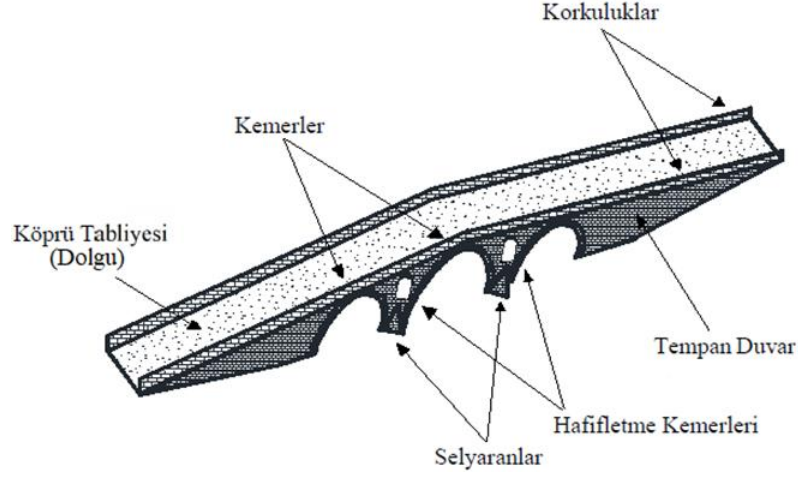
Bu çalışmada, sayısal uygulama için Tunceli ili Çemişgezek ilçesinde bulunan tek açıklıklı tarihi Tağar köprüsü seçilmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modeli SAP2000 sonlu eleman paket programıyla üç boyutlu olarak oluşturulmuş daha sonra köprünün dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Köprünün zaman tanım alanında dinamik analizleri kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü için farklı sönüm oranları altında değerlendirilmiştir. Sismik etki olarak 15.03.1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda farklı sönüm tipleri ve oranları için köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme grafikleri elde edilerek tarihi yığma bir köprünün sismik davranışına etkisi araştırılmıştır.

## 2. Tarihi Yığma Köprüler

Yeryüzünde kemer formuna ait örnekler ilk olarak M.Ö. 3000 yıllarında Mezopotamya'da Sümerlere ait yeraltı mezarlarında rastlanmıştır. Aynı dönemlerde Mısırda görülen örnekler, Mısırlıların da kemer formunun yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olduğunu göstermektedir. Kemer formu her ne kadar ilk olarak Sümerler

ve Mısırlılarda görülse de kemer formunu en etkili ve göz alıcı biçimde kullanmayı başaranlar Romalılardır. Köprü mimarisinin ülkemizdeki en güzel örnekleri ise 16. yüzyılda inşa edilen Mimar Sinan eserleridir [17].

Geçmişten günümüze farklı boyut, şekil ve malzemelerden inşa edilmiş birçok yığma köprü bulunmaktadır. Farklı amaçlara hizmet etmesi için yapılan bu köprülerde farklı yapım teknikleri uygulanmıştır. Tarihi taş kemer köprüler temeller, kanat duvarları, dolgu malzemesi, kemerler, kitabeler, selyaranlar, korkuluklar, çörtener ve tempan (yan) duvarlar gibi birtakım ana ve yardımcı elemanlardan meydana gelir. Yığma kemer köprüler için ana elemanları temeller, tempan duvarlar, kanat duvarlar, kemerler ve dolgu malzemesi olarak söylemek mümkündür [18]. Yığma köprü elemanları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tarihi yığma köprü elemanları

### 3. Tağar Köprüsü

Tarihi yığma Tağar köprüsü, Tunceli ili Çemişgezek ilçesinde bulunmaktadır. Köprü, Çemişgezek ilçesine 3 km uzaklıkta bulunan Tağar çayı üzerindedir. Köprünün yapım tarihi 1807 yılıdır ve Osmanlı dönemine aittir. Bosna Hersek'te bulunan Mostar köprüsüyle mimari açıdan benzerlikleri bulunmaktadır. Köprü, ova köyleri ile bağlantıyı sağlamak amacıyla Yusuf Ziya Paşa tarafından yaptırılmıştır (Şekil 2).



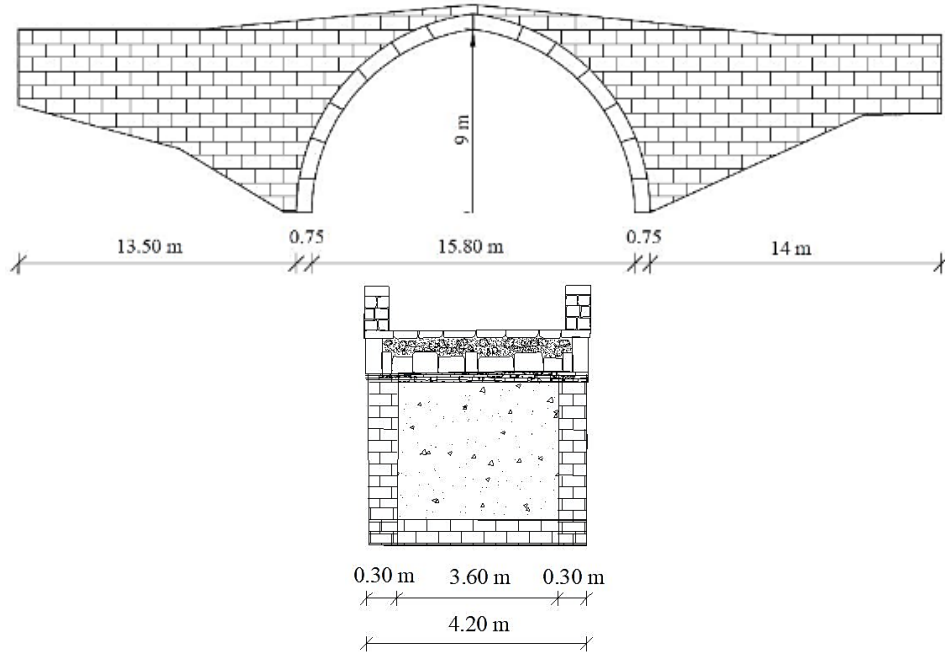
Şekil 2. Tağar Köprüsü

Günümüze kadar gelmeyi başarmış Tağar köprüsü bilinen iki onarım geçirmiştir. Bunlardan ilki, Diyarbakır Valisi Akif Paşa tarafından 1902 yılında, ikincisi ise Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 1987 yılında yapılmıştır. Yapılan son restorasyon çalışmasında aşağıda maddeler halinde verilen işlemler gerçekleştirilmiştir.

1. Kemerden düşen taşlar gerçeğine uygun biçimde tamamlanmıştır.
2. Tempan duvarda meydana gelmiş çatlaklar ve sökülen taşlar gerçeğine uygun biçimde onarılmıştır.
3. Mansap kısmındaki tempan duvar üzerine sonradan yapılmış sıva sökülerek asıl yüzey ortaya çıkarılmıştır.
4. Kemer ile tempan duvar üzerindeki derzler takviyeler yapılarak yenilenmiştir.
5. Köprüye özgün eğimini tekrar kazandırmak için sonradan yükseltile döşeme ve korkuluklar sökülmüştür.
6. Bozulan baba taşları yenilenmiştir.

Köprü, 1986 yılında 1839 sayılı Taşınmaz Kültür Varlıkları Yüksek Kurulu Kararı ile birinci derece anıtsal yapıt olarak kayda geçmiştir [19].

Tağar köprüsü sivri kemer geometrisine sahiptir. Köprü, dolgu malzemesi, tempan duvarlar ve tempan duvar üzerinde bulunan korkuluklardan oluşmaktadır. Köprünün uzunluğu 44.80 m, genişliği 4.2 m, kemer açıklığı ve yüksekliği sırasıyla 15.8 m ve 9 m dir. Tempan duvar kalınlığı 0.30 m ve korkuluk yüksekliği 0.75 m'dir. Tağar köprüsünün geometrik özellikleri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Köprüye ait geometrik özellikler

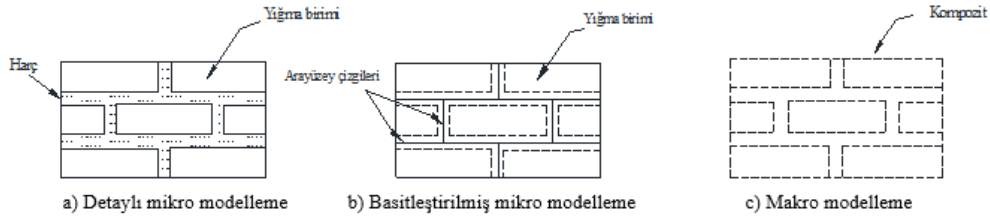
Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi güçtür. Ayrıca tarihi öneme sahip bu yapılarda tahrip edici sonuçlara yol açabilir. Bu sebeple köprüde kullanılan malzemelerin özellikleri hakkında deneysel bir çalışma yapılamamıştır. Bu çalışmada geçmişte yapılmış birçok çalışmada olduğu gibi, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme özellikleri literatürde tarihi yığma köprülerin analizinde kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir [20-22]. Köprüde kullanılan taşın basınç dayanımı 20 MPa, çekme dayanımı ise basınç dayanımının 1/10 ile 1/20 arasında alınabileceği dikkate alınarak 1 MPa olarak dikkate alınmıştır [7]. Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sonlu elemanlar analizinde dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite modülü (Mpa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Kemer	2500	0.2	2300
Tempan duvarlar	2000	0.2	2100
Dolgu	1200	0.2	1500

### 3. Sonlu Elemanlar Modeli ve Dinamik Analiz

Yığma yapılar üç temel yaklaşım ele alınarak modellenebilir. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak isimlendirilir [23]. İlk modelleme tekniğinde çözüm süresi oldukça uzun olduğundan daha çok incelenecek yapının bir bölümü veya küçük yapıların çözümü için kullanışlıdır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerinin boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Oluşturulan yığma birimleri birbirlerinden ara yüzey çizgileri ile ayrılırlar. Makro modelleme ise eşdeğer bir malzeme modelidir. Bu modelleme tekniğinde taş, tuğla vb. bloklar ve harç arasında ayırım yapılmaz [24]. Bu modelleme tekniği mikro modelleme tekniklerinden daha az düğüm ve eleman sayısı içerdiğinden bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azaltır. Bu sebeple büyük yapı sistemlerinin incelenmesinde sıklıkla tercih edilir. Bu modelleme yönteminde yığma malzeme kompozit olarak dikkate alınmaktadır. Geçmişte bu konuda yapılmış çalışmalar incelendiğinde tarihi yapıların genellikle makro modelleme tekniği ile modellendiğini görmek mümkündür. Bu modelleme teknikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yığma yapıların modelleme teknikleri [23-24].

#### 4.1. Yapılarda kullanılan sönüm modelleri

Sönümsüz modellerle yapılan hesaplar, yapıların dinamik davranışı hakkında önemli bilgiler verse de elde edilen sayısal veriler önemli hatalar içerir. Bu nedenle sayısal sonuçların gerçeğe daha yakın olabilmesi için yapı modeline bir sönüm mekanizması eklemek gerekir. Literatürde, dinamik analizlerde kullanılması önerilen bazı sönüm modelleri vardır [25-26]. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

- Vizkoz sönüm
- Kütle orantılı sönüm
- Rijitlik orantılı sönüm
- Kütle ve rijitlikle orantılı (Rayleigh) vizkoz sönüm
- Coloumb sönümü
- Çevresel sönüm
- Enerji yayılma sönümü

Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik analizlerde yukarıda belirtilen sönüm modellerinden kütle orantılı, rijitlik orantılı ve Rayleigh sönüm modelleri dikkate alınmıştır.

##### 4.1.1. Kütle orantılı sönüm modeli

Kütle orantılı sönüm modeli, deneylerle elde edilen yapıya ait sönüm oranı ve hakim titreşim frekansıyla ilgilidir. Herhangi bir n'inci mod için genelleştirilmiş sönüm matrisi Denklem 1' de gösterilmiştir.

$$C = a_0 M \quad (1)$$

Burada, C sönüm matrisini,  $a_0$  kütle orantılı sönüm katsayısını ve M ise kütle matrisini ifade etmektedir. Kütle orantılı sönüm katsayısı, herhangi bir moddaki sönüm oranı ile o modun doğal titreşim frekansı ile belirlenir (Denklem 2).

$$a_0 = 2\xi_1 \omega_1 \quad (2)$$

#### 4.1.2. Rijitlik orantılı sönüm modeli

Rijitlik orantılı sönüm modeli, kütle orantılı sönüm modelinde olduğu gibi deneysel olarak elde edilen yapıya ait sönüm oranı ve hakim titreşim frekansı ile ilişkilidir. Rijitlik orantılı sönüm matrisi Denklem 3 yardımı ile belirlenir.

$$C = a_1 \omega_n^2 M \quad (3)$$

Denklemdaki C sönüm matrisini,  $a_1$  rijitlik orantılı sönüm katsayısını,  $\omega_n$  yapının hakim titreşim frekansını M ise kütle matrisini temsil etmektedir.  $a_1$  katsayısı, herhangi bir moddaki sönüm oranı ile o modun doğal titreşim frekansı ile belirlenir (Denklem 4).

$$a_1 = \frac{2\xi_i}{\omega_j} \quad (4)$$

#### 4.1.3. Rayleigh sönüm modeli

Kütle ve rijitlik orantılı sönüm modellerine bağlı olarak birçok deneysel verinin sonucuna göre Rayleigh sönüm oranı aşağıdaki eşitlikler ile bulunur. Direkt integrasyon tekniğinin kullanıldığı analizlerde dikkate alınan Rayleigh sönümü, Denklem 5 ile ifade edilmektedir.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (5)$$

Burada, C, M ve K sırasıyla sönüm, kütle ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Rayleigh sönüm katsayıları olan  $a_0$  ve  $a_1$  ise sırasıyla kütle ve rijitlik matrisi katsayılarıdır. Rayleigh sönümünde, modal sönüm oranı ile doğal frekanslar arasında Denklem 6 daki eşitlik kullanılır.

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (6)$$

Eğer bu ifade matris biçiminde sistemin farklı iki mod durumu için yazılacak olursa Denklem 7'deki matris elde edilir

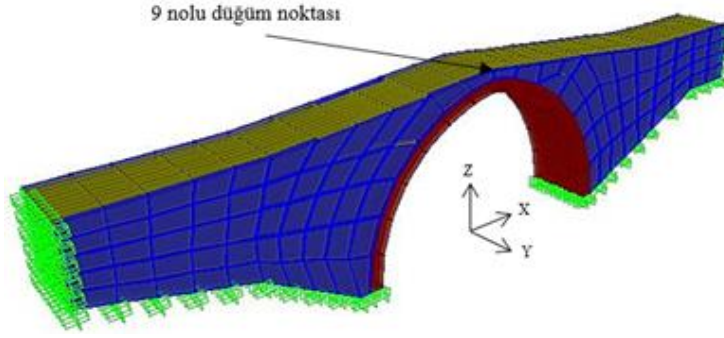
$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Denklem 7' deki  $\omega_i$ ,  $\omega_j$  ifadeleri sistemin i inci ve j inci moda ait doğal frekanslarıdır. Bu matris tanımından kütle ( $a_0$ ) ve rijitlik ( $a_1$ ) orantı katsayıları Denklem 8'de verilen ifadelerle hesaplanmaktadır [25-26].

$$a_0 = \frac{2\xi_i \omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \frac{2\xi_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (8)$$

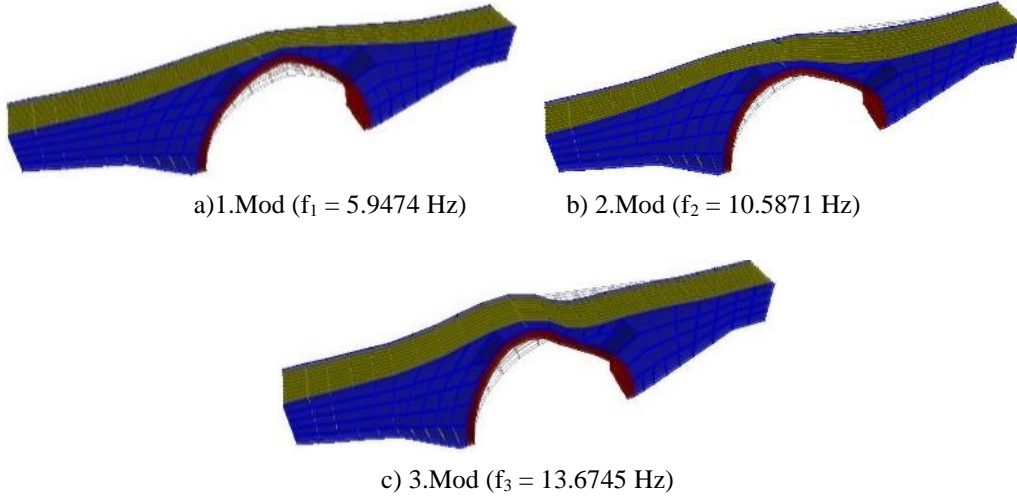
## 4.2. Köprünün dinamik analizleri

Tarihi Tağar köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 [27] programı ile üç boyutlu katı (solid) elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Köprüde makro modelleme yöntemi esas alınmıştır. Köprünün sonlu elemanlar ağı 2115 düğüm noktası ve 1498 dörtgen prizmatik katı elemandan oluşmaktadır. Köprünün sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında her düğüm noktasında üç serbestliği bulunan sekiz düğüm noktalı üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, köprünün zeminle temas eden bölgeleri ankastre (fixed) mesnetli olarak modellenmiştir. Tağar köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve tepki büyüklüklerinin incelendiği 9 nolu düğüm noktası Şekil 5'te verilmiştir.



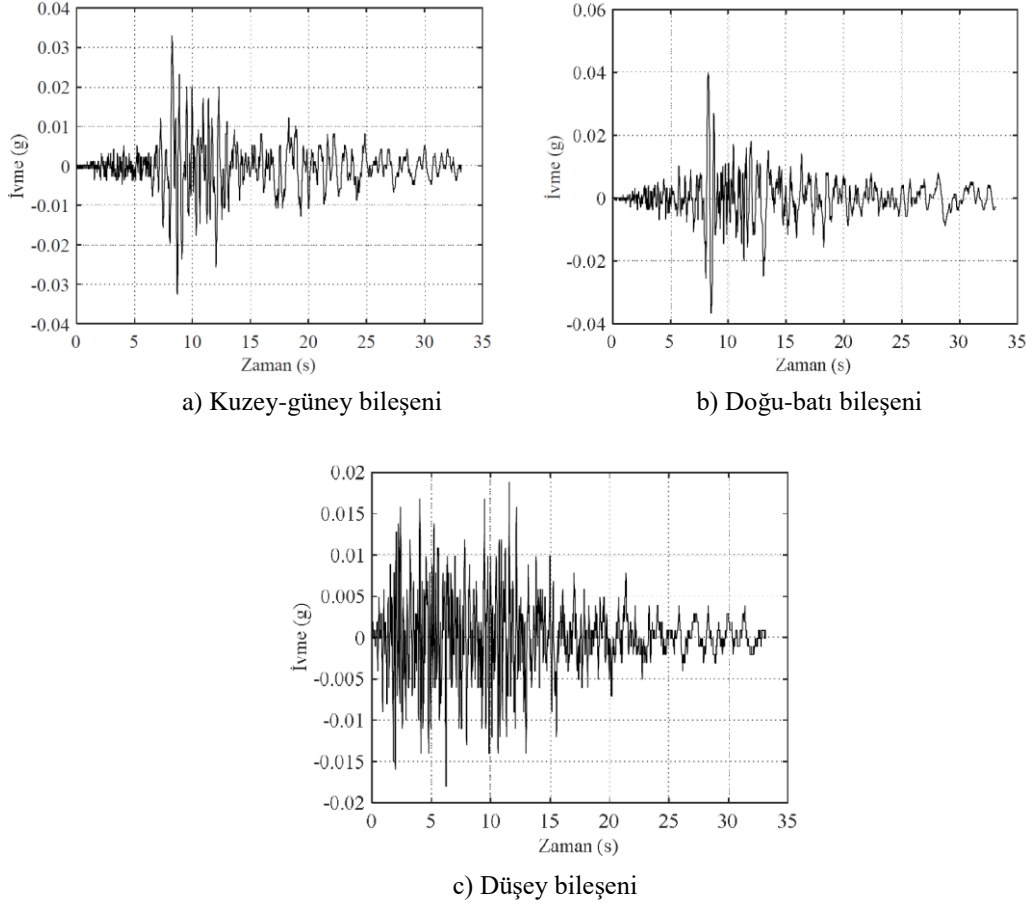
Şekil 5. Köprü'nün 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli

Köprü'nün dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla ilk olarak modal analiz yapılmıştır. Modal analizde hesaplanan etkin kütle katılım oranlarının toplamı köprü'nün toplam kütlelerinin %90'ından büyük olacak şekilde yeterli mod sayısı hesaba katılmıştır. Şekil 6'da köprü'nün ilk üç mod şekli ve frekansları verilmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde ilk modun y doğrultusunda öteleme, ikinci modun burulma-dönme, üçüncü modun ise x doğrultusunda öteleme olduğu görülmektedir. Tağar köprü'sünün zaman tanım alanında dinamik analizleri için 15.03.1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. 1992 Tunceli depremine ait Kuzey-Güney, Doğu- Batı ve düşey doğrultudaki ivme zaman grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan analizlerde depremin doğu-batı bileşeni köprüye suyun akış doğrultusunda (y doğrultusu) uygulanmıştır. İntegrasyon zaman adımı 0.01 s olarak dikkate alınmıştır. Dinamik analizler için HHT- $\alpha$  algoritmasının tahmin düzeltme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kütle, rijitlik ve Rayleigh sönümleri dikkate alınarak hasarsız durumdaki köprü için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranı olacak şekilde Tağar köprü'sünün lineer dinamik analizleri yapılmıştır. Analizlerde köprü'nün kendi ağırlığı da hesaba katılmıştır. Bu çalışmada, analizlerde zamana bağlı gerilmelerin en büyük ve en küçük (envelope max, envelope min.) değerleri dikkate alınmıştır. Burada envelope min. basınç gerilmelerinin en büyük değerini, envelope max. ise çekme gerilmelerinin en büyük değerini ifade etmektedir.



Şekil 6. Tağar köprü'sünün ilk üç mod şekli ve doğal frekansları

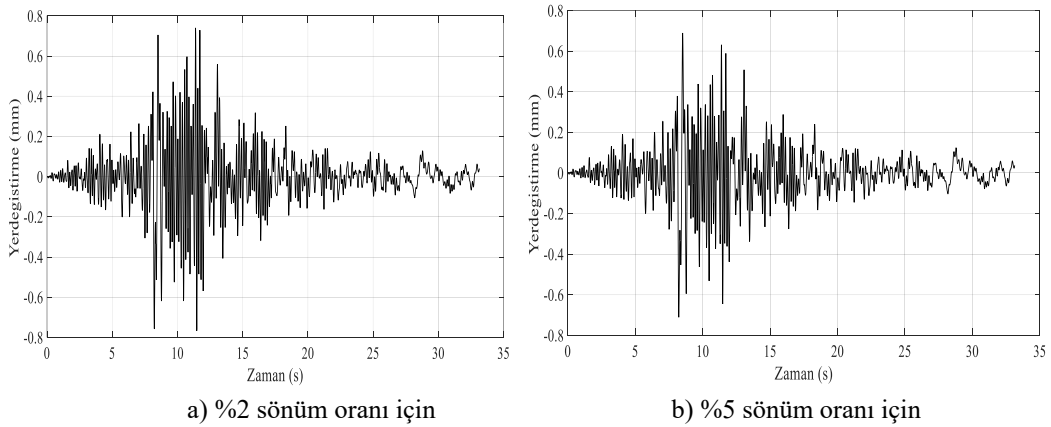
## Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi



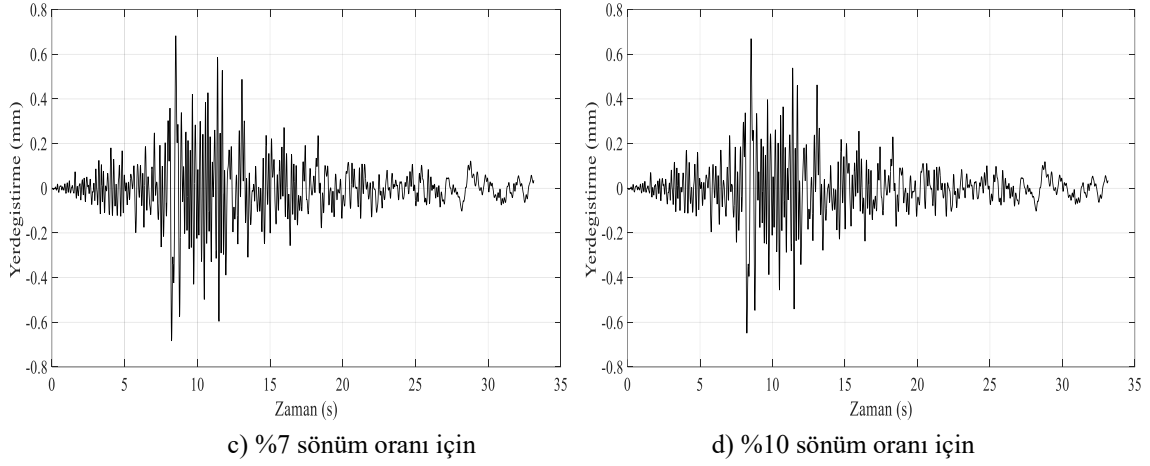
Şekil 7. 1992 Tunceli depremi ivme kayıtları

### 5. Dinamik Analiz Sonuçları

Kütle orantılı sönüm tipi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu analizlerde en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde elde edilmiştir. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.767 mm, 0.711 mm, 0.684 mm ve 0.670 mm olarak bulunmuştur. Sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme oluşmamıştır.

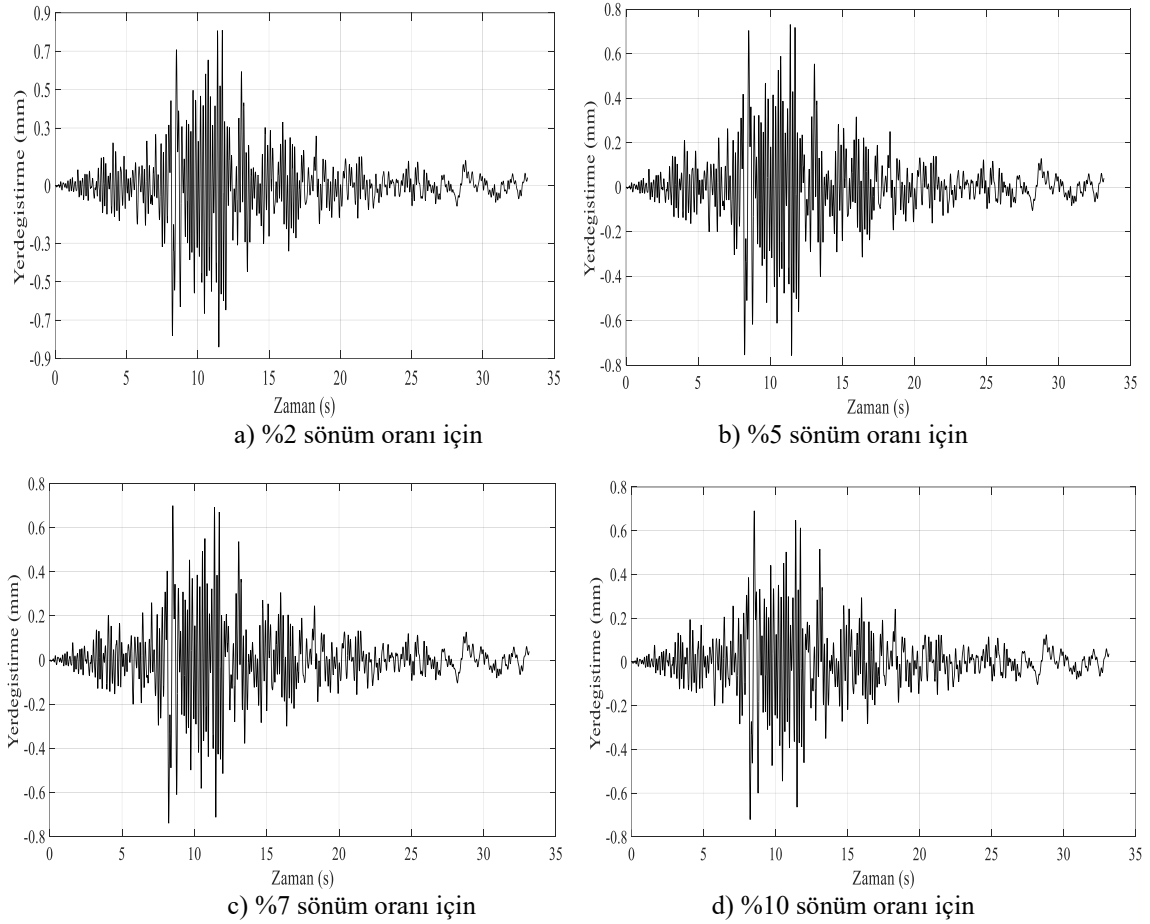






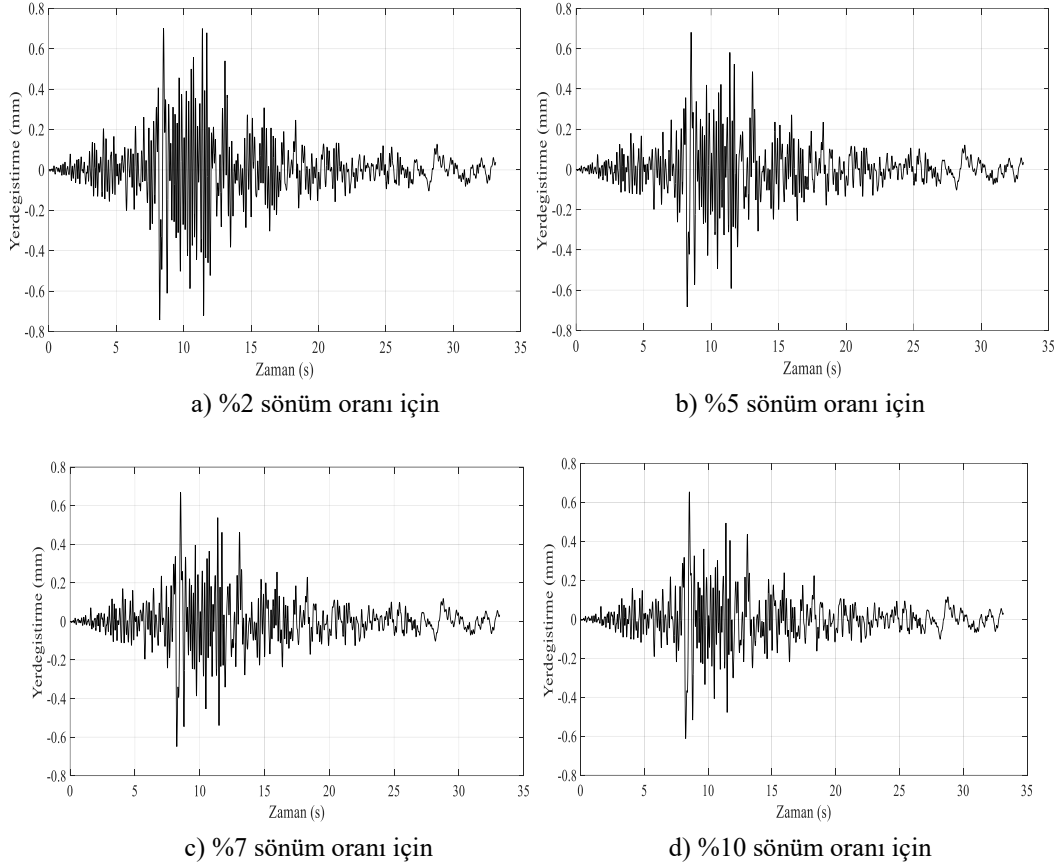
**Şekil 8.** Kütlesel sönüm oranları için 9 nolu düğüm noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri

Rijitlik oranlı sönüm tipi için zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Bu analizlerde tüm sönüm oranlarında en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde bulunmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.841 mm, 0.757 mm, 0.740 mm ve 0.721 mm olarak elde edilmiştir. Sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme meydana gelmemiştir.



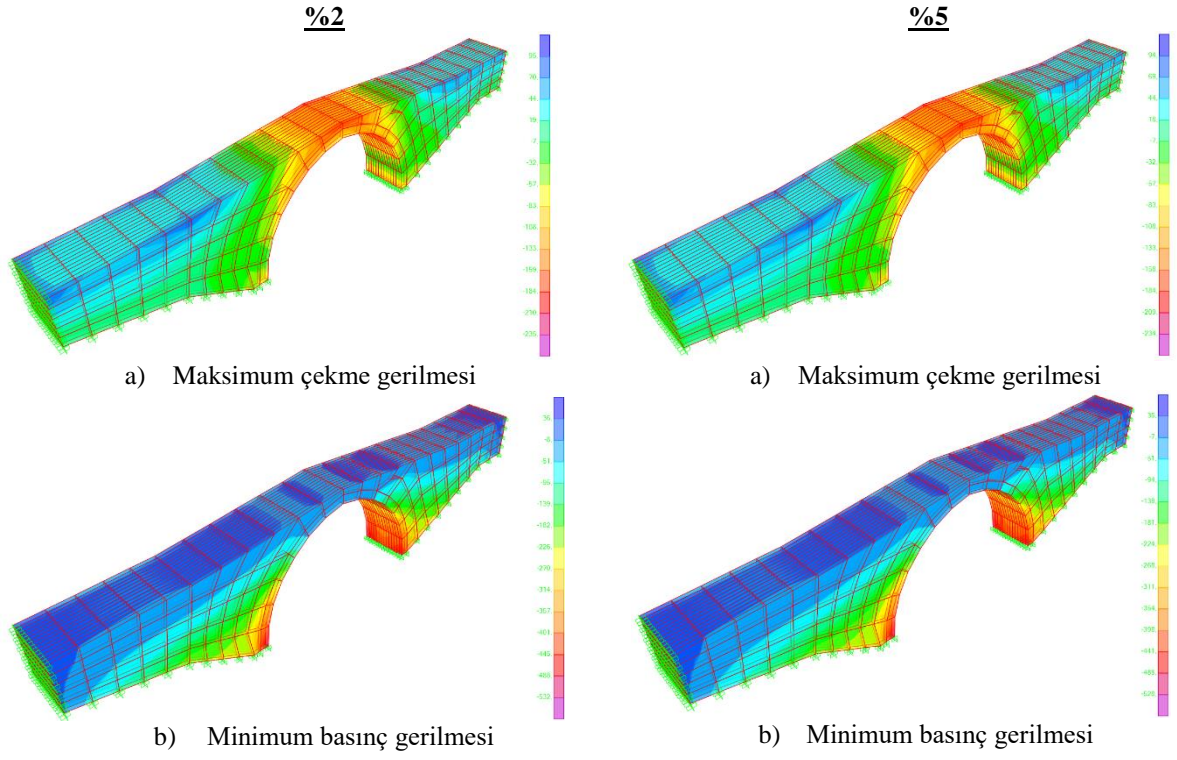
**Şekil 9.** Rijitlik oranlı sönüm oranları için 9 nolu düğüm noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri

Rayleigh sönüm tipi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Diğer sönüm tiplerinde olduğu gibi bu sönüm tipinde de en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde elde edilmiştir. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.743 mm, 0.683 mm, 0.669 mm ve 0.654 mm olarak bulunmuştur. Yer değiştirme grafikleri incelendiğinde sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış olup tüm sönüm oranları için yapılan analizlerde köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme oluşmamıştır.

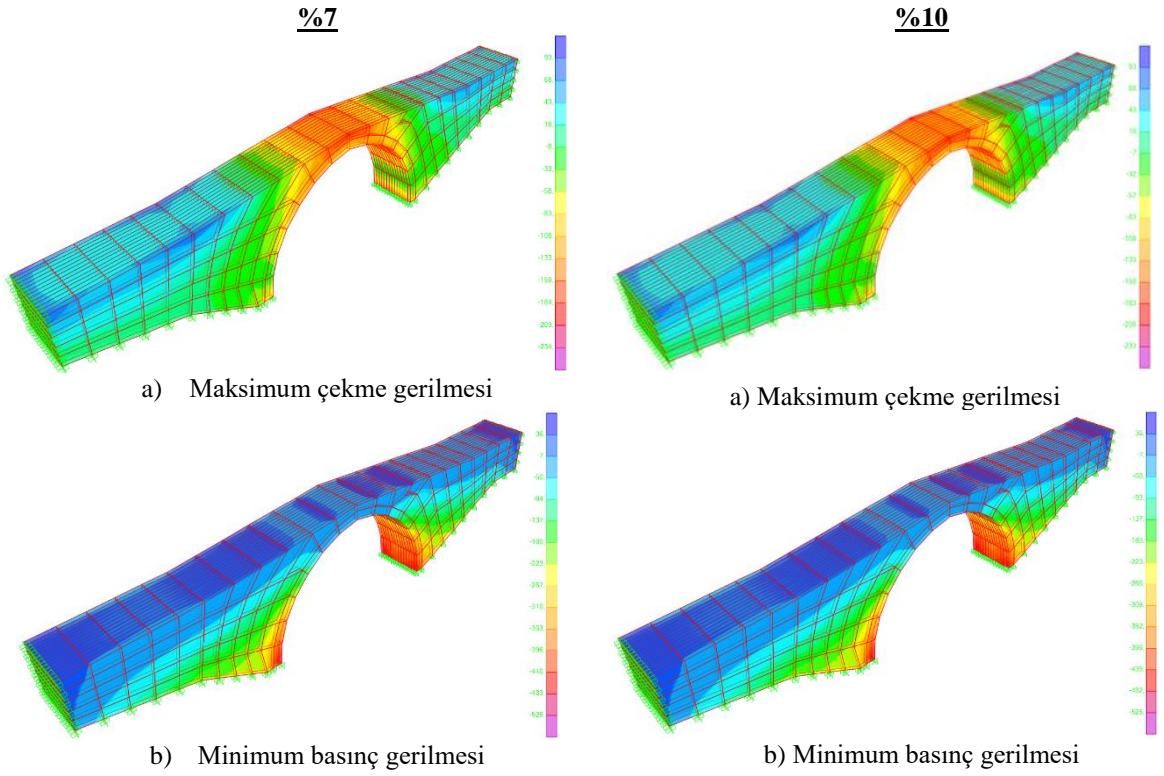


Şekil 10. Rayleigh tipi sönüm için 9 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirme-zaman grafikleri

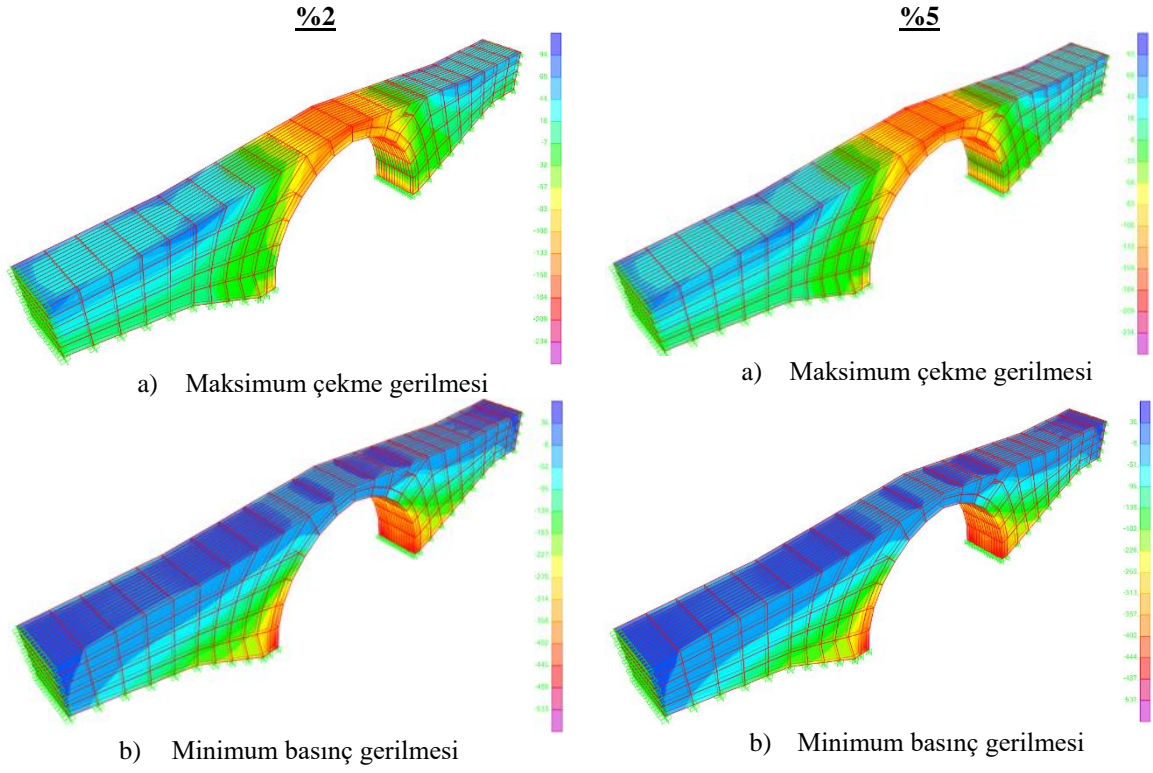
Köprünün dinamik analizleri sonucu kütle orantılı sönüm tipi için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Gerilme diyagramlarında en büyük değerler %2 sönüm oranında elde edilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.25 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -531.51 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Rijitlik orantılı sönüm tipi için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları ise Şekil 13 ve 14'de verilmiştir. Gerilme diyagramlarında en büyük değerler %2 sönüm oranında bulunmuştur. Şekil 13 incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.30 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -533 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde yoğunlaşmıştır. Rayleigh sönüm tipi için ise %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranlarında elde edilen gerilme diyagramları Şekil 15 ve 16'da verilmiştir. Bu diyagramlarda en büyük gerilme değerleri %2 sönüm oranında elde edilmiştir. Şekiller incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.17 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -530.32 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde oluşmuştur. Tüm sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları köprü için kabul edilen basınç ve çekme dayanımının altındadır.



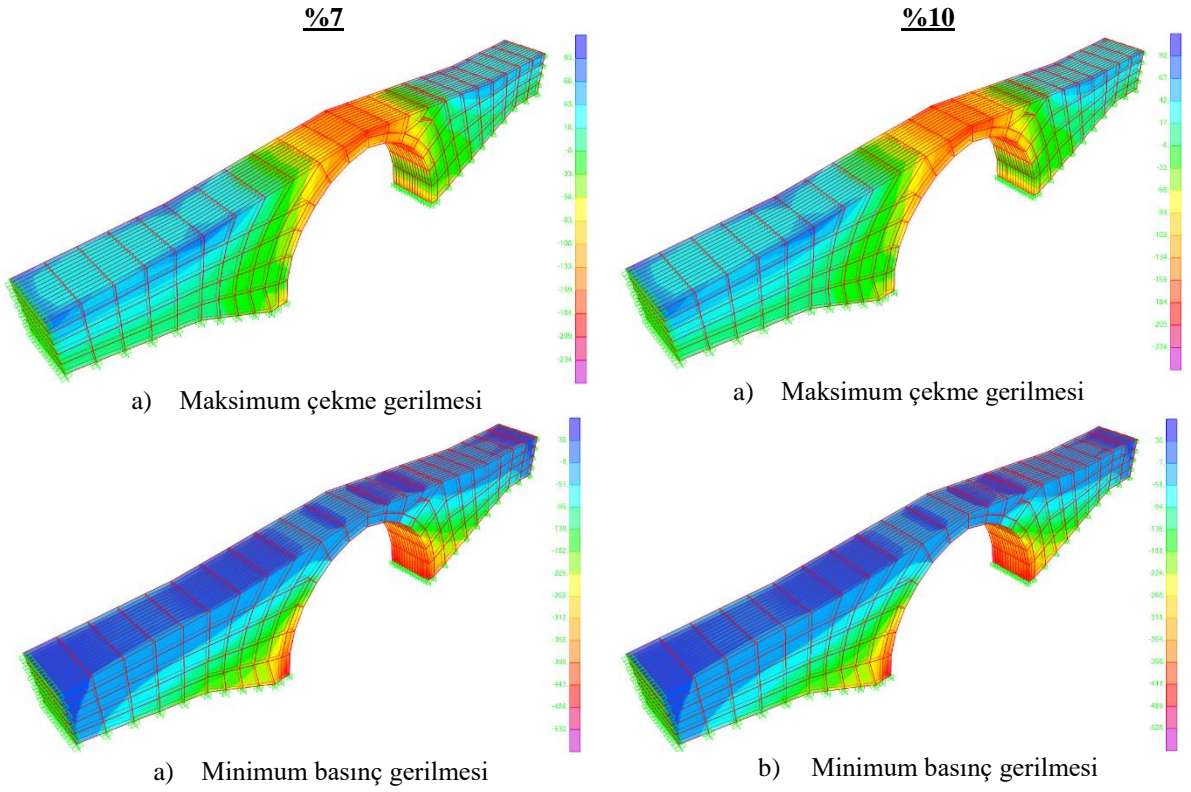
Şekil 11. Kütle orantılı sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



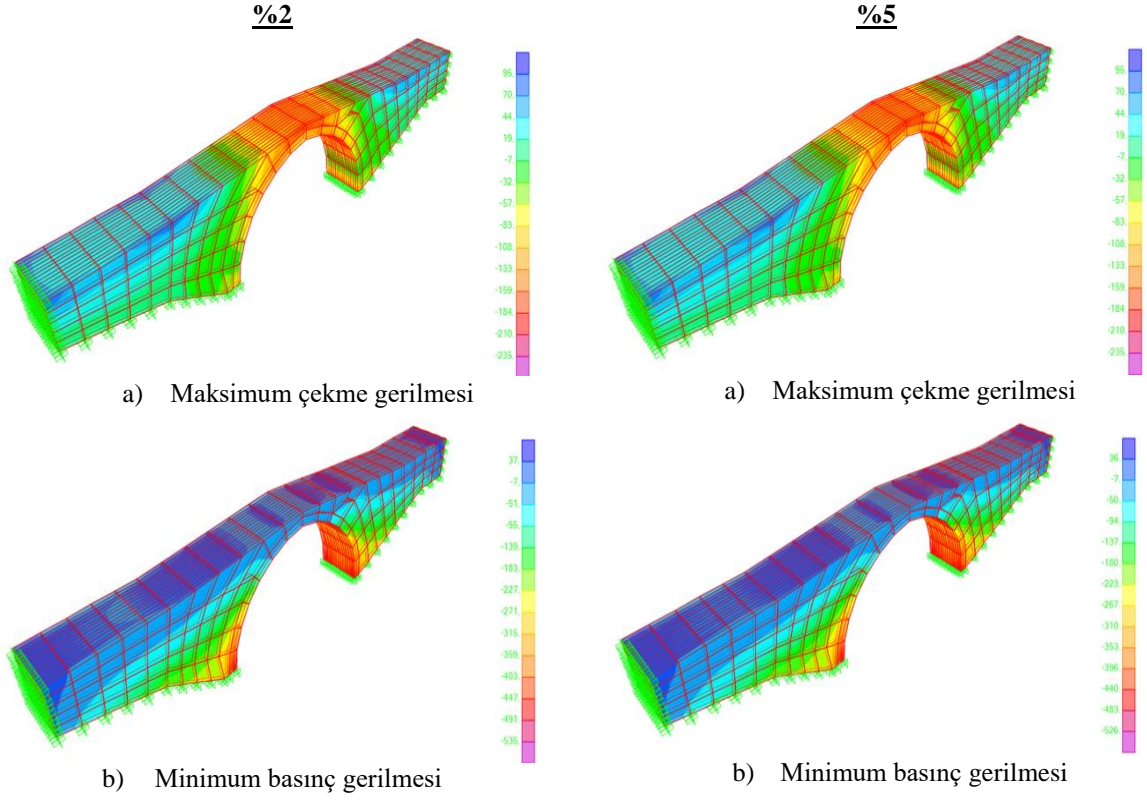
Şekil 12. Kütle orantılı sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



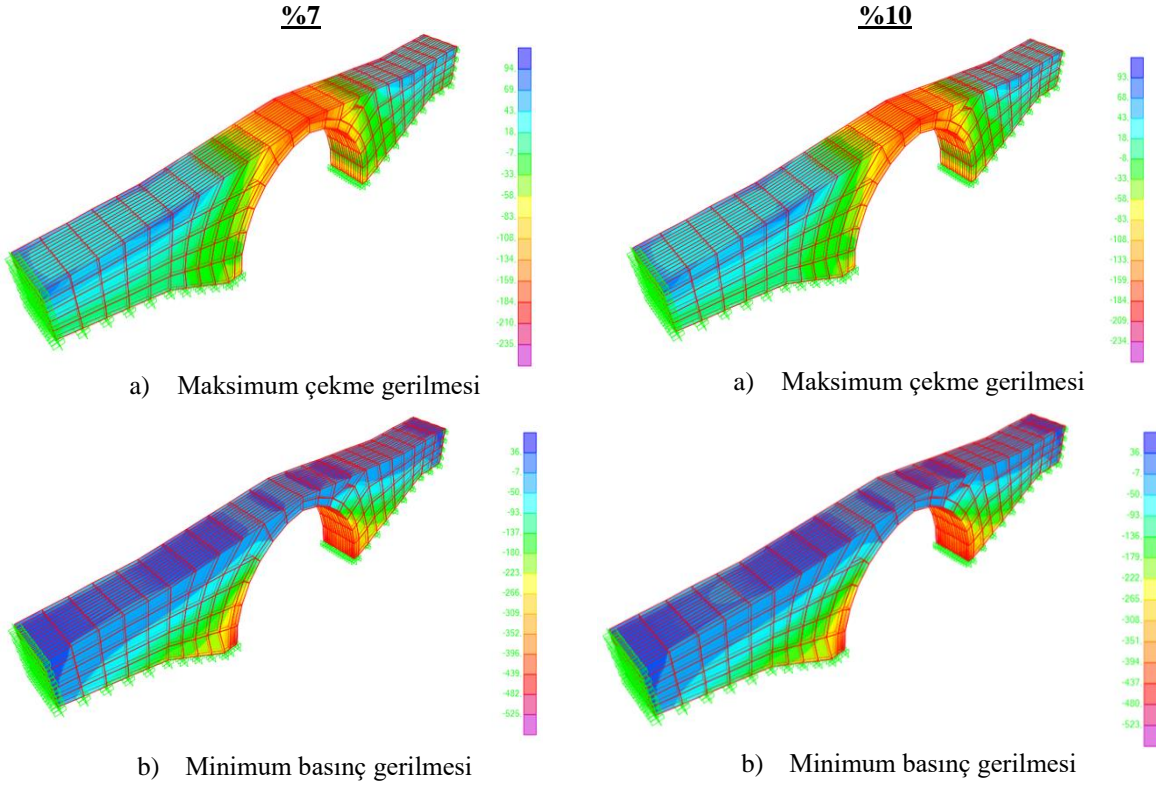
Şekil 13. Rijitlik orantılı sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 14. Rijitlik orantılı sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 15. Rayleigh sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 16. Rayleigh sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada, tarihi yığma bir köprünün farklı sönüm tipleri ve oranları altında sismik tepkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla tarihi Tağar köprüsü dikkate alınarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Köprünün modal analizi yapılarak doğal titreşim frekansları, periyot ve mod şekilleri elde edilmiştir. Daha sonra sönüm tipinin kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü olduğu kabul edilerek zaman-tanım alanında farklı sönüm oranları için köprünün dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik analizler için köprünün bulunduğu konumda dikkate alınarak 1992 Tunceli depremi ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Dinamik analizler sonucunda köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı düğüm noktasında en büyük yer değiştirme değeri köprünün y eksenine doğrultusunda bulunmuştur. En büyük yer değiştirme değeri ise rijitlik orantılı sönüm de elde edilmiştir. Analizler sonucunda çekme gerilmeleri yan duvarların üst kısımlarında ve köprünün her iki ucuna yakın bölgelerde yoğunlaşırken basınç gerilmeleri ise kemerin zemine oturduğu bölgede yoğunlaşmıştır. En büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilmiştir. Farklı sönüm tipleri için elde edilen gerilme değerleri birbirine yakın olmakla beraber en büyük gerilme değerleri rijitlik orantılı sönüm tipinde bulunmuştur. Ancak elde edilen basınç ve çekme gerilmeleri çalışmada dikkate alınan taşın basınç ve çekme dayanımının altında kalmış ve sönüm oranının artmasıyla köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri azalmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje birimi (FÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No: MF.20.28). Yazarlar bu projeye desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- [1] Fanning P.J, Boothby TE. Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers and Structures* 2001; 79(29-30): 2645-2662.
- [2] Sevim B, Bayraktar A, Altunışık AC, Atamtürk S, Birinci F. Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations. *Nonlinear Dynamics* 2011; 63(4): 755-770.
- [3] Sayın E, Calayır Y, Karaton M. Nonlinear seismic analysis of historical Uzunok bridge. *Seventh National Conference on Earthquake Engineering*, 30 May–3 June 2011; Istanbul, Turkey.
- [4] Tetik T. Tarihi yığma yapıların deprem performansı ve güçlendirme teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [5] Yılmaz B. Tarihi köprülerin yapısal davranışına kemer geometrisinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2016.
- [6] Günaydın M. Tarihi bir yığma minarenin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi. *GÜFBED* 2018; 8(2): 381-395.
- [7] Güllü H. Tarihi yığma yapıları cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 7(1): 245-259.
- [8] Özmen A, Sayın E. Seismic assessment of a historical masonry arch bridge. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics* 2018; 1(2): 95-104.
- [9] Öncü M.E, Karaşın A, İzgi R, Karaşın İ.B. Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 1-2 Kasım 2019; Ankara, Türkiye.
- [10] Demir O. Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) köprüsü'nün sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, Türkiye, 2019.
- [11] Gönül A, Sakcalı GB. Tarihi Irgandı köprüsünün deprem performansı. 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 8-11 October 2019; Ankara, Türkiye.
- [12] Öksüz BA. Rize Timisvat köprüsünün sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizi. *A Journal of Structural Science and Innovation* 2019; 1(1): 1-8.
- [13] Işık E, Antep B, Karaşın İB, Öncü ME. Ahlat ilçesinde yer alan Bezirhane beden duvarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 2019; 10(2): 721-730.
- [14] Hökelekli E. Yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 2020; 11(2): 825-838.
- [15] Özmen A, Sayın E. Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.* 2020; 9(2): 956-965.
- [16] Homaei, F, Yazdani, M. The probabilistic seismic assessment of aged concrete arch bridges: The role of soil-structure interaction. *Structures* 2020; 28: 894-904.

- [17] Tokar S, Ünay Aİ. Kemerli taş köprülerin matematiksel modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *G.Ü.Fen Bilimleri Dergisi* 2004; 17(2): 129-139.
- [18] Hughes TG, Blackler MJ. A review of the UK masonry arch assessment methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1997; 122(3), 305-15.
- [19] Yıldırım S. Yusuf Ziya Paşa'nın hayatı ve yaptırmış olduğu eserler. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2018.
- [20] Frunzio G, Monaco M, Gesualdo A. 3D F.E.M. analysis of a Roman arch bridge, *Historical Constructions*. P.B.Lourenço, P.Roca (Eds.), 591-598, Guimarães, 2001.
- [21] Bayraktar A, Altunışık AC, Türker T, Sevim B. Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 2007; İstanbul, Türkiye.
- [22] Pela L, Aprile A, Benedetti A. Seismic assessment of masonry arch bridges. *Engineering Structures* 2009; 31: 1777-1788.
- [23] Lourenço P.B. Computations on historic masonry structures, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2002; 4: 301–319.
- [24] Sayın E. Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2009.
- [25] Celep, Z. *Yapı Dinamiği*, Dördüncü Baskı, Beta Basım Yayım. İstanbul, Türkiye, 2011.
- [26] Karahmetli S, DüNDAR C. Yapıların dinamik analizinde kullanılan sönüm modellerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Müh. Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(2): 23-35.
- [27] SAP2000, *Integrated Structural Analysis and Design Software*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2016.