



TARİHİ YIĞMA KEMERLİ BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Alper ÖZMEN¹ , Erkut SAYIN^{2,*} 

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44000, Malatya, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

ÖZET

Tarihi yığma kemerli köprüler eski dönemlerden beri geçmiş uygarlıkların kültürel mirasını günümüze aktaran en önemli yapılardan biridir. Tarihi yığma kemerli köprüler geçmişte ulaşım, ticaret ve mimarinin en önemli unsurlarından biridir. Ancak yeni yapı malzemelerinin ve yapım yöntemlerinin gelişmesiyle günümüzde artık yığma kemerli köprüler inşa edilmemektedir. Bu yapılar deprem, sel, yangın ve savaşlar gibi dış etkenlerle zarar görebilmektedir. Ülkemizde de tarihi köprüler gibi geçmişi günümüze bağlayan önemli mühendislik yapılarının mevcut durumlarının tespit edilerek geleceğe güvenle devredilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmanın temel hedefi tarihi yığma kemerli bir köprünün lineer dinamik analizlerini gerçekleştirerek köprünün deprem etkisi altındaki davranışını incelemektir. Bu amaçla tek açıklıklı yığma kemerli bir köprü sayısal örnek olarak ele alınmıştır. Köprünün 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar programı ile makro modelleme yaklaşımı dikkate alınarak oluşturulmuştur. Lineer dinamik analizlerde köprünün bulunduğu konum da göz önünde bulundurularak 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerine ait ivme kayıtları sismik etki olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerden köprüye ait yer değiştirmeler ve maksimum-minimum asal gerilmeler elde edilmiş ve köprünün sismik tepkileri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yığma kemerli köprüler, Sonlu elemanlar modeli, Makro modelleme, Lineer dinamik analiz

EVALUATION OF EARTHQUAKE BEHAVIOR OF A HISTORICAL MASONRY ARCH BRIDGE

ABSTRACT

Historical masonry arch bridges are one of most important structures which transfer to cultural heritage of ancient civilizations to the present. These bridges have been one of the most important elements of transportation, trade and architecture in the past. However, nowadays, with the development of new construction materials and methods, masonry arch bridges are no longer constructed. These structures can be damaged by external factors such as earthquakes, floods, fires and wars. There are various studies that are carried out in order to determine the earthquake behaviour of the historical masonry arch bridges. The main objective of this study is to investigate the behaviour of the single span masonry arch bridge under earthquake effects by performing linear dynamic analyses. For this purpose, a single-span masonry arch bridge is considered as a numerical example. Three dimensional finite element model of the bridge has been created by using ANSYS finite element software into account with the macro modelling approach. Because of the location of the bridge, the acceleration records of the 2011 Simav and 2002 Sultandağı earthquakes were used as a seismic effect in the linear dynamic analyses. The displacements and maximum-minimum principal stresses of the bridge were obtained from the analyses and the seismic responses of the bridge were evaluated.

Keywords: Masonry arch bridges, Finite element model, Macro modelling approach, Linear dynamic analyses

1. GİRİŞ

Tarihi yapıların en önemlilerinden biri de hiç kuşkusuz köprülerdir. Tarihi köprüler bölgeden bölgeye bazı değişiklikler göstermektedir. Ülkemizde de farklı dönemlere ait geçmişten günümüze kadar ulaşan birçok tarihi yığma köprü bulunmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan tarihi köprüler envanterine göre yurt içinde büyük çoğunluğu Osmanlı dönemine ait toplam 1646 adet tarihi köprü bulunmaktadır [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esayin@firat.edu.tr

Geliş / Received: 06.04.2020 Kabul / Accepted: 25.05.2020 doi: 10.28948/ngumuh.715121

Yüzlerce yıllık geçmişe sahip olan bu köprüler doğal afetler veya insanlar tarafından zarar görebilmekte ya da yıkılabilmektedir. Ayrıca köprüde kullanılan malzemelerin zamanla dayanımını yitirmesi, zemin oturmaları ve köprünün inşa edildiği dönemde düşünülmemiş yüklere maruz kalması gibi sebepler de tarihi köprülerin zarar görmesine sebep olabilmektedir. Günümüzde bu köprülerin yerini betonarme ve çelik köprüler almıştır. Ancak tarihi köprüler bazı ülkelerde ve ülkemizde halen karayolu, demiryolu ve yaya trafiğinde etkin olarak kullanılmaktadır.

Tarihi köprülerin önemli bir bölümü yığma yapıım tekniğiyle ve taş kullanılarak inşa edilmiştir. Bu köprüler, temel, kemer, tempan duvar ve dolgu malzemesinden meydana gelmekte olup kemerler bu yapı sistemlerinin ana unsurlarını oluşturmaktadır. Geometrisinden dolayı basınç kuvvetlerine maruz kalan kemerler geniş açıklıkların geçilmesi için tarihi köprüler için uygun yapı sistemleridir. Tarihi köprüler hakkında birçok araştırmacı önemli çalışmalar yapmıştır. Fanning ve Boothby [2] üç yığma köprüyü sonlu elemanlar metodu ile üç boyutlu olarak modellemiştir. Köprülerin sonlu eleman modellerinin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve bu modellerden elde edilen sonuçları köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Ural [3] Trabzon'un Maçka ilçesinde bulunan Çoşandere köprüsünün lineer elastik deprem davranışını incelemiştir. Köprünün, dinamik etkilere karşı tepkisini incelemek amacıyla 1940 El Centro deprem kayıtlarını kullanmıştır ve dinamik etkiler sonucunda maksimum gerilmelerin kemer yüksekliğinin orta bölgesinde meydana geldiği sonucuna varmıştır. Bayraktar ve diğ. [4] tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla Trabzon'un Akçabat ilçesindeki tarihi Şinik köprüsünü incelemiştir. Çalışma sonucunda model iyileştirmesi yapılmadan önceki durumda köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin ve asal gerilmelerin, model iyileştirmesi yapıldıktan sonraki durumda meydana gelen maksimum yer değiştirme ve asal gerilmelerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Pela ve diğ. [5] kemerleri betondan ve tuğladan inşa edilmiş iki farklı köprünün doğrusal olmayan statik analizlerini yapmışlardır. Sayın ve diğ. [6] Malatya ilinin Darende ilçe merkezindeki tarihi Uzunok köprüsünün lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda deprem sırasında köprüde meydana gelecek olası çatlak bölgeleri belirlenmiş ve köprünün stabilitesini tehlikeye sokmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Sevim ve diğ. [7] Rize ilinde bulunan Mikron köprüsünün operasyonel modal analiz yardımı ile sonlu eleman model iyileştirilmesini yapmış köprünün 1992 Erzincan depremi altında lineer olmayan davranışını inceleyerek, sonlu eleman iyileştirmesinin lineer olmayan analizlere etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda sonlu eleman iyileştirilmesi yapılmayan modellerden elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum asal gerilmelerin, sonlu eleman model iyileştirmesi yapıldıktan sonraki durumdan elde edilen maksimum yer değiştirme ve asal gerilmelerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Halifeoğlu ve diğ. [8] Anadolu'daki önemli tarihi köprülerden biri olan Samsun ili, Vezirköprü ilçesinde, Kızılırmak nehri üzerindeki Altınkaya baraj gölüne dökülen İstavroz (İstavroz) çayı üzerinde bulunan Tarihi Kurt Köprüsü'nde (Mihraplı Köprü, Vezirköprü) 2007-2009 yılları arasında gerçekleştirilen uygulama çalışmaları ile teknik araştırmalar konusunda bilgiler vererek gerçekleştirilen restorasyon projesini tanıtmışlardır. Gonen ve diğ. [8] tarihi yığma bir köprüyü SAP2000 sonlu elemanlar programı ile modelleyerek köprünün deformasyonları ve gerilmeleri ölü yükler altında elde edilmiş ve köprünün lineer elastik deprem davranışı araştırılmıştır. D'Ambrisi ve diğ. [10] çalışmalarında taş kemer köprüleri çimento katkılı karbon fiber malzeme ile güçlendirmişlerdir. Bu güçlendirmenin köprünün yapısal davranışına etkisini araştırmışlardır. Zampieri ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada kemer kalınlığında zamanla meydana gelen hasarın kemerin sismik davranışına ve yıkılma mekanizmasına olan etkilerini sismik limit analiz yöntemi ile incelemiştir. Özmen ve Sayın [12] Elazığ ili Maden ilçesinde bulunan tarihi Dutpınar köprüsünün zaman tanım alanında lineer dinamik analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda 2003 Bingöl depremi altında köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler ve köprüde meydana gelen asal gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler elde edilmiş ve gerilme yığılımların olduğu bölgelerde daha detaylı analizler yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Öncü ve diğ. [13] Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunu değerlendirmek amacıyla tek açıklığa sahip tarihi köprüyü ANSYS programında üç boyutlu olarak modellemiş ve köprünün statik ve dinamik yükler altında doğrusal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda tarihi köprünün sınırlı hasar performans düzeyini sağladığı kanaatine varmışlardır.

Bu çalışmada, yığma yapıtlı tarihi taş kemer bir köprünün lineer dinamik analizleri yapılarak köprünün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Lineer dinamik analizler için 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu depremler köprünün bulunduğu bölgede daha önce meydana gelmiş olan depremlerdir. Lineer dinamik analizleri gerçekleştirmek amacıyla ANSYS paket programı kullanılmıştır. Bu amaçla Kütahya ili Gediz ilçesinde bulunan Tarihi Debboy Köprüsü sayısal örnek olarak dikkate alınmıştır. Böylece tarihi köprülerde hasara yol açabilecek en önemli unsurlardan biri olan deprem etkisinin incelenmesi ve ileride bu köprü için planlanacak koruma ve restorasyon çalışmalarına katkı sunulması amaçlanmıştır.

2. DEBBOY KÖPRÜSÜ

Debboy köprüsü Kütahya ili Gediz ilçesi, Eskigediz beldesinde yer almaktadır. Kemer şekli sivri olan köprü kesme taşlardan inşa edilmiş olup tek açıklığa sahiptir. Köprü, 5.5 m genişliğinde ve 23 m uzunluğundadır. Köprü kemeri birden fazla yaydan oluşmaktadır ve ortalama yarıçapı 3.9 m'dir. Köprünün yan taşıyıcı duvarlarının kalınlığı 0.40 m olup korkuluk yüksekliği ise 1.2 m'dir. Tarihi köprü, 39.0244 Kuzey, 29.2454 Doğu koordinatlarında bulunmaktadır.

TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaynaklarda köprünün Bizans zamanında yapıldığı belirtilmektedir. Köprü; yapı, plan ve mimari detayları ile bir Osmanlı eseridir. Köprü, Gediz’de meydana gelen sel ve 1944 ile 1970 yıllarındaki depremler gibi pek çok doğa felaketinden sağlam olarak çıkmayı başarmıştır. Köprünün yakınına yeni bir köprü yapılmış ve tarihi köprü bugün işlevsiz kalmıştır [14]. Gediz Çayı üzerinde bulunmakta olan tarihi köprüye ait iki farklı görünüş Şekil 1’de geometrik özellikleri ise Şekil 2’de verilmiştir.



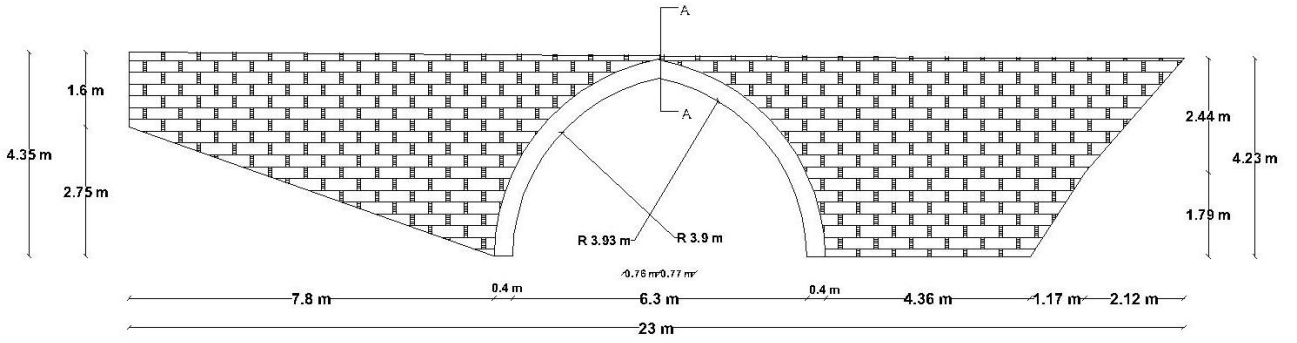
a)



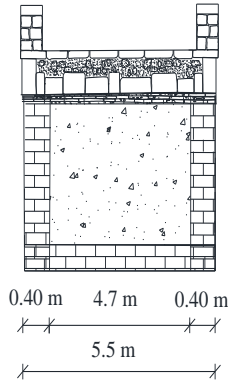
b)

Şekil 1. Debboy köprüsünün genel görünüşü

A. Özmen, E. Sayın



a) Köprü'nün genel görünüşü

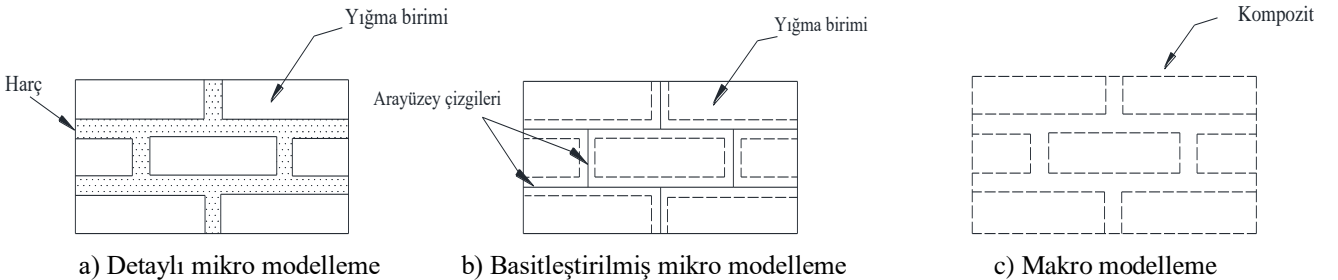


b) A-A kesiti

Şekil 2. Debboy köprüsünün geometrik özellikleri

3. KÖPRÜNÜN SONLU ELEMANLAR MODELİ VE DEPREM ANALİZİ

Yığma yapılar için yapılacak olan sayısal analizlerde, ele alınan yapı sistemin büyüklüğüne bağlı olarak 3 farklı modelleme tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak isimlendirilir [15]. Detaylı mikro modellemede, çözüm süresi oldukça uzundur bu sebeple bu modelleme yöntemi özellikle küçük yapılar ya da dikkate alınacak yapının bir bölümünün çözümü için daha kullanışlıdır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerinin boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Yığma birimleri birbirinden ara yüzey çizgileri ile ayrılırlar. Makro modelleme ise, taş, tuğla vb. bloklar ve harç arasında ayırım yapmaksızın, yapı elemanını kompozit olarak kabul eden ve bu malzemelerin ortak özelliğini yansıtan eşdeğer bir malzeme modelidir. Büyük yapı sistemlerinin incelenmesinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığından çoğunlukla makro modelleme yöntemi kullanılır. Bu yöntemde yığma birimi ile harç arasındaki ilişki ihmal edilerek malzeme kompozit olarak dikkate alınmaktadır. Bu modelleme teknikleri Şekil 3' de verilmiştir. Mikro ve makro modelleme tekniklerinin farklı kullanım alanlarından dolayı, bir modelleme tekniğinin diğerine göre daha uygun olduğunu söylemek doğru değildir. Ancak, literatür incelendiğinde büyük tarihi yapıların çoğunlukla makro modelleme tekniği kullanılarak modellendiği görülmektedir [16, 17].



a) Detaylı mikro modelleme

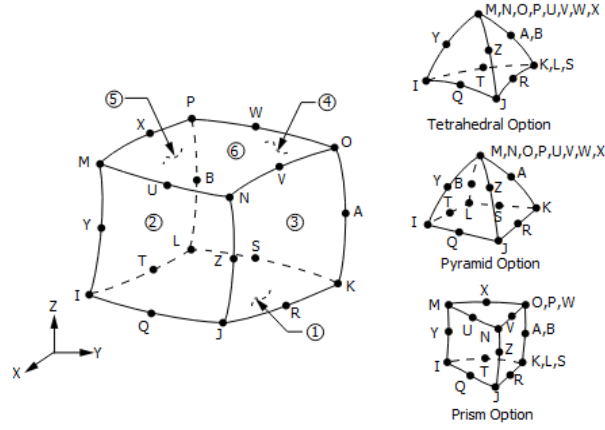
b) Basitleştirilmiş mikro modelleme

c) Makro modelleme

Şekil 3. Yığma yapı modelleme teknikleri [18].

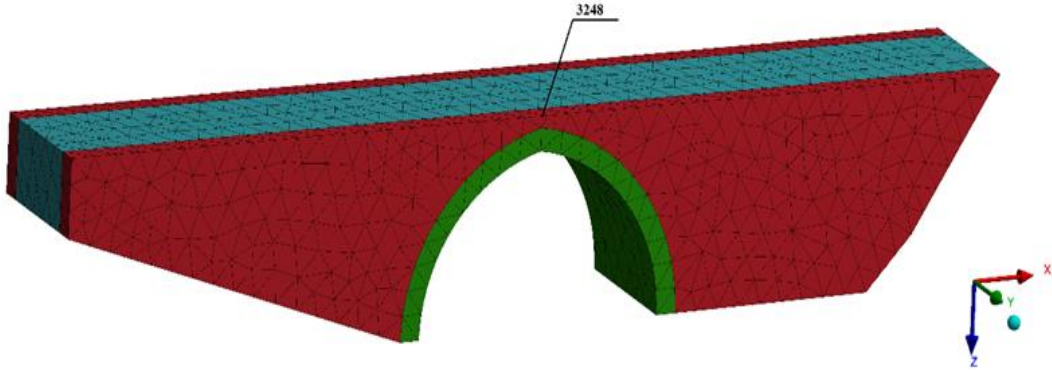
TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Debboy köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS programı kullanılarak makro modelleme yöntemi ile SOLID186 elemanı kullanılarak elde edilmiştir. SOLID186 elemanı toplam 20 düğüm noktasına ve her bir düğüm noktasında üç adet yer değiştirme serbestlik derecesine sahiptir. SOLID186 elemanının genel görünüşü Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 4. SOLID186 elemanının genel görünüşü [19].

Debboy köprüsünün sonlu eleman modelinde sırasıyla 12986 düğüm noktası ve 8022 adet üç-boyutlu katı (solid) eleman bulunmaktadır. Köprü'nün sonlu eleman ağı ve yer değiştirmenin zamanla değişim grafiklerinin çizildiği köprü'nün en üst noktasında yer alan 3248 nolu düğüm noktası Şekil 5' de verilmiştir. Köprü ayakları kaya zemin üzerine oturduğu için modelin sınır koşulları (boundary conditions) ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Köprüde kemer ve yan duvarlar arasında bir yüzey elemanı tanımlanmamış bu kısımlar bonded contact olarak alınmıştır. Köprüde kullanılan elemanların mesh büyüklüğü ise 0.5 m olarak dikkate alınmıştır.



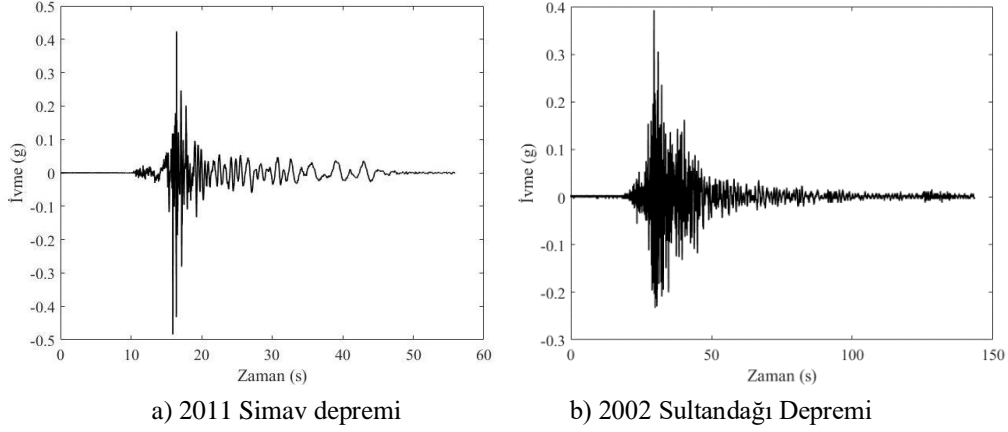
Şekil 5. Debboy köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik parametrelerinin belirlenmesi güçtür. Bu sebeple köprüde kullanılan malzemelerin özellikleri literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir [20, 21]. Bu çalışmada kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. 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 [22].

Tablo 1. Malzeme özellikleri

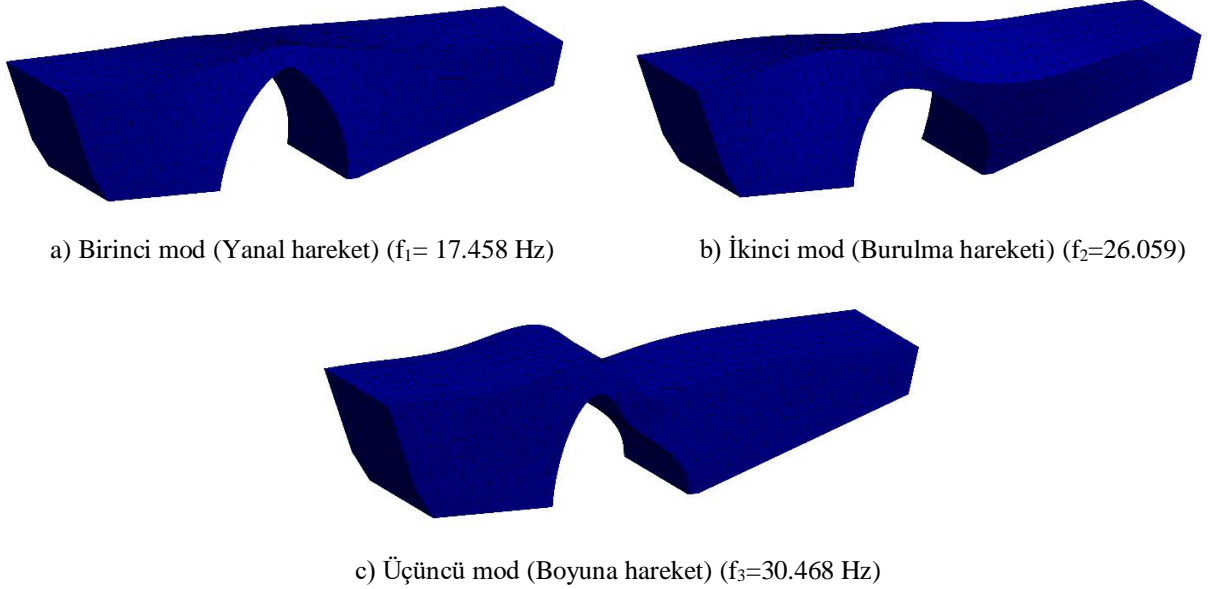
Malzeme	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Yoğunluk (t/m ³)	Poisson Oranı
Kemer	2.5E6	2.3	0.2
Yan Duvar (Tempan Duvar)	2E6	2.2	0.2
Dolgu Malzemesi	1.2E6	1.4	0.2

Lineer analizlerde köprünün bulunduğu bölgenin depremselliği de dikkate alınarak 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem ivmeleri köprünün zayıf eksenini (suyun akış doğrultusu) olan y doğrultusundan etki ettirilmiştir. Her iki deprem kaydının da en etkili olduğu 15 saniyelik zaman dilimi dikkate alınmıştır. 2011 Simav ve 2002 Sultandağı depremlerinin ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Lineer analizlerde kullanılan deprem ivmelerine ait ivme-zaman grafiği

Analizlerde kullanılan deprem ivmeleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2018) göre hazırlanan interaktif deprem haritasından köprünün bulunduğu konumun koordinatları girilerek alınan spektrum grafiğine göre maksimum ivme 0.48g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi Seismomatch yazılımı ile yapılmıştır [23]. Lineer analizlerde viskoz sönüm oranı %5 olarak kabul edilmiş ve Newmark yaklaşımı ile analizler yapılmıştır. Köprüye ait ilk üç mod şekli ve doğal frekansları ise Şekil 7'de verilmiştir.

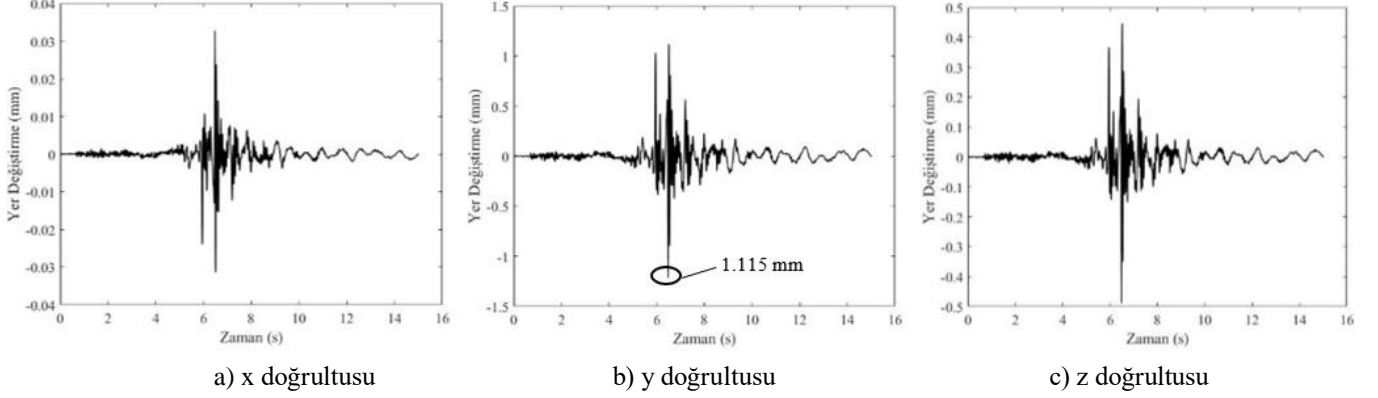


Şekil 7. Debboy köprüsüne ait mod şekilleri ve doğal frekanslar

Tarihi Debboy köprüsünün rölöve ve restorasyon çizimlerine göre oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli dikkate alınarak köprünün kendi ağırlığı ve deprem yükü altında lineer dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar programı ile oluşturulmuştur. Analizlerde doğrusal elastik malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. En büyük yer değiştirme değerleri köprünün en üst noktasında yer alan 3248 nolu düğüm noktasında meydana gelmiştir. Lineer dinamik analizler neticesinde 3248 nolu düğüm noktasının x, y ve z doğrultusunda 2011 Simav depremi için elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla Şekil 8'de verilmiştir.

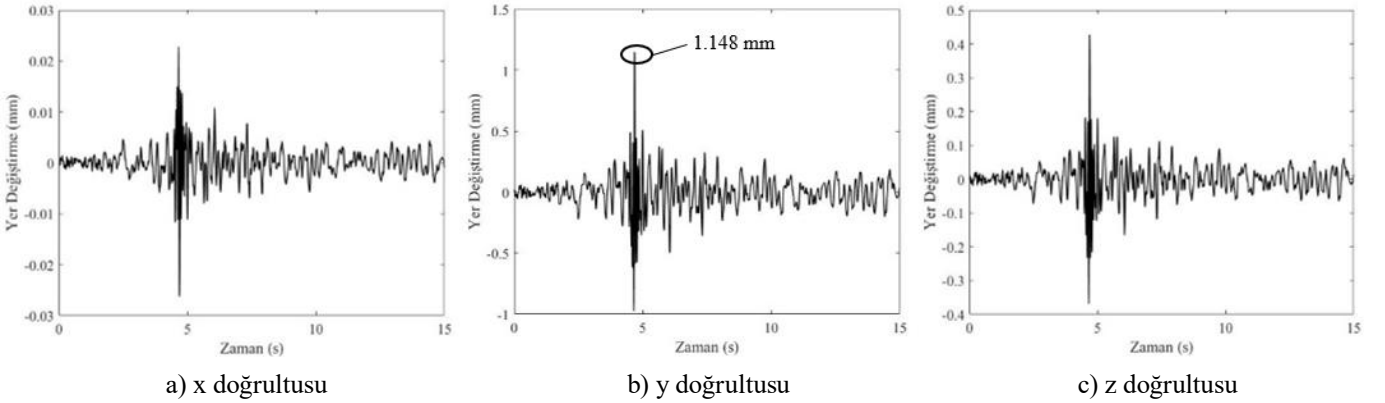
TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Simav depreminden elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde maksimum yer değiştirme değerinin 1.115 mm olarak köprünün kemer açıklığının ortasında y doğrultusunda bulunmuştur.



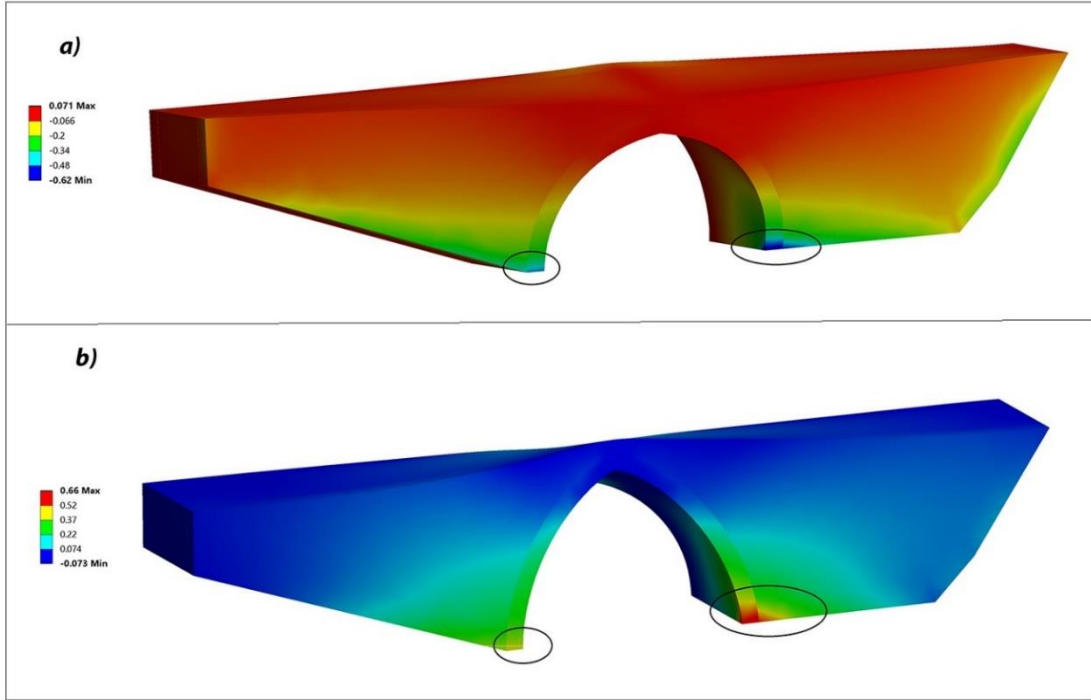
Şekil 8. 2011 Simav depremi için 3248 nolu düğüm noktasının yer değiştirme zaman grafikleri

2002 Sultandağı depremi için 3248 nolu düğüm noktasında x, y ve z doğrultusunda elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri ise sırasıyla Şekil 9’da verilmiştir. Sultandağı depreminden elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde maksimum yer değiştirme değeri 1.148 mm olarak köprünün kemer açıklığının ortasında y doğrultusunda elde edilmiştir. Her iki deprem kaydı için elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri birbirine yakın olup y doğrultusunda bulunmuştur.



Şekil 9. 2002 Sultandağı depremi için 3248 nolu düğüm noktasının yer değiştirme zaman grafikleri

2011 Simav depremi için lineer dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum çekme gerilmesi 0.66 MPa, maksimum basınç gerilmesi ise 0.62 MPa olarak tespit edilmiştir. Köprü üzerinde maksimum ve minimum basınç bölgelerinin meydana geldiği bölgeler Şekil 10’da işaretlenmiştir. Şekil incelendiğinde basınç ve çekme gerilmelerinin köprünün memba cephesinde kemer ayaklarının zemine mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaştığı söylenebilir.

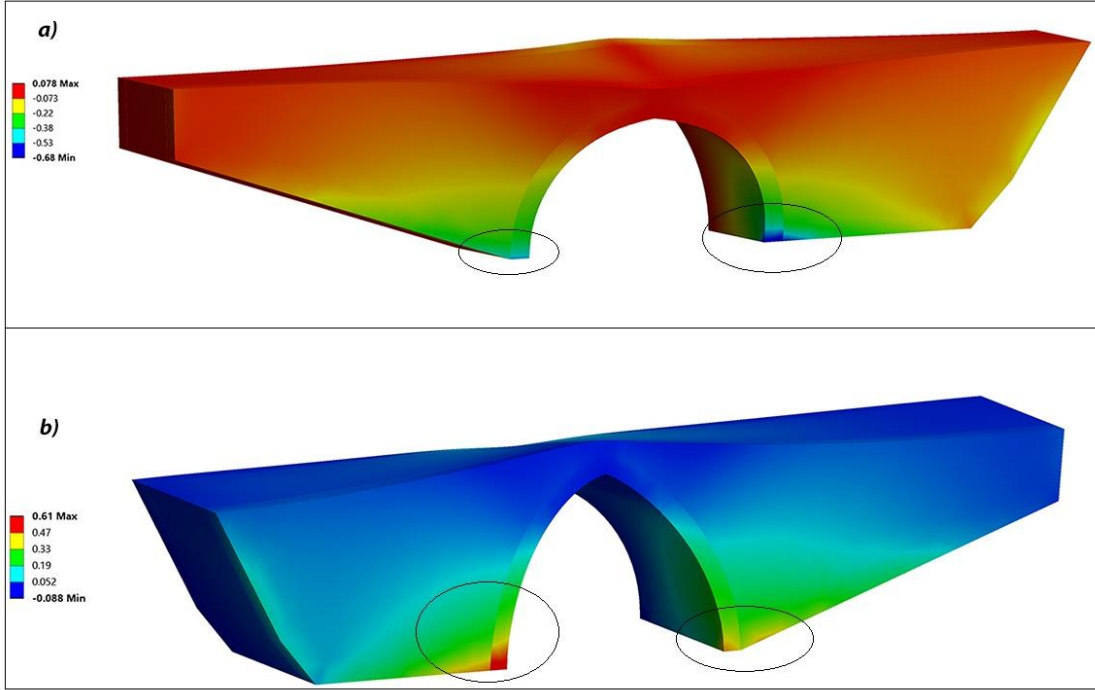


Şekil 10. 2011 Simav depreminden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları

2002 Sultandağı depremi için yapılan analizlerde ise maksimum çekme gerilmesi 0.61 MPa, maksimum basınç gerilmesi ise 0.68 MPa olarak elde edilmiştir. Köprü üzerinde çekme ve basınç gerilmelerinin meydana geldiği bölgeler Şekil 11’ de verilmiştir. 2002 Sultandağı deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan lineer dinamik analizler sonucunda basınç gerilmeleri memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşırken çekme gerilmeleri ise maksimum değerine mansap cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada ulaşmıştır.

Her iki deprem kaydı için yapılan analizlerde basınç gerilmeleri köprü için dikkate alınan taşın basınç dayanımının (20 MPa) oldukça altında olduğundan basınçtan dolayı köprüde bir hasar oluşması beklenmemektedir. Elde edilen çekme gerilmeleri de taşın çekme dayanımından düşük olmakla beraber taşın çekme dayanımına oldukça yakındır. Çekme gerilmelerinden elde edilen değerler köprüde kullanılan malzemenin dayanımını aşarsa potansiyel hasar bölgelerinin ilk olarak analizde tespit edilen bu bölgelerde meydana gelmesi beklenmelidir. Bu sebeple lineer analiz ile tespit edilen bu bölgelerin nonlineer analiz ile daha ayrıntılı olarak modellenerek hasar ve çatlak mekanizmalarının irdelenmesi faydalı olacaktır.

TARİHİ YIĞMA BİR KÖPRÜNÜN DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 11. 2002 Sultandağı depreminden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları

4. SONUÇLAR

Tarihi yapılar çeşitli etkenler sonucunda zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Bu yapıların güvenle gelecek nesillere aktarılabilmesi için korunması ve restorasyonu oldukça önemli bir husustur. Bu çalışma kapsamında Kütahya ili Eskigediz beldesi Gediz çayı üzerinde bulunan Tarihi Debboy köprüsü makro modelleme yaklaşımı ile üç boyutlu olarak modellenerek lineer dinamik analizleri yapılmıştır. Sismik etki olarak iki farklı ivme kaydı dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda maksimum deplasman değeri 2011 Simav depremi ve 2002 Sultandağı depremi için y doğrultusunda (suyun akış doğrultusu) sırasıyla 1.115 mm ve 1.148 mm olarak elde edilmiştir.

Dinamik analizler sonucunda 2011 Simav depremi için basınç ve çekme gerilmeleri köprü'nün memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşırken, 2002 Sultandağı deprem için basınç gerilmeleri köprü'nün memba cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada maksimum değerine ulaşmış çekme gerilmesinin maksimum değeri ise köprü'nün mansap cephesinde kemer ayaklarının zeminle mesnetlendiği noktada elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre basınç ve çekme gerilmelerinin maksimum olduğu bu bölgelerde elde edilen değer köprü'nün malzeme dayanımını aşarsa ilk olarak bu bölgelerde potansiyel hasar bölgelerinin meydana gelmesi beklenebilir. Ülkemiz gibi aktif deprem kuşağı üzerinde bulunan bölgelerde; tarihi yapıların bu çalışmada kullanılan yaklaşımlara benzer yöntemler kullanılarak değerlendirilmelerinin yapılması, güçlendirme gereksinimlerine bu şekildeki değerlendirme sonuçlarına göre karar verilmesi uygun bir çözüm olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), Tarihi Köprüler Şubesi Müdürlüğü Envanteri, Ankara, 2012.
- [2] P. J. Fanning, and T. E. Boothby, "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges," *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 2645-2662, 2001.
- [3] A. Ural, "Tarihi kemer köprülerin sonlu eleman metoduyla analizi," Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [4] A. Bayraktar, A. C. Altunışık, T. Türker, ve B. Sevim, "Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi," Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.

- [5] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges,” *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 1777-1788, 2009.
- [6] E. Sayın, M. Karaton, B. Yön, ve Y. Calayır, “Tarihi Uzunok köprüsünün yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik analizi,” 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- [7] B. Sevim, A. Bayraktar, A. C. Altunışık, S. Atamtürktür, and F. Birinci, “Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 63, no. 4, pp. 755-770, 2011.
- [8] F. M. Halifeoğlu, H. Sert, ve S. Yılmaz, “Tarihi Kurt köprüsü (Mihraplı köprü, Vezirköprü) restorasyonu proje ve uygulama çalışmaları,” *METU JFA*, vol. 30, no. 2, pp. 81-104, 2013.
- [9] H. Gonen, M. Dogan, M. Karacasu, H. Ozbasaran, and H. Gokdemir, “Structural failures in retrofit historical Murat masonry arch bridge,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 334-342, 2013.
- [10] A. D’Ambrisi, F. Focacci, R. Luciano, V. Alecci, and M. De Stefano, “Carbon- from materials for structural upgrade of masonry arch road bridges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, pp. 355-366, 2015.
- [11] P. Zampieri, M. A. Zanini, and F. Faleschini, “Influence of damage on the seismic failure analysis of masonry arches,” *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 343-355, 2016.
- [12] A. Özmen, and E. Sayın, “Seismic assessment of a historical masonry arch bridge,” *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, vol. 1, no.2, pp. 95-104, 2018.
- [13] M.E. Öncü, A. Karaşin, R. İzgi, İ.B. Karaşin, “Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi”, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- [14] T. Acar, “Eskigediz’de (Kütahya) su mimarisi: köprüler, çamaşırhaneler, su kemerleri ve su deposu,” *Uluslararası Folklor Akademisi Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 1-32, 2019.
- [15] P.B. Lourenço, “Computational strategies for masonry structures,” Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands, 1996.
- [16] L. Pela, A. Aprile, and A. Benedetti, “Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 381-394, 2013.
- [17] P. Zampieri, M. A. Zanini, and C. Modena, “Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 13, no. 9, pp. 2629-2646, 2015.
- [18] E. Sayın, “Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Elazığ, 2009.
- [19] ANSYS, 2015, Finite Element Software, Swanson Analysis System, Inc., Houston, TX, USA.
- [20] A.C Altunışık, A. Bayraktar, B. Sevim, and F. Birinci, “Vibration-based operational modal analysis of the Mikron historic arch bridge after restoration,” *Civ. Eng. Envir. Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 247-259, 2011.
- [21] A. Brencich, and D. Sabia, “Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 2087-2099, 2008.
- [22] H. Güllü, Tarihi yığma yapı Cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 7, sayı 1, 245-259, 2018.
- [23] Seismomatch, 2018, Seismosoft Ltd., Pavia, Italy.

