

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hamza GÜLLÜ (ORCID: 0000-0003-2588-2698)*

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

*Geliş / Received: 04.10.2017
Kabul / Accepted: 14.12.2017*

ÖZ

Bu çalışmada, tarihi yığma yapıli kemer formli Cendere köprüsünün üç boyutlu sayısal modeli oluşturularak deprem etkisindeki davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli katı eleman kullanılarak, yapının genel davranışını modelleyen homojen tek bir malzeme kabulü ile oluşturulmuştur. Deprem etkisi, zaman-tanım analizi uygulanarak lineer elastik davranış modeline göre araştırılmıştır. Analizlerde, bölgesel sismisiteyi temsil eden değişik senaryo depremlerine ait kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılmış ve sismik değerlendirmeler için en olumsuz tepkilerin elde edildiği deprem kaydı dikkate alınmıştır. Araştırmada elde edilen bulgular, deprem etkisinde yığma yapının çekme dayanımının kemer bölgesinde aşılabilirliğini, rezonans oluşabileceğini ve yüksek spektral büyütmelerin olabileceğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, olası bir deprem durumunda köprünün hasar açısından risk taşıdığına dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma kemer köprü, sonlu elemanlar, deprem, zaman-tanım analizi, lineer elastik model

INVESTIGATION OF EARTHQUAKE EFFECT OF HISTORICAL MASONRY CENDERE BRIDGE

ABSTRACT

In this study, a historical masonry arch bridge called Cendere Bridge was investigated under earthquake effects by building 3D finite element model of bridge. The finite element model was constructed using solid element with the assumption of homogeneous material in the structure. The earthquake response was investigated for linear elastic behavior applying time-history analysis. Different earthquake scenarios of strong ground motion records that represent the regional seismicity of bridge were employed for the earthquake responses. The earthquake record resulting in the most adverse responses was taken into account for seismic evaluations. The results indicate to the possibility of the exceedance of tensile strength of masonry stone at the arch region, resonance occurrence and high spectral amplifications under earthquake. The results of the study notice a potential of damage risk for the bridge under a possible earthquake.

Keywords: Historical masonry arch bridge, finite element, earthquake, time-history analysis, linear elastic model

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, geçmiş ile günümüz arasındaki bağlantıyı sağlayan çok önemli bir role sahiptir. Bir ülkenin kültürel mirasını ve kimliğini yansıtan en değerli unsurlarıdır. Tarihi yapıları araştırmadan bir ülkenin medeniyet

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 342 360 11 07; e-mail / e-posta: hgullu@gantep.edu.tr

H. GÜLLÜ

geçmişini öğrenmek, anlamak ve geleceğe aktarmak mümkün değildir. Zengin bir medeniyet tarihine sahip Anadolu coğrafyasındaki ülkemizde kültürümüzün en önemli parçalarını oluşturan birçok tarihi yapı bulunmaktadır. Köprüler bu yapılar içerisinde, fonksiyonel olarak vermiş oldukları ulaşım ve lojistik hizmetlerinin yanı sıra mühendislik ve mimari açıdan da oldukça önem arz etmektedir. Değişik zamanlarda inşa edilen bu köprülerde kemer yapı formları yapısal sistemin ana unsurlarıdır. Kemer yapı, geometrik şekliyle dolaylı basınç kuvvetlerine maruz kaldığından, özellikle geniş açıklıklı mesafelerin geçilmesinde uygun bir tasarım sistemidir. Yüksek basınçları taşıyabilme kapasitelerinden dolayı, kemerlerin inşasında kullanılan başlıca yapı malzemesi taş veya tuğladır [1-3]. Tarihi köprüler inşa edildikleri zamandan günümüze gelinceye kadar doğal afetler (deprem, sel, yangın, vs.) ve insan etkileri sonucu bozulma, hasar veya yıkılma tehlikelerine maruz kalmışlardır. Tarihi köprülerdeki hasara sebep olan başlıca faktörler: i) zemin taşıma kapasitesinin azalması ve beton yapımında kullanılmak için temel civarındaki kum ve çakılların insanlar tarafından alınması sonucu mesnetlerde meydana gelen oturmalar, ii) sel etkisi ile oluşan değişik çarpma etkilerinin ve hidrodinamik basınçların sebep olduğu hasarlar, iii) deprem etkisi altında oluşan yanıl yer değiştirmeler, çekme gerilmeleri ve özellikle kemer ortasında oluşan çatlaklar, iv) drenaj sistemlerinin çalışmaması veya yetersiz drenaj sonucunda yağmur sularının köprünün yapısal sistemini etkilemesi, dolgu duvarlar içerisindeki ince daneleri dışarı sürükleyerek taşıma kapasitesini azaltması, boşlukları doldurarak malzemenin ve harcın mukavemetini düşürmesi, v) mevsimlere bağlı olarak oluşan yüksek sıcaklık değişimlerinin yapı malzemesinde oluşturduğu donma-çözünme etkileri, donma-çözünmeye maruz kalan taşlardaki şiddetli rüzgâr, yağmur ve titreşimler sonucu oluşan bozulmalar ve çevre şartlarına bağlı olarak taşlardaki durabilite ve performans kaybı, vi) zaman içerisinde oluşan aşırı ve düzensiz trafik yüklerinin sebep olduğu yapısal bozulmalar, vii) köprünün değişik kısımlarında gelişen bitki köklerinin köprünün iç kısımlarına kadar uzanması sonucu oluşan hasarlar, viii) köprüde uygun yaşam şartlarında gelişen mikroorganizmalardan dolayı biyolojik olarak taşın kristal özelliklerinin değişerek fiziksel ve mekanik yapısının bozulması, ix) şehirleşmeden dolayı nehir yataklarının daralması ve aşırı sedimentasyon sebebi ile seller sırasında oluşan üniform olmayan akımların özellikle köprü temelini zarar vermesi, olarak bildirilmektedir [1-2, 4-5]. Bu faktörlerin zararlı etkilerine karşı tarihi köprülerin korunması, muhafaza edilmesi ve düzenli olarak onarılması bir zorunluluktur. Bu hususta katkıda bulunacak araştırmalara destek verilerek yapısal davranışların belirlenmesi önemli bir gereksinimdir. Böylece, kültürel miraslarımızı koruyabilir ve geleceğe güvenle aktarabiliriz. Bu araştırmada yığma türü taş kemer yapıları tarihi Adıyaman Cendere Köprüsünün sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modelinin oluşturulması ve hasara sebep olan faktörlerden biri olan deprem etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde, Cendere köprüsünün deprem etkisinin irdelendiği bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bu makalenin Cendere köprüsü için ileride planlanacak koruma, muhafaza ve restorasyon çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Taş kemer köprülerin yapısal analizi oldukça kompleks bir çalışma olup özel bir ilgi gerektirmektedir. Özellikle yapısal davranışın malzemeden kaynaklanan lineer olmayan özellikleri iyi bir şekilde tanımlanmalıdır [1-2]. Yığma yapılarıdaki en önemli hasar nedeni, deprem etkisi ile oluşan kayma gerilmelerinin dolayısıyla çekme gerilmelerinin çatlak, ayrılma ve dağılma şeklinde meydana getirdiği hasarlardır. Çünkü genellikle yığma yapıdaki duvar malzemesinin çekme dayanımı ve harcın kayma dayanımı düşüktür. Yığma yapılar ağır ve rijit oldukları için çok büyük deprem kuvvetlerinin etkisinde kalırlar. Sünek olmayan davranışı nedeniyle yığma yapı, çekme ve basınç gerilmeleri altında önemli bir plastik şekil değiştirme göstermeden aniden göçmeye maruz kalabilir. Yığma elemanlarda yüksek çekme gerilmelerinin çatlamlara, yüksek basınç gerilmelerinin ise ezilmelere sebep olacağı kabul edilebilir [6-7]. Rijitliklerinden dolayı yığma yapının hem sönüm oranının hem de doğal titreşim periyodunun kısa olduğu bildirilmektedir. Ayrıca, kısa periyotlu olmalarından dolayı uzak odaklı depremlerin yığma yapıları pek etkilemeyeceği belirtilmektedir [8]. Detaylı deneysel araştırmaların yapılmadığı çalışmalarda, özellikle harç ile tuğla veya taş arasındaki bağlantı ve yığma yapı malzemesinin mekanik özellikleri kabullere dayanarak tanımlanabilir. Bu durumda yapılan analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği hakkındaki şüphelerin oluşmaması için yığma yapının strüktürel (yapısal) davranışının belirlenmesi ve taşıyıcı sistemin zayıf olduğu yerlerin saptanması amacıyla, mevcut analiz yöntemleri (elastik analiz, elastik olmayan analiz, limit analiz) içerisinde öncelikle elastik analiz yapılması önerilmektedir [1, 9-10]. Yığma yapının gevrek davranış göstermesi nedeniyle elastik davranış gösteren katı eleman kullanılması uygundur [6]. Ayrıca, yığma yapılarında harç ile tuğla veya taş arasındaki bağlantı çok değişik şekillerde modellenebileceği için, özellikle karmaşık geometrik oluşumlardaki tarihi yapılarda yük aktarma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için elastik hesap yönteminin kullanılması önerilmektedir [1, 10]. Yığma yapının doğrusal olmayan (elastik olmayan) davranışında, çekme gerilmelerinin malzemenin çekme dayanımına ulaşması sonucunda zayıflamalar ve çatlamlar oluşur [6]. Elastik analizdeki temel amaçlardan birisi, model üzerinde yapının elastik sınırlardaki ve başlangıç seviyelerindeki gerilmelerini belirleyerek oluşabilecek hasarların yorumlanmasına katkı sağlamaktır [5]. Elastik analiz sonucunda belirlenen zayıf bölgelerde lineer olmayan malzeme özelliklerinin dikkate alındığı ayrıntılı modeller ile tekrar analizler yapılabilir. Elastik analizlerde, malzeme dayanımlarının basınç ve çekme gerilmelerinin lineer-elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir.

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yığma yapılarda bu yaklaşımın basınç gerilmeleri açısından kabul edilebilir sonuçlar verirken, çekme gerilmeleri açısından sorunlar oluşturduğu bildirilmektedir. Ancak, özellikle dinamik yükler altında yapının çatlamaya yakın yerlerinin belirlenmesinde elastik analizin önem taşıdığı bildirilmektedir [1].

Yığma yapı taş kemer köprülerin sayısal modelinin oluşturulması ve yapısal davranışının incelenmesi üzerine değişik çalışmalar mevcuttur. Tarihi bir kemer köprü, lineer elastik ve elastik olmayan malzeme davranışına göre sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek statik ve dinamik yükler altındaki tepkiler incelenmiş, elastik olmayan modelin köprünün gerçek davranışında belirleyici olduğu gözlenmiştir. Kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisinde, hasarın köprünün üst kısmında kemerlerde yoğunlaştığı belirlenmiştir [11]. Deneysel çalışmalar, kemer yapıların iki boyutlu plastik ve elastik analizler ile tam olarak modellenemeyen üç boyutlu etkilere maruz kalabileceğini göstermiştir. Aynı elemanlar ve plastik yöntemleri içeren üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin faydalı olduğu gösterilmiştir [12]. Katı (solid) model elemanlar kullanılarak, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile tahmini malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulan yığma kemer köprü modellerinde, servis yükleri etkisindeki model bulguları köprü üzerinde yapılan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Köprü dolgusu Drucker-Prager malzeme modeli, dolgu ile taş arasındaki arayüz ise sürtünmeli temas varsayımı ile modellenmiştir. Bulgular, sayısal modelin gözlem ve deneyler ile uyumlu olduğunu ve gerçek köprü davranışını temsil ettiğini göstermiştir [13]. Toker ve Ünay [1], tarihi kemer yapı prototip bir köprü modelinde doğrusal elastik analiz yöntemi ile yapılan hesaplamalarda deprem etkisindeki en büyük gerilmelerin kemer yüksekliğinin orta bölgesinde ve yan duvarlarda yoğunlaştığını belirlemiştir. Taş ve tuğla gibi yığma yapı tekniğiyle inşa edilen yapılar için en iyi hesap yönteminin sonlu elemanlar analizi olduğu, betonarme, çelik ve ahşap yapılar için uygulanan sayısal model tekniklerinin yığma yapılar için geçerli olmadığı, yığma yapıların gerçek yapısal davranışını anlamak için doğrusal elastik olmayan malzeme ve geometrik özelliklerini hesaba katan yöntemlerin gerekli olduğu bildirilmiştir. Ancak, kemerli yapıların genel stabilitesi ve değişik yüklemeler etkisinde oluşabilecek hasarlar için kritik bölgelerin tespit edilmesi amacıyla ilk önce doğrusal elastik analizin yapılması, daha sonra uygun modeller ile deprem gibi değişen yükler altındaki davranışın incelenmesi önerilmektedir [1]. Yığma türü tarihi kemer yapı Trabzon Coşandere köprüsünün sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modeli oluşturulmuş, statik yük (ölü yük) ve lineer elastik çözümle deprem etkisindeki gerilme ve şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Kendi ağırlığından dolayı kemerin yan yüzlerinin maksimum gerilmelere maruz kaldığı ve zorlandığı belirlenmiş olup bu gerilmeler güvenle taşınmıştır. Kemer köprü düzlemine dik olarak uygulanan deprem etkisinden dolayı ise özellikle kemerin orta bölgesinde büyük gerilmelerin oluşacağı belirlenmiştir. Muhtemel çatlakların bu bölgeden başlayıp göçme mekanizmasına ulaşacağı öngörülmüştür [5]. Tarihi bir taş kemer köprüde (Rakanji Köprüsü) oluşan tahribatın değerlendirilmesi üzerine yapılan bir çalışmada, köprünün yapısal özelliklerinin (doğal frekans, titreşim modları) belirlenmesi amacıyla mikrotremor ölçümleri yapılmıştır. Köprü sayısal olarak modellenmiş ve eigensistem gerçekçi algoritma tekniği ile yapısal karakteristikler (hakim periyot, sönüm faktörü, titreşim modları) belirlenerek sayısal ve deneysel bulgulara dayalı olarak köprüde oluşan hasarlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan sayısal modelin gerçek davranışını temsil ettiği, sismik performans, güçlendirme ve yapısal stabilitenin değerlendirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir [14]. Bir kemer köprünün sürtünmeli temas dinamik hesaplama yöntemi ile dinamik davranışını araştırılmış ve davranışa etkiyen faktörler değerlendirilmiştir. Bulgular, kohezyonlu zeminlerdeki temellere oturan kemerlerin kohezyonsuz zeminlere göre dinamik etkilere karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir [15]. Tarihi bir kemer köprünün sismik performansı nonlineer statik analiz (pushover) ile değerlendirilmiştir. Elastik olmayan nonlineer statik analiz ve tepki spektrumu yaklaşımlarının çerçeve tipi olmayan yapılarda daha zor olduğu bildirilmektedir [16]. Taş kemer yapı tarihi Uzunok köprüsü makro modelleme yaklaşımı esas alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile (katı elemanlar kullanılarak) üç boyutlu olarak modellenmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Temel ortamı doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Malzemeler şekil değiştirme yumuşamasını dikkate alan yayılı çatlak (kemer ve yan duvarlar için) ve Drucker-Prager (dolgu için) modeli ile temsil edilmiştir. Dinamik analizler HHT- α algoritması kullanılarak ANSYS paket programı ile yapılmıştır. Belirli bir zamana kadar (3,71 s) doğrusal ve doğrusal olmayan frekans ve genliklerin (yerdeğiştirme) aynı değerlere sahip olduğu, bu andan itibaren köprüdeki hasar ve çatlaklardan dolayı yerdeğiştirme genliklerinde bazı küçük farklar meydana geldiği bulunmuştur. Kemer düzlemine dik veya akış doğrultusundaki yerdeğiştirmeler diğer doğrultudakine göre genelde daha büyük hesaplanmıştır [17]. Sonlu elemanlar ile oluşturulan üç açıklı bir yığma kemer köprü modeli üzerinde sismik kapasite değerlendirmeleri yapılmıştır. Nonlineer statik analiz (pushover analiz) yöntemi ile hesaplanan yerdeğiştirmelerin, zaman-tanım alanında dinamik analiz ile hesaplananlardan güvenli tarafta olmak üzere bir miktar fazla olduğu belirlenmiştir. Kontrol noktasının ağırlık merkezinde seçilmesi, üst tarafta seçilmesine göre daha güvenilir bulgular ortaya koymuştur [18]. Taş kemer yapı tarihi Timisvat köprüsü, katı eleman kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Zaman-tanım alanında x (köprü düzlemi boyunca) ve y (köprü düzlemine dik) eksenleri yönünde doğrusal (lineer) dinamik analizler yapılarak yerdeğiştirme ve gerilmeler hesaplanmıştır. Bulgular, y yönündeki yerdeğiştirmelerin x'dekilere göre daha

H. GÜLLÜ

büyük olduğunu, gerilmelerin ise x yönünde daha büyük olduğunu göstermiştir. En büyük gerilmeler büyük kemerde hesaplanmıştır [19].

Literatür incelemesi, yığma taş kemer köprüler üzerine yapılan araştırmaların özellikle ülkemizde hala yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada SAP2000 (v.16) [20] programı kullanılarak tarihi Cendere köprüsünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Cendere Köprüsü

Cendere köprüsü, MS 200 yılları başlarında Romalılar tarafından yapılan, dünyanın halen kullanılmakta olan en eski kemer köprülerinden birisidir (Şekil 1). Adıyaman'a 55 km mesafede Eskikale olarak bilinen bir antik yerleşim bölgesinde, Kahta ilçesi Kesertaş köyü sınırları içerisinde Cendere çayı üzerindedir. Biri ana kemer ve diğeri tahliye kemeri olmak üzere toplam iki kemerden oluşan köprü, Romalıların yaptığı ikinci en geniş kemerli köprüdür. Orjinalinde 9-10 m yüksekliğinde 4 sütun bulunan köprü'nün günümüzde 3 sütunu durmaktadır. Köprü'nün uzunluğu 120 m, genişliği ise 7 m olarak bildirilmektedir [21-22]. Köprü yapısal olarak kemer formulu bir köprü olup, ana kemer yüksekliği tabandan itibaren yaklaşık 16 m, kemer açıklığı ise yaklaşık 32 m'dir. Tahliye kemerinin ise yaklaşık yüksekliği 5 m, açıklığı ise 4 m'dir. Kemer taşlarının Cendere çayının hemen arkasında bulunan kayalardan kesilerek elde edildiği bildirilmektedir [21].



Şekil 1. Adıyaman Cendere köprüsü genel görünüşü

Köprü'nün sonlu elemanlar modeli oluşturulurken yapının genel davranışı söz konusu olduğu için [6], kemer ve dolguda aynı taşların kullanıldığı, dolgunun da yük taşıma mekanizmasında katkı sağladığı kabul edilmiştir. Diğer bir deyişle sayısal model, taşıyıcı elemanlar ile beraber dolguyu da katarak tek bir malzeme kabulü ile oluşturulmuştur. Bu kabul, dolgunun kütle ve ağırlık etkisinin yanı sıra basınç gerilmelerini de ileterek köprü'nün çeşitli bölümlerine yükleri aktardığı varsayımına dayanmaktadır. Köprü'nün genel stabilitesi ve kullanım gereksinimlerinden dolayı bu kabulün uygun olduğu düşünülmektedir. Kahta bölgesi jeolojik formasyon açısından pliyo-kuvaterner ve orta-üst miyosene ait karasal kırıntılar ihtiva eden sedimentasyon kayalardan oluşmaktadır [23]. Köprüde kullanılan yığma taş hakkında deneysel bir çalışma yapılamamıştır. Bu yüzden, taş malzemenin mekanik özellikleri jeolojik formasyon [23] ve literatürdeki kaynaklardan [16-19, 24-25] faydalanılarak, taşın genelde kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Buna göre elastisite modülü (Young modül) 3500MPa, basınç mukavemeti 20MPa, çekme mukavemeti ise Pela [16] çalışmasına bağlı olarak basınç mukavemetinin %5'i olan 1MPa kabul edilmiştir. Pela [16] yığma yapılarda çekme/basınç mukavemeti oranının 1/10 ile 1/20 arasında alınabileceğini belirtmişlerdir. Köprüde kullanılan taşın malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Yığma yapı sistemlerinde mekanik özellikler geniş bir aralıkta değişebileceğinden [16], bu çalışmada güvenli tarafta kalmak için mekanik özelliklerin alt sınırları dikkate alınmıştır. Ayrıca, köprü sayısal modelinde taş ve harç üniform kabul edilerek tek bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Böylece, kemer ve diğer kısımları oluşturan taş blokların arasına yerleştirilen harç malzemesinin özelliklerinin de yüksek mertebede olacağı varsayılmıştır.

2.2. Deprem Kayıtları

Türkiye'nin aktif bir fay zonu olan Doğu Anadolu Fayı (DAF), Cendere köprüsünün 60 km kuzeyinden (KD-GB doğrultulu) geçmekte olup, Adıyaman bölgesi için deprem açısından önemli bir risk potansiyeli oluşturmaktadır [26-27] (Şekil 2). Kahta ilçesinde bulunan Cendere köprüsü, Türkiye deprem bölgeleri haritasına [28] göre 2. derece deprem bölgesindedir (Şekil 3). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [29]'e göre deprem etkisinde beklenen en büyük ivme değerleri 0,3g ile 0,4g arasındadır. Bölgenin

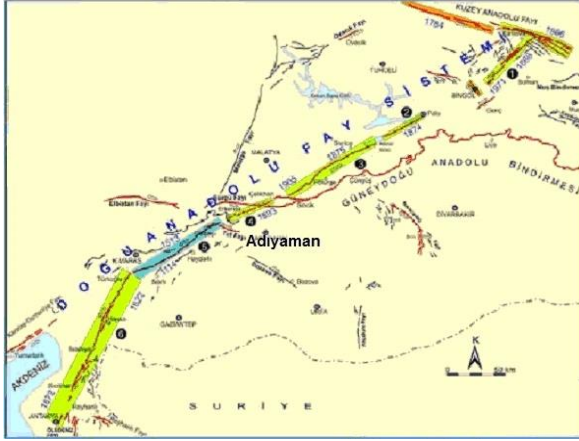
TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

deprem durumu dikkate alınarak yapılacak hesaplamalar için kullanılacak deprem kayıtlarının, i) DAF hareketi ile oluşan, ii) tahmini 0,3-0,4g arasındaki ivmelere sahip veya bu en büyük ivme değerleri arasında olacak şekilde ölçeklendirilmiş (artırılmış veya azaltılmış) ve iii) yakın odaklı (faya olan uzaklık 100km'den küçük) depremler olması benimsenmiştir. Bu çalışmada, köprü temel zemini hakkında detaylı bir araştırma yapılamamıştır. Köprü, ortasından bir çayın geçtiği kanyonun iki tarafını birleştirmektedir. Jeolojik olarak sert veya kayalık bir zemin formasyonuna sahip olduğu kabul edilebilir. Bu yüzden, hesaplarda kullanılan deprem kayıtlarının sert zemin veya kayaya (kayma dalgası hızı > 350 m/s) ait olmasına dikkat edilmiştir. Böylece, zemin-tepki (site response) etkisi en az seviyeye indirilmiş, anakaya temsil edilmiş ve depremin yapı üzerindeki etkisi daha gerçekçi hesaplanmıştır. Temel zemini sert bir zemin olarak kabul edildiğinden, zemin-yapı etkileşimi ihmal edilebilir. Bu yüzden, deprem hareketi doğrudan mesnetlerden uygulanmıştır.

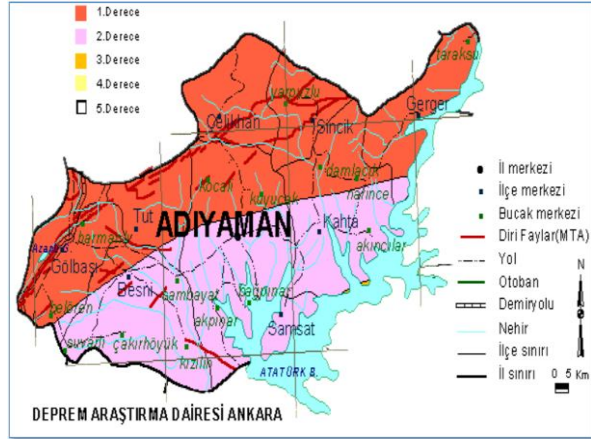
Tablo 1. Sayısal modelde kullanılan köprü yığma taşının mekanik özellikleri

Malzeme Özelliği	Değer
Elastisite modülü (MPa)	3500
Poison oranı	0,2
Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	24
Basınç Mukavemeti (MPa)	20
Çekme Mukavemeti (MPa)	1

Deprem hesabı, zaman-tanım (time-history) alanında linear (doğrusal) davranışı temsil eden analiz türüne göre yapılmıştır. Deprem kayıtlarının seçilmesinde bölgenin deprem durumuna ilave olarak deprem yönetmeliğine göre [29]: i) zaman-tanım alanındaki doğrusal deprem hesabı için 3 adet gerçek ivme kaydı kullanılması, ii) ivme kayıtlarından elde edilen büyüklüklerin en elverişsiz olanlarının (yani maksimumları) deprem etkisi altındaki tasarıma esas olması ve iii) deprem kaydının yapının birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmaması kriterleri de benimsenmiştir.



Şekil 2. Doğu Anadolu Fayı ve Adıyaman İli [26-27]

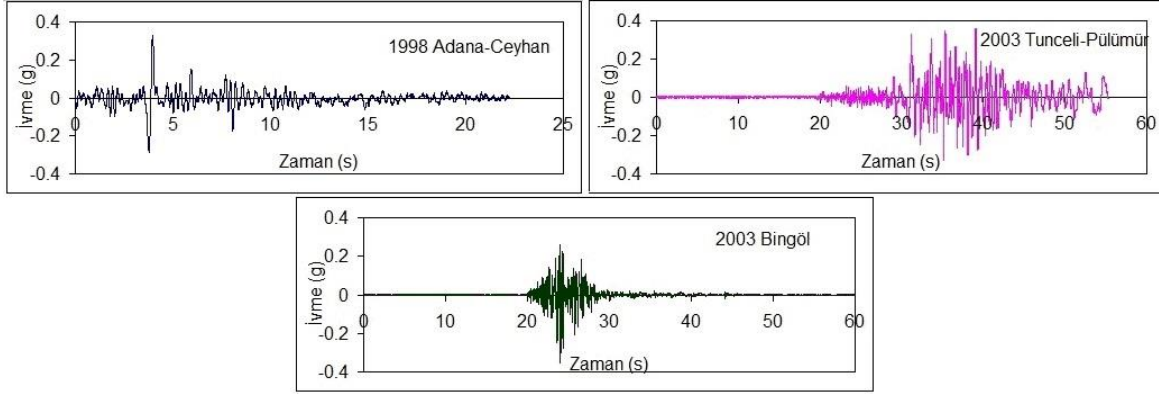
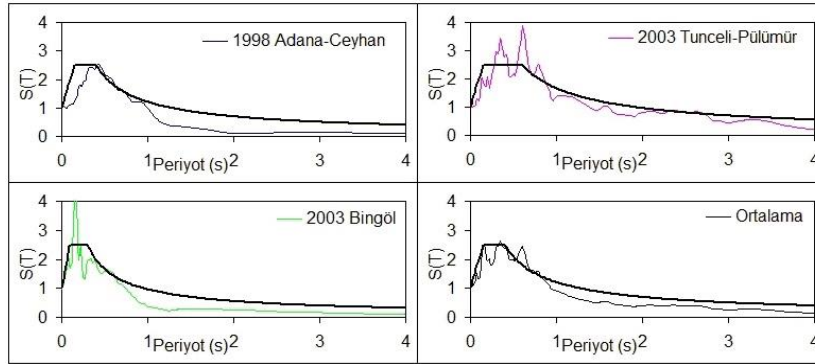


Şekil 3. Adıyaman İli deprem bölgeleri haritası [28]

Hesaplamalarda kullanılan depremler Tablo 2'de, depremlere ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman kayıtları ise Şekil 4'te gösterilmektedir [30]. Şekil 4'ten görüldüğü üzere en büyük ivmeler yaklaşık 0,35 g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Depremlerin salınım özelliklerini yansıtan spektrum grafikleri, deprem yönetmeliğine [29] göre belirlenen tasarım ivme spektrumları ile beraber Şekil 5'te verilmektedir. Bilindiği gibi tasarım ivme spektrumları depremlerin etkili olduğu karakteristik periyot aralıkları hakkında bilgi vermektedir. Şekil 5'teki spektrum grafikleri incelendiğinde, depremlerin 0,1 s ile 0,6 s arasında değişen periyotlarda köprüde etkili olacağı anlaşılmaktadır. Köprü'nün de bu periyotlarda salınımı durumunda deprem dalgası ve yapı arasında rezonans etkisi olabilir. Bu çalışmada, köprü uzunluğu boyunca olan (x-ekseni) deprem etkisi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, deprem hareketi x-ekseni doğrultusunda uygulanmıştır. Ayrıca, Hatzigeorgiou [11] çalışması uyarınca köprüde "sabit yük (ölü yük)+deprem yükü" kombinasyonu ile oluşan tepkiler incelenmiştir.

Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan depremler [30]

Deprem	Kayıt istasyonu kodu	Mw	Episentr mesafesi (km)	Kayma dalgası hızı (m/s)
1998 Adana-Ceyhan	3301-Merkez	6,2	65	366
2003 Tunceli-Pülümür	1201-Merkez	6,0	86	529
2003 Bingöl	1201-Merkez	6,3	12	529

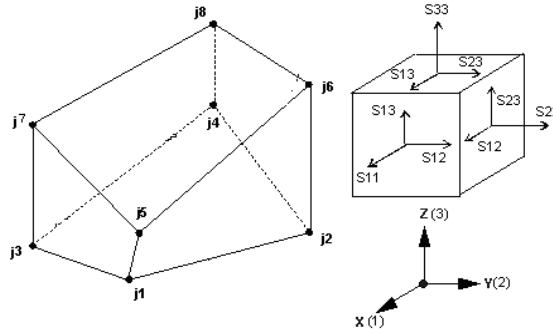
**Şekil 4.** Deprem kayıtları (ivme-zaman) [30]**Şekil 5.** Depremlerin spektrum grafikleri ve deprem yönetmeliğine [29] göre tasarım ivme spektrumları (S(T)= Spektrum Katysayısı)

2.3. Sonlu Elemanlar Modeli ve Deprem Analizi

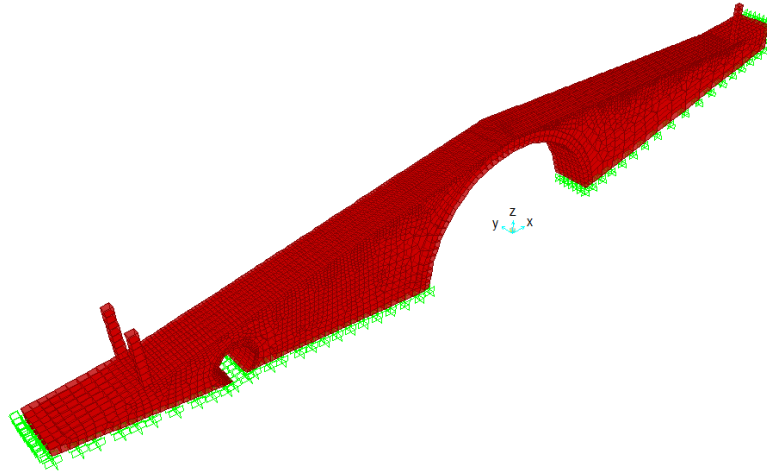
Cendere köprüsünün sayısal modeli üç boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir. Üç boyutlu model, katı (solid) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Katı elemanlarda lineer elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Katı eleman sekiz düğüm noktasına sahip, üç boyutta gerilmelerin tanımlandığı en küçük modeldir [20] (Şekil 6). İlk önce uzunluk boyunca (x-yönü) alan elemanlar kullanılarak köprü'nün iki boyutlu modeli kurulmuştur. Daha sonra ise genişlik boyunca (y-yönü) iki boyutlu model katı elemanlara dönüştürülerek üç boyutlu model oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen modelde 13863 adet üç-boyutlu katı eleman kullanılmıştır. Modeldeki düğüm noktası ise 18048 adettir. Modelin sınır koşulları (boundary conditions) ankastre (fixed) mesnet olarak tanımlanmıştır. Cendere köprüsünün sonlu elemanlar modeli Şekil 7'de gösterilmektedir. Sonlu elemanlar modeli, hem malzeme davranışı hem de dinamik yükleme açısından Tablo 2 (Şekil 4)'de verilen deprem ivme kayıtları kullanılarak zaman-tanım (time-history) alanında *lineer-elastik (doğrusal-elastik)* davranış metodu ile analiz edilmiştir. Böylece, Cendere köprüsünün deprem etkisi altındaki davranış tepkileri belirlenmiştir. Gevrek davranıştan dolayı, hesaplamalarda deprem hareketinin sönüm oranının düşük seviyelerde olması benimsenmiş ve %5 olarak kabul edilmiştir. Deprem hesabında kullanılan deprem hareketinin model özellikleri Tablo 3'te verilmektedir. Hem sonlu elemanlar modeli hem de deprem analizi SAP2000 (v.16) [20] paket programı kullanılarak yapılmıştır. Deprem etkisi altında Cendere köprüsünde

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

oluşabilecek başlıca tepkiler: i) gerilme (basınç, çekme), ii) deplasman, iii) titreşim periyotları ve iv) taban kesme etkileri olarak hesaplanmış ve elde edilen bulgular tartışılarak hasar potansiyeli değerlendirilmiştir.



Şekil 6. Sekiz düğüm noktalı katı (solid) model elemanı ve gerilmeler (S11=X eksenindeki gerilme, S22=Y eksenindeki gerilme) [20]



Şekil 7. Cendere köprüsünün sonlu elemanlar ile oluşturulan sayısal modeli

Tablo 3. Zaman-tanım alanındaki deprem hesabında kullanılan model özellikleri

Parametre	Özellik
Yükleme Durumu	zaman-tanım alanı (time history)
Analiz tipi	lineer
Çözüm tipi	modal
Zaman-tanım tipi	geçici (transient)
Yük tipi	ivme
Yük ismi	U1
Modal Sönüm (damping)	0,05'de sabit

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sabit yük, modal yükleme ve deprem yükleri etkisinde köprüde oluşan en büyük basınç ve çekme gerilmeleri Tablo 4'de sunulmuştur. Kendi ağırlığından (sabit yük) dolayı oluşan gerilmeler (basınç, çekme) malzeme dayanımlarından düşük olduğundan, sabit yük altında taş kemerli köprüde herhangi bir hasar oluşması beklenmemektedir. Deprem etkisindeki yüklemelerden dolayı oluşan gerilmeler, gerilme zarfının (envelope) maksimum (çekme), minimum (basınç) ve zamana göre en büyük ivme durumları için ayrı ayrı hesaplanarak

H. GÜLLÜ

köprüye etkiyen en elverişsiz deprem hareketi belirlenmiştir. Tablo 4'teki bulgular irdelendiğinde, maksimum gerilme zarfındaki çekme gerilmesinin **3,609 MPa** olduğu “**Sabit yük+2003 Bingöl depremi**” yüklem durumu deprem etkisinin en elverişsiz yüklemesi olarak kabul edilebilir. Bu yüzden, deprem hesaplarında Bingöl deprem kaydının benimsendiği bu yük kombinasyonu dikkate alınmıştır. Tablo 4'teki bulgulardan serbest titreşim (deprensiz) hareketini modelleyen modal yüklem durumu incelendiğinde, çekme gerilmesinin (1.mod serbest titreşim hareketi için) 3,506 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Serbest titreşim durumunda mevcut hali ile köprünün stabil ve hasarsız olduğu düşünülürse, 3,506 MPa değerine kadar artan çekme gerilmesinde köprüde herhangi bir hasar oluşmayacağı varsayılabilir. Elde edilen bu çekme gerilmesinin Pela [16] tarafından yığma yapılar için önerilen ve hasar potansiyelinin değerlendirilmesinde kontrol olarak kullanılabilir. Ancak, yüklem durumu (sabit, deprem ve sabit+deprem), analiz tipi (lineer) ve deneysel veri yokluğundan kaynaklanan etkenler nedeniyle daha güvenli tarafta kalmak uygun olacaktır. Bu yüzden daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada çekme mukavemeti/basınç mukavemeti oranları (1/20-1/10) ile uyumlu olduğu söylenebilir. Ancak, yüklem durumu (sabit, deprem ve sabit+deprem), analiz tipi (lineer) ve deneysel veri yokluğundan kaynaklanan etkenler nedeniyle daha güvenli tarafta kalmak uygun olacaktır. Bu yüzden daha önce belirtildiği gibi bu çalışmada çekme mukavemeti/basınç mukavemeti oranı 1/20 veya %5 kabul edilerek hasar potansiyeli değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, deprem etkisinde çekme gerilmesinin 1/20'den büyük değerlerinde (>1 MPa) yapısal dayanımın azalarak hasar oluşabileceği öngörülmüştür.

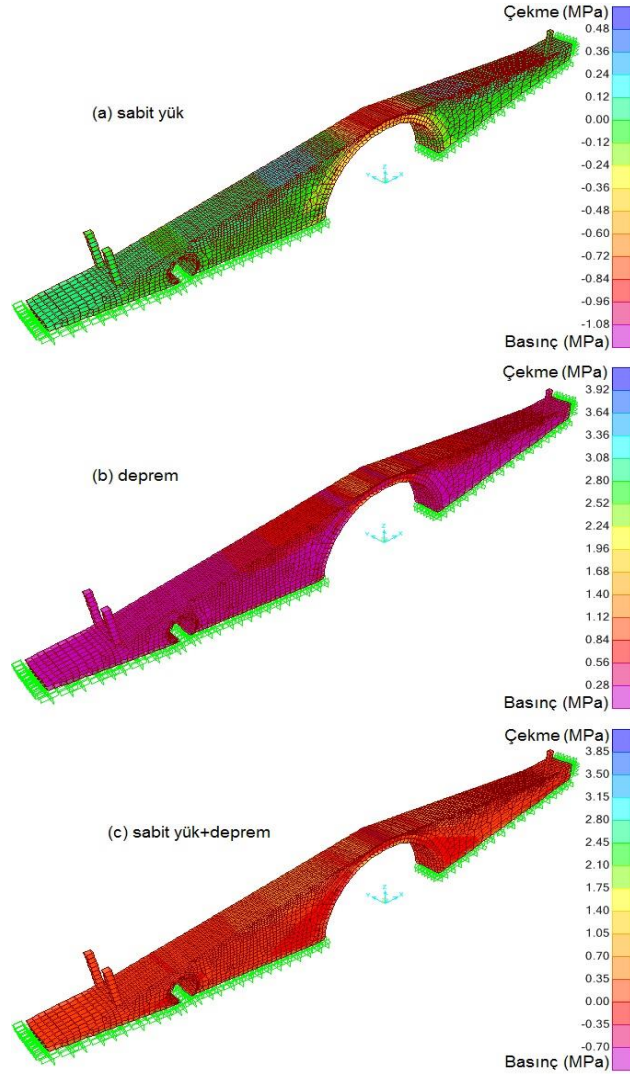
Tablo 4. Yüklem sonucunda oluşan en büyük gerilmeler

Yük	Basınç (-) (MPa)	Çekme (+) (MPa)
Sabit yük	1,129	0,454
Modal yüklem	2,702	3,506
Maksimum zarf durumu (Envelope max)		
1998 Adana-Ceyhan depremi	-	1,119
2003 Tunceli-Pülümür depremi	-	1,733
2003 Bingöl depremi	-	3,920
Sabit yük+1998 Adana-Ceyhan depremi	0,868	0,808
Sabit yük+2003 Tunceli-Pülümür depremi	0,796	1,418
Sabit yük+2003 Bingöl depremi	0,723	3,609
Minimum zarf durumu (Envelope min)		
1998 Adana-Ceyhan depremi	1,053	-
2003 Tunceli-Pülümür depremi	1,864	-
2003 Bingöl depremi	3,717	-
Sabit yük+1998 Adana-Ceyhan depremi	1,577	0,419
Sabit yük+2003 Tunceli-Pülümür depremi	2,175	0,402
Sabit yük+2003 Bingöl depremi	4,032	0,347
Zaman (Maksimum İvme)		
1998 Adana-Ceyhan depremi (t=3,96 s, a _{max} =0,328g)	1,047	1,113
2003 Tunceli-Pülümür depremi (t=39,07 s, a _{max} =0,357g)	1,061	1,115
2003 Bingöl depremi (t=24,04 s, a _{max} =0,355 g)	2,912	2,741

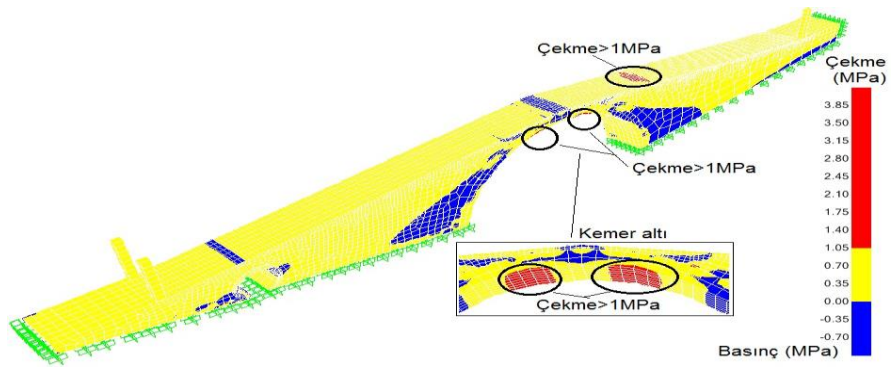
Sabit yük, deprem yükü (Bingöl depremi) ve “sabit yük+deprem yükü (Bingöl depremi)” durumları için gerilme dağılımları hep birlikte Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8 incelendiğinde, deprem etkisi ile artan çekme gerilmelerinin özellikle büyük kemer boyunca daha belirgin olduğu gözlenmektedir. Değerlendirmeler için benimsenen “Sabit yük+deprem” yüklemesi dikkate alındığında; köprüde statik yüklem altında 0,454MPa değerine kadar ulaşabilen çekme gerilmesi, deprem etkisi ile 3,609 MPa değerine kadar yükselerek yığma taş yapının 1 MPa olarak kabul edilen çekme dayanımını aşmıştır. Sonlu elemanlar modeli detaylı olarak incelendiğinde, 476 adet düğüm noktasında çekme gerilmesinin 1 MPa'dan büyük olduğu anlaşılmıştır. Bu bulgular, deprem etkisi altında çekme gerilmesinden dolayı hasar olabileceğine işaret etmektedir. Deprem etkisindeki basınç gerilmeleri ise yığma taşın basınç dayanımından (20 MPa) oldukça düşük olduğundan basınçtan dolayı hasar oluşması beklenmemektedir. Şekil 9, köprü yüzeyinde deprem etkisi altında çekme gerilmesinin 1 MPa'dan büyük olduğu ve hasar açısından riskli olabilecek bölgeleri göstermektedir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, büyük kemerin üst yan kısımları, kemer altı ve kemer yanı yol yüzeyi hasar açısından kritik olarak önerilebilir. Bu bulgu literatürde [11] kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisinde bulunan sonuçlar ile uyumludur. İleriki aşamalarda artan yük etkisinde (nonlineer veya elastik olmayan çözümlerde) oluşması muhtemel çatlakların bu bölgelerden başlayıp göçme mekanizmasına ulaşması beklenebilir. Bu yüzden, önerilen

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

kritik bölgelerin nonlineer analiz ile daha ayrıntılı modellenerek çatlak mekanizmalarının incelenmesi faydalı olacaktır.



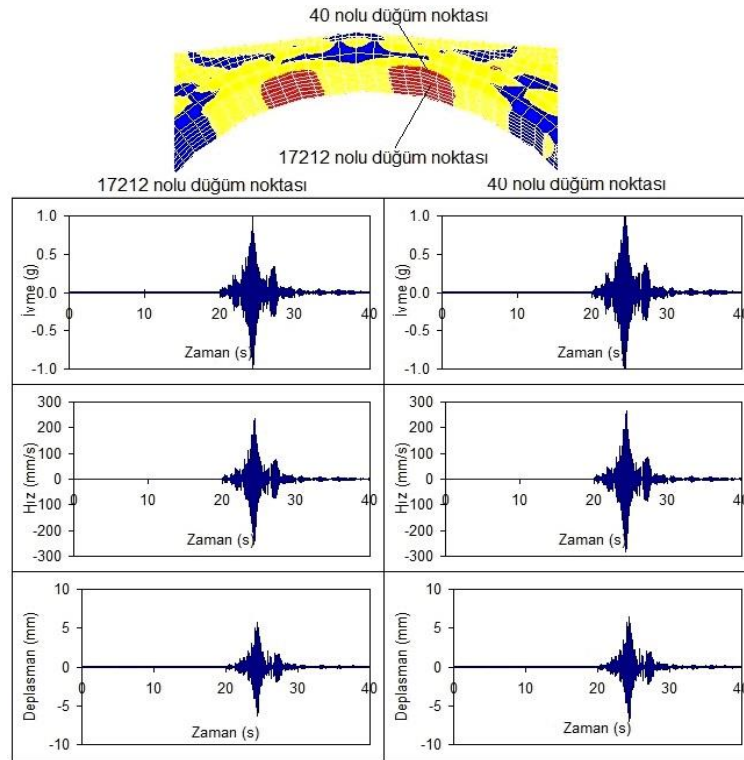
Şekil 8. Gerilme dağılımı: (a) sabit yük, (b) deprem yükü (Bingöl depremi), (c) sabit yük+deprem



Şekil 9. Deprem etkisinde köprü yüzeyindeki gerilmelerin (basınc, çekme) detaylı gösterimi ve çekme gerilmesinin 1 MPa'dan büyük olduğu kritik bölgeler

H. GÜLLÜ

Depremim ivme, hız ve deplasman genliklerine olan etkisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Deprem etkisi köprüde hasar açısından kritik olarak önerilen büyük kemer altının sağ kısmında (17212 nolu düğüm noktasında) ve kemer yan yüzeyinin sağ kısmında (40 nolu düğüm noktasında) çekme gerilmelerinin yaklaşık 1,6MPa olduğu bölgelerde gösterilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere mesnetlerden 0,355g'lik maksimum ivme ile uygulanan deprem etkisi, köprüde artarak kemerde yaklaşık 1g'ye kadar yükselmektedir. Deplasmanlar ise 7mm'ye kadar çıkmaktadır. Deplasman büyüklüklerinin, düğüm adetine göre değişimi Tablo 5'de sunulmuştur. Köprüdeki düğüm noktalarının çoğunda (55,4%) deplasmanlar 0-1mm arasındadır. Sonlu elemanlar modeli detaylı olarak incelendiğinde, genel olarak deplasmanların büyük kemerde 7mm'yi aşmadığı gözlenmiştir. Ancak, yaklaşık 268 adet düğüm noktasında 7mm'yi aşarak (Tablo 5) özellikle sütunlarda 28mm'ye kadar yükseldiği anlaşılmıştır. Deplasmanlar ile deprem hasarının orantılı olduğu bilinmektedir [6]. Sütunlar için DBYBHY [29]'de önerilen maksimum etkin görelî kat ötelemesi $(\delta_i)_{\max} / h_i \leq 0,02$ (h_i =i'inci katın kat yüksekliği, $\delta_i = R\Delta_i$, Δ_i = i'inci katdaki azaltılmış görelî kat ötelemesi, δ_i = i'inci katdaki etkin görelî kat ötelemesi, R=taşıyıcı sistem davranış katsayısı) koşulu dikkate alındığında; 10m sütun yüksekliği ve konservatif bir hesap ile R=4 alınması durumunda $(\delta_i)_{\max}=4*28/10000=0,0112 \leq 0,02$ olarak hesaplanır. Bu bulgu deprem yönetmeliğine göre deplasmandan dolayı sütunda hasar oluşmayacağına işaret etmektedir. Ancak, Celep ve Kumbasar [6]'da önerilen relatif kat yerdeğiştirme oranı (δ =yerdeğiştirme/kat yüksekliği) ve hasar arasındaki ilişki ($\delta=0,001$ ise taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar çok muhtemel; $\delta=0,002$ ise taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar çok muhtemel; $\delta=0,007$ ise taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar hemen kesin, taşıyıcı elemanlarda hasar çok muhtemel; $\delta=0,015$ ise taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar kesin, taşıyıcı elemanlarda hasar çok muhtemel) ile karşılaştırıldığında; $\delta=28/10000=0,0028$ olarak hesaplanan yerdeğiştirme oranı, sütunlarda hasar ihtimali için kritik sınır olarak değerlendirilebilir. Fakat, köprünün sütunlar dışındaki diğer kısımlarında Celep ve Kumbasar [6]'a göre deplasmanlardan dolayı hasar oluşması beklenmemektedir. Yine de nihai kararın daha detaylı gözlem ve incelemelere dayalı mühendislik değerlendirmesi ile verilmesi önerilir.



Şekil 10. Deprem etkisindeki ivme, hız ve deplasman genlikleri

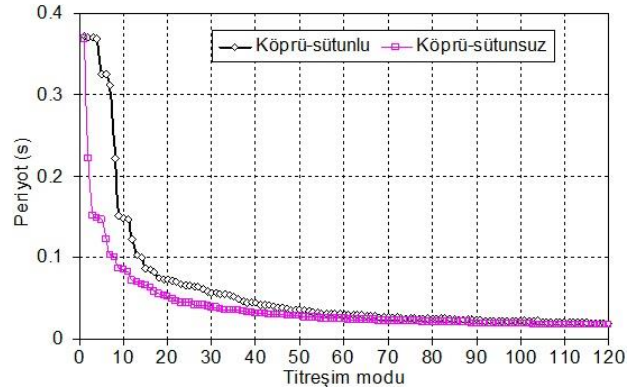
Köprünün serbest titreşim durumundaki modal analiz ile elde edilen doğal titreşim periyotları (modal periyot), titreşim şekillerini ifade eden mod sayılarına göre (120 moda kadar) Şekil 11'de gösterilmektedir. DBYBHY [29] uyarınca modal katılma kütle oranı (her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının yapı toplam kütlelerine oranı) %90'dan büyük olup modal çözümde yeterli titreşim mod sayısı hesaba katılmıştır. Sütunlu durumda, yüksek periyotların (7 moda kadar) elastik olan sütunların titreşiminden, geri kalanların ise yapısal

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

sistemin titreşiminden kaynaklandığı söylenebilir. Literatürdeki [8] bilgiye uygun olarak, hesaplanan doğal titreşim periyotlarının kısa olduğu değerlendirilebilir. Zaman-tanım alanı (time-history) analizi ile yapılan deprem hesabı neticesinde köprüde elde edilen tepki spektrumu, deprem spektrumu (Bingöl depremi, Şekil 5) ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 12’ de gösterilmektedir. Köprü tepki spektrumu büyük kemer için Şekil 10’da genlikleri gösterilen ve çekme gerilmeleri açısından kritik olarak önerilen kemer altı bölgesinde 17212 nolu düğüm noktası için elde edilmiştir. Tepkiler, spektral ivmelerin ivme-zaman grafiğindeki en büyük ivme değerine göre normalize edilmesi sonucu bulunan spektral oranlar (S(T)) olarak hesaplanmıştır. Deprem yönetmeliğinde [29] önerilen tasarım ivme spektrumları ile birlikte sunulmuştur. Bilindiği gibi yüksek modlardaki titreşimler çok büyük enerji gerektirdiği için çoğunlukla ilk birkaç yada 5 moda kadar olan titreşimler yapısal değerlendirmelerde önemli olmaktadır [31]. Eğer yapının doğal titreşim periyodu ile yapıya etkileyen deprem hareketinin hakim periyodu birbirine yakın ise yapıdaki deprem etkisinin arttığı ve hasar riskinin oluşabileceği rezonans durumu ortaya çıkar [32]. Modal analiz ile elde edilen doğal titreşim periyotları (Şekil 11) genel olarak incelendiğinde, köprüdeki salınımların düşük titreşim modlarında (yaklaşık 10 moda kadar) 0,1s-0,37s arasındaki hakim periyotlarda, yüksek titreşim modlarında ise 0,1s’den düşük periyotlarda salındıkları anlaşılmaktadır. 0,1s-0,37s aralığında salınan köprünün doğal titreşim periyotları, hakim periyodu 0,16s olan ve tasarım ivme spektrumuna [29] göre 0,1s-0,3s aralığında salınan deprem ivme spektrumu (Şekil 12b) ile karşılaştırıldığında, köprüde rezonans ihtimalinden söz edilebilir. Zaman-tanım alanı analizi ile elde edilen salınımlar incelendiğinde ise (Şekil 12a), köprüdeki hakim periyodun yaklaşık 0,18s olduğu ve tasarım ivme spektrumuna [29] göre 0,1s-0,3s arasında değişebileceği anlaşılmaktadır. Köprü tepki spektrumu (Şekil 12a) ile deprem spektrumu (Şekil 12b) karşılaştırıldığında, modal analiz sonucunda olduğu gibi deprem etkisinde köprüde rezonans ihtimalinden bahsedilebilir.

Tablo 5. Deplasman büyüklüklerinin değişimleri

Deplasman aralığı (mm)	Düğüm âdeti	%
20-28	23	0,13
10-20	31	0,20
8-10	4	0,02
7-8	210	1,20
6-7	660	3,70
5-6	533	3,00
4-5	1197	6,60
3-4	1185	6,60
2-3	1436	8,00
1-2	2773	15,40
0-1	9996	55,40

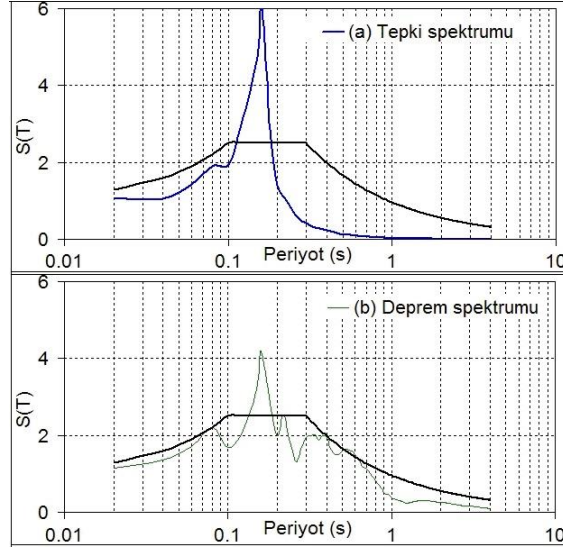


Şekil 11. Köprünün sütunlu ve sütunsuz durumlarında farklı titreşim modlarındaki doğal titreşim periyotları

Deprem etkisindeki spektral büyütme etkileri değerlendirildiğinde, deprem spektrumunda (Şekil 12b) 4,1 olan spektral büyütme katsayısının, köprü tepki spektrumunda (Şekil 12a) artarak 6’ya çıktığı belirlenmiştir. DBYBHY [29]’de tasarım ivme spektrumunda tasarıma esas olan spektral büyütme katsayısının üst sınırı 2,5

H. GÜLLÜ

olarak önerilmektedir. 2,5 üzerindeki değerler ise tehlikeli kabul edilmekte ve güvenli bulunmamaktadır. Bu yüzden, köprüde üst sınırın oldukça üzerinde hesaplanan spektrum katsayısı, depremden dolayı köprüde meydana gelecek salınımların hasar açısından tehlikeli olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle kemer bölgesinde oluşan büyütme etkisinin rijitlikten kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 12. Tepki spektrumları: (a) Kemer altında 17212 nolu düğüm noktasında hesaplanan köprü tepki spektrumu, (b) Deprem dalgasının (Bingöl depremi, Şekil 5) tepki spektrumu

Yükleme etkisi ile köprüde oluşan maksimum yatay taban kesme kuvvetleri (x-yönünde) ve dönme momentleri Tablo 6’da verilmektedir. Taban kesme kuvveti deprem etkisinde (statik+deprem) önemli artış göstererek 47849kN’a yükselmiştir. Ancak, dönme momentinde ise anlamlı bir artış görülmemiştir. Sonlu elemanlar modeli detaylı incelendiğinde düşey yöndeki kesme kuvvetlerinde de anlamlı bir artış olmadığını belirtmekte fayda vardır. Köprünün toplam ağırlığı 211279kN olup, deprem etkisinde hesaplanan taban kesme kuvveti toplam ağırlığın yaklaşık %23’ünü oluşturmaktadır. DBYBHY [29]’e göre, 2.derece deprem bölgesinde yeralan Cendere köprüsünde (Şekil 3) oluşabilecek en büyük yer ivme değerlerinin (0,3g-0,4g) etkisi ile kıyaslandığında, zaman-tanım alanı ile deprem etkisinde hesaplanan taban kesme kuvvetinin beklenenden daha düşük olduğu söylenebilir. Bu durum deprem etkisindeki analiz tipinin lineer olmasından kaynaklanmış olabilir. Güllü ve Karabekmez [33]’de nonlineer analiz ile elde edilen taban kesme kuvvetlerinin, deprem ivme etkisine göre daha büyük etkiye sebep olabileceği görülmüştür. Depremden dolayı oluşan taban kesme kuvvetinin hasar açısından güvenli olup olmadığı, DBYBHY [29]’de önerilen duvar kayma emniyet gerilmesinin ($\tau_{em} = \tau_0 + \mu\sigma$, τ_{em} = duvar kayma emniyet gerilmesi, μ = sürtünme kuvveti (0,5 olarak alınabilir), σ = duvar düşey gerilmesi, τ_0 = duvar çatlama emniyet gerilmesi) kuvvet cinsinden bulunup karşılaştırılması ile değerlendirilebilir. Güvenli durum için taban kesme kuvvetinin kayma direncinden küçük olması beklenir. Duvar düşey gerilmesinden dolayı oluşan kuvvet, toplam köprü ağırlığı olarak kabul edilir ve konservatif bir hesapla duvar çatlama emniyet gerilmesi ihmal edilirse; köprüdeki kayma direnci yaklaşık 105640 kN olarak hesaplanır. Bu değer, taban kesme kuvvetinden oldukça büyüktür. Bu yüzden deprem etkisindeki taban kesme kuvvetinin hasar açısından güvenli olduğu söylenebilir.

Tablo 6. Taban kesme kuvveti ve dönme momenti

Yük	Taban kesme kuvveti (kN)	Dönme momenti (kNm)
Statik	0	738809
Modal (Mod1)	0,776	6536
Deprem	47849	20746
Statik+deprem	47849	759489

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Elde edilen analiz bulguları neticesinde, deprem etkisi altında köprüde hasar açısından kritik olarak öngörülen bölgeler için gerekli önlemlerin alınması önerilmektedir. Olası bir depremde özellikle çekme dayanımının aşılmasından veya rezonans oluşumundan dolayı köprüde oluşabilecek hasarın derecesi, çatlak genişliklerine göre literatürde [7, 34] önerilen sınıflandırmadan (Tablo 7) faydalanılarak değerlendirilebilir. Ancak, bu çalışmada zaman-tanım alanı analizi ile deprem etkisi sadece lineer davranış modeli kullanılarak araştırılmıştır. Alternatif davranış modelleri (nonlineer, nonlineer itme-göçme, özdeğer analiz, tepki spektrumu, v.s.) ve ayrıca hassasiyet düzeyine bağlı olarak mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modeller [17, 35-37] karşılaştırılarak deprem etkileri daha detaylı araştırılmalı ve hasar potansiyeli değerlendirilmelidir. Malzeme bakımından nonlineer çözümler için muhtemel olabilecek çatlakların (global veya ayrık çatlak, lokal veya yayılı çatlak) kırılma mekanizmasının [17, 38-39] incelenmesi de faydalı olacaktır.

Tablo 7. Yığma yapı hasarının sınıflandırılması [7, 34]

Hasar Durumu	İnceleme
Hasarsız	Çatlak ≤ 1 mm, kılcal boyutta, daha ince, sıva kalınlığı kadar veya hiç yok
Az Hasarlı	Çatlak genişliği 1-10 mm arasında, X şeklinde, duvar içine kadar uzanan duvar çatlakları
Orta Hasarlı	Çatlak genişliği 10-25 mm arasında, X şeklinde kesme çatlakları, değişmeyen duvar düzlemi ve boyutları
Ağır Hasarlı	Çatlak genişliği > 25 mm, düşeyden sapan duvar düzlemi, duvarlarda şişme, 1/50 oranından fazla düşeyden ayrılan duvar
Yıkılmış	Taşıyıcı duvarın yıkılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tarihi yığma yapı ve kemer formlu Cendere köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve zaman-tanım alanında lineer elastik analiz yöntemi ile deprem etkisi altındaki davranışı incelenerek hasar durumu değerlendirilmiştir. Lineer elastik davranış modelinin etkisi ile elde edilen analiz bulgularına bağlı olarak Cendere köprüsü için aşağıdaki sonuçlar önerilebilir:

- 1) Deprem yükü altındaki çekme gerilmeleri, özellikle büyük kemerin üst yan kısımlarında, kemer üst yan kısımlarında ve kemer yanı yol yüzeyinde müsaade edilen yığma taş çekme dayanımına ulaşmış olup hasar açısından risk oluşturmaktadır. Basınç gerilmeleri ise, yığma taş basınç dayanımının oldukça altında olup, hasar açısından riskli görülmemektedir.
- 2) Deplasmanlardan dolayı sütunlarda hasar potansiyeli kritik seviyede bulunmuştur. Ancak, köprünün diğer kalan kısımlarında hasar oluşturacak seviyede deplasman oluşmamıştır.
- 3) Modal analiz ile hesaplanan köprünün doğal titreşim periyotları kısa periyotlu olup düşük titreşim modlarında (10 moda kadar) 0,1 s-0,37 s arasında değişmektedir.
- 4) Hem zaman-tanım alanı ile elde edilen köprü tepki spektrumunun salınım periyotları hem de modal analiz ile hesaplanan doğal titreşim periyotları, deprem spektrumu ile karşılaştırıldığında köprüde rezonans olma ihtimalinden söz edilebilir.
- 5) Köprü tepki spektrumu ile hesaplanan spektral büyütme katsayısı, deprem tasarım ivme spektrumlarında 2,5 olarak önerilen üst sınırın oldukça üzerinde olup, deprem etkisi ile oluşacak salınımlardan dolayı hasar açısından riskli görülmektedir.
- 6) Deprem hareketi ile köprü toplam ağırlığının %23'ü seviyesinde taban kesme kuvveti oluşmuştur. Taban kesme kuvvetinden dolayı köprüde hasar beklenmemektedir.

Elde edilen sonuçlar lineer-elastik davranış modelini temsil etmektedir. Alternatif davranış modellerinin araştırılması önerilse bile, köprüde gerekli sismik deneyler yapılarak model sonuçları ile karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] TOKER, S., ÜNAY, A.İ., "Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges", Gazi University Journal of Science, 17(2), 129-139, 2004.
- [2] URAL, A., ORUÇ, S., DOĞANGÜN, A., TULUK, Ö.İ., "Turkish Historical Arch Bridges and Their Deteriorations and Failures", Engineering Failure Analysis, 15, 43-53, 2008.

H. GÜLLÜ

- [3] GÜLLÜ, H., JAF, H.S., “Full 3D Nonlinear Time History Analysis of Dynamic Soil Structure Interaction For a Historical Masonry Arch Bridge”, *Environmental Earth Sciences*, 75(21), 1-17, 2016. Doi: 10.1007/s12665-016-6230-0.
- [4] ÇULPAN, C., *Turkish Stone Bridges; From Medieval to The End of Ottoman Period*, [in Turkish], Turkish History Foundation, 2002.
- [5] URAL, A., “Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi”, *Deprem Sempozyumu*, 408-413. Kocaeli, Türkiye, 2005.
- [6] CELEP, Z., KUMBASAR, N., *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, Sema Matbaacılık, ISBN: 975-95405- 2-5, İstanbul, Türkiye, 1993.
- [7] ÇIRAK, I.F., “Yığma Yapılarda Oluşan Hasarlar, Nedenleri ve Öneriler”, *SDU International Technologic Science*, 3(2), 55-60, 2011.
- [8] BAYÜLKE, N., “Yığma Yapıların Deprem Davranışı ve Güvenliği”, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 1-14. Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- [9] KARAESMEN, E., ÜNAY, A.İ., ILTER, I., *A Study of The Sinan’s Masonry Bridges, Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings II*, Computational Mechanics Publications, Southampton-Boston, 1991.
- [10] CROCI, G., *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1998.
- [11] HATZIGEORGIOU, G.D., BESKOS, D.E., TEODORAKOPOULOS, D.D., SFAKIANAKIS, M., “Static and Dynamic Analysis of the Arta Bridge by Finite Elements”, *Architecture and Civil Engineering*, 2(1), 41-51, 1999.
- [12] BOOTHBY, T.E., “Analysis of Masonry Arches and Vaults”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 246-256, 2001.
- [13] FANNING, P.J., BOOTHBY, T.E., “Three-Dimensional Modelling and Full-Scale Testing of Stone Arch Bridges”, *Computers and Structures*, 79, 2645-2662, 2001.
- [14] AOKI, T., SABIA, D., RIVELLA, D., KOMIYAMA, T., “Structural Characterization of a Stone Arch Bridge by Experimental Tests and Numerical Model Updating”, *International Journal of Architectural Heritage*, 1, 227–250, 2007.
- [15] RAFIEE, A., VINCHES, M., BOHATIER, C., “Application of The NSCD Method to Analyse The Dynamic Behaviour of Stone Arched Structures”, *International Journal of Solids and Structures*, 45, 6269–6283, 2008.
- [16] PELA, L., APRILE, A., BENEDETTI, A., “Seismic Assessment of Masonry Arch Bridges”, *Engineering Structures*, 31, 1777-1788, 2009.
- [17] SAYIN, E., KARATON, M., YÖN, B., CALAYIR, Y., “Tarihi Uzunok Köprüsünün Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi”, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 1-8. Ankara, Türkiye, 11-14 Ekim 2011.
- [18] PELA, L., APRILE, A., BENEDETTI, A., “Comparison of Seismic Assessment Procedures for Masonry Arch Bridges”, *Construction and Building Materials*, 38, 381–394, 2013.
- [19] KORKMAZ, K.A., ZABIN, P., ÇARHOĞLU, A.I., NUHOĞLU, A., “Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi: Timisvat Köprüsü Örneği”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 66-75, 2013.
- [20] SAP2000 (v.16), *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual*, Berkeley, California, Computer and Structures Inc., 2016.
- [21] AKSU, R., MÜLAYİM, O., “Adıyaman ve Çevresinin Jeolojisi Teknik Gezi Kılavuzu”, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TP), 2015. https://www.researchgate.net/profile/Oguz_Mulayim/publication/298281685_Adiyaman_ve_Cevresinin_Jeolojisi_Teknik_Gezi_Kilavuzu/links/56e7b33408ae4c354b1be38d/Adiyaman-ve-Cevresinin-Jeolojisi-Teknik-Gezi-Kilavuzu.pdf (erişim tarihi 10.12.2017)
- [22] ADIYAMAN VALİLİĞİ, 2016. <http://www.adiyamanrehberim.com/Detay/158/adiyaman-cendere-koprusu> (erişim tarihi 06.05.2016)
- [23] MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü-Turkish General Directorate of Mineral Research and Exploration), 2002. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/HATAY.pdf> (erişim tarihi 10.12.2017)
- [24] BOWLES, J.E., *Foundation Analysis and Design* (5th ed.), McGraw-Hill, 1996.
- [25] BAYKASOĞLU, A., GÜLLÜ, H., ÇANAKCI, H., ÖZBAKIR, L., “Prediction of Compressive and Tensile Strength of Limestone”, *Expert Systems with Applications*, 35, 111-128, 2008.
- [26] AYDIN, M., SEVİMLİ, U.İ., ZORLU, K., SERVİ, T., GÜNAYDIN, O., “Adıyaman İlinin İstatistiksel Deprem Analizi”, Adıyaman Üniversitesi, Doğrudan Faaliyet Destek Programı, TRC1/13/DFD/3027, 2013.

TARİHİ YIĞMA YAPILI CENDERE KÖPRÜSÜNÜN DEPREM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

- [27] DUMAN, T.Y., EMRE, Ö., ÖZALP, S., OLGUN, Ş., ELMACI, H., “1:250000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Şanlıurfa (NJ37-10) ve Suruç (NJ37-14) Paftaları, Seri No: 43”, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye, 2012. http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/yenilenmis_diri_fay_haritalari/sanliurfa_suruc.pdf (erişim tarihi 10.12.2017)
- [28] TDBH (Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası), 1996. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, <http://www.deprem.gov.tr/depbolge/adiyaman.gif> (erişim tarihi 15.05.2016)
- [29] DBYBHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik), 2007. <http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/eski/DBYBHY-2007-KOERI.pdf> (erişim tarihi 15.05.2016)
- [30] AFAD (T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), 2016. http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php?dst=TU9EVUxFX05BTUU9ZWYdGhxdWFrZSZNT0RVTEVfVEFTSz1zZWYyY2g%3D (erişim tarihi 17.05.2016)
- [31] BAYÜLKE, N., “Çok Katlı Yapılar ve Deprem”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Çok Katlı Yapılar Sempozyumu, 189-226. İzmir, Türkiye, 21-23 Eylül 1989.
- [32] KRAMER, S.L., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [33] GÜLLÜ, H., KARABEKMEZ, M., “Gaziantep Kurtuluş Camisinin Deprem Davranışının İncelenmesi”, DÜMF Mühendislik Dergisi, 7(3), 455-470, 2016.
- [34] MERTOL, A., MERTOL, C., Deprem Mühendisliği, Ankara, 2002.
- [35] LOURENÇO, P.B., Computational Strategies For Masonry Structures, Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands, 1996.
- [36] MODENA, C., VALLUZZI, M.R., TONGINI, F.R., BINDA, L., “Design Choices and Intervention Techniques for Repairing and Strengthening of The Monza Cathedral Bell-Tower”, Construction and Building Materials, 16, 385–395, 2002.
- [37] BERNARDESCHI, K., PADOVANI, C., PASQUINELLI, G., “Numerical Modeling of The Structural Behavior of Buti’s Bell Tower”, Journal of Cultural Heritage, 5, 371–378, 2004.
- [38] MANFREDI, C., RAMASCO, R., “The Use of Damage Functionals in Earthquake Engineering: A Comparison Between Different Methods”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22(10), 855-868, 1993.
- [39] RODRIGUEZ, M.E., ARISTIZABAL, J.C., “Evaluation of a Seismic Damage Parameter”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(5), 463-477, 1999.