



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ KEMER KÖPRÜNÜN DÜZLEM İÇİ VE DÜZLEM DIŞI DEPREM
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

HAZIRLAYAN
BETÜL NİHAN ÜSTÜN

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMİN HÖKELEKLİ

BARTIN-2020



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TARİHİ KEMER KÖPRÜNÜN DÜZLEM İÇİ VE DÜZLEM DIŞI DEPREM DAV-
RANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Betül Nihan ÜSTÜN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Emin HÖKELEKLİ	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. Selçuk BAŞ	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. Ali DEMİR	- Manisa Celal Bayar Üniversitesi

BARTIN-2020

KABUL VE ONAY



BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Emin HÖKELEKLİ danışmanlığında hazırlamış olduğum “TARİHİ KEMER KÖPRÜ-NÜN DÜZLEM İÇİ VEDÜZLEM DIŞI DEPREM DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

26.08.2020

Betül Nihan ÜSTÜN

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteğini esirgemeyen sabırla bana yol gösteren kıymetli danışmanım Sayın Dr. Emin HÖKELEKLİ hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösterdiği ve sürekli bu konuda çalışmam için elinden gelen her şeyi yapan eşim Murat ÜSTÜN' e teşekkürlerimi sunuyorum.

Motivasyon desteğiyle çalışmamda sürekliliği sağlamamda bana yardımcı olan ablam Aslıhan YOĞURTÇU' ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatım öncesinde ve sonrasında maddi ve manevi bütün ihtiyaçlarımı her ne pahasına olursa olsun karşılayan, annem Emine YILMAZ' a teşekkürlerimi sunuyorum. Tez aşamasına gelmeden önce bana derslerde gerekli tüm bilgileri öğreten Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında derslerime giren tüm öğretim görevlilerine teşekkür ederim.

Betül Nihan ÜSTÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARİHİ KEMER KÖPRÜNÜN DÜZLEM İÇİ VE DÜZLEM DIŞI DEPREM DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Betül Nihan ÜSTÜN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Emin HÖKELEKLİ

Bartın-2020, sayfa: 63

Ülkemizde Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinden günümüze kadar ayakta kalmayı başaran ve ulaşım sistemine önemli derecede katkı sağlayan çok sayıda tarihi taş köprü bulunmaktadır. Taş kemer köprüler genellikle kemer, yan duvar, dolgu, ayak ve temel gibi yapısal elemanlardan meydana gelmektedir. Kemer köprüler genellikle sel, deprem, rüzgâr ve üzerinden geçen trafik yükleri etkisindedir. Bu dış etkiler arasında köprülerin yapısal elemanlarına hasar veren en önemli yük etkisi depremlerdir. Deprem, sel ve rüzgâr gibi yatay yük etkisinde köprülerin düzlem dışı hareketlerinde en savunmasız ve çoğunlukla hasar gören eleman yan duvarlarıdır. Köprülerde yan duvarların uzunluğunun ve yüksekliğinin artması düzlem içi ve düzlem dışı doğrultuda kırılma eğilimini artırmaktadır. Bu tezin amacı, sismik etkiler altında tarihi taş yığma bir köprünün taşıyıcı birimleri arasındaki etkileşimin köprü yan duvarlarının düzlem içi ve düzlem dışı davranışına etkisini doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanarak incelemektir. Çalışma alanı olarak 1787 yılında inşa edilen Bartın ilinin ilk taş köprüsü Kemer köprü seçilmiştir. Kozcağız nehri üzerinde bulunan köprünün üzerinden her gün binlerce araç ve yaya geçmektedir. İki açıklıklı kemer köprünün toplam uzunluğu 44m'dir. Kemer açıklıklıları 12.5m uzunluğunda ve 7,8m yüksekliğindedir. Köprünün toplam genişliği 8.5m ve nehir üzerindeki uzunluğu 30m'dir. Köprünün sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ve zaman tanım ala-

nında doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizlerinin gerçekleştirilmesinde ABAQUS V10 (2010) programı kullanılmıştır. Köprü taşıyıcı sistemini oluşturan yığma birimler arasındaki etkileşimin yapısal davranışa etkisini incelemek amacı ile iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modellerinden birincisinde yığma birimler arasındaki etkileşim dikkate alınmamış, ikincisinde ise etkileşim dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Köprünün yan duvar ve kemer birimlerinin doğrusal olmayan malzeme davranışının tanımlanmasında beton hasar plastikleşme (ConcreteDamage Plasticity) yaklaşımı, dolgu biriminin doğrusal olmayan davranışının tanımlanmasında Mohr-Coulomb yaklaşımı kullanılmıştır. Yapının zaman tanım alanında sismik analizlerinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtlarının Doğu-Batı Bileşeni kullanılmıştır. İvme kaydı düzlem dışı (menbansab) ve düzlem içi (trafik akışı) yönlerde köprüye ayrı ayrı uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda doğrusal ve doğrusal olmayan analizler ara yüzey etkileşimsiz model kullanılarak karşılaştırılmıştır. Daha sonra ara yüzey etkileşimli ve etkileşimsiz modellerin doğrusal olmayan düzlem içi ve düzlem dışı davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda yapıların yapısal davranışının belirlenmesinde doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiği görülmüştür. Ayrıca ara yüzey etkileşiminin kemer köprülerin yan duvar davranışını önemli derecede etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle kemer köprülerin yapısal davranışının belirlenmesinde ara yüzey etkileşiminin dikkate alınması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi taş köprü;Doğrusal ve doğrusal olmayan deprem analizi;Yapışkan ara yüzey davranışı;Düzlem içi ve dışı davranış;Beton hasar plastisite modeli.

Bilim Alan Kodu:502.03.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE IN-PLANE AND OUT-PLANE EARTHQUAKE BEHAVIOR OF THE HISTORICAL ARC BRIDGE

Betül Nihan ÜSTÜN

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Dr. Öğretim Üyesi Emin HÖKELEKLİ

Bartın-2020, pp: 63

In our country, there are many historical stone bridges which have survived from the Roman, Byzantine, Seljuk and Ottoman periods to the present and which have contributed significantly to the transportation system. Stone arch bridges usually consist of structural elements such as arch, sidewall, filling, abutment and foundation. Arch bridges are generally affected by flood, earthquake, wind and traffic loads passing over them. Among these external effects, earthquakes are the most important load effects that cause damage to the structural elements of the bridges. The most vulnerable and mostly damaged element in the out of plane movements of horizontal load affected bridges such as earthquake, flood and wind are the side walls. Increasing the length and height of the side walls in the bridges increases its fragility in the plane and out of plane direction. The aim of this thesis is to investigate the effect of interaction between the bearing units of a historical masonry bridge under seismic effects on the in plane and out of plane behavior of the bridge side walls using linear and nonlinear analysis methods. The first stone arch bridge of Bartın province, which was built in 1787, was chosen as the working area. Every day, thousands of vehicles and pedestrians pass over the bridge on the Kozcağız river. The total length of the arch bridge with two spans is 44m. The arch spans are 12.5 m length and 7.8 m height. The total width of the bridge is 8.5 m and its length over the river is 30m. The ABAQUS V10 (2010) program has been used to form the finite element model of the

bridge and to perform linear and nonlinear time history seismic analyses. Two separate finite element models have been formed to investigate the effect of the interaction between the masonry units forming the bridge bearing system on structural behavior. In the first of the finite element models formed, the interaction between masonry units is not taken into account. In the second, modeling has been done by taking interaction into account. Concrete damage plasticity approach has been used in defining the nonlinear material behavior of the sidewall and arch units of the bridge, and Mohr-Coulomb approach has been used in defining the nonlinear behavior of the filling unit. The east-west component of the acceleration records of the 17 August 1999 Kocaeli earthquake has been used in the time history seismic analyses of the structures. The acceleration recording has been applied separately to the bridge in the out of plane (upstream-downstream) and in plane (traffic flow) directions. At the end of the study, linear and nonlinear analyses have been compared using the non-interaction interface model. Then, the nonlinear in plane and out of plane behavior of interaction and non-interaction interface models have been compared. At the end of the study, it has been seen that nonlinear analysis methods should be used in determining the structural behavior of the structures. In addition, it has been concluded that interface interaction significantly affects the side wall behavior of arch bridges. Therefore, it has been suggested to consider the interface interaction in determining the structural behavior of the arch bridges.

Keywords: Historical stone bridge; Linear and nonlinear seismic analysis; Cohesive interface behavior; In-plane and out-of-plane; Concrete damage plasticity model.

Scientific Field Code: 502.03.01

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iv
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Tarihi Kemer Köprüler	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Yığma Köprüler Konusunda Yapılmış Çalışmalar	3
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOT	7
3.1 Tarihi Yığma Yapılar	7
3.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler.....	9
3.2.1 Taş	9
3.2.2 Tuğla	10
3.2.3.1 Kireç Harcı	10
3.2.3.2 Horosan Harcı.....	10
3.3 Tarihi Kemer Köprü Taşıyıcı Sistem Elemanları	12
3.3.1 Kemer.....	12
3.3.2 Sütun ve Ayaklar.....	13
3.3.3 Yan Duvarlar.....	14
3.3.4 Temel.....	15

3.3.4.1 Sürekli Temel	15
3.3.4.2 Tekil Temel	15
3.4 Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzeme Modelleme Yöntemleri	15
3.4.1 Detaylı Mikro Modelleme	16
3.4.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	16
3.4.3 Makro Modelleme	18
3.4.4 Makro Modellemede Kullanılan Malzeme Parametrelerinin Hesabı.....	18
3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi	20
3.6. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz.....	21
3.6.1 MohrCoulombAkma Kriteri	22
3.6.2Beton Hasar Plastisite Malzeme Modeli.....	23
BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1 Tarihi Kemer Köprü	26
4.2.1 Köprünün Coğrafi konumu	27
4.2.2 Köprünün Tarihi Geçmişi	28
4.2.3 Bartın İlinde Meydana Gelen Depremlerin Tarihsel İncelemesi	28
4.2.4 Köprünün Mimari ve Yapısal Özellikleri	29
4.2.5. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	30
4.3 Köprünün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	31
4.4 Deprem İvme Kaydının Seçilmesi.....	33
4.5 Köprünün Dinamik Analizleri	35
4.5.1 Modal Analiz.....	35
4.5.2 Zaman Tanım Alanında Doğrusal/Doğrusal Olmayan Sismik Analizler	38
4.5.3. Köprünün ara yüzey etkileşimsiz Doğrusal/Doğrusal Olmayan Sismik Analizler	38
4.5.4. Ara yüzey etkileşimli SE modeli Doğrusal olmayan sismik analizi	42
4.5.5. Tarihi Yığma Taş Kemer Köprüsünün Düzlem Dışı Davranışı.....	45
4.5.6 Tarihi Kemer Köprüsünün Düzlem İçi Davranışı	50
BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER	55

KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	63



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
Şekil 1: Roma dönemine ait Kutluca Köprüsü. (URL-1, 2019)	7
Şekil 2:Roma dönemine ait Cendere Köprüsü. (URL-2,2019)	8
Şekil 3: Selçuklu Dönemine ait Çeşnigir Köprüsü. (URL-3, 2019).....	8
Şekil 4:Osmanlı dönemine ait Mostar Köprüsü. (URL-4,2019)	9
Şekil 5: Kemer elemanlarının adları.	12
Şekil 6: Kemer yapım şekilleri (a) düz kemer, (b) basık kemer, (c) üst çizgisi olan tam kemer, (d) sivri kemer, (e) dar açılı taş kullanılmadan yapılan kemer.....	13
Şekil 7: Sütun başındaki mesnetlenme sistemi.....	14
Şekil 8: Duvarların mesnetlenme şekilleri.	14
Şekil 9: Detaylı mikro modelleme.....	16
Şekil 10:Basitleştirilmiş mikro modelleme.	17
Şekil 11: Yığma birimlerin yapışkan ara yüzey davranışı. (Bolhassani vd. (2015), Abdulla vd. (2017), Salih (2018))	17
Şekil 12: Makro modelleme tekniği.	18
Şekil 13: Mohr Coulomb kırılma hipotezi ve üç eksenli gerilme hali. (Davisve Selvadurai,2002).....	22
Şekil 14: CDP model gerilme şekil değiştirme ilişkisi, (a) Çekme davranışı, (b) Basınç davranışı. (ABAQUS, 2010).....	23
Şekil 15: Tarihi Kemer Köprü.	27
Şekil 16: Bartın İli deprem tehlike haritası. (URL-9,2020).....	29
Şekil 17: Tarihi kemer köprü enine ve boyuna kesiti.....	29
Şekil 18: Tarihi kemer köprü ön ve yan görünüşü.	32
Şekil 19: Tarihi kemer köprüsü üç boyutlu katı modeli.	32
Şekil 20: Tarihi kemer köprüsü katı modeli.	33
Şekil 21: Tarihi kemer köprüsü sonlu eleman modeli.	33
Şekil 22: 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme-zaman grafikleri.....	34
Şekil 23: Kocaeli depremi Doğu-Batı ivme bileşeni.	34
Şekil 24: Teorik mod şekilleri (a) Ara yüzey etkileşimsiz (b) Ara yüzey etkileşimli.	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil	Sayfa
No	No
Şekil 25: Yer değiştirmenin zaman bağlı değişim grafikleri (a) doğrusal analiz (b) doğrusal olmayan analiz.	39
Şekil 26: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin zamana bağlı değişim grafikleri.	39
Şekil 27: Maksimum (çekme) asal gerilmelerinin köprü üzerinde dağılımı.	40
Şekil 28: Minimum (basınç) asal gerilmelerin dağılımı (a) Doğrusal analiz.	41
Şekil 29: Minimum çekme plastik uzamalarının zaman bağlı değişimi.	41
Şekil 30: Minimum çekme plastik uzamalarının köprü üzerinde dağılımı.	42
Şekil 31: Yığma birim ara yüzey davranışı.	43
Şekil 32: Deprem sonrası yan duvarların göçmesi. (Rota, 2004).	43
Şekil 33: 1999 Kocaeli depremi Doğu-Batı ivme kaydı.	44
Şekil 34: Maksimum yer değiştirme zaman grafiği.	45
Şekil 35: Farklı zaman adımlarında yan duvarlarda meydana gelen açılmalar.	46
Şekil 36: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	47
Şekil 37: Maksimum (çekme) plastik uzamalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	48
Şekil 38: Minimum (basınç) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	49
Şekil 39: Minimum (basınç) plastik kısaltmalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı.	49
Şekil 40: Maksimum yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi.	50
Şekil 41: Farklı zaman adımlarında yan duvarlar kemer birleşiminde meydana gelen.	51
Şekil 42: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	52
Şekil 43: Maksimum (çekme) plastik uzamalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	53
Şekil 44: Minimum (basınç) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.	54

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
Tablo 1:Bartın İlinde MeydanaGelen Depremler.	28
Tablo 2:Yığma ve arayüz birimlerinin mekanik özellikleri.	31
Tablo 3:Köprünün dinamik özellikleri arasındaki bağlantı. (Bayraktar vd., 2014)	36



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: kohezyon
d_t	: çekme hasar parametresi
E_m	: harcın elastisite modülü
E_u	: taş veya tuğlanın elastisite modülü
E_o	: hasarsız elastisite modülü
f_b	: taş veya tuğlanın basınç mukavemeti
f_m	: harcın basınç mukavemeti
G	: yığma birimin kayma modülü
K	: Basınç ve çekme meridyenleri arasındaki uzaklık
km	: kilometre
KPA	: kilopascal
m	: metre
m^2	: metrekare
m^3	: metreküp
MPA	: megapascal
t_m	: harcın ortalama kalınlığı
t_u	: taş veya tuğlanın ortalama yüksekliği
ϕ	: sürtünme
σ	: gerilmeler
σ_c	: nihai basınç gerilemesi
σ_t	: nihai çekme gerilemesini
ε_c	: toplam şekil değiştirme
ε_c^{in}	: elastik olmayan şekil değiştirme
ε_{oc}^{el}	: toplam şekil değiştirme

KISALTMALAR

CDP :ConcreteDamagePlasticity (Beton hasar plastisite)



BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Tarihi Kemer Köprüler

Tarihi yapılar geçmişle geleceğe bağlayan bir köprüdür. Geçmişte yaşayan toplumların sosyal, ekonomik, dini ve kültürel yapısı hakkında bilgileri günümüze kadar taşıyan eşsiz elçilerdir. Bu nedenle tarihi yapıları korunup gelecek nesillere aktarılması gerekmektedir.

Tarihi yapılar günümüze ulaşmaya kadar birçok deprem ve doğal afete maruz kalmışlar ve zarar görmüşlerdir. Tarihi yapıların zarar görmesindeki etkenler sadece doğal afetler değildir. Ayakta kaldığı süre boyunca taşıyıcı sistemini oluşturan malzemelerin zamanla dayanımını yitirmesi, zamana bağlı şekil değiştirmeler, yanlış kullanım, zemin oturmaları, savaşlar da tarihi yapıların zarar görmesinde büyük bir etkindir (Toker ve Ünay,2004).

Tarihi yapılar arasında, nehir ve vadileri geçebilmek amacı ile inşaa edilen, bulunduğu coğrafyanın ekonomisine büyük katkı sağlayan olan köprülerin ayrı bir önemi vardır. Mimari formu ve taşıyıcı sisteminde kullanılan malzemeler göz önüne alındığında tarihi taş kemer köprülerin inşaatı çok zor olmakla birlikte kalifiyeli işçilik gerektirir. Son yüzyılda gelişen teknoloji nedeniyle yığma köprüler yerini betonarme ve çelik köprülere bırakmıştır.

Yığma taş köprüler kemer formundaki yapısından dolayı basınç kuvvetleri etkisi altındadır. Kemer formunun yapı malzemeleri, yüksek basınç dayanımlarına sahip taş ve tuğladır. Buna rağmen köprülerde en çok zarar gören yer kemer formlarıdır. Buna rağmen yığma taş köprülerde hem işlevsel hem de dekoratif amaçlı birbirinden farklı kemer formları kullanılmıştır (Toker ve Ünal,2004).

Bulunduğu bölgenin turizm, ekonomisine katkı sağlayan tarihi kemer köprülerin korunması ve gelecek nesillere aktarılması için yapısal davranışlarının bilinmesi gerekir. Tarihi yapıların yapısal davranışının belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmasına rağmen, sonlu eleman yönteminin yapısal davranışlarının anlaşılmasında daha elverişli olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak birçok tarihi yapının yapısal davranışları incelenmiş olup restorasyon ve onarımı yapılmıştır.

Kemer köprülerde ana taşıyıcı sistemi kemerlerdir. Doğal afet ve diğer etmenlerin oluşturduğu yük etkilerinden dolayı düşey düzeleme dik doğrultuda önemli deformasyonlar ve iç kuvvetler oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak yığma kemer köprülerin çoğu hasar görmüşlerdir (Toker ve Ünal,2004).

Yığma yapıyı oluşturan taş, harç ve beton gibi malzemeler basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı düşük olan gevrek malzemelerdir. Gevrek malzeme olduklarından şekil değiştirmeleri yetenekleri çok azdır. Dış etkilerden dolayı meydana gelen çekme gerilmelerini karşılayamazlar. Bu yüzden taşıyıcı elemanlarda çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların yönleri ve şekilleri işçilik, malzeme ve duvar boşluklarına göre değişir. Bu çatlakların giderilmesi için çeşitli güçlendirme yöntemleri vardır (Ercan,2010).



BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Yığma Köprüler Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Tarihi kemer köprülerin yapısal davranışının belirlenmesi konusunda birçok araştırmacı çalışma yapmıştır.Yapılan çalışmalarda deneysel ve numerik yöntemler kullanılmıştır.Tarihi yığma köprüler üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Özkaya vd. (2015), tarihi Kireçli Köprü'nün davranışı statik ve dinamik analizler yaparak incelemiştir.Yapılan analizlerde en büyük yer değiştirme köprü'nün orta bölgesinde olmuştur.1992 Erzincan deprem kaydı esas alınarak dinamik analiz sonucu yer değiştirmenin modelde kemer bölgesinin en üst kısmında olduğu görülmüştür. Ayrıca köprü'nün üzerine düşey ve yatay statik itme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Dinamik analiz ile itme analizi benzerlik göstermiştir (Özkaya vd.,2015).

Maraş vd. (2016), çalışmalarında tarihi Kurt köprüsü'nün üç boyutlu modellemesi yapılarak dokümantasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında köprü'nün bir kısmı tahrip olmuştur.Tahrip olan kısımlarına ait bilgilerin fotogrametrik tekniklerle elde edilmesi ve model hazırlayarak köprü'nün çevresel etkilere karşı dayanımı ve davranışı incelenmiştir (Maraş vd.,2016).

Türker vd. (2015), çalışmalarında ölçekli yığmataş kemer köprü modelinin davranışını deneysel ve teorik yöntemler kullanarak incelemiştir. Çevresel etkilerin (taşıt, inşa vb.) yapıda oluşturduğu titreşimler yerinde yapılan ölçümler ile yapının deneysel dinamik karakteristikleri (frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmiştir. Köprü'nün sonlu eleman modeli oluşturularak SAP 2000 programında modal analiz yapılmış ve teorik mod şekilleri ve frekansları hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik frekanslar karşılaştırıldığında aralarında farklar olduğu görülmüş ve bu farkın malzeme özelliklerinden ve sınır kaynaklandığı ifade edilmiştir (Türker vd.,2015).

Onat ve Sayın (2015), çalışmalarında Tagar Köprüsü'nün dinamik davranışını incelemiştir. Bu kapsamda öncelikle yapının üç boyutlu sonlu elemanlar modelini ANSYS sonlu eleman programı kullanarak oluşturmuşlardır. Oluşturulan sonlu elemanlar modelini kullanarak

zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizler yapılmıştır. Deprem analizlerinde 1992 Erzincan depremi ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Köprünün sonlu eleman modelinin oluşturulmasında makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Dinamik analizler için genelleştirilmiş algoritması ve tahmin-düzeltilme yönteminin birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Köprü de hasarlar meydana gelmiştir ve yer değiştirme genliklerinde farklar meydana gelmiştir. Köprü de ilk çatlak köprü kemerinin temel ile birleşen sağ kısmında ve köprü kemerinin solunda bulunan yan duvarın temel ile birleştiği kısımda oluşmuştur. Başka çatlaklarda meydana gelmiştir. Ancak meydana gelen hasarlar köprü mevcut performansını tehlikeye sokacak büyüklükte olmadığı ifade edilmiştir (Onat ve Sayın, 2015).

Orhan ve Özyazıcıoğlu (2014) çalışmalarında tek açıklıklı kagir kemer köprülerin göçme yükünün, limit analizin alt sınır teoremine göre hesaplanması amacıyla bir algoritma geliştirilmiştir. Ülkemizde kullanılmaya devam edilen ve tarihi eser niteliğinde birçok kagir kemer köprünün mevcut olduğunu ve bu yapıların analizinde karşılaşılan bazı temel sorunların olduğu ifade edilmiştir. Bu sorunlar geometrik boyutlarla ilgili veri eksikliği, yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler, ayrıntılı laboratuvar analizlerinin yüksek maliyeti ve çağdaş yapı malzemesi yapısal analiz tasarım ve yüksek şartnamelerinin uygulanamamasıdır. Geliştirilen algoritma matlab ortamında kodlanmıştır. Program sonucu programla yapılan analizler gerçek değerlere kabul edilebilir yakınlıkta çıkmıştır (Orhan ve Özyazıcıoğlu, 2014).

Sayın vd. (2011), çalışmalarında tarihi yapıların depremlerden en az hasar görmeleri ve yapısal bütünlüklerini korumaları için sismik davranışların belirlenmesi gerektiğini incelemiştir. Köprüye etki eden yükler kendi ağırlığı, trafik yükü ve depreme bağlı oluşan dinamik etkilerdir. Bu çalışma da Uzunok köprüsünün 3 boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS paket programı kullanılarak, köprünün doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Analiz yapılırken 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizlerde ilk çatlak memba bölgesinde meydana gelmiştir. İlk çatlağın olduğu ayakta hasar genişleyerek yayılmıştır. Hasarlar köprünün stabilitesini bozacak büyüklükte olmamıştır. Sonuç olarak deprem titreşim hareketi hasar yayılımını önemli ölçüde etkilemiştir (Sayın vd., 2011).

Korkmaz vd., (2013), çalışmalarında Rize-Ardeşen de ki Timisvat tarihi köprüsünü incelemiştir. Tarihi köprü SAP 2000 programında solid eleman ile modellenmiş, model üzerin-

de dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizde 10 adet deprem ivme kaydı uygulanmıştır. Analiz de kullanılan depremler Anza, Cape Mendocino, Coyote Lake, LomaPrieta, LytleCreek, Northridge, Kobe, San Fernanda, WhiterNarrows, Victoria Mexica depremleridir. Analiz sonuçlarında farklı deprem ivme kayıtları ve deprem etkisindeki yükler altında kalan tarihi köprü 0.058-1.757 MPA arasında değişen basınç gerilmeleri etkisi altında kalmıştır ve en büyük gerilme köprüdeki büyük kemerde meydana gelmiştir (Korkmaz vd., 2013).

Güllü (2017) çalışmasında SAP 2000 programı kullanılarak tarihi Cendere Köprüsünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Analiz sonucunda yapı, kendi ağırlığından dolayı meydana gelen maksimum gerilmeleri güvenle taşıyabilmektedir. Ayrıca yük kemerin tabana yaklaştığı kenar kısımlarında yoğunlaşmış ve maksimum gerilmeler bu bölgede meydana gelmiştir.

Üç boyutlu taş kemer köprünün ayak oturmasının köprünün davranışına etkilerini incelemişlerdir (Reccia vd.,2014).

Kemerdeki zamanla meydana gelen kalınlık azalmasının kemerin sismik davranışına olan etkilerini sismik limit analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Sonuç olarak kemer kalınlığındaki azalmanın kemer kalınlığına oranı en fazla 0,3 olursa uygun olacağını belirlemişlerdir (Zampieri vd.,2016).

4 adet köprüyü statik yükleme altında analiz etmişlerdir ve analiz sonuçlarına göre maksimum yük değerleri benzer çıkmıştır (Costa vd.,2015).

Taş kemer köprülerin yapısal şekli hakkında araştırmalar yapıp köprüyü modelleyerek analizleri incelemişlerdir. Çalışma da amaç taş kemerin uygun boyutlar kullanılarak yük taşıma kapasitesini belirleyebilmektir (Solla vd.,2012).

Yığma köprülerin sonlu elemanlar yöntemiyle göçme yüklerini hesaplamışlardır. Kemer yüksekliğindeki azalmanın yük limitinin artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Drosopoulos vd.,2008).

Çalışma da taş kemer köprü'nün modal analiz yöntemi ile hasarları tespit edilerek frekans tepki fonksiyon grafiği elde edilmiştir. İlave yükler yapının parametresini önemli ölçüde değiştirmiştir (Armstrong vd.,1995).

Japonya da üç açıklıklı yığma köprü'nün sonlu elemanlar yöntemi kullanarak dinamik analizlerini incelemişlerdir. Ayrıca köprü üzerinde titreşim deneyleri uygulamışlardır. Elde edilen deneysel ve teorik dinamik özellikleri karşılaştırmışlardır (Aoki vd.,2004).

Beş açıklıklı yığma kemer köprü'nün sonlu elemanlar yöntemi ve Operasyonel Modal analiz yöntemi kullanılarak analizleri karşılaştırmışlardır (Beconcini vd.,2007).

Çalışma da tarihi taş kemer köprülerin hasarsız haldeki analizlerini hesaplamışlardır. Daha sonra hasara maruz bırakılarak tekrar hesaplamışlardır. Böylelikle tarihi yapıların hasarlı durumlarını görmüşlerdir (Ramos vd.,2009).

Tarihi köprü'nün genel durum değerlendirmesi için testler yapmışlar ve köprü'nün sonlu eleman modelini gerçekleştirmişlerdir (Castellazzi vd.,2012).

Üç farklı yük altında tarihi kemer köprü davranışlarını incelemişlerdir. Köprü davranışı deneysel değildir ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen köprü gerçek davranıştan farklı çıkmıştır (Oliveira vd.,2007).

Trabzon da bulunan Şinik köprüsünün dinamik özelliklerini Operasyonel Modal ve sonlu eleman yöntemleriyle incelemişlerdir. Model 1992 Erzincan depremi altında analiz edilmiştir (Bayraktar vd.,2007).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1 Tarihi Yığma Yapılar

Köprü yapıların taşıyıcı sisteminde kullanılan en eski yapı malzemeleri kereste ve taştır. Fakat kemerin kullanılmaya başlanmasıyla kereste malzemesi yerini taşa bırakmıştır. Malzemenin dayanıklılığı ve dış etkilere karşı direnci bir yapı inşası için çok önemlidir. Taş malzemesiyle yapılan köprüler yüzyıllar boyunca ayakta kalmıştır. Taş köprü gelişimini etkileyen en önemli faktör ise kemerlerdir. Kemer kullanımı sayesinde akarsular ve derin vadilerde büyük açıklıklar kolaylıkla geçilebilecek hale gelmiştir (Gürbüz,2012;Ceylan,2013).

Kemer formuna ilk örnek MÖ. 3000'li yıllar da Mezopotamya'da bulunan Sümerlerin yaptığı yer altı mezarlarıdır. Sümerlerin kemer formunu bulduğu doğrudur ama en etkileyici örnekleri Romalılar da görülmüştür (Toker ve Ünay,2014). Şekil (1-2) de gösterilmiştir.

Romalılar köprü, su kemeri ve yol yapımında kendilerini çok geliştirmişlerdir. Köprü yapımında iri köşeli taşlar kullanmışlardır. Şuan da Yunanistan da bulunan köprülerin birçoğu Romalılara aittir (Ceylan,2013).



Şekil 1:Roma dönemine ait Kutluca Köprüsü. (URL-1, 2019)



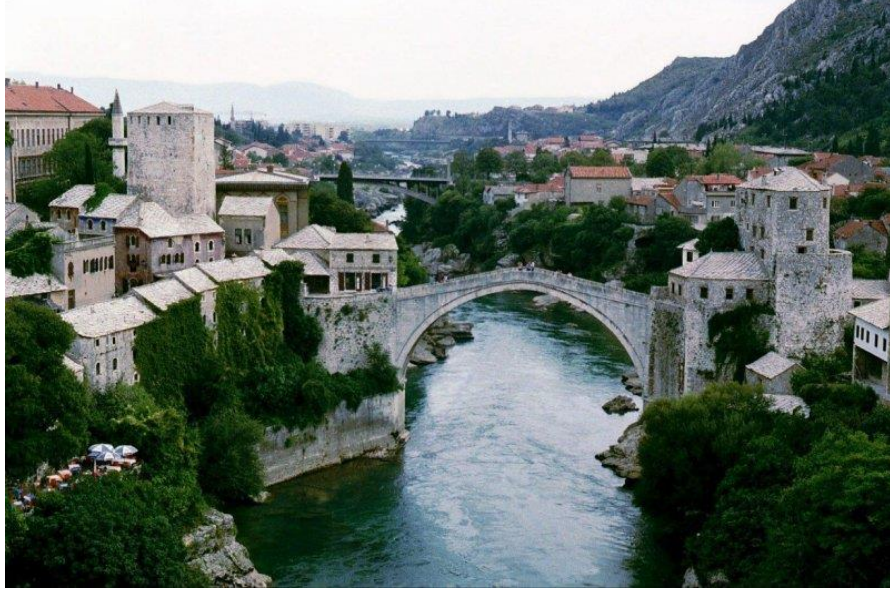
Şekil 2:Roma dönemine ait Cendere Köprüsü. (URL-2,2019)

Anadolu'nun Türk yurdu olması ile birlikte birçok köprüler inşa edilmiştir. Köprülerin inşaatı Beylikler döneminde M.S 1165 Artukoğulları zamanında başlamıştır. Selçuklu döneminde köprünün önemi vurgulanmış ve köprü inşası hız kazanmıştır(Gürbüz,2012). Selçuklular dönemine ait köprü örneği Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3:Selçuklu Dönemine ait Çeşnigir Köprüsü. (URL-3, 2019)

Osmanlı döneminde köprü yapımları devam etmiş ve köprü, kervansaray yapımı padişahın vazifeleri arasında görülmüştür. Bu dönemde yuvarlak kemerler yerine sivri kemerler kullanılmıştır. Şekil 4'de gösterilmiştir.Sivri kemerler köprüler daha narin ve güzel görünümlü olmuştur.



Şekil 4:Osmanlı dönemine ait Mostar Köprüsü. (URL-4,2019)

3.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Taş

Taşlar yığma yapılarda en çok kullanılan malzemedir.Bunun nedeni ise hemen hemen her yerde bulunmasıdır. Malzemenin dayanıklı olmasındandolayı yapıların inşasında özellikle tercih edilir. Yüzyıllar sonra bile yapısını korur. Taşlar basınca karşı dayanıklı çekmeye karşı zayıftırlar(Akdeniz,2011).Yapılarda kullanılan bazı doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

Granit malzemelerin basınç dayanımı 30-70MPa, kayma dayanımı 14-33MPa, çekme dayanımı 4-7MPa, elastisite modülü ise 30×10^3 - 55×10^3 MPa; mermer malzemelerin basınç dayanımı 25-65MPa, kayma dayanımı 9-45MPa, çekme dayanımı1-15MPa, elastisite modülü ise 25×10^3 - 70×10^3 MPa; kireç taşının, basınç dayanımı 18-35MPa, kayma dayanımı 6-20MPa, çekme dayanımı 2-6MPa, elastisite modülü ise 10×10^3 - 55×10^3 MPa; kuvars, basınç dayanımı 10-30MPa, kayma dayanımı 3-10MPa, çekme dayanımı 3-4MPa, elastisite modülü ise 15×10^3 - 55×10^3 MPa; kum taşı,basınç dayanımı 5-30MPa, kayma dayanımı 2-10MPa, çekme dayanımı2-4MPa, elastisite modülü ise 13×10^3 - 50×10^3 MPa; serpantin,basınç dayanımı 7-30MPa, kayma dayanımı 2-10MPa, çekme dayanımı 6-11MPa, elastisite modülü ise 23×10^3 - 45×10^3 MPa arasında değişen değerler almaktadır.

3.2.2 Tuğla

Tarihi yapılardakullanılan tuğlanın hammaddesidere kenarlarında,yüzeysel olarak biriken kum taşlarının kalıntılarından oluşmaktadır. Tuğlalar fırınlarda yüksek ısı altında pişirilir. Fırının olmadığı dönemlerde güneş ışınlarından yararlanılarak üretilirdi (Mahrebel,2006).

Tuğlayı oluşturan malzemenin kalitesi, tuğlanın nasıl örüldüğünü ve dayanımını belirler. Tuğlanın basınç dayanımı 10-30 MPa arasında çekme dayanımı 2.5-5MPa arasında kayma dayanımı ise 10-20MPa arasında değişir. Bu değerlerden tuğlanın basınç dayanımı çekme dayanımından %10, kayma dayanımından %30 fazla olduğu görülmektedir. Tuğlaların iyi fırınlanması önemlidir. Çünkü iyi fırınlanmış bir tuğlanın dayanımı kötü fırınlanmış bir tuğlaya göre üç kat daha fazladır (Ünay,2002).

3.2.3 Harç

Harç, kum gibi tutucu özelliği olan malzemelerin su ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. En eski bağlayıcı malzeme çamurdur. Çamur sert mevsim koşullarına dayanıklı değildir. Bu yüzden toprak, saman gibi bağlayıcı malzemelerin birleşmesiyle elde edilen kerpiç ve tuğla gibi yapı malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle yapı malzemelerini birleştirmek için harç kullanımına ihtiyaç duyulmuştur (Uray,2018).

Harcın katılaşp bağlayıcılık özelliği kazanması için hidrasyon olayının gerçekleşmesi gerekir. Harç yapısından suyun tamamen çıkmasını istemez. Su harcı tamamen terk ederse harç uçucu kül haline gelir (Akdeniz,2011). Tarihi yığma yapılarda harçlar kireç hacı ve horasan harcı diye sınıflandırılır.

3.2.3.1 Kireç Harcı

Çimentonun olmadığı dönemlerde kirecin tutucu özelliğinden yararlanılarak harç ve sıva elde edilmiştir. Harç yapımında kireç, tutucu madde olarak agrega ise tamamlayıcı malzeme olarak kullanılır. Bunlara ek olarak harca kimyasal katkı maddeleri de eklenmektedir (Böke vd.,2004).

3.2.3.2 Horosan Harcı

Horosan pişirildikten sonra öğütülmüş kildir.Horosan ve kireç kullanılarak oluşturulan harca ise horosan harcı denir. Tarihimiz de horosan harcına çok sık rastlanır. Araştırmalara

göre horosan harcının basınç dayanımının 6-8MPa arasındadır. Horosan harcı içerisinde kil, tuğla parçaları, mermer tozu, yumurta akı olduğu görülmüştür (Uray,2018).

Horosan çok sert bir malzemedir. Dayanımı kirecin kalitesine ve tuğla tozunun inceliğine bağlıdır. Tuğla tozu ne kadar ince ise horosan harcı o kadar dayanıklıdır. Bu dayanımı kısa sürede kazanabilmesi için ise katkı maddeleri kullanılmaktadır (Mahrebel,2006).

3.2.4 Su

Yığma yapılarda kireç harcı hazırlanmasında içilebilir su kullanılmalı ve yapısında sülfat veya sülfür klorür iyonları bulunmamalıdır (Bayraktar,2006).

3.2.5 Agregalar

Agregalar dolgu malzemesi olarak kullanılırlar. Harç hazırlanması sırasında kireçle reaksiyona giren agregalara puzolonik, girmeyenlere ise etkisiz agregalar denir. Kireçle reaksiyona giren agregalar doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolonlar volkanik oluşumlardır. Yapay puzolonlar pişirilmiş malzemedir (Böke vd.,2004; Bayraktar,2006).

3.2.6 Katkı Malzemeleri

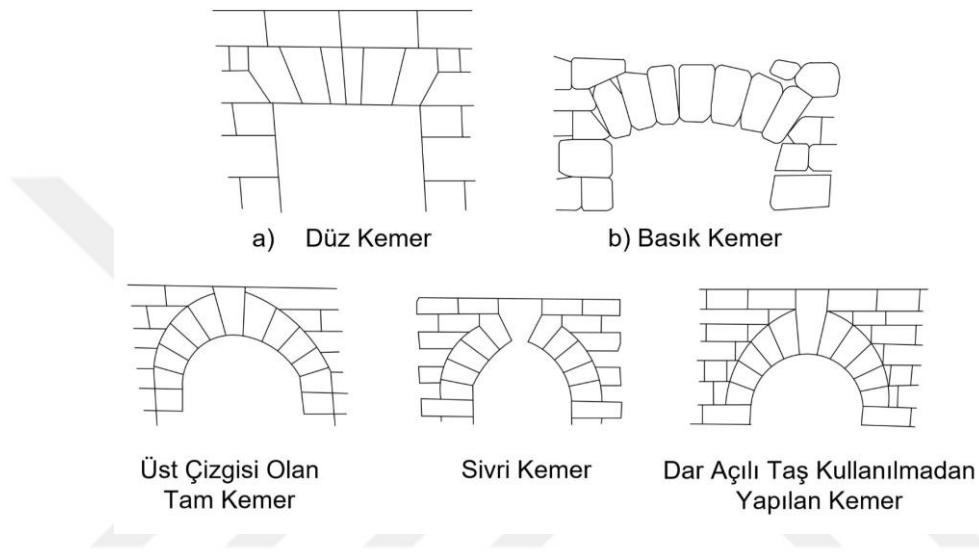
Katkı malzemeleri sertleşmeyi hızlandırmak, harçlara basınç ve çekme kuvveti kazandırmak ve su izolasyonunu sağlamak için kullanılmaktadır (Böke vd.,2004).

3.2.7 Ahşap

Ahşap kolay elde edilebilen ve rahatça taşınabilen bir malzemedir. Bu yüzden tarihi yapılarımızda ahşaba çok sık rastlarız. Ahşabın taş göre ömrü kısadır ama hafif olması ve çekme ve eğilmeye karşı dayanımının taş göre üstün olması büyük açıklıklarda ahşap kullanılmasını sağlamıştır. Ahşap tarihi yapılarda genellikle tavan, döşeme veya duvarlarda hatıl olarak tamamlayıcı görev yapmaktadır (Yılmaz,2006).

Ahşabın emniyet katsayısı 5-10 arasında alınarak ifade edilmektedir. Ahşap çeşidi olan çam sınıfının liflere paralel elastisite modülü 10MPa, liflere dik elastisite modülü 300 MPa meşe ve kayının liflere paralel elastisite modülü 12.5MPa, liflere dik elastisite modülü ise 600MPa'dır (Deren,1980).

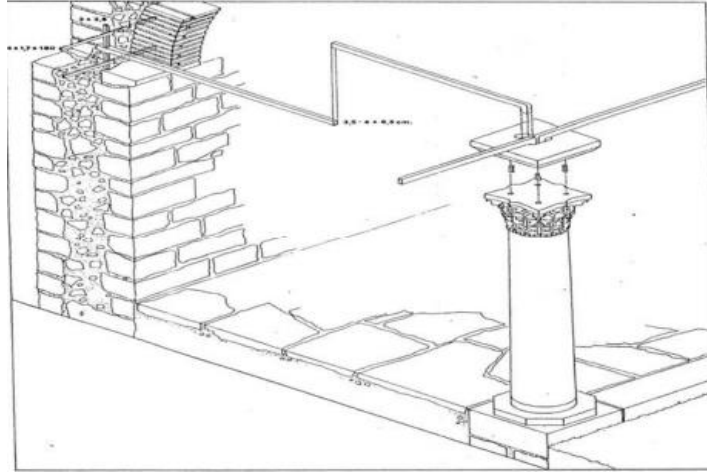
Kemerlerde oluşan çekme kuvveti taş ve tuğlanın çatlamasına neden olur. Çünkü kemerlerde düşey yükler yatay yüklerden büyüktür. Böylelikle kesit içerisindeki çekme kuvvetinin şiddeti azalır. Kemerlerin içinde oluşan kuvvetler kemerin geometrik şeklinden dolayı düzgün bir şekilde mesnetlere aktarılır. Eşit yayılı yükler altında kemerlerde eğilme momenti meydana gelmez. Bunun sebebi ise kemerin geometrik şekli ve yatay yer değiştirmesinin önlenmesidir. Şekil 6’ da kemer formları gösterilmiştir (Çamlıbel,2000).



Şekil 6: Kemer yapım şekilleri (a) düz kemer, (b) basık kemer, (c) üst çizgisi olan tam kemer, (d) sivri kemer, (e) dar açılı taş kullanılmadan yapılan kemer.

3.3.2 Sütun ve Ayaklar

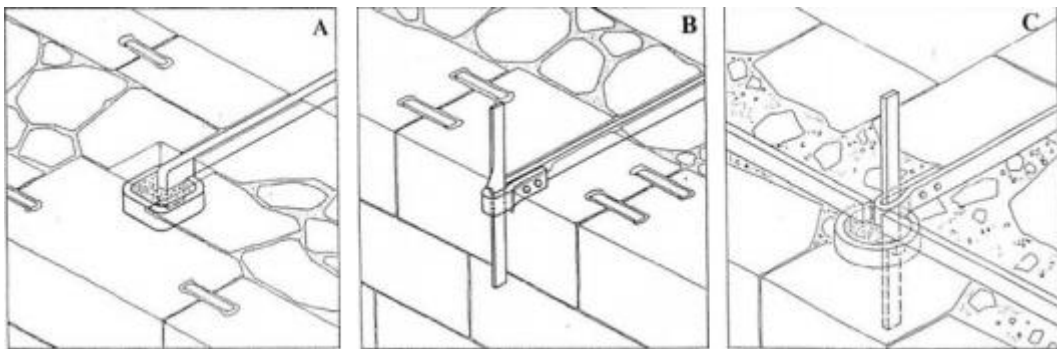
Sütunlar birkaç taş ile oluşturulmuş düşey elemanlardır. Birkaç taşla oluştuklarında ağaç veya bronz kenetler yardımıyla birleştirilir. Sütunların gelen yükü altındaki yapı elamanına yaymasını sağlamak için sütun tabanı yapılır. Sütunların taşıdığı kemer yükünü toplamak için ise sütun başlığı yapılır. Şekil 7’de sütun başındaki mesnetlenme sistemi gösterilmiştir (Çamlıbel,2000).



Şekil 7:Sütun başındaki mesnetlenme sistemi.

3.3.3 Yan Duvarlar

Duvarlara gelen dikey yükleri sağlam zemine aktaran yapı malzemelerinden oluşan taşıyıcı sistemdir(Bayülke,1978).Duvarların mevcut yapısını dikey yükler, deprem yükleri ve malzeme boyutları etkiler. Duvarlar bir bütün halinde çalışırlar. Böylelikle hem dikey hem yatay yükleri karşılayabilirler. Duvar rijitliğinin sağlanabilmesi için kemerdeki taşıyıcı elemanlar bağlanmıştır. Duvarların mesnetlenme biçimleri Şekil 8’de gösterilmiştir (Mahrabel,2006). Çekme ve basınç gerilmelerini karşılayabilecek şekilde duvarların boyutları yeterli derecede büyük seçilir (Çamlıbel, 2000).



Şekil 8:Duvarların mesnetlenme şekilleri.

3.3.4 Temel

Temeller, yapının zati yükünü ve yapıya etki eden dış yükleri sağlam zemine aktaran taşıyıcı sistemdir (Bayülke,1992).Temeller yapım şekline göre tekil ve sürekli temel olmak üzere 2ye ayrılır.

3.3.4.1 Sürekli Temel

Yapının toprak altında kalan kısmının kademeli olarak genişletilmesidir. Temelin kesit ve şekli tüm duvar boyunca korunur ve en alt katmandaki harcın içine enine ve boyuna kalaslar yerleştirilir (Akdeniz,2011).

3.3.4.2 Tekil Temel

Sütunlar ve kolonlar altına yapının toprakta kalan kısmının kare şeklinde genişletilmesidir (Akdeniz,2011).

3.3.5 Gergiler

Gergiler duvarlarda oluşan yatay etkilerin karşılanmasını sağlar. Tarihi yapılarda gergiler yoğun olarak kullanılmıştır. Gergiler iki düşey taşıyıcı elemanı birbirine bağlayarak açıklık gergisi olarak ya da bir duvarı kendisine dik konumdaki diğer bir duvara bağlamak için demir olarak kullanılır (Kara,2009).

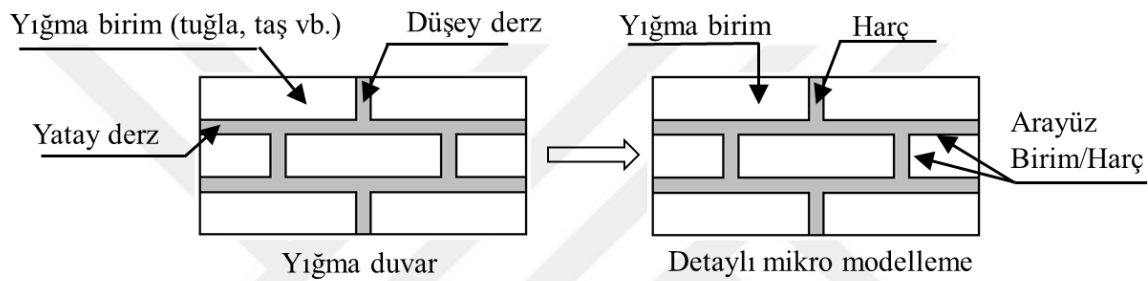
3.4 Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzeme Modelleme Yöntemleri

Yığma yapılar ülkemizde önemli bir yer tutmaktadır.Yapılarda kullanılan malzemeler kompozit olduğundan dolayı fiziksel ve kimyasal özellikler tam olarak bilinmemektedir.Yığma yapılarda sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemedeki kabuller, betonarme yapılardan farklıdır. Betonarme yapılarda malzeme heterojen olmasına rağmen bir yapısal eleman aynı çeşit sonlu elemanla geçebilir. Ancak yığma yapılarda farklı özelliklere sahip yapı malzemelerinin olması kabulü zorlaştırmıştır. Bu nedenle farklı yapı malzemelerinin ayrı ayrı değerlendirilerek modelleme yapılmaktadır(Akdeniz,2011).Yığma yapılarda yapılan analiz çalışmalarında, 3 farklı modelleme tekniği bulunmaktadır.

3.4.1 Detaylı Mikro Modelleme

En gelişmiş modelleme yöntemidir. Taş ve harç elemanları birbirinden bağımsız olarak modellenmektedir. Bu modelleme de yapı taşlarının elastisitemodülü, poisson oranı ve elastik olmayan özellikleri göz önüne alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasında meydana geleceği varsayılmaktadır (Bayraktar vd.,2007).

Detaylı mikro modellemede taşıyıcı malzeme ve bağlayıcı malzemelerin beraber ve farklı davranışları gözlemlenir. Küçük boyutlu elemanların tasarlanmasından doğru sonucu veren modelleme tekniğidir. Şekil 9’da detaylı mikro modelleme gösterilmiştir(Tetik,2015)

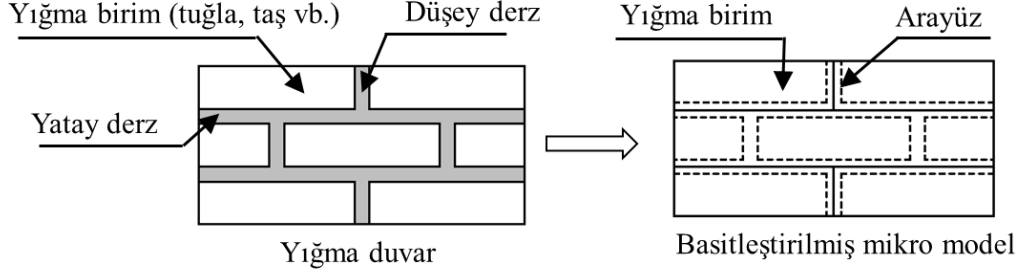


Şekil 9:Detaylı mikro modelleme.

3.4.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Basitleştirilmiş mikro modellemede taşıyıcı malzemelerin boyutları,bağlayıcı malzeme tabakasının iki katı arttırılarakbağlayıcı tabaka iptal edilir. Taşıyıcı malzemeler birbirinden ara yüzey çizgileri ile ayrılmaktadır (Lourenço (1996), Akdeniz (2011)).

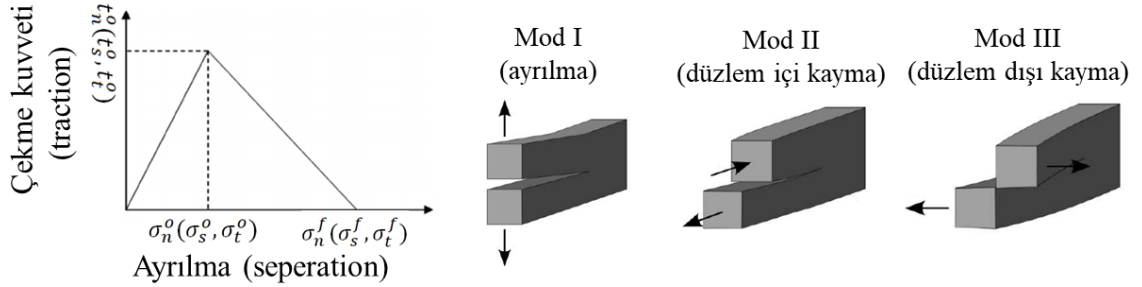
Bu modellemede olası göçme mekanizmaların tümü dikkate alınmadığı için büyük sorunlara yol açabilir. Bundan dolayı, yığma duvarlarda oluşabilecek kayma ve çekmedeformasyonlarının ara yüzeylerde oluşacağı, taşıyıcı duvarlarda meydana gelebilecek deformasyonların ise taşıyıcı malzemeninağırlık merkezinde dikey bir şekilde geleceği kabul edilir. Basitleştirilmiş mikro modelleme örneği Şekil 10’da gösterilmiştir (Lourenço (1996); Jafarovvd.,(2012).



Şekil 10: Basitleştirilmiş mikro modelleme.

3.4.2.1 Yapışkan Ara Yüzey Tanımlama (Cohesive interface)

Tarihi yapılarda farklı malzemeler farklı örme teknikleri ile bir araya getirilmektedir. Bu nedenle yapıların doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde mikro modelleme yaklaşımının uygulanması çok zordur. Bu tür yapıların modellenmesinde basitleştirilmiş makro modelleme tekniği kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş makro modelleme tekniğinde harç kalınlığı sıfır olarak kabul edilir ve yığma birim (taş/tuğla) boyutları harç kalınlığı kadar artırılır. Bu yaklaşımda duvar üniteleri arasında, harç tanımlanmasa bile üniteler arasındaki ara yüzeyin temsili bir rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Bu ara düzlem yüzey gerilmelerine bağlı olarak yığma birimler arasında ayrılma ve kaymanın meydana geleceği bir düzlemdir. Yığma birimler normal ve kayma gerilmeleri altındaki davranışı Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11: Yığma birimlerin yapışkan ara yüzey davranışı. (Bolhassani vd. (2015), Abdulla vd. (2017), Salih (2018))

Basitleştirilmiş makro modelleme yaklaşımında yığma birimler arasındaki ara yüzeye ait rijitlik sabitleri harç ve duvar birimlerinin (taş/tuğla) malzeme özellikleri ve kalınlıkları göz önüne alınarak eşitlik 1-2 yardımı ile hesaplanmaktadır (Lourenço ve Rots (1997) Fanning, ve Boothby (2001), Macorini ve Izzuddin (2011), Zhang (2015).

$$k_n = \frac{E_u E_m}{t_m (E_u - E_m)^2} (1)$$

$$k_s = \frac{G_u G_m}{t_m (G_u - G_m)^2} (2)$$

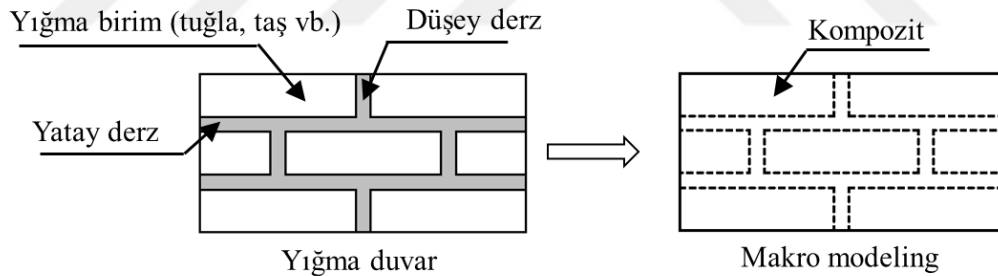
E_u ; taş/tuğla elastisite modülünü, E_m ; harç elastisite modülünü, G , yığma birimin kayma modülünü, t_m ; ise ara yüzeyin (harç) kalınlığını ifade etmektedir.

3.4.3 Makro Modelleme

Makro modelleme tekniğinde, yapıda hiç çatlak ve süreksizlik olmadığı ve bir bütün olarak çalıştığı varsayılıyor. Doğrusal elastik modelleme tekniğine dayanan makro modelleme tekniği, çekme kuvvetlerinin oluşturduğu bölgede hiç çatlak meydana gelmediğini ve çekme gerilmelerine maruz kalmadığını kabul eder (Zucchini vd., 2006).

Bu teknik te yığma duvarlar kompozit malzeme olarak kabul edilir. Buna dayanarak yığma birim ve harç çeşitli homojenleştirme işlemine tabii tutulur ve işlemin sonucuna göre modelin mekanik özellikleri belirlenir (Lourenço (1996); Akdeniz,(2011)).

Makro modelleme tekniğinde yığma birim ve harç arasındaki ilişki ihmal edilir. Makro modelleme tekniğini Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12: Makro modelleme tekniği.

3.4.4 Makro Modellemede Kullanılan Malzeme Parametrelerinin Hesabı

Yığma yapılarda sistemin büyüklüğüne göre, Lourenço (1996) tarafında önerilen üç farklı modelleme stratejisi kullanılmaktadır. Bu stratejiler, detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak sınıflandırılmaktadır. Küçük yığma sistemlerde mikro modelleme kullanılırken, camii, köprü, kule, minare vb. büyük yığma yapılarda makro modelleme tekniğinin kullanılması önerilmektedir. Yığma yapıyı oluşturan taş/tuğla ve harç, homojenleştirme yaklaşımı (makro model) ile bir bütün olarak modellenmektedir. Bu nedenle yığma sistemin elastik parametreleri ve yığmayı oluşturan taş/tuğla ve harcın mekanik özellikleri literatürde kabul görmüş çeşitli denklemler

kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yığma duvar sistemlerin basınç dayanımı Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanabilmektedir Eurocode 6 (1996).

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3)$$

Burada K, yığma sistemin morfolojik yapısına göre 0.4 ile 0.6 arasında 0.05'lik farklarla değişen değerler alır. α ve β , düzgün şekilli yığmalarda sırasıyla 0.7 ve 0.3, kaba örülmüş yığmalarda ise 0.65 ve 0.25 değerleri önerilmiştir. f_b (MPa), taş veya tuğlanın basınç mukavemetini, f_m (MPa), harcın basınç mukavemetini ifade eder. f_m için alınabilecek en büyük değer f_b iki katıdır Eurocode 6 (1996).

Çok ince derz harcına sahip (0,5 mm ile 3 mm arasında) yığma sistemlerde basınç dayanımı aşağıdaki Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \quad (4)$$

Koçak (1999), tarafından yapılan çalışmada, yığma sistemin çekme dayanımının hesaplanmasında, basınç dayanımının %10'nun alınabileceğini önermiştir.(Koçak (1999).

Yığma sistemlerin elastisitemodülü için Eurocode 6 (1996) ve Lourenço (2001)Eşitlik5'te verilen ifadeyi önermektedir (Eurocode 6 (1996), Lourenço (2001)).

$$E = \frac{\frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}}}{\rho} \quad (5)$$

Yukarda verilen eşitlikte, ρ sabit bir değerdir ve harç ile taş/tuğla arasındaki aderansa göre değişmektedir. t_m harcın ortalama kalınlığını, t_u taş veya tuğlanın ortalama yüksekliğini, E_m harcın elastisite modülünü, E_u taş veya tuğlanın elastisite modülünü ifade eder (Lourenço (2001)).

Eurocode 6 (1996),elastisite modülü için Eşitlik 6'yı önermektedir Eurocode 6 (1996).

$$E = 1000 \cdot f_k \quad (6)$$

Eurocode 6 (1996), G, kayma modülü için ise elastisite modülü değerinin % 40'nın alınabi-

leceğini önermiştir. Eurocode 6 (1996),

Yığma yapılar için hesaplarda kullanılacak Poisson oranı, Koçak (1999) tarafından 0,17 olarak önerilmiştir(Koçak, 1999).

3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Son yıllarda bilgisayar teknolojindeki hızlı gelişmeye bağlı olarak sayısal hesaplama amaçlı kullanılan yazılımlarda hızlı bir gelişim göstermiştir. Sayısal hesaplama yazılımları temel olarak sonlu elemanlar yöntemini üzerine kurulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde inşaat, makine, uçak, nükleer ve bilgisayar gibi aklımıza gelen her tür mühendislik alanlarında karmaşık fizik ve mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mühendislikte karşılaştığımız problemlerin çözümünde analitik yöntemleri kullanmamız gerekmektedir. Ancak mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemlerde düzgün olmayan geometrik şekillerden, farklı sınır şartlarından, üniform olmayan yüklemelerden ve doğrusal olmayan malzeme davranışından dolayı çözümlerin yapılması zor veya imkânsız hale gelmektedir. Günümüzde bu tür problemlerin çözümü sayısal yöntemler kullanılarak kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu yöntemlerde bilinmeyenler (yer değiştirme, gerilme vb.) hesaplarken karmaşık geometriyi ele almak yerine içindeki sonlu küçük bir alana ait noktalarda ki yaklaşık değerlerin hesaplanması üzerine kurulmaktadır. Sonlu küçük alanlar için yapılan basit yaklaşım ve çözümler bir araya getirilerek karmaşık geometriye ait çözümler elde edilmektedir. Yapıyı ne kadar çok küçük sonlu elemana bölünürse daha doğru çözümler elde edilebilir. Daha çok sonlu elemanın bulunduğu bir yapı sisteminin çözümü yüksek donanıma bilgisayarlar ve yazılımlar ile gerçekleştirilmektedir.

Çevremizde gördüğümüz her olay ve problem fizik ve matematik kurallarıyla ifade edilebilmektedir. Karmaşık problemlerin anlaşılır ve çözülür hale getirilebilmesi için cebirsel, diferansiyel ve integral denklemlerden yararlanılır. Sonlu Elemanlar yöntemi karmaşık problemleri, daha basit, anlaşılır ve çözülebilir alt problemlere dönüştüren bir yöntemdir. Karmaşık yapısal bir sistemin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümünde kullanılan işlem basamakları, yapı sisteminin sonlu sayıda küçük ayrılması, sonlu parçalara ait şekil fonksiyonları ve eleman matrislerinin belirlenmesi, eleman matrislerinin birleştirilerek sistem matrisinin elde edilmesi, sisteme ait sisteme sınır şartlarının belirlenmesi ve sistem denge denklemlerinin hazırlanması, çözülmesi istenilen gerilme, yer değiştirme vb. değerlerin hesaplanması şeklinde sıralanmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde kurulan modelin doğru sonuçlar vermesi, belirlenen sonlu eleman sayısına, eleman tipine, malzeme özelliklerinin tanımlanmasına ve elemanın sınır koşullarına bağlıdır. Günümüzde hemen hemen bütün mühendislik dallarına hitap eden sonlu eleman yazılım programları bulunmaktadır. Özellikle inşaat mühendisliğinde Fluent, Ls-Dyna, Linflow, CivilFEM, Ansys, Abaqus yazılımları kullanılmaktadır.

3.6. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analiz

Doğrusal analiz yönteminde dış yük etkisiyle malzemede meydana gelen gerilmelerin akma gerilmesine ulaşana kadar doğrusal bir davranış sergilediği, gerilme ve şekil değişiminin ilişkisinin doğrusal olduğu kabul edilmektedir. Bu tür malzeme kabulünde hesaplar doğrusal elastisite teorisine göre yapılmaktadır. Dolayısı ile gerilme şekil değiştirme eğrisinde akma gerilmesi üzerindeki gerilmeler göz önüne alınmaz. Ancak malzemenin gerçek davranışı dikkate alındığında gerçekte gerilme dağılımının düzgün olmadığı, akma gerilmesinin aşıldığı bölgelerde kalıcı şekil değişiminin meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle doğrusal davranışın malzeme davranışını dolayısı ile yapısal davranış tam olarak yansıtmadığı söylenebilir.

Doğrusal olmayan analiz yöntemlerinde gerilme şekil değiştirme eğrisinin malzemenin akmadan sonraki pekleşme bölgesini dikkate almaktadır. Pekleşme bölgesinin dikkate alınması malzemede meydana gelen ve üniform olmayan gerilmelerin daha gerçekçi hesaplanmasına imkân tanımaktadır. Günümüzde malzemelerin doğrusal olmayan davranışını temsil eden birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Genellikle betonun davranışını plastik ve visko-plastik teoriler kullanarak tanımlamaktadır (Malkin vd., 2006).

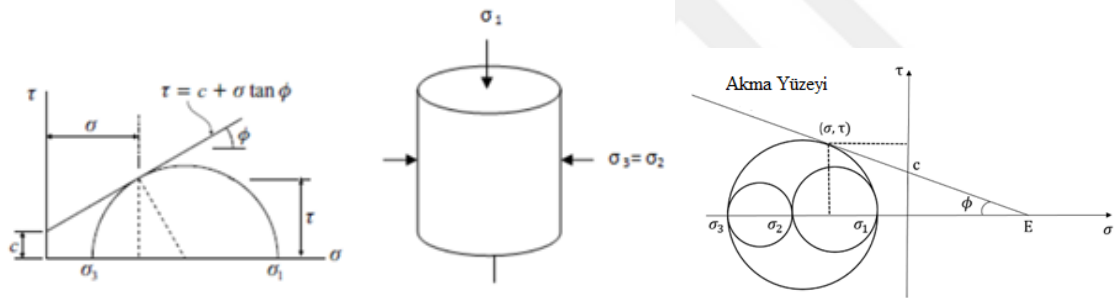
Yığma yapıları oluşturan taş/tuğla malzemeler beton malzeme gibi çekme dayanımı düşük, basınç dayanımı yüksek ve gevrek bir malzemedir. Bu nedenle beton için geliştirilen doğrusal olmayan malzeme modelleme yöntemleri yığma birimler içinde kullanılmaktadır. Literatürde malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için sıklıkla Drucker-Prager, Mohr-Coulomb Plasticity, Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında köprüyü oluşturan kemerler ve yan duvarların doğrusal olmayan davranışı için CDP model yaklaşımı, dolgu birimi için ise Mohr-Coulomb malzeme modelleme yaklaşımı kullanılmıştır.

3.6.1 MohrCoulombAkma Kriteri

Bu kritere göre malzeme meydana gelen maksimum kayma gerilmelerinin sınır kayma gerilmelerini aştığı düzlem boyunca göçmenin gerçekleşeceği kabul edilmektedir. Sınır kayma gerilmelerinin değeri Maksimum kayma gerilmesi ile malzemeler arasındaki içsel sürtünme (ϕ), yapışma direnci (kohezyon, c), ve kayma düzlemine dik etkiyen normal gerilmeler (σ) kullanılarak Eşitlik 7 bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır (URL-5,2019).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (7)$$

Eşitlik 7’de verilen c ve ϕ parametreleri beton veya yığma birimlere uygulanan üç eksenli basınç deneyinden elde edilmektedir. Mohr-Coulombkriterinde akma yüzeyi asal gerilmelere bağlı olarak elde edilir. Çizilen dairelerden herhangi biri akma çizgisine teğet olduğu durumda malzemede akmanın başladığı kabul edilir. Şekil 13’de kayma gerilmesi ve kayma düzlemine dik etkiyen normal gerilme arasındaki ilişki ve akma düzlemi gösterilmiştir.



Şekil13: Mohr Coulomb kırılma hipotezi ve üç eksenli gerilme hali. (Davisve Selvadurai,2002)

Şekil 13’de verilen akma düzleminin mohr dairesine teğet olduğu noktadaki akmaya sebep olan normal ve kayma gerilmeleri asal gerilmeler kullanılarak Eşitlik 8 ve 9 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos \phi \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin \phi \quad (9)$$

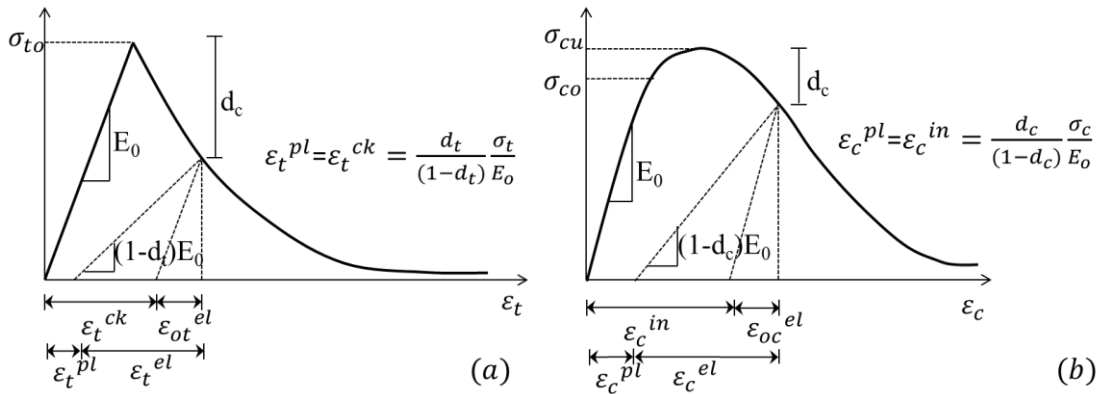
Mohr-Coulombkriterine ait genel akma fonksiyonu Eşitlik 8 ve Eşitlik9 kullanılarak elde edilir (Eşitlik 10) (URL-6,2019).

$$f(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi - 2 \cos \phi \quad (10)$$

3.6.2 Beton Hasar Plastisite Malzeme Modeli

Beton hasar plastisite (Concrete Damage Plasticity), beton ve yığma birimler gibi gevrek malzemelerin basınç ve çekme altındaki elastik olmayan davranışını modellemede kullanılan malzeme modelleme yöntemidir. Bu modelleme yaklaşımında betonun basınç altında ezilmesini, çekme altında ise çatlamasını temel alan iki göçme mekanizması bulunmaktadır. Kısaca CDP model çekme ve basınç etkileri altında malzemede meydana gelen birim şekil değiştirmelerin doğrusal davranış sınırını aştığında plastik şekil değiştirmelerin başladığını kabul etmektedir (ABAQUS, 2010).

Beton hasar plastisite malzeme modelleme yaklaşımı malzemenin doğrusal olmayan davranışını, basınç ve çekme altındaki gerilme şekil değiştirme eğrilerinde faydalanarak tanımlamaktadır. Malzemenin basınç ve çekme altındaki davranışını temsil etmek üzere tek eksenli basınç ve çekme deneylerinden elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılmaktadır. CDP modelde kullanılan gerilme şekil değiştirme eğrileri Şekil 14’de sunulmuştur.



Şekil 14:CDP model gerilme şekil değiştirme ilişkisi, (a) Çekme davranışı, (b) Basınç davranışı. (ABAQUS, 2010).

CDP modelleme yaklaşımında basınç ve çekme altında malzemenin maksimum gerilmeye kadar doğrusal davrandığı kabul edilmektedir. Maksimum basınç ve çekme gerilmesinin aşılması durumunda malzemede ezilmeler ve çatlamlar olacağı, kabul edilmektedir.

Malzemede maksimum basınç gerilme değeri aştıktan sonra gerilme-şekil değiştirme eğrisi kalıcı şekil değiştirmeler esas alınarak belirlenebilmektedir. Elastik ve kalıcı şekil değiştirmeler Eşitlik 11 ve 12 kullanılarak hesaplanmaktadır (ABAQUS, 2010).

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_o} \quad (12)$$

Eşitlik 11 ve 12’ de verilen ε_c^{in} elastik olmayan şekil değiştirme, ε_c toplan şekil değiştirme, ε_{oc}^{el} elastik şekil değiştirme, σ_c nihai basınç gerilemesi, E_o hasarsız elastisite modülünü ifade etmektedir.

ABAQUS plastik şekil değiştirme (ε_c^{pl}) değerlerini elastik şekil değiştirme ve basınç hasar parametresini kullanarak Eşitlik 13 yardımıyla hesaplamaktadır (ABAQUS, 2010).

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \left[\frac{d_c}{1-d_c} \right] \left[\frac{\sigma_c}{E_o} \right] \quad (13)$$

Malzemede maksimum çekme gerilme değeri aştıktan sonra gerilme-şekil değiştirme eğrisi kalıcı şekil değiştirmeler esas alınarak belirlenebilmektedir. Elastik ve kalıcı şekil değiştirmeler Eşitlik 14 ve 15 kullanılarak hesaplanmaktadır (ABAQUS, 2010).

$$\varepsilon_f^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ot}^{el} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ot}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_o} \quad (15)$$

Eşitlik 14 ve 15’ de verilen ε_t^{ck} elastik olmayan şekil değiştirme, ε_t toplan şekil değiştirme, ε_{ot}^{el} elastik şekil değiştirme, σ_t nihai çekme gerilemesini ifade etmektedir.

ABAQUS plastik şekil değiştirme (ε_t^{pl}) değerlerini elastik şekil değiştirme ve çekme hasar parametresini (d_t) kullanarak Eşitlik 16 yardımıyla hesaplamaktadır (ABAQUS, 2010).

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \left[\frac{d_t}{1-d_t} \right] \left[\frac{\sigma_t}{E_o} \right] \quad (16)$$

Beton hasar plastisite modelinde, malzemenin plastik davranışının doğru olarak tanımlanabilmesi için gerilme şekil değiştirme ilişkisi dışında dört temel parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Akma esnasında, plastik hacim değişikliğini kontrol eden ve bu değeri sabitleyen

genişleme katsayısı (Dilationangle, ψ), malzemenin maksimum çekme dayanımının basınç dayanıma oranı olan dış merkezlik (eksantirite, ε), Basınç ve çekme meridyenleri arasındaki uzaklık (K) ve iki eksenli basınç/çekme dayanımları arasındaki oranın (σ_{co}/σ_{bo}) tanımlanması gerekmektedir (ABAQUS, 2010).



BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Bartın ili Kemer Mahallesiinde bulunan iki açıklıklı tarihi yığma taş Kemer köprüünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle köprüünün tarihi geçmişi ve taşıyıcı sistemini oluşturan malzemelerin özellikleri hakkında literatür araştırması yapılmıştır. Yerinde ölçümler yapılarak yapının üç boyutlu katı modeli AutoCAD 2017 programında oluşturulmuştur. Yapının sonlu eleman modeli vesismik analizleri Abaqus V10 (2010) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda analiz sonuçları karşılaştırılarak köprüünün yapısal davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

4.1 Tarihi Kemer Köprü

Bartın merkezinde bulunan tarihi kemer köprü Kozcağz ırmağı üzerinde bulunmaktadır. Osmanlı dönemine ait olan köprü 1787 tarihindeÇalıkoglu İbrahim Ağa tarafından yaptırılmıştır.Kemer köprü açıklıkları 12.5m, yüksekliği 6.8m olan iki adet kemer, yan duvarlar ve dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Trafik ve yayaların kullanım alanları ile birlikte köprüünün genişliği 8.5m ve toplam yüksekli 7.8m'dir. Toplam uzunluğu 42m olmasına rağmen ırmak üzerindeki uzunluğu 30m'dir. Kemer köprüye ait resimler ve boyutları Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 15:Tarihi Kemer Köprü.

4.2.1 Köprünün Coğrafi konumu

Kemer köprü Bartın'ın Merkez ilçesinde Kemer köprü mahallesinde bulunur. Konum olarak şehir merkezinin içindedir. Köprünün altından Bartın ırmağı akmaktadır. Bartın ırmağı Bartın'ın en önemli akarsuyudur. Bartın ırmağının iki ana kolunu Kocaçay ve Kocanazçayı oluşturur. Bu iki ana kol Bartın Merkezinde bulunan Gazhane Burnu'nda birleşerek Boğaz mevkinde Karadeniz'e ulaşır.Bartın Irmağı; üzerinde 500 tonluk gemilerle Karadeniz'den kente kadar ulaşımisağlayan düzenli akarsudur (URL-7, 2019).

Bartın da yazlar sıcak, kışlar ise serindir. Karadeniz iklimi görülür. Denize yakın olduğundan dolayı nem fazladır. Buna bağlı olarak sıcaklık farkı da fazladır. Akarsuların debisi, yerde bulunan karların erimesinden dolayı ilkbaharda artar. Debinin artması sel'in oluşmasına neden olur. Bartın'da en çok görülen doğal afet seldir (URL-7, 2019).

4.2.2 Köprünün Tarihi Geçmişi

Bartın da yapılan ilk taş köprü Kemer Köprüdür. Bu köprü Kocanaz ırmağı üzerinde, kesme taş ve harçla yapılan çok sağlam üçayak ve iki sivri kemer üzerine kurulmuştur. 1.Abdülhamit zamanında Bartın Voyvadalık idaresinde iken Çalıköğlü İbrahim Paşa tarafından 1787 yılında yaptırılmıştır. Bulunduğu mahalle köprü yapılmadan önce Ada Mescit Mahallesidir. Köprü yapıldıktan sonra mahalleye köprünün adı olan Kemer Köprü ismini vermişlerdir. Köprünün iki tane mermerden yapılmış kitabesi vardır. Bu iki kitabe üzerinde yazılanlar aynı olmakla birlikte boyutları farklıdır. Rivayetlere göre köprü yapılırken kullanılan harcın yumurta akından yapıldığı söyleniyor.Bartın da 1998 yılında büyük bir sel felaketi yaşanmıştır. Bu felaketin sonucunda bu köprü taşları numaralandırılarak başka bir yere taşınması istenmiştir. Bartın Belediyesi böyle bir olayın yaşanmasına engel olmuştur (URL-8, 2019)

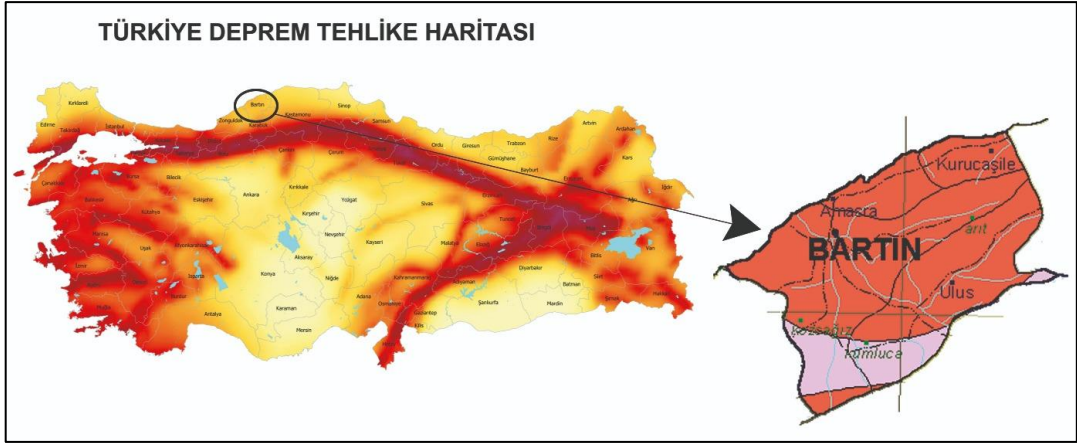
4.2.3 Bartın İlinde Meydana Gelen Depremlerin Tarihsel İncelemesi

Bartın ilinde farklı zamanlar da değişik şiddetler de birçok deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerden bazıları hasar vermiştir bazıları ise fark edilmemiştir. Bartın da son 10yılıda olan depremler Tablo 1’ de gösterilmiştir.

Tablo 1:Bartın İlinde Meydana Gelen Depremler.

Tarih	Derinlik (km)	Şiddeti	Yer
29.11.2019	9.7	2.3	Akkonak-Amasra
17.01.2018	2.1	2.9	Amasra -Tarlaağzı
05.02.2017	11.2	2.5	Şahin Köyü
26.06.2016	21.85	3.5	Güzelcehisar Köyü
28.01.2015	8.5	3.6	Eyüpoğlu Köyü
04.09.2014	4.5	4.1	Merkez
26.07.2013	3.8	3.4	Amasra-Kocaköy
10.09.2011	6.8	3.3	Serdar Köyü
11.03.2010	5.0	3.4	Amasra

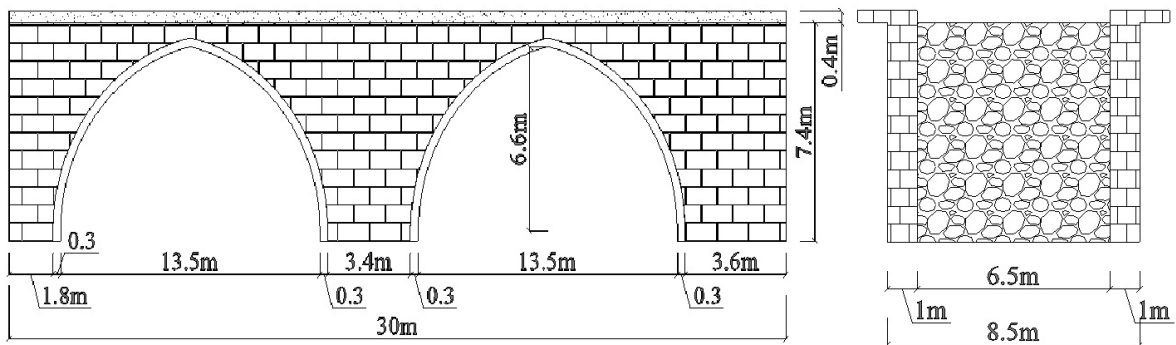
Bartın ili en fazla 1968 yılındaki depremden etkilenmiş ve il çok zarar görmüştür. Deprem 3 Eylül 1968 yılında saat 10.20’de meydana gelmiştir. 2478 bina hasar görmüştür. 20 kişi hayatını kaybetmiştir. Deprem olduktan sonra artçı depremler 1 ay boyunca devam etmiştir. Bartın ili deprem tehlike haritası şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16:Bartın İli deprem tehlike haritası.(URL-9,2020)

4.2.4 Köprünün Mimari ve Yapısal Özellikleri

Kemer Köprü'nün toplam uzunluğu 42 m dir. 12 metresi nehrin dışında kalmaktadır. Nehrin üstünde olan kısım ise 30m dir. Köprü de iki tane kemer bulunmaktadır. Kemerlerin açıklıkları 13.5m yükseklikleri ise 6.6m dir. Köprü'nün sağ tarafındaki ayak genişliği 3.6m ve sol tarafındaki ayak genişliği ise 1.8m dir. Köprü'deki iki kemeri ayıran ortadaki ayağın genişliği 3.4m ve suyun akış yönündeki kısmında, gelen suyun şiddetini azaltmak amaçlı suyu iki tarafa bölen üçgen şeklinde yaklaşık 2.5m uzunluğunda 70cm yüksekliğinde örme duvar bulunmaktadır. Köprü'nün genişliği 8.5m toplam yüksekliği ise 7.8m dir. Köprü'nün ayakları sağlam zeminin üzerine yapılmıştır. Köprü'nün taşıyıcı sistemlerinde ise kesme taş ve horosan harcı kullanılmıştır. Köprü'nün enine ve boyuna kesiti ve boyutları Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17:Tarihi kemer köprü enine ve boyuna kesiti.

4.2.5. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yığma yapıların yük taşıma kapasitesini ve yapısal davranışının etkileyen en önemli parametre taşıyıcı sistemini oluşturan (taş/tuğla ve harç) malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleridir. Bu nedenle yapının taşıyıcı sistemini oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin yerinde yapılan ölçümler ve yapıdan alınan numuneler üzerinde laboratuvar ortamında deneyler yapılarak belirlenmesi önerilmektedir. Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin basınç dayanımı, kayma gerilmesi, elastisitemodülü, yoğunluğu ve poisson oranının belirlenmesi amacı ile tek eksenli basınç deneyi, yarmada çekme deneyi, schimit çekici ve ultrases deneyleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Taş/tuğla ve harç elemanlar üzerinde hasarlı ve hasarsız deneyler yapılarak elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilerek malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmektedir. Ancak kemer köprü gibi tarihi önemi olan yapılarda hasarlı deney yöntemlerinin kullanılması yapının tarihi dokusuna zarar vereceğinden dolayı numune alırken dikkatli olunmalıdır.

Tarihi yapılarda yapısal davranışı etkileyen en önemli parametre taşıyıcı sistemi oluşturan taş/tuğla ve harç malzemelerin mekanik özellikleridir. Fakat tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri bulunduğu bölgenin malzeme özelliklerinden dolayı farklılık göstermektedir. Ayrıca yapının tarihi dokusuna zarar vermemek amacı ile hasarlı malzeme deneylerine izin verilmemektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan malzeme özellikleri literatürde yapılmış aynı malzeme özelliklerine sahip tarihi taş kemer köprülerde kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir(Monaco vd., 2001; Sevim vd., 2011; Pela vd., 2013; Aydın vd., 2017; Özmen vd.,2018).Köprünün zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizlerinde Tablo 2’de sunulan malzeme özellikleri kullanılmıştır.

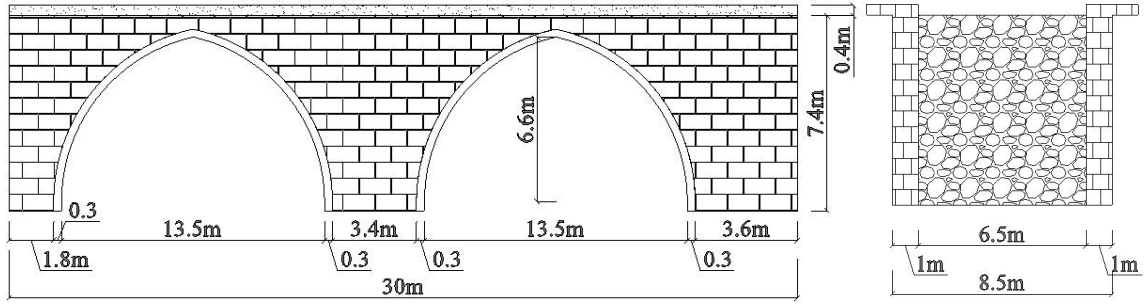
Tablo 2:Yığma ve arayüz birimlerinin mekanik özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Taş Kemerler	Yan Duvarlar	Dolgu	Ara yüzey rijitliği
Elastik modülü (MPa)	2800-3000	2400-2500	500	
Poissonoranı	02-0.25	0.20	0.25	
Yoğunluk (kg/m^3)	1600	1400	1800	
Basınç dayanımı (MPa)	5.0	5.0	1.0	
Çekme dayanımı (MPa)	0.5	0.5	0.05	
Sürtünme açısı			20	
Kayma açısı			0	
Kohezyon (MPa)			0.05	
Normal SertlikMPa/mm				2.45
Kesme SertliğiMPa/mm				1.21

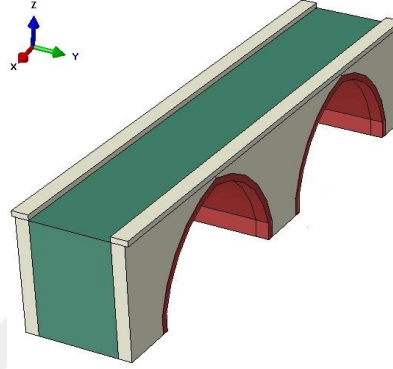
4.3 Köprünün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Yığma yapım tekniği kullanılarak inşaa edilen tarihi yapılar karmaşık bir mimariye sahiptir. Bunula birlikte yapının taşıyıcı sistemini oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi güçtür. Bu nedenlerden dolayı tarihi yapıların yapısal davranışının doğru olarak belirlenmesi mühendislik yöntemler kullanılarak analiz edilmesi oldukça zordur. Ancak günümüzde yapısal analiz programlarının ve kullanılan bilgisayar kapasitelerindeki hızlı gelişmeler karmaşık geometriye sahip yapıların analizlerinin gerçekleştirilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Gelişmiş bir yapısal analiz programı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının yapısal davranışı doğru olarak temsil etmesi için dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Bu kapsamda öncelikle yapısal davranışı en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modelinin oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca, analizde kullanılacak malzeme parametrelerinin ve malzeme idealleştirilmesi için yapılan kabuller doğru olarak belirlenmelidir.

Bu tez kapsamında incelenen Tarihi kemer köprüsünün mimari projelere ulaşılamamıştır. Bu nedenle öncelikle yerinde ölçümler yapılarak köprünün iki boyutlu mimari çizimleri ve üç boyutlu katı modeli AutoCAD 2018 programında oluşturulmuştur (Şekil 18 ve Şekil19).

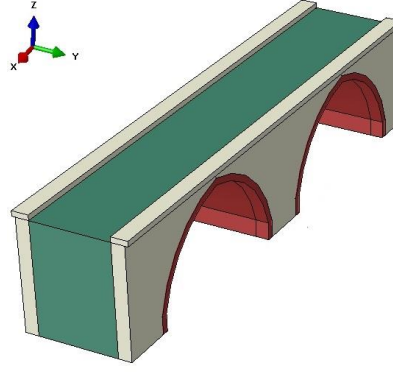


Şekil 18: Tarihi kemer köprü ön ve yan görünüşü.



Şekil 19: Tarihi kemer köprüsü üç boyutlu katı modeli.

Yığma yapıların modellenmesinde mikro, genişletilmiş makro ve makro olmak üzere üç tür modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Cami, kilise, minare, kule ve köprü gibi karmaşık geometriye sahip yapıların modellenmesinde sıklıkla makro ve genişletilmiş makro modelleme yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada basitleştirilmiş makro modelleme kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinin oluşturulması ve dinamik analizlerinin yapılmasında ABAQUS V10 (2010) programı kullanılmıştır. Köprünün taşıyıcı sistemini oluşturan kemerler, yan duvarlar ve dolgu biriminin sonlu eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur (Şekil 20). Oluşturulan sonlu eleman modellerinde toplam 25989 düğüm noktası ve sekiz düğüm noktasına sahip 30732 lineer hexahedral (C3D8R) eleman kullanılmıştır (Şekil 21). Bu çalışmada yığma birimler arasındaki etkileşimin yapısal davranış üzerine etkisini görmek amacıyla iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Birinci sonlu eleman modelinde yığma birimler (yan duvar-kemer, dolgu-kemer, yan duvar dolgu) arasındaki etkileşimin dikkate alınmadığı bir model oluşturulmuştur. İkinci modelde ise yığma birimler arasındaki etkileşim dikkate alınarak oluşturulmuştur.



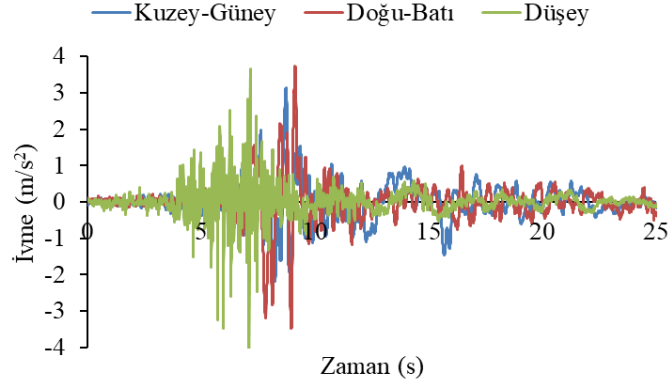
Şekil 20: Tarihi kemer köprüsü katı modeli.



Şekil 21: Tarihi kemer köprüsü sonlu eleman modeli.

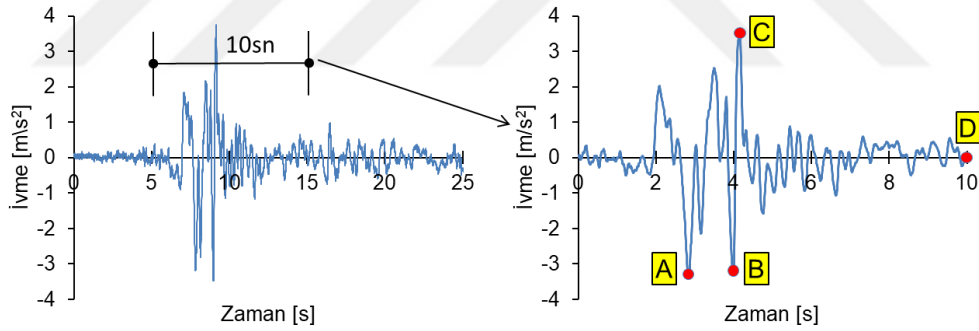
4.4 Deprem İvme Kaydının Seçilmesi

Tarihsel süreç içerisinde Bartın’da meydana gelen depremlerin yapıda ciddi bir hasara sebep olmadığı görülmüştür. Bu nedenle Bartın ilinde 7 şiddetinde bir deprem olması durumunda köprünün yapısal davranışının belirlenmesi amacı 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtlarının kullanılmasının uygun olduğu düşünülmüştür. Düzce istasyonundan elde edilen 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı veri bankasından alınmıştır. 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları Şekil 22’de sunulmuştur.



Şekil 22: 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme-zaman grafikleri.

Zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan deprem analizlerde 1999 Kocaeli depremi ivme kaydının maksimum ivme değerine (3.71 m/s^2) sahip olan Doğu-Batı bileşeni kullanılmıştır. Analiz süresini kısaltmak amacı ile 25sn'lik ivme kaydının etkili on saniyelik kısmı enine (düzlem dışı –menba-mansab yönünde) ve boyuna (düzlem içi – trafik akışı yönünde) doğrultularda köprüye uygulanmıştır (Şekil 23).



Şekil 23: Kocaeli depremi Doğu-Batı ivme bileşeni.

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde Şekil 23'de gösterilen Doğu batı bileşeni ivme kaydının maksimum ivme değerlerine sahip olan A,B,C ve analizin tamamlandığı D noktaları esas alınmıştır.

4.5 Köprünün Dinamik Analizleri

4.5.1 Modal Analiz

Yapıların mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları gibi dinamik karakteristiklerin belirlenmesi dinamik davranışlarının doğru olarak belirlenmesini sağlar. Yapıların dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde deneysel ve teorik yöntemler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen teorik dinamik karakteristikler yapının dinamik davranışını gerçeğe yakın olarak temsil edemez. Bunun nedeni malzeme özellikleri, sınır şartları, zemin etkisinin göz önüne alınıp alınmadığı gibi bir kabullerin yapısal davranışı etkilemesinden kaynaklanmaktadır (Birinci, 2010). Ayrıca yapının proje ve inşaa aşamasındaki farklılıklar yapının gerçek davranışı ile teorik olarak elde edilen davranış arasında farklılıklara neden olmaktadır. Son olarak tarihi yapılarda kullanılan malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenememesi dinamik davranışın teorik yöntemlerle doğru olarak belirlenmesini güçleştirmektedir (Türker, 2005). Teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin gerçek yapısal davranışı en iyi şekilde temsil etmesi için oluşturulan sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun için çevresel etkilerin (taşı, insan, rüzgâr vb.) yapıda oluşturduğu dinamik etkilerin yerinde yapılan ölçümler ile belirlenmesi gerekmektedir. Çevresel titreşim testlerinin yapılamadığı durumlarda yapının etkin olan 1. Doğal frekans değeri literatürde kabul görmüş amprik formüller kullanılarak hesaplanmalıdır. Teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler deneysel yöntemler veya amprik formüllerle elde edilen sonuçlara yaklaştırılarak yapının sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yapının mevcut durumunun gerçeğe yakın davranışının belirlenmesinde iyileştirilmiş sonlu elmanlar modeli kullanılmalıdır. Yığma kemer köprülerde; köprünün toplam uzunluğu, açıklık sayısı, maksimum açıklık uzunluğu, yüksekliği, kemer tipi ve malzeme özellikleri gibi birçok parametre yapısal davranışını etkilemektedir. Bayraktar vd., (2014) çalışmalarında farklı kemer açıklığına sahip sekiz taş köprü üzerinde yaptıkları teorik ve deneysel dinamik karakteristikler üzerinde istatistiksel hesaplamalara yapmışlardır. Çalışmanın sonunda maksimum kemer açıklığı ile birinci doğal frekans arasındaki ilişkiyi matematiksel ifade etmişlerdir (Eşitlik 17).

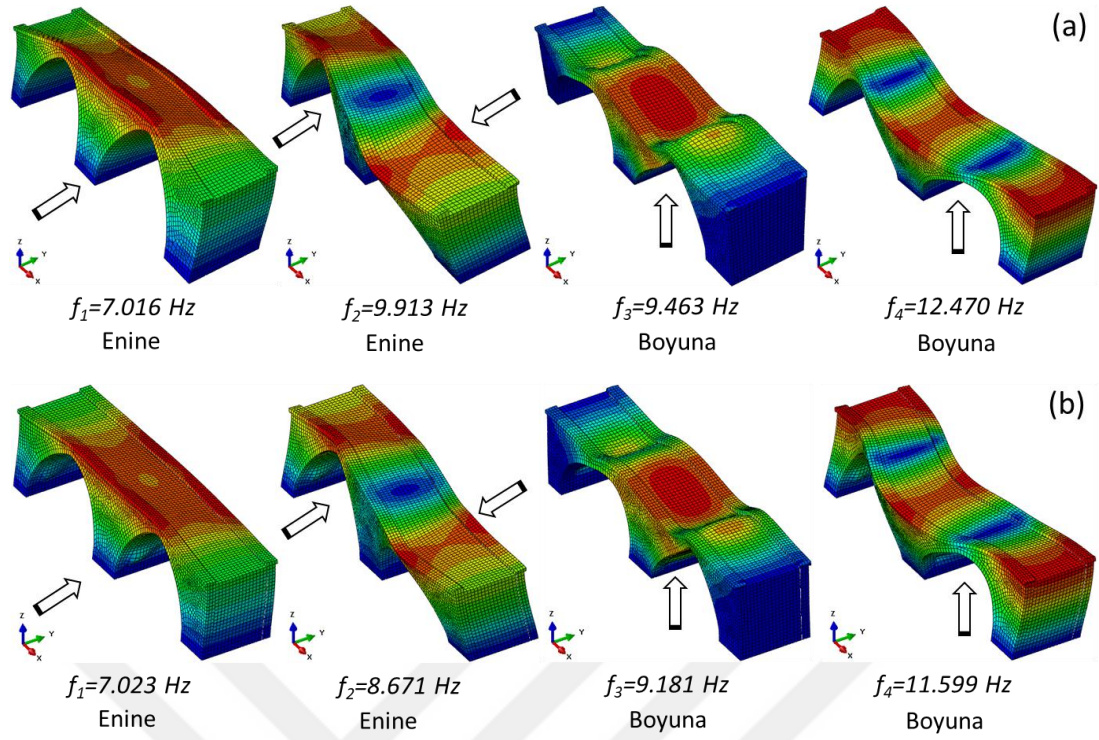
$$y = -3.35 \ln(x) + 16.824 \quad (17)$$

Formülde verilen x; maksimum kemer açıklığını, y ise birinci doğal frekans göstermektedir. Araştırmacı Eşitlik 17 ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen frekans değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3:Köprünün dinamik özellikleri arasındaki bağlantı. (Bayraktar vd., 2014)

Köprü	Yer	Kemer malzemesi	Kemersayısı	Ana kemer açıklığı (m)	Deneyssel doğal frekans	Frekans (Eşitlik 17)
Aspendos	Antalya	Taş	Yedi	16.00	5.890	5.914
Pehlivanlı	Erzurum	Taş	Tek	15.17	5.279	6.123
Mikron	Rize	Taş	Tek	19.49	6.063	5.137
Osmanlı	Rize	Taş	İki	25.2	4.640	4.126
Şenyuva	Rize	Taş	Tek	24.8	4.045	4.189
Şahruh	Kayseri	Taş	Sekiz	13.00	4.730	6.168
Osmanbaba	Trabzon	Taş	İki	10.00	8.853	7.763
Torul	Gümüşhane	Taş	Üç	12.00	6.970	7.046

Numerik ve deneyssel frekans değerleri arasındaki farkın çok küçük olduğu ve bu formülün yığma kemer köprülerin sonlu eleman model iyileştirilmesinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.Kemer köprünün yığma birimleri arasında etkileşimin göz önüne alındığı ve alınmadığı sonlu eleman modellerine ait ilk dört teorik mod şekli ve doğal frekans değerleri Şekil 24’de sunulmuştur.



Şekil 24: Teorik mod şekilleri (a) Ara yüzey etkileşimsiz (b) Ara yüzey etkileşimli.

Oluşturulan sonlu eleman modelinin yapının gerçeğe yakın davranışını temsil etmesi amacı ile birinci teorik frekans değerleri Eşitlik 17 kullanılarak elde edilen frekans değeri ile karşılaştırılmıştır. Eşitlik 17 kullanılarak Kemer köprü'nün birinci doğal frekans değeri 6.882 Hz olarak hesaplanmıştır. Amprik ve teorik olarak elde edilen birinci doğal frekanslar arasındaki farkın çok küçük olduğu görülmüştür. Bu yüzden oluşturulan sonlu elemanlar modelinin gerçek yapısal davranışı yüksek doğrulukla temsil edeceğini göstermektedir. Yığma duvarlar arasında etkileşimli ve etkileşimli modellerden elde edilen frekanslar arasındaki farkın az olduğu görülmüştür. Frekans değerleri arasındaki bu farkın mod sayısı arttığında belirgin derecede arttığı görülmüştür. Her iki model türünde meydana gelen mod şekilleri karşılaştırıldığında birinci ve ikinci mod şeklinin nehir akışı (düzlem dışı), yönünde üçüncü ve dördüncü mod şeklinin ise köprü trafik akışı (düzlem içi) yönünde meydana geldiği görülmüştür. İlk 100 mod arasında, kütle katılım oranı % 91 ve nehir akışı yönünde (düzlem dışı) etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak kütle katkı oranı ve mod hareketinden birinci ve ikinci mod şekillerinin, yan duvarların düzlem dışı (nehir akış yönü) davranışında etkili olduğunu göstermektedir.

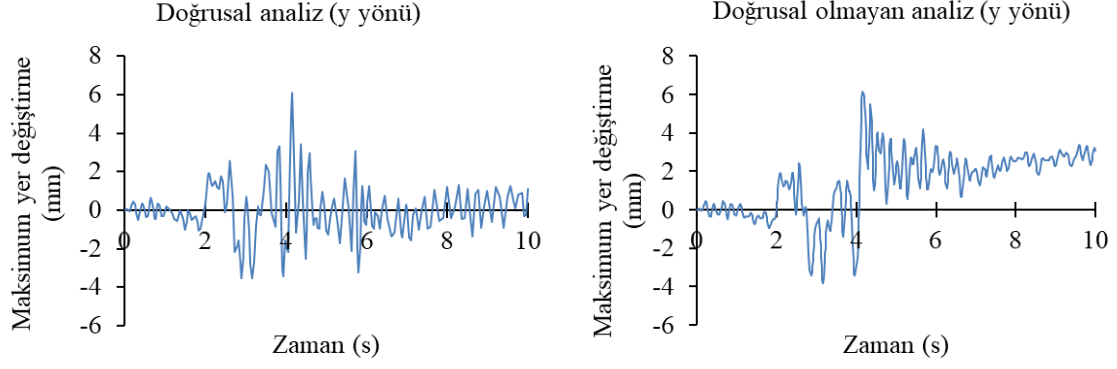
4.5.2 Zaman Tanım Alanında Doğrusal/Doğrusal Olmayan Sismik Analizler

Köprünün taşıyıcı sistemini oluşturan, kemer, yan duvarlar ve dolgu birimlerinin sonlu eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. Köprünün taşıyıcı birimleri arasındaki etkileşimin yapısal davranışına etkisini araştırmak amacı ile iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Birinci modelde taşıyıcı birimler arasındaki etkileşim (kayma ve ayrılma davranışı) göz önüne alınmayarak oluşturulmuştur. Bu modelin oluşturulmasında ABAQUS programı Assembly modülü kullanılarak kemer, dolgu ve yan duvar modeller bir araya (Merge) getirilerek oluşturulmuştur. Ayrı oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin Merge edilerek birleştirilmesi, dış yük etkisi altında yapı elemanlarının ayrılmadan tek bir parça gibi davranmalarına imkân sağlamaktadır. İkinci modelde ise dolgu-kemer ve dolgu-yan duvar arasında etkileşim göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Yığma birimlerden kemer ve yan duvarların doğrusal olmayan malzeme davranışlarının tanımlanmasında beton hasar plastikleşme modeli, dolgu birim içinse Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Birimler arasındaki etkileşim yapışma davranışı (cohesive behavior) olarak tanımlanmıştır. Ara yüzeyin açılma (normal behavior) ve kayma (shear behavior) davranışı, yığma birimleri oluşturan taş ve harcin malzeme özellikleri kullanılarak tanımlanmıştır.

Son olarak köprünün doğrusal ve doğrusal olmayan hem ara yüzey etkileşimli, hem de ara yüzey etkileşimsiz modeller dikkate alınarak düzlem dışı (nehir akış yönü) ve düzlem içi (trafik akış yönü) yönde uygulanan deprem yükleri altında dinamik davranışı araştırılmıştır.

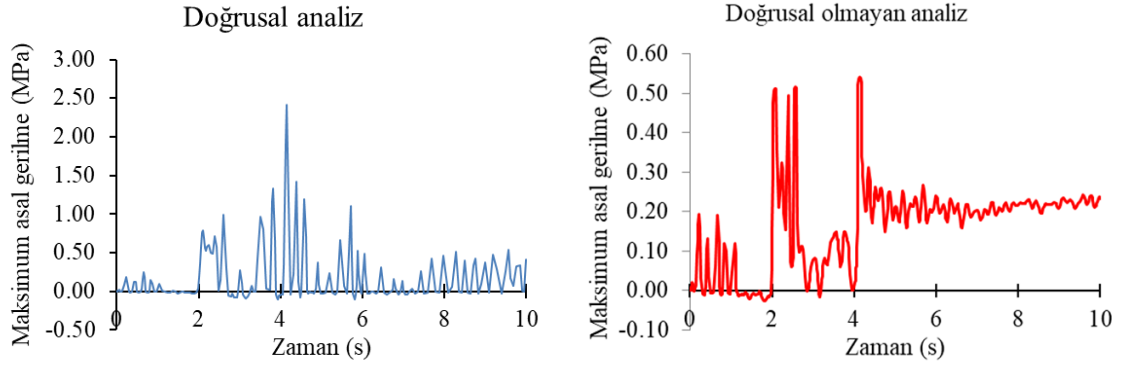
4.5.3. Köprünün ara yüzey etkileşimsiz Doğrusal/Doğrusal Olmayan Sismik Analizler

19 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak değerleri elde edilmiştir (Şekil 25). Maksimum yer değiştirmenin nehir akışı yönünde (düzlem dışı) davranışta meydana geldiği ve değerinin 6.14mm olduğu görülmüştür.

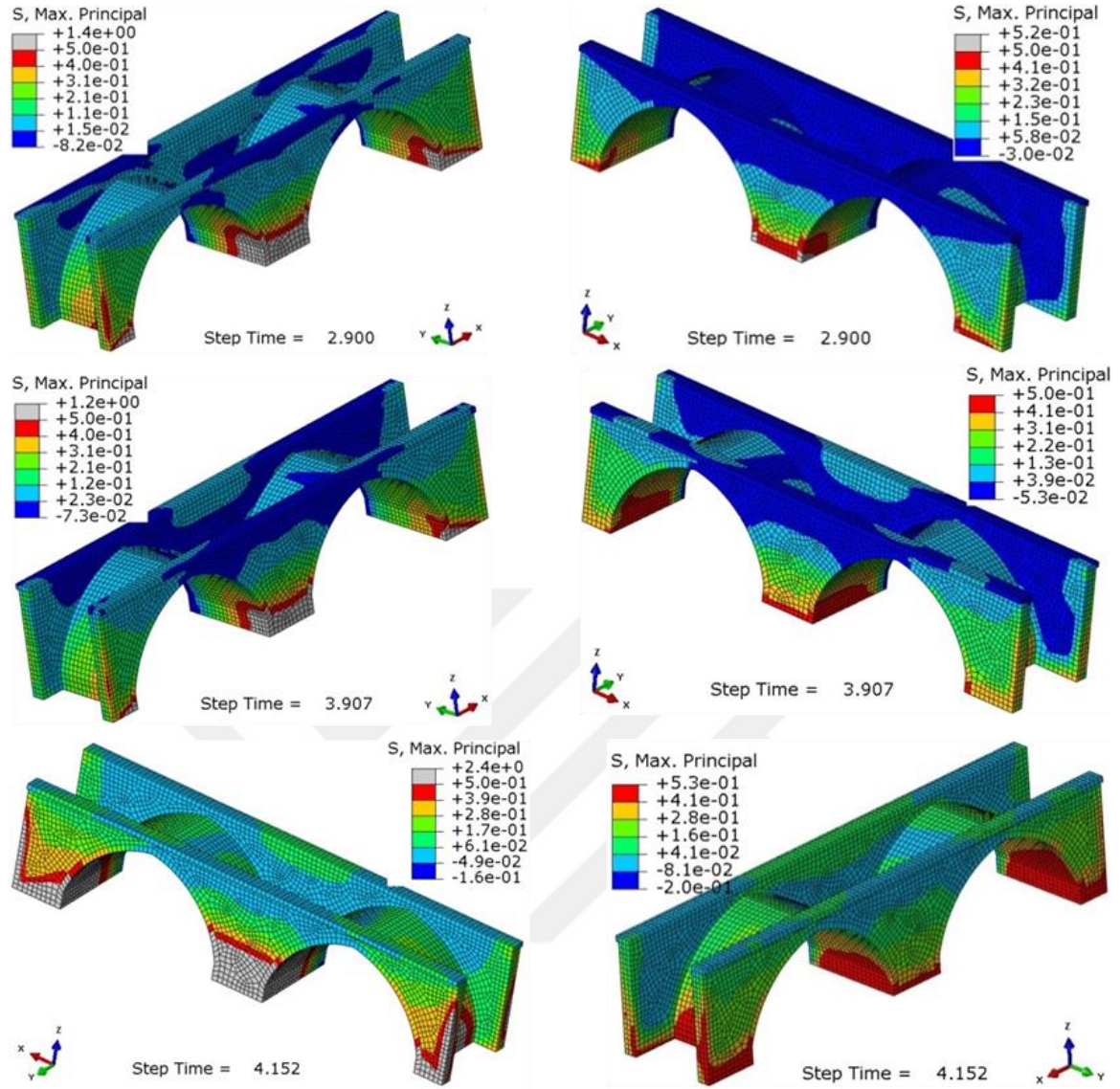


Şekil 25: Yer değiştirmenin zaman bağlı değişim grafikleri (a) doğrusal analiz (b) doğrusal olmayan analiz

Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen maksimum (çekme) asal gerilmelerin zamana bağlı değişimi Şekil 26’da sunulmuştur. Maksimum çekme gerilmelerinin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler Şekil 27’de sunulmuştur.

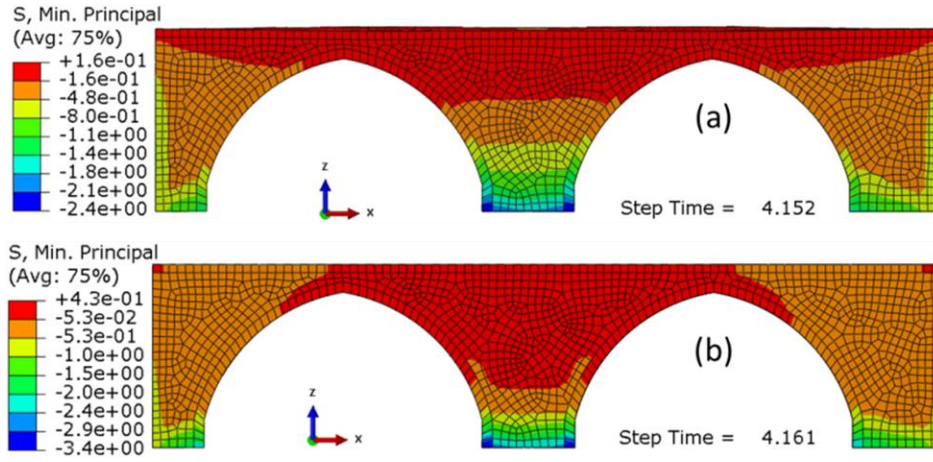


Şekil 26: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin zamana bağlı değişim grafikleri.



Şekil 27: Maksimum (çekme) asal gerilmelerinin köprü üzerinde dağılımı.

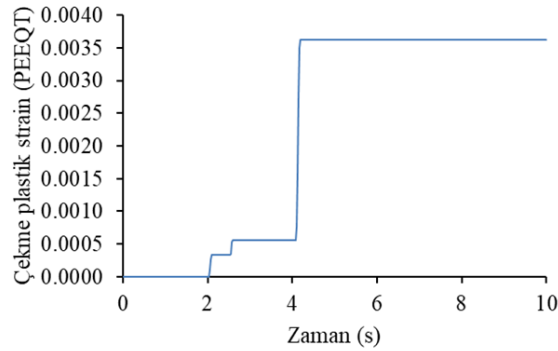
Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı düşüktür. Özellikle köprü türü yapıların kemer formunda yapılması hem üzerlerine gelen basınç kuvvetleri rahatlıkla taşıyabilmeleri hem de uzun açıklıkların geçilmesine imkân tanımaktadır. Yapılan analizlerden köprüde meydana gelen minimum (basınç) asal gerilmelerinin yapı üzerinde yoğunlaştığı bölgeler Şekil 28’de sunulmuştur.



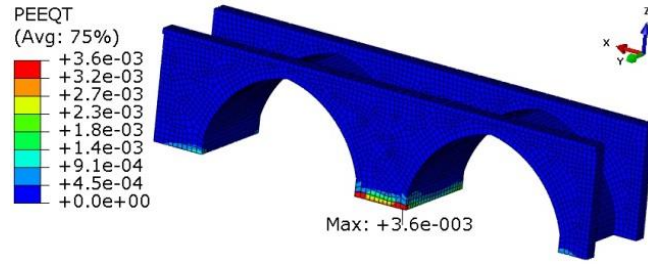
Şekil 28: Minimum (basınç) asal gerilmelerin dağılımı (a) Doğrusal analiz.

Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonucu köprüde meydana gelen minimum (basınç) gerilmelerinin yığma duvar limit basınç gerilmesi değeri 7MPa'ı aşmadığı görülmüştür. Basınç gerilmeleri ise köprünün orta kemer temel birleşim bölgesinde meydana gelmektedir. Doğrusal olmayan analizde elde edilen basınç gerilmelerinin doğrusal analizlere göre yaklaşık 1.4 kat daha büyük olduğu görülmüştür.

Doğrusal olmayan analizden elde edilen maksimum çekme plastik uzamalarının zaman bağlı değişimi Şekil 29'da görülmüştür. Plastik uzamalarının orta kemer mesnet bölgesine yakın elemanlarında yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 29: Minimum çekme plastik uzamalarının zaman bağlı değişimi.



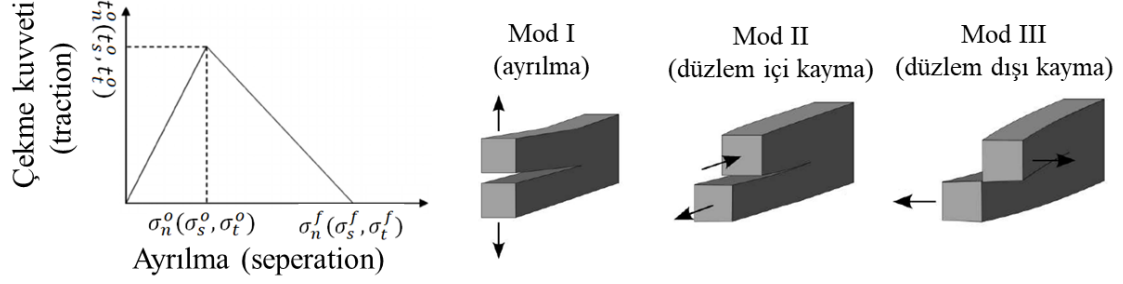
Şekil 30: Minimum çekme plastik uzamalarının köprü üzerinde dağılımı.

Şekil 30 göz önüne alındığında çekme plastik uzamalarının analizin 2,05. saniyesinde başladığı ve analiz tamamlandığında maksimum değer olan 0,0036 değerine ulaştığı görülmüştür.

4.5.4. Ara yüzey etkileşimli SE modeli Doğrusal olmayan sismik analizi

Yığma yapıların sonlu eleman modelinin oluşturulmasında ara yüzey davranışı dikkate alındığı zaman genellikle basitleştirilmiş makro modelleme tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Bu modelleme yaklaşımında harç kalınlığı sıfır kabul edilerek yığma birimler harç kalınlığı kadar genişletilmektedir. Bu yaklaşımda, duvar üniteleri arasındaki ara yüzeyin, sürekli ara yüzey ortamının birbirine karışmasını önlemek için temsili bir sertliğe sahip olması gerekir. Yığma birimler arasındaki bu yüzey gerilme nedeniyle açılma ve kaymanın olması düşünülen bir düzlemdir. Yığma birimler arasındaki ara yüzeyi yapışkan (cohesive) ara yüzey olarak modelleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Ara yüzeyin davranışını temsil eden elastik normal ve kayma rijitlikleri yığma birimi oluşturan malzemeler ve harcın malzeme özellikleri ve kalınlıkları dikkate alınarak belirlenmektedir. Basitleştirilmiş makro modelleme yaklaşımında ara yüzeyin normal ve kayma rijitliklerinin Eşitlik 18-19-20’de verilen formüllerle hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda harç malzeme modellenmektedir. Normal ve kayma gerilmesi altında yığma birim ara yüzeylerinin davranışı açılma, kayma (düzlem içi ve dışı) olarak meydana gelmektedir (Şekil 31).

1. Davranış: Açılma (18)
2. Davranış : Düzlem içi kayma (19)
3. Davranış: Düzlem dışı kayma (20)



Şekil 31: Yığma birim ara yüzey davranışı.

Bu çalışmada kullanılan yığma ara yüzey normal ve kayma rijitlikleri Eşitlik 19-20 kullanılarak sırası ile 2,45 MPa/mm ve 1,21 MPa/mm olarak hesaplanmıştır. Yan duvarlar-dolgu, kemer-dolgu arasındaki etkileşim, yığma köprü türü yapıların dinamik davranışının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle ağır trafik yüklerinin yapmış olduğu basınç nedeni ile dolgu birimin genişletme davranışı ve köprü enine doğrultusunda etkiyen deprem yükleri dikkate alındığında yan duvarlarda ciddi hasarlara neden olmaktadır.(Şekil 32). Bu hasarlar köprü yan duvarlarının kısmen veya tamamen göçmesi ve dolgunun dağılması ile sonuçlanmaktadır (Rota, 2004).



Şekil 32: Deprem sonrası yan duvarların göçmesi. (Rota, 2004).

Belirtilen nedenlerden dolayı yan duvar-dolgu ve kemer arasındaki etkileşimin yapısal davranışı etkilediği görülmektedir. Çalışmanın bu bölümünde yığma birimler arasındaki etkileşimin köprü davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yığma birimler arasına tanımlanan ara yüzey, yüzey tabanlı yapışma (cohesive behavior) yaklaşımı kullanılarak model-

Köprünün zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi köprünün ara yüzey etkileşimli ve etkileşimsiz modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan 1999 Kocaeli depreminin maksimum ivme değerine sahip olan bileşeni trafik akışı (düzlem içi) ve nehir akışı (düzlem dışı) doğrultularında köprüye uygulanmıştır. Doğrusal olmayan analizlerin uzun sürmesi ve bilgisayar kapasitesinden dolayı analizlerde 25 saniyelik ivme kaydının etkili 10 saniyelik kısmı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde ivme değerlerinin pik yaptığı A, B, C ve analizin tamamlandığı D noktaları göz önüne alınmıştır (Şekil 33).


$$\omega_i = 2\pi f_i, \omega_j = 2\pi f_j \quad (21)$$

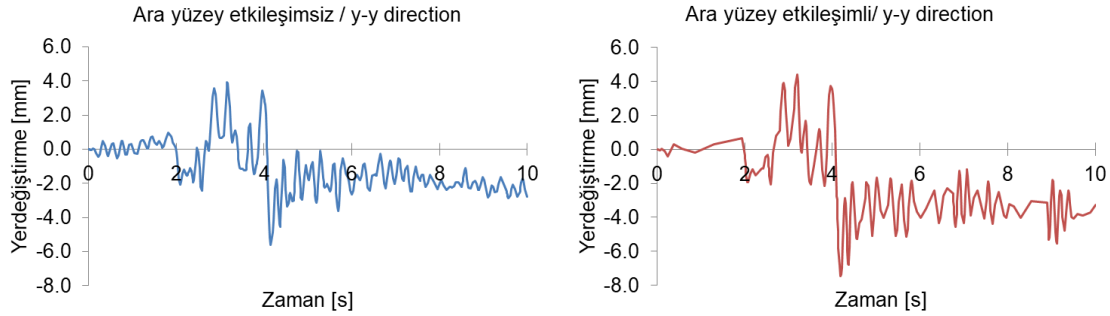
Formülde verilen f_i ve f_j 'inci frekans değerleri kullanılarak elde edilen ω_i ve ω_j ağırsal doğal frekansları, ξ ise yapısal sönüm oranını ifade etmektedir.

44

hesaplanmıştır. Sönüm oranlarının hesabında yapısal sönüm oranı %5 alınmıştır.

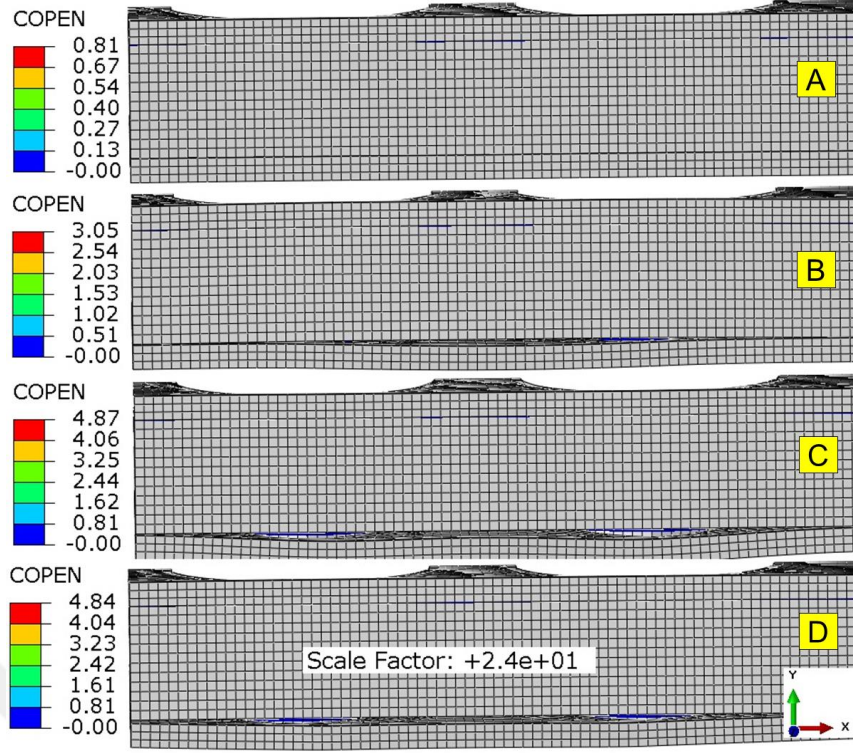
4.5.5. Tarihi Yığma Taş Kemer Köprüsünün Düzlem Dışı Davranışı

Ara yüzey etkileşimli ve etkileşimsiz modelde meydana gelen maksimum yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi Şekil34’de sunulmuştur. Köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmenin ara yüzey etkileşimsiz modelde 5mm, ara yüzey etkileşimli modelde ise 7mm olduğu görülmüştür (Şekil 34).



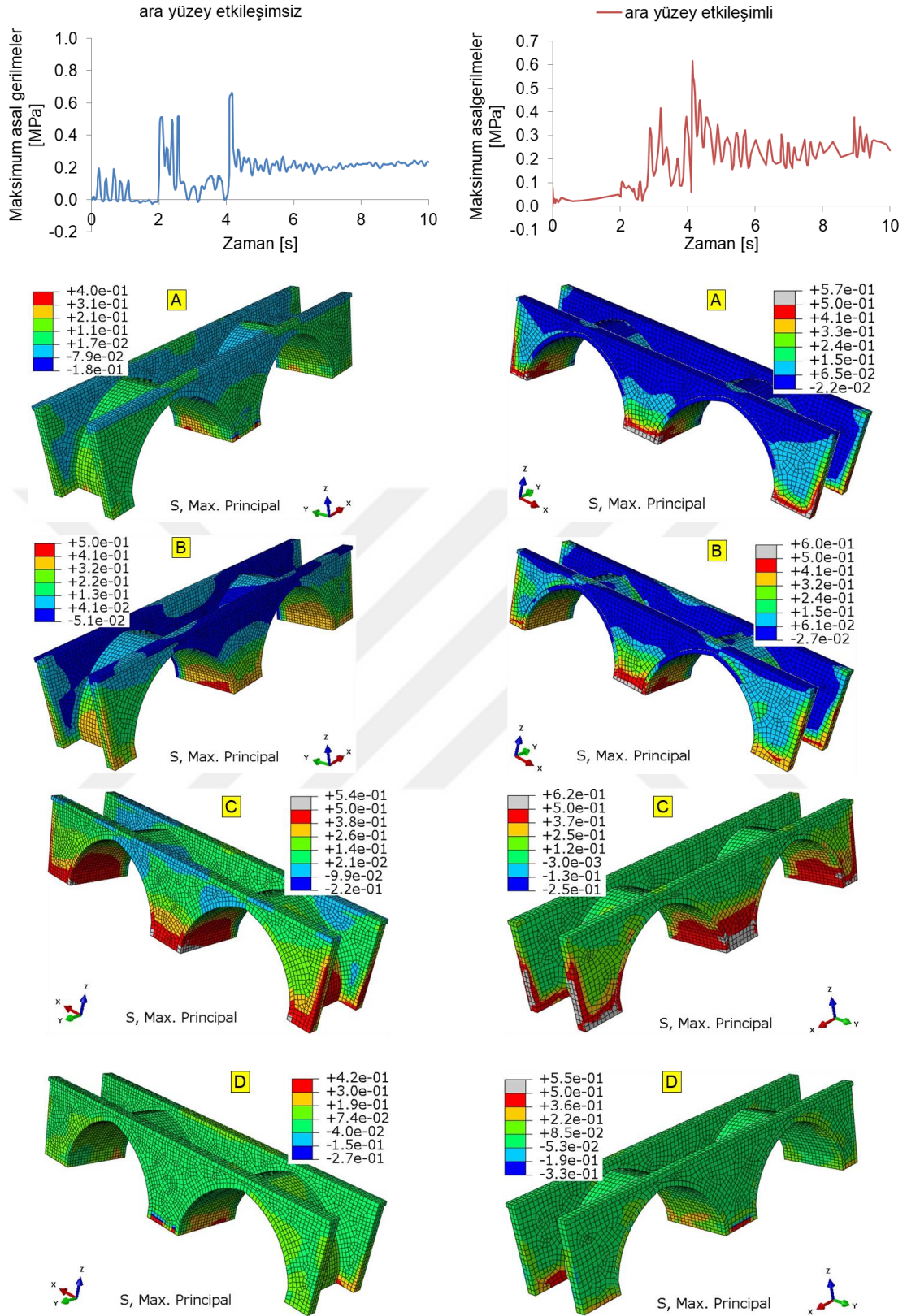
Şekil 34: Maksimum yer değiştirme zaman grafiği.

Her iki modelde yapının doğrusal olmayan davranışa ivme değerinin maksimum olduğu 4,14. saniyeden sonra geçtiği görülmüştür. Doğrusal olmayan davranış sırasında ara yüzeyli etkileşimli modelde meydana gelen maksimum yer değiştirmenin az bir farkla da olsa daha büyük olduğu görülmüştür. Ara yüzey etkileşimli modelde yan duvarla ve dolgu arasında açılma olduğu görülmüştür. Açılmanın büyüklüğü ivme zaman grafiğindeki A, B, C ve D zaman adımlarında sırası ile 0.891mm, 3.05mm, 4.87mm ve 4,84mm olduğu görülmüştür (Şekil 35).



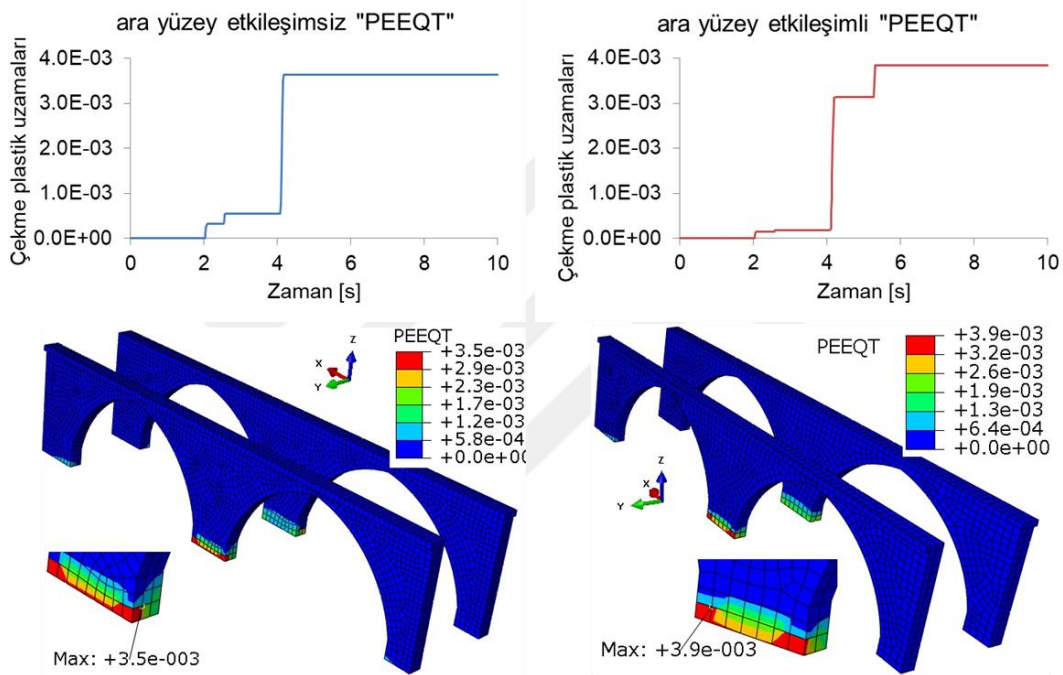
Şekil 35: Farklı zaman adımlarında yan duvarlarda meydana gelen açılmalar.

Yan duvar-dolgu arasındaki açılmanın maksimum ivme değerinde en büyük değerini (4.87mm) aldığı ve analiz sonuna kadar yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Ara yüzeyde meydana gelen açılmanın köprünün yapısal davranışını etkileyecek boyutlarda olmadığı görülmüştür. Fakat açıklığın boyutundaki zamana bağlı artış göz önüne alındığında, daha yüksek yan duvarlara sahip köprülerde duvarların düzlem dışı davranışı önemli derecede etkileyeceğini göstermektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen, ara yüzey etkileşimsiz ve etkileşimli sonlu eleman modellerinde meydana gelen maksimum (çekme) asal gerilmelerinin zamana bağlı davranışı Şekil 36’da sunulmuştur.



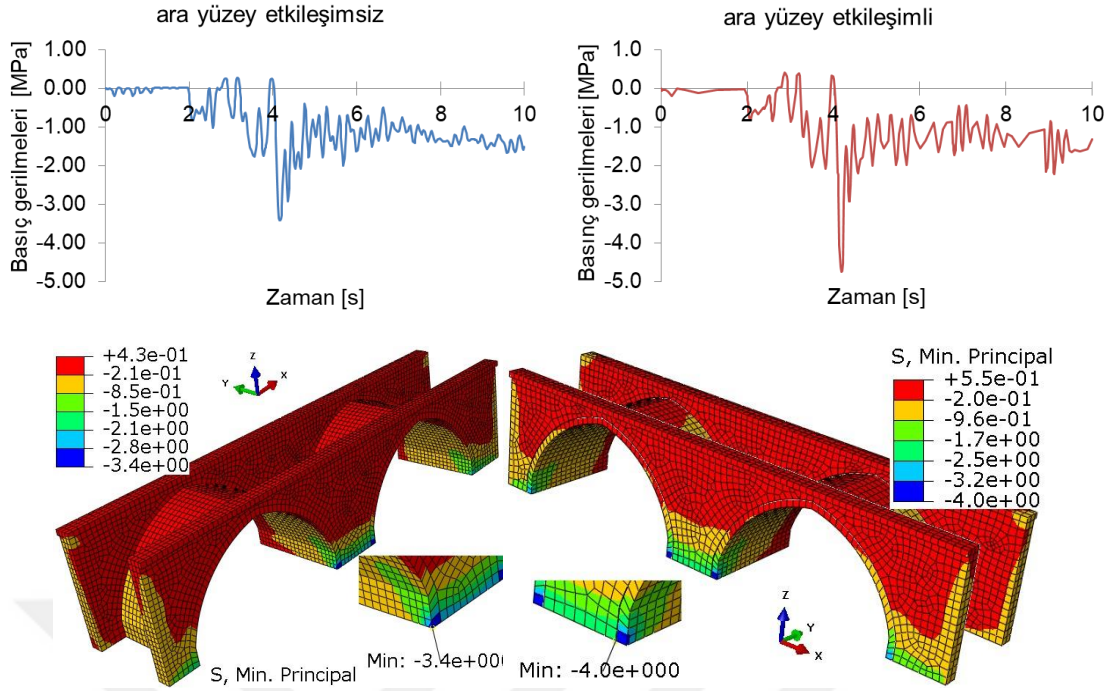
Şekil 36: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin köprü üzerindekiyoğunlaştığı bölgeler

Şekil 36'da görüldüğü gibi, ara yüzey etkileşimli modelde meydana gelen gerilmelerin daha yığma duvar limit çekme gerilmesi değerini (0.5MPa) aştığı görülmüştür. Maksimum (çekme) gerilmelerinin ara yüzey etkileşimsiz modelde kemer bölgesinde yoğunlaşırken, ara yüzey etkileşimli modelde duvar bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Düzlem dışı deprem yüklerinden dolayı maksimum (çekme) asal gerilmelerin yan duvarlarda yoğunlaşması, ara yüzey etkileşimli sonlu eleman modelinin köprünün davranışını daha doğru temsil ettiği görülmektedir. Çekme gerilmelerinin meydana getirdiği çekme plastik uzamalarının zamana bağlı değişimi ve yoğunlaştığı bölgeler Şekil 37’de sunulmuştur.



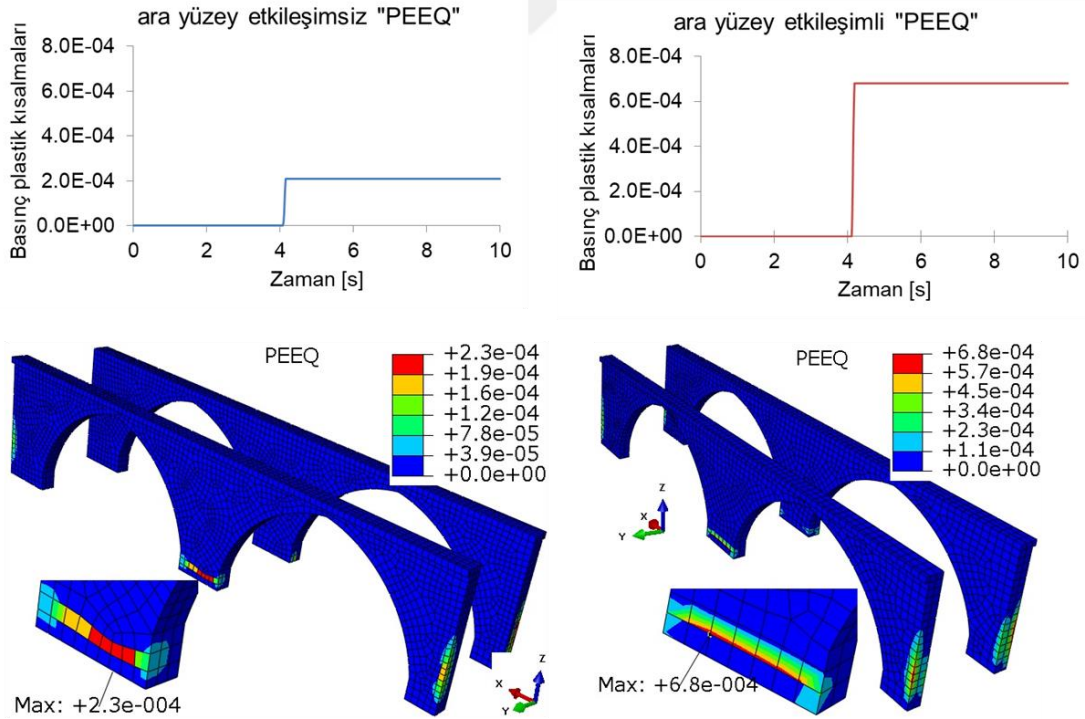
Şekil 37: Maksimum (çekme) plastik uzamalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde köprüde meydana gelen minimum (basınç) asal gerilmelerinin zaman bağlı değişimi ve yoğunlaştığı bölgeler Şekil 38’de sunulmuştur. Ara yüzey etkileşimli modelde meydana gelen basınç gerilmelerinin etkileşimsiz modelde meydana gelenlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Ara yüzey etkileşimsiz modelde meydana gelen basınç gerilmelerinin yığma duvar limit basınç gerilmesi değeri 5MPa’ı aşmadığı, ara yüzeyli etkileşimde ise aştığı görülmüştür.



Şekil 38: Minimum (basınç) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

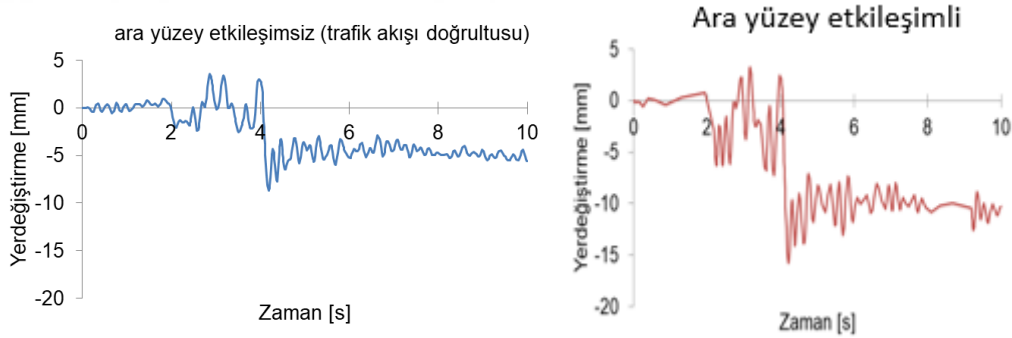
Basınç gerilmelerinin meydana getirdiği basınç plastik kısaltmalarının zamana bağlı değişimi ve yoğunlaştığı bölgeler Şekil 39’da sunulmuştur.



Şekil 39: Minimum (basınç) plastik kısaltmalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

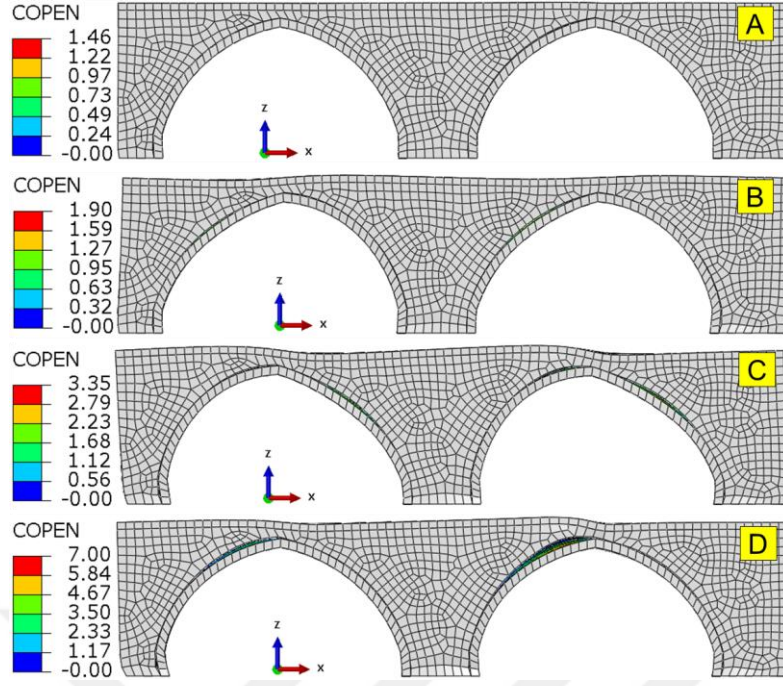
4.5.6 Tarihi Kemer Köprü'nün Düzlem İçi Davranışı

Yığma kemer köprülerin yan duvarlarının düzlem içi davranışı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda iki ve üç boyutlu modeller kullanılmıştır. Ancak bu çalışmaların birçoğunda yığma birimler arasındaki etkileşim dikkate alınmamıştır. Tez çalışmasının bu aşamasında tarihi kemer köprü'nün düzlem içi davranışı araştırılmıştır. 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtlarından Doğu batı bileşeni düzlem içi (trafik akışı) doğrultuda köprüye uygulanarak doğrusal olmayan deprem davranışı belirlenmiştir. Köprüde meydana gelen maksimum yerdeğiştirmenin trafik akışı doğrultuda ara yüzey etkileşimli modelde 8.5mm, ara yüzey etkileşimli modelde ise 17.7mm olduğu görülmüştür. Maksimum yer değiştirmelerin zaman bağlı değişimi Şekil 40'da verilmiştir.



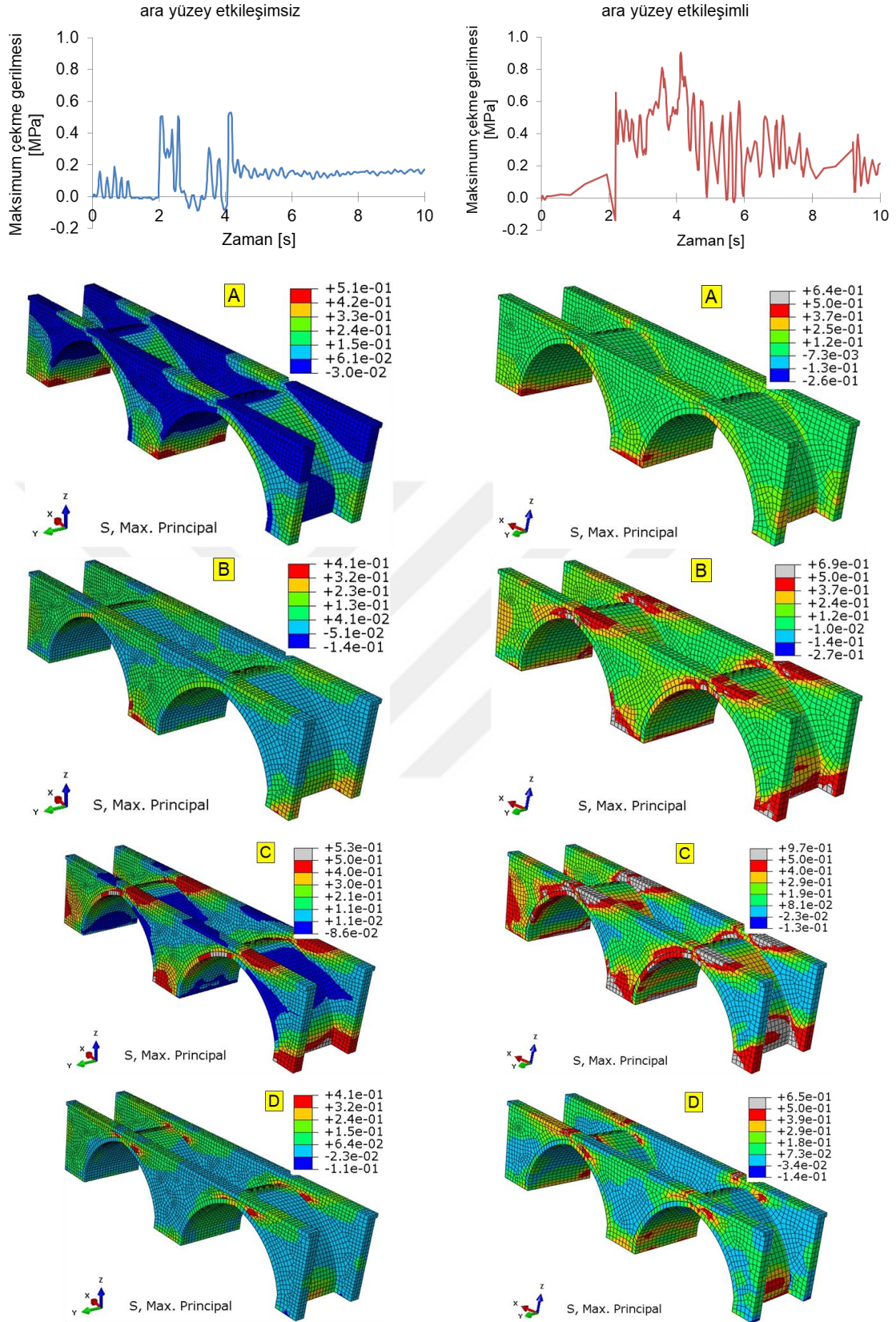
Şekil 40: Maksimum yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi.

Analiz sonucu köprü'nün kemer yan duvar birleşim bölgesinde meydana gelen açılmalar farklı zaman adımları için Şekil 41'de sunulmuştur. Kemer-yan duvar birleşiminde meydana gelen açılmanın zaman artışı ile arttığı ve analiz tamamlandığında maksimum değeri aldığı görülmüştür.



Şekil 41: Farklı zaman adımlarında yan duvarlar kemer birleşiminde meydana gelen açılmalar.

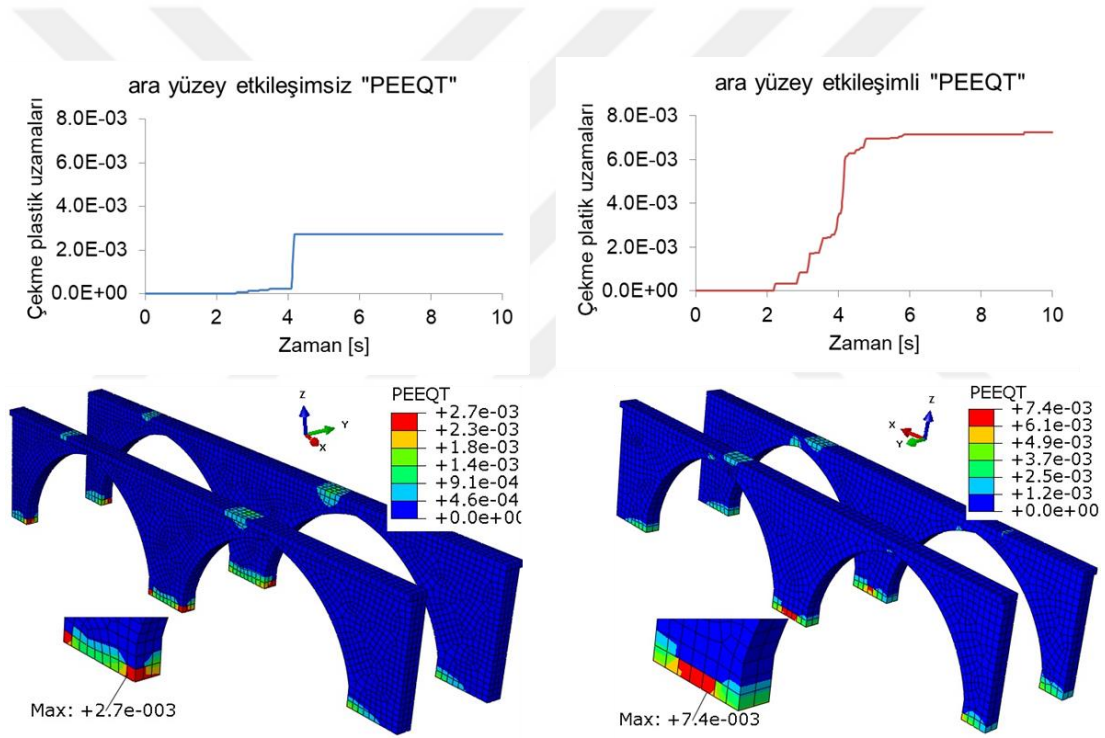
Zaman bağılı olarak kemer-yan duvar arasındaki açılmanın artması yığma köprülerin düzlem içi davranışında ara yüzey etkileşiminin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Düzlem içi uygulana deprem etkisi altında köprüde meydana gelen çekme gerilmelerinin zaman bağılı değişimi ve yoğunlaştığı bölgeler Şekil 42’de gösterilmiştir.



Şekil 42: Maksimum (çekme) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

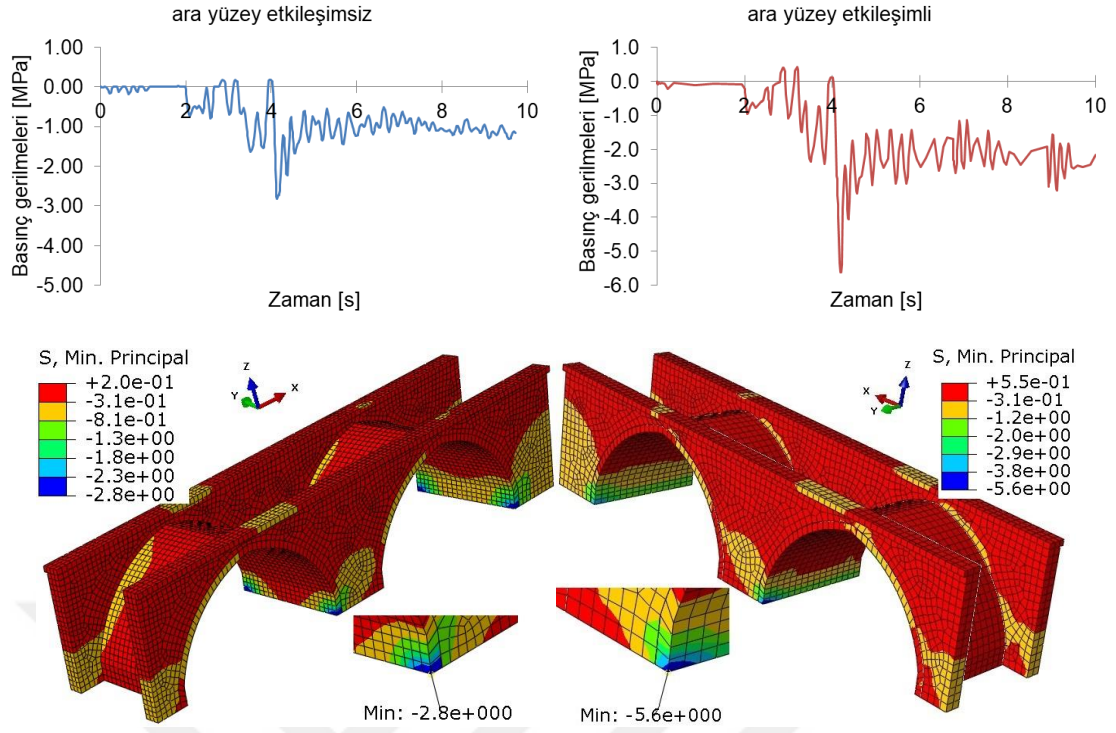
Doğrusal olmayan analiz sonucu, ara yüzey etkileşimli modelde meydana gelen gerilmenin 0.53MPa, etkileşimsiz modelde ise 0.97MPa olduğu görülmüştür. Ara yüzeyli etkileşimde meydana gelen maksimum çekme gerilmeleri yığma duvar limit çekme gerilmesi 0.5MPa'ı aşmaktadır. Yığma duvar limit gerilmesini aşan gerilmeler köprünün yan duvar ve kemer çevresinde yoğunlaşmaktadır. Ara yüzeyli etkileşimde meydana gelen maksimum çekme gerilmeleri sadece birkaç elemanda yığma duvar limit çekme gerilmesi değerini aşmaktadır. Limit değeri aşan çekme gerilmeleri kemer bölgesinde yoğunlaşmaktadır.

Çekme gerilmeleri nedeni ile köprüde meydana gelen çekme plastik uzamalarının zamana bağlı değişimi ve yoğunlaştığı bölgeler Şekil 43'de sunulmuştur. Ara yüzeyli etkileşimde meydana gelen çekme plastik uzama değerlerinin, ara yüzeyli etkileşime göre 3 kat daha büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 43: Maksimum (çekme) plastik uzamalarının köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonucu köprüde meydana gelen minimum (basınç) gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgeler ve zaman bağlı olarak değişimi Şekil 44'de gösterilmiştir. Ara yüzey etkileşimli modelde yapıda meydana gelen basınç gerilmelerinin yığma duvar limit basınç gerilmesi değeri 5MPa'ı aşmadığı, etkileşimli modelde yalnızca birkaç elemanda limit değeri aştığı görülmüştür.



Şekil 44: Minimum (basıncı) asal gerilmelerin köprü üzerinde yoğunlaştığı bölgeler.

BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tarihi bir yığma köprünün dolgu-kemer ve dolgu-yan duvar ara yüzeyleri arasında etkileşimin olduğu ve olmadığı durumlar dikkate alınarak yapının düzlem içi ve düzlem dışı doğrusal ve doğrusal olmayan sismik davranışı incelenmiştir. Yığma duvar ve kemer birimlerinin doğrusal olmayan malzeme davranışını simüle etmek için Beton Hasar Plastisite malzeme modeli, dolgu dolgusu için Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Öncelikle ara yüzey etkileşiminin olmadığı model kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Deprem yükleri yapıya enine doğrultuda etki edilmiştir. Ara yüzey etkileşimsiz model kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Ara yüzey etkileşimsiz model için doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırılması

- Maksimum yer değiştirmenin nehir akışı yönünde (düzlem dışı) davranışta meydana geldiği ve değerinin 6.14mm olduğu görülmüştür.
- Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonucu köprüde meydana gelen minimum (basınç) gerilmelerinin yığma duvar limit basınç gerilmesi değeri 7MPa'ı aşmadığı görülmüştür.
- Doğrusal olmayan analizde elde edilen basınç gerilmelerinin doğrusal analizlere göre yaklaşık 1.4 kat daha büyük olduğu görülmüştür.
- Doğrusal analizlerde maksimum çekme gerilmesinin 2.4MPa ve yığma duvar limit çekme gerilmesi değeri 0.5MPa'ı aştığı görülmüştür.
- Doğrusal olmayan analizde maksimum çekme gerilmesinin 0.52MPa ve yığma duvar limit çekme gerilmesi değerini sadece birkaç elemanda aştığı görülmüştür.
- Doğrusal olmayan analizden çekme plastik uzamalarının köprü yan duvarı mesnet bölgesi elemanlarında olduğu görülmüştür.

Ara yüzey etkileşiminin yığma kemer köprülerin yapısal davranışına etkisini görmek amacı ile ara yüzey etkileşimli ve etkileşimsiz modeller kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen bulgular ve değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

- Ara yüzey etkileşimli modelde düzlem içi ve dışı deprem yükleri etkisi altında köprünün en savunmasız ve hasar görmesi beklenen biriminin yan duvarlar olduğu görülmüştür.
- Ara yüzey etkileşimli modelde yığma birimler arasına tanımlanan normal ve kayma rijitliklerinin yan duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışını etkilemektedir.
- Ara yüzey etkileşiminin yığma taş köprülerin 2. ve 4. Frekanslarını az da olsa etkilediği görülmüştür.
- Ara yüzey etkileşimli ve etkileşimsiz modellerde 1. ve 2. mod şeklinin düzlem dışı yönde, 3. ve 4. mod şeklinin düşey yönde meydana geldiği ve birbirleri ile uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Düzlem dışı deprem yükleri altında yan duvar-dolgu ve yan duvar kemer arasında meydana gelen açılmanın maksimum ivme kaydına kadar arttığı, maksimum ivme değerinden sonra artışın az da olsa devam ettiği görülmüştür.
- Düzlem içi deprem yükleri etkisinde yan duvar-dolgu ve yan duvar kemer arasında meydana gelen açılmanın analizin sonuna kadar artarak devam ettiği görülmüştür.
- Düzlem içi yükler altında yığma duvar sınır gerilme değerini aşan eleman sayısının ara yüzey etkileşimli modelde etkileşimsiz modele göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Düzlem dışı sismik etki altında, ara yüzey etkileşimli modelde meydana gelen çekme plastik gerilme ve uzama değerlerinin daha yüksek olduğu ve çekme gerilmelerinin, yığma duvar sınır çekme gerilme değerini aştığı görülmüştür.
- Düzlem dışı ve düzlem içi sismik etkilerden kaynaklanan basınç gerilmelerinin, her iki modelde de sadece birkaç elemanda yığma duvar basınç gerilmesi sınır değerini aştığı görülmüştür.

Köprünün düzlem dışı sismik davranışı

- Ara yüzey etkileşimli modeli modelde meydana gelen maksimum yer değiştirme, maksimum asal (çekme) gerilmeleri ve minimum asal (basınç) gerilmelerinin ara yüzey etkileşimsiz durumdan daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Ara yüzey etkileşimli modelde meydana gelen maksimum basınç gerilmelerinin, yığma duvar limit basınç gerilme değeri 0.5 MPa 'ı aştığı görülmüştür. Ara yüzey etkileşimli modelde basınç gerilmelerin yan duvarlarda yoğunlaşırken, etkileşimsiz modelde kemer bölgesinde yoğunlaşmaktadır.

Köprünün düzlem içi sismik davranışı

- Düzlem içi etkiyen deprem yükleri nedeniyle meydana gelen maksimum yer değış-

tirmelerin düzlem içi doğrultuda ara yüzey etkileşimsiz modelde 17.7mm, etkileşimli modelde ise 8.5mm olduğu görülmüştür.

- Her iki modelde de, meydana gelen maksimum çekme gerilmelerinin, yığma duvar limit çekme gerilmesi değerini aştığı bulunmuştur. Ara yüzey etkileşimli durumda limit gerilme değeri birkaç elemanda aşılrken, ara yüzey etkileşimli modelde daha fazla elemanda aştığı görülmüştür. Maksimum yerdeğiştirme değerindeki artış ara yüzey etkileşiminin yapısal davranışın değerlendirilmesinde önemli olduğunu göstermektedir.

Doğrusal analiz sonuçlarına göre köprünün yan duvar ve kemer birimlerinde ciddi hasar olacağı görülmüştür. Doğrusal olmayan sonuçlara göre köprüde hasar olması beklenmektedir. Yapının mevcut durumu göz önüne alındığında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının köprünün gerçeğe yakın sismik davranışı temsil ettiği görülmüştür. Sonuç olarak yığma türü yapıların sismik davranışının belirlenmesinde doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kullanılmasının önemli olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerden ve elde edilen bulgulardan yığma taş köprülerin yan duvarlarının düzlem içi ve düzlem dışı davranışında yığma birimler arasındaki etkileşimin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle yığma kemer köprülerin yapısal davranışları değerlendirilirken yığma birimler arasındaki etkileşimin göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ABAQUS Theory Manual, version 6.11, HibbittKarlson&Sorensen, Inc 2013.
<https://doi.org/10.1007/s11071-010-9835-y>
- Abdulla, K.,Cunningham, L. andGillie, M. (2017), “Simulating masonry wall behaviour using a simplifiedmicro-model approach”, Eng. Struct., 151, pp. 349-365.
- Akdeniz,Ö.(2011). Tarihi yapıların lineer olmayan dinamik analizi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Ünay,A. (2002). Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı. Türkiye. ODTÜ Mimarlık Fakültesi.
- Aydin, A.,C, Özkaya, S. G. (2018). "Thefinite element analysis of collapse loads of single-Spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge)", Engineering FailureAnalysis,84, pp. 131–138.<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.002>.
- Aoki,A. Komiyama,T.,Sabia,D. VeRivella, D.(2004).TheoreticalandExperimental Dynamic Analysis of Rakanji Stone Arch Bridge, Oita, Japan, 7th International Conference on Motion andVibration Control, August St. Louis, Proceedings, USA, 1-9Modal Analysis, International Earthquake Symposium, Kocaeli, Türkiye, 368-380.
- Bayraktar, A.,Altunışık, A., Türker, T. ve Sevim, B., (2007). *Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin OperasyonelModal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1*, Ankara, Bildiriler Kitabı: 429-440.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C. (2015). "Experimentalfrequenciesand Dampingratiosforhistoricalmasonryarchbridges", ConstructionandBuilding-Materials,75,pp. 234–241, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.044>.
- Bayülke, N.(1992). YığmaYapılar, T.C.İmarveİskanBakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Ankara.
- Beconcini, M.L.,Buratti, G., Mengozzi, M., Orsini, P. (2007). DynamicCharacterization of a Five Spans Historical Masonry Arch Bridge, 5th International Conference on ArchBridges, September , Madeira, Portugal, Proceedings, 399-407.
- Bolhassani, M., Hamid, A.A., Lau, A.C.W. and Moon, F. (2015). “Simplifiedmicro modeling of partiallygroutedmasonryassemblages”, Constr. Build. Mater., 83, 159–173.
- Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B. (2004). Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri. Yapı Dergisi

- Celasun H. (9174). Betonarme Köprüler ve Hesap Metotları. İstanbul, Türkiye, Çağlayan Kitabevi.
- Ceylan,İ.(2013).Kara yolları 13.bölge sınırları içinde yer alan tarihi köprülerin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Mimarlık Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Castellazi,G.,Miranda,S.,Mazzotto, C.(2012).Finite Element ModellingTuned on ExperimentalTestingfortheStructuralHealthAssessment of an Ancient MasonryArch Bridge, Mathematical Problems in Engineering 495019 pp. 18.
- Costa, C.,Arede, A., Morais, M. ve Anibal, A.(2015). Detailed FE and DE Modelling of Stone MasonryArchBridgesfortheAssessment of Load-carryingCapacity, ProcediaEngining, 114, 854-861.
- Çamlıbel, N. (2000). Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, BirsenYayınevi, İstanbul. ArchBridge Spandrel Wall SeparationIdentification, NDT&E International, 28, 6, 377-386.
- Deren, H. (1980). Ahşap Yapı Elemanları Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Drosopoulos, G.A.,Stavroulakis, G.E. veMassalas, C.V. (2008). Influence of the GeometryandtheAbutmentsMovement on theCollapse of Stone ArchBridges, Construction andBuildingMaterials, 22, 200–210.
- Ercan,E.(2010). Tarihi yığma yapıların güvenliklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi İzmir.
- Eurocode 6. (1996). Design of MasonryStructures. EuropeanUnion, Brussel.
- Fanning, P. J.,Boothby, T. E. (2001). "Three-dimensionalmodellingandfull-scaletesting of stonearch bridges", Computersand Structures, 79(29–30), pp. 2645–2662, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00109-2).
- Gürbüz,S.(2012).Kayseri Taş Köprüleri, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat Tarihi Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi Kayseri.
- Jafarov,O., Köksal,H.,Doran,B. VeKarakoç, C. (2012). An Investigation on the nonlinear of unreinforced masonry walls, journal of engineering and natural sciences, 133-143.
- Kara.H.(2009). Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri , güvenliğinin incelenmesi,onarımive güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi , İstanbul.

- Koçak, A.(1999). Tarihi Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Statik ve Dinamik Analizi: Küçük Aya Sofya Camisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (Doktora Tezi).
- Korkmaz,K.,Zabin,P., Çorhoğlu,A.,Nuhoğlu,A. (2013). Taş Kemer köprülerin deprem davranışlarının değerlendirilmesi.
- Kowalewski, Ł.,Gajewski, M.(2015). "Determination of FailureModes in BrickWalls Using Cohesive Elements Approach", Procedia Engineering, 111, pp. 454–461.
- Lourenço P.B. (2001). Assessment of theStabilit yConditions of a CistercianCloister, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Istanbul.
- Lourenço, P. B.,Rots, J. G.(1997). "Multi surface Interface Model for Analysis of Masonry Structures", Journal of EngineeringMechanics, 123(7), pp.660–668, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:7\(660\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(660)).
- Macorini, L.,Izzuddin, B. A. (2011). "A non-linearinterface element for 3D mesoscale-analysis of brick-masonry structures", International JournalforNumericalMethods in Engineering, 85(12), pp. 1584–1608,<https://doi.org/10.1002/nme.3046>.
- Mahrebel,H.(2006).Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Maraş,E.,Haciefendioğlu,K., Birinci,F., Uslu,G. (2006). Tarihi köprülerin dokümantasyonu için dijital fotogrametri ile 3B modellerinin oluşturulması ve dinamik analizlerinin yapılması.
- Malkin, YA.,Isayev, I.A.(2006).Rheology, Concepts, Methods, and Applications, Toronto, , 15-17s.
- Monaco, M.,Gesuado, A., Frunzio, G. (2019). "3D F.E.M. analysis of a Roman arch-bridge", In: Proceedings of the 3rd International Seminar, Guimarães, Portugal, 2001, pp. 591–598. Available at: <http://www.hms.civil.uminho.pt/events/historica2001>.
- Onat,O.,Sayın,E. (2015). Tarihi Tagar Köprüsünün doğrusal olmayan sismik analizi.
- Orhan,S.,Özyazıcıoğlu,S. (2014). Tek açıklıklı dairesel kagir kemer köprülerin göçme yüklerinin limit analiz yöntemleri ile hesaplanması.
- Oliviera, D. V.,Maruccio, C. veLourenço, P. B., September (2007). NumericalModelling of a Load Test on a MasonryArch Bridge, 5th International Conference on ArchBridges, Madeira, Portugal, Proceedings, 577-584.
- Özkaya,G.,Kazaz,İ., Okuyucu,D. (2015). Kemerli yığma köprünün sismik davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi.

- Özmen, A., Sayın, E.(2018). "Seismicassessment of a historicalmasonryrarchbridge", Journal of StructuralEngineering&AppliedMechanics, 1(2), pp. 95–104, <https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01095104>.
- Pelà, L., Aprile, A., Benedetti, A. (2013) "Comparison of seismicassessmentproceduresfor Masonryarchbridges", Construction andBuildingMaterials, 38, pp. 381–394, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.046>.
- Ramos, L. F., De Roeck, G., Lourenço, P. B. ve Campos-Costa, A. (2009). Damage Identification on Masonry Structures Based on VibrationSignatures, Engineering-Structures, 146-162.
- Reccia,E.,Milani,G.,Cecchi,A. VeTrolli,A.(2014). Full 3D homogenizationapproachto Investigate the behavior of masonry arch bridges: TheVenice trans-lagoonrailway bridge, constructionand Building Materials, s:66,567-586.
- Rota, M. (2004). “Seismic Vulnerability of Masonry Arch Bridge Walls”, MScThesis, University of Pavia.
- Sayın,E.,Karatan,M.,Yön,B.,Calayır,Y.(2011).Tarihi Uzunok Köprüsünün yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik analizi.
- Salih, S.A. (2018), “Rate-dependentcohesive-zonemodelsforfractureandfatigue”, PhD Thesis, School of Mechanical, Aerospaceand CivilEngineering, University of Manchester.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Atamtürktür, S., Birinci, F.(2011). "Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations", Nonlinear Dynamics, 63(4), pp. 755–770, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11071-010-9835-y>.
- Solla, M.,Riveiro, B., Arias P. and Caamano, J.C., (2012). A NovelMethodologyforthe StructuralAssessment of Stone ArchesBased on Geometric Data by Integration of PhotogrammetryandGround-Penetrating Radar, EngineeringStructures, 35, 296-306.
- Tetik, T. (2015). Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Toker, Ü. (2004). Mathematical modeling andfinite element analysis of masonryrarch bridge Fen Bilimleri Dergisi s:129-139 ODTÜ Mimarlık Fakültesi Bölümü, Ankara.
- Türker, T.(2005). Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (Yüksek Lisans Tezi).

- Türker,T.,Bayraktar,A., Kocaman,İ., Çoruh,B. (2015). Ölçekli Yığma taş kemer köprü modelinin dinamik davranışının deneysel ve analitik olarak incelenmesi.
- Ulkay, S. (1978). Yapı Bilgisi, YTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı İşliği, İstanbul
- Uray,A.(2018).Tarihi Yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin İznik Yeşil Cami Örneğinde incelenmesi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Yılmaz,P.(2006).Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi Sakarya.
- Zampieri, P.,Zanini, M.A. veFaleschini, F. (2016). Influence of Damage on theSeismic Failure Analysis of MasonryArches, Construction andBuildingMaterials, 119, 343-355.
- Zhang, Y. (2019)."Advanced Nonlinear Analysis of MasonryArchBridges", MScThesis, ImperialCollegeLondon,2015.Availableat:
<https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/29128>.
- Zucchini, A.,Lourenço, P., B. (2006). Homogenization of Masonry Using A Micromechanical Model: Compressive Behaviour, III European Conference on ComputationalMechanicsSolids, StructuresandCoupledProblems in Engineering, June, Lisbon, Portugal.
- URL-1(2019).<https://tr.pinterest.com/pin/593208582139215338/?lp=true>, (08.05.2019).
- URL-2(2019).<https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/adiyaman/gezilecekyer/cenderekoprusu>,(08.08.2019).
- URL- 3 (2019). <https://www.aa.com.tr/tr/kultur-sanat/selcuklu-yadigari-cesnigir-koprusu-turizme-kazandiriliyor/1339789> , (22.05.2019).
- URL-4(2019).<https://www.ensonhaber.com/galeri/osmanlidan-bosna-herseke-miras-mostar-koprusu>, (12.06.2019).
- URL-5(2019).<https://www.comsol.com/blogs/yield-surfaces-plastic-flow-rules-geomechanics/>, (14.06.2019).
- URL -6 (2019).http://kyhdata.deprem.gov.tr/2K/kyhdata_v4.php, (22.06.2019).
- URL -7 (2019).<https://www.bartintso.org.tr/sayfalar/bartincografi-konum> , (22.06.2019).
- URL - 8 (2019).<http://74medya.com/iste-kemerkoprunun-2-asirlik-oykusu/>, (01.07.2019).
- URL- 9 (2019).<https://bluesyemre.com/2019/08/27/turkiye-deprem-tehlike-haritasi-afad-udap/>, (01.07.2019).

ÖZGEÇMİŞ

