

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ DİYARBAKIR DİCLE (ON GÖZLÜ) KÖPRÜSÜ'NÜN  
SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Osman DEMİR

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN  
2019

Her Hakkı Saklıdır.

## Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Hakan YALÇINER danışmanlığında, Osman DEMİR tarafından hazırlanan bu çalışma 20.10.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (3./3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr.Üyesi Yaşar AYAZ

İmza:

Üye : Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İmza:

Üye : Dr. Öğr.Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 04/07/2019 tarih ve 25/9..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY**  
Enstitü Müdürü

### Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsü’nün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi” isimli “Yüksek Lisans” tezini tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

20/06/2019



**Osman DEMİR**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TARİHİ DİYARBAKIR DİCLE (ON GÖZLÜ) KÖPRÜSÜ'NÜN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Osman DEMİR

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Kültürel mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların en önemlilerinden biri de tarihi köprülerdir. Türkiye sınırları içerisinde Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinden günümüze ulaşan çok sayıda tarihi köprü bulunmaktadır. Bu tarihi yapılar deprem gibi doğal afetler, çevresel etkiler ve yetersiz bakım sonucunda zarar görek servis ömrünü doldurmaktadır.

Bu çalışmada Diyarbakır İlinin Merkez Sur İlçesindeki Dicle Nehri üzerinde bulunan tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü Sap2000 programında modellenerek tarihi yapının mevcut sismik performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda her bir deprem kaydına ait yer değiştirme ve gerilme değerleri ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak köprünün sismik davranış sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda; tarihi yapıda meydana gelebilecek maksimum gerilmeler ve yer değiştirmeler belirlenmiştir.

“Tarihi Yapıların Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda” yer alan performans düzeylerine karşılık gelen hesap yöntemleri ve sınır durumlarına göre yapının azaltılmamış deprem yükü (1992, Erzincan) etkisinde performans seviyesine ait bulgular incelenmiştir. Bu bulgular ışığında tarihi köprünün performans düzeyi belirlenmiştir.

**2019, 51 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Dicle (on gözlü) köprü, Tarihi yapılar, Sonlu elemanlar yöntemi, Zaman tanım alanında dinamik analiz

## ABSTRACT

Master Thesis

### ANALYSIS OF HISTORICAL DİYARBAKIR DİCLE (ON GÖZLÜ) BRIDGE BY USING FINITE ELEMENT METHOD

Osman DEMİR

Erzincan Binali Yıldırım University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan YALÇINER

One of the most important historical structures that are an important part of our cultural heritage is the historical bridges. Within Turkey there are many historical bridges that have survived from Roman, Byzantine, Seljuk and Ottoman period. These historical buildings are damaged as a result of natural disasters such as earthquakes, environmental impacts and insufficient maintenance.

In this study, the historical Tigris (Ten Eyed) Bridge on the Tigris River where located in the Central Sur District of Diyarbakır Province was modeled on the Sap2000 program and the current seismic performance of the historical structure was evaluated. As a result of the analyzes made in the time domain, the results of the displacement and tensile values of each earthquake record were compared with each other and the seismic behavior results of the bridge were evaluated comparatively. As a result of the evaluations; maximum tensile and displacements that can occur in the historical structure were determined.

According to the calculation methods and the boundary conditions corresponding to the performance levels in the "Guidelines for the Management of Earthquake Risks of Historical Buildings", the findings of the performance level under the influence of the unstructured earthquake load (1992, Erzincan) were examined. In the light of these findings, the performance level of the historical bridge was determined.

**2019, 51 Pages**

**Keywords:** Tigris (ten eyed) bridge, Historical constructions, Finite element method, Dynamic analysis in time domain

## TEŞEKKÜR

Çalışmamda birikimiyle her daim bana yol ve muazzam bir sabır gösteren değerli ve kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Hakan YALÇINER'e, yardımını ve desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU'na, çalışmalarımda bana çok büyük destek olan değerli arkadaşım Arş. Gör. Mesut KÜÇÜK'e, Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN'a, Arş. Gör. Alper ÇELİK'e, Aqludin KARİMİ' ye, yardımlarını ve dostluğunu her zaman yanımda hissettiğim çok değerli Arş. Gör. F. Pelin BAŞARAN'a, tez konum olan tarihi köprü ile ilgili mimari çalışmalarını benimle paylaşan olan Doç. Dr. F. Meral HALİFEOĞLU'na, çalışmalarım boyunca her zaman desteğini hissettiğim, aileme teşekkürü borç bilirim. Bu tez çalışmamın bu yolda ilerleyecek arkadaşlara ve dostlara yararlı olmasını, katkı sunmasını içtenlikle dilerim.

Osman DEMİR

Haziran, 2019

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	viii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>4</b>
<b>3. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>9</b>
3.1. Yapı Modelleme Prensipleri ve İdealleştirmeler .....	9
3.1.1. Yapı geometrisinin idealleştirilmesi .....	9
3.1.2. Yapı malzemesinin idealleştirilmesi .....	9
3.2. Yapı Modelleme Yöntemleri .....	11
3.2.1. Mikro modelleme yöntemi.....	12
3.2.2. Makro modelleme yöntemi .....	13
3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi.....	14
3.3. Analiz Yöntemleri.....	17
3.3.1. Düşey yükler altında statik analiz .....	18
3.3.2. Dinamik analiz .....	19
3.3.2.1. Modal analiz .....	19
3.3.2.2. Davranış spektrumu analizi .....	19
3.3.2.3. Zaman tanım alanında analiz .....	20
3.3.3. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi .....	21
<b>4. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
4.1. Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsü.....	23
4.1.1. Köprünün konumu ve tarihçesi .....	23
4.1.2. Köprünün mimari incelenmesi .....	24
4.1.3. Köprünün malzeme özelliklerinin belirlenmesi .....	29
4.1.4. Köprünün modellenmesi ve analizi.....	32

4.1.4.1.	Üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	33
4.1.4.2.	Düşey yükler altında statik analiz .....	33
4.1.4.3.	Dinamik analizler.....	35
4.1.4.3.1	Modal analiz .....	35
4.1.4.3.2	Zaman tanım alanında analiz.....	37
4.1.5.	Köprünün performans düzeyinin belirlenmesi.....	42
4.1.5.1.	Taş duvar sistemi basınç dayanımı güvenliği.....	43
4.1.5.2.	Taş duvar sistemi kayma güvenliği .....	44
4.1.5.3.	Yapı maksimum ötelenme kontrolü.....	45
<b>5.</b>	<b>SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>46</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>.....</b>	<b>47</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>.....</b>	<b>51</b>
Ek-1.	Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar .....	51
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>.....</b>	<b>52</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Malzemelerin homojenizasyonu (benzeşimi) (Laurenço 2013) .....	11
Şekil 3.2. Yapıların modelleme teknikleri (Ural 2009).....	12
Şekil 3.3. Sonlu eleman yönteminde düğüm noktaları ve elemanlar (Engin 2000b).....	16
Şekil 4.1. Tarihi dicle (on gözlü) köprüsü'nün konumu .....	23
Şekil 4.2. Döşeme planı (Halifeoğlu vd. 2009a).....	25
Şekil 4.3. Döşeme planı (Halifeoğlu vd. 2009b).....	25
Şekil 4.4. Memba yüzü-rölöve çizimi (Halifeoğlu vd. 2009c) .....	25
Şekil 4.5. Memba yüzündeki piramidal külahlı selyaranlar.....	26
Şekil 4.6. Mansap yüzü .....	26
Şekil 4.7. Mansap yüzü-rölöve çizimi (Halifeoğlu vd. 2009d).....	27
Şekil 4.8. Köprü üzerinde bulunan namazgâh .....	29
Şekil 4.9. Dicle (on gözlü) köprüsü yol kaplaması .....	29
Şekil 4.10. Dicle (on gözlü) köprüsü boyuna kesiti (Halifeoğlu vd. 2009h) .....	31
Şekil 4.11. Dicle (on gözlü) köprüsü enine kesiti .....	31
Şekil 4.12. Analizde kullanılacak numunelerin hazırlanması.....	32
Şekil 4.13. Dicle (on gözlü) köprüsü sonlu eleman modeli .....	33
Şekil 4.14. Dicle (on gözlü) köprüsü'nün şekil değiştirmiş 3D görüntüsü.....	34
Şekil 4.15. Statik analiz, maksimum basınç gerilmeleri .....	34
Şekil 4.16. Statik analiz, maksimum çekme gerilmeleri.....	35
Şekil 4.17. Analiz sonuçlarından elde edilen ilk 5 mod şekli .....	36
Şekil 4.18. 1992, erzincan depremi doğu-batı bileşeni .....	37
Şekil 4.19. Köprünün en büyük yer değiştirmelere sahip şekil değiştirmiş hali.....	38
Şekil 4.20. D noktasının yer değiştirme zaman grafiği.....	38
Şekil 4.21. Erzincan depreminin x yönü çekme gerilmesi değerleri.....	39
Şekil 4.22. Erzincan depreminin x yönü basınç gerilmesi değerleri.....	39
Şekil 4.23. Erzincan depreminin y yönü çekme gerilmesi değerleri.....	40
Şekil 4.24. Erzincan depreminin y yönü basınç gerilmesi değerleri.....	40
Şekil 4.25. Erzincan depreminin z yönü çekme gerilmesi değerleri.....	41
Şekil 4.26. Erzincan depreminin z yönü basınç gerilmesi değerleri.....	41
Şekil 4.27. Statik itme eğrisi ve performans sınır durumları (tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu 2017a) .....	42

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1. Analiz tiplerinin karşılaştırılması (Şen 2003e).....	19
Tablo 4.1. Kemer boyutları (Halifeoğlu vd. 2009e).....	27
Tablo 4.2. Selyaran boyutları (Halifeoğlu vd. 2009f).....	28
Tablo 4.3. Topuk boyutları (Halifeoğlu vd. 2009g).....	28
Tablo 4.4. Analizde kullanılan malzeme özellikleri (Demir vd.) .....	32
Tablo 4.5. Analiz sonuçlarından elde edilen ilk 5 mod için frekans ve periyot değerleri.....	36
Tablo 4.6. Performans seviyeleri (tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu 2017b) .....	43
Tablo 4.7. Yığma duvar malzemesinin basınç dayanımları (tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu 2017c) .....	44
Tablo 4.8. Duvarların başlangıç kesme dayanımları $f_{vko}$ (türkiye bina deprem yönetmeliği, 2018) .....	45
Tablo 4.9. Deprem yükünde taş duvar sisteminde kayma güvenliği .....	45

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

$[D]$	Alan matrisi
$\gamma$	Birim hacim ağırlık
$\varepsilon$	Birim şekil değiştirme
$f_{vk}$	Düşey gerilmelerle duvar karakteristik kesme dayanımı
$f_{vko}$	Eksenel gerilmesiz karakteristik kesme dayanımı
$E$	Elastisite Modülü
$f$	Frekans
$Hz$	Hertz
$f_b$	Kargir birimin standartlaştırılmış ortalama basınç dayanımı
$[M]$	Kütle matrisi
$\sigma$	Normal gerilme
$[K]$	Rijitlik matrisi
$T$	Periyot
$\nu$	Poisson oranı
$\rho$	Yoğunluk
$\sigma_d$	Yük katsayısı ve düşey yükler altında düşey basınç gerilmesi

### Kısaltmalar

SRSS	Karelerinin Toplamının Karekökü
ABS	Mutlak Değerlerin Toplamı
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FEM-DE	Sonlu Eleman Yöntemi ile Ayrık Eleman Yöntemi
CQC	Tam Karesel Birleştirme

## 1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, mazi ile günümüz arasında güçlü bir bağ oluşturmak için, önemli rol oynayan kültürel miras ve zenginliğin birer yansımalarıdır. Geçmişteki politik, ekonomik, sosyolojik ve dinsel yaşam, tarihi yapıların kendisini oluşturur. Tarihi yapılara bakılmaksızın medeniyetleri anlamak ve yorumda bulunmak mümkün değildir. Bu yapılar, medeniyetler için birer hâkimiyet sembolü, yerleşim birimlerini süsleyen birer anıt, geçmişten gelen tecrübe ve teknolojileri daha ileri taşımamızı sağlayan kültürel miraslarımızdır. Günümüzde insanlığın evrensel görevi olarak nitelendirilen kültürel mirasları koruma amaçlarına hizmet etmek için birçok uluslararası örgüt kurulmuştur. Bu minvalde kültür varlıklarınca zengin olan ülkemizin de önemli görev ve sorumluluklarının olduğu göz ardı edilemez.

Ne yazık ki anıt niteliğindeki bu tarihi yapılar deprem gibi doğal afetlerle zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Bununla beraber tarihi yapılara zarar veren etkenler sadece depremler ya da doğal olaylar değildir; yapıda kullanılan yapıyı oluşturan malzemenin dayanımını yitirmesi, zeminde oturmalar, yanlış kullanımdan kaynaklı aşırı ve dengesiz yükleme, zamana bağlı yapı deformasyonları, savaşlar, su baskınları, yangınlar ve zamanında yapılmayan ya da bilinçsizce yapılan bakım ve onarım faaliyetleri, insanların vandalizmi tarihi yapıların yok olmalarının diğer nedenleri arasında yer almaktadır.

Coğrafyamız, geçmişten günümüze çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmış olduğundan dolayı çok farklı sayıda ve türde, kültür varlığını barındırmaktadır. Bu kültür varlıkları çeşitli iklimsel ve çevresel etkilere maruz kalmakta ve gün geçtikçe mukavemetini, gücünü, sağlamlığını yitirmektedir. Sorumluluk sahibi her insan, günümüze miras kalan kültür varlıklarının korunması hususunda gerekli hassasiyeti, özeni ve dikkati göstermelidir.

Geçmiş medeniyetlerin insanlığa bıraktığı kültür yapılarını korumak ve özgün nitelikleri ile gelecek nesillere aktarmak günümüzün en önemli problemleri arasındadır. Bu amaçla tarihi eserlerin yapısal ve işlevsel özelliklerinin bozulmasını önlemek, sağlıklı bir şekilde bizden sonraki kuşaklara aktarılması önem arz etmektedir.

Kültürel mirasımızın önemli bir parçası olan tarihi yapıların en önemlilerinden biri de tarihi köprülerimizdir. Köprüler, uçlarında kenar ayaklara ve bulunuyorsa arada orta ayak kısımlarına oturan bir döşeme plağından oluşmuş sanat yapısı olarak veya aralarında su, arazi, yol veya çukur gibi mani, bulunan iki yakayı birbirine bağlayarak yolu bir uçtan diğerine ulaştırmak amacıyla yapılan kargir, maden veya ahşap yapısı şeklinde ifade edilmiştir (Hasol, 1992). Diğer tanımlarda: aralarında su, arazi, yol veya çukur gibi engeller bulunan ve iki yakayı bağlamak için yapılan yapılardır (Hasol, 1993). Anadolu'da, nehirler ve çaylar gibi yollar üzerindeki engelleri geçebilmek için çok sayıda köprü yapılmıştır. Farklı tarihlerde yapılmış köprülerin birçoğu; tasarımları, malzeme kullanımındaki özen ve işçilikleri, çeşitli süsleme ve yazıtlarıyla anıt özelliği gösterir (İlter, 1978, Tunç, 1978, Çulpan, 2002).

Bu anıtsal taş kemer köprülerin günümüzde inşasında, yapıya uygun taşların ocaktan çıkarılıp uygun ölçülere getirilmesi, yerlerine yerleştirilmesi, kalifiye işçilik gerektirmesinden ve ekonomik olmaması gibi nedenlerden dolayı hemen hemen hiç yapılmamaktadır. (Celasun, 1974).

Yaşadığımız coğrafya ise, asırlardan beri çeşitli uygarlıklara ev sahipliği yaptığı için, hâkimiyet kurmuş olan devletlerin anlayışlarına ve ticaretlerinin istikametlerine göre farklılaşan yollara sahip olmuştur. Bu yollar, kimi zaman siyasi nedenlerle kimi zamanda ticari ihtiyaçlar doğrultularında şekil değiştirmiştir. Bu yol ağlarını genellikle taş kemer köprülerinden oluşmaktaydı. Bu köprüler özünde buldukları yerin konumuna göre iki tipe ayrılırlar: İlk tip olarak; iki veya daha fazla sayıda kemerlerden oluşan, yükseklikleri ile genişlikleri bakımından büyük farklılık olmayan, köprü yolunun düz yâda düze yakın olduğu köprüler, ikinci tip olarak; her iki yandan ortada bulunan geniş ve yüksek asıl kemere doğru güçlü bir çıkışla yükselen dik köprüler örnek gösterilebilir. Köprü tipinin belirlenmesindeki en büyük parametre, nehir ve çayların genişliği ile derinliğidir. Geniş bir nehir veya çayda, yüksek ve geniş açıklıklara ihtiyaç duyulmaz. Köprünün uzamasına ve göz sayısının artmasına sebep olan yatağın yaygın oluşudur.

Bu çalışmada ise, yukarıda açıklanan ilk tip köprü olan iki veya daha fazla kemerden oluşan, Diyarbakır İli Merkez Sur İlçesinde bulunan tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü ele alınmıştır. Bu çalışma sonucunda tarihi köprünün dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile Diyarbakır İlinde tarihi

ipek yolu üzerinde bulunan, on açıklıklı tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün rölövesi elde edilerek geometrik özellikleri belirlenmiştir. Tarihi köprünün taş kemerlerini ve yan duvarlarını oluşturan taşların birim hacim ağırlıklarının ve maksimum basınç dayanımlarının elde edilmesi amacıyla literatürde Diyarbakır tarihi yapıları ile ilgili yapılan benzer çalışmalar araştırılıp, bu çalışmalardan elde edilen malzeme özelliklerinden de faydalanılarak modellemede kullanılacak olan malzeme özellikleri belirlenmiştir. Geometrik özellikleri ve malzeme özellikleri belirlenen köprünün SAP2000 programı kullanılarak modellenmesi yapıp, servis yükleri ve sismik yükler etkisi altındaki analiz çalışmaları yapılmıştır. Dinamik analizler için 1992, Erzincan depreminin deprem-ivme verileri kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde yapının mod şekilleri, doğal frekans değerleri, yapı elemanlarında meydana gelen en büyük yer değiştirmeler, yer değiştirme-zaman grafikleri, maksimum basınç ve çekme gerilmesi değerleri belirlenerek tarihi köprünün deprem performansı değerlendirilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu ve buna benzer çalışmalara ışık tutması ve yol göstermesi amacıyla dünya literatüründe tarihi yapılar ile ilgili yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında da literatürdeki birçok kaynak incelenmiş ve içeriklerine aşağıda kısaca değinilmiştir.

Lourenço, (1996) çalışmasında mikro ile makro modelleme yöntemleriyle kâgir yapılarda doğrusal olmayan davranışları incelemiş, kayma mekanizması ile göçme mekanizmalarına dair bilgi edinmemize olanak sağlamıştır.

Sucuoğlu ve Erberik, (1997) çalışmalarında 13 Mart 1992 tarihinde gerçekleşen Erzincan depreminde, hasara uğramayan üç katlı donatısız yığma bir yapının sismik performansını belirleyebilmek amacıyla, önce deneylerle yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini belirleyip, daha sonra da bu malzeme özelliklerini bilgisayar ortamında oluşturdukları yapı modeline uygulayarak yapının doğrusal olmayan dinamik analizini yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda elde ettikleri tepki davranışını yorumlayıp önerilerde bulunmuşlardır.

Lourenço vd., (1998) yığma yapı panel elemanlarının üzerinde dayanımı belirleyebilmek için, yaptıkları yükleme deneylerinin sonuçlarını ile pratik çözümlerden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlar, bunun sonucunda çekme ve basınç durumlarında farklı değerler veren bir akma ölçütü belirlemişlerdir.

Hatzigeorgiou vd., (1999) tarihi kagir Artha Köprüsü'nü sonlu elemanlarla modellemişler, modele doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler uygulamışlardır. Yapıyı sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek statik ve dinamik etkiler altındaki tepkiler incelenmiş, elastik olmayan modelin köprünün gerçek davranışında belirleyici olduğu gözlenmiştir. Kendi ağırlığı ve deprem yükü etkisinde, hasarın köprünün üst kısmında kemerlerde yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Casolo, (2000) çalışmasında tarihi yığma yapılar üzerinde incelemeler yaparak, yığma duvarların dinamik deprem hareketlerini belirlemiştir. Duvarların farklı yönlerde yapacakları eğilmeler ve düzlem dışı yer değiştirmeler hakkında yorumlar yapmıştır. Farklı yöntemler kullanarak elde ettiği eğriler ile duvarlarda kullanılan malzemelerin davranışlarını göstermiştir.

Frunzio vd., (2001) tarihi bir taş kemer Roma köprüsünün 3 boyutlu sonlu eleman modelini oluşturup, teorik analizlerini gerçekleştirerek dolgu duvarlar ve kemer üstü dolgu duvarlarında gerçekleşen lineer olmayan malzeme davranışlarını incelemişler ve yapıya ait dinamik karakteristikleri belirlenmiştir.

Fanning ve Boothby, (2001) bu çalışmada; İrlanda'da ki Griffith köprüsünün taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini kullanarak, köprü dolgusu Drucker-Prager malzeme modeli, dolgu ile taş arasındaki ara yüz ise sürtünmeli temas varsayımı ile modellemişlerdir. Bulgular sonucu, sayısal modelin gözlem ve deneyler ile uyumlu olduğunu ve gerçek köprü davranışını temsil ettiğini göstermiştir.

Karaveziroğlu vd., (2001) farklı iki teorik yöntem kullanarak tarihi taş kemer köprülerin statik analizlerini gerçekleştirmişler ve her iki teorik yöntem ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile ayrı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda her iki yöntemden elde edilen sonuçların uyumlu oldukları, fakat sonlu elemanlar yönteminin taş köprü analizlerinde kullanılmasının daha uygun bir yöntem olduğu kanısına varılmıştır.

Boothby, (2001) yığma kemer yapıların korunması için yaklaşım yöntemlerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar ile kemer yapıların iki boyutlu plastik ve elastik analizlerle tam olarak modellenemeyen üç boyutlu etkilere maruz kalabileceğini göstermiştir. Ayrı elemanlar ve plastik yöntemleri içeren üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin faydalı olacağını gösterilmiştir.

Özcan Z., (2004) MS. 558-562 yıllarında Sakarya nehrinin eski güzergâhı üzerinde yapılan Tarihi Sakarya (Sangarius) Köprüsü'nü incelemiştir. Bu çalışmasında kullanılan malzeme değişkenleri, yapıya ait olan taş ve bağlayıcı örnekler üzerinde gerçekleşen basınç testleriyle bulunmuştur. Köprü gövdesi 3 boyutlu modeli SAP2000 ile oluşturulup, yapının dinamik analizlerinde sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Yapının sonlu eleman metoduyla, serbest titreşim periyotları ve Marmara depremine yanıtı incelenmiştir.

Toker ve Ünay, (2004) farklı yük durumları altında tarihi bir kemer köprüünün teorik modelleme teknikleri üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda yığma yapım



yöntemiyle inşa edilmiş yapılar için en iyi hesaplama yönteminin sonlu elemanlar yöntemi olduğu kanısına varmışlardır.

Aoki vd., (2004) Japonya'da bulunan 3 açıklı Rakanji taş kemer köprüsüyle ilgili deneysel ve teorik dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu nedenle ilk sonlu eleman modelini oluşturabilmek için ihtiyaç duyulan köprü malzeme özelliklerini belirleme testlerini gerçekleştirmişlerdir. İkinci olarak da köprü 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulup, yapılan analizler neticesinde köprü teorik mod şekilleri ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Daha sonra ise köprü üzerindeki çeşitli ölçüm noktalarından, çevresel titreşimlerin sebep olduğu ivme ölçümleri yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel veriler yardımı ile köprü deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Deneysel yöntemde ise mod şekilleri ve doğal frekansları hesaplayabilmek için zaman tanım alanındaki veri işleme yöntemleri kullanılmıştır. Son olarak da elde edilen deneysel ve teorik dinamik karakteristikler karşılaştırılmış, aralarındaki uyum gözlemlenmiştir.

Ural A., (2005) kemerleri taştan oluşan köprülerin yapı davranışlarını belirlemek gayesiyle Trabzon Coşandere (Kıvalı) Köprüsü'nü SAP2000 analiz programıyla modellemiştir. Oluşturulan modelde 4394 tane 3 boyutlu solid eleman kullanılmıştır. Yapının öz ağırlığından kaynaklı oluşan davranışlarını tespiti için statik analizi, mod şekilleri ve yapı periyotlarını belirlemek için ise modal analizleri yapılmıştır. Yapı modeline 1940 El Centro depremine ait kuzey güney bileşeni etki ettirilerek yapının dinamik etkiler altındaki davranımı izlenmiştir. Analiz sonucunda yapının, kendi ağırlığından meydana gelen gerilmeleri güven ile taşıyabildiği düşünülmektedir.

Zong vd., (2005) dolgu betondan oluşan çelik Beichuan Köprüsü'nü sonlu elemanlar yöntemi kullanarak modelleyip, model üzerinde dinamik ve analitik modal analizler ortaya koymuşlardır.

Şen, (2006) yapmış olduğu çalışmada, Hemdat İsrail Sinagog'unu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak modelledikten sonra deprem etkisini yansıtabilecek şekilde, düşey ve yatay yükler altında doğrusal analizini yaparak yapının mevcut halinin deprem performansını değerlendirmiştir. Ayrıca pencere çerçevesiz ve çerçevesiz olmak üzere farklı iki model daha oluşturularak analizler yapmış, bu analizler sonucunda yapıdaki boşlukların yapının sismik davranışına etkisini incelemiştir.

Salvador Ivorra ve Francisco Pallares, (2006) çalışmalarında beşik tonozlu farklı 3 yığma köprü incelemiştir. Köprüleri non-lineer olarak ele alarak drucker-prager akma kriterini kullanmışlardır. Yapı üzerlerinden geçen araçların ağırlıkları altında yapıların performansını sonlu elemanlar yöntemi ile bularak, köprülerdeki hasarlarla karşılaştırmışlardır.

Bayraktar vd., (2007) çalışmalarında tarihi köprülerde sonlu eleman model iyileştirilmesinin, deprem davranımına etkisini araştırmışlardır. Bunun için Trabzon Akçaabat'taki Şinik Köprüsü üzerinde çalışmışlar, tarihi köprü üzerinde sonlu elemanlar metodu ile üç boyutlu modal analizini yaparak, doğal frekansları ile mod şekillerini tayin etmişlerdir.

Özkul vd., (2007) çalışmalarında, İstanbul'da yer alan tarihi bir kiliseyi incelemiştir. Kilisenin ait sonlu eleman modelini oluşturarak, kilisenin kendi ağırlığı altında ve deprem kuvvetleri altında davranışını incelemiştir. Meydana gelen basınç ve çekme gerilme değerlerinin limit değerlerin altında kaldığı sonucuna varmışlardır.

Ural vd., (2008) ülkemizde yer alan tarihi kemer köprülerin mimari ve mühendislik özelliklerine dair çalışmalar yapmışlar. Çalışmalarında tarihi kemer köprülerin korunmanın ve uygun yenileme proje çalışmalarını geliştirebilmek için, yapıların mevcuttaki durumlarının doğru tayin etmenin önemini anlatmışlardır.

Rafiee vd., (2008) tarihi yığma kemer yapılarıdaki dinamik ve mekanik davranışlarını belirlemek için, bilgisayar modeli oluşturulup model üzerinde yapısal ve kırılma analizleri yapmışlardır.

Karaton vd., (2009) çalışmalarında, Malabadi Köprüsü'nün 1992 Erzincan depremi etkisiyle oluşan doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmişlerdir.

Pelà vd., (2009) çalışmalarında, tarihi kemerden oluşan köprülerin sismik davranışlarını inceleyebilmek için oluşturulan köprü modeli üzerinde doğrusal olmayan statik analiz yapmışlardır.

Bayraktar vd., (2009) Malatya ile Elazığ karayolu arasında yer alan Kömürhan Köprüsü'nün analitik ve deneysel olarak tespiti yapılan dinamik özelliklerinin

mukayesesi için, köprünün modelini SAP2000 analiz programıyla modelleyerek, dinamik özelliklerini analitik olarak ortaya koymuşlardır.

Yıldız ve Koç, (2010) çalışmalarında, Mardin’de yer alan tarihi 8 köprüyü tanıtarak, köprülerin mimarisi çalışmalar içindeki konumunu ortaya koymaya çalışmışlardır.

Sayın vd., (2011) çalışmalarında; Malatya’da yer alan tarihi Uzunok Köprüsü’nü makro modelleme yöntemi ile modelleyerek, köprünün lineer ve lineer olmayan sismik analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada 2003 Bingöl depremi ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Lineer ve lineer olmayan analizler sonucu varılan verileri karşılaştırıp köprünün sismik davranımını incelemişlerdir.



### **3. KURAMSAL TEMELLER**

#### **3.1. Yapı Modelleme Prensipleri ve İdealleştirmeler**

##### **3.1.1. Yapı geometrisinin idealleştirilmesi**

Tarihi yapı geometrisi çok karmaşıktır. Yapıyı ayakta tutan sistem ile dekoratif öğelerin neredeyse aynı olduğu yapı tiplerinde, taşıyıcı elemanlarda dekoratif ayrıntılar ön plana çıkmaktadır. Modelleme yapılırken, yapı elemanlarının geometrisi doğrusal parçalara bölünüp, mimari ayrıntılar yalınlaştırılarak elemanların gerçek modelleri oluşturulmaktadır. Yapının asıl davranımını yansıtabilmek için bu modeller üzerinde idealleştirmeler zorunlu olmaktadır. Geometrik idealleştirmeler ve kabuller konusunda aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi önem arz etmektedir.

- İdeal ve üç boyutlu dikey modeller analizde dengeli olduğundan geometrik sadeleştirmeler mümkün olduğunca basit olmalıdır.
- 3 boyutlu modellemeye göre daha basit oluşturulan ve analizi daha kısa sürede ve kolay gerçekleştirilebilen 2 boyutlu modelleme seçeneği de göz ardı edilmemelidir.
- Kabuk elemanlarda, kalınlıkları boyunca gerilme değişimi incelenemediğinden kabuk elemanların kullanılmasında hususunda dikkatli olmak gereklidir.
- Yapı elemanlarının şekil ve konumlarına uygun yapı davranımına tesir etmeyecek geometrik idealleştirme çalışmaları yapılmalıdır.
- Yapı davranışının daha hangi model iyi temsil ettiğinin anlaşılabilmesi için farklı analitik modeller üzerinde mukayese yapabilmek için farklı seçenekli çözümler tatbik edilebilmektedir (Koçak, 1999).

##### **3.1.2. Yapı malzemesinin idealleştirilmesi**

Malzeme davranımı, gerilme ve şekil değiştirme ilişkisini anlatan matematiksel modelle belirlenir. Uygun analiz modelinin kurulmasındaki en önemli husus malzemeye ait olan matematik modellerin oluşturulmasıdır. Oluşturulan bu matematik modele “esas model” denilmektedir. Esas model, reel davranışların sadeleştirilmiş şekilde ortaya konulmasıdır. Yapıların reel davranımını kavramak için detaylı ve karmaşık malzeme model tipleri kullanılabilir, ancak kullanılan modellerin göçme yüküne yakın neticeler vermediği belirlenmiştir. Günümüzde çokça uygulanan yöntem ise, lineer elastik davranış ile yapının asıl davranımını tahmin edebilecek sağlıklı sayısal aletlerin uygulanmasıdır. Bu aletlerin kullanılması gücün tamamıyla bitmesine gelmeden

yapıda olası gelebilecek yarıma ve kırılmaların tespiti ile uygulanabilirlik seviyesi, göçme sistemleri ve yapının emniyet değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Laurenço, 1998a).

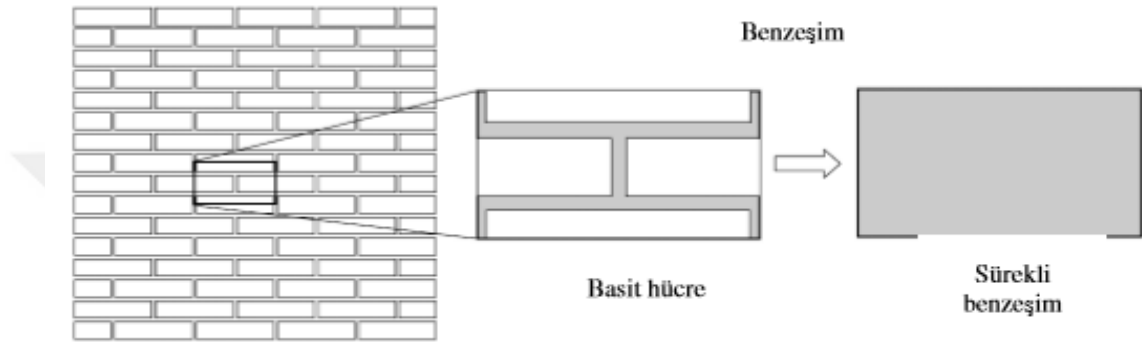
Mühendislikte; statik, mekanik ve analiz yöntemlerine verilen önem, malzeme bilimine gösterilmemektedir. Bu, yapısal analiz çalışmalarındaki gelişmelere malzeme davranışlarının yetişemediği sonucuna da gelir. Bundan dolayı, şimdiki esas malzeme modelleri, sıklıkla yapısal analizin gerçeklik mertebesini de tespit eden bir etmendir. Malzemedeki her bir gerilmenin farklı şekil değiştirmeye karşılık geldiğini anlatan ve  $\sigma/E = \epsilon$  şeklinde Robert Hooke ait olan homojen, elastik cisimleri açıklayan elastisite kuralı, mühendislerce yapının davranımını ve göçme yükünü anlamak için uygulanmaktadır. Güvenli tarafta kalmak için katsayı kullanılsa dahi; deney, tecrübeyle sabit değerlendirme yöntemleri, bazı sorun ve yanlışlığa neden olmuştur. Kâgir yapılar için uygulanmış malzeme davranım çalışmalarına ait araştırmaların sayısı yetersiz olmakla birlikte, şu anki durumda sayısal modeller, yapı değerlendirmeleri ve ihya çalışmaları için yapı davranımının belirlenmesinde önemli bir konuma sahiptir (Laurenço, 1998b).

Kâgir yapılarda malzemeler homojen olmadığından, birbirinden ayrı davranımlar gösterebilirler. Ayrıca, inşa aşamasındaki devamsızlık, farklı çeşitte malzemelerin asıl malzeme yerine kullanılmış olabileceğinden dolayı, bu malzemeler de muhakkak çeşitli mekanik davranımlar gösterecektir. Kâgir yapıların için mekanik nitelikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Mekanik davranışlar homojen olmamaktadır.
- Malzeme eş yönlü olmayıp, yönlerine göre çeşitli davranımlar gösterir.
- Sürekli yükler için çekme dayanımı sıfır olduğu varsayılır.
- Basınç gerilmeleri etkisinde davranışlar kırılığandır.
- Kayma gerilmeleri etkisinde az miktarda sünek davranım gösterir.
- Elemanların asıl rijitlik hesabı yapılırken çatlamış yerler ile elemanlar arasındaki bağ ilişkisi göz ardı edilmemelidir.
- Mekanik davranım lineer olmayıp, çoğu zamanda elastik değildir (Oğuzmert, 2002).

Malzeme idealleştirilmesi yapılırken, özellikle yapının yekpare olarak düşünüldüğü makro modelleme yönteminde aşağıdaki sadeleştirmeler uygulanabilir:

- Homojen ve İzotrop Malzeme: Malzeme homojen olarak kabul edilerek, her yönde benzer davranımları ifade ettiği kabul edilebilir (Şekil 3.1). Bu yaklaşım, jeoteknik mühendisliği uygulamalarında kökleştirilmiş, yığma yapıyı bir katmanlı bir malzeme olarak kabul etmiştir (Zucchini ve Lourenço, 2009).



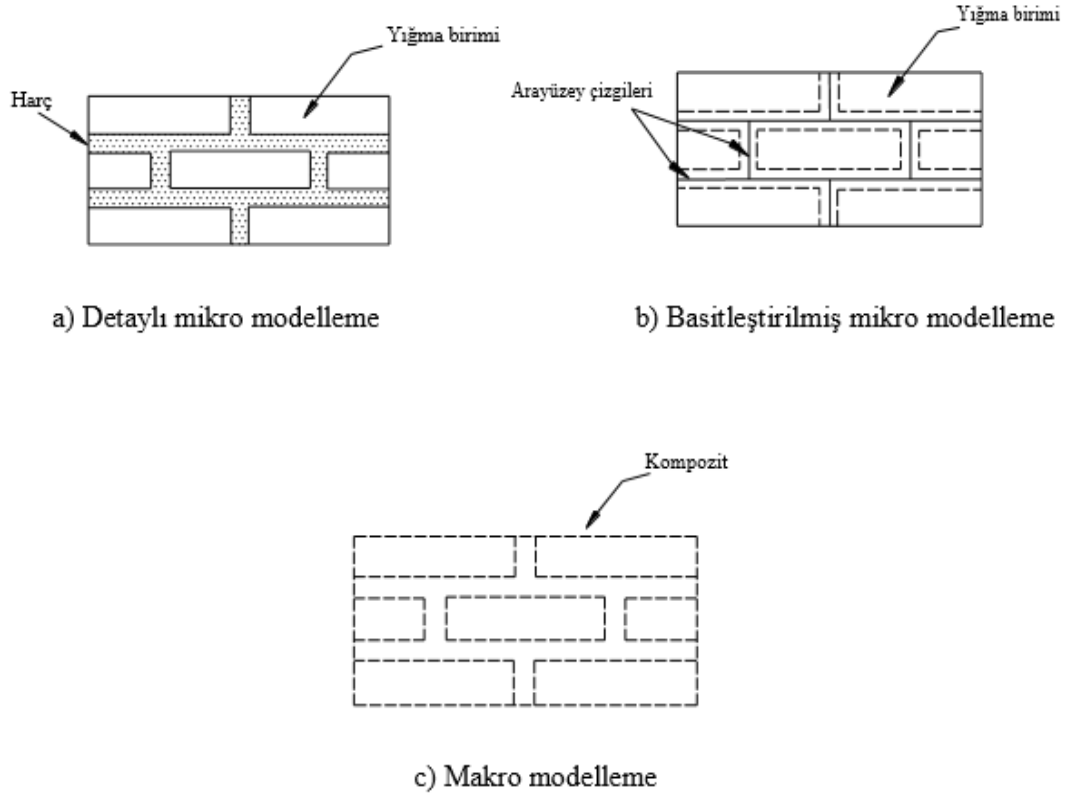
**Şekil 3.1.** Malzemelerin Homojenizasyonu (Benzeşimi) (Laurenço, 2013).

- Lineer Elastik Davranış: Az gerilme altında malzemenin lineer elastik davranım anlattığı kabul edilebilir. Reelde ise kabul edilen basınç etkisinde yeterince tutarlıdır. Çünkü kâgir yapıların kesitleri ölü yük etkisinde oldukça az düzeyde gerilmelere sahiptir. Ancak, çekme gerilmeleri düşük düzeylerde de olsa dahi çatlamalara neden olabilmektedir.
- Çekme Mukavemeti: Kâgir malzemelerin çekme gerilmesi taşıdıkları kabul görebilir. Bu gerçek davranıma zıt görünse dahi çekme gerilmesi meydana gelen kısımları saptamak, olası çatlakların konumları hususunda veriler sağladığı için faydalanılabilir. Ayrıca, çekme gerilmelerinin oluştuğu kısımlardaki malzemeleri modelden çıkarmak kaydıyla, lineer olmayan davranımın tespitinde de mümkün olabilmektedir.
- Lineer Olmayan Davranış: Doğrusal olmayan davranışları, yüksek gerilme değerlerinde göz önüne almak gereklidir. Lineer olmayan davranım genelde Mohr-Cloumb kriteri ile Drucker-Prager kriteri olmak üzere iki kriter şeklinde modellenir (Dabanlı, 2008a).

### 3.2. Yapı Modelleme Yöntemleri

Yığma yapıların modellenmesinde iki temel teknik yöntem vardır. Bu teknikler; mikro modelleme ve makro modelleme teknikleridir. Mikro modelleme yönteminde, bağlayıcı malzemeyi ifade eden harç, taş veya tuğla tek başlarına modelleniyorken, makro modelleme yönteminde ise malzemeler kısım kısım değil yekpare olarak tek bir

malzemeymiş gibi modellenmektedir. Mikro modelleme tekniğinde, elastik ötesi davranışlar arabirim öğelerden oluşur. Rijitliğin azalmasına sebep olan gerilmeler ile yük akışı gülebilir. Arabirim öğeleri için, çeşitli göçme modlarını içeren modeller de geliştirilmiştir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Yapıların Modelleme Teknikleri (Ural 2009).

### 3.2.1. Mikro modelleme yöntemi

Yığma yapıdaki derz kısımları rijitliğin azaldığı yerler olarak görülür. Detaylı bir model çalışmasında, taştan veya tuğladan oluşan kâgir birimler ile derz dolgusunu oluşturan harçlar birbirinden bağımsız modellenerek davranım farklılıkları göz önüne alınır. Derz dolgusunun kâgir birimlere oranla daha güçsüz olmasından dolayı, derz dolgusu üzerinde duran model yöntemi olan mikro modelleme yöntemi, özellikle büyük boyutlu olmayan yapılarda yapı öğelerinin veya yapıların bir kısmının detaylı çözümlemesinde kullanılan teknik yöntemdir. Mikro modelleme yönteminde kâgir yapı birimleri ile harçların mekanik özelliklerinin kesinlikle bilinmesi gerektiğinden modelleme evveliyatında ayrıntılı malzeme çalışmaları gerçekleştirmek gerekmektedir. Mikro modelleme yönteminde; doğrusal olmayan davranım ara birimlerde, beklenen düşey

kırılmalar ise birimin orta kısmında gözlenebilir. Bu yöntemde genellikle önemli bir hesap yüküyle karşılaşıldığından dolayı mikro modelleme yöntemi bölgesel analizler için çokça kullanılır iken, çok büyük yapıların tamamını ele alan çalışmalarda ise seçenek olarak kabul edilmemektedir. Tatbiklerde ise sonlu ve ayırık elemanlar ile limit analiz uygulanarak yapılabilir (Laurenço, 2006a).

Önemli yer değiştirmeler derzler için ve ufak şekil değiştirmeler bloklar için prensibi üzerine kurulu olan ayırık elemanlar metodunda, yapılar farklı blokların katı veya biçimi bozulabilen birleşimi olarak kabul edilir. Her blok geometriye uygun, malzeme olarak modellendikten ve kuvvet tanımları yapıldıktan sonra, zamana sınırlandırılmış hareket denklemleri sayısal olarak çözülür.

Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) ve Ayırık Eleman Yöntemi (FEM-DE) birlikte uygulanabilmektedir. Katı elemanlar sonlu elemanlar yöntemiyle modellenir iken, bağlayıcı harçlardan oluşan derz dolgusu için ayırık elemanlar yöntemi uygulanmaktadır. Önemli yer değiştirmelerin olduğu zamanlarda bu yöntemi uygulamak güçleşir. Uygun malzeme parametrelerini belirlemek bu yöntemde karşılaşılan en büyük zorluktur.

Ayırık elemanlar yönteminin önemli özellikleri şunlardır:

- Rijit ya da şekil değiştiren kitle blokları kullanılabilir.
- Köşe kısımları ile yüzeyler arasında ilişki kurulabilir.
- Yapı öğelerinin birbirleri içerisine girme şansı mevcuttur.
- Dinamik problemler için reel sönüm kat sayısı ya da statik sorunlar için yüksek hayali sönüm kat sayısı kullanılabilir.

Bu yöntemin en önemli üstünlüğünü, makro yer değiştirmelerin yeterli olan bir yöntemle formüle edilerek, özgür hareket edebilme yeteneği oluşturur. Dezavantajları ise, karşılıklı etkilerin düzgün bir şekilde ifade edilebilmesi için fazlaca sayıda bağlantı yüzeyine ihtiyaç duyulması, bunun sonucunda üç boyutlu problemler için çokça zaman gerekmesi şeklinde sayılabilir (Laurenço, 2006b).

### **3.2.2. Makro modelleme yöntemi**

Bu modelleme yönteminde, kâgir birim ve harcın özellikleri çeşitli sadeleştirme uygulamalarına bağlı tutulması kaydıyla kâgir duvarın kompozit bir tek malzeme olarak



kabul edilmesine dayanmaktadır (Şekil 2.2 (c) ). Sadeleştirilerek homojen hale gelen modelin mekanik özellikleri belirlenmektedir.

Makro modellerin kurulması ve tatbik edilmesinde deneysel bilgilerin olmaması ve her yönde eş olmayan malzeme davranımındaki karmaşıklıklar nedeniyle zorluklar ile rastlanılmaktadır. Ehliyetli sayıda çalışmanın yapılmadığı zati modeller, makro modellemenin zorluklarının üstesinden gelmek için yeterli olamamaktadır. Farklı çalışmalarda ise anizotrop malzeme davranımı ile plastisite kavramı ele alınarak kullanılan farklı yönlerde farklı sertleşme ve yumuşama hususiyet gösteren çalışmalar gayet iyi neticeler vermiştir (Laurenço, 2006c). Çalışmalarda da anlaşılacağı üzere makro modelleme yönteminde malzeme tarifleri ve anlamaları, modelin ve model üzerinde yapılacak analizin gerçekliğini tayin eden ana ölçüttür.

### **3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi**

Tarihi yapılarla ilgili olarak birçok çalışma yapılmaktadır. Bunlar; hasarsız ve az hasarlı test yöntemleri, laboratuarlarda yapılan deneysel çalışmalar, yapısal hasarların rölövesi, çatlakların izlenmesi, yapının geçirmiş olduğu onarımlar ve eklentiler, duvar morfolojisi, zemin koşulları, mimari özellikleri vb. ile elde edilen bilgiler ışığında sonlu elemanlar yöntemiyle gerekli analizlerinin yapılmasıdır. Yapıdaki çatlakların izlenmesi ve nem durumunun iklim şartları göre belirlenmesi gibi aşamalar ise yıllarca sürebilecek araştırmalar niteliğindedir. Yukarıda sayılan tüm çalışmaların gerçekleşmesi birçok uzmanın birlikte çalışmasını gerektiren önemli bir husustur. Bu nedenle tarihi yapıların analizleri çoklu bir problem olup hassas ve zamana yayılan, birçok disiplini ortak paydaya getiren çalışmalardır.

Yığma yapıların analizleri bilgisayar teknolojisinin gelişmiş olmadığı zamanlarda basitleştirici kabuller ve bilinmeyen sayısını en aza indirerek çözülmekteydi. Ancak günümüzde bilgisayar teknolojisinin de ilerlemesi ile karmaşık ve büyük modeller nümerik yöntemlerle rahatlıkla çözülebilmektedir. Nümerik yöntemler içerisinde en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir.

Sonlu elemanlar yönteminde çubuk, kabuk, levha, prizma, plak, vb. elemanlara bölünebilen yapının üç boyutlu modeli yakınsama kriterleriyle, yapının serbestlik derecesine bağlı olarak kısa denebilecek bir zaman diliminde çözülebilmektedir. Ayrıca

yapının tamamının belirli parçalara ayrılarak analizlerinin yapılmasına imkân sunulmaktadır. Böylece farklılık gösteren kısımların malzeme özellikleri, serbestlik dereceleri de farklı olarak tanımlana bilmektedir. Bir başka özellik ise yapıların hem lineer olarak hem de non-lineer olarak analizlerinin yapılabilmesidir. Böylece çalışılan modelin analiz sonuçları da gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

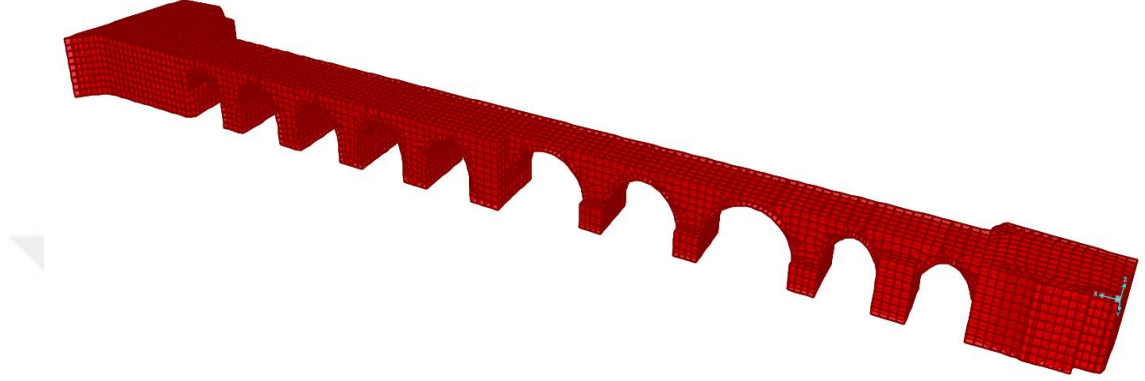
İnşaat mühendisliğinde birçok problemi çözüme kullanılan sonlu elemanlar yöntemi; malzeme hususiyetlerinin ile limit koşullarının başkalıklarını güçlkle karşılaşmadan bağdaştırabilen, kolay kullanımı olan gayet uygun sayısal analiz tekniklerinden birisidir. Aynı zamanda doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme özelliklerini beraber problemde kullanabilen, toplam ve efektif gerilme durumunu gösterecek şekilde formülize edilmiş bir analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislere önemli bir oranda hız kazandırmakta, bilgi, tecrübe ve dikkat ile kullanıldığında kolaylıkla her türlü probleme uygulanabilmektedir (Şenel, 1996a).

Sonlu elemanlar yönteminde; yapı, davranımı önceden tayin edilmiş olan fazlaca sayıda elemanlara ayrılır. Bu eleman öğeleri düğüm noktaları ile yeniden birleştirilirler (Şekil 3.3). Her elemanın düğüm noktalarında serbestlik derecesi kadar bilinmeyen vardır. Elemanların davranışı bilinmeyen serbestlik dereceleri içeren denklemler ile ifade edilir. Yapının matematiksel modeli, düğüm noktalarında ve eleman sınır yüzeylerinde birtakım süreklilik şartlarını sağlandığında elde edilmiş olur.

Böylelikle model, sonsuz serbestlik derecesine sahip bir modele dönüşmüş olur ve bir denklem bulunur. Gerilme analizinde kullanılan bu denklemler düğüm noktalarında oluşan denge denklemleridir. İlgilenilen problem büyüklüğüne sınırlı, fazlaca sayıda hata ve denklem bulunur. Bahsedilen denklemlerin çözümünde ise bilgisayarın kullanımı zaruri duruma gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde ana düşünce daimi fonksiyonları, yerel sürekli fonksiyonlarla ifade etmektir. Bu da elemanlar içerisinde hesaplatılması istenilen büyüklüğün değeri, o elemanın düğüm yerlerindeki değerleri kullanılarak ara değer kestirimi ile bulunacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden sonlu elemanlar metodunda bilinmez ve hesaplanması istenilen değerler düğüm kısımlarındaki değerler olmaktadır. Varyosyonel bir prensip uygulanarak büyüklük alanının düğümlerdeki değerleri için denklem grubu bulunur. Bu denklem takıma ait matris biçimindeki gösterilişi

$$[\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{D}] = [\mathbf{R}] \quad (3.1)$$

şekildedir. Denklemdede  $[\mathbf{D}]$  büyüklük alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör,  $[\mathbf{R}]$  bilinen yük vektörü ve  $[\mathbf{K}]$  ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde  $[\mathbf{K}]$  rijitlik matrisi olarak da bilinmektedir (Engin, 2000a).



**Şekil 3.3.** Sonlu Eleman Yönteminde Düğüm Noktaları ve Elemanlar (Engin, 2000b).

Yapının davranım sisteminin serbestlik dereceleri bilinmezler gibi ele alındıktan sonra, denklemler sırası ile anlatılması mümkündür. Modelin doğru olması, alınan elemanların davranışlarının kabulü ile ağdaki eleman sayısına bağlıdır. Genel itibariyle eleman sayısındaki artış, bilinmeyenlerin sayısını da arttıracığından sonuçların doğruluk ve kesinliğini de arttıracaktır (Bathe, 1967).

Sonlu eleman yönteminin sağladığı çok fazla avantaj vardır. Sonlu eleman yönteminin avantajlarını kısaca sıralamak gerekirse:

- Bitişik öğelerdeki malzemelerin hususiyetleri aynı olamayabilir. Bu özellikler bir kaç malzemenin bir araya getirildiği gövdelerde tatbik etmeye olanak vermektedir.
- Düzenli olmayan limit sınırlarına ehil modeller, kenarları eğri eleman öğeleri kullanılıp çözümlenebilirler.
- Elemanların ebatları kullanıcılarca değiştirilebilir. Böylelikle mühim değişimler beklenen olası bölgelerde, elemanlar daha küçük kullanılarak duyarlı işlemler gerçekleştirilebilirken, model üzerinde öteki bölgeleri büyük eleman öğelerine bölüp işlemlerin hızı yükseltilebilir.
- Sınır koşulları basitçe uygulanabilir.
- Sonlu eleman yönteminin çok yönlülüğü ve esnekliği sofistike yapılar için, alan, sürekli ortam ve diğer sorunlarda neden sonuç ilişkilerini hesaplayabilmek için daha aktif bir biçimde kullanılabilir (Nath, 1993).

Sonlu eleman yönteminde uygulanan temel adımlar şöyle özetlenebilir.

- Taşıyıcı sistem sonlu elemanlarla küçük parçalara bölünür.
- Sonlu elemanların şekil fonksiyonları belirlenir.
- Elemanların matrisleri belirlenir.
- Elemanların matrisleri birleştirilerek sistem matrisleri elde edilir.
- Sınır şartları uygulanır.
- Sistem denge denklemleri çözülür.
- Çözümler ile istenilen değerlerin ileri hesaplaması yapılır (Reddy, 1993).

Sonlu elemanlar yönteminin kullanmanın en sıkıntılı olan kısmı, süreklilikleri alt bölgelere ayırma işlemi ile bilgisayar için hata serbestliği olan veri giriş kısmıdır. Bu işlemler bir yere kadar otomatik olmasına rağmen, bölgelendirmeler esnasında mühendislik yorumunun katılabilmesi için tamamıyla otomatikleştirilememiştir. Veri girişinde meydana gelen hatalar, başlangıçta kabul edilebilir görünen yanlışların ve fark edilmemiş sonuçların elde edilmesine neden olabileceğinden kullanıcılar böyle hataları gözden tekrar geçirerek kontrol etmelidir. Kontrollere ek olarak, veri girişini sağlayan ve bölgelendirilmiş sürekliliğin çizimine olanak veren yardımcı işlemler tercih edilmektedir. Bu çizim veri girişinin çok hızlı bir şekilde kullanıcı tarafından kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır (Şenel 1996b).

### **3.3. Analiz Yöntemleri**

Tarihi yapıların analizinde farklı 3 analiz yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bunlar: Doğrusal, Doğrusal Olmayan ve Plastik Analizdir.

**Doğrusal Analiz:** Malzemelerin lineer elastik davranımına dayanır. Lineer davranış ile yapıda sınır durumlarının analizi yapılabilir. Ayrıca yapıda oluşacak tedrici çatlakların ve hasarların irdelenmesi ile yapıyı kullanılabilme sınır durumları da anlaşılmaktadır. Çatlamış eleman öğelerinin rijitlik durumlarında azaltmalar yapılarak bir daha gerilmelerin dağılımı sayesinde limit yük analizleri de yapılabilmektedir (Şen, 2003a).

**Doğrusal Olmayan Analiz:** Yapıda ilk andan sonra limit duruma gelene dek oluşacak bütün tepkiler ile hasarlar tetkik edilebilir. Yapım dizisi ile daha evvelki yüklemelerin tesirleri de bu çözümleme yönteminde hesaba katılabilir. Yapıda doğrusal olmayan davranışları etkileyen iki etmen mevcuttur. Bunlardan ilki malzemenin elastik ötesi

davranımıdır. Diğeriyse, ikinci mertebeye etkileri olarak bilindik, yüklemeye yapı geometrisinde oluşan varyasyonları dikkate alan etkileri ele alır. Doğrusal olmayan analiz, limit yük analizinde ve kullanılabilirlik analizlerinde uygulanabilir (Şen, 2003b).

**Plastik Analiz:** Yapıların plastik davranım sergilediği temeline dayanan ve limit yük çözümlerinde kullanılan analiz yöntemidir. Plastik mafsallı hipotezine dayanan yapısal bir davranış modeli olup, genellikle doğrulama çalışmalarında kullanılır. Plastik analizde önceden yapılan yüklemelerin tesiri ele alınmıyorken, yüklerin yoğunlaşması hesaba alınabilir ve yüklerin tekdüze artış gösterdiği kabul edilir. Bu yöntem ile alt sınır veya üst sınır teoremleri birine göre uygulanabilir. İtke çizgisi analizi statik bir alt sınır teoremi olarak, plastik mafsallı analizi ise kinematik bir üst sınır uygulaması olarak karşımıza çıkmaktadır (Şen, 2003c).

Analiz yöntemleri, malzeme davranımı ve sonuçlar bakımından farklılıklar gösterebilir. Basit yapılar için, çekme dayanımını sıfır kabul etmek şartıyla lineer olmayan analiz ve limit yük analizi birbirine yakın göçme mekanizmalarıyla neticelenir. Ancak karmaşık yapılar için limit yük analizini yapmak zor olup sonuçlarda hatalar olabilmektedir. Tarihi yapıların analizinde çekme dayanımı mühim bir husustur. Analizde sıfırdan farklı, düşük ya da azalan çekme dayanımı göz önüne alındığında neticesinin güvenilirliği de artmaktadır. Bunun ile birlikte çekme gerilmelerinin değerlendirilmesi basit olmamaktadır (Şen, 2003d). Altta yer alan tabloda analiz yöntemleri ile giriş ve sonuç verileri gösterilmiştir (Tablo 3.1).

**Tablo 3.1.** Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması (Şen, 2003e).

<b>ANALİZ TİPİ</b>	<b>GİRİŞ VERİSİ</b>	<b>SONUÇ VERİSİ</b>
Doğrusal Analiz	Lineer Elastik Malzeme Özellikleri Güvenlik Gerilmeleri	Şekil Değişirme Gerilme Dağılımı
Doğrusal Olmayan Analiz	Malzemenin Elastik ve Mukavemet Özellikleri	Şekil Değişirme Gerilme Dağılımı ve Göçme Mekanizması
Plastik Analiz	Malzeme Mukavemeti	Göçme Mekanizması

### **3.3.1. Düşey yükler altında statik analiz**

Düşey yükler altında statik analiz, düşey yükleme (ölü yükler, hareketli yükler ve kar yükü de dâhil edilebilir) durumlarında yapıda oluşacak yer değiştirme ve gerilme

durumunu görmek amacı ile gerçekleştirilir. Yapının genel olarak düşey yükler etkisinde sıkıntı yaşanmayacağı umulur. Kimi durumlarda yapıda oluşan hasarlar, düşey yüklerin taşınması konusunda dahi sıkıntılara neden olabilmektedir. Bu tür durumların statik analizde dikkate alınması ve olası hasar kısımlarının tespit edilerek, irdelenmesi gereklidir (Dabanlı, 2008b).

### **3.3.2. Dinamik analiz**

#### **3.3.2.1. Modal analiz**

Bir yapıya ait dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar, sönüm oranları ve yapısal deformasyonuna bağlı bir değer olan mod şekillerinin belirlenmesi için yapılan teorik ve deneysel çalışmaların tamamına “modal analiz” denir. Modal analizleri anlayabilmek için öncelikle titreşim teorisini iyi bilmek gerekmektedir. Bir sistemin, başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler etkisi altında göstermiş olduğu tepkiye “titreşim” denir. İki temel titreşim olup, bunlar serbest titreşim ve zorlanmış titreşimlerdir. Bir başlangıç şartı (başlangıç yer değiştirmesi ve/veya başlangıç hızı) ile başlayan daha sonra serbestçe salınmaya bırakılan sistemlerde meydana gelen titreşimlere “serbest titreşim”, değişen dış yükler sisteme etki ettirildiğinde meydana gelen titreşimlereyse “zorlanmış titreşim” denir.

#### **3.3.2.2. Davranış spektrumu analizi**

Sayısal çözümlene ya da kesit etkisi gibi bir sistem parametresinin zamana bağımlı değişimi zaman alanında yer değiştirmeyi verir. Fakat taşıyıcı sistemlerin güvenilirliğinin saptanmasında genel anlamda bu değişkenlerin en büyük değeri tesirli olmaktadır. Bu neden ile uzun ve çok zahmetli sayısal çözümlemelere gereksinim kalmadan, deprem hareketinin spektrumu kullanılarak, en olumsuz değerlerin elde edilmesi çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Spektral eğriler sadece en büyük değerin elde edilmesine yönelik hazırlandıkları ve belirli bir anda çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olamadıkları için, matematiksel bir yaklaşımın oluşturulması zaruri olmaktadır. Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) yöntemi ile bütün modların en büyük katkılarının aynı anda olacağı kabul edilerek, incelenen parametrenin meydana gelebilecek en büyük değerlerinin üst sınırı elde edilmektedir. Lakin bu değer aşırı büyük çıktığı için genellikle kullanılmamaktadır. Karelerinin Toplamının Karekökü

(SRSS) yöntemi ile elde edilen değerin, serbest titreşim frekansları ayırık olan sistemlerde, zaman tanım alanında çözümlemeyle elde edilen sonuçlara çok yakın değerler verdiği görülmüştür. Bu kuralın sınırlamasını kaldıran Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemiye çok daha kapsamlı bir yöntem olup, serbest titreşim frekansları yakın olan sistemlerde de kullanılabilir. Modların karşılıklı etkileşimi ihmal edildiği takdirde Tam Karesel Birleştirme ile Karelerin Toplamının Karekökü Kuralı üst üste düşer (Celep ve Kumbasar, 2004a).

Matematik birleştirme metotlarının kullanılması ile sistemin zaman alanında dinamik analizinin yapılmasına gerek kalmaz. Fakat Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nde sistemin devir, sönüm ve mod şekilleri gibi sistemin dinamik nitelikleri yanında, depremin dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri de kullanıldığından, bu yöntem de dinamik bir yöntem haline gelmektedir. Daha önceki deprem kayıtları temel olarak spektrum eğrilerinin hazırlanmasıyla Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nin başlangıcını belirlemek, zaman tanım alanında adım adım yapılan sayısal çözümlere göre büyük bir kolaylık sağlamaktadır (Celep ve Kumbasar, 2004b).

### **3.3.2.3. Zaman tanım alanında analiz**

Zaman tanım alanı, belirli yönde, belirli zaman aralıkları ile tutulan deprem ivme değerlerinin kayıdır. Zaman tanım alanında analiz yönteminin pratikte başarılı olması, oluşan deprem ivmelerinin düzgün bir şekilde kayda alınmasıyla mümkün olabilmektedir. Depreme maruz kalan bölgelerin deprem kayıtlarının mevcut olması, modelleme ve analizde sırasında hazır verilerin kullanılması bakımından çok sayıda belirsizliği ortadan kaldırıp sismik etkilerin gerçeğe en yakın biçimde temsil edilmesine imkân sağlayabilir. Ancak oluşan her depremin kendisine özgü bir özelliği olduğundan dolayı deprem kayıtlarının mevcut olması tahmini bir depremin yaratabileceği etkileri tam olarak yansıtmaması anlamına gelmez (Doğan, 2005).

Zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilmesindeki en önemli husus, en uygun deprem kayıtlarının seçilmesi ve bu kayıtların analiz yapılacak programda kullanılabilir şekilde ölçeklenebilmesidir. Deprem kayıtlarını üç farklı kaynaktan elde etmek mümkündür. Bunlar; doğal olmayan yollar ile oluşturulmuş ve tasarım ivme spektrumu uyumlu deprem kayıtları, kaynak ve dalga yayılımı özellikleri yapay yolla fiziksel olarak benzeştirilmiş deprem kayıtları ile gerçek depremler sonucu bulunan

kayıtlardır. Yapay olarak oluşturulan deprem kayıtları; geniş bir periyod aralığında, tepki spektrumu elastik tasarım spektrumuna benzeyen yapay kayıtlar meydana getirebilir. Sadeleştirilmiş tepki spektrumundan güç spektral yoğunluk fonksiyonu bulunur ve bu fonksiyonla gelişigüzel faz açıları birleştirilerek sinüzoidal sinyaller türetilir. Bu sinüzoidal hareketler toplanarak yapay kayıtlar elde edilmiş olur. Benzeştirilmiş deprem kayıtları; zemin özellikleri ve yayılım ortamlarını göz önüne alan sismolojik kaynak modellerinden yararlanarak elde edilir. Bunun için ise; elverişli kaynak, zemin özellikleri ve yayılım ortamının tanımlanması gerekir. Gerçek depremler sonucu elde edilen kayıtlar; yer sarsıntısının oluşumu ve özellikleri hakkında sağlıklı bilgileri içerir. Bunun ile birlikte kayıtlara etkisi olan kaynak, zemin ve yayılım ortamı gibi bütün etmenleri de yansıtır. Gerçek deprem kaydının seçilmesi, yapay kayıtlar ile elde edilen sonuçlara göre gerçeğe daha da yakındır. Teknolojinin ilerlemesiyle deprem esnasında alınan kayıt sayılarındaki artış ve bunlara erişimin basitleşmesi zaman tanım alanında yapılması muhtemel çalışmalarda, gerçek deprem kayıtlarını en çok yeğlenen opsiyon durumuna getirmiştir (Seçme, 2009a).

Bir bölgedeki tasarım ivme spektrumuna uygun yer hareketi kayıtlarının tespiti için kullanılan ölçüt bölgenin jeolojikle birlikte sismolojik özelliklerini de ihtiva etmelidir. Depremin büyüklüğü, depremin oluşma tipi, çalışmada ele alınan bölgenin faya olan mesafesi, fayın kırılma yönü, fay şekilleri ile yerel zemin şartlarının bilinmesi gerekmektedir. Benzeştirme için kullanılacak ölçütlerin tespitinden sonra, gerçek deprem kayıtlarına uygulanacak olan ölçekleme çalışmalarının yapılabilmesi için metod belirlenmeli ve yeterli yaklaşımın sağlanıp sağlanmadığı gözden geçirilmelidir (Seçme, 2009b).

### **3.3.3. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi**

Analiz sonuçlarının yorumlanması kuşkusuz yapılan çalışmanın en mühim safhalarındandır. Yapılan teorik ve deneysel analizler neticesinde, yapının emniyet durum tespiti yapılır. Yapının performans seviyelerine uygunluğu kontrol edilir. Bu performans seviyelerine uymadığı takdirde alınması gereken önlemler ile bu önlemlerin uygulama yöntemleri üzerinde durulur.

Değerlendirme bölümünde önerilen yaklaşımlar, çeşitli analizler sonucu elde edilen çalışmaların birbiriyle karşılaştırılması yönündedir. Sonuçların uyumlu olması ya da



uyumsuzlukları yapı hakkında yapılan çalışmalar ve kullanılan analiz yöntemlerinin güvenilirliği konusunda bazı ipuçları verebilir.



## 4. MATERYAL ve YÖNTEM

### 4.1. Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsü

#### 4.1.1. Köprünün konumu ve tarihçesi

Diyarbakır ilinde bulunan tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü, şehrin simgelerinden biri durumuna gelmiş, mimarisi ve boyutlarıyla dikkat çekmektedir. Dicle Nehri üzerinde bulunan ve bundan dolayı çeşitli literatürlerde “Dicle Köprüsü” olarak adlandırılmış olan tarihi köprü, on açıklığa sahip olduğu için yerel halkça “On Gözlü Köprü” olarak bilinir. Eski Silvan yolu güzergâhında bulunduğundan bazı kaynaklarda ise “Silvan Köprüsü” olarak da geçer.

Dicle (On Gözlü) Köprüsü, şehir merkezine 3 kilometre uzaklıkta olup, Diyarbakır’dan gelerek Mardin’e devam eden (eski Mardin yolu), sonra doğuya doğru ayrılan tali yolun bağlantı yerinde, kent merkezini Bağışvar Beldesi ile civar köylere bağlayan noktada bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü’nün Konumu.

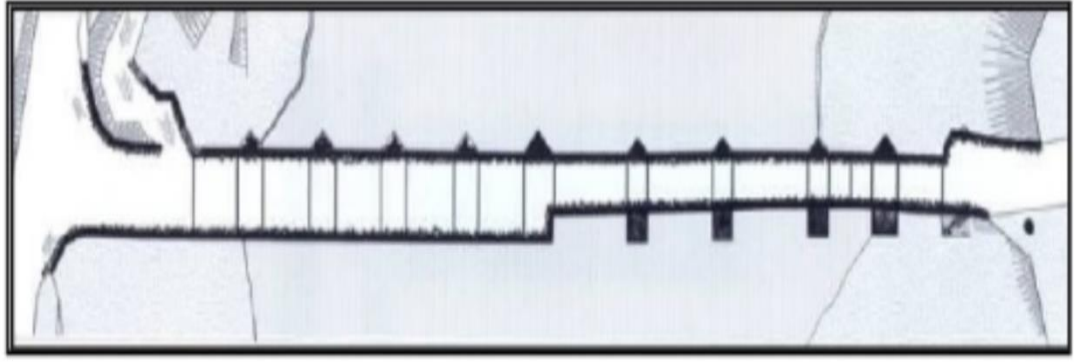
Köprünün ilk yapım tarihi ile ilgili farklı türde görüşler vardır. Bu görüşlerden bazıları köprünün şimdiki yerinde, antik dönemde de bir köprü olduğunu öne sürer. Van Bercheh ve Albert Gabriel de aynı görüşü paylaşmaktadır (Beysanoğlu, 1996).

639 yılında İslam hâkimiyetine giren Diyarbakır'da, Emevi Halifesi Hişam'ın 742-743 yıllarında yıkılmış bir köprüyü onarmaya başladığını, vefatı ile birlikte köprü inşasının durduğunu bildiren bir yazıttan bahsedilir. Rum İmparatorluğu'na ait doğu ordularının 974 yılında Diyarbakır'ı kuşattığı, ancak başarılı olamadan geri çekildiği çekilirken de bu köprüyü yıktırıldığı bilinmektedir (Çulpan 2002). Kaynaklarda bahsedilen köprünün, konumu ve yapım yılı göz önüne alınarak, Dicle (On Gözlü) Köprüsü olduğu düşünülmektedir.

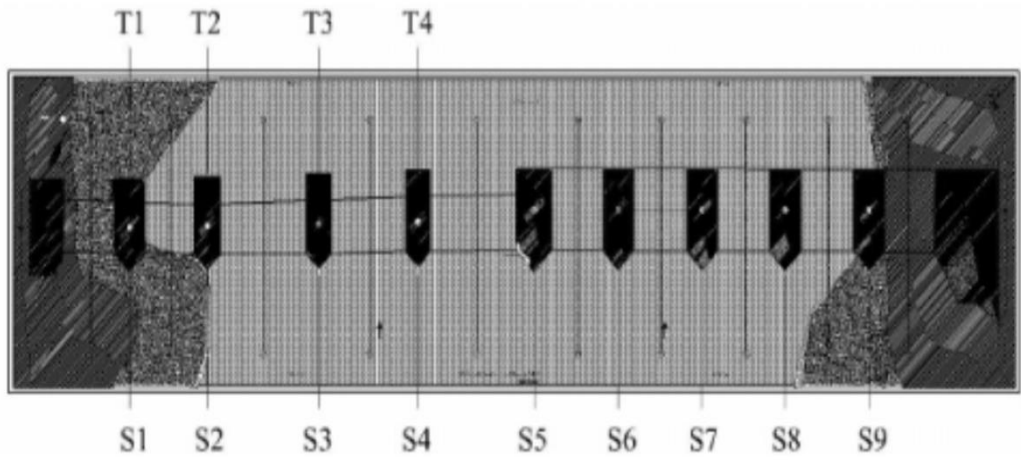
Birkaç defa kısmen veya tamamen yıkılıp yeniden inşa edildiği düşünülen köprünün, yapım yılı olarak bilinen en yakın ve doğru tarih, köprü üzerinde yer alan kitabeden fark edilmektedir. Kitabeye göre; Mervanoğlu Ahmed'in oğullarından biri olan Emir Müeyyid Devle Kasım Nasır, köprünün inşasını emrederek köprüyü Kadı Ebu'l Hasan Abdulvahid bin Muhammed'in vasıtası ile hicri 457 (1065) yılında Ubeyd Bin Sacer'e yaptırılmıştır. Kitabelerce anlaşılan en eski tarihli İslam Köprüsü'nün Dicle (On Gözlü) Köprüsü olduğu anlaşılmaktadır (İlter, 1978).

#### **4.1.2. Köprünün mimari incelenmesi**

Dicle (On Gözlü) Köprüsü, çok gözlü ve düz tabliyeli köprüler grubunda değerlendirilmektedir. Köprünün uzunluğu 172 m olup, genişliği ise ilk beş gözde 5,45-6,24 m arası, beşinci gözden itibaren artarak, 9,69 m-10,20 m arasındadır. Köprü yolu yapılan yenileme çalışmaları sonucunda mevcut halinde orijinal döşeme taşlarıyla kaplıdır. Parapet yüksekliği kenarlarda 85 cm, ortalara doğru 155 cm'ye kadar ulaşmaktadır. Harpuştaların yüksekliği ise 31 cm, genişliği 71 cm, alın kısmı 7 cm'dir (Şekil 4.2). Köprünün ortasına yakın bir noktada, köprünün daraldığı yerde, mansap yüzündeki parapetin iç kısmında bir namazgah bulunur (Şekil 4.8).

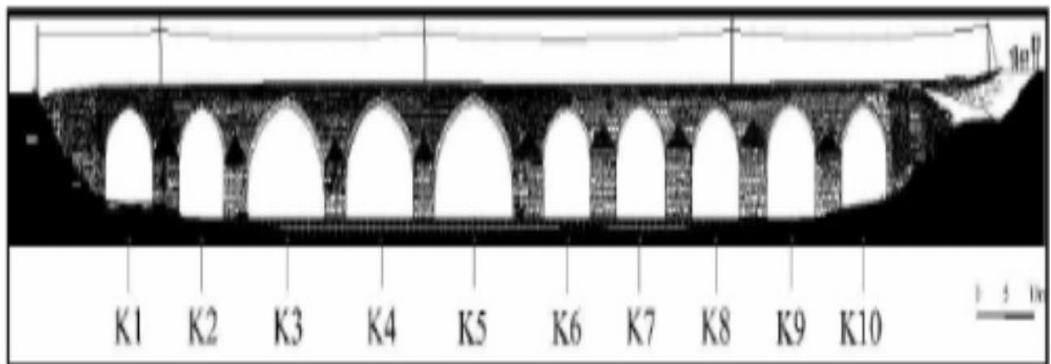


Şekil 4.2. Döşeme Planı (Halifeoğlu vd. 2009a).



Şekil 4.3. Döşeme Planı (Halifeoğlu vd. 2009b).

Köprünün 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10 numaralı gözlere ait kemerler, birbirine yakın genişlik ve yüksekliktedir. 3, 4 ve 5 gözlere ait kemerlerde ise genişlik ve yükseklik daha fazladır (Şekil 4.4, Şekil 4.5, Tablo 4.1, Tablo 4.2, Tablo 4.3).



Şekil 4.4. Memba Yüzü-Rölöve Çizimi (Halifeoğlu vd. 2009c).



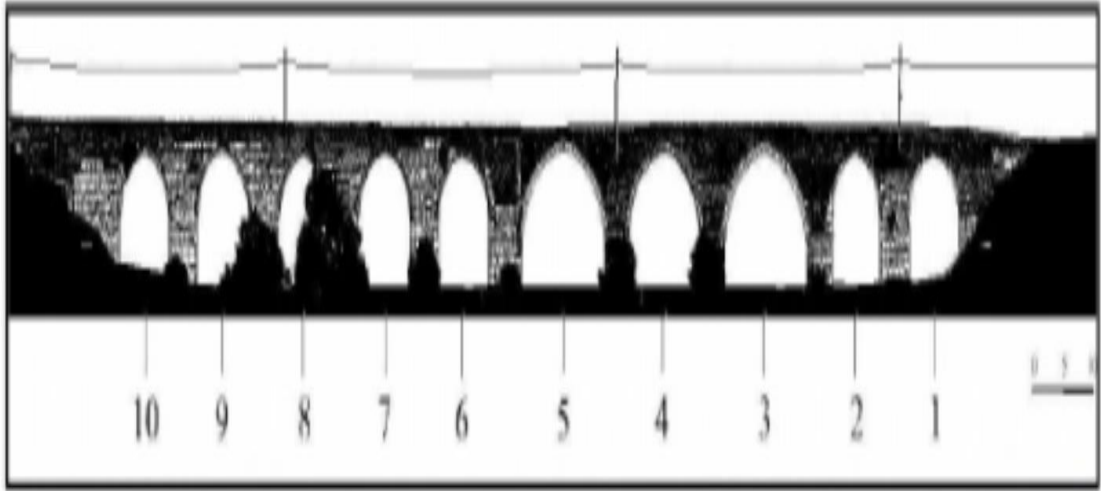
**Şekil 3.5.** Memba Yüzündeki Piramidal Külahlı Selyaranlar.

Köprü'nün kuzey cephesi yönünde (membra yüzü) 9 adet piramidal külahlı selyaran bulunmaktadır. 1, 2, 3 ve 4 nolu selyaranlar (S1, S2, S3, S4), diğerlerine göre daha alçaktır (Tablo 4.2). Ayrıca 6, 7, 8, 9 ve 10 nolu gözlerin tempan duvarları, yarı yüksekliğe kadar eski yapım özelliğini devam ettirdiği görülmektedir. Fakat 1, 2, 3, 4 ve 5 nolu gözlerin tempan duvarlarında farklı bir taş işçiliği uygulanmıştır (Şekil 4.4, Şekil 4.5, Tablo 4.2, Tablo 4.3).

Köprü'nün güney cephesi yönünde (mansap yüzü), kuzey cephede olduğu gibi düz bir cephe duvarına sahip değildir. 1, 2, 3, 4 ve 5 nolu gözlerin kemerleri yaklaşık 4 m civarı içerdedir. Bu kısmının sonradan yıkıldığı ve yapılan tamiratlar sonucunda daha içeriden yapıldığı, köprü'nün mevcut durumunun incelenmesi sonucu üzerindeki ipuçlarından tespit edilmiştir (Şekil 4.6).



**Şekil 4.6.** Mansap Yüzü.



Şekil 4.7. Mansap Yüzü-Rölöve Çizimi (Halifeoğlu vd. 2009d).

Tablo 4.1. Kemer Boyutları (Halifeoğlu vd. 2009e).

KEMER BOYUTLARI										
Kemer Adları	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
Kemer Açıklığı										
Memba	848	804	1384	1197	1392	838	873	845	859	815
Mansap	823	801	1377	1193	1380	839	873	845	859	815
Kemer Yüksekliği										
Memba	498	501	797	697	776	477	474	553	493	492
Mansap	482	486	798	676	769	477	493	533	493	491

**Tablo 4.2.** Selyaran Boyutları (Halifeoğlu vd. 2009f).

<b>SELYARAN BOYUTLARI</b>									
	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>
<b>a</b>	258	192	179	190	281	283	246	249	242
<b>b</b>	221	191	196	200	283	245	243	246	239
<b>c</b>	389	322	282	297	362	295	300	340	322
<b>d</b>	391	322	282	297	362	295	300	337	325
<b>e</b>	316	256	282	233	247	193	194	239	201
<b>f</b>	417	479	480	483	527	608	605	625	569
<b>g</b>	528	479	480	483	527	603	605	625	512
<b>h</b>	450	479	480	483	527	611	605	625	540

**Tablo 4.3.** Topuk Boyutları (Halifeoğlu vd. 2009g).

<b>TOPUK BOYUTLARI</b>				
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>a</b>	338	354	361	344
<b>b</b>	469	400	379	380
<b>c</b>	285	369	404	371
<b>d</b>	265	226	219	210
<b>e</b>	260	233	219	211
<b>f</b>	118	115	110	92
<b>g</b>	865	356	282	392
<b>h</b>	849	356	382	392

Köprü üzerinde birbirinden farklı şemalar halinde 29 çeşit taşçı işareti bulunmaktadır. Bunlar dışında blok halinde farklı iki işaret dizisi vardır. Bunlardan ilki; Latince K, O ve E harflerinin alt alta sıralandığı işaret dizisidir. Diğeri ise; yan yana, alt alta ve çapraz işlenmiş noktalama bloklardan oluşmaktadır. Taşçı işaretlerinin yapım nedeni, taş ocağından çıkarılan taşların hesaplanması, farklı türden mermer taşların ayrıştırılması, mermer ticareti yapan tüccarların tanımlanması ve taşları işleyen sanatçıların kendilerini ifadesi etmesi olarak tanımlanabilir (Bakırer, 2002).



**Şekil 4.8.** Köprü Üzerinde Bulunan Namazgah.



**Şekil 4.9.** Dicle (On Gözlü) Köprüsü Yol Kaplaması.

#### **4.1.3. Köprünün malzeme özelliklerinin belirlenmesi**

Dicle (On Gözlü) Köprüsü genelinde yöresel malzeme olan bazalt taşı kullanılmıştır. 6, 7, 8, 9 ve 10 nolu gözlerde, kemerlere kadar olan kısımlarda, yarı yüksekliğe kadar bazalt taşı düzgün kesilerek kullanılmıştır. Kemer kilit taşı ve yer yerde kemer üzengi taşı seviyesinden harpuştaya kadar onarım izi olarak gözlenen moloz taşı kullanıldığı görülmektedir. Kesme taşların düzgün bir yapıya sahip olması sebebiyle bu bölümlerde harç malzemesi çok ince kullanılmıştır. Kemer iç kısımlarında tuğla malzeme oldukça nizami bir şekilde kullanılmıştır.

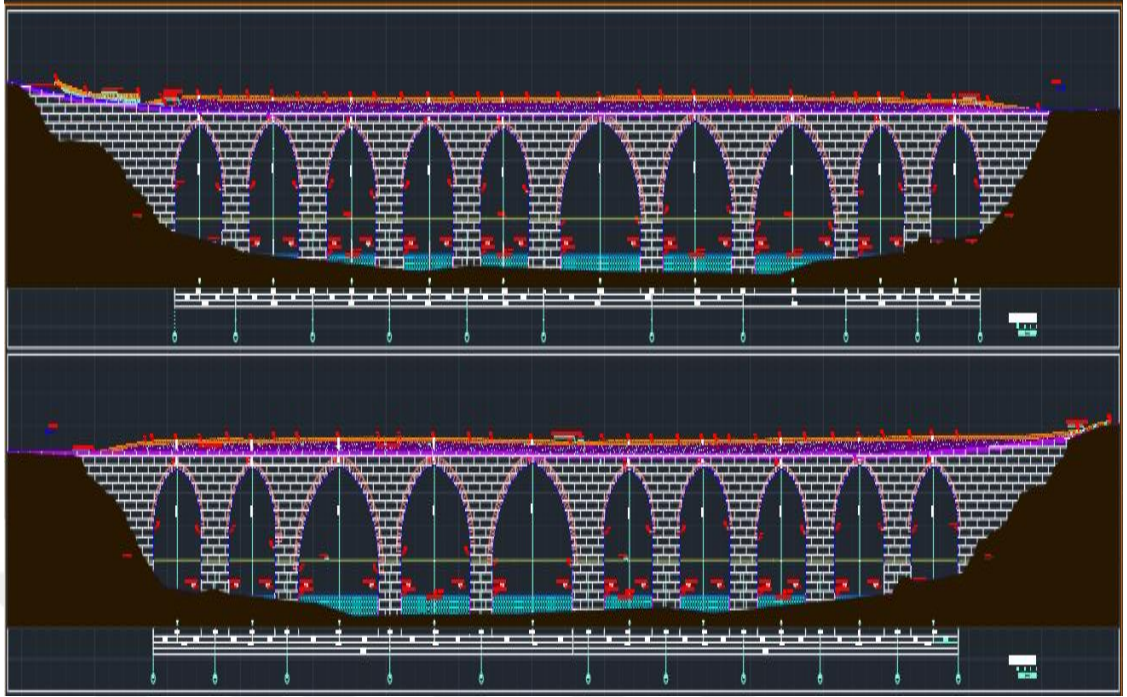


Ayrıca 1 ve 2 nolu gözlerin kemer taşlarında kalker taşı düzgün bir şekilde kesilerek kullanılmıştır. Malzeme analizleri sonucunda; yöresel malzeme olarak bazalt taşı, kalker taşı ve tuğlanın, yakın zaman onarımlarında ise özgün döşeme için doğal taş kullanıldığı görülmektedir.

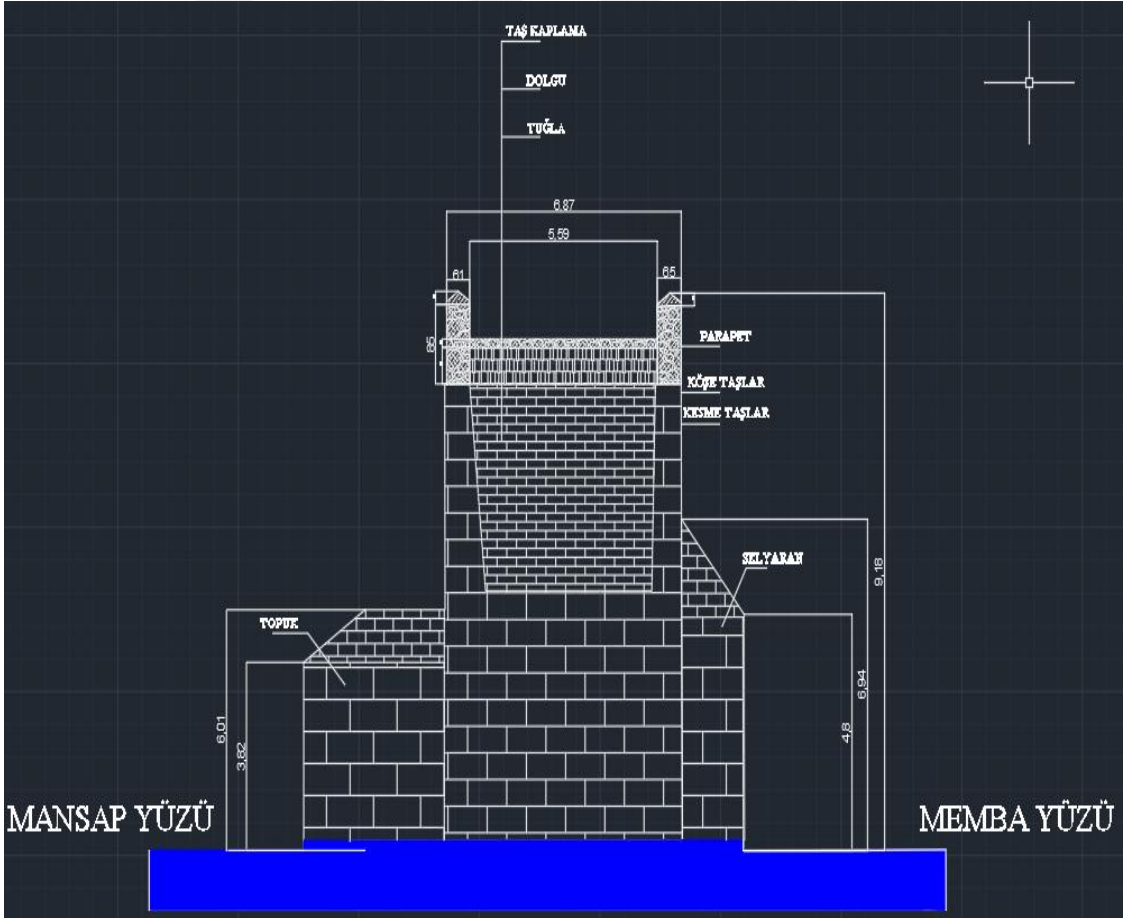
Tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılması için yapılacak mühendislik çalışmalarında yapı davranışlarının ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kompozit özellikte olması ve benzer elemanların farklı malzeme özellikleri göstermesi nedeniyle yapı malzeme karakteristiğinin belirlenmesi oldukça güçtür. Malzeme özelliklerinin bilinmesi yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi içinde önemlidir. Yapının sismik davranışlarını düşey taşıyıcı elemanların rijitliği belirlemektedir.

Yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken malzeme özellikleri ne kadar doğru seçilir ise, oluşturulan modelin gerçek yapıyı ve yapının gerçek davranışlarını temsil etme olasılığı o kadar artacağından dolayı yapıyı oluşturan elemanlara ait malzeme özelliklerinin seçilmesi modellemede hayati önem taşımaktadır. Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor ve pahalı bir işlem olmakla birlikte kimi zamanda tarihi açıdan değerli olan bu yapıları yıpratıcı sonuçlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada tarihi köprünün kemerleri, selyaranları, topukları ve yan duvarlarını oluşturan taşların birim hacim ağırlıklarının ve maksimum basınç dayanımlarının elde edilmesi amacıyla literatürde tarihi köprüler ile ilgili yapılan benzer çalışmalar araştırılıp, 2016 yılında İstanbul'da gerçekleştirilen köprü konferansında ele alınan Türkiye'de Tarihi Dicle Köprüsü'nün yapısal ve sismik değerlendirilmesi ayrıca Diyarbakır yöresindeki bazalt taşı ve Karacadağ bazaltı ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen malzeme özelliklerinden de faydalanılmıştır (Kahveci, 2008; Birinci, 2010; Gümüüşü ve Turgut 2012; Demir vd. 2016).

Tarihi köprüyü oluşturan elemanların kesit görünüşleri ve yapıyı oluşturan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi için yapı etrafından geçmişte yapıya ait olduğu düşünülen ve numune olarak alınan malzemelerin daha sonra yapı modellenirken analiz işlemlerinde kullanılmak üzere hazırlanışı verilmiştir (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12).



Şekil 4.10. Dicle (On Göz) Köprüsü Boyuna Kesiti (Halifeoğlu vd. 2009h).



Şekil 4.11. Dicle (On Göz) Köprüsü Enine Kesiti.



**Şekil 4.12.** Analizde Kullanılacak Numunelerin Hazırlanması.

Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere malzeme parametreleri köprüye ait daha önce yapılan çalışmalardan belirlenmiş olup, bu değerler temel alınarak analiz yapılmıştır. (Tablo 4.4).

**Tablo 4.4.** Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri (Demir vd. 2016).

Malzeme	Elastisite Modülü (Mpa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kN/m <sup>3</sup> )
Taş	3500	0,2	16
Tuğla	3000	0,3	12
Köşe Taşlar	2500	0,2	14
Dolgu	500	0,05	12

#### 4.1.4. Köprünün modellenmesi ve analizi

Bu çalışmada, çok gözlü yığma taş köprülerin dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla, Diyarbakır İlinin Merkez Sur İlçesindeki Dicle Nehri üzerinde tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü çalışılmıştır. Tarihi köprü, SAP2000 programı ile çeşitli geometrilerdeki yapı öğelerinin kesit ve malzeme niteliklerinin rahatlıkla tanımlanabildiği çözümlenebilir metod olan Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak

modellenmiştir. Matematiksel modelin kendi ağırlığından oluşan davranışlarının belirlemek amacı ile statik analiz, yapı periyotlarının ile mod şekillerinin tespiti hedefiyle modal analizleri ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla, 13.03.1992 Erzincan Depremi ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.1.4.1. Üç boyutlu sonlu eleman modeli**

Sonlu elemanlar yönteminde, yapının veya yapı öğelerinin geometrisi sonlu sayıda düğüm noktasıyla belirlendiğinden dolayı Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün sonlu eleman modeli oluşturulurken yapı davranışının doğru biçimde tespiti amacıyla fazlaca düğüm noktası kullanılmıştır. Yapılan sonlu eleman modelinde 12937 katı (solid) eleman ve bu elemanları oluşturmak içinde 17541 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Bu çalışmada köprü tabanındaki serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de boyutları ile kesit özellikleri verilen tarihi Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nü oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 4.13'te görünmektedir.

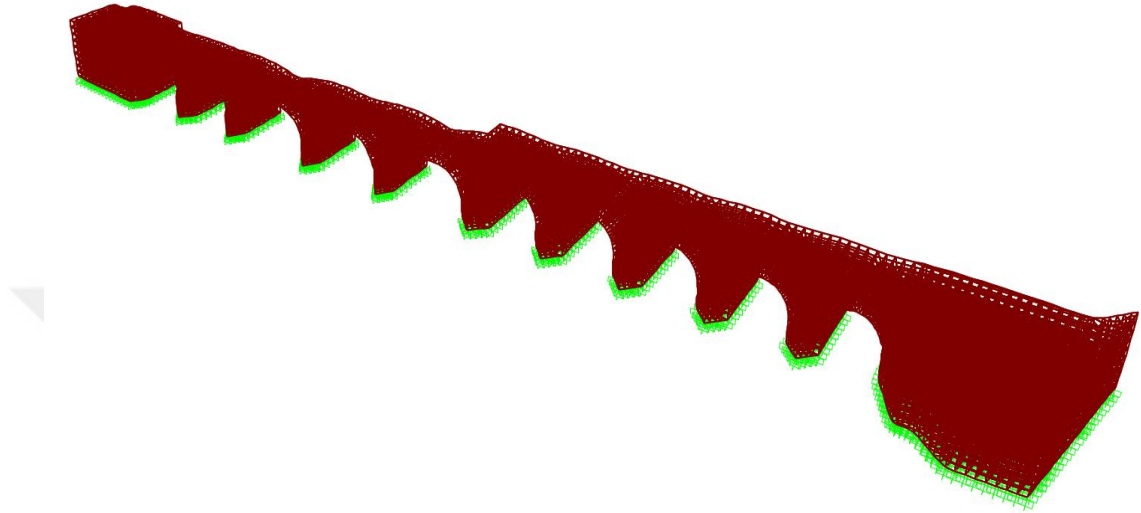


**Şekil 4.13.** Dicle (On Gözlü) Köprüsü Sonlu Eleman Modeli.

#### **4.1.4.2. Düşey yükler altında statik analiz**

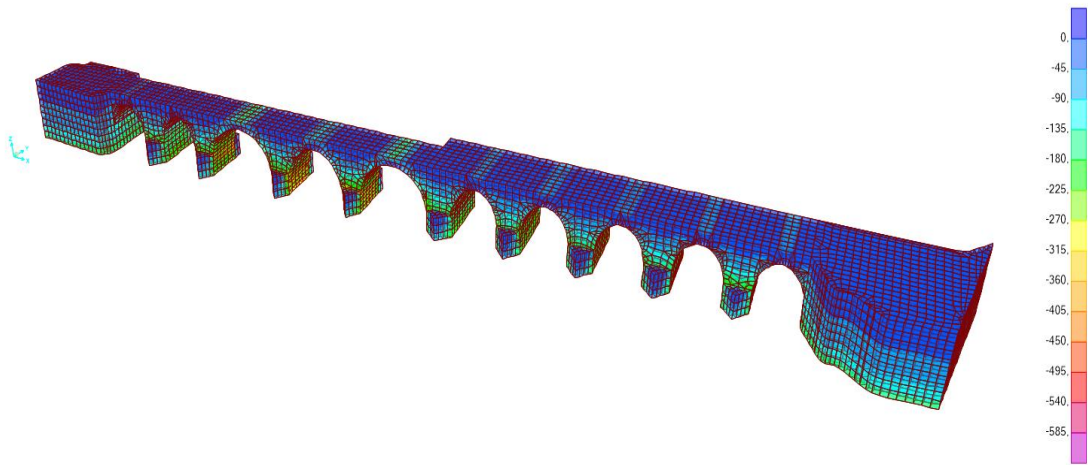
Düşey yükler altında statik analiz, düşey yükler etkisinde yapıda oluşan gerilme dağılımı ve yer değiştirmeleri değerlendirmek hususunda önem arz etmektedir. Genelde her yapının düşey yükleri sorunsuz bir şekilde taşıması beklenmesine rağmen, olası düşey yükleri taşımadaki sorun ve problemleri bu analizle rahatlıkla görülerek gerekli önlemler alınabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, ölü yükler malzeme birim ağırlıklarıyla tanımlanmıştır. Hareketli yükler ile kar yükü hesaba katılmamıştır. Yapılan statik analiz sonucunda köprünün şekil değiştirmiş 3 boyutlu görüntüsü, maksimum basınç gerilmeleri ve maksimum çekme gerilmeleri diziniyle Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



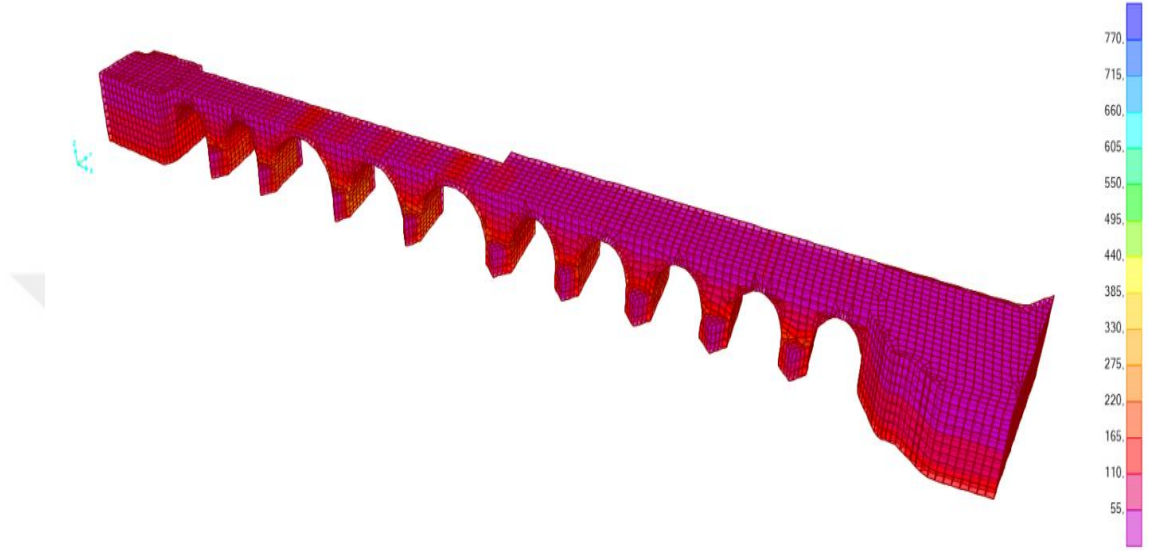
**Şekil 4.14.** Dicle (On Gözlü) Köprüsü’nün Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü.

Yapılan statik analiz sonrasında en büyük yer değiştirmeler düşey 3 eksen (z eksen) doğrultusunda olup köprünün kemer ayaklarında ve dolgu duvarlarda olup özellikle genişliği ve yüksekliği daha fazla olan 3, 4, 5 nolu gözlere ait kemer ve ayaklarında gerçekleşmiştir. En büyük yer değiştirme miktarının 0,852 mm değerinde olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.15.** Statik Analiz, Maksimum Basınç Gerilmeleri ( $\text{kN/m}^2$ ).

Statik analizde maksimum basınç gerilmeleri dağılımına bakıldığında en büyük gerilmelerin taş kemerlerin köprü ayağı ile birleştiği noktalarda ve köprü ayaklarının alt kısımlarında meydana geldiği görülmektedir. En büyük gerilme değeri  $618,1 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.16.** Statik Analiz, Maksimum Çekme Gerilmeleri ( $\text{kN/m}^2$ ).

Statik analizde maksimum çekme gerilmeleri dağılımına bakıldığında en büyük gerilmelerin köprü kenarlarının alt uç noktalarında ve köprü ayaklarının kemer ile birleştiği iç noktalarda olduğu görülmektedir. En büyük gerilme değeri  $801,3 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunmuştur.

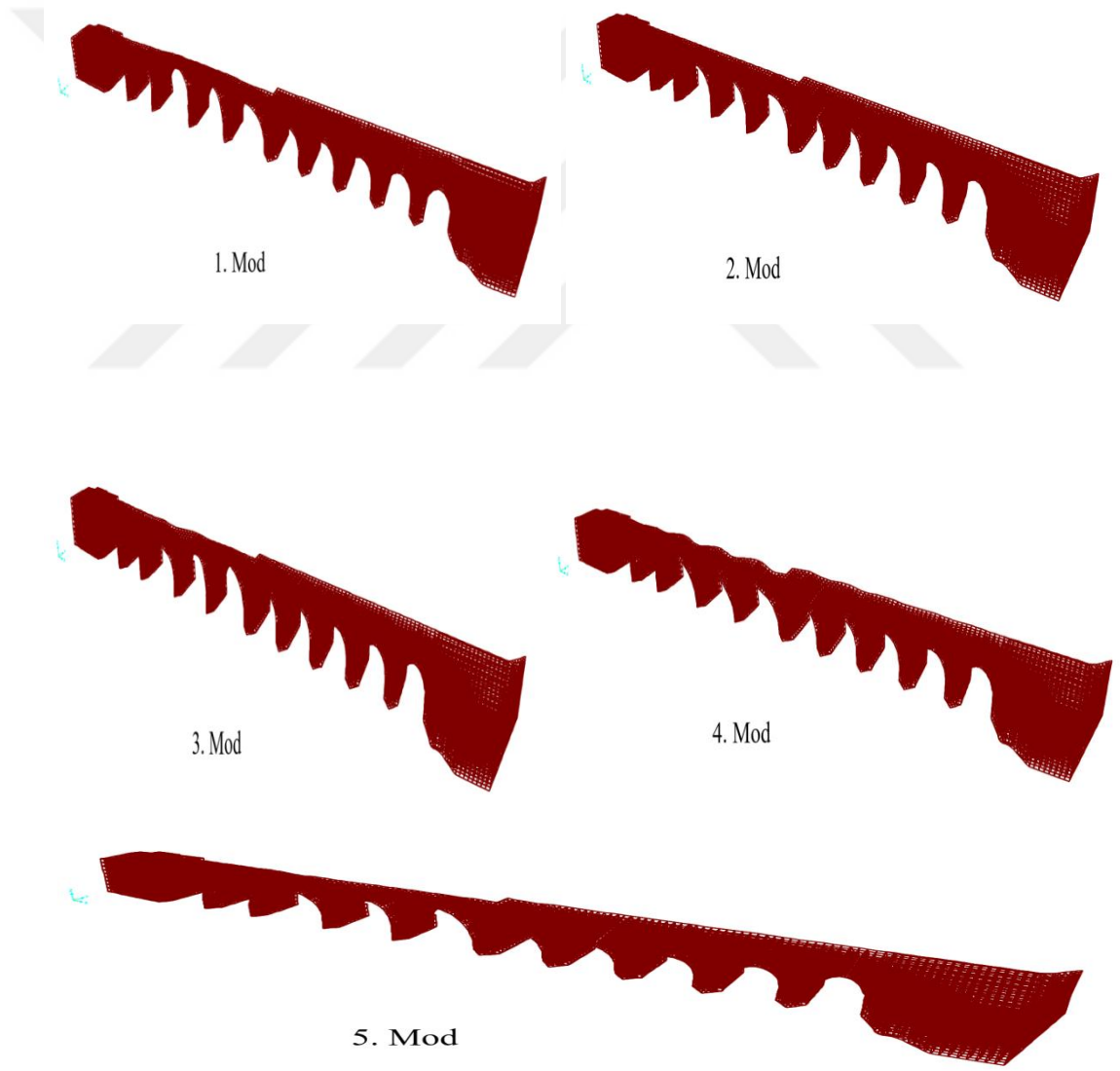
#### **4.1.4.3. Dinamik analizler**

##### **4.1.4.3.1 Modal analiz**

Yapılan modal analiz sonucunda Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün ilk beş modu dikkate alınarak köprü dinamik karakteristikleri olan doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen periyot değerleri Tablo 4.5'de ve mod şekilleri Şekil 4.17'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.5.** Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk 5 Mod İçin Frekans ve Periyot Değerleri.

Mod Sayısı	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	8,740	0,114
2	9,229	0,108
3	10,165	0,098
4	10,378	0,096
5	11,560	0,086

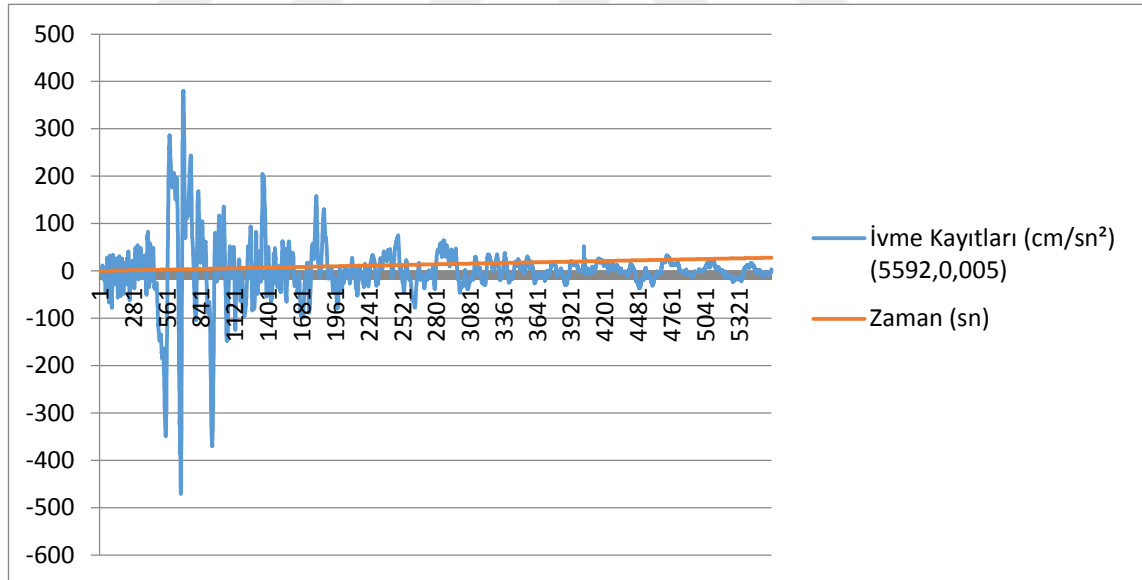


**Şekil 4.17.** Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk 5 Mod Şekli.

Analiz sonuçlarına bakıldığında ilk beş doğal frekans değerlerinin 8-12 Hz arasında olduğu görülmektedir. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekillerine bakıldığı zaman ise birinci ve ikinci modun y doğrultusunda yanal mod, üçüncü ve dördüncü modun x doğrultusunda yanal mod, beşinci modun ise z doğrultusunda düşey mod olduğu görülmektedir.

#### 4.1.4.3.2 Zaman tanım alanında analiz

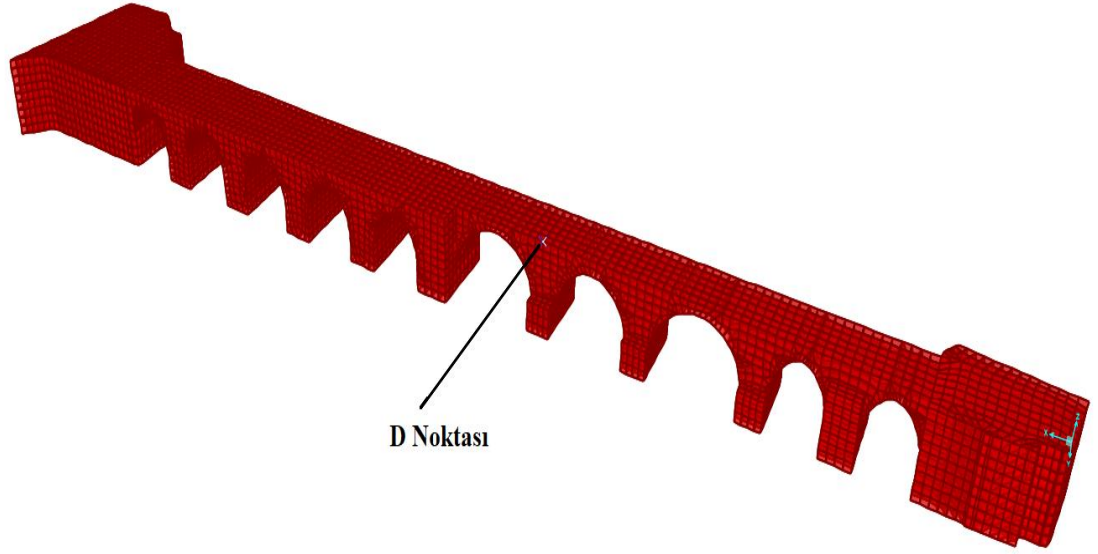
Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme tekniği ile oluşturulan model üzerinde, zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Model üzerinde 13 Mart 1992 Erzincan depreminin Doğu–Batı Bileşeninin deprem ivme kayıtları kullanılarak bu yapının dinamik etkiler altındaki davranışı izlenmiştir. En büyük ivme kaydı 3,395’inci saniyede elde edilen  $-470,915 \text{ cm/sn}^2$ ’dir. Kullanılan deprem ivme-zaman grafiği Şekil 4.18’de gösterilmiş olup, analizler deprem süresi olan 27,96 saniye boyunca elde edilen ivme kayıtları için yapılmıştır.



Şekil 4.18. 1992, Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni.

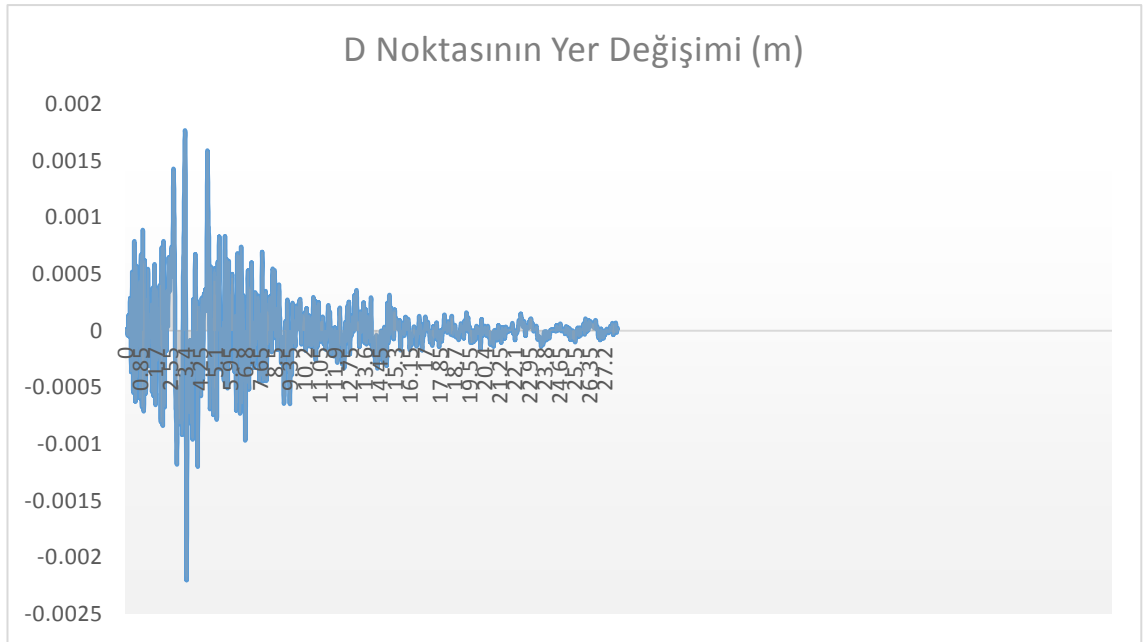
13 Mart 1992 Erzincan depreminin Doğu–Batı Bileşeninin deprem ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda, modelin en büyük yer değiştirmelere sahip şekil değiştirmiş hali Şekil 4.19’da görülmektedir.





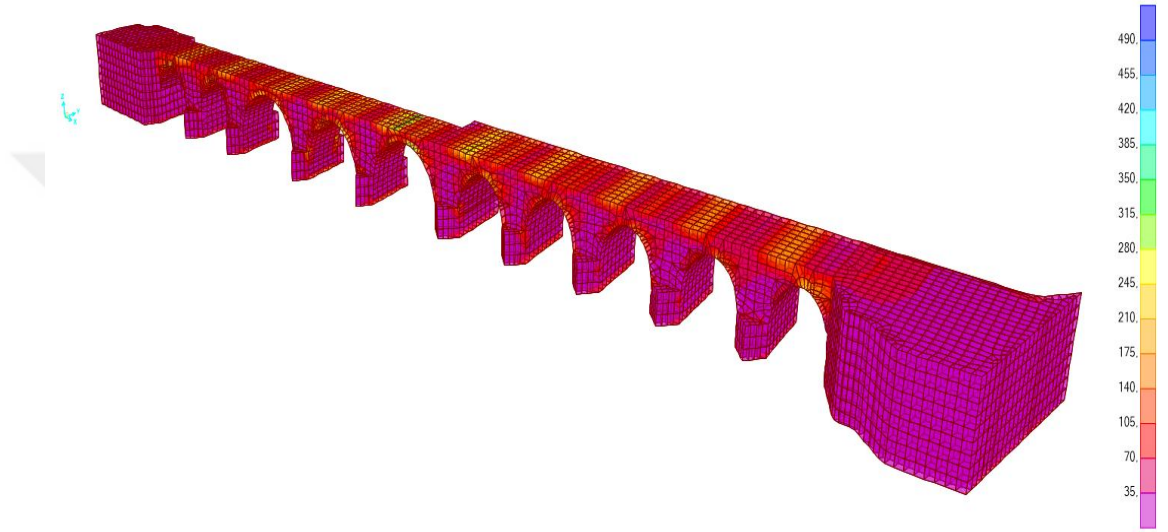
**Şekil 4.19.** Köprünün En Büyük Yer Değişimlere Sahip Şekil Değiştirmiş Hali.

Şekil 4.19'dan da görüldüğü üzere yapılan dinamik analiz sonucunda en büyük yer değiştirmeler en büyük kemer açıklığına sahip 5 nolu kemer etrafında ve kemer üst döşemelerinde elde edilmiştir. En büyük yer değiştirmeler x yönünde 2,199 mm değerinde olup, en büyük yer değiştirmeye sahip noktalardan olan D noktasının yer değiştirme zaman grafiği Şekil 4.20'de gösterilmektedir.

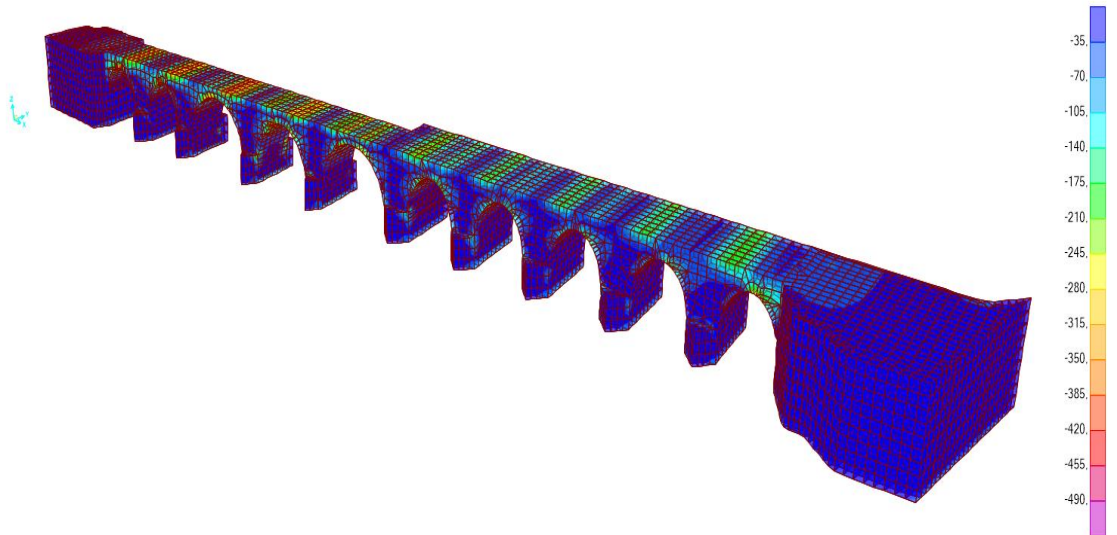


**Şekil 4.20.** D Noktasının Yer Değiştirme Zaman Grafiği.

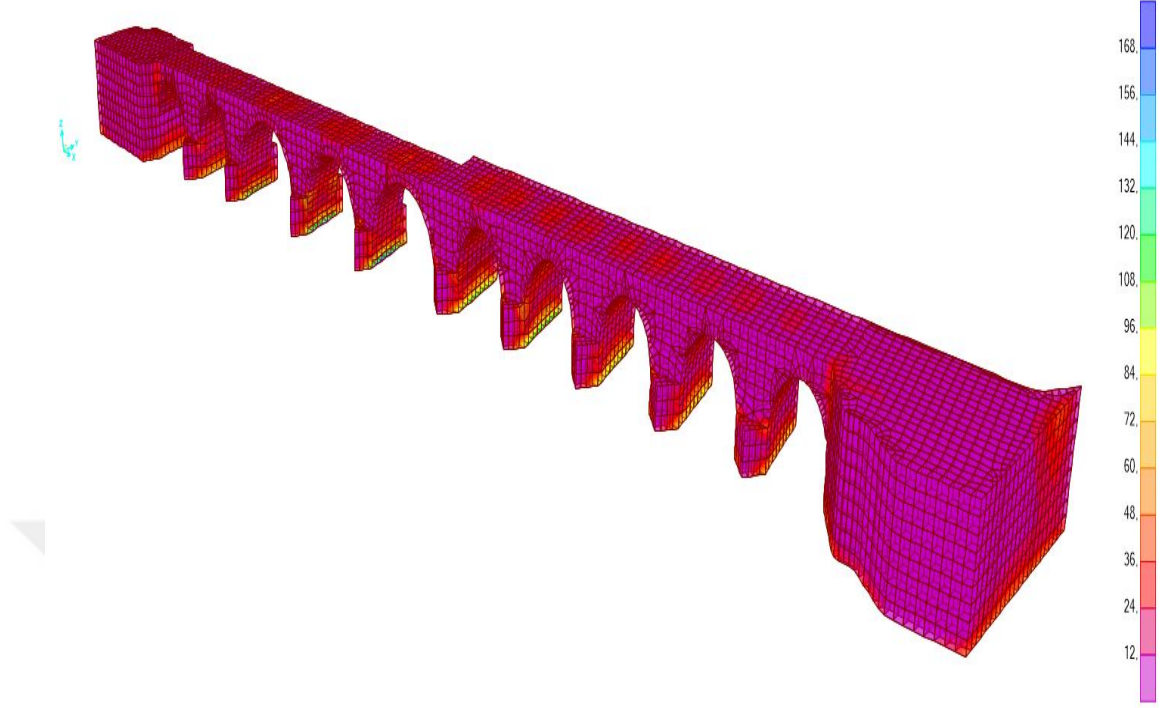
13 Mart 1992 Erzincan depreminin Doğu-Batı Bileşeninin deprem ivme kayıtları kullanılıp yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda, Erzincan depreminin x yönü çekme gerilmesi değerleri, x yönü basınç gerilmesi değerleri, y yönü çekme gerilmesi değerleri, y yönü basınç gerilmesi değerleri, z yönü çekme gerilmesi değerleri ve z yönü basınç gerilmesi değerleri sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmektedir.



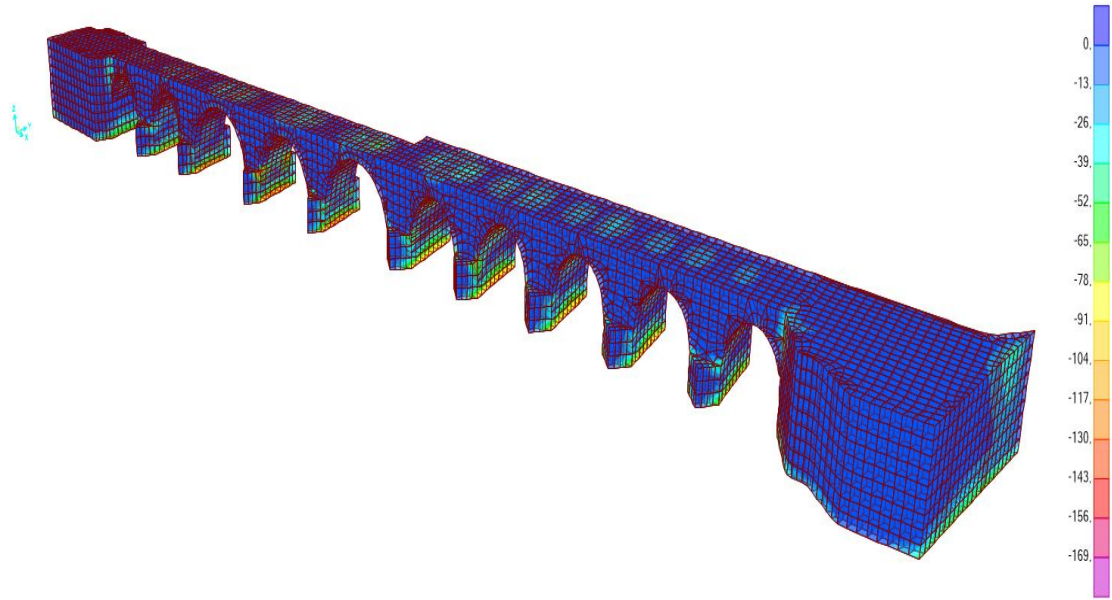
Şekil 4.21. Erzincan Depreminin X Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).



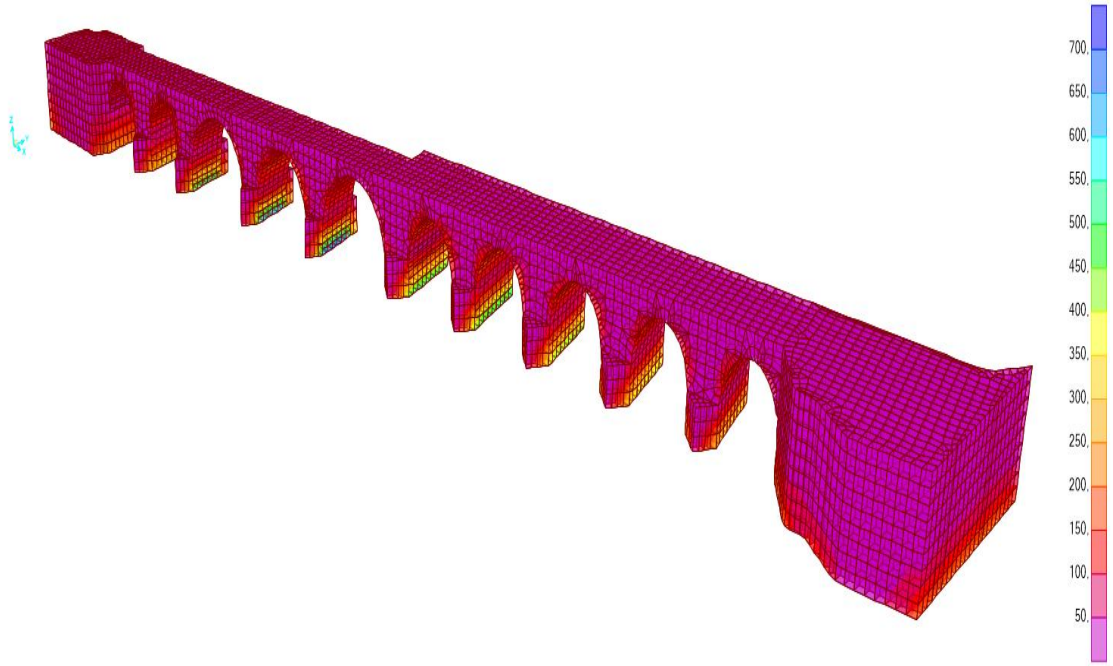
Şekil 4.22. Erzincan Depreminin X Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).



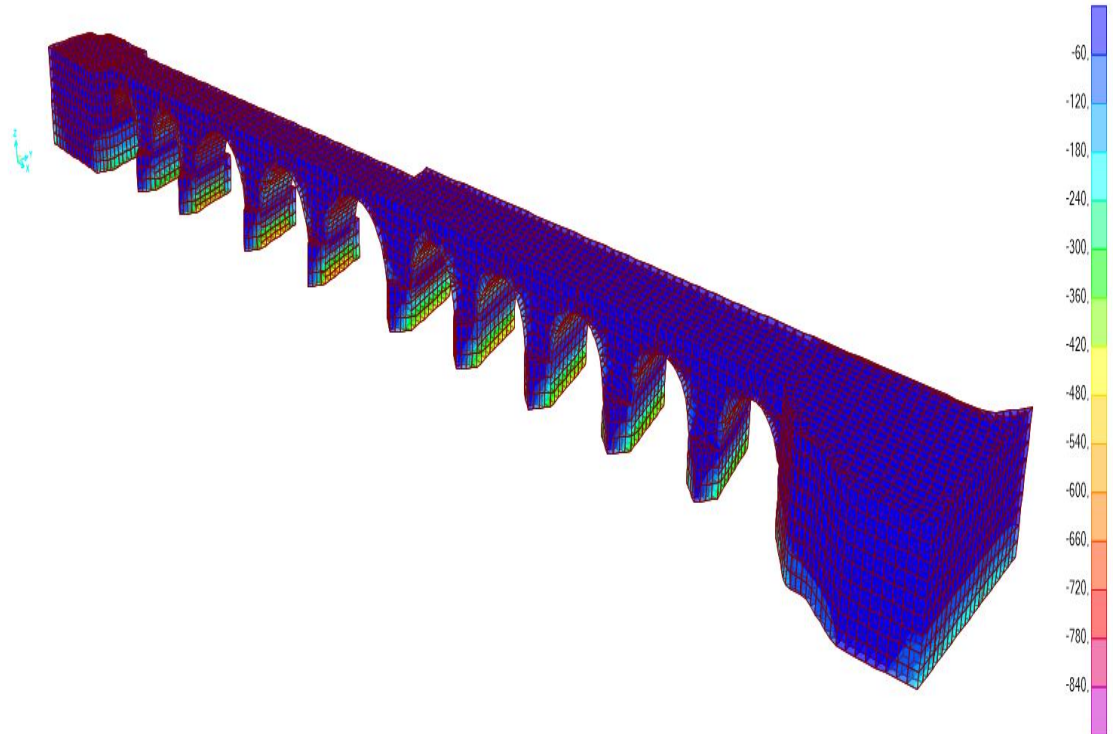
Şekil 4.23. Erzincan Depreminin Y Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).



Şekil 4.24. Erzincan Depreminin Y Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).



Şekil 4.25. Erzincan Depreminin Z Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).



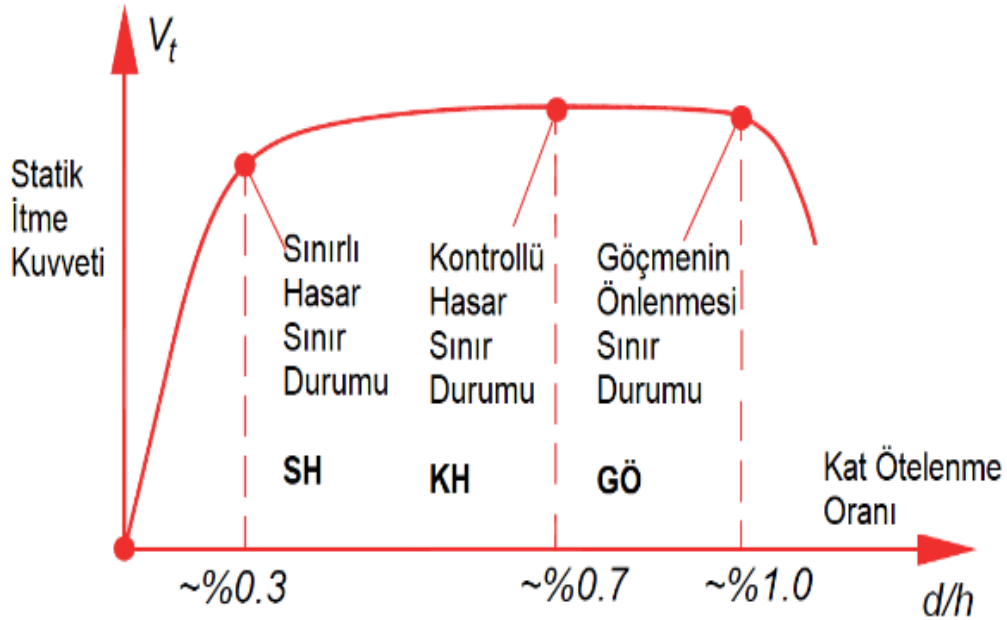
Şekil 4.26. Erzincan Depreminin Z Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m<sup>2</sup>).

Yapılan dinamik analiz sonucunda Erzincan depreminin x yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 507,679 kN/m<sup>2</sup>, x yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 496,050 kN/m<sup>2</sup>, y yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 174,240 kN/m<sup>2</sup>, y yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 180,507 kN/m<sup>2</sup>, z yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 731,624 kN/m<sup>2</sup> ve z yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 893,774 kN/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

X yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmeleri köprü kemerleri ve kemer üst döşeme kısımlarında, Y yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin kemer ayakları ve köprü alt taban kenar ve kemer iç kısmında, Z yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin köprü kemerlerinin birleştiği ayakların taban kenar kısımlarında olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4.1.5. Köprünün performans düzeyinin belirlenmesi

Yapının performans düzeyine Tarihi Yapıların Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda verilen performans sınır durumlarına göre karar verilmiştir.



Şekil 4.27. Statik İtme Eğrisi ve Performans Sınır Durumları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu 2017a).

**Tablo 4.6.** Performans Seviyeleri (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu 2017b).

<b>Performans düzeyi</b>	<b>Hesap yöntemi ve sınırlar</b>
Sınırlı hasar sınır durumu (SH)	1.Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0.3 sınırı 1 aşıyor.
Kontrollü sınır durumu (KH)	1.Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile hasar azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0.7 aşıyor. 2.Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme % 0.7 sınırını aşıyor. b) Malzemelerin şekil şekil değiştirme kapasiteleri aşılmıyor.
Göçme öncesi sınır durumu (GÖ)	1.Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranla (~1.5 katı) aşılabılır. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 1 sınırını aşıyor. 1. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme % 1 sınırını aşıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme oranları sınırlı oranda (~1.2 katı) aşılabılır

#### **4.1.5.1. Taş duvar sistemi basınç dayanımı güvenliği**

Yapıda bulunan yığma duvarlar çoğunlukla kaba yonu ve kesme taştan oluşmaktadır. Kesme taşın basınç dayanımının belirlenmesi için Tarihi Yapıların Deprem Risklerinin Belirlenmesi Kılavuzu'nun Yapısal modelleme ve Değerlendirme bölümünde verilen malzeme mekanik özellikleri tablosu kullanılmıştır Tabloya göre basınç dayanımının 1,1 -1,6 MPa değerleri arasında alınması tavsiye edilmiştir (Tablo 4.7).

**Tablo 4.7.** Yığma Duvar Malzemesinin Basınç Dayanımları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2017c).

Duvar Türü	Basınç Dayanımı $f_m$ (MPa)
Moloz taşlı yığma duvar	0.6~0.90
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.1~1.6
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.5~2.0
Yumuşak taşlı (kalker, tuf) yığma duvar	0.8~1.2
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3.0~4.0
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8~2.8
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	3.8~5.0
Boşluk oranı % 45'den küçük olan tuğla yığma duvar	4.6~6.0

Yapıda oluşan maksimum basınç gerilmesi değeri  $618,1 \text{ kN/m}^2$  olup, yığma taş duvar için verilen basınç dayanımı değerini aşmamaktadır.

#### 4.1.5.2. Taş duvar sistemi kayma güvenliği

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin 11. Bölümüne göre, duvar karakteristik kayma dayanım  $f_{vk}$ , duvar numuneleri üzerinde yapılacak deneylerden veya aşağıdaki denklem ile elde edilecektir.

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4\sigma_d \leq 0,10 f_b \quad (4.1)$$

$f_{vk}$ : Duvar üzerindeki ortalama düşey gerilmeleri kullanarak bulunan duvar karakteristik kesme dayanımı

$f_{vko}$ : Eksenel gerilmenin bulunmadığı durumdaki karakteristik kesme dayanımı

$\sigma_d$ :Yük katsayıları ile çarpılmış düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan düşey basınç gerilmesi

$f_b$ : Kargir biriminin standartlaştırılmış (boyut etkisinden arındırılmış  $100 \times 100 \text{ mm}$  boyutundaki numuneye eşdeğer) ortalama basınç dayanımı

Eksenel gerilmenin bulunmadığı durumdaki karakteristik kayma dayanımı ( $f_{vk}$ ), deprem yönetmeliğine verilen Tablo 11.3 e göre belirlenecektir (Tablo 4.8).

**Tablo 4.8.** Duvarların Başlangıç Kesme Dayanımları  $f_{vko}$  (MPa) (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018).

<b>Kargir birim</b>	<b>Genel amaçlı harç(*)</b>		<b>İnce tabaka harç</b>
Tuğla	M10-M20	0.30	
	M2.5-M9	0.20	0.30
	M1-M2	0.10	
Beton	M10-M20	0.20	0.30
Gazbeton	M2.5-M9	0.15	0.30
Doğal veya Yapay Taş	M1-M2	0.10	Kullanılmaz

(\*) Harçlar M harfini takip eden rakam MPa cinsinden karakteristik basınç dayanımlarını gösterecek şekilde isimlendirilmiştir.

Taşlar için kullanılacak kayma dayanımları  $0,10 \text{ MPa}=100 \text{ kN/m}^2$  olarak verilmiştir. Düşey yük altında yapılan analiz sonuçlarına göre yapıda oluşan maksimum basınç gerilmeleri ( $\sigma_d$ ) kullanılarak duvarların etkili kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda duvarlarda oluşan kayma gerilmeleri, hesaplanan kayma dayanımları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.9).

**Tablo 4.9.** Deprem Yükünde Taş Duvar Sisteminde Kayma Güvenliği.

<b>Doğrultu</b>	<b>Oluşan Basınç</b>	<b>Oluşan Kayma</b>	<b>Etkili Kayma</b>	<b>Durum</b>
	<b>Gerilmesi</b>	<b>Gerilmesi</b>	<b>Dayanımı</b>	
	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	
X-X	618.1	507.679	347.24	Sağlamıyor
Y-Y	618.1	180.507	347.24	Sağlıyor

#### 4.1.5.3. Yapı maksimum ötelenme kontrolü

Deprem etkisi altında yapılan analizler sonucunda yapıda oluşan maksimum yer değiştirme  $2,199 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir. Yapının maksimum ötelenme miktarı,  $\%0,02$ 'dir.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan statik ve dinamik analizler neticesinde, tarihi yapıda meydana gelebilecek maksimum gerilmeler ve yer değiştirmeler belirlenmiştir.

Tarihi Yapıların Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda yer alan performans düzeylerine karşılık gelen hesap yöntemleri ve sınır durumlarına göre yapının performans seviyesine aşağıda sıralanmış olan bulgular neticesinde karar verilmiştir.

- Düşey yükler altında statik analizde oluşan basınç gerilmeleri basınç dayanımını aşmamaktadır.
- Gerçek deprem yükü altında yapılan analiz sonucunda yapı sistemi X-X doğrultusunda oluşan kayma gerilmeleri, etkili kayma dayanımını aşmaktadır. Ancak bu deprem yükü, deprem yükü azaltma katsayısı ( R ) ile azaltılmadı. Y-Y doğrultusunda oluşan kayma gerilmeleri ise etkili kayma dayanımını aşmamaktadır.
- Yapıda hesaplanan maksimum ötelenme miktarı, %0,02 olup ötelenme sınırı olan %0,3 değerini aşmamaktadır.

Azaltılmamış deprem yükü(1992,Erzincan) etkisinde, yapıda oluşan gerilmeler hesaplanan dayanımları Y-Y doğrultusunda aşmayıp, yalnızca X-X doğrultusunda aşmaktadır. Ancak  $R_a \leq 3$  ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmamaktadır. Ötelenme miktarı %0,3 sınırını geçmemesine rağmen X-X doğrultusunda ötelenme miktarı sınır değeri aştığından güvenli tarafta kalmak için yapının performans düzeyi **Kontrollü Hasar Sınır Durumu (KH)** olarak belirlenmiştir. Deprem sonrası meydana gelen hasar tespiti ve onarımında “ Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu” kullanılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Aoki, A., Komiyama, T., Sabia, D. and Rivella, D. (2004) "Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Rakanji Stone Arch Bridge", Oita, Japan, *7th International Conference on Motion and Vibration Control*, St. Louis, Proceedings, USA, 1-9.
- Bakırer, Ö (2002), "Anadolu Selçuklu Mimarisinde Taşçı İşaretleri", "*Uluslararası Sanat Tarihi Sempozyumu*", Prof. Dr. Gönül Güney'e Armağan.
- Bathe, K. (1967) "The Finite Element Method Publisher", *Journal of the University of Cape Town Engineering Society*, 57-61, 1967.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T. ve Sevim, B. (2007) "Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinin Etkisi", *Sixth National Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T. (2009) "Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi", *İMO Teknik Dergi*, Yazı 307, ss:4675-4700.
- Beysanoğlu, Ş. (1996) "Anıtları ve Kitabeleri ile Diyarbakır Tarihi", *Kültür ve Sanat Yayınları*, Ankara.
- Birinci, F. (2010) "Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Boothby, T. E. (2001) "Analysis of masonry arches and vaults", *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 2 (DOI: 10.1002/pse.84).
- Casolo, S. (2000) "Modeling of Out-of-Plane Seismic Behavior Masonry Walls By Rigid Elements", *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 29(12), 1797-1813.
- Celasun, H. (1974) "Betonarme Köprüler ve Hesap Metodları", *Çağlayan Basım Evi*, Birinci Baskı, İstanbul.
- Celep, Z. ve Kumbasar N. (2004) "Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı", *Beta Yayınları*, İstanbul.
- Çulpan, C. (2002) "Türk Taş Köprüleri, Ortaçağdan Osmanlı Devrine Kadar", *Türk Tarih Kurumu*, Ankara.
- Dabanlı, Ö. (2008) "Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Demir, A., Gedik, H., Güneş, O. ve Korkmaz, K. (2016) "Structural and Seismic Evaluation of Historical Dicle Bridge in Turkey", *İstanbul Bridge Conference* Istanbul Technical University, Department of Architecture, Istanbul, Turkey.

- Doğan, M. (2005) “Depreme Dayanıklı Tasarım Dersi”, *Osmangazi Üniversitesi*, s. 81,84,259,365,367,381-389 Eskişehir.
- Ergin, A., Bayraktarkatal, E. ve Ünsan, Y. (2000) “Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları, Seminer Kitabı”, *Yapım Matbaacılık*, İstanbul.
- Frunzio, G., Monaco, M. and Gesualdo, A. (2001) “3D FEM Analysis of a Roman Arch Bridge”, *Historical Constructions*, 591-598.
- Fanning, P.J. and Boothby, T.E. (2001) “Three-Dimensional Modeling and Full-scale Testing of Stone Arch Bridges”, *Computers and Structures*, Volume: 79, Issure Number: 29, pp. 2645–2662.
- Gümüřçü, M. ve Turgut, P., (2012) “Karacadağ Bazaltının Fiziko-Mekanik ve Isıl Özellikleri”, *Dođa ve Fen Dergisi*, Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Osmanbey Kampüsü, 63000, Şanlıurfa, TÜRKİYE.
- Hatzigeorgiou, G.D., Beskos, D.E., Teodorakopoulos, D.D. and Sfakianakis, M. (1999) “Static And Dynamic Analysis Of The Arta Bridge By Finite Elements”, *Architecture and Civil Engineering*, Vol. 2, No 1, pp:41 – 51.
- Halifeoğlu, F.M., Dalkılıç, N., Sert, H ve Halifeoğlu, Z. (2009) “Diyarbakır, Dicle (On Gözlü) Köprüsü’nün Rölöve, Restitüsyon ve Restorasyon Projelerinin Yapımı”, *Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceđe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Diyarbakır.
- Hasol, D. (1993) “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, *YEM Yayınları*, İstanbul, s:275.
- Hasol, D. (2002) “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, *YEM Yayınları*, 8. Baskı, İstanbul.
- Hong Zong, Z., Jaishi, B., Ping Ge, J. and Xin Ren, W. (2005) “Dynamic analysis of a halfthrough concrete-filled steel tubular arch bridge”, *Engineering Structures*, 27, pp:3–15.
- Ivorra, S. and Pallares, F.J. (2006) “Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower”, *Engineering Structures*, Volume: 28, Issure Number: 5, pp. 660-667.
- İlter, F. (1978) “Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri”, *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Yayın No:244, Ankara
- Kahveci, A.E. (2008) “Diyarbakır Yöresinde Bazalt Taşının Yapı Malzemesi Olarak Kullanımının İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Karaton, M., Sayın, E. ve Calayır, Y. (2009) “Malabadi Köprüsünün Lineer Olmayan Sismik Analizi”, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceđe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2*, Diyarbakır.

- Karaveziroğlu, M., Stavrakakis, E., Lazarides, P., Liolios, A., Giannopoulou, M., Roukounis, Y. and Yeroyianni, M. (2001) "A Comparative Analysis of Some Historical Stone Arch Bridges in Greece by Two New Numerical Approaches", *Historical Constructions*, 749-755.
- Koçak, A. (1999) "Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve NonLineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneđi", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Lourenço, P.B., Borst, R. and Rots, J. (1997) "A Plane Stress Softening Plasticity Model for Orthotropic Materials", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume: 40, 4033-4052
- Lourenço, P.B. (1998) "Experimental and Numerical Issues in the Modelling of the Mechanical Behaviour of Masonry", *Structural Analysis of Historical Constructions II*, Barcelona.
- Lourenço, P.B., Rots, J.G. and Blaauwendraad, J. (1998) "Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation", *Journal of Structural Engineering*, 124(6), 642-652.
- Lourenço, P.B. (2006) "Structural Behavior of Civil Engineering Structures: Highlight in Historical and Masonry Structures", *Universidade do Minho*, Portugal.
- Nath, B. (1993) "Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri", *Sakarya Üniversitesi Yayınları*, Çeviren: Günay, D., Adapazarı
- Oğuzmert, M. (2002) "Yığma Minarelerin Dinamik Davranışları", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- ÖZCAN, Z. (2004) "Tarihi Sangarius (Sakarya) Köprüsü Üzerine Bir Çalışma" *Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering*, Bogazici University.
- Özkul, T.A., Karagüler, M., Ergüneş, O.I., Kaya, Y. ve Pavlatos, C.F. (2007) "Static and Dynamic Analysis of Panagia Ton Isodion Church", *International Sempodium Studies on Historical Heritage*, Antalya, 535-542, September 17-21.
- Pelà, I., Aprile, A. and Benedetti, A. (2009) "Seismic Assessment of Masonry Arch Bridges", *Engineering Structures*, 31, pp:1777-1788.
- Rafiee, A., Vinches, M. and Bohatier, C. (2008) "Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures", *International Journal of Solids and Structures*, 45, pp:6269-6283.
- Reddy, J. (1993) "An Introduction to the Finite Element Method", *McGraw Hill International Editions*.

- Sayın E., Karaton M. , Yön B. ve Calayır Y. (2011) “Tarihi Uzunok Köprüsünün Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi”, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 11-14 Ekim 2011 – ODTÜ – ANKARA*
- Seçme, T. (2009) “Zaman Tanım Alanında Davranış Spektrumunun İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Sucuoğlu, H. ve Erberik, A. (1997) “Performance Evaluation of a Three-Storey Unreinforced Masonry Buildings During the 1992 Erzincan”, *Earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(3), 319-336, March.
- Şen, B. (2003) “Modeling and Analysis of Historical Masonry Structures”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Şen, B. (2006) “Modeling and Analysis of the Historical Masonry Structures”, Master of Science Thesis, *Boğaziçi University Institute of Natural and Applied Sciences*, İstanbul.
- Şenel, M.Ş. (1996) “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Yapı Analizi Yapan Bir Bilgisayar Programı”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Toker, S. ve Ünay, A.I. (2004) “Mathematical Modelling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 129-139.
- Tunç, G., (1978) “Taş Köprülerimiz, Bayındırlık Bakanlığı”, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Yayın No:237, Ankara
- “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu”, (2017) *T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü*.
- “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, (2018) *T.C. Resmi Gazete*, Sayı 30364
- URAL A. (2005) “Tarihî Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi”, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli.
- Ural, A., Oruç, S.,Doğangün, A. ve Tuluk, Ö.İ. (2008) “Turkish Historical Arch Bridges And Their Deteriorations and Failures”, *Engineering Failure Analysis*, 15, ss:43–53.
- Ural, A. 2009 “Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, KTÜ.
- Yıldız, İ. ve Koç, E. (2010) “Mardin’deki Tarihi Köprüler Üzerine Bir Değerlendirme”, *Mukaddime*, Sayı 2.
- Zucchini, A. and Laurenço, P.B. (2009) “A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls”, *Int J Solids Struct*, 46 (3-4), 871-886

## EKLER

### **Ek-1.** Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Kumbasaroglu A., Celik A., Demir O., Turan, A. and Yalciner H., “An Assessment of the Seismic Performance of the Historic Tigris Bridge”, *Open Journal of Civil Engineering- Earthquake Engineering*, 2019



## ÖZGEÇMİŞ

Osman DEMİR 1990 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Diyarbakır'da tamamladı. 2008 yılında başladığı Mustafa Kemal Üniversitesi (İskenderun Teknik Üniversitesi) Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında yatay geçiş ile Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne geçiş yaptı. 2012 yılında fakülte derecesi ile üniversiteden mezun oldu. Henüz üniversite 2. sınıftayken çalışmaya, çeşitli inşaat firmalarında yarı zamanlı olarak teknik işleri yapmaya başladı. Mezun olduktan sonra da özel sektörde çalışmaya devam ettikten sonra 2012 KPSS ile İçişleri Bakanlığı'nda İnşaat Mühendisi olarak göreve başladı. Halen bakanlık bünyesinde çalışmakta olup, çalıştığı süre boyunca teknik işlerin yanı sıra Avrupa Birliği, Kalkınma Bakanlığı, İller Bankası vb. hibe programları kapsamında proje uzmanlığı, yatırım projelerine koordinatörlük görevlerini de zaman zaman yürütmektedir. 2014 yılında, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.