

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Hüseyin Okan ANADUT

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Durdu Mehmet ÖZCAN**

Yozgat 2016

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Hüseyin Okan ANADUT

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Durdu Mehmet ÖZCAN**

Yozgat 2016

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 70110712016 numaralı öğrencisi Hüseyin Okan ANADUT'un hazırladığı "Tarihi Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı Doktora/Yüksek Lisans tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 22/04/2016 Cuma günü saat 11:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Murat ÇOBANER



Üye : Yrd. Doç. Dr. D. Mehmet ÖZCAN (Danışman)

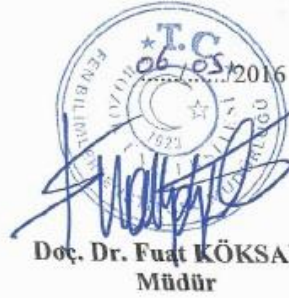


Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa VEKLİ



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 06/05/2016 tarih ve 15 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Doç. Dr. Fuat KÖKSAL
Müdür

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KONUyla İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	5
3. TARİHİ YAPILARDA TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI VE KULLANILAN MALZEMELER	11
3.1. Tarihi Yığma Yapılar	11
3.2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları	12
3.2.1. Temeller	12
3.2.2. Taşıyıcı Duvarlar.....	13
3.2.3. Kemerler.....	14
3.3. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler	15
3.3.1. Doğal Taşlar	15
3.3.2. Harman Tuğlası (Horasan Tuğlası).....	16
3.3.3. Kireç.....	16
3.3.4. Su	17
3.3.5. Agrega.....	17
3.3.6. Katkı Malzemeleri.....	17
3.3.7. Harç.....	18
3.3.8. Kireç Harcı.....	18

3.3.9. Horasan Harcı	18
3.3.10. Sıva.....	19
4. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ VE ANALİZİ	20
4.1. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler	21
4.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi.....	21
4.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi.....	22
4.2. Modelleme Yöntemleri.....	25
4.2.1. Mikro Modelleme Yöntemi	25
4.2.2. Makro Modelleme Yöntemi.....	27
4.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	28
4.3. Analiz Yöntemleri	33
4.3.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	34
4.3.2. Dinamik Analiz	35
4.3.2.1. Modal Analiz	35
4.3.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler.....	35
4.3.2.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	38
4.3.2.2. Davranış Spektrumu Analizi.....	41
4.3.2.3. Zaman Tanım Alanında Analiz.....	42
4.3.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	43
5. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	44
5.1. Elekçi Köprüsü	44
5.1.1. Elekçi Köprüsü Üzerinde Yapılan Çalışmalar	47
5.1.2. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	47
5.1.3. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	50
5.1.4. Dinamik Analizler	53
5.1.4.1. Modal Analiz	53
5.1.4.2. Zaman Tanım Alanında Analiz.....	55

5.2. Yozgat Saat Kulesi	60
5.2.1. Modelin Oluşturulması	61
5.2.2. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	63
5.2.3. Dinamik Analizler	65
5.2.3.1. Modal Analiz	65
5.2.3.2. Zaman Tanım Alanında Analiz.....	66
6. SONUÇLAR.....	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	80

TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hüseyin Okan ANADUT

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2016; Sayfa: 80

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Durdu Mehmet ÖZCAN

ÖZET

Tez çalışması kapsamında, tarihi yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla Yozgat'ta bulunan Elekçi Köprüsü ve Yozgat Saat Kulesi ele alınarak deprem davranışı açısından değerlendirilmiştir. Ele alınan yapılar sonlu elemanlar programı olan SAP2000 ile makro modelleme tekniğine göre solid elemanlarla modellenmiştir. Elde edilen modeller üzerinde 13.03.1992 tarihli Erzincan depreminin deprem-ivme kayıtları kullanılarak modellerin zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemiyle dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışmaya konu olan tarihi yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda yapıların mod şekilleri, doğal frekans değerleri, yapı elemanlarında meydana gelen en büyük yer değiştirme değerleri, yer değiştirme zaman grafikleri, maksimum basınç ve çekme gerilmesi değerleri belirlenerek tarihi yapıların deprem performansları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, çalışmaya konu olan tarihi yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları, tarihi yapılarda yapılacak restorasyon projelerine yol gösterici olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik Analiz, Sonlu Elemanlar, Tarihi Yapılar.

INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOURS OF HISTORICAL STRUCTURES

Huseyin Okan ANADUT

Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

2016; Page: 80

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Durdu Mehmet OZCAN

ABSTRACT

In this thesis, to understand the dynamic behaviors of historical structures, Elekci Bridge and Yozgat Clock Tower in Yozgat were investigated in terms of earthquake behaviors. These selected structures are modeled with SAP2000 Finite element program using macro modeling approach with solid elements. Time history analyses of the obtained models were carried out by using the acceleration records of Erzincan earthquake, which has occurred in 13 March 1992. Hence, earthquake behaviors of the historical structures which are subject to study were detected. According to the analysis results, mode shapes, natural frequencies, maximum displacements of structural elements, displacement time graphics, maximum stress values were determined and earthquake performance of historical structures was investigated. As a result, earthquake behaviors of the historical structures which are subject to study were detected. The results of the study will be a guide to the restoration projects of the historical structures.

Keywords: Dynamic Analysis, Finite Element, Historical Structure.

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Tarihi Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” isimli tez çalıŐmasını bana öneren, her aŐamasında bilgi ve tecrübesiyle daima yanımda olan Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Durdu Mehmet ÖZCAN'a tez çalıŐmamın tamamlanmasında göstermiş olduğu katkılarından dolayı minnet ve Őükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Birlikte çalıŐmaktan mutluluk duyduğum oda arkadaŐım ArŐ. Gör. Ferhat ŐAHİNKAYA'ya yardımlarından dolayı teŐekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi hiçbir desteği benden esirgemeyen canım ablam Sema ANADUT'a, sevgili annem Gönül ANADUT'a ve değerli babam Bekir ANADUT'a minnet ve Őükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Bu tez çalıŐmasının benzer çalıŐmalara kaynak ve örnek teşkil etmesini ve Ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri	15
Tablo 3.2. Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri	16
Tablo 4.1. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması.....	34
Tablo 5.1. Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları.....	49
Tablo 5.2. Numunelerin Maksimum Basınç Dayanımları	49
Tablo 5.3. Teorik Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	49
Tablo 5.4. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Frekans ve Periyot Değerleri	53
Tablo 5.5. Teorik Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	62
Tablo 5.6. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Frekans ve Periyot Değerleri	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yığma Taş Yapılar.....	12
Şekil 4.1. Tuğla, Harç ve Yığma Eleman, Gerilme – Şekil Değişirme Diyagramı	23
Şekil 4.2. Yığma Malzemelerin Homojenleştirilmesi.....	24
Şekil 4.3. Model Yaklaşımları	25
Şekil 4.4. Yığma Duvarın Mikro Model Analizi	26
Şekil 4.5. Yığma Duvarın Makro Model Analizi	28
Şekil 4.6. Sonlu Eleman Modelinde Düğüm Noktaları ve Elemanlar	31
Şekil 4.7. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) Teorik Modeli.....	35
Şekil 4.8. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) Serbest Cisim Diyagramı.....	36
Şekil 5.1. Elekçi Köprüsü Güney Tarafı Görünüşü	44
Şekil 5.2. Elekçi Köprüsü Kuzey Tarafı Görünüşü	45
Şekil 5.3. Elekçi Köprüsü Batı Tarafı Görünüşü	45
Şekil 5.4. Elekçi Köprüsü Doğu Tarafı Görünüşü.....	45
Şekil 5.5. Elekçi Köprüsü Kesit Özellikleri.....	46
Şekil 5.6. Numunelerin Hazırlanması.....	48
Şekil 5.7. Numunelerin Kırılması.....	48
Şekil 5.8. Kırılmış Numuneler	48
Şekil 5.9. Elekçi Köprüsü Sonlu Eleman Modeli	50
Şekil 5.10. Elekçi Köprüsü'nün Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü	51
Şekil 5.11. Statik Analiz, Maksimum Basınç Gerilmeleri.....	52
Şekil 5.12. Statik Analiz, Maksimum Çekme Gerilmeleri	52
Şekil 5.13. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk Beş Mod Şekli.....	54
Şekil 5.14. 1992 Erzincan Deprem İvme Kaydı (Doğu - Batı Bileşeni).....	55

Şekil 5.15. Köprünün En Büyük Yer Değiştirmelere Sahip Şekil Değiştirmiş Hali	56
Şekil 5.16. A Noktasının Yer Değiştirme Zaman Grafiği	56
Şekil 5.17. Erzincan Depreminin X Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri	57
Şekil 5.18. Erzincan Depreminin X Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri.....	57
Şekil 5.19. Erzincan Depreminin Y Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri	58
Şekil 5.20. Erzincan Depreminin Y Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri.....	58
Şekil 5.21. Erzincan Depreminin Z Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri.....	59
Şekil 5.22. Erzincan Depreminin Z Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri	59
Şekil 5.23. Yozgat Saat Kulesi	60
Şekil 5.24. Kat Yükseklikleri ve Taş Duvar Kalınlıkları.....	61
Şekil 5.25. Yozgat Saat Kulesi Sonlu Eleman Modeli	62
Şekil 5.26. Yozgat Saat Kulesi'nin Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü	63
Şekil 5.27. Statik Analiz, Maksimum Basınç Gerilmeleri.....	64
Şekil 5.28. Statik Analiz, Maksimum Çekme Gerilmeleri	64
Şekil 5.29. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk 5 Mod Şekli.....	66
Şekil 5.30. Kulenin En Büyük Yer Değiştirmelere Sahip Şekil Değiştirmiş Hali.....	67
Şekil 5.31. A Noktasının Yer Değiştirme Zaman Grafiği	67
Şekil 5.32. Erzincan Depreminin X Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri	68
Şekil 5.33. Erzincan Depreminin X Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri.....	68
Şekil 5.34. Erzincan Depreminin Y Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri	69
Şekil 5.35. Erzincan Depreminin Y Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri.....	69
Şekil 5.36. Erzincan Depreminin Z Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri.....	70
Şekil 5.37. Erzincan Depreminin Z Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri	70

KISALTMALAR LİSTESİ

A_s	: Sabit değer
{A}	: Genlik vektörü
{A_r}	: Öz vektör
B_s	: Sabit değer
c	: Sönüm katsayısı
C₁	: Sabit değer
C₂	: Sabit değer
[C]	: Sönüm matrisi
C_r	: Sabit değer
ÇSDS	: Çok serbestlik dereceli sistemler
F_I	: Atalet kuvveti
F_D	: Sönüm kuvveti
F_s	: Kütle hareketlerinden dolayı yayda oluşan kuvvet
F(t)	: Uygulanan dış kuvvet
f	: Frekans
{F(t)}	: Kuvvet vektörü
[I]	: Birim diyagonal matris
k	: Yay katsayısı
[K]	: Rijitlik matrisi
[M]	: Kütle matrisi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
s	: Sabit değer
T	: Periyot

TSDS	: Tek serbestlik dereceli sistemler
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
$\mathbf{x}(t)$: Kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{\mathbf{x}}(t)$: Kütlenin hızı
$\ddot{\mathbf{x}}(t)$: Kütlenin ivmesi
\mathbf{x}_0	: Başlangıç yer değiştirmesi
$\dot{\mathbf{x}}_0$: Başlangıç hızı
$\{\mathbf{x}(t)\}$: Yer değiştirme vektörü
$\{\dot{\mathbf{x}}(t)\}$: Hız vektörü
$\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\}$: İvme vektörü
$\{\Phi\}_r$: Modal vektör
λ_r	: Öz değer
$[\Phi]$: Modal matris

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, atalarımızın bizlere bıraktığı birer miras, devletler için birer hakimiyet sembolü, yerleşim birimlerini süsleyen birer anıt, geçmişin tecrübe ve teknolojilerini daha ileri taşımamızı sağlayan kültürel miraslarımızdır. Günümüzde insanlığın evrensel görevi olarak nitelendirilen kültürel mirası koruma amacına hizmet etmek için birçok uluslararası örgüt kurulmuştur. Bu çerçevede zengin kültür varlıklarına sahip Ülkemizin de önemli sorumlulukları olduğu göz ardı edilemez.

Tarihi yapılar deprem gibi beklenmedik doğal afetlerle zarar görmekte veya yıkılmaktadır. Bununla beraber tarihi yapılara zarar veren etkenler sadece depremler ya da doğal afetler değildir; yapıda kullanılan yapı malzemesinin dayanımını yitirmesi, zemin oturmaları, yanlış kullanımdan kaynaklı aşırı ve düzensiz yükleme, zamana bağlı deformasyonlar, savaşlar, yangınlar ve zamanında yapılmayan yada bilinçsizce yapılan bakım – onarım faaliyetleri tarihi yapıların yavaş yavaş yok olmalarının diğer nedenleri arasında yer almaktadır [1].

Ülkemiz, yüzyıllar boyunca çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmış olduğundan dolayı çok farklı sayıda ve çeşitte, taşınır veya taşınmaz sayısız kültür varlığını barındırmaktadır. Bu kültür varlıkları çeşitli çevresel ve iklimsel etkilere maruz kalmakta ve zaman geçtikçe gücünü, dayanımını, sağlamlığını yitirmektedir. Sorumluluk sahibi her birey, bizlere miras kalan kültür varlıklarının korunması hususunda gerekli hassasiyeti göstermelidir.

Atalarımızın bizlere bıraktığı kültür değerlerini korumak ve özgün nitelikleriyle gelecek nesillere aktarmak günümüzün en önemli sorunları arasındadır. Amaç tarihi eserlerin yapısal ve işlevsel özelliklerinin bozulmasını önlemek, sağlıklı bir durumda bizden sonraki nesillere aktarılmasını sağlamaktır [2].

Köprüler, yollar üzerindeki büyük suları, bataklık alanları ve derin vadileri geçebilmek amacıyla yapılmış olan sanat yapılarıdır [3]. Diğer tanımlarda: Uçlarında kenar ayaklara ve varsa arada orta ayaklara oturan bir tabliyeden oluşan sanat yapısı olarak veya aralarında çukur, arazi, su veya yol gibi engeller bulunan iki yakayı birbirine bağlayarak yolu bir uçtan ötekine ulaştırmak için yapılan ahşap, kargir veya

maden yapısı şeklinde ifade edilmiştir [4]. Taşların ocaktan çıkarılması, uygun ölçülere getirilmesi, yerlerine yerleştirilmesi gibi sebeplerden dolayı taş kemer köprülerin inşaatı büyük ölçüde kalifiye işçilik gerektirdiğinden, günümüzde bu kalifiye işçiliğe ulaşmanın çok zorluğu ve ekonomik olmamasından dolayı artık taş kemer köprüler hemen hemen hiç yapılmamaktadır [3].

Anadolu, asırlardan beri çeşitli uygarlıklara ev sahipliği yaptığı için, hakimiyet kurmuş olan toplumların kendi anlayışlarına ve dünya ticaretinin yönlerine göre değişen yollara sahip olmuştur. Bu yol ağları, kimi zaman siyasal nedenlerle kimi zamanda ticari ihtiyaçlar doğrultusunda zaman zaman şekil değiştirmiştir. Anadolu'nun coğrafi konumu gereği dünya ticaretinin önemli kavşaklarında bulunması nedeniyle, zamanın şartlarıyla paralel bir yapıya ve yol ağına sahip olmuştur. Anadolu'daki Selçuklu devri köprüleri, Selçuklu'lara kadar gelen devirlerin de ihtiyaçlarını karşılayan, ayrıca kendileri tarafından da yapılan yollar üzerinde kurulmuşlardır. Anadolu'da yapılmış olan köprüler esas olarak iki tipe ayrılırlar: İlk tip olarak her iki yandan ortadaki geniş ve yüksek ana kemere doğru güçlü bir çıkışla yükselen dik köprüler ve ikinci tip olarakta iki veya daha fazla sayıda kemerler arasında, yükseklik ve genişlik bakımından büyük fark göstermeyen, köprü yolunun düz veya düze yakın olduğu köprüler örnek gösterilmektedir. Köprü tipinin belirlenmesindeki en büyük etken, nehir yatağının derinliği ve genişliği olmaktadır. Geniş bir yatakta, yüksek, geniş açıklıklara ihtiyaç duyulmaz. Köprü boyunun uzamasına ve göz sayısının fazlalaşmasına sebep olan yatağın yaygın oluşudur. Derin yataklı sularda, ana yatak üzerine ayakları oturtmak çok zor olduğu için zeminin yükseldiği derin olmayan uçlara yerleştirilen ayakların arası, geniş ve yüksek bir kemerle bağlanır. Oluşturulan gözler, çevresindeki yardımcı büyük olmayan açıklıklarla, güçlü eğimlerle her iki sahilden yükselen dik köprüleri doğurur [5].

Saat kulesi yapma geleneği 16.yy'da Osmanlı hayatına girmiş, ilerleyen zamanlarda batıdan doğuya doğru giderek artmıştır. II. Abdülhamit'in 1900'lü yıllarda Valilere saat kulesi yapımıyla ilgili gönderdiği ferman, saat kulelerinin Anadolu'da yayılmasının en kuvvetli sebebi olmuştur. Tanzimat sonrasında İmparatorluk

toprakları çeşitli yıllarda çıkarılan nizamnamelerle (1858, 1864, 1871) vilayetlere bölünmüştür. O dönemde saat kuleleri devlet hakimiyetinin de birer simgesi olarak görüldüğünden dolayı, İstanbul ve Anadolu'da yapılan kulelerin amacı bu hakimiyeti temsil etmek olmuştur. Bu yapılar kimi zaman imparatorluk armaları ve kimi zamansa farklı saltanat simgeleriyle farklı biçimlerde de olsa yerel seviyede iktidarın hissettirilmesi açısından önemliydiler [6].

Kentlerin ve kasabaların sembol ve odak noktaları olan saat kuleleri; yerleşim yerlerinin en görkemli zaman göstergeleri olmanın yanında, yangın ve gözetleme kuleleri, sisli puslu havalarda yön belirteçleri, kaidelerindeki çeşmelerle devasa sebiller, altlarındaki odalarla da muvakkithaneler ve üzerlerinde taşıdıkları hava olaylarını ölçen rüzgârgülleri ile çok fonksiyonlu yapılar olarak çok çeşitli amaçlara hizmet etmek üzere inşa edilmişlerdir [7].

Bu çalışmada, kültürel mirasımızı oluşturan tarihi yapılardan olan Yozgat İlinde bulunan tarihi Elekçi Köprüsü ve Yozgat Saat Kulesi'nin dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Yozgat İlinde tarihi ipek yolu üzerinde bulunan, çift kemerli tarihi Elekçi Köprüsü'nün ve Yozgat merkezde bulunan Yozgat Saat Kulesi'nin yapılan ölçümlerle rölevesi çıkartılarak geometrik özellikleri belirlenmiştir. Tarihi köprünün taş kemer ve yan duvarlarını oluşturan taşların birim hacim ağırlıklarının ve maksimum basınç dayanımlarının elde edilmesi amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. İlave olarak literatürde tarihi köprülerle ilgili yapılan benzer çalışmalar araştırılıp, bu çalışmalardan elde edilen malzeme özelliklerinden de faydalanılarak modellemede kullanılacak olan malzeme özellikleri belirlenmiştir. Tarihi kulenin modellenmesinde kullanılacak olan malzeme özelliklerinin belirlenmesinde literatürde yapılan benzer çalışmalardan faydalanılmıştır. Geometrik özellikleri ve malzeme özellikleri belirlenen tarihi yapıların SAP2000 programı kullanılarak modellenmesi yapıp, kendi yükleri ve sismik yükler etkisi altındaki analizleri yapılmıştır. Dinamik analiz için 13.03.1992 tarihli Erzincan depreminin deprem-ivme kayıtları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda yapıların mod şekilleri, doğal frekans değerleri, yapı elemanlarında meydana gelen en büyük yer değiştirme değerleri, yer değiştirme

zaman grafikleri, maksimum basınç ve çekme gerilmesi değerleri belirlenerek tarihi yapıların deprem performansları değerlendirilmiştir.



2. KONUYLA İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Tarihi yapılar, atalarımızın bizlere bıraktığı birer miras olmakla beraber geçmişin tecrübelerini ve teknolojilerini daha ileri taşımamız için aynı zamanda bize yol gösterici birer anıttır. Bu nedenle dünya literatüründe tarihi yapılarla ilgili yapılmış çok sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Tez kapsamında bu çalışmalardan bazıları incelenmiş ve kısaca içeriklerine değinilmiştir.

Riva ve ark. (1998) yaptıkları çalışmada; İtalya'da bulunan Asinelli Kulesi'ni, makro modelleme tekniğiyle Abaqus sonlu elemanlar programında modelleyerek yapının modal ve sismik analizlerini yapmışlardır. Kulenin kendi ağırlığı altında oluşan maksimum basınç gerilmesi değerinin tuğla için bilinen sınır dayanımına yakın değerlerde olduğunu ve Bologna'da geçmiş tarihlerde meydana gelmiş olan depremlere kulenin dayanabileceğini göstermişlerdir [8].

Fanning ve Boothby (2001) yaptıkları çalışmada; taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini kullanarak, üç yığma köprüyü makro modelleme yöntemiyle modelleyerek statik yükler altındaki analizlerini yapmışlardır [9].

Bernardeschi ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada; İtalya'da bulunan Buti Çan Kulesi'ni, makro modelleme tekniği ile modelleyip kendi ağırlığı ve kendi ağırlığı yanında yatay yük etkisi altında olmak üzere iki farklı durum altında incelemişlerdir. Yapıdaki yer değiştirmeleri, gerilme alanlarını ve çatlak dağılımlarını inceleyip hesap sonucunda bulunan çatlak dağılımları ile yapıdaki gerçek çatlak dağılımlarını karşılaştırmışlardır [10].

Karaton ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada; Malabadi Köprüsü'nün Erzincan depremi etkisi altında doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmişlerdir [11].

Bayraktar ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada; Trabzon'da bulunan Ayasofya Çan Kulesi'nin makro modelleme yöntemiyle sonlu elemanlar modelini oluşturup, deprem etkisindeki lineer olmayan dinamik analizlerini yapmışlardır. Çan kulesinde meydana gelen yer değiştirmeleri, gerilme dağılımlarını ve çatlak dağılımlarını hesaplayıp, kulede mevcut olan gerçek çatlak dağılımları ile karşılaştırmışlardır [12].

Sayın, ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; Malatya da bulunan tarihi Uzunok Köprüsü'nü makro modelleme yöntemi ile modelleyip, Köprü'nün lineer ve lineer olmayan sismik analizlerini yapmışlardır. Sismik etki olarak 2003 Bingöl depremi ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Lineer ve lineer olmayan çözümlerden elde edilen sonuçları birbirleri ile karşılaştırarak köprünün sismik davranışını incelemişlerdir [13].

Di Pasquale (1979) yapmış olduğu çalışmada; kagir duvarlarla ilgili malzeme özellikleri ve yapısal davranışları anlatarak İtalya Floransa'da bulunan ve XV. yüzyıl yapısı olan Santa Maria Del Fiore Katedrali'nin kubbesini sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiş ve analiz sonuçlarını incelemiştir [14].

Karaesmen ve Ünay (1988) yaptıkları çalışmada Mimar Sinan'ın kubbeli yapılarını incelemiş ve bu yapıların yük aktarma sistemleri hakkında bilgi vermişlerdir. Şehzade Mehmet Camisi'nin malzeme ve yapısal özellikleri ile ilgili bilgiler vererek ana kubbenin sonlu elemanlar yöntemiyle analizini yapmışlardır [15].

Karaesmen ve ark. (1992) yaptıkları çalışmada; Mimar Sinan'ın deprem kuşağı üzerinde yer alan yapılarını ele alarak, Şehzade Mehmet Camisi'ni ve Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisi'ni sonlu elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Modellenen yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir [16].

Erdik ve Durukal (1993) yaptıkları çalışmada; Ayasofya'nın deprem yükleri altındaki davranışını incelemek üzere sonlu eleman modelini oluşturmuşlar ve yapıda gerçekleştirdikleri çevrel titreşim deneyleri sonuçları çerçevesinde model düzenlenmişlerdir. Ayasofya'nın yapısal özelliklerini belirlemek ve doğru bir model yaratmak amacıyla, binanın davranışı ile ilgili verileri karşılaştırmışlardır [17].

Ünay (1997) yapmış olduğu çalışmada; tarihi yapının düşey yük analizini yapmış ve analiz sonrasında zayıf noktalarda bulunan elemanların, Eksenel Yük-Eğilme Momenti (N-M) diyagramlarını üreterek taşıma gücünü hesaplamıştır [18].

Koçak (1999) yapmış olduğu çalışmada Küçük Ayasofya Camii'nin zemin ve geoteknik incelemesi ile malzeme deneyleri ve çevrel titreşim deney verilerini

kullanarak tarihi yapının önce statik ve dinamik yükler altındaki lineer ve non-lineer analizlerini daha sonra çeşitli mesnet oturmaları düzenleyerek hasar analizleri yapmıştır [19].

Frunzio ve ark. (2001) tarihi taş kemer bir Roma köprüsünün 3-boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuş, teorik analizlerini gerçekleştirmiş ve dolgu duvarlar ve kemer üstü dolgu duvarlarındaki lineer olmayan malzeme davranışlarını incelemiştir [20].

Lourenco ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada numerik analizlerin önemini vurgulamak üzere bir kilise yapısının sonlu eleman çözümlerini yaparak hasar nedenlerini bulmaya çalışmış ve yapının güçlendirilmesi için öneriler getirmiştir [21].

Mele ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada yapıya statik ve dinamik analizler ile iki boyutlu statik itme analizi uygulamışlardır. İtme analizinden elde edilen sonuçlarla limit analiz sonuçlarını karşılaştırmışlar ve yapının non-lineer modelinin gerçek davranışı sonlu elemanlar modeliyle tespit etmeye çalışmışlardır [22].

Teomete (2004) yapmış olduğu çalışmada Urla Kamanlı Camii'nde kullanılan taş, tuğla ve harç malzemelerinin deneylerini yaparak bu malzemelerin mekanik özelliklerini tespit etmiştir. Yapının sonlu eleman modelini oluşturmuş ve statik ve dinamik yükler altındaki lineer ve non-lineer davranışları mesnetlerde oturma senaryoları düzenleyerek incelemiştir [23].

Salvador Ivorra, ve Francisco Pallares (2006) yaptıkları çalışmada; beşik tonozlu 3 farklı yığma köprü incelemiştir. Yapıları non-lineer olarak ele almışlar ve drucker-prager akma kriterini kullanmışlardır. Yapılardan geçen araçların ağırlığı altında yapıların performansını sonlu elemanlar yöntemi ile bularak, köprülerdeki hasarlarla karşılaştırmışlardır [24].

Özkul ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada; İstanbul'da bulunan tarihi bir kiliseyi incelemiştir. SAP 2000 programını kullanarak kilisenin sonlu eleman modelini oluşturup, kilisenin kendi ağırlığı altındaki ve deprem kuvvetleri altındaki

davranışını incelemişlerdir. Oluşan basınç ve çekme gerilme değerlerinin limit değerlerin altında kaldığı sonucuna varmışlardır [25].

Psycharis ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada; bir Bizans kilisesinin sismik etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları sonlu eleman çözümleri ile mevcut yapıda oluşan çatlakları karşılaştırmışlardır. Bu sayede yapının zayıf bölgelerini ortaya çıkararak deprem sırasında oluşabilecek hasarları incelemişlerdir [26].

Karaveziroğlu ve ark. (2001) iki farklı teorik yöntem kullanarak tarihi taş kemer köprülerin statik analizlerini gerçekleştirmiş ve her iki yöntemden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ve ayırık sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak her iki yöntemden elde edilen sonuçların uyum içinde oldukları fakat sonlu elemanlar yönteminin taş köprü analizleri için daha uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır [27].

Toker ve Ünay (2004) farklı yük durumları altında örnek bir tarihi kemer köprüünün teorik modelleme teknikleri üzerinde çalışmışlar ve yığma yapıım tekniğiyle inşa edilmiş yapılar için en iyi hesap yönteminin sonlu elemanlar yöntemi olduğu sonucuna varmışlardır [28].

Ural (2005) sonlu elemanlar yönteminin kemer tipindeki yığma köprülerin yapısal analizlerinde de kullanılabilceği konusunda bir araştırma yapmıştır. Bu amaçla taş kemer bir köprüünün, önce statik olarak kendi ağırlığından dolayı oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplanmış ve köprüünün üzerindeki yükleri güvenle taşıyabildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca modelin lineer elastik deprem davranışı da incelenmiştir [29].

Aoki ve ark. (2004) Japonya'daki 3 açıklı Rakanji taş kemer köprüsünün deneysel ve teorik dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla ilk olarak sonlu eleman modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan köprü malzeme özelliklerini belirleme testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak köprü 3-boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapılan analizler sonucunda köprü teorik mod şekilleri ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Daha sonra köprü üzerinde çeşitli ölçüm noktalarından, çevresel titreşimlerin neden olduğu ivme ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bu

deneysel veriler yardımıyla köprü deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Deneysel yöntemde mod şekilleri ve doğal frekansları hesaplamak için zaman tanım alanındaki veri işleme yöntemleri kullanılmıştır. Son olarak elde edilen deneysel ve teorik dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve aralarındaki uyum gözlemlenmiştir [30].

Beconcini ve ark. (2007) 5 açıklıklı tarihi bir taş kemer köprünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda çalışmışlardır. Başlangıç olarak köprünün sonlu eleman modeli yapılmış ve teorik sonuçları doğrulamak için operasyonel modal analiz uygulanmıştır [31].

Lourenço (1996) yapmış olduğu çalışmada mikro ve makro modelleme teknikleriyle yığma yapıların; doğrusal olmayan doğrusal olmayan davranışları inceleyerek, kayma ve göçme mekanizmaları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamıştır [32].

Lourenço ve ark. (1998) yığma yapı panel elemanları üzerinde dayanımı belirlemek için yaptıkları yüklemeye deneylerinin sonuçları ile pratik çözümlerden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçta çekme ve basınç durumlarında farklı değerler veren bir akma kriteri belirlemiştir [33].

Sucuoğlu ve Erberik (1997) çalışmalarında 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminde, hasar görmeyen üç katlı donatısız bir yığma yapının sismik performansını belirlemek amacıyla, önce deneysel olarak yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerini belirlemişler daha sonra da bu malzeme özelliklerini bilgisayar ortamında oluşturdukları modele uygulayıp yapının doğrusal olmayan dinamik analizini yapmışlardır. Bunun sonucunda elde ettikleri tepki davranışını yorumlayarak önerilerde bulunmuşlardır [34].

Casolo (2000) yapmış olduğu çalışmada tarihi yığma yapılar üzerinde incelemeler yaparak yığma duvarların dinamik deprem hareketlerini belirlemiştir. Duvarların farklı yönde yapacakları eğilmeleri ve düzlem dışı yer değiştirmelerini yorumlamıştır. Farklı yöntemler kullanarak elde ettiği eğrilerle duvarlarda kullanılan malzemelerin davranışını göstermiştir [35].

Şen (2006) yapmış olduğu çalışmada 105 yaşındaki Hemdat İsrail Sinagog'unu Sap2000 sonlu elemanlar yöntemi paket programıyla modelledikten sonra deprem etkisini temsil edecek şekilde düşey ve yatay yükler altında doğrusal analizini yaparak yapının mevcut durumunun deprem performansını değerlendirmiştir. Ayrıca pencere çerçevesiz ve çerçevesiz olmak üzere iki farklı model daha oluşturup analizini yaparak yapıdaki boşlukların yapının sismik davranışına etkisini incelemiştir [36].

Dabanlı (2008) yapmış olduğu çalışmada tarihi yığma yapıların modellenmesi, modelleme teknikleri ve kabuller üzerinde durarak tarihi yığma yapıların deprem dayanımlarını koruma yöntemlerini araştırmıştır. Ayrıca analiz yöntemlerine değinerek örnek yapı olarak ele aldığı Hırka-i Şerif Camii'nin sonlu elemanlar paket programıyla modelini oluşturup dinamik ve statik analizlerini yapmıştır [37].

3. TARİHİ YAPILARDA TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI VE KULLANILAN MALZEMELER

3.1. Tarihi Yığma Yapılar

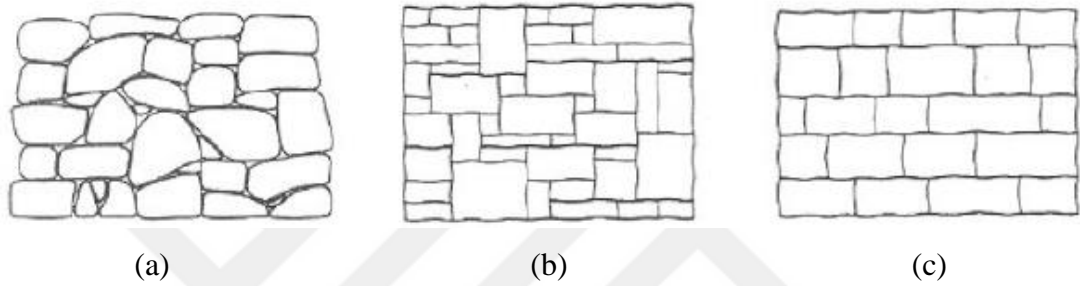
Birçok medeniyetin yaşamış olduğu Ülkemizde, Selçuklular, Asurlular, Bizanslılar ve Osmanlılar gibi medeniyetlerin yapmış olduğu köprüler, saat kuleleri, surlar, kaleler, saraylar, kiliseler, camiler, su kemerleri, medreseler vb. birçok tarihi yığma yapılar, günümüze kadar gelmiş kültürel zenginliklerimizdir. Bir milletin benliği olan tarihinin izlerini taşıyan bu yapıların korunarak gelecek nesillere aktarılabilmesi için bu yapıların dikkatle incelenmesi, deprem dayanımlarının belirlenmesi, gerekli bakım onarım ve güçlendirme işlemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Ülkemizde tarihi yapıların korunması amacıyla yapılan çalışmaların sayısı son yıllarda artış göstermiştir. Fakat tarihi yapıların korunmasına yönelik yapılacak olan çalışmalarda tam anlamıyla baz alınabilecek yönetmelik ve standartlar yoktur. Yığma yapılar için hazırlanan yönetmelikler yeni yapım tekniklerine göre hazırlandıkları için, bu yönetmelikleri tarihi yığma yapılara uygulamak neredeyse imkânsızdır. 2007 Deprem Yönetmeliği'nde tarihi yığma yapıların korunmasına yönelik herhangi bir standart getirmediği için, tarihi yapılarımızın deprem güvenliğinin değerlendirilmesi, restorasyonu ve taşıyıcı elemanlarının güçlendirmesi konularında en son teknoloji ve koruma yöntemleri de göz önüne alınarak, yönetmeliklere tarihi yığma yapı standartları eklenmelidir [38].

İlk yığma yapılar büyük ve ağır doğal taşların üst üste konmasıyla harç kullanılmadan yapılmıştır. Tarihin en görkemli ve ilgi çekici yapıları doğal taşlardan yapılmıştır. Yığma yapılarda kullanılacak doğal taşların, basınç, donma ve zaman etkisiyle oluşan deformasyonlara karşı dayanımlarının yeterli olması gerekir. Doğal taşlardaki kılcal çatlaklardan suların taşın içine sızıp, havaların soğumasıyla birlikte donan suyun hacimce artış göstererek taşın dayanımında azalmaya neden olan çatlakların büyümesi söz konusudur. Bu durum yığma yapıların yapısal güvenliği açısından istenmeyen bir problemdir. Taşların basınç dayanımları, oluşum şartları ve buldukları bölgenin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Volkanik kökenli taşlar tortul kökenli taşlardan daha sert

Duvarların teşkili, malzemelerin farklı dizilişleri ve bir arada kullanımları göz önüne alındığında yığma yapılarda çok farklı yapım tekniklerinin kullanıldığını söylemek mümkündür.

Yığma yapıların, taş yapı birimleri ve bu birimler arasındaki bağlantıyı sağlayan harç gibi malzemelerden oluşan, heterojen bir yapım tekniği vardır. Yığma yapıların yapım tekniği açısından basit bir sınıflandırması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.1) [39].



Şekil 3.1. Yığma Taş Yapılar a) Moloz Taş, b) Kesme Taş, c) İri Kesme Taş [39].

Taşların kullanılan harçlarla bir araya getirildiği, yer yer dolgu malzemeleri, kenetler ve gergiler gibi bağlantı elemanlarının da kullanıldığı yığma yapım tekniğiyle, yıllara meydan okuyan çok sağlam ve estetik tarihi eserler meydana getirilmiştir.

3.2. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları

3.2.1. Temeller

Osmanlı yapılarının en önemli elemanını temeller oluşturmaktadır. Temeller, zemindeki suyun drenajı yapıldıktan sonra yontulmuş büyük kaya blokların yerleştirilmesi ve alt tabanın üzerine duvar tarzı elemanların yapılması ile oluşturulmaktadır. Boşluk hacimlerine gelen alan, genelde büyük taşlarla yapılan blokajlarla kapatılmakta ve yüksekliği yapının büyüklüğüne göre değişmektedir [40, 41, 42].

Temeller; mütemadi, tekil ve radye olmak üzere yapım şekline göre üçe ayrılmaktadır.

Mütemadi Temel: Yapının toprak altındaki kısmının kademeli olarak genişletilmesi, temelin aynı şeklinin duvar boyunca korunması ve en alt katmanındaki harcın içine enine ve boyuna kalaslar yerleştirilmesi ile oluşturulur.

Tekil Temel: Yapıdaki kolonların ve dikey elemanların altına, yapının toprak altında kalan kısmının kademeli olarak kare şeklinde genişletilmesi ile oluşturulur. Tekil temellerin yüksekliği en az 20 cm olmalıdır. Tekil temellerin yapının en alt katmanında harç içine ahşap kalasların yerleştirildiği tabanları bulunmaktadır.

Radye Temel: Taşıma gücü zayıf zeminlerde, yapının oturduğu alanın harçlı taş dolgu ile doldurulması şeklinde yapılan temellerdir.

Tarihi yapılarda temel güçlendirmesi için çeşitli uygulamalar olmakla birlikte genel olarak zayıf zeminlerde, yapının oturacağı tabanın ahşap kazıklar yardımıyla güçlendirildiği görülmektedir [43].

3.2.2. Taşıyıcı Duvarlar

Taşıyıcı duvarlar yapı yüklerinin temele aktarılmasını sağlayan, yapının dış hatlarını ve yapının ara bölme ayrımlarını oluşturan duvarlardır. Kâgir duvarlar gevrek yapılarından dolayı çekme gerilmelerini taşıyamadığı kabul edilen, düşey yük etkisinde kalan taşıyıcı basınç elemanlarıdır. Taşıyıcı duvar yapımında genelde normal ve kesme kuvvetine karşı dayanıklı olan yontma veya moloz taş, tuğla ya da kerpiç kullanılmakta olup, bağlayıcı olarakta kireç, horasan harcı ya da çamur kullanılmaktadır [41, 43].

Kaba Yonu Taş Duvar: Taşların yontulmasıyla düzgün hale getirilen yüzeylerinin, duvar yüzeyine gelecek şekilde yerleştirilmesi ve açık kalan orta bölgelerdeki yüzeylere taş dolgu yapılmasıyla oluşmaktadır. Taş duvarlar birer metre örüldükten sonra tuğladan iki veya daha fazla sıra duvar bölgesi yapılmak suretiyle duvarda düzleme yüzeyi yapılır. Duvar düzleme yüzeyindeki çekme kuvvetlerini karşılamak için düzleme bölgelerine, yapının o anki yüksekliğindeki tüm duvar bölgesini kapsayacak şekilde ahşap hatıllar yapılmaktadır. Özellikle deprem bölgelerinde duvarlar hatılsız yapılmamaktadır [40, 42].

Sıfır Derz Taş Duvar: Taşlar arasında yığma duvarlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmakta olan, duvara belirli oranda esneklik sağlayan ve aynı zamanda bir üst sıradan gelen yükleri alt sıraya üniform olarak aktarmayı sağlayan harç kullanılmadan yapılan duvarlardır. Estetik tasarımlar için veya kapiler suların duvar üst katmanlarına çıkmasını engellemek amacıyla yapılmaktadır [40, 42].

Kenet Demiri: Lama demirlerinin çeşitli boylardaki parça uçlarının 10 ile 15 cm kıvrılmasıyla oluşturulan elemanlardır. Çekme özelliği göstermeyen kenet demirinin uygulama sırasında kıvrılan uçlarının taş oyuklarının içine gömülmesi ve bu oyukların kurşunla doldurulması yapıdan sıyrılmasını engelleyeceğinden önemlidir. [40, 42].

Zıvana Demiri: Duvarlarda üst üste gelen taşları birbirine bağlamak için yapılan pimlerdir. Zıvana demirleri taşlar arasında çekme elemanı görevini üstlenmektedir [40, 42].

3.2.3. Kemerler

İki sütun veya iki ayak arasındaki bir açmanın üstünü örtmek için, uçları bu sütun veya ayaklara oturmak üzere yay şeklinde yapılan, düşey yükleri belli noktalara yönlendirilen, taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Mesnetlerinde gergi çekme çubukları yapılabildiği gibi gergisizde yapılabilmektedirler. Gergisiz olarak yapıldıklarında mutlaka güçlü duvarlara oturmuş olması veya ayak kısımlarında kemer ayağında oluşan yatay kuvvetleri düşeye yönlendiren ağırlık kulelerinin bulunması gerekmektedir. Kemerlerin taşıma kapasitesini ve dayanımlarını taşıyabildikleri basınç ve çekme gerilmeleri belirlemektedir [40, 42].

Kemerler deprem yüklerine çok dayanıklı değildir. Yük taşıma özelliği hassas dengelerle oluştuğu için, özellikle yatay yük etkilerinin iyi incelenmesi gerekmektedir. Bazen taşıyıcı duvarların alt katlarında büyük boşlukların yapılması veya çok büyük açıklıkların kolonlarla geçilmesi gerekirse, üst katlardan gelecek yükleri kolonlara etki ettirmemek için, kolon üstündeki taşıyıcı duvarın içine gizli kemerler yerleştirilir (tahfif kemeri) [19,40, 42, 44].

3.3. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Tarihi yapılarda genel itibarı ile doğal taş, harman tuğlası, kireç, katkı malzemeleri, harç, horasan harcı, kireç harcı, kâgir duvar harcı, sıva gibi malzemeler kullanılmaktadır. Yığma malzemeler genellikle basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olan malzemelerdir. Yığma malzeme ile inşa edilmiş yapının malzeme karakteristiklerini belirlemek oldukça güçtür [45]. Tarihi yapılardaki mevcut yapı malzemesinin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerekli deney ve ölçümlerin yapılması, yapının davranışının belirlenmesi için önemlidir [40].

3.3.1. Doğal Taşlar

Taşlar, yığma yapılarda en çok kullanılan malzeme türlerindedir. Bunun nedeni hemen hemen her yerde bulunabilmesi ve maliyetin düşük olmasıdır. Tablo 3.1. de verilen çeşitli taşların fiziksel özelliklerinden de anlaşılacağı üzere taşlar basınca karşı yüksek, çekmeye karşı düşük dayanım göstermektedirler. İşlenebilme kolaylığından dolayı eski yapılarda daha çok metamorfik ve tortul taşlar kullanılmıştır. Yapı güzel bir tasarım ve dayanıklı malzeme kullanılarak yapılmışsa asırlarca ayakta kalabilmektedir [18, 46, 47].

Tablo 3.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri [18].

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (kPa)	Kayma Dayanımı (kPa)	Çekme Dayanımı (kPa)	Elastisite Modülü (kPa)
Granit	30.000-70.000	14.000-33.000	4.000-7.000	30×10^6 - 55×10^6
Mermer	25.000-65.000	9.000-45.000	1.000-15.000	25×10^6 - 70×10^6
Kireç Taşı	18.000-35.000	6.000-20.000	2.000-6.000	10×10^6 - 55×10^6
Kumtaşı	5.000-30.000	2.000-10.000	2.000-4.000	13×10^6 - 50×10^6
Kuars	10.000-30.000	3.000-10.000	3.000-4.000	15×10^6 - 55×10^6
Serpantin	7.000-30.000	2.000-10.000	6.000-11.000	23×10^6 - 45×10^6

3.3.2. Harman Tuğlası (Horasan Tuğlası)

Harman tuğlası; kireçsiz kil veya killi topraklardan, belirli oranlarda kum ve kuvars karıştırılarak oluşturulan hamurun, kalıplarda şekil verilerek pişirilmesiyle elde edilen yapay taşlardır [18, 46, 47]. Tuğlaların puzolanik özellikte olabilmesi için yapısında puzolanik özellik sağlayacak miktarda kil bulunması ve pişirilme sıcaklığının 700-900°C arasında olması gerekmektedir. Puzolanik özellikte olmayan tuğlaların yapıları dayanıklı olmadığı için yeni tekniklerle üretilen veya geleneksel ocaklarda pişirilen tuğlaların mutlaka puzolanik özelliği kontrol edilmeli, puzolanik özelliğe sahip olmayan tuğlaların tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Tuğlanın kolay üretilmesi ve ucuz olması, yapı ana malzemesi olma niteliğini kazandırmıştır. Tuğlanın Tablo 3.2. de verilen fiziksel değerleri incelendiğinde yalnız basınç dayanıklı bir malzeme olduğu görülmekte olup bu nedenle yapı taşıyıcı sisteminde basınç gerilmelerini alacak şekilde biçimlendirilmesi gerekmektedir [40, 48, 49, 50].

Tablo 3.2. Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri [18].

Basınç Dayanımı (kPa)	Kayma Dayanımı (kPa)	Çekme Dayanımı (kPa)	Elastisite Modülü (kPa)
10.000-30.000	10.000-20.000	2.700-5.000	150.000-300.000

3.3.3. Kireç

Kireç, tüm harçlarda kullanılan bağlayıcı malzemedir.

Yağlı kireç: Kalkerin (CaCO_3) 900° de pişirilmesiyle elde edilen kalsiyum okside (CaO) sönmemiş kireç, su ile söndürülmesi neticesinde oluşan Ca(OH)_2 ye yağlı kireç denilmektedir. Kireç harcı taş ve tuğla gibi doğal malzemelere yapışma özelliğinden dolayı her türlü harcın bağlayıcısı olarak kullanılmaktadır.

Su kireci: %20 oranında kil içeren kalkerin pişirilmesiyle elde edilen malzemelerin su ile söndürülmesi sonucu oluşan hidratelere su kireci denilmektedir. Su kirecinin oluşması için pişirilen malzeme en az %10 oranında CaO içermelidir.

Kireç kalitesine etki eden faktörlere dikkat etmek gerekmektedir. Kireç taşları büyük parçalar içermemeli, gözenekli yapıda olmalıdır. Söndürmede kullanılan su yeterli miktarda ve saf olmalıdır. Söndürme işlemi yüksek olmayan sıcaklıklarda ve karıştırılarak yapılmalıdır. Söndürülmüş kirecin uzun süre havayla temas etmeden bekletilmesi de yapı için büyük fayda sağlamaktadır. Havasız ortamda bekletilen kirecin plastikliği ve su tutma özelliği artmaktadır. Kireç kristallerinin boyutları küçülmekte ve havadaki karbondioksit ile reaksiyona girecek yüzey alanı çoğalmaktadır ve karbonatlaşma daha kolay olmaktadır [40, 50].

3.3.4. Su

Yığıma yapılarda kireç harcı hazırlanmasında kullanılan su içilebilir özellikte olmalı, yapısında sülfat veya klorür iyonları bulunmamalıdır [40].

3.3.5. Agregata

Dolgu olarak kullanılan agregaların kireçle reaksiyona girebilenlerine puzolanik, kireçle reaksiyona girmeyenlerine ise etkisiz agregata denilmektedir. Puzolanik agregaların yapısında, kireçle asit-baz reaksiyonuna girebilen silikatlar ve alimünatlar bulunmaktadır. Harçların nemli ortamlarda, suda ve kuru havada, sertleşmeyi sağlayan asidik yapıdaki puzolanları, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar genelde volkanik oluşumlardır (Tüf, Tras). Yapay puzolanlar pişirilmiş malzemelerdir. (Tuğla, kiremit kırıkları, pirinç kabuğu yakılarak elde edilen külleri) [40, 50].

3.3.6. Katkı Malzemeleri

Sertleşmeyi hızlandırmak veya su izolasyonu sağlamak amacıyla katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Tarih boyunca harçlara basınç ve çekme mukavemeti kazandırabilmek amacıyla çok sayıda katkı malzemesi kullanılmıştır. Sertleşmeyi hızlandırmak amacıyla domuz yağı, kan, süt, yumurta beyazı gibi katkı malzemeleri kullanılırken, su izolasyonu sağlamak için hayvan tutkalı, arap sabunu, keten tohumu yağları gibi katkı malzemeleri kullanılmıştır. Keten lifleri, hayvan tüyleri, incir sütü gibi katkı maddeleri kireç harcına basınç ve çekme mukavemeti kazandırmak için katılmaktadır [40, 50].

3.3.7. Harç

Saman, killi toprak veya kendir parçalarının su ile karıştırılmasıyla elde edilen karışım en basit harçtır. Harçlarda karışım malzemesi olarak; kireç (su kireci, yağlı kireç), puzolan, pişirilip öğütülmüş kil, taş tozları, tuğla ve kiremit tozları kullanılmaktadır. Harcın bağlayıcı özellik kazanması hidrasyon olayıyla başlamaktadır. Harç yapısından suyun tamamen çıkması istenmeyen bir durumdur. Harcın kristalleşip bağlayıcı özelliğini devam ettirebilmesi için zerreler üzerindeki absorbe suyun ve köşe sularının harç içerisinde kalması istenir. Bu sular harç yapısını terk ederse harç özelliğini yitirip uçucu kül haline gelmektedir. Boşluk sularının harcı terk etmesinden sonra su ile tekrar dolması, zerreler arasındaki boşluk suyu basıncını artırıp, zerreler arasındaki kayma mukavemetini azaltıp, harcın dış etkilerle dağılmasını kolaylaştıracağından dolayı istenmeyen bir durumdur. Yığılma yapı harcının çekme özelliğinin de olması istendiğinden dolayı katkı malzemeleri kullanılmaktadır [49, 50].

3.3.8. Kireç Harcı

Agrega, kireç ve su ile yapılan hamura kireç harcı denilmektedir. Kireç harcında agrega dolgu olarak, kireçte bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Kireç harcının özelliklerini iyileştirmek için kullanılacak yapı kısımlarına uygun organik veya inorganik katkı malzemeleri kullanılabilir [49, 50].

3.3.9. Horasan Harcı

Horasan pişirildikten sonra öğütülmüş kildir. Su ile hidrate olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zamanla kristalleşmekte ve katılaşmaktadır. Katılaşmış kireç suyla temas ettiğinde tekrar yumuşar. Kireç havadaki karbondioksitle kimyasal reaksiyona girerek suda erimeyen katı kalsiyum karbonata dönüşür. Hidrate kirecin karbondioksitle reaksiyona girmesi için kuruması gerekmektedir. Duvar örüldükten sonra, harç mutlaka kuru ortamda muhafaza edilmelidir. Pişirilmiş kil tozu kimyasal etkinlik kazanmış silistir. (SiO_2) Silis zayıf bir asittir. Kuvvetli baz olan kireç, pişirilmiş kil tozları ile asit-baz reaksiyonuna girince nemli ortamda kalsiyum silikat oluşur. Kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat dış etkilere dayanıklı malzemelerdir [40, 42, 50].

3.3.10. Sıva

Taşıyıcı sistemin ana malzemesini oluşturan tuğlanın veya taşın dış etkilerden zarar görmemesi amacı ile duvar dış kaplaması olarak yapılmaktadır. Sıva koruyucu amaçla kullanılabilirdiği gibi su veya ısı geçirimsizliğinin azaltılması amacıyla da kullanılmaktadır. Koruma amaçlı kullanılan sıvanın yapışkan özelliğe olması, dökülmeden duvar yüzeyinde uzun süre kalabilmesi ve duvarı oluşturan yapı malzemesiyle uyumlu olması gerekmektedir. Sıva, taş veya tuğla malzemeye nüfuz ederek yapışmalıdır. Sıvanın, duvarı tam anlamıyla koruyabilmesi için duvarda kılcal çatlakların olmaması gerekmektedir. Dış etkiler sebebiyle yapıları bozulan sıvalar dikkatle sıyırılmalı ve temizlendikten sonra yeniden sıvanmalıdır. Sıvanın periyodik olarak sökülüp yenilenmesi taşıyıcıların stabilitesi ve durabilitesi bakımından önemlidir [49, 50].

4. TARİHİ YAPILARIN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Yapı tasarımı, uygulanabilirlik ile mühendisliği dengeleme sanatıdır. Önceden, tecrübeye dayalı bilgilerden kaynağını bir potansiyele sahip olan yapı tasarımı, sonraki dönemlerde matematiksel temellere oturtulmuş ve yöntemleri büyük oranda kusursuz bir hale gelmiştir. Romalı mimar Vitruvius, Mimarlık Üzerine On Kitap isimli eserinde, farklı ocaklardan çıkarılan taşları, farklı ağaçlardan elde edilen ahşabı karşılaştırmıştır. Ayrıca sütunların hangi aralıklarla sıralanması gerektiğinden ve bir tapınağın sütunlarının olması gerekenden daha fazla açıklıklarla geçildiğinden bahsederken, herhangi bir yapısal formül veya hesaptan bahsetmemiştir. Daha sonra orta çağ ustaları, deneme yanılma yoluyla mimaride önemli gelişmelere öncülük etmişlerdir [37].

Taş ustalığının görkemini oluşturan eserlerin sütun, kemer, payanda, kubbe ve tonozlardan oluşan iskeleti, kırılğan ve oldukça ağır olan taşların tüm stabilite kurallarına aykırılığına rağmen soluk kesici bir zafere dönüşmüştür. Yapısal davranışın, bu eserlerin ustaları tarafından ne kadar bilindiği bir soru işareti olsada araştırmalardan elde edilen kanaate göre bu ustalar, yapısal güvenliğin sınırlarını tecrübe ve inceleme ile öğrenmişlerdi. Aynı zamanda, inşa ettikleri yapılarda stabiliteyi etkileyen geometrik oranlardaki isabetleri açısından şanslı da sayılabilirlerdi. Milan'da 1400 civarında uzmanın katıldığı bir araştırmanın raporunda, yapılarda kullanılan oran ve belirsizlikler değerlendirilmiş; 'eğer bir yapıda kullanılan geometrik oranlar doğru ise bu yapının taşıyıcı sisteminin de doğru olduğu anlamına gelir' ifadesi kullanılmıştır [39].

Jean Mignot'a ait olan 'yığma yapı inşaatı bir bilim değildir, yalnızca geometridir' sözü, yığma yapılarda mimari oranların ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir. Mignot teknik ve estetiği beraber ele almıştır. İkisini birbirinden ayırmamak gerekir, çünkü ona göre estetik kurullarla teknik kurullar eşleşir. Mignot'a göre yığma yapılarda tek karşılaştırılabilir kural, ayak veya sütuna orantılı olarak yapılacak payandaların doğru kalınlıkta seçilmesidir. Bu oranı kendisi 3:1 olarak tanımlarken 4:1 ve 1.5:1 oranlarını verenlerde olmuştur. Bu oranlarla çok başarılı sonuçlar elde

edilmiş olmasına rağmen, bir kısım yapısal hasarlar da ortaya çıkmış olduğundan dolayı söz konusu oranlarda birtakım düzeltmelerin yapılması gerektiği de düşünülebilir. Sonraları Leonardo Da Vinci, temeli geometriye dayanan bir takım grafik metotlar geliştirmiştir. Bunlar arasında fazlaca uğraştığı kubbelerin yapımı için kullanmış olduğu zincir eğrisi yöntemi de bulunur [39].

Son yıllarda, yığma yapıların sayısal modellerle incelenmesi yaygınlaşmıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, yığma yapıların analizinde de farklı yaklaşımlar ve farklı yöntemler ortaya çıkmıştır. Yığma yapılar, yapım tekniği itibariyle birde fazla malzemenin bir araya getirilmesi şeklinde uygulandığı için, farklı doğrultularda farklı davranışlar gösteren bir karaktere sahiptir. Modellemede önemli olan bu davranışın temsil edilebilmesidir. Yapının gerçek davranışını modelleme yoluyla elde etmek için bazı idealleştirmelere ve basitleştirici kabullere ihtiyaç duyulur. Yapının değerlendirilmesi için ayrılan zaman ve ekonominin de belirleyici olduğu bir süreçte, kabul edilen yaklaşım sınırları çerçevesinde hesaplar yapılması için farklı idealleştirmeler ve farklı modelleme ilkeleri kullanılabilir. Örneğin, yapıdaki bir elemanın davranışını incelemek için kullanılacak model çok detaylı olarak hazırlanabileceği gibi, yapının genel değerlendirmesi için daha az detay kabul edilebilir. Bilgisayarların işlem ve hafıza kapasiteleri de bu incelemeler için sınırlamalar getirmektedir [37].

4.1. Modelleme İlkeleri ve İdealleştirmeler

4.1.1. Geometrinin İdealleştirilmesi

Tarihi yığma yapıların geometrisi oldukça karmaşıktır. Özellikle taşıyıcı sistem ve dekoratif elemanların aynı olduğu yapılarda, taşıyıcı elemanlarda dekoratif detaylar öne çıkmaktadır. Modelleme yapılırken modellenecek yapı elemanlarının geometrisi doğrusal parçalara bölünerek ve mimari detaylar sadeleştirilerek gerçek eleman geometrieleri oluşturulmaktadır. Yapının gerçek davranışını yansıtabilmek için bu geometrik idealleştirmeler kaçınılmaz olmaktadır. Geometrik basitleştirmeler ve kabuller hususunda aşağıdaki noktalara dikkat edilmesi tavsiye edilmektedir.

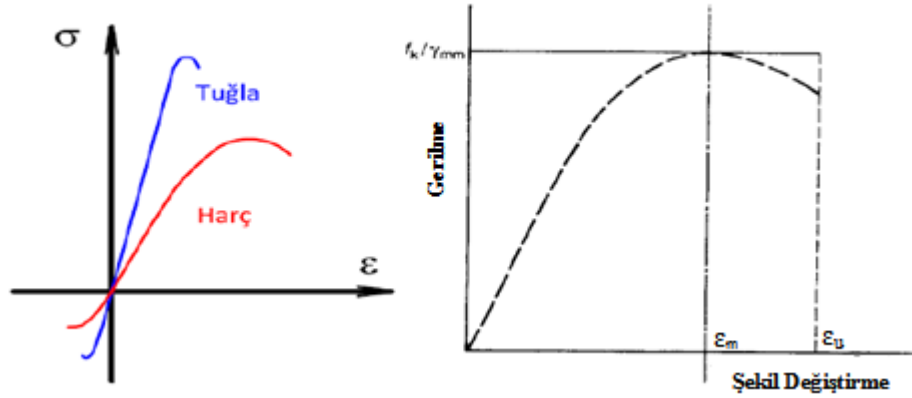
- İdeal ve ortogonal geometri ile modeller analizde daha kararlı olduğundan dolayı geometrik idealleştirilmeler, mümkün olduğunca basit olmalıdır.
- 3 boyutlu modeller yerine, modeli daha kolay oluşturulan ve analizi daha kolay ve kısa sürede gerçekleştirilebilen 2 boyutlu modelleme seçeneği de göz önünde bulundurulmalıdır.
- Kabuk elemanların kalınlıkları boyunca gerilme değişimi incelenemediği için kabuk elemanların kullanılmasında dikkatli olmak gereklidir
- Yapı elemanlarının konumları ve şekillerine uygun, davranışını etkilemeyecek geometrik idealleştirilmeler yapılmalıdır.
- Yapı davranışının en iyi hangi model tarafından temsil edildiğinin anlaşılabilmesi için çeşitli analitik modeller arasında kıyaslamalar yapmak için çok alternatifli çözümler uygulanabilmektedir [19].

4.1.2. Malzemenin İdealleştirilmesi

Malzeme davranışı, gerilme - şekil değiştirme ilişkisini ifade eden bir matematiksel model ile belirlenir. Uygun bir analiz modelinin kurulmasındaki en önemli nokta malzemeye ait matematik modellerin oluşturulmasıdır. Bu matematik modele 'esas model' (constitutive model) denilmektedir. Esas model, gerçek davranışın basitleştirilmiş bir şekilde ifade edilmesidir. Bir yapının gerçek davranışını anlamak için karmaşık ve detaylı kurulacak malzeme modelleri kullanılabilir ancak bu modellerin göçme yüküne yakınsayan sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntem ise, lineer elastik davranıştan, yapının gerçek davranışını tahmin edebilecek sağlam sayısal araçların kullanılmasıdır. Bu araçların kullanılması, tamamen güç tükenmesine gelmeden önce meydana gelebilecek çatlak ve kırılmaların tespitiyle, kullanılabilirlik seviyesi, göçme mekanizmaları ve yapısal güvenliğin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır [39].

Yapı mühendisliğinde, mekanik, statik ve hesaplama yöntemlerine verilen önem, malzeme bilimine verilmemektedir. Bu, yapısal analiz alanındaki gelişmelere malzeme davranışının yetişemediği anlamına da gelir. Bu sebeple, günümüzdeki esas malzeme modelleri, genellikle yapısal analizin doğruluk derecesini de belirleyen bir faktördür. Malzemedeki her gerilmenin bir şekil değiştirmeye karşılık geldiğini

anlatan ve $\sigma / E = \varepsilon$ şeklinde R. Hooke tarafından homojen/elastik cisimler için ifade edilen elastisite kuralı, mühendisler tarafından yapı davranışını ve göçme yükünü anlamak için kullanılmaktadır. Güvenlik katsayıları kullanılmış olmasına rağmen, tecrübe ve deneylere dayanan değerlendirme yöntemleri, bir kısım yanlışlıklara sebep olmuştur. Yığma yapılarda gerçekleştirilmiş olan malzeme davranış modellerine dair araştırmaların sayısı yeterli olmamakla birlikte, şimdiki seviyede, sayısal modeller, yapısal değerlendirme ve güçlendirme için yapı davranışının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir [39].



Şekil 4.1. Tuğla, Harç ve Yığma Eleman, Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı [51,52].

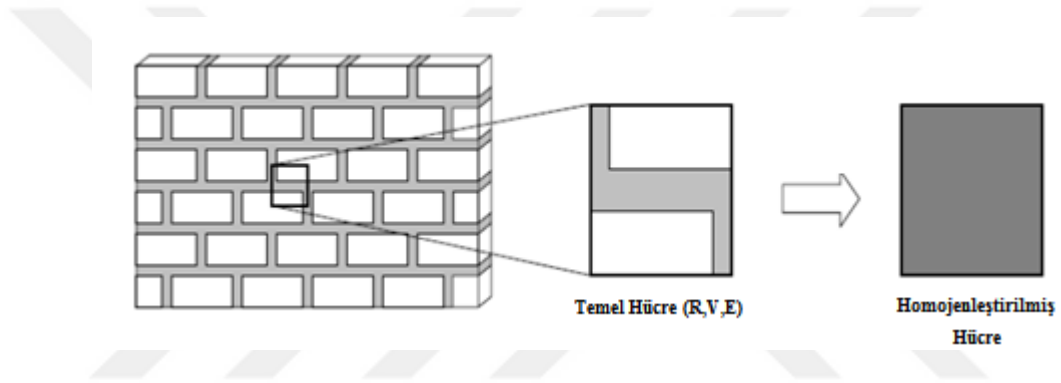
Yığma yapı malzemeleri homojen olmadığı için birbirinden farklı davranışlar gösterebilirler. Ayrıca, inşa safhalarındaki süreksizlikler sebebiyle farklı türden malzemeler de birbirinin yerine kullanılmış olabileceğinden dolayı bu malzemeler de elbette farklı mekanik davranışlar gösterecektir. Yığma yapıların mekanik özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Mekanik davranış homojen değildir.
- Malzeme izotropik değildir, doğrultuya göre farklı davranışlar gösterir.
- Uzun vadeli yükler için çekme mukavemeti sıfır kabul edilir.
- Basınç gerilmeleri altında davranışı gevrekçektir.
- Kayma gerilmeleri altında belirli bir oranda sünek davranış gösterir.

- Elemanların gerçek rijitliklerinin hesabında çatlaklar ve elemanlar arasındaki bağlar dikkate alınmalıdır.
- Mekanik davranış lineer değildir ve çoğu zamanda elastik değildir [51].

Malzeme idealleştirmesi yaparken, özellikle yapının bir bütün olarak değerlendirildiği makro modelleme yönteminde aşağıdaki basitleştirme ve idealleştirmeler yapılabilir:

- Homojen ve İzotrop Malzeme: Malzeme homojen kabul edilip, bütün doğrultularda aynı davranışı gösterdiği kabul edilebilir (Şekil 4.2).



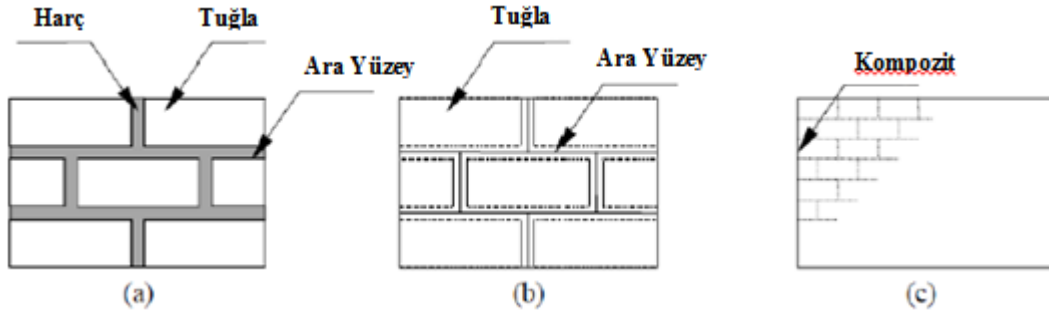
Şekil 4.2. Yığma Malzemelerin Homojenleştirilmesi [53].

- Lineer–Elastik Davranış: Düşük gerilme düzeylerinde malzemenin lineer elastik davranış gösterdiği kabul edilebilir. Gerçekte bu kabul basınç gerilmeleri altında oldukça tutarlıdır. Çünkü yığma yapıların kesitleri ölü yükler altında oldukça düşük seviyelerde gerilmelere sahiptir. Fakat çekme gerilmeleri küçük seviyelerde de olsa çatlaklara sebep olabilmektedir.
- Çekme Mukavemeti: Yığma malzemelerin çekme gerilmesi taşıdığı da kabul edilebilir. Bu gerçek davranışa zıt gibi görünse de çekme gerilmesi oluşan bölgeleri tespit etmek, muhtemel çatlakların yerleri hakkında bilgiler verdiği için faydalıdır. Ayrıca, çekme gerilmesinin olduğu bölgelerdeki malzemeleri modelden çıkarmak suretiyle, lineer olmayan davranışın belirlenmesi de mümkün olmaktadır.
- Lineer Olmayan Davranış: Doğrusal olmayan davranışı, yüksek gerilme değerlerinde dikkate almak gerekir. Lineer olmayan davranış genellikle

Mohr-Cloumb kriteri ve Drucker-Prager kriteri olmak üzere iki kriter şeklinde modellenir. [37].

4.2. Modelleme Yöntemleri

Yığma yapıların modellenmesinde iki temel yaklaşım vardır. Bunlar; mikro modelleme ve makro modelleme teknikleridir. Mikro modelleme tekniğinde, bağlayıcıyı temsil eden harç ile taş veya tuğla ayrı ayrı modellenirken makro modellemede ise malzemeler ayrı ayrı değil, genel bir ilişki içerisinde tek malzeme gibi modellenmektedir. Mikro modelleme yaklaşımında, elastik ötesi davranış ara yüz elemanlarında oluşur. Rijitliğin azalmasına yol açan gerilmeler ve yük akışı izlenebilir. Ara yüz elemanı için farklı göçme modlarını içeren modeller de geliştirilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Model Yaklaşımları a) Detaylı Mikro, b) Basit Mikro, c) Makro Modelleme [53].

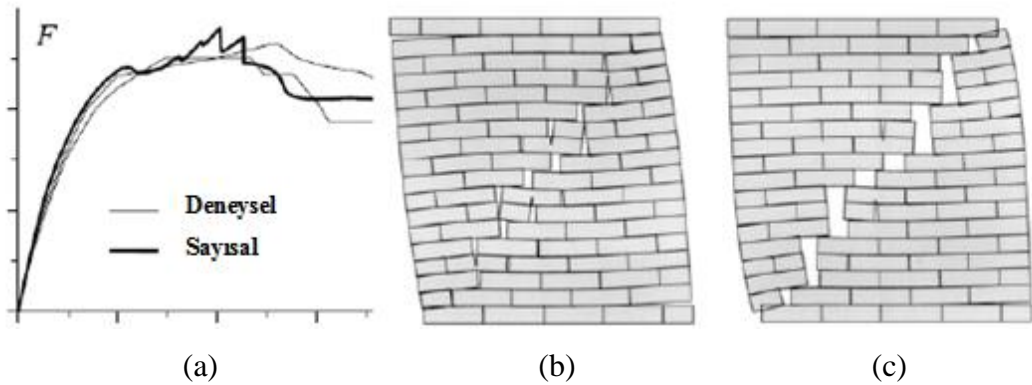
4.2.1. Mikro Modelleme Yöntemi

Yığma yapıdaki derzler rijitliğin azaldığı düzlemler olarak görülür. Detaylı bir modelde, tuğla veya taştan oluşan yığma birimler ile derzleri oluşturan harçlar birbirinden ayrı modellenerek davranış farklılıkları dikkate alınır. Derzdeki harcın yığma birimlere oranla daha güçsüz olması sebebiyle, derzlere yoğunlaşan bir model yaklaşımı olan mikro modelleme tekniği, daha çok büyük boyutlu olmayan yapılarda ve özellikle yapı elemanlarının veya yapıların bir bölümünün detaylı analiz edilmesinde tercih edilen bir tekniktir. Mikro modelleme yaklaşımında yığma yapı birimleri ile harçların mekanik özelliklerinin tam olarak bilinmesi gerektiğinden dolayı modelleme öncesinde detaylı bir malzeme çalışması yapılması şarttır. Mikro

modellemede, doğrusal olmayan davranış ara yüzlerde, muhtemel düşey kırılmalar da birimin ortasında yoğunlaştırılabilir. Bu yaklaşımda genel olarak büyük bir hesap yüküyle karşılaşıldığından dolayı mikro modelleme yaklaşımı yerel analizler için yaygın olarak kullanılırken, büyük ölçekli yapının bütünü değerlendiren çalışmalarda ise tercih edilmemektedir. Uygulamalar ise sonlu elemanlar, ayırık elemanlar ve limit analiz kullanılarak gerçekleştirilebilir [53].

Büyük yer değiştirme (derzler için) ve küçük şekil değiştirmeler (bloklar için) mantığı üzerine kurulu olan ayırık eleman yönteminde, yapı ayrı blokların (katı ya da deforme olabilen) birleşimi olarak kabul edilir. Her bir blok geometrik ve malzeme olarak modellendikten ve kuvvetleri tanımlandıktan sonra, zamana bağlı hareket denklemleri sayısal olarak çözülür (Şekil 4.4).

Sonlu Eleman Yöntemi ile Ayırık Eleman Yöntemi (FEM-DE) (Finite element method-Discrete Element) birlikte de kullanılabilir. Katı elemanlar sonlu eleman yöntemi ile modellenirken bağlayıcı harçlar için ayırık eleman yöntemi kullanılmaktadır. Büyük yer değiştirmeler olduğu zamanlarda bu yöntemi kullanmak zorlaşır. Uygun malzeme parametrelerini belirlemek bu yöntemdeki en büyük zorluktur. Örme yapıları elemanlar genellikle alçı, sıva gibi malzemeler ile kapatıldığından dolayı tuğla/blok ve harç bağlayıcının karakteristiklerinin tespit edilmesinde pratikte zorluklar bulunur [54].



Şekil 4.4. Yığma Duvarın Mikro Model Analizi a) Kuvvet-Yer Değiştirme Diyagramı, b,c) Maksimum ve Nihai Yüklerdeki Deformasyonlar [53].

Ayrık elemanlar metodunun en çok dikkat çeken özellikleri şunlardır:

- Şekil değiştirebilen veya rijit bloklar kullanılabilir.
- Köşe noktaları ve yüzeyler arasında bağlantı sağlanabilir.
- Elemanların birbiri içerisine girme imkânı vardır.
- Gerçek sönüm kat sayısı (dinamik problem) veya yüksek hayali sönüm kat sayısı (statik problem) kullanılabilir.

Bu tekniğin en büyük avantajlarını, büyük yer değiştirmelerin yeterli bir yaklaşımla formülize edilmesi ve bağımsız hareket edebilme yeteneği oluşturur. Olumsuz tarafları ise karşılıklı etkilerin doğru bir biçimde temsil edilebilmesi için çok sayıda temas yüzeyine ihtiyaç duyulması ve üç boyutlu problemler için çok zaman gerekmesi şeklinde sayılabilir [53].

Limit Analizin en çok dikkat çeken özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Rijit bloklar kullanılır.
- Blokların birbirinin içerisine girmesine izin verilmez.
- Optimizasyon sağlayan bir matematik yöntem kullanılır.

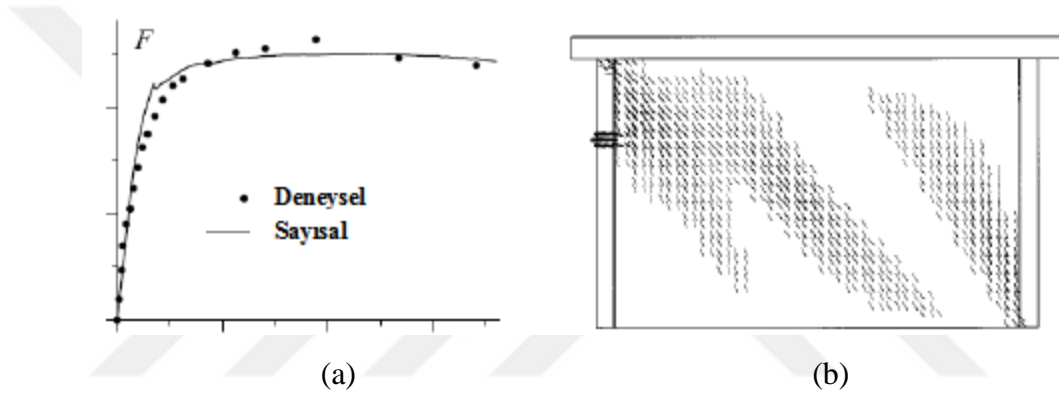
Avantajları, hızlı analiz yapma olanağı ve tasarımda kullanılabilmesidir. Dezavantajları ise göçme yükü ve mekanizmanın tespit edilebilir olması, çekme gerilmelerinin modele dâhil edilememesi ve yükleme geçmişinin tanıtılmasının zor olmasıdır.

Tam bir mikro modelde birleşimlerdeki çatlaklar, derzde meydana gelebilen kaymalar, yığma birimin kırılması ve ezilmesi şeklinde sayılabilecek mekanizmalar bulunmalıdır [53].

4.2.2. Makro Modelleme Yöntemi

Makro modellerin kurulması ve uygulanmasında deneysel verilerin olmaması ve izotrop olmayan malzeme davranışındaki karmaşıklıklar sebebiyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Yeterli sayıda çalışmanın yapılmadığı özel modeller, makro modellemenin zorluklarını aşmak için yeterli olmamaktadır. Bazı çalışmalarda ise

anizotrop malzeme davranışı ve plastisite kavramı kullanılarak, farklı yönlerde farklı sertleşme/yumuşama özelliği gösteren uygulamalar oldukça iyi sonuçlar vermiştir [53]. Buradan da anlaşılacağı üzere makro modellemede malzeme tanımları, model ve analizin doğruluğunu belirleyen ana kriterdir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 4.5.) yığma bir duvara ait makro model analizi görülmektedir. Deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar çok iyi bir benzerlik göstermiştir. Mikro model yöntemi olan ayrık eleman metodu ile aynı duvarın analizinden de benzer sonuçlar çıkmıştır. Sonuç olarak uygun kabuller ve sınır şartları sağlandığı takdirde makro modelin kolay ve hız kazandıran bir teknik olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5. Yığma Duvarın Makro Model Analizi a) Kuvvet-Yer Değiştirme Diyagramı, b) Nihai Yükte Deformasyon Şekli [53].

4.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

20. yüzyılın ortalarına doğru bilgisayar teknolojileri kapsamında pek çok çalışmalar yapılmış ve olumlu sonuçlar yaşanmıştır. Karmaşık, yoğun ve içinden çıkılması çok zor olan hesapların daha doğru ve hızlı çözümü bu şekilde mümkün hale gelmiştir. Bilgisayar teknolojisindeki pek çok gelişmenin ortaya çıkardığı kolaylıklar mühendislere ve diğer araştırmacılara daha çeşitli alanlarda çalışma ve yeni yöntemler üzerinde düşünme imkânı sağlamıştır. Mevcut durumdaki çözüm yöntemlerinin yaklaşık yöntemler olması ve bilgisayarla yapılacak çözümler için çok uygun olmaması sebebiyle yeni yöntemlerin denenme ve tercih edilme sayıları artmıştır [55].

Sonlu elemanlar yöntemi, problemlerin bilgisayar ortamına aktarılma isteği neticesinde geliştirilmiş ve genellikle tüm mühendislik alanlarında, bilgisayar ile çözümlenmeye uygun olması ve kısa zamanda doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamasından dolayı kullanılmış ve halen de kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde ana mantık, bütünü sonlu sayıda elemanlara bölerek sistemin genel davranışını, sistemi meydana getiren elemanların gösterdikleri tepkiler ile detaylı bir şekilde açıklamaktır. Sonlu elemanlar yönteminde çözümün doğruluğu için modellemenin doğru yapılması ve her bir elemanın davranışının gerçeğe en yakın şekilde temsil edilmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanışı üç ana grup olarak ele alınabilir. Bunlar matris ve doğrusal uygulamalar, seçilen sonlu eleman formülasyonu ile statik ve dinamik analizde sonlu eleman denge denklemlerinin etkili bir biçimde çözümü için kullanılan nümerik metotlar şeklinde açıklanabilir [55].

Sonlu elemanlar yöntemi; kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemlerin çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu metotta cisim sonlu boyutta çok sayıda elemana ayrılmaktadır [56,57].

Sonlu eleman yaklaşımında problemin genel bir denklemini yazıldıktan sonra ortam sonlu elemanlara ayrılır ve her eleman için problemin bütünü göz önüne alınarak denklemler çıkartılır. Mevcut sınır şartları içerisinde elemanlar birleştirilir ve ortamın tamamı için matris şeklinde denklemler elde edilir. Elde edilen denklem takımı veya takımları çözülerek bilinmeyenler hesaplanır [58].

Doğru şekil fonksiyonlarının seçiminden sonra, rijitlik ve yük matrislerinin formülasyonunu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmek mümkün olmaktadır. Rijitlik matrisi yöntemi, elde edilen yük formülasyonu ve matris uygulamalarının doğruluğunda yapılması gereken yöntem olarak ele alınması ve yapı sistemlerinin çözümüne uygulanmasından ibarettir. Yapı sisteminin genel şekli nasıl olursa olsun, yapıyı oluşturan bütün elemanların davranışlarının uygun şekil fonksiyonları ile temsil edilebildiği, rijitlik ve yükleme matrisleri formüle edilebildiği için yapı sisteminin çözümü, bu standart rijitlik matrisi uygulaması ile

kolaylıkla yapılabilmektedir. Bahsedilen işlem bilgisayar ile çözümlenmeye son derece uygundur [55].

Elemanlar, geometrisine göre (üçgen, paralel kenar, dörtgen), düğüm sayısına açısından düğüm sayısındaki bilinmeyenlere göre ve sürekli ortam probleminin özelliklerine göre (plak, levha, kabuk problemleri) sonlu elemanlar yönteminde sınıflandırılır. Ayrıca temel matrislerin elde edilmesine göre de elemanları matematik modelleme açısından sınıflandırmak mümkündür [56,57].

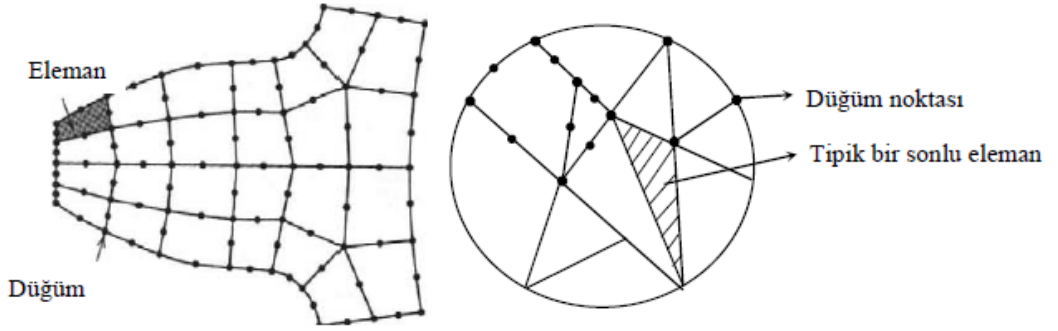
İnşaat mühendisliği alanında birçok problemi çözmeye kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, malzeme özelliklerinin çeşitliliğini ve sınır koşullarının farklılığını güçlükle karşılaşmadan bağdaştırabilen, kullanımı kolay çok yönlü sayısal analiz yöntemlerinden birisidir. Aynı zamanda doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme özelliklerini aynı anda problemde kullanabilen, toplam ve efektif gerilme durumunu gösterecek şekilde formüle edilmiş bir analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislere büyük oranda hız kazandırmakta, dikkat, bilgi ve tecrübe ile kullanıldığında kolaylıkla her probleme uygulanabilmektedir [55].

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı önceden belirlenmiş olan çok sayıda elemana bölünür. Bu elemanlar nod denilen düğüm noktaları ile tekrar birleştirilirler (Şekil 4.6). Her elemanın düğüm noktalarında serbestlik derecesi kadar bilinmeyen sayısı vardır. Elemanların davranışı bu bilinmeyen serbestlik dereceleri içeren denklemlerle ifade edilir. Cismin veya yapının matematiksel modeli, düğüm noktalarında ve eleman sınır yüzeylerinde birtakım süreklilik şartları sağlandığında elde edilmiş olur. Böylece model, sonsuz serbestlik derecesi olan bir modele dönüşmüş olur ve cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde kullanılan bu denklemler düğümlerdeki denge denklemleridir. İlgilenilen problem büyüklüğüne bağlı olarak fazla sayıda hata ve denklem elde edilir. Bahsedilen denklem takımının çözümünde ise bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Sonlu elemanlar metodunda ana fikir sürekli fonksiyonları, bölgesel sürekli fonksiyonlar ile ifade etmektir. Bu da bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değerinin, o elemanın düğüm noktalarındaki değerleri kullanılarak interpolasyon ile bulunacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden sonlu elemanlar

metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğümlerdeki değerler olmaktadır. Varyasyonel bir prensip kullanılarak büyüklük alanının düğümlerdeki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[\mathbf{K}] \cdot [\mathbf{D}] = [\mathbf{R}] \quad (4.1)$$

şeklinde. Burada $[\mathbf{D}]$ 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 bilinmektedir [59].



Şekil 4.6. Sonlu Eleman Modelinde Düğüm Noktaları ve Elemanlar [59].

Yapının davranış sisteminin serbestlik dereceleri bilinmeyenler olarak ele alındıktan sonra bir denklemler sırası ile ifade edilmesi mümkündür. Modelin doğruluğu, alınan elemanların davranışlarının kabulüne ve ağdaki eleman sayısına bağlıdır. Genel itibarıyla, eleman sayısındaki artış, bilinmeyenlerin sayısını da arttıracığından dolayı sonuçların doğruluk ve kesinliğini de arttıracaktır [58].

Sonlu eleman yöntemlerinin sağladığı çok fazla avantaj vardır. Diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemi de bölgeleme prensibine dayanmaktadır. Varyasyon ve kalıcı yaklaşım yöntemi sayesinde teknik, cismi sadece sürekli ortam gibi idealize etmekle kalmayıp, bununla birlikte sürekli ortam içinde her noktada yaklaşık çözüme ulaşan interpolasyonu da sağlamaktadır. Çözüm, sonlu sayıdaki ayırık düğüm noktalarında elde ediliyor olmasına rağmen, alan değişken modelinin formülasyonu ile cisimdeki diğer yer değiştirmeleri de

bulmaktadır. Varyasyonel ve kalıcı yaklaşımlardan farklı olarak, sonlu elemanlar yönteminde ayırık alt bölgelerin kullanımı karmaşık bir geometri gösteren süreklilikler için büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde malzemeler istenilen her boyuta ayrılarak yüksek hassasiyetli sonuçlara ulaşılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi geometrisi düzgün olmayan ve sınır şartlarını sağlamayan problemlere bile kolaylıkla uygulanabilir. Yöntem farklı özellik ve malzemelerden oluşan yapı malzemelerinin bir bütün oluşturmasını sağlar. Sonlu elemanlar yöntemi özellikle yığma yapılar gibi farklı malzemelerden oluşan yapıların gerçek hali gibi modellenebilmesine olanak sağlar. Yöntem aynı yapı elemanı için farklı özellikler kullanmaya olanak sağlar. Yöntem, yapısal sürekliliklerin sonlu boyutlu ayırık elemanlardan oluşan bir sistemle yer değiştirilmesiyle çözümüne olanak sağlamaktadır. Bu sistem çerçeve analizinde sıklıkla kullanılan ve iyi bilinen yer değiştirme modeli aracılığıyla analiz edilmektedir. Tanımlanan sınır koşullarının yöntemdeki denklem kümesine dâhil edilişi gayet kolaydır. Sınır şartları değiştiği zaman alan değişken modelinin değişmesine gerek olmamaktadır. Yöntemin, hiçbir özel tekniğe veya suni yöntemlere ihtiyacı yoktur. Varyasyonel yaklaşımda sadece geometrik sınır koşulları belirlenmelidir. Sonlu elemanlar yöntemi, diğer sayısal yöntemlerle modellenemeyen çeşitli karmaşık malzeme koşullarını ve tiplerini de modelleyebilir. Doğrusal olmayan, zamana veya sıcaklığa bağımlı malzeme davranışları gibi katı mekaniğinin bünyesel özelliklerini de formüle edebilmektedir. Yöntemle her çeşit dış yükler modellenebilir ayrıca diğer analitik metotlarla kıyaslandığında sınır koşullarının esnekliği ayrı bir avantaj sağlamaktadır. Homojen olmayan sürekliliklerin modellenmesinde teknik, farklı elemanlara farklı malzeme özellikleri vererek rahatlıkla çözüme ulaşmaktadır. Değişken malzeme özellikleri temsil edilirken, önceden seçilen polinom modeli ile uygunluk bozulmayacak şekilde, eleman içinde özelliklerin değişimini sağlamak mümkündür. Yöntem, kolay veya karmaşık her türlü problemin sebep sonuç ilişkisini açıklayabilmektedir. Yöntemin sistematik bir şekilde genelleştirilebilmesi, onu çok farklı tipteki problemlere uygulanabilir kılmakta ve yöntemi çok kullanışlı bir hale getirmektedir. Yöntem, fiziksel anlamının olması, matematik temelinin gücü ve ifadesi sayesinde uygulamacılara çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır [55].

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımının en sıkıntılı olan kısmı süreklilikleri alt bölgelere ayırma işlemi ve bilgisayar için hata serbestliği olan veri girişi kısmıdır. Bu işlem bir noktaya kadar otomatik olmasına rağmen, bölgelendirme esnasında mühendislik yorumunun katılabilmesi için tamamiyle otomatikleştirilmemiştir. Veri girişindeki hatalar, başlangıçta kabul edilebilir görünen yanlışların ve fark edilmemiş sonuçların elde edilmesine neden olabileceğinden dolayı kullanıcılar böyle hataları gözden geçirerek kontrol etmelidir. Kontrollere ilave olarak, veri girişini sağlayan ve bölgelendirilmiş sürekliliğin çizimine imkân veren yardımcı işlemler tercih edilmektedir. Bu çizim veri girişinin çok hızlı bir şekilde kullanıcı tarafından kontrol edilmesine imkân sağlamaktadır [55].

4.3. Analiz Yöntemleri

Tarihi yığma yapıların analizinde 3 farklı analiz yöntemi öne çıkmaktadır. Bunlar: Doğrusal Analiz, Doğrusal Olmayan Analiz ve Plastik Analizdir.

Doğrusal (Lineer) Analiz: Malzemenin lineer-elastik davranış kabulüne dayanır. Lineer davranışla yapının limit durumlarının analizi yapılabilir. Ayrıca, yapıda meydana gelen tedrici çatlak ve hasarların incelenmesiyle kullanılabilirlik sınır durumları da anlaşılabilir. Çatlamış elemanların rijitliklerinde azaltmalar yapılarak tekrardan gerilmelerin dağılımı sayesinde limit yük analizi de yapılmaktadır [60].

Doğrusal Olmayan (Non-Lineer) Analiz: Yapıda başlangıçtan itibaren limit duruma gelene kadar oluşan tüm hasarlar ve tepkiler incelenebilir. Yapım sırası ve daha önceki yüklemelerin etkileri de bu analizde hesaba katılabilir. Yapılarda doğrusal olmayan davranışı etkileyen iki ana faktör vardır. Bunlardan birincisi malzemenin elastik ötesi davranışdır. İkincisi ise ikinci mertebe etkileri adıyla bilinen, yüklemeye geometride meydana gelen değişimleri dikkate alan etkileri kapsar. Non-Lineer analiz, limit yük analizinde ve kullanılabilirlik analizlerinde uygulanabilir [60].

Plastik Analiz: Yapının plastik bir davranış sergilediği esasına dayanan ve limit yük analizinde kullanılan bir analiz yöntemidir. Plastik mafsal hipotezine dayanan bir

yapısal davranış modeli olup genellikle doğrulama çalışmalarında kullanılır. Plastik analizde önceki yüklemelerin etkisi göz önüne alınmazken, yüklerin yoğunlaşması dikkate alınabilir ve yüklerin monoton artış gösterdiği kabul edilir. Bu yöntem alt sınır veya üst sınır teoremlerinin birine göre uygulanabilir. İtke çizgisi analizi statik bir alt sınır teoremi olarak, plastik mafsal analizi de kinematik bir üst sınır uygulaması olarak karşımıza çıkmaktadır [60].

Analiz metotları, malzeme davranışı ve sonuçlar açısından birbirinden farklılıklar gösterir. Basit yapılar için çekme mukavemetini sıfır kabul etmek şartıyla non-lineer analiz ile limit yük analizi birbirine yakın göçme mekanizmalarıyla sonuçlanır. Ancak karmaşık yapılar için limit yük analizini yapmak zordur ve sonuçlarda yanlışlıklar olabilmektedir. Tarihi yapıların analizinde çekme mukavemeti önemli bir meseleyi oluşturur. Analizde sıfırdan farklı, düşük veya azalan çekme mukavemeti dikkate alındığında sonuçların güvenilirliği artmaktadır. Bununla birlikte çekme gerilmelerinin değerlendirilmesi kolay değildir [60]. Aşağıdaki tabloda analiz yöntemleri ile giriş ve sonuç verileri gösterilmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Analiz Tiplerinin Karşılaştırılması [60].

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

4.3.1. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

Bir yapının analizi söz konusu olduğu zaman mutlaka gerçekleştirilen bir analiz olan düşey yükler altında statik analiz, düşey yükleme (ölü yükler, hareketli yükler ve kar yükü de dâhil edilebilir) durumlarında yapıda meydana gelen yer değiştirme ve gerilme durumunu görmek amacıyla gerçekleştirilir. Genel olarak yapının düşey yükler altında bir sıkıntı yaşanmayacağı beklenir. Fakat bazen yapıda oluşan

hasarlar, düşey yüklerin taşınması konusunda bile sıkıntılara yol açabilmektedir. Böyle durumların statik analizde dikkate alınması ve olası hasar bölgelerinin tespit edilip, incelenmesi gerekir [37].

4.3.2.Dinamik Analiz

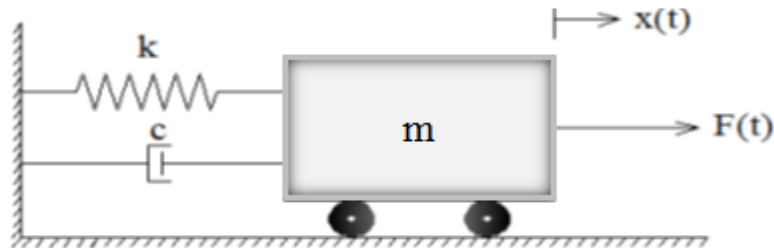
4.3.2.1.Modal Analiz

Modal analizde, yapının mod şekilleri, serbest titreşim periyotları ve kütle katılım oranları belirlenir. Modal analizin anlaşılabilmesi için öncelikle titreşim teorisinin bilinmesi gerekmektedir. Titreşim, serbest titreşim ve zorlanmış titreşim açıklandıktan sonra öncelikle Tek Serbestlik Dereceli Sistemler'in (TSDS) serbest titreşim teorisi, sonra da Çok Serbestlik Dereceli Sistemler'in (ÇSDS) serbest titreşim teorisi anlatılacaktır.

Bir sistemin uygulanan dış yükler etkisi altında göstermiş olduğu tepkiye titreşim denir. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki temel titreşim vardır. Serbest titreşim, bir başlangıç şartı (başlangıç hızı veya başlangıç yer değiştirmesi) ile başlayan ve sonrasında serbest salınmaya bırakılan sistemlerde oluşan titreşimlerdir. Zorlanmış titreşim ise sisteme değişen dış yükler uygulandığında sistemde meydana gelen titreşimlerdir [61].

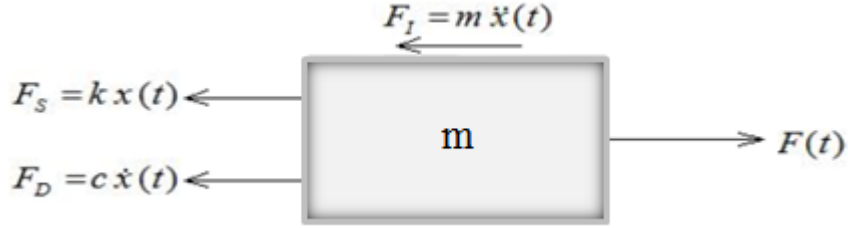
4.3.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapılar çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Bu sistemlerin çözümlerine ulaşabilmek için ise tek serbestlik dereceli sistemlerin çözümlerini elde etmek gerekmektedir. Titreşim analizleri basit bir kütle-yay modeli ile anlaşılabilir. Tek serbestlik dereceli sistemler için teorik model Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. TSDS Teorik Modeli

Şekil 4.7'deki teorik model kullanılarak elde edilen serbest cisim diyagramı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. TSDS Serbest Cisim Diyagramı

Şekil 4.8'deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılarak,

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (6.1)$$

eşitliği elde edilir. (6.1) nolu denklemde gerekli ifadeler yerine yazılırsa TSDS için genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (6.2)$$

olarak elde edilir. (6.1) ve (6.2) nolu denklemlerdeki, F_I atalet kuvveti, F_D sönüm kuvveti, F_S yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti, m yapının kütlesi, c sönüm katsayısı, k yay katsayısı, $\ddot{x}(t)$ kütleinin ivmesi, $\dot{x}(t)$ kütleinin hızı, $x(t)$ kütleinin yer değiştirmesi, $F(t)$ uygulanan dış kuvvet olarak adlandırılır. Sönümsüz serbest titreşimin hareket denklemi için ise genel hareket denklemi olan (6.2) nolu denklemde, titreşime başlangıç şartlarının sebep olduğu düşünülerek uygulanan dış kuvvet $F(t)=0$ ve sönüm sabiti $c=0$ olarak kabul edilmektedir. (6.2) nolu denklem bu şartlar altında düzenlendiğinde, TSDS için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (6.3)$$

olarak bulunur. Denklem (6.3) düzenlenirse

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (6.4)$$

ve buradan da

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6.5)$$

elde edilir. (6.5) nolu denklemdeki ω , sönümsüz doğal açısal frekanstır. (6.4) nolu denklem ikinci dereceden adi homojen bir diferansiyel denklem olduğu için çözüm

$$x(t) = Ce^{st} \quad (6.6)$$

olarak biçimde aranır. Bu ifade (6.3) nolu denkleme göre yeniden düzenlenirse,

$$\ddot{x}(t) = Cs^2e^{st} \quad (6.7)$$

eşitliği bulunur. Denklem (6.6) ve (6.7), (6.4) nolu denklemde yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$Ce^{st}(ms^2 + k) = 0 \quad (6.8)$$

Burada $C \neq 0$ ve $e^{st} \neq 0$ olduğu için,

$$(ms^2 + k) = 0 \rightarrow s_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}} = \pm i\omega \quad (6.9)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= C_1e^{st} = C_1e^{i\omega t} \\ x_2(t) &= C_2e^{st} = C_2e^{-i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

denklemlerine ulaşılır. Denklemlerdeki C_1 ve C_2 keyfi sabitlerdir. Sistem lineer olarak ele alındığında toplam davranış,

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = C_1e^{i\omega t} + C_2e^{-i\omega t} \quad (6.11)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (6.11)'e aşağıdaki Euler formülü,

$$\left. \begin{aligned} e^{i\omega t} &= \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \\ e^{-i\omega t} &= \cos(\omega t) - i \sin(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

uygulanıp düzenlendiğinde sistemin yer değiştirmesi,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) \quad (6.13)$$

şeklinde elde edilir. Denklemdede görülenen A_s ve B_s değerleri, sabit değerler olup aşağıdaki denklemlerde görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\left. \begin{aligned} A_s &= C_1 + C_2 \\ B_s &= i(C_1 - C_2) \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

$$\left. \begin{aligned} x(0) &= x_0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

Başlangıç koşulları kullanılarak, (6.13) nolu denklem yeniden yazıldığında sistem davranışı,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) = x_0 \cos(\omega t) + (\dot{x}_0/\omega) \sin(\omega t) \quad (6.16)$$

olarak elde edilir [62].

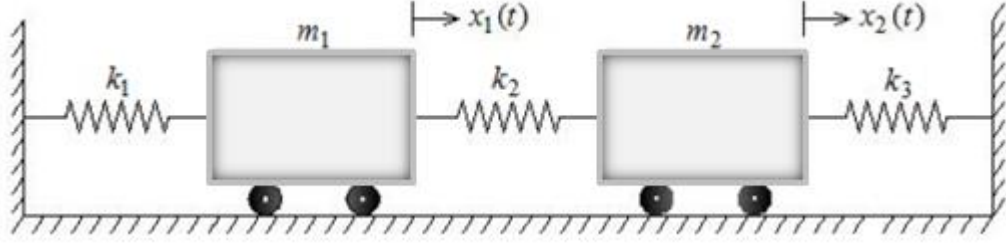
4.3.2.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Günlük hayatta karşımıza çıkan sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşiminde skaler değerler yer alırken, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler yer alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemini,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (6.17)$$

dir. Burada, $[M]$ kütle matrisi, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörü, $[C]$ sönüm matrisi, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörü, $[K]$ rijitlik matrisi, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörü ve $\{F(t)\}$ kuvvet vektörüdür. Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönümsüz serbest titreşimden bahsedebilmek için kuvvet vektörü $\{F(t)\} = 0$ ve sönüm matrisi $[C] = 0$ kabul edilmelidir. Çok serbestlik dereceli sistemleri göstermek amacıyla iki serbestlik

dereceli bir sistemin sönümsüz serbest kütle-yay teorik modeli Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. ÇSDS Sönümsüz Serbest Teorik Modeli

Sönümsüz serbest titreşimlerde sönüm olmadığından dolayı teorik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir ve hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{0\} \quad (6.18)$$

şekline gelir. Denklemin çözümü için basit harmonik hareket dikkate alınarak

$$\{x(t)\} = \{A\} \sin(\varphi + \omega t) \quad (6.19)$$

olduğu varsayılır [62]. Burada; $\{A\}$, zamana bağlı olmayan bir vektör olup genlik vektörü olarak adlandırılır. (6.19) nolu denklem, (6.18) nolu denklemde yerine yazıldığında,

$$-\omega^2 [M] \{A\} \sin(\varphi + \omega t) + [K] \{A\} \sin(\varphi + \omega t) = \{0\} \quad (6.20)$$

ifadesi elde edilir. Denklemdaki $\sin(\varphi + \omega t)$ terimi keyfi olduğundan denklemden çıkartılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{A\} = \{0\} \quad (6.21)$$

denklemini bulunur ve bu denklem $[M]^{-1}$ ile çarpıldığında

$$[[D] - \lambda [I]] \{A\} = \{0\} \quad (6.22)$$

Standart öz değer problemi elde edilir [62]. Burada,

$$[D] = [M]^{-1} [K] \quad (6.23)$$

olur. $[I]$ birim diyagonal matris ve $\lambda = \omega^2$ öz değerlerdir. (6.21) nolu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$| [K] - \omega^2 [M] | = \{ 0 \} \quad (6.24)$$

karakteristik determinant denklemini elde edilmiş olur. Bu denklemin çözümünden n serbestlik derecesi sayısınca sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde edilir. Elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekans değerine karşılık gelen mod şekli de temel mod şekli olarak adlandırılır. Her λ_r öz değer vektörüne karşılık bir A_r öz vektör veya doğal mod şekli belirlenir.

$$A_r = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{Bmatrix}_r \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6.25)$$

Doğal titreşim modlarını elde etmek amacıyla (6.22) nolu eşitlik düzenlenirse,

$$[D] \{ A \} = \lambda \{ A \} \quad (6.26)$$

elde edilir ve r. mod için,

$$[D] \{ A \}_r = \lambda_r \{ A \}_r \quad (6.27)$$

şeklini alır. (6.27) nolu eşitlik, C_r sabiti ile çarpılırsa ve

$$C_r \{ A_r \} = \{ \emptyset \}_r \quad (6.28)$$

yazılırsa,

$$[D] \{ \emptyset \}_r = \lambda_r \{ \emptyset \}_r \quad (6.29)$$

eşitliği elde edilir [62]. Bu eşitlikte $\{\Phi\}_r$, λ_r 'ye karşılık gelen modal vektördür. $\{A_r\}$ vektörü küçük C_r sabiti ile normalleştirilmektedir. $\{\Phi\}_r$ modal vektörlerinin beraber yazılmasıyla $[\Phi]$ modal matrisi elde edilir ve (6.30) nolu eşitlikteki gibi gösterilir.

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\Phi\}_1 \ \{\Phi\}_2 \ \dots \ \{\Phi\}_n] \quad (6.30)$$

4.3.2.2. Davranış Spektrumu Analizi

Zaman alanında yer değiştirme, sayısal çözümleme veya kesit etkisi gibi bir sistem parametresinin zamana bağlı olan değişimini verir. Fakat, taşıyıcı sistemin güvenilirliğinin belirlenmesinde genel anlamda bu parametrenin en büyük değeri etkili olmaktadır. Bu sebepten dolayı, uzun ve çok yorucu olan sayısal çözümlere ihtiyaç kalmadan, deprem hareketinin spektrumu kullanılarak, en elverişsiz değerlerin elde edilmesi çok büyük kolaylık sağlamaktadır. Spektral eğriler sadece en büyük değer elde edilmesine yönelik hazırlandıkları ve belirli bir anda çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmadıkları için, matematiksel bir yaklaşıklığın yapılması gerekli olmaktadır. Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) yönteminde, bütün modların en büyük katkılarının aynı anda olduğu kabul edilerek, incelenen parametrenin meydana gelebilecek en büyük değerlerinin üst sınırı elde edilmektedir fakat bu değer aşırı büyük çıktığı için genellikle kullanılmamaktadır. Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemiyle elde edilen değer, serbest titreşim frekansları ayırık olan sistemlerde, zaman tanım alanında çözümleme ile elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu kuralın sınırlamasını kaldıran Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi ise çok daha kapsamlı olup, serbest titreşim frekansları yakın olan sistemler için de kullanılabilir. Modların karşılıklı etkileşimi ihmal edildiği takdirde Tam Karesel Birleştirme ile Karelerin Toplamının Karekökü Kuralı üst üste düşer [63].

Matematik birleştirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, sistemin zaman alanında dinamik bir çözümünün yapılmasına gerek kalmaz fakat Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nde de sistemin periyot, sönüm ve mod şekilleri gibi sistemin dinamik özellikleri yanında, depremin dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri de kullanıldığı için, bu yöntem de dinamik bir yöntem haline gelmektedir. Daha önceki

deprem kayıtlarından yola çıkılarak spektrum eğrilerinin hazırlanması ile Modal Spektral Çözümleme Yöntemi'nin başlangıcını teşkil etmek, zaman tanım alanında adım adım sayısal çözüme göre büyük bir kolaylık sağlamaktadır [63].

4.3.2.3. Zaman Tanım Alanında Analiz

Zaman tanım alanı, belirli bir yönde, belirli zaman aralıklarıyla tutulan deprem ivme değerlerinin kayıdır. Zaman tanım alanında analiz yönteminin uygulamada başarılı olması, meydana gelen deprem ivmelerinin düzgün bir şekilde kayda alınmasıyla mümkün olmaktadır. Depreme maruz kalan bölgenin deprem kayıtlarının mevcut olması, modelleme ve analizde hazır verilerin kullanılması bakımından çok sayıdaki belirsizliği ortadan kaldırarak sismik etkinin gerçeğe en yakın şekilde temsil edilmesine kolaylık sağlayabilir. Ancak her depremin kendisine özgü bir oluşum özelliği olduğundan dolayı deprem kayıtlarının mevcut olması tahmini bir depremin yaratacağı etkinin tam olarak yansıtılması anlamına gelmez [64].

Zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilmesindeki en önemli nokta, uygun deprem kayıtlarının seçilmesi ve bu kayıtların analiz yapılacak bilgisayar programında kullanılabilecek şekilde ölçeklenmesidir. Deprem kayıtlarını üç farklı veri kaynağından elde etmek mümkündür. Bunlar; yapay yollar kullanılarak oluşturulan ve tasarım ivme spektrumu uyumlu kayıtlar, kaynak ve dalga yayılımı özellikleri yapay yolla fiziksel olarak benzeştirilmiş kayıtlar ve gerçek depremlerden elde edilen kayıtlardır. Yapay olarak oluşturulmuş deprem kayıtları; geniş bir periyod aralığında, tepki spektrumu elastik tasarım spektrumuna benzeyen yapay kayıtlar üretilebilir. Sadeleştirilmiş tepki spektrumundan güç spektral yoğunluk fonksiyonu bulunur ve bu fonksiyon ile rastgele faz açıları birleştirilerek sinüzoidal sinyaller türetilir. Bu sinüzoidal hareketler toplanarak yapay kayıt elde edilmiş olur. Benzeştirilmiş deprem kayıtları; yayılım ortamı ve zemin özelliklerini dikkate alan sismolojik kaynak modellerinden elde edilir. Bunun içinde uygun kaynak, yayılım ortamı ve zemin özelliklerinin tanımlanması gerekir. Gerçek depremlerden elde edilen kayıtlar; yer sarsıntısının oluşumu ve özellikleri hakkında sağlıklı bilgiler içerir. Bununla birlikte kayıtlara etkisi olan kaynak, yayılım ortamı ve zemin gibi bütün faktörleri de yansıtır. Gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi, diğer kayıtlarla

elde edilen sonuçlara göre gerçeğe daha yakındır. Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak deprem esnasında alınan kayıt sayılarındaki artış ve bunlara erişimin kolaylaşması zaman tanım alanında yapılacak hesaplarda, gerçek kayıtları en çok tercih edilen seçenek haline getirmiştir [65].

Bir bölgedeki tasarım ivme spektrumuna uygun yer hareketi kaydının seçilebilmesi için kullanılan ölçütler bölgenin jeolojik ve sismolojik özelliklerini içermelidir. Depremin büyüklüğü, depremin oluşma tipi, çalışmaya konu olan bölgenin faya olan mesafesi, fayın kırılma yönü ve şekli ile yerel zemin koşullarının bilinmesi gerekir. Benzeştirme için kullanılacak ölçütler belirlendikten sonra, gerçek kayıtlara uygulanacak olan ölçeklemelerin yapılması için yöntem belirlenmeli ve yeterli yaklaşım sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir [65].

4.3.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analiz sonuçlarının yorumlanması şüphesiz çalışmanın en önemli safhalarından birisidir. Yapılan analizler sonucunda, yapının güvenlik seviyesi değerlendirilir. Yapının sağlaması gereken performans seviyesine uygunluğu kontrol edilip, uymadığı takdirde alınması gereken tedbirler ve bunların uygulama yöntemleri üzerinde durulur.

Değerlendirme bölümünde önerilen yaklaşım, çeşitli analizlerden elde edilen sonuçların birbiriyle karşılaştırılması yönündedir. Sonuçların uyumu yada uyumsuzlukları yapı hakkında ve kullanılan yöntemlerin güvenilirliği hakkında ipuçları içerebilir.

5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

5.1. Elekçi Köprüsü

Yozgat – Boğazlıyan eski kervan yolu üzerinde yer alan ve Anadolu’da sağ kol olarak bilinen (İran ve kutsal topraklara bağlantıyı sağlayan) ana yol güzergahına göre; içerde kalan ve Anadolu’da tarihi yollar içerisinde ikincil yollar (kervan yolları) olarak nitelendirdiğimiz yol üzerinde inşa edilen köprü, bugünkü Bozok Üniversitesi Erdoğan Akdağ Kampüsü alanı içerisinde bulunmaktadır. Delicesuyu’nun bir kolu üzerinde, kuzey – güney doğrultusunda kurulmuştur. Kültür Bakanlığı’nın 21.07.1983 tarih ve 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu’nun 3. Maddesinde tarif olunan ve 6. Maddesinde belirtilen korunması gereken taşınmaz kültür varlıkları kapsamında 17.06.1987 tarih ve 3386 sayılı Tabiat ve Kültür Varlıklarının Tespit ve Tescil Yönetmeliği’nin 6. Maddesi gereğince (öncelikle cephe taşlarının ve üzerinden geçen yolun temizlenmesi ve zemin döşemesinin yapılması, eksik olan korkuluk taşlarının tamamlanması, altından geçen dere yatağının kemer ayakları başlangıç seviyesine indirilmesi v.b.) aslına uygun olarak Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2011 yılında restore edilerek kullanıma açılmıştır. Elekçi Köprüsü’nün güney tarafı, kuzey tarafı, batı tarafı ve doğu tarafı görünüşleri sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Elekçi Köprüsü Güney Tarafı Görünüşü



Şekil 5.2. Elekçi Köprüsü Kuzey Tarafı Görünüşü

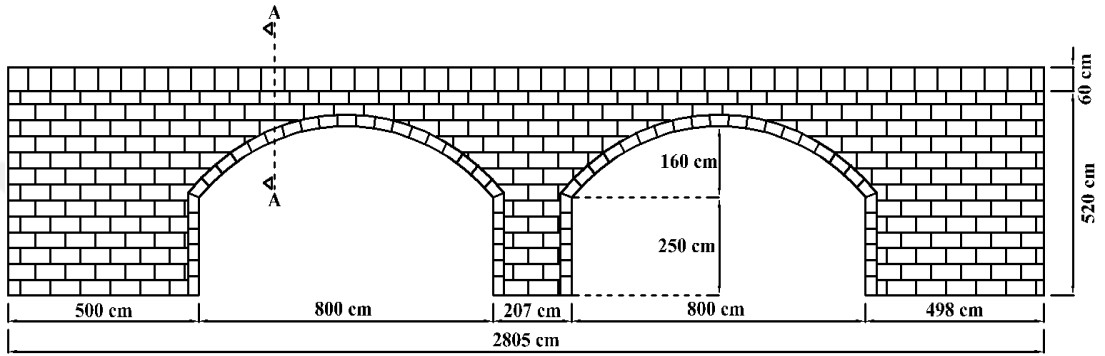


Şekil 5.3. Elekçi Köprüsü Batı Tarafı Görünüşü

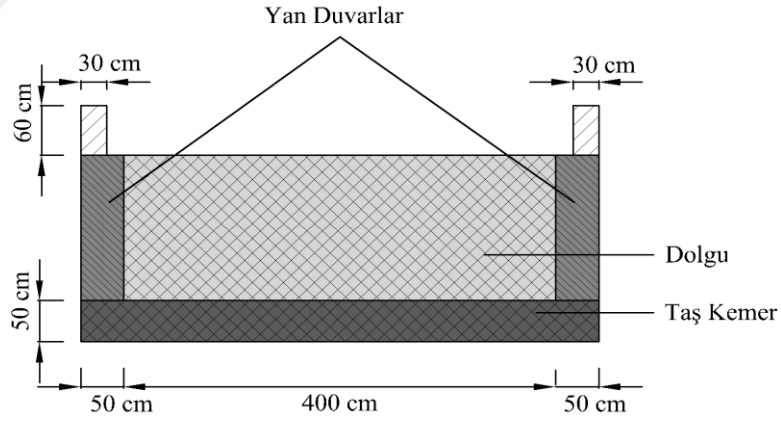


Şekil 5.4. Elekçi Köprüsü Doğu Tarafı Görünüşü

Köprünün üzerinde küçük bir kitabesi vardır. Kitabesine göre II. Abdülhamit döneminde, H.1310/M 1894-1895 yılında inşa edilmiştir. Ayağının kaynak ve mansap tarafında birer mahmuz bulunur. Köprü, sarı kesme taştan yapılan 2 gözlü bir kemer köprü olup, uzunluğu 28,05m, genişliği 5m, kemer açıklıkları 8m ve kemer yüksekliği 4,10m'dir. Tarihi kemer köprüyü oluşturan elemanların kesit görünüşü ve özellikleri Şekil 5.5'te verilmektedir.



a) Köprü Boyuna Kesiti



b) Köprü Enine Kesiti (A-A Kesiti)

Şekil 5.5. Elekçi Köprüsü Kesit Özellikleri

Köprü kemer kalınlığı 0,5m, yan duvarların kalınlığı 0,5m ve yan duvarlar arasındaki dolgu duvarın kalınlığı ise 4m'dir. Yan duvarların yükseklikleri her iki tarafta aynı olup 5,2m'dir. Ayrıca köprüünün her iki tarafında 0,3*0,6m boyutlarında korkuluklar mevcuttur.

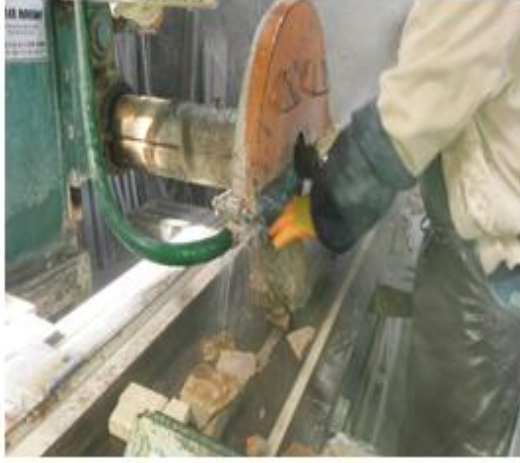
5.1.1. Elekçi Köprüsü Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada, taş kemer köprülerin dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla, Bozok Üniversitesi Erdoğan Akdağ Kampüsü alanı içerisinde yer alan Elekçi Köprüsü ele alınmıştır. Tarihi köprü SAP2000 bilgisayar programında çeşitli geometrilerdeki yapı elemanlarının kesit ve malzeme özelliklerinin kolaylıkla tanımlanabileceği bir analiz yöntemi olan Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Matematiksel modelin kendi ağırlığından meydana gelen davranışının belirlenebilmesi amacıyla statik analiz, mod şekillerinin ve yapı periyotlarının belirlenmesi amacıyla modal analizleri ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla geçmiş yıllardaki meydana gelen depremlerin ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır.

5.1.2. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken malzeme özellikleri ne kadar doğru seçilirse, 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 taş kemer ve yan duvarlarını oluşturan taşların birim hacim ağırlıklarının ve maksimum basınç dayanımlarının elde edilmesi amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. İlave olarak literatürde tarihi köprülerle ilgili yapılan benzer çalışmalar araştırılıp, bu çalışmalardan elde edilen malzeme özelliklerinden de faydalanılmıştır [20, 61, 66, 67].

Tarihi köprünün taş kemer ve yan duvarlarını oluşturan sarı kesme taşlardan 10*10*10 cm boyutlarında 3 adet ve 4*4*4 cm boyutlarında 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kırılma işlemine tabi tutulup numunelerin birim hacim ağırlıkları ve maksimum basınç dayanımları elde edilmiştir. Numunelerin hazırlanması, numunelerin kırılması ve kırılmış numuneler sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Numunelerin Hazırlanması



Şekil 5.7. Numunelerin Kırılması



Şekil 5.8. Kırılmış Numuneler

Kırma işlemi sonucu elde edilen, numunelerin birim hacim ağırlıkları ve maksimum basınç dayanımları sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Numunelerin Birim Hacim Ağırlıkları

10*10*10 cm Boyutundaki Numuneler			4*4*4 cm Boyutundaki Numuneler					
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)			Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)					
Birinci Numune	İkinci Numune	Üçüncü Numune	Birinci Numune	İkinci Numune	Üçüncü Numune	Dördüncü Numune	Beşinci Numune	Altıncı Numune
1636	1634	1633	1576	1791	1826	1819	1674	1677

Tablo 5.2. Numunelerin Maksimum Basınç Dayanımları

10*10*10 cm Boyutundaki Numuneler			4*4*4 cm Boyutundaki Numuneler					
Maksimum Basınç Dayanımı (kN/m ²)			Maksimum Basınç Dayanımı (kN/m ²)					
Birinci Numune	İkinci Numune	Üçüncü Numune	Birinci Numune	İkinci Numune	Üçüncü Numune	Dördüncü Numune	Beşinci Numune	Altıncı Numune
31140	31340	32620	23750	29625	36375	36562	36562	21687

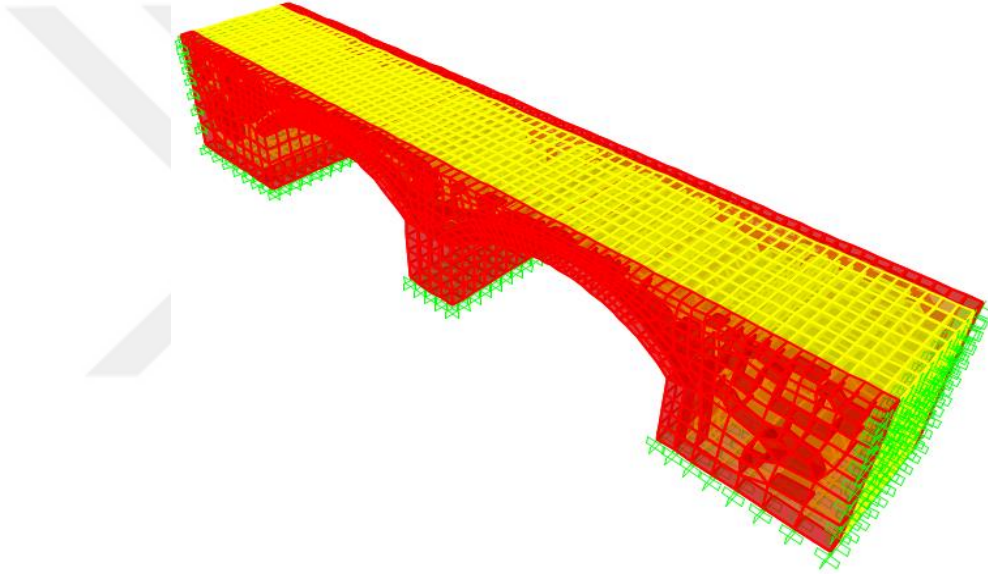
Tarihi köprü'nün taş kemer ve yan duvarlarını oluşturan taşlar aynı cins olduğundan dolayı bu çalışmadaki modellemede taş kemer ve yan duvarlar için aynı malzeme özellikleri dolgu duvar için ise farklı malzeme özellikleri kullanılmıştır. Tarihi köprü'nün sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzeme özellikleri Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3. Teorik Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri [20,61,66,67].

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Taş Kemer	3,0E9	0,2	1600
Yan Duvarlar	3,0E9	0,2	1600
Dolgu Duvar	1,5E9	0,05	1300

Tarihi Elekçi Köprü'sü'nün sonlu eleman modeli oluşturulurken SAP2000 [68] programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde yapının veya yapı

elemanlarının geometrisi sonlu sayıda düğüm noktası ile belirlendiğinden dolayı Elekçi Köprüsü'nün sonlu eleman modeli oluşturulurken yapı davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla çok sayıda düğüm noktası kullanılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde 5378 katı (solid) eleman ve bu elemanları oluşturmak içinde 7141 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Bu çalışmada hem köprü tabanında hem de enine doğrultudaki yan ve dolgu duvarlarındaki serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Çalışmanın 7. Bölümünde tanıtılan, Şekil 5.5'te boyutları ve kesit özellikleri verilen tarihi Elekçi Köprüsünün oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



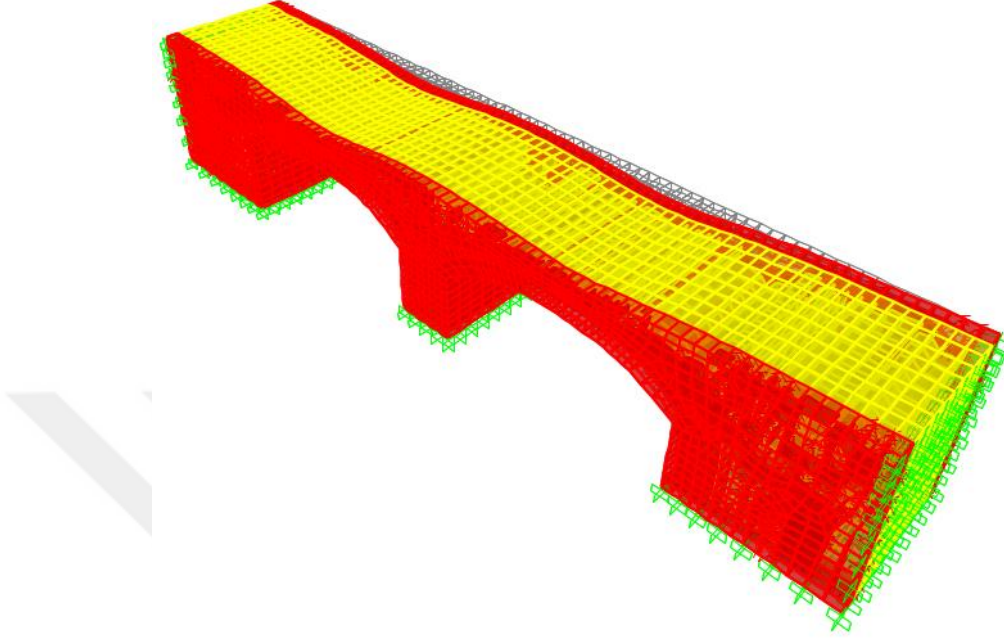
Şekil 5.9. Elekçi Köprüsü Sonlu Eleman Modeli

5.1.3. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

Düşey yükler altında statik analiz, düşey yükler altında yapıda meydana gelen gerilme dağılımı ve yer değiştirmeleri görmek açısından önemlidir. Genel olarak her yapının düşey yükleri sıkıntısız bir şekilde taşınması beklenmesine rağmen olası düşey yükleri taşımadaki problemler bu analiz sayesinde rahatlıkla görülüp önlem alınabilmektedir.

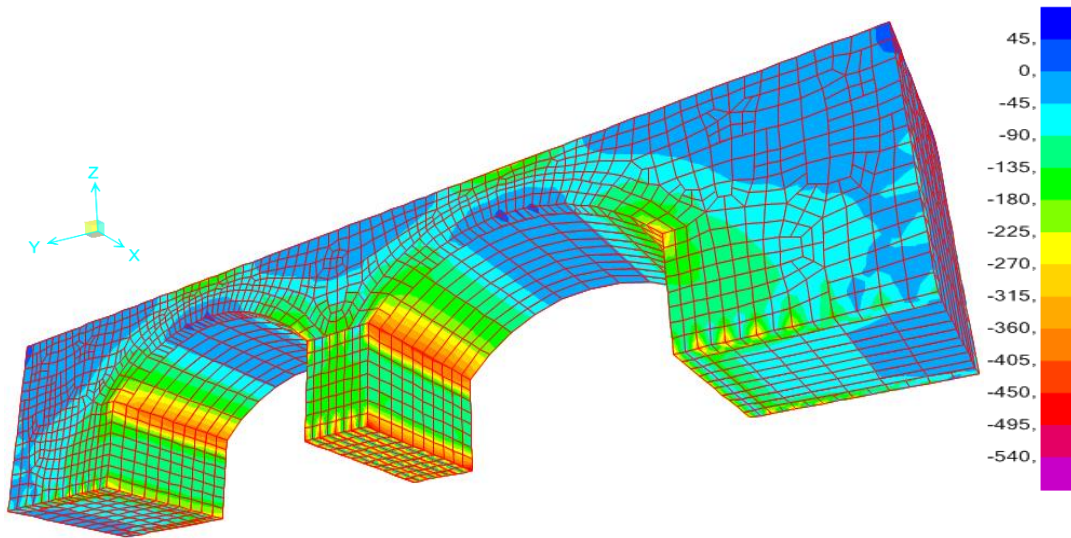
Yapılan çalışmada ölü yükler malzeme birim ağırlıkları ile tanımlanmıştır. Hareketli yükler ve kar yükü hesaba katılmamıştır. Yapılan statik analiz sonrası köprünün şekil

değiştirmiş 3D görüntüsü, maksimum basınc gerilmeleri ve maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



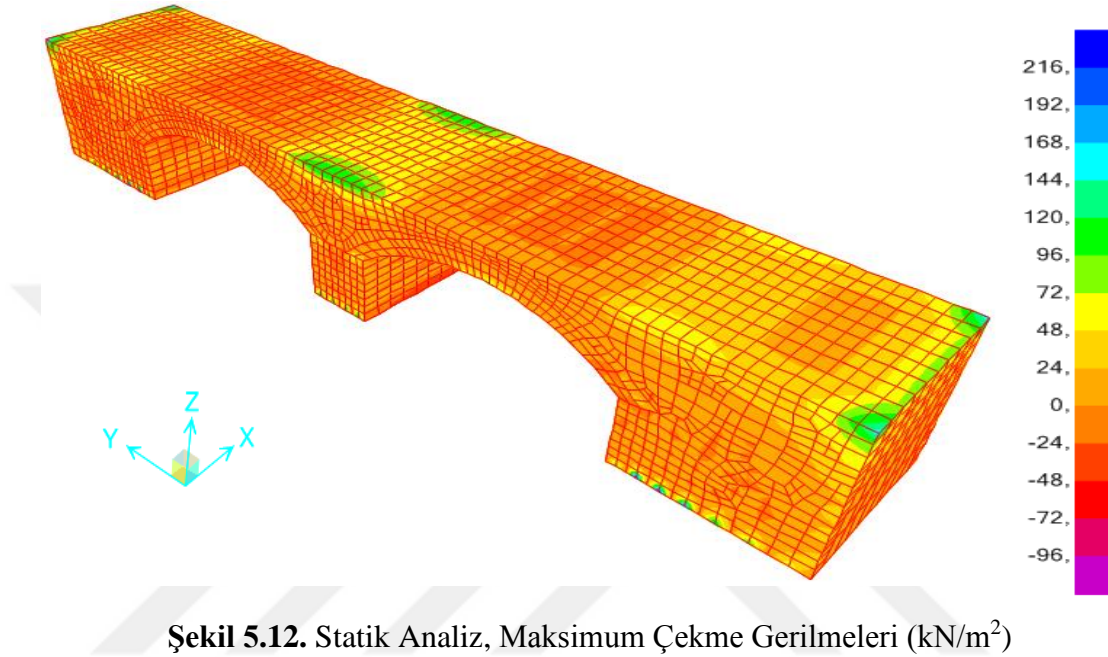
Şekil 5.10. Elekçi Köprüsü’nün Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü

Yapılan statik analiz sonrasında en büyük yer değiştirmeler düşey 3 eksenini (z eksenini) doğrultusunda olup köprünün taş kemerlerinin üzerindeki yan ve dolgu duvarlarda gerçekleşmiştir. En büyük yer değiştirme miktarının 0,6 mm değerinde olduğu grlmştir.



Şekil 5.11. Statik Analiz, Maksimum Basınc Gerilmeleri (kN/m²)

Statik analizde maksimum basınç gerilmeleri dağılımına bakıldığında en büyük gerilmelerin taş kemerlerin köprü ayağı ile birleştiği noktalarda ve köprü ayaklarının alt kısımlarında olduğu görülmektedir. En büyük gerilme değeri 575,9 kN/m² olarak bulunmuştur.



Statik Analizde maksimum çekme gerilmeleri dağılımına bakıldığında en büyük gerilmelerin köprü kenarlarının üst uç noktalarında ve ortadaki köprü ayağının üst kısmındaki yan duvarlarda olduğu görülmektedir. En büyük gerilme değeri 224,9 kN/m² olarak bulunmuştur.

5.1.4. Dinamik Analizler

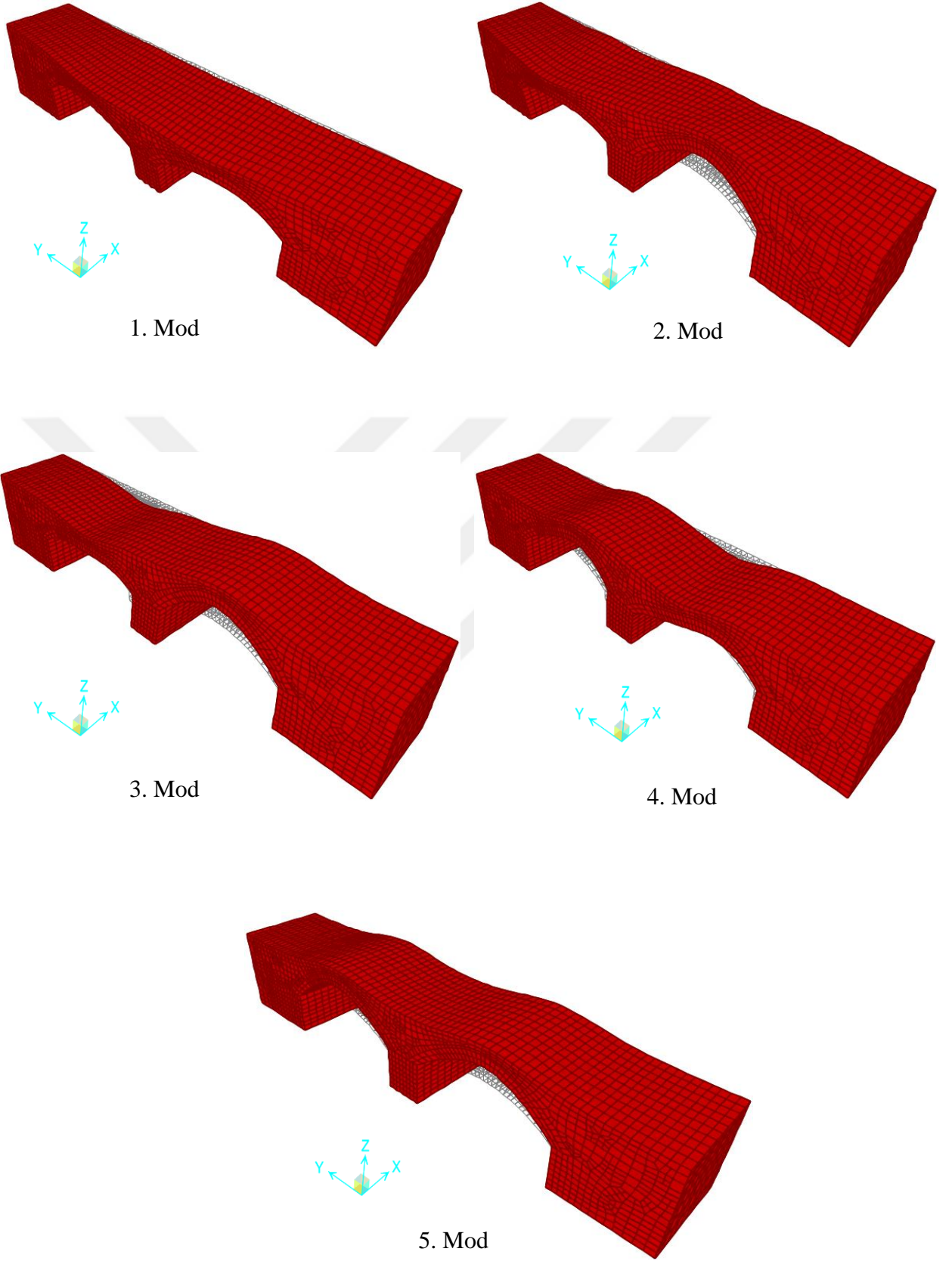
5.1.4.1. Modal Analiz

Yapılan modal analiz sonucunda Tarihi Elekçi Köprüsü'nün ilk beş modu dikkate alınmış olup köprü dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen periyot değerleri Tablo 5.4'te ve mod şekilleri Şekil 5.13'te gösterilmektedir.

Tablo 5.4. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Frekans ve Periyot Değerleri

Mod Sayısı	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	16,033	0,062
2	21,565	0,046
3	22,223	0,045
4	24,940	0,040
5	25,238	0,039



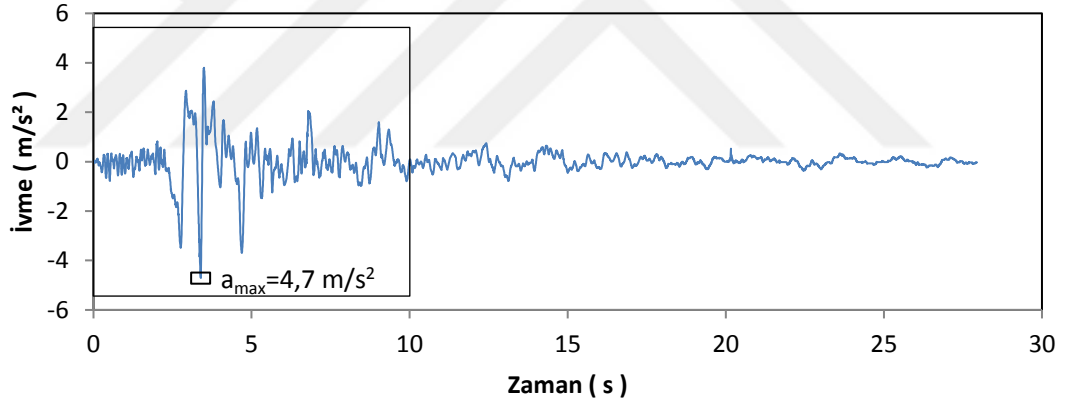


Şekil 5.13. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk 5 Mod Şekli

Analiz sonuçlarına bakıldığında ilk beş doğal frekans değerlerinin 16-26 Hz arasında olduğu görülmektedir. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekillerine bakıldığı zaman ise birinci ve ikinci modun x doğrultusunda yanal mod, üçüncü ve dördüncü modun y doğrultusunda yanal mod, beşinci modun z doğrultusunda düşey mod olduğu görülmektedir.

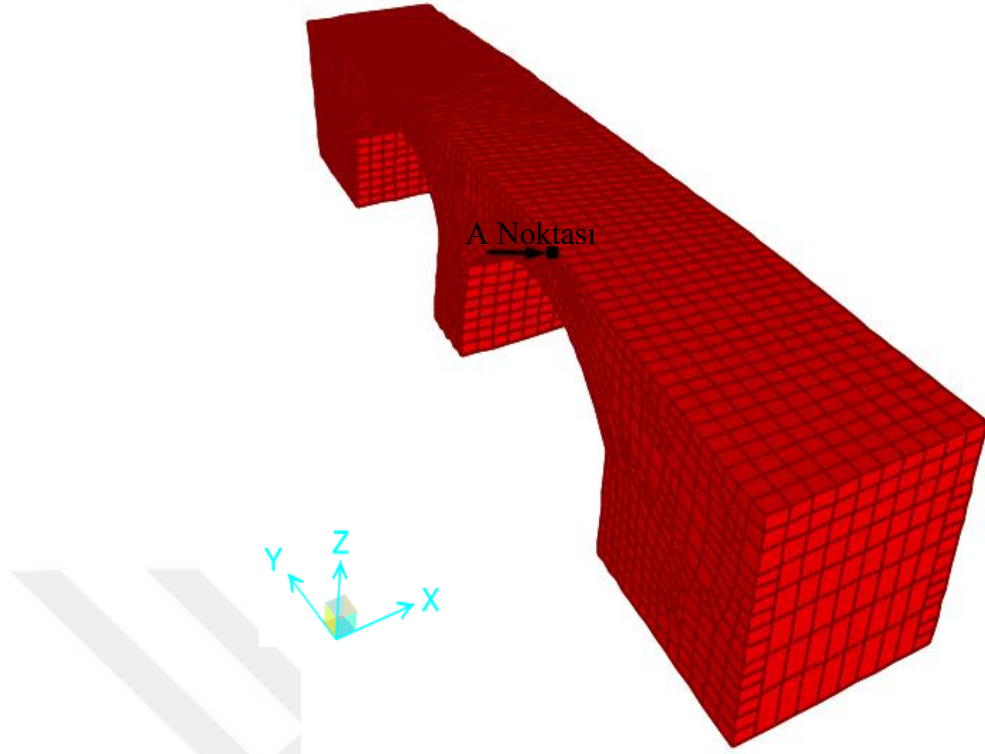
5.1.4.2. Zaman Tanım Alanında Analiz

Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme tekniği ile oluşturulmuş model üzerinde zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Model üzerinde 13.03.1992 Erzincan depreminin Doğu – Batı Bileşeninin ivme kayıtları kullanılarak bu yapının dinamik etkiler altındaki davranışı izlenmiştir. Kullanılan deprem ivme-zaman grafiği Şekil 5.14’te gösterilmiş olup, analizler ilk 10 saniyelik ivme kayıtları için yapılmıştır.



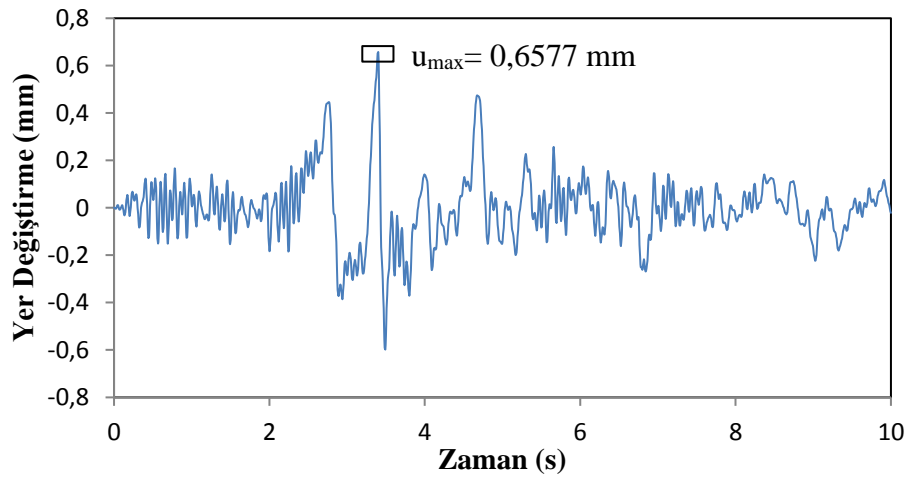
Şekil 5.14. 1992 Erzincan Depremi Doğu – Batı Bileşeni

13.03.1992 Erzincan depreminin doğu – batı bileşeninin ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda modelin en büyük yer değiştirmelere sahip şekil değiştirmiş hali Şekil 5.15’te gösterilmektedir.



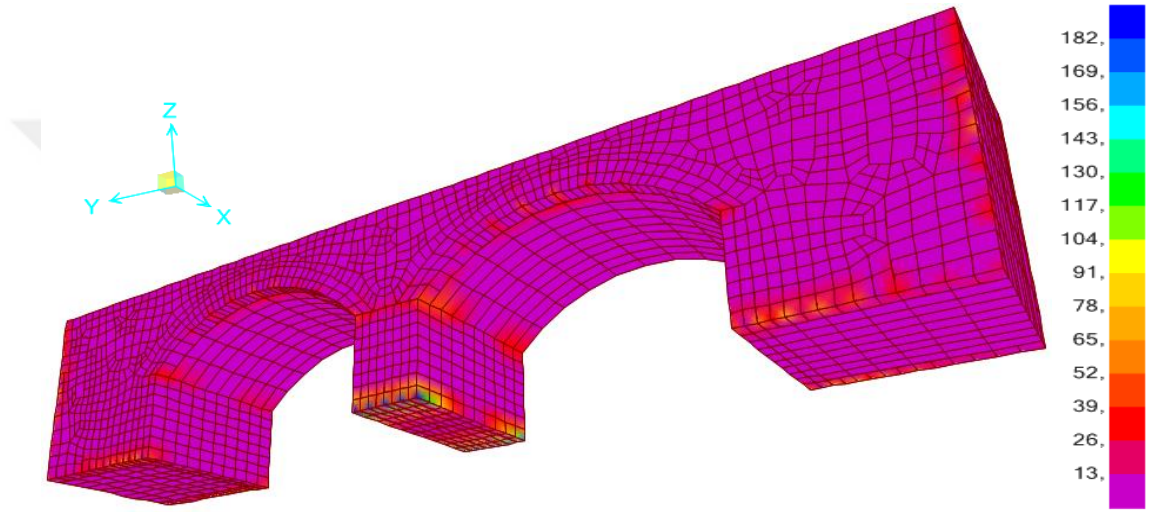
Şekil 5.15. Köprü'nün En Büyük Yer Değişimlere Sahip Şekil Değiştirmiş Hali

Şekil 5.15'ten de görüldüğü üzere yapılan dinamik analiz sonucunda en büyük yer değiştirmeler köprü kemer kısımlarının üst noktalarında elde edilmiştir. En büyük yer değiştirmeler x yönünde 0,6577 mm değerinde olup, en büyük yer değiştirmeye sahip noktalardan olan A noktasının yer değiştirme zaman grafiği Şekil 5.16'da gösterilmektedir.

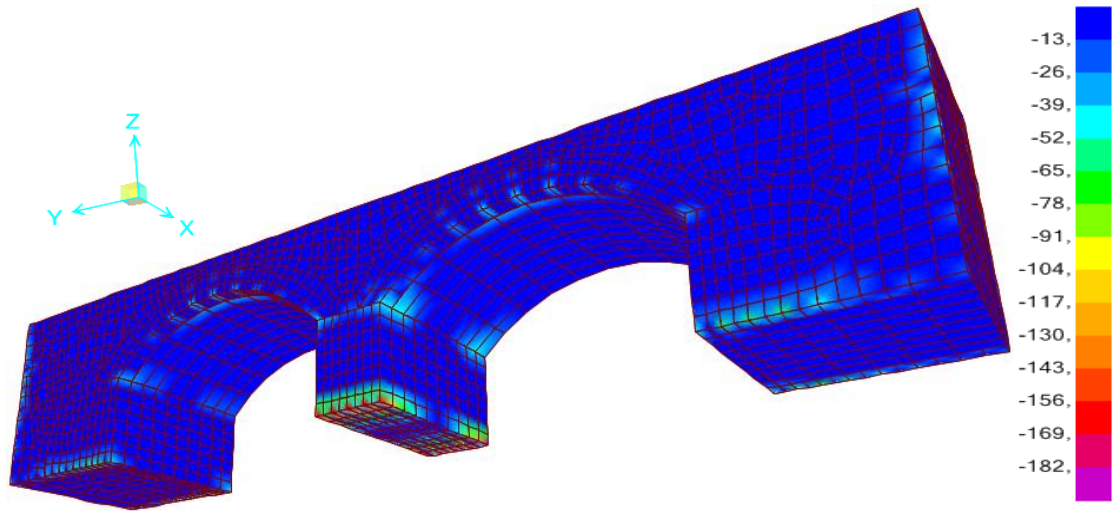


Şekil 5.16. A Noktasının Yer Değiştirmeye Zaman Grafiği

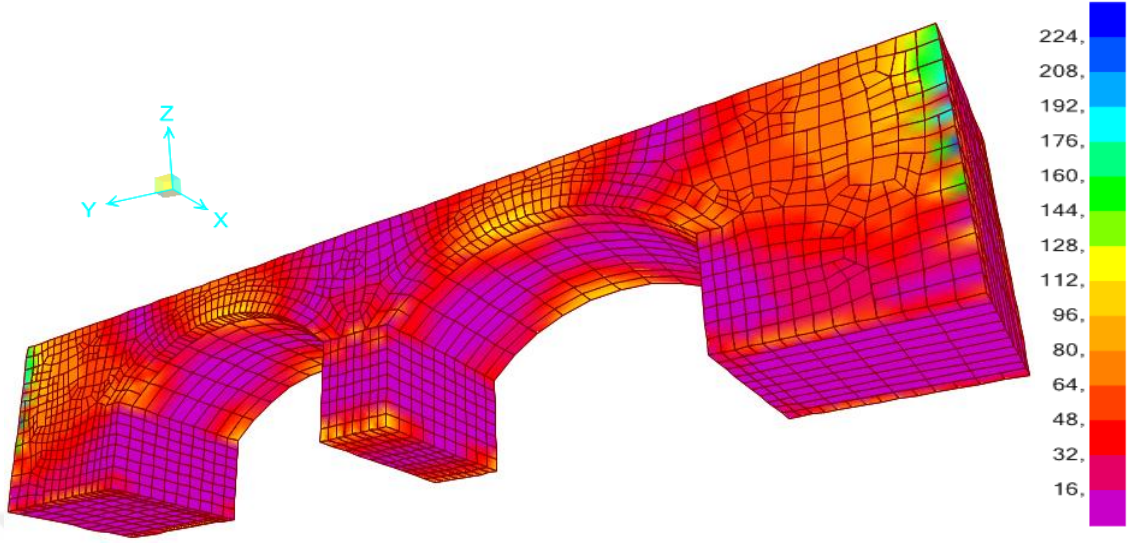
13.03.1992 Erzincan depreminin doğu – batı bileşeninin ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda Erzincan depreminin x yönü çekme gerilmesi değerleri, x yönü basınç gerilmesi değerleri, y yönü çekme gerilmesi değerleri, y yönü basınç gerilmesi değerleri, z yönü çekme gerilmesi değerleri ve z yönü basınç gerilmesi değerleri sırasıyla Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de gösterilmektedir.



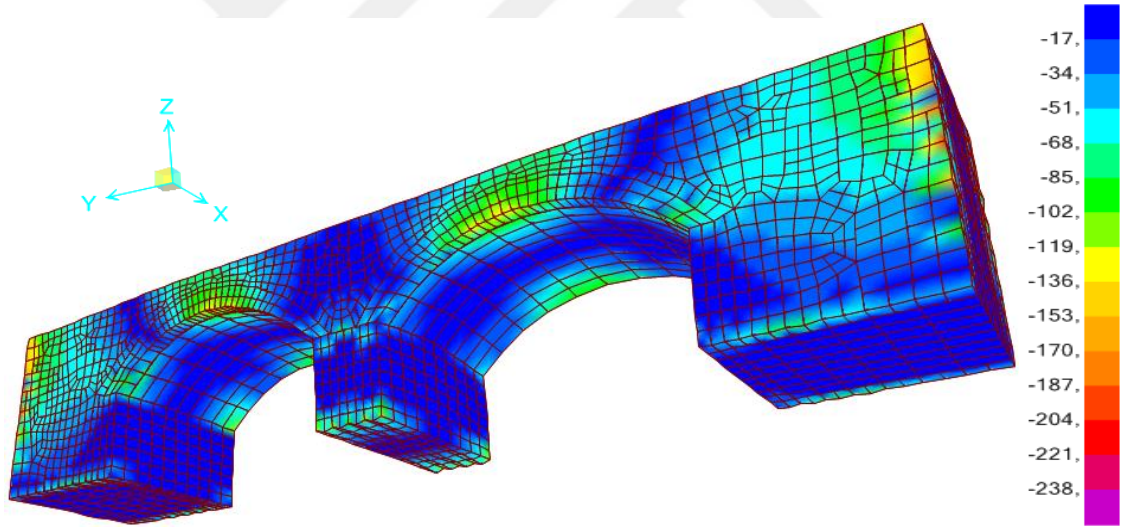
Şekil 5.17. Erzincan Depreminin X Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



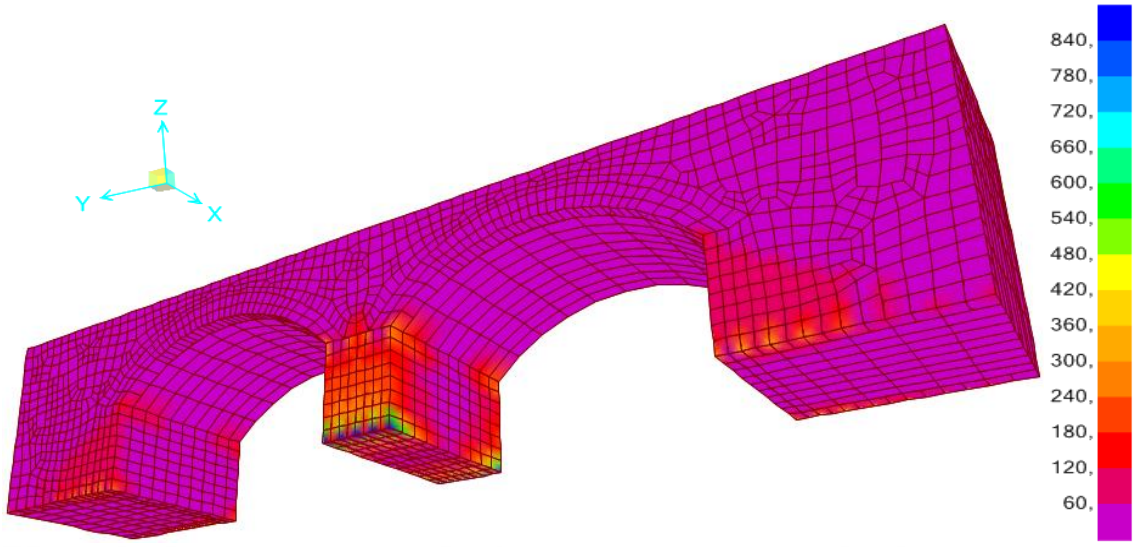
Şekil 5.18. Erzincan Depreminin X Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



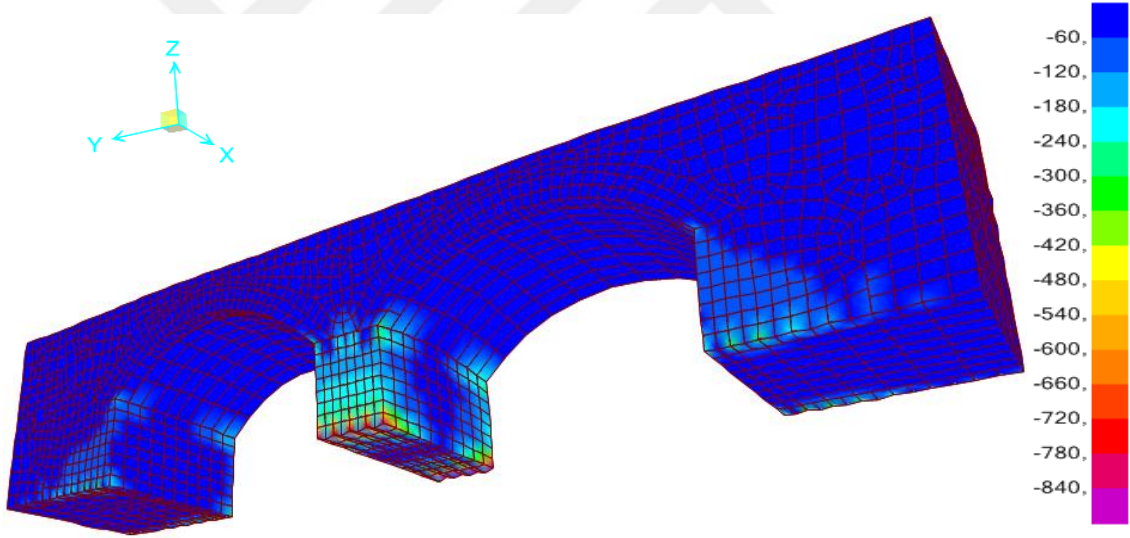
Şekil 5.19. Erzincan Depreminin Y Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.20. Erzincan Depreminin Y Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.21. Erzincan Depreminin Z Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.22. Erzincan Depreminin Z Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)

Yapılan dinamik analiz sonucunda Erzincan depreminin x yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 184,086 kN/m², x yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 184,560 kN/m², y yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 239,889 kN/m², y yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 240,213 kN/m², z yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 894,222 kN/m² ve z yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 896,324 kN/m² olarak hesaplanmıştır.

X yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmeleri köprü kemerlerinin birleştiği orta ayağın taban kısımlarında, Y yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin köprü kenarlarının üst noktalarında, Z yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin köprü kemerlerinin birleştiği orta ayağın taban kısımlarında olduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Yozgat Saat Kulesi

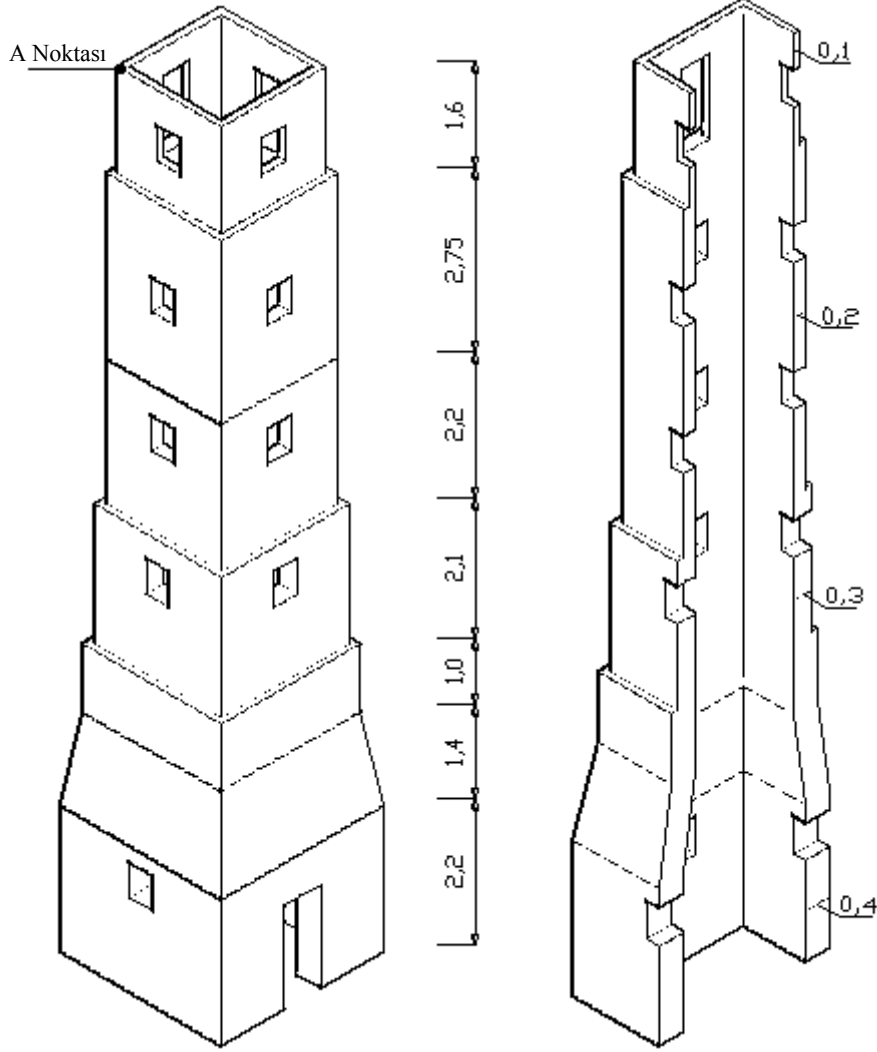
Yozgat Saat Kulesi, Yozgat İli merkezinde Cumhuriyet alanında bulunmaktadır. İl genelindeki tek tarihi saat kulesidir. Tevfikzade Ahmet Bey'in belediye başkanlığı zamanında Şakir Usta adında bir ustaya yaptırılmıştır. Yapılış tarihi 1908'dir. Yozgat şehir merkezindeki bu kule zemin kat ve çanların bulunduğu kısımlarla birlikte yedi kattır. Sarı köfeki kesme taşlarla inşa edilmiştir. Her bölüm birbirinden ayrılmış olup, her cephesine birer pencere yerleştirilmiştir. Kulenin içerisindeki ahşap merdivenlerle yukarı çıkılmaktadır ve en üst katı şerefe gibi bir balkonla çevrelenmiştir. En üst kısımda çan olup, çanın bulunduğu kattan itibaren üstteki ilk katta her cepheye ayrı ayrı yerleştirilmiş 4 saat bulunmaktadır. Saat çanı 250 kg ağırlığındadır. Kare prizma şeklinde saat kulesinin çan ile birlikte yüksekliği 16,5 m olup Şekil 5.23'te Yozgat Saat Kulesi'nin genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 5.23. Yozgat Saat Kulesi

5.2.1. Modelin Oluşturulması

Yozgat Saat Kulesi SAP2000 programında makro modelleme tekniğine göre solid elemanlarla modellenmiştir. Modelde kullanılan kat yükseklikleri ve her kattaki taş duvar kalınlıkları Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



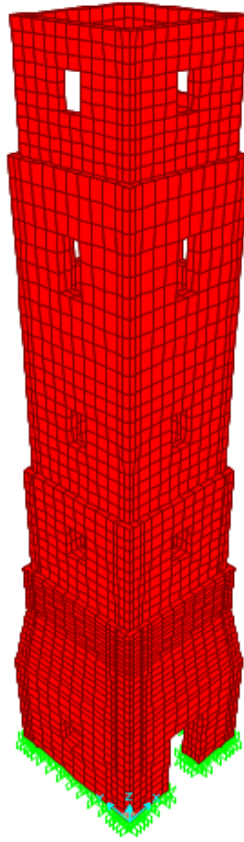
Şekil 5.24. Kat Yükseklikleri ve Taş Duvar Kalınlıkları (m)

Bu çalışmada literatürde konuyla ilgili yapılmış olan benzer çalışmalar araştırılıp, bu çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır [66,69,70,71].

Tablo 5.5. Teorik Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri [66,69,70,71].

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Taş Duvar	3,0E9	0,2	2150

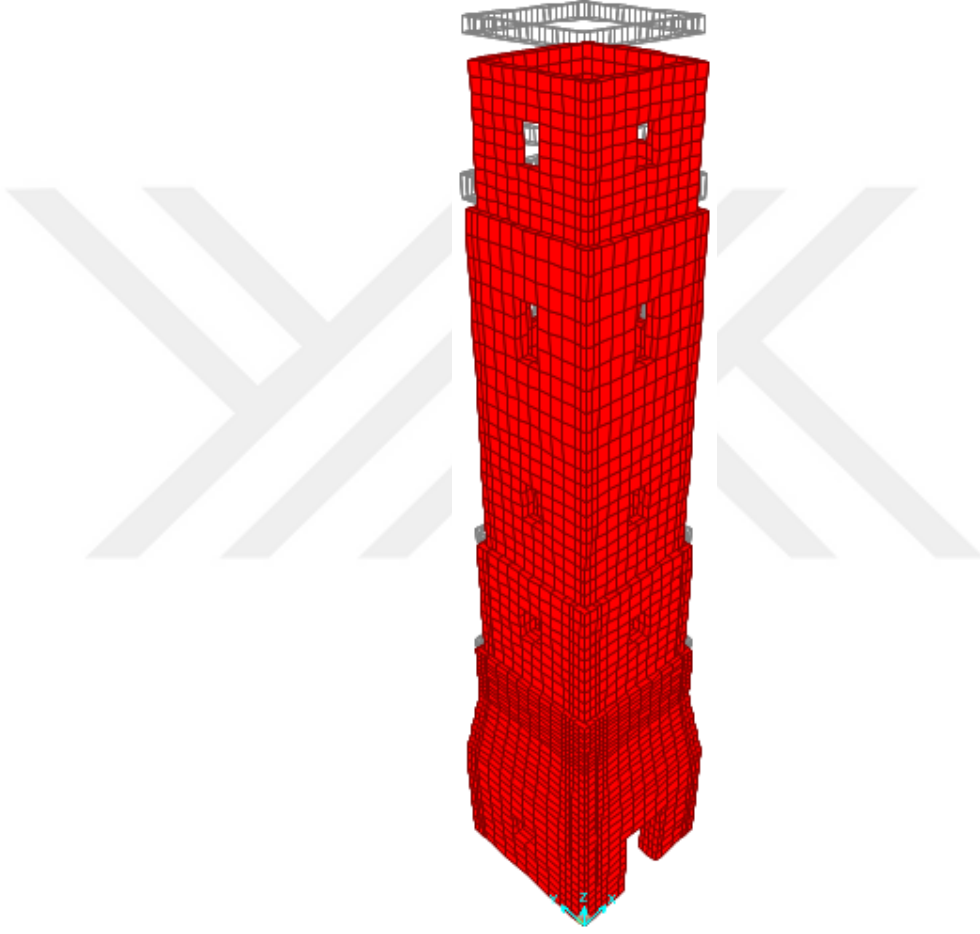
Tarihi Saat Kulesi'nin sonlu eleman modeli oluşturulurken SAP2000 [68] programı kullanılmıştır. Yozgat Saat Kulesi'nin sonlu eleman modeli oluşturulurken yapı davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla çok sayıda düğüm noktası kullanılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde 7676 katı (solid) eleman ve bu elemanları oluşturmak içinde 11755 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Bu çalışmada kule tabanındaki serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Çan ve saatlerin bulunduğu kısım modele ilave yük olarak etki ettirilmiştir. Tarihi Yozgat Saat Kulesi'nin oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 5.25'te gösterilmektedir.



Şekil 5.25. Yozgat Saat Kulesi Sonlu Eleman Modeli

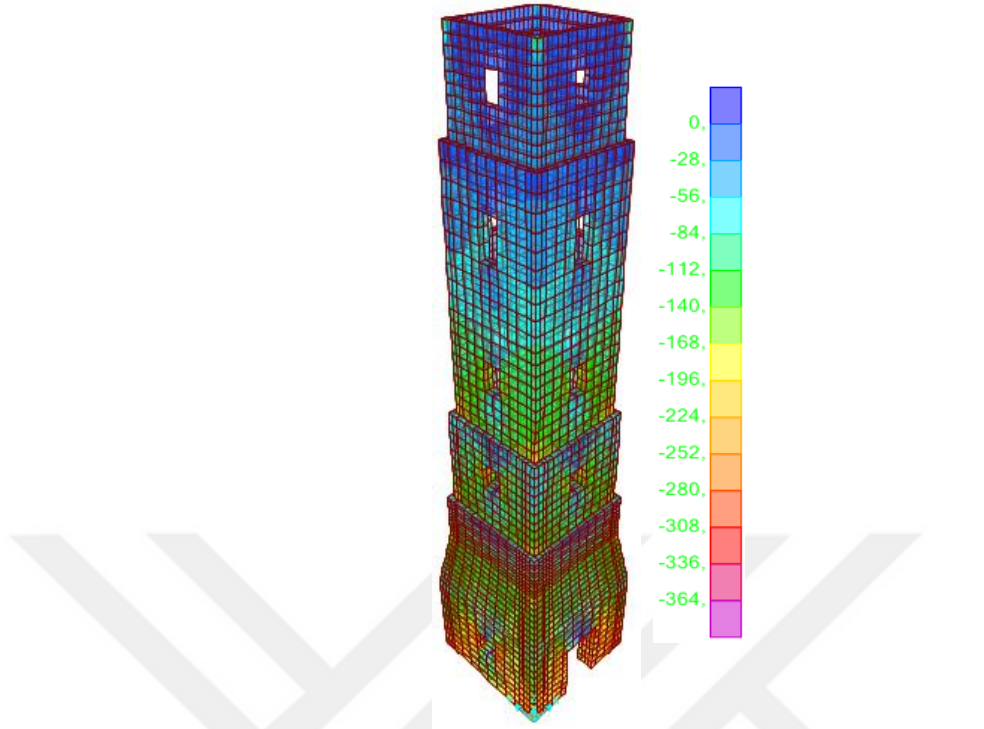
5.2.2. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

Yapılan çalışmada ölü yükler malzeme birim ağırlıkları ile tanımlanmıştır. Hareketli yükler ve kar yükü hesaba katılmamıştır. Yapılan statik analiz sonrası kulenin şekil değiştirmiş 3D görüntüsü, maksimum basınç gerilmeleri ve maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’te gösterilmektedir.

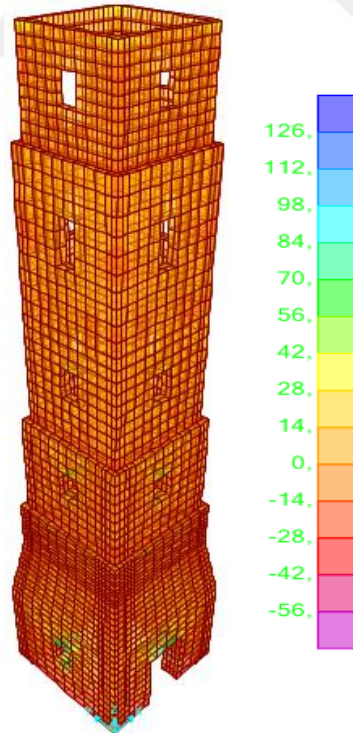


Şekil 5.26. Yozgat Saat Kulesi'nin Şekil Değiştirmiş 3D Görüntüsü

Yapılan statik analiz sonrasında en büyük yer değiştirmeler düşey 3 eksenli (z eksenli) doğrultusunda olup yer değiştirme miktarları kulenin üst kısımlarına doğru artış göstermektedir. Kulenin en üst kısmındaki noktalarda yer değiştirmelerin 0,4 mm değerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.27. Statik Analiz, Maksimum Basınç Gerilmeleri (kN/m^2)



Şekil 5.28. Statik Analiz, Maksimum Çekme Gerilmeleri (kN/m^2)

Statik analizde maksimum basınç gerilmeleri dağılımına bakıldığında gerilmelerin kulenin alt kısımlarına doğru arttığı görülmektedir. En büyük basınç gerilmesi değeri 372,882 kN/m² olarak bulunmuştur. Statik analizde maksimum çekme gerilmeleri dağılımına bakıldığında gerilmelerin kapı ve pencere boşluklarının kenarlarında yoğunlaştığı görülmektedir. En büyük çekme gerilmesi değeri 138,075 kN/m² olarak bulunmuştur.

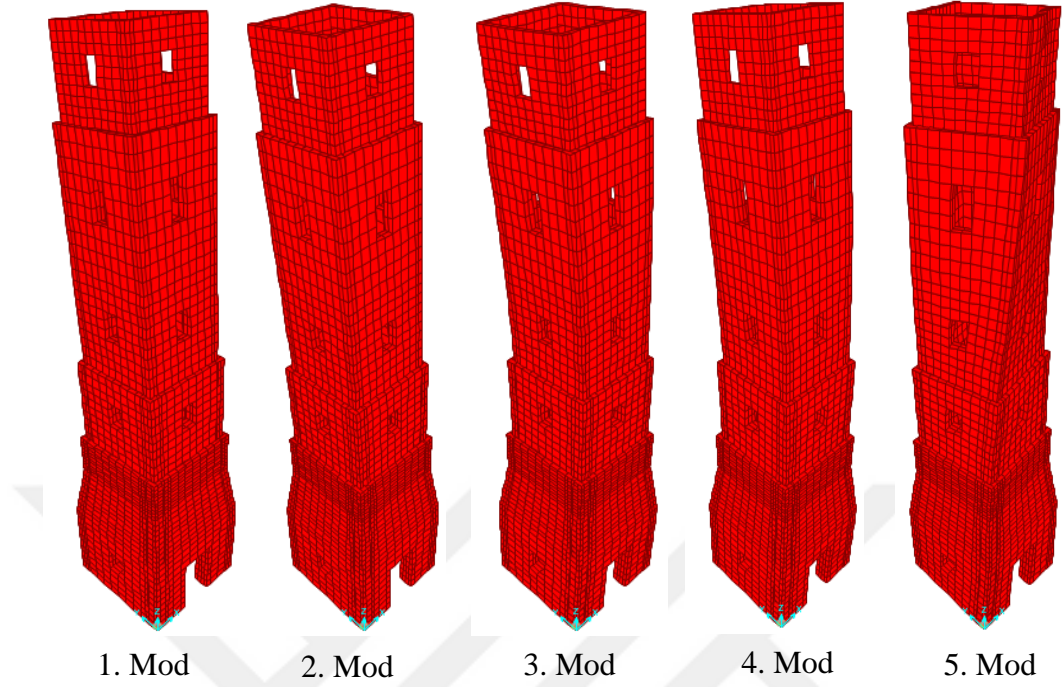
5.2.3. Dinamik Analizler

5.2.3.1. Modal Analiz

Yapılan modal analiz sonucunda Yozgat Saat Kulesi'nin ilk beş modu dikkate alınmış olup kule dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen periyot değerleri Tablo 5.6'da ve mod şekilleri Şekil 5.29'da gösterilmektedir.

Tablo 5.6. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Frekans ve Periyot Değerleri

Mod Sayısı	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	5,51302	0,18139
2	5,53314	0,18073
3	16,25582	0,06152
4	16,77419	0,05962
5	18,71242	0,05344

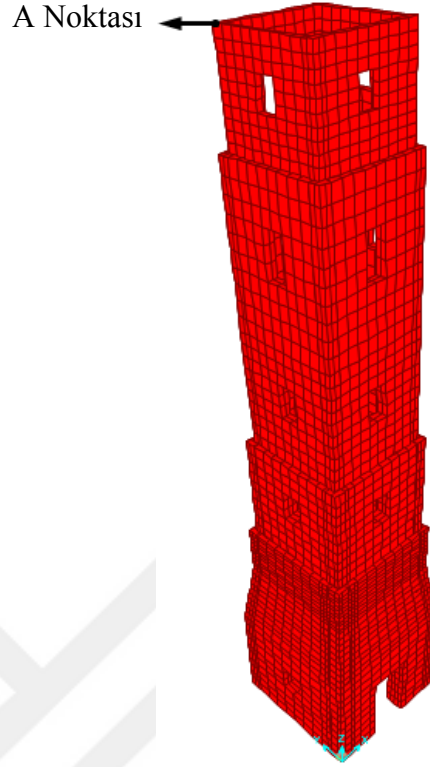


Şekil 5.29. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen İlk 5 Mod Şekli

Analiz sonuçlarına bakıldığında ilk beş doğal frekans değerlerinin 5-19 Hz arasında olduğu görülmektedir. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekillerine bakıldığı zaman ise birinci modun y doğrultusunda yanal mod, ikinci modun x doğrultusunda yanal mod, üçüncü modun x doğrultusunda yanal mod, dördüncü modun y doğrultusunda yanal mod ve beşinci modun ise burulma modu olduğu görülmektedir.

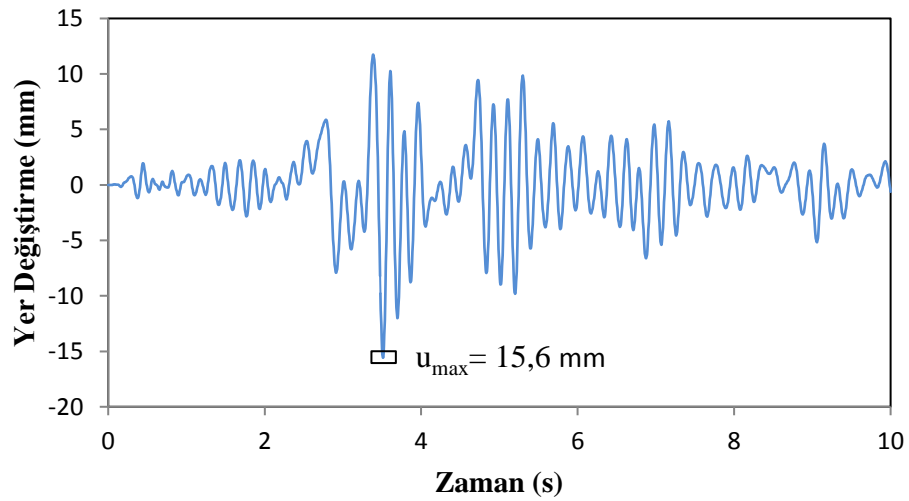
5.2.3.2. Zaman Tanım Alanında Analiz

Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme tekniği ile oluşturulmuş model üzerinde zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Model üzerinde, köprü örneğinde kullanılan ve Şekil 5.14'te gösterilen ivme-zaman grafiğine sahip 13.03.1992 Erzincan depreminin Doğu – Batı Bileşeninin ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizler ilk 10 saniyelik ivme kayıtları için yapılmıştır. 13.03.1992 Erzincan depreminin doğu – batı bileşeninin ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda modelin en büyük yer değiştirmelere sahip şekil değiştirmiş hali Şekil 5.30'da gösterilmektedir.



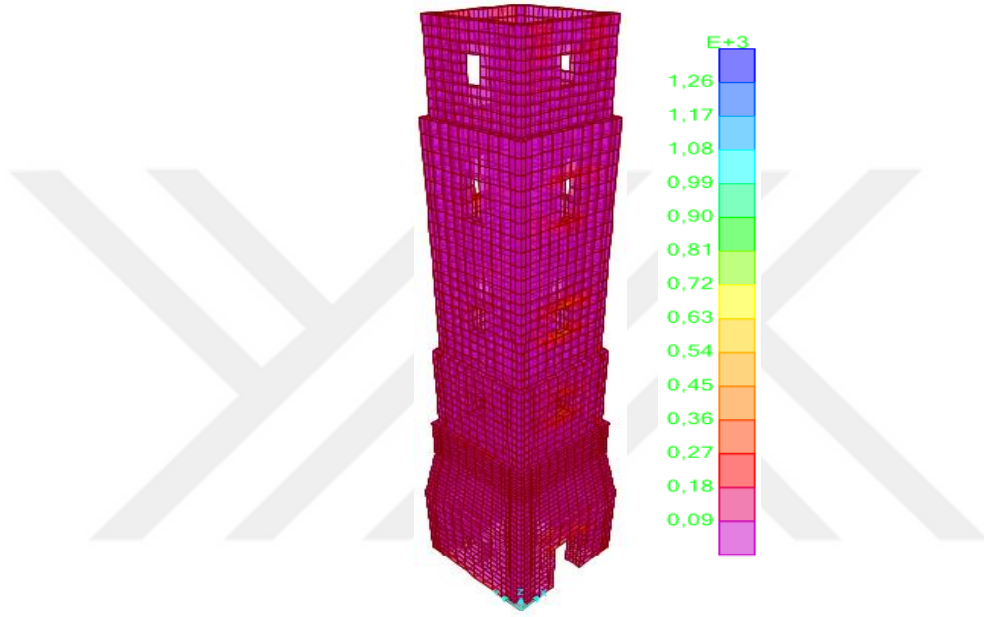
Şekil 5.30. Kulenin En Büyük Yer Değiştirmelere Sahip Şekil Değiştirmiş Hali

Şekil 5.30'dan da görüldüğü üzere yapılan dinamik analiz sonucunda en büyük yer değiştirme değerleri modelin en üst katındaki noktalarında elde edilmiştir. En büyük yer değiştirmeler -x yönünde 15,6 mm değerinde olup, en büyük yer değiştirmeye sahip noktalardan olan A noktasının yer değiştirme zaman grafiği Şekil 5.31'de gösterilmektedir.

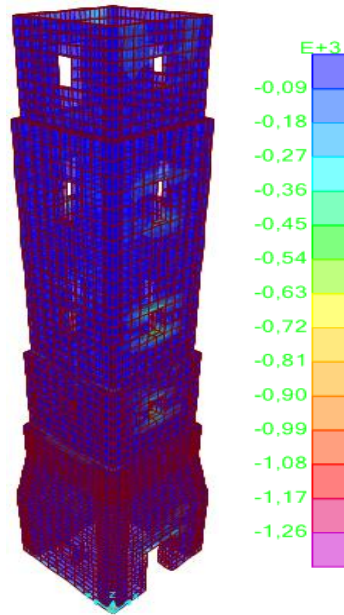


Şekil 5.31. A Noktasının Yer Değiştirmeye Zaman Grafiği

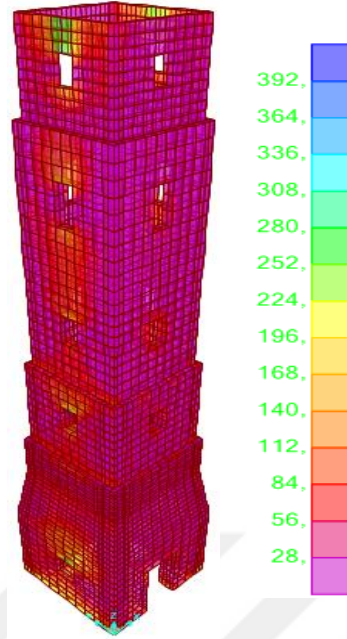
13.03.1992 Erzincan depreminin doğu – batı bileşeninin ivme kayıtları kullanılarak yapılan zaman tanım alanında doğrusal dinamik analiz sonucunda Erzincan depreminin x yönü çekme gerilmesi değerleri, x yönü basınç gerilmesi değerleri, y yönü çekme gerilmesi değerleri, y yönü basınç gerilmesi değerleri, z yönü çekme gerilmesi değerleri ve z yönü basınç gerilmesi değerleri sırasıyla Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de gösterilmektedir.



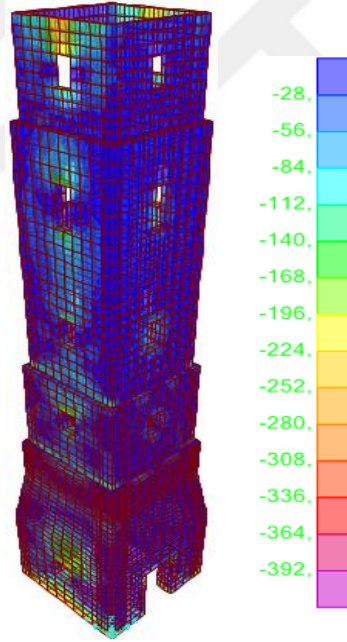
Şekil 5.32. Erzincan Depreminin X Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



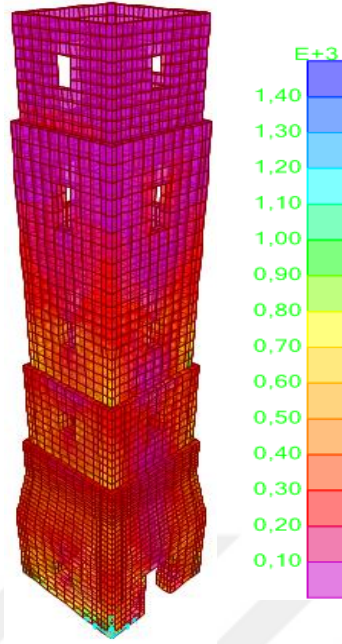
Şekil 5.33. Erzincan Depreminin X Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



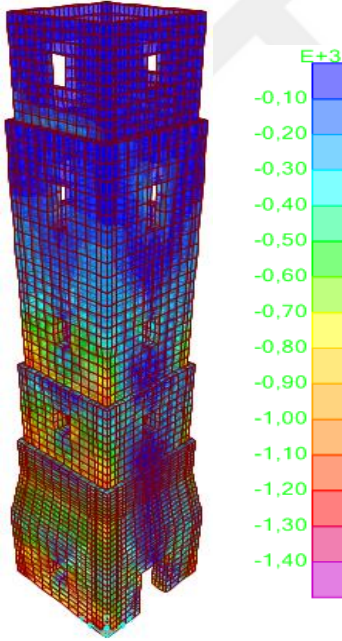
Şekil 5.34. Erzincan Depreminin Y Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.35. Erzincan Depreminin Y Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.36. Erzincan Depreminin Z Yönü Çekme Gerilmesi Değerleri (kN/m²)



Şekil 5.37. Erzincan Depreminin Z Yönü Basınç Gerilmesi Değerleri (kN/m²)

Yapılan dinamik analiz sonucunda Erzincan depreminin x yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 1297,539 kN/m², x yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 1311,738 kN/m², y yönü maksimum çekme gerilmesi değeri 408,236 kN/m², y yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 410,404 kN/m², z yönü maksimum çekme

gerilmesi değeri 1426,421 kN/m² ve z yönü maksimum basınç gerilmesi değeri 1432,763 kN/m² olarak hesaplanmıştır.

X yönündeki basınç ve çekme gerilmelerinin kapı ve pencere boşluklarının bulunduğu yüzeylerde yoğunlaştığı, Y yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin kapı ve pencere boşluklarının bulunduğu yüzeylerde, kat birleşim bölgelerinde ve deprem doğrultusundaki pencere boşluklarını birleştiren duvar yüzeylerinde yoğunlaştığı, Z yönündeki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin kapı ve pencere boşluklarının bulunduğu yüzeylerde, kat birleşim bölgelerinde yoğunlaştığı ve gerilme yoğunluğunun alt katlara doğru artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada; tarihi yapılarda taşıyıcı sistem elemanları ve kullanılan malzemeler hakkında bilgi verildikten sonra, tarihi yığma yapılarda kullanılan modelleme yöntemleri ve analiz yöntemleri kısaca anlatılmıştır. Tez çalışması kapsamında tarihi yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla Yozgat ilinde bulunan Elekçi Köprüsü ve Yozgat Saat Kulesi'nin sonlu elemanlar programı olan SAP 2000 ile oluşturulan solid modellerine, 13.03.1992 tarihli Erzincan depreminin deprem-ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi uygulanmış, mod şekilleri, doğal frekans değerleri, en büyük yer değiştirme değerleri, yer değiştirme zaman grafikleri, maksimum basınç ve çekme gerilmesi değerleri tespit edilmiştir.

Yozgat Saat Kulesi'nin oluşturulan modeli üzerinde yapılan analizler neticesinde; ilk beş doğal frekans değerlerinin 5-19 Hz arasında olduğu, birinci modun y doğrultusunda yanal mod, ikinci modun x doğrultusunda yanal mod, üçüncü modun x doğrultusunda yanal mod, dördüncü modun y doğrultusunda yanal mod ve beşinci modun ise burulma modu olduğu, yer değiştirmelerin yapının kotunun yükselmesi ile arttığı, en büyük yer değiştirmelerin yapının en üst kotunda meydana geldiği, maksimum tepe noktası deplasmanının -15,6 mm olduğu, maksimum gerilmenin $1432,763 \text{ kN/m}^2$ olduğu, maksimum gerilmelerin kapı-pencere boşluklarının bulunduğu yüzeylerde ve kat birleşim bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Elekçi Köprüsü'nün oluşturulan modeli üzerinde yapılan analizler neticesinde; ilk beş doğal frekans değerlerinin 16-26 Hz arasında olduğu, birinci ve ikinci modun x doğrultusunda yanal mod, üçüncü ve dördüncü modun y doğrultusunda yanal mod, beşinci modun z doğrultusunda düşey mod olduğu, en büyük yer değiştirmelerin köprü kemer kısımlarının üst noktalarında meydana geldiği, maksimum deplasmanın 0,6577 mm olduğu, maksimum gerilmenin $896,324 \text{ kN/m}^2$ olduğu, maksimum gerilmelerin köprü kemerlerinin birleştiği orta ayağın taban kısımlarında, kemer yüksekliklerinin orta bölgelerinde ve köprü üst uç kenar bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Her iki yapının da gerilme yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler belirlenmiş olup, dinamik etkiler karşısında her iki tarihi yapıda olası hasarların ilk olarak bu gerilme yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde meydana geleceği ve gerekmesi durumunda yapılardaki onarım ve güçlendirmenin öncelikli olarak bu bölgelerde yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Her iki tarihi yapıya aynı deprem kaydı uygulanmış olup, analiz sonuçlarından elde edilen değerler incelendiğinde, köprünün daha rijit, kulenin ise daha narin tipte bir yapı olduğu, aynı dinamik etkiye maruz kalma durumunda kulenin yapısal zarara uğrama ihtimalinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

1. Armağan, K., Tarihi Yapılarda Kullanılan Fonksiyonelliğin İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2012.
2. Yavuz, U.C., Tarihi Yapılarda Statik Güçlendirme Teknikleri, Uzmanlık Tezi, Ankara, 2012.
3. Celasun, H., Betonarme Köprüler ve Hesap Metodları, Çağlayan Basım Evi, Birinci Baskı, İstanbul, 1974.
4. Hasol, D., Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, YEM Yayınları, 8. Baskı, İstanbul, 2002.
5. İtler, F., Osmanlılar'a kadar Anadolu Türk Köprüleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 1978.
6. Güntan, Ç., II. Abdülhamit Döneminde İmparatorluk İmajının Kamu Yapıları Aracılığı ile Osmanlı Kentine Yansıtılması, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
7. Halaç, H.H., İlhan, S.Ö., Kentsel İmge Olarak Saat Kuleleri; II. Abdülhamit Han Dönemi Saat Kulelerinin İstanbul Dışı Türkiye Coğrafyasında Dağılımları ve Bir Tipoloji Denemesi, e-Journal of New World Sciences Academy, ISSN: 1306-3111, 1308-7320, 2014.
8. Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E., Boschi, E., Seismic Analysis of the Asinelli Tower and Earthquakes in Bologna, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume: 17, Issue Number: 7-8, pp. 525–550, 1998.
9. Fanning, P.J., and Boothby, T.E., (2001). Three-Dimensional Modeling and Full-scale Testing of Stone Arch Bridges, Computers and Structures, Volume: 79, Issue Number: 29, pp. 2645–2662, 2001.
10. Bernardeschi, K., Padovani, C., Pasquinelli, G., Numerical Modeling of the Structural Behavior of Buti's Bell Tower, J. Cultural Heritage, 5, 371–378, January, 2004.
11. Karaton, M., Sayın, E., ve Calayır, Y., Malabadi Köprüsünün Lineer Olmayan Sismik Analizi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2, Diyarbakır, Ekim 2009.
12. Bayraktar, A., Şahin, A., Özcan, D.M., and Yıldırım, F., Numerical Damage Assessment of Hagia Sophia Bell Tower by Nonlinear FE Modeling, Applied Mathematical Modelling, Volume: 34, pp. 92-121, 2010.

13. Sayın, E., Calayır, Y., ve Karaton, M., Tarihi Uzunok Köprüsünün Lineer Olmayan Sismik Analizi, Yedinci Ulusal Deprem Muhendisliği Konferansı, İstanbul, 30 Mayıs-3 Haziran, 2011.
14. Di Pasquale, S., The Dome of Santa Maria del Fiore: An Opportunity to State a Theory of Masonry Structures, Proceedings of IASS Symposium, Madrid, 843-866, 1979.
15. Karaesmen, E., Ünay, A.İ., A Study of Structural Aspects of Domed Buildings with Emphasis on Sinan's Mosques, Proceedings of IASS-MSÜ Int. Symposium, İstanbul, 93-104, 1988.
16. Karaesmen, E., Erkay, C., Boyacı, N., Senkaya, E., Yakut, A., Evolution of Domed Building in Seismic Zones with Emphasis on Sinan's Major Works, METU-Pariar Education and Research Foundation, Ankara, 1992.
17. Erdik, M., Durukal, E., Ayasofya'nın Deprem Davranışı, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 198-207, 10-13 Mart, 1993.
18. Ünay, A.İ., A Method For the Evaluation of the Ultimate Safety of Historical Masonry Structures, Ph.D Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 1997.
19. Koçak, A., Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Linear Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.
20. Frunzio, G., Monaco, M., ve Gesualdo, A., 3D FEM Analysis of a Roman Arch Bridge, Historical Constructions, 591-598, 2001.
21. Lourenco, P.B., Oliveira, D.V., Mourao, S., Numerical Analysis as a Tool to Understand Historical Structures, The Example of The Church of Outeiro, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, 355-364, 2001.
22. Mele, E., De Luca, A., Giordano, A., Modelling and Analysis of a Basilica under Earthquake Loading, Journal of Cultural Heritage, 4 (4), 355-367, 2003.
23. Teomete, E., Finite Element Modeling of Historical Masonry Structures; Case Study: Urla Kamanlı Mosque, Master Of Science Thesis, Izmir Institute Of Technology, İzmir, 2004.
24. Ivorra, S., Pallares, F.J., Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower, Engineering Structures, Volume: 28, Issue Number: 5, pp. 660-667, 2006.
25. Özkul, T.A., Karagüler, M., Ergüneş, O.I., Kaya, Y., Pavlatos, C.F., Static and Dynamic Analysis of Panagia Ton Isodion Church, International Semposium Studies on Historical Heritage, Antalya, 535-542, September 17-21, 2007.

26. Psycharis, I., Mauzakis, H., Pavlopoulou, E., Miltiadou, A., Investigation of the Seismic Response of a Byzantine Church-Comparison with the Existing Damage, International Semposium Studies on Historical Heritage, Antalya, 559-566, September 17-21, 2007.
27. Karaveziroğlu, M., Stavrakakis, E., Lazarides, P., Liolios, A., Giannopoulou, M., Roukounis, Y., Yeroyianni, M., A Comparative Analysis of Some Historical Stone Arch Bridges in Greece by Two New Numerical Approaches, Historical Constructions, 749-755, 2001.
28. Toker, S., ve Ünay, A.I., Mathematical Modelling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(2), 129-139, 2004.
29. Ural, A., Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 408-413, Mart 2005.
30. Aoki, A., Komiyama, T., Sabia, D., ve Rivella, D., 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, August 2004.
31. Beconcini, M.L., Buratti, G., Mengozzi, M., Orsini, P., Dynamic Characterization of a Five Spans Historical Masonry Arch Bridge, 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira, Portugal, Proceedings, 399-407, September 2007.
32. Lourenço, P.B., Borst, R., Rots, J., A Plane Stress Softening Plasticity Model for Orthotropic Materials, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume: 40, 4033-4052, 1997.
33. Lourenço, P.B., Rots, J.G., Blaauwendraad, J., Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation. Journal of Structural Engineering, 124(6), 642-652, June 1998.
34. Sucuoğlu, H., ve Erberik, A., Performance Evaluation of a Three-Storey Unreinforced Masonry Buildings During the 1992 Erzincan Earthquake. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26(3), 319-336, March 1997.
35. Casolo, S., Modeling of Out-of-Plane Seismic Behavior Masonry Walls By Rigid Elements, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 29(12), 1797-1813, September 2000.
36. Şen, B., Modeling and Analysis of the Historical Masonry Structures, Master of Science Thesis, Boğaziçi University, İstanbul, 2006.

37. Dabanlı, Ö., Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
38. Arıcan, Y., Yığma Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2010.
39. Lourenço, P.B., Experimental and Numerical Issues in the Modelling of the Mechanical Behaviour of Masonry, Structural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona, 1998.
40. Bayraktar, A., Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları, s. 145, Beta Yayınları, İstanbul, 2006.
41. Dönmezer, H., Zemin Mekaniği, s. 512, Osman Yalçın Matbaası Yayını, İstanbul, 1956.
42. Çelebi, M.R., Yapı Bilgisi, s. 251, İstanbul Kültür Üniversitesi Yayını, Yayın No: 1, İstanbul, 2012.
43. Bahtiyar, M., Restorasyonda Strüktürel Sorunlar, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 1998.
44. Çamlıbel, N., Sinan Mimarlığında Strüktürün Analitik İncelenmesi, s. 630 Yıldız Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Yayını, İstanbul, 1988.
45. Timur, T., Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
46. Şener, İ.N., An Innovative Methodology and Structural Analysis for Relocation of Historical Masonry Monuments: A Case Study In Hasankeyf, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2004.
47. Ünay, A.İ., Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, s. 174, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Yayını, Yayın No: 1 Ankara, 2002.
48. Lourenço, P.B., Vasconcelos, G., Ramos, L., Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Yıldız Technical University, İstanbul, 669-678, 2001.
49. Kanıt, R., Işık, N.S., Horosan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi, Politeknik Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 2, s. 179-183, 2004.
50. Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., Tarihi Yapılarda Kullanılan Horosan Harcı ve Sıvaların Özellikleri, Yapı Dergisi, 69, 90-95, 2004.

51. Oğuzmert, M., Yığma Minarelerin Dinamik Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
52. Sinha, B.P., Hendry, A.W., Davies, S.R., Design of Masonry Structures, Third Edition, E&FN Spon, UK, 2004.
53. Lourenço, P.B., Structural Behavior of Civil Engineering Structures: Highlight in Historical and Masonry Structures, Universidade do Minho, Portugal, <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/6436>
54. Saraç, M.M., Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
55. Şenel, M.Ş., Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Yapı Analizi Yapan Bir Bilgisayar Programı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 1996.
56. Zienkiewicz, C., Taylor, L., The Finite Element Method, Publisher, Mcgraw-Hill, 22, 456-478, 1988.
57. Cook, R., Malkus, D., Plesha, M., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Third Edition, John Wiley&Sons, Canada, 1989.
58. Bathe, K., The Finite Element Method Publisher, Journal of the University of Cape Town Engineering Society, 57-61, 1967.
59. Ergin, A., Bayraktarkatal, E., Ünsan, Y., Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları, Seminer Kitabı, Yapım Matbaacılık, İstanbul, 2000.
60. Şen, B., Modeling and Analysis of Historical Masonry Structures, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2003.
61. Birinci, F., Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2010.
62. Chopra, A.K., Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Inc., Toronto, 1995.
63. Celep, Z., Kumbasar N., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Yayınları, İstanbul, 2004.
64. Doğan, M., Depreme Dayanıklı Tasarım Dersi, s. 81,84,259,365,367,381-389 Eskişehir, 2005.
65. Seçme, T., Zaman Tanım Alanında Davranış Spektrumunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2009.

66. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., ve Sevim, B., Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Ankara, Bildiriler Kitabı, 429-440, Eylül 2007.
67. Brencich, A., Sabia, D., Experimental Identification of a Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Materials, 22(10), 2087-2099, October 2008.
68. SAP2000 V16., Integrated Structural Analysis and Design Software, Computer and Structures Inc., Berkeley, California, 2014.
69. Ertek, E., Fahjan, Y.M., Osmanlı Minarelerinin Yapısal Sistemleri: Sınıflandırma, Modelleme ve Analizi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 16-20 Ekim, 2007.
70. Erkek, H., Calayır, Y., Sayın, E., Karaton, M., Tarihi Malatya Ulu Camisi'nin Sismik Davranışı, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismolojisi Konferansı, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, 25-27 Eylül, 2013.
71. Çarhoğlu, A.I., Usta, P., Korkmaz, K.A., Ayasofya Örneğinde Tarihi Minare Yapılarının Sismik Davranışının İncelenmesi, SDU International Technologic Science, Volume: 5, Issue Number: 1, pp. 36-43, 2013.

ÖZGEÇMİŞ

20.01.1986 yılında İncesu'da doğan Hüseyin Okan ANADUT, ilk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Vali Sebahattin Çakmakoğlu İlkokulu ve Mustafa Özkan Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2006 yılında kazandığı Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne yatay geçiş yapıp, bölümünü 2010 yılında tamamlamıştır. 2 yıl süreyle konut şantiyelerinde şantiye şefliği ve Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisliği görevlerini üstlenmiştir. 2013 yılı itibariyle Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi kadrosunda görev yapmaktadır.

İletişim Bilgileri

İş Adresi : Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Merkez/YOZGAT 66100

İş Telefonu : +90 (354) 242 1001-2117

E-Posta : okan.anadut@bozok.edu.tr