

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ
DİKKATE ALINARAK DEPREM DAVRANIŞININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Alper ÖZMEN

Doktora Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ DİKKATE
ALINARAK DEPREM DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tez Yazarı
Alper ÖZMEN

Danışman
Prof. Dr. Erkut SAYIN

OCAK 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Tarihi Yığma Yapıların Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Deprem Davranışının Değerlendirilmesi
Yazarı:	Alper ÖZMEN
İlk Teslim Tarihi:	05.12.2023
Savunma Tarihi:	11.01.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Erkut SAYIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ragıp İNCE Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Muhammet KARATON Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Tarihi Yığma Yapıların Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Deprem Davranışının Değerlendirilmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

11.01.2024

Alper ÖZMEN



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında Malatya ili Yeşilyurt ilçesinde bulunan Tarihi Taşharon Kilisesinin Yapı- Zemin etkileşimi dikkate alınarak deprem davranışı incelenmiştir. Malatya ili Doğu Anadolu Fayı üzerinde bulunan ve geçmişte birçok büyük depremi yaşamış bir lokasyonda yer almaktadır. Bu nedenle kültürel mirasımızı olan tarihi yapıların deprem davranışlarının ileri tekniklerle elde edilip bu yapılara uygun müdahalelerin yapılması oldukça önemli bir konudur.

Tez çalışmasının ve mesleki hayatımın her aşamasında derin bilgi ve birikimini benimle paylaşan, bana daima yol gösteren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Erkut SAYIN'a

Deneyisel çalışmalarında benimle tecrübelerini paylaşan kıymetli hocalarım ve mesai arkadaşlarım Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ, Dr. Öğr. Üyesi Enes EKİNCİ, Doç. Dr. Üyesi Engin ÖZDEMİR, İnş. Yüksek Müh. Merve BÜYÜKTAPU, Öğr. Gör. Metin KATLAV, Öğr. Gör. İzzeddin DÖNMEZ ve Arş. Gör. Tuğba ŞENTÜRK'e

Malatya Büyükşehir Belediyesinden, Tarihi Taşharon Kilisesi ile ilgili her türlü dokümanı benimle paylaşan Gökcek BOYRAZ hanımefendiye ve yapı ile ilgili tüm çalışma izinlerini almamda desteğini esirgemeyen Fikret VURUCU beye, Fırat Üniversitesinden, Arş. Gör. Ömer Faruk TAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Musa YETKİN'e

İnönü Üniversitesi İnşaat Müh. Laboratuvar imkanlarını kullanmam konusunda yardımcı olan bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. M. Burhan KARAKOÇ'a

Tez izleme komitesinde yer alan ve tezin her aşamasında benimle fikirlerini ve deneyimlerini paylaşan Sayın Prof. Dr. Muhammed KARATON'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu uzun ve meşakkatli öğrenme yolculuğumda daima yanımda olan, her türlü sorunumda beni sonuna kadar maddi ve manevi olarak destekleyen kıymetli babam Çetin ÖZMEN, sevgili annem Aynur ÖZMEN ve kardeşim Anıl ÖZMEN'e sonsuz minnetlerimi sunarım.

Alper ÖZMEN

ELAĞIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ	xiii
SİMGELER	xiv
KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özetleri	2
1.1.1. Tarihi Yapıların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar	2
1.1.2. Tarihi Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşiminin Dikkate Alındığı Çalışmalar.....	4
1.1.3. Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Analizinin Lineer Olmayan Statik İtme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemiyle Yapıldığı Çalışmalar.....	7
1.2. Çalışmanın Önemi	8
2. MALATYA TAŞHORAN KİLİSESİ.....	10
3. YAPIYA AİT MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	14
3.1. Tahribatlı Test Yöntemleri (Laboratuvar Deneyleri).....	15
3.1.1. Fiziksel Özelliklerin Tespiti	15
3.1.2. Mekanik Özelliklerin Tespiti.....	17
3.1.3. Eskitme İşlemleri.....	18
3.1.4. Mikro Yapı Analizleri	21
3.2. Tahribatsız Test Teknikleri.....	22
3.2.1. Schmidt Sertlik Çekici	22
3.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	23
3.2.3. İnfrared Termografi (IRT)Testi	24
3.3. Tarihi Taşhoran Kilisesi Malzeme Özellikleri.....	25
3.3.1. Tahribatlı Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özellikleri.....	25
3.3.2. Tahribatsız Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özellikleri.....	37
3.3.3. Tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması	
40	
4. YIĞMA YAPILARIN SONLU ELEMANLAR METODUYLA ANALİZİ.....	44
4.1. Yığma Yapıların Modelleme Teknikleri.....	44
4.2. Lineer Olmayan Malzeme Modelleri.....	45
4.3. Sonlu Elemanlar Modeli İçin Malzeme Özellikleri	47
4.3.1. Yığma Birim Malzeme Özellikleri.....	47
4.3.2. Zemin Ortamının Malzeme Özellikleri	49
5. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİNDE KULLANILAN YAKLAŞIMLAR	51
5.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi.....	61
5.2. Modal Analiz	64

5.3. Zaman Tanım Alanında Analiz	68
6. YAPININ DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	80
6.1. Dinamik Yapı İzleme Metotları.....	80
6.1.1. Teorik Yöntemler	80
6.1.2. Deneysel Yöntemler.....	80
6.2. Seçilen Örnek Yapının Dinamik Karakteristiklerinin OMA Yöntemiyle Belirlenmesi	83
6.3. Sonlu Elemanlar Modelinin İyileştirilmesi.....	90
7. YAPININ SİSMİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	97
7.1. Modal Analiz	97
7.2. Lineer Olmayan İtme Analizi	98
7.2.1. Kapasite eğrisinin elde edilmesi.....	100
7.2.2. Sismik Talep Eğrisi	103
7.2.3. Performans Değerlendirmesi.....	104
7.3. Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz.....	115
7.3.1. Zaman Tanım Alanında Analizde Kullanılacak Deprem Kayıtlarının Seçimi	115
7.3.2. Analiz Sonuçları.....	119
7.4. İtme Analizi ve Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	134
8. SONUÇLAR.....	136
ÖNERİLER	138
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Tarihi Yığma Yapıların Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Deprem Davranışının Değerlendirilmesi

Alper ÖZMEN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024, Sayfa: xvi + 147

Tarihi yığma yapılar deprem, sel vb. etkilerle zaman içerisinde zarar görmekte ve yıkılmaktadır. Bu yapıların gelecek nesillere aktarılması için uygun biçimde incelenmesi ve korunması oldukça önemli bir konudur.

Bu tez çalışması kapsamında Malatya, Türkiye’de yer alan Tarihi Taşhoran Kilisesi örnek yapı olarak seçilmiştir. Kilise 1893 yılında inşa edilmiş ve farklı zaman dilimlerinde birçok defa hasar görmüş ve onarılmıştır.

Araştırma çalışması sekiz ana bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde yığma yapıların önemi ve davranışı anlatılmıştır. Ayrıca tarihi yapıların deprem davranışının araştırıldığı çalışmalar kısaca özetlenmiştir. İkinci bölümde tez kapsamında seçilen örnek yapının tarihçesi, günümüzdeki durumu ve geometrik özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, yapı malzemeleri üzerinde uygulanan tahribatlı ve tahribatsız test yöntemleri birlikte kullanılarak yapının malzeme özellikleri elde edilmiş ve her iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde, yığma yapıların modelleme teknikleri, malzeme modelleri ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında uygulanan teknikler açıklanmıştır. Beşinci bölümde, üçüncü bölümde elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak yığma yapıların modellenmesinde dikkate alınan farklı yapı-zemin etkileşimi metodları, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durum ve birebiriyle karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde, incelenen yapının dinamik karakteristikleri numerik ve deneysel olarak elde edilmiş ve sonlu elemanlar modeli kalibre edilmiştir. Yedinci bölümde, kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak, lineer olmayan statik analiz ve zaman tanım alanında dinamik analiz gerçekleştirilmiş ve yapının sismik performansı değerlendirilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde DIANA FEA paket programı kullanılmış ve zaman tanım alanında analizlerde 11 farklı gerçek deprem kaydı dikkate alınmıştır. Sekizinci bölümde sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

Çalışma sonucunda, tahribatsız yöntemlerin, tarihi yapıların malzeme özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılabileceği, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda yapının sismik davranışının değiştiği dolayısıyla deprem davranışı incelenecek olan yapılarda dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İtme analizi, Tarihi yığma yapılar, Sonlu elemanlar metodu, Operasyonel modal analiz, Sonlu eleman model iyileştirme, Tahribatsız yöntemler

ABSTRACT

Assessment of Seismic Behavior of Historical Masonry Structures Considering the Soil-Structure Interaction

Alper ÖZMEN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

January 2024, Pages: xvi + 147

Historical masonry structures are damaged and destroyed over time due to earthquakes, floods, etc. In order to transfer these structures to future generations, it is very important to examine and protect them properly.

Accordingly, this thesis focuses on the case of the historical Taşhoran Church, located in Malatya, Turkey. The church, built in 1893, has been subjected to various damages and repairs throughout the different time periods.

The research comprises eight main chapters. In Chapter 1, the significance of masonry structures is described, along with an overview of studies examining the seismic behavior of these structures. Chapter 2 provides information on the history, current condition, and geometric features of the selected case study. In Chapter 3, destructive and non-destructive testing methods carried out on the structural materials are presented, together with the comparison of the results from both methods. Chapter 4 explains the modeling techniques, material models, and soil-structure interaction methods for masonry structures. Chapter 5 compares various seismic analysis methods, including soil-structure interaction techniques, considering the material properties obtained from Chapter 3. In Chapter 6, the dynamic characteristics of the investigated structure are obtained numerically and experimentally, and the finite element model is calibrated. In Chapter 7, nonlinear static and dynamic time-history analyses are carried out using the calibrated finite element model, and the seismic performance of the structure is evaluated by considering 11 different earthquake records. Chapter 8 provides conclusions and recommendations.

The results demonstrate that non-destructive methods can be utilized for determining the material properties of historical structures, and that the seismic behavior of structures can vary significantly when soil-structure interaction effects are taken into account in seismic analysis. Therefore, it is recommended to consider these effects in the seismic behavior examination of masonry structures.

Keywords: Pushover analysis, Historical masonry structures, Finite element method, Operational modal analysis, Finite element model updating, Non-destructive methods

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve incelenen yapının konumu	2
Şekil 2.1. Tarihi Taşhoran Kilisesine ait çeşitli fotoğraflar	11
Şekil 2.2. Yapının kesit özellikleri	13
Şekil 3.1. Laboratuvar deneylerine numune hazırlanması (a) Taş bloklar (b) Karot alma işlemi (c) Silindirik karot numuneler (d) Kesme işleminde kullanılan alet	14
Şekil 3.2. Laboratuvar deneyleri iş akışı	15
Şekil 3.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney düzeneği ve gerinim pulları	17
Şekil 3.4. Çekme Dayanımı deney düzeneği	18
Şekil 3.5. Asitle maruziyet deney seti	19
Şekil 3.6. Donma- Çözülme deney seti	20
Şekil 3.7. Rikagu XRD cihazı	21
Şekil 3.8. LEO (Zeiss) EVO40 SEM-EDAX cihazı	22
Şekil 3.9. N Tipi Schmidt çekici	22
Şekil 3.10. Ultrases Hızı Test cihazı	23
Şekil 3.11. Ultrases hızı testi farklı ölçüm konfigürasyonları	24
Şekil 3.12. Testo 868 infrared termal kamera	24
Şekil 3.13. Zamana karşı Kapiler su emme miktarı	26
Şekil 3.14. Tek eksenli basınç gerilmesi altında ortalama gerilme- şekil değiştirme diyagramı	27
Şekil 3.15. Asitle maruziyet altında numunelerin ağırlık değişimi	28
Şekil 3.16. Asitle maruziyet altında P dalga hızının değişimi	29
Şekil 3.17. 20 Döngü asitle maruziyet deneyi sonrası tek eksenli basınç dayanımı değişimi	29
Şekil 3.18. Asitle maruziyet altında OT ve RT' de meydana gelen görsel değişimler	31
Şekil 3.19. Donma-çözülme etkisi altında OT ve RT numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri a) Ağırlık kaybı b) P dalga hızı değişimi c) 35 döngü D-Ç deneyi sonunda tek eksenli basınç dayanımı	32
Şekil 3.20. D-Ç etkisi altında OT ve RT numunelerinde meydana gelen görsel değişimler	33
Şekil 3.21. Tuz Kristalleşme etkisi altında OT ve RT numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri a) ağırlık kaybı b) P dalga hızı değişimi c) 15 döngü tuz kristalizasyon deneyi sonunda tek eksenli basınç dayanımı	34
Şekil 3.22. Tuz Kristalizasyon etkisi altında OT ve RT numunelerinde meydana gelen görsel değişimler .	35
Şekil 3.23. SEM görüntüleri ve EDAX sonuçları a) OT b) RT	36
Şekil 3.24. OT ve RT numunelerinin XRD desenleri a) OT örnekleri b) RT örnekleri (C: Kalsit, Ab: Albit, Crs: Kristobalit, Kln: Kaolinit, Mcc: Mikroklin, En: Enstatit)	37

Şekil 3.25. Yerinde Schmidt çekici ve Ultrasonik ses hızı (UPV) deneyi	38
Şekil 3.26. Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesi'nin yerinde testlerde dikkate alınan lokasyonları	38
Şekil 3.27. Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesinin İnfrared Termografi görüntüleri	40
Şekil 3.28. Tipik Tanjant modülü hesabı.....	41
Şekil 3.29. Bazı kayaç türlerinin Poisson oranı aralıkları [71]	42
Şekil 3.30. Tek eksenli basınç dayanımı ve kuru birim hacim ağırlığın belirlenmesi için önerilen ilişkiler a) Tek eksenli basınç dayanımı ile Schmidt geri tepmesi arasındaki ilişki [70] b) P dalga hızı ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki [72]	42
Şekil 4.1. Yığma yapılar için modelleme teknikleri (a) Detaylı mikro modelleme (b) Basitleştirilmiş mikro modelleme (c) Makro modelleme [74]	44
Şekil 4.2. Tek eksenli yükleme altında yarı kırılğan malzemelerin tipik gerilme- şekil değiştirme eğrileri a) Çekme kuvveti altında davranış b) Basınç kuvveti altında davranış [74], [86]	45
Şekil 4.3. Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak modelinde basınç ve çekme tipik altında davranış	46
Şekil 4.4. Mohr- Coloumb akma kriteri	46
Şekil 4.5. Kırılma Enerjisi Yayılım Kriterlerine Göre Çekme ve Basınç Altında Davranış.....	48
Şekil 4.6. Sondaj Lokasyonları.....	49
Şekil 5.1. Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde dikkate alınan analitik yaklaşımlar a) Doğrudan yöntem b) Substructure yöntemi [99]	52
Şekil 5.2. Sonlu elemanlar modeli zemin boyutları.....	54
Şekil 5.3. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan katı elemanlar a) TE12L b) T9TB c) T18FF [88]	55
Şekil 5.4. 5 farklı modele ait sonlu eleman modelleri a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB	57
Şekil 5.5. Seçilen deprem kayıtları ve hedef dizayn spektrumu	63
Şekil 5.6. Ölçeklendirilmiş Deprem Kayıtları a) 2020 Sivrice depremi, b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi.....	64
Şekil 5.7. Yapı-Zemin etkileşimi modellerine ait mod şekilleri ve frekansları a) Model FBS b) Model ABS c) Model FRF d) Model WNK e) Model FB	65
Şekil 5.8. İlk 50 modda elde edilen kütsel katılım oranları a) X yönü b) Z yönü.....	67
Şekil 5.9. İlk 20 mod için periyodların karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.10. KN düğüm noktasına ait yer değiştirme-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi.....	69
Şekil 5.11. KN düğüm noktasına ait hız-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi.....	70
Şekil 5.12. KN düğüm noktasına ait ivme-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi.....	71
Şekil 5.13. Yapı üzerinde asal gerilmelerin dağılımı a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB.....	74
Şekil 5.14. 2020 Sivrice depremi altında Çekme şekil değiştirmesi dağılımı a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB.....	78

Şekil 6.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi Akış Diyagramı [141].	81
Şekil 6.2. OMA yöntemi akış diyagramı [141].	82
Şekil 6.3. Piezoelektrik ivmeölçere ait temsili iç yapı	84
Şekil 6.4. Kullanılan ivmeölçere ait görünüm ve geometrik özellikler [141]	85
Şekil 6.5. OROS gürültü ve titreşim analizörü	85
Şekil 6.6. İvmeölçerlerin yapı üzerine yerleştirilmesi	87
Şekil 6.7. İvmeölçerlerin yapı üzerinde konumları	88
Şekil 6.8. Yapıya ait ivme-zaman grafikleri	89
Şekil 6.9. Ölçümlerden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu	89
Şekil 6.10. Yapının 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli	90
Şekil 6.11. Deneysel ve Numerik Mod Şekilleri	93
Şekil 6.12. Numerik ve Deneysel Modal Analiz akış diyagramı	94
Şekil 6.13. Farklı parametre varyasyonları için duyarlılık grafiği	95
Şekil 7.1. Etkin Kütlesel katılım oranları ve mod şekilleri	98
Şekil 7.2. Yapı üzerinde seçilen kontrol noktaları	99
Şekil 7.3. Yapının farklı kontrol noktaları için kapasite eğrileri	101
Şekil 7.4. Modal kapasite eğrileri	102
Şekil 7.5. Elastik tasarım spektrumu ve talep eğrisi	103
Şekil 7.6. TBDY-2018'e göre performans noktasının tayini	104
Şekil 7.7. Yapının +X, -X, +Z ve -Z eksenlerinde performans noktaları	106
Şekil 7.8. İtme analizi sonucunda çekme şekil değiştirmesi dağılımı a) +X b) -X c) +Z d) -Z	108
Şekil 7.9. +Z yönünde itme sonucunda basınç şekil değiştirmesi	111
Şekil 7.10. İtme analizi sonucunda elde edilen asal basınç ve çekme gerilmesi dağılışı a) +X b) -X c) +Z d) -Z	112
Şekil 7.11. +Z yönünde itme sonucunda yapıda meydana gelen çatlak ilerlemesi	115
Şekil 7.12. Seçilen deprem ivme spektrumları ve hedef spektrum	116
Şekil 7.13. Ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri	117
Şekil 7.14. KN3 noktasından elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri	119
Şekil 7.15. KN3 noktasından elde edilen z ekseninde ivme-zaman grafikleri	124
Şekil 7.16. 1989 Loma Prieta depremi altında yapının deforme olmuş hali	128
Şekil 7.17. 1989 Loma Prieta depremi altında asal çekme şekil değiştirmesi (7.91 saniye)	129
Şekil 7.18. Loma Prieta depremi altında yapının çatlak ilerlemesi	130
Şekil 7.19. 1989 Loma Priata depremi altında elde edilen maksimum asal gerilmeler a) Asal çekme gerilmeleri b) Asal basınç gerilmeleri	132

Şekil 7.20. 1989 Loma Prieta depremi altında elde edilen çatlak genişlikleri	134
---	-----



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. 1929- 2021 yılları arasında Malatya için aylık ve yıllık kaydedilen don olan ortalama gün sayısı	20
Tablo 3.2. Tarihi Taşhoran Kilisesi taş örneklerine ait fiziksel özellikler	25
Tablo 3.3. OT ve RT için kapiler su emme katsayısı (c).....	26
Tablo 3.4. Tarihi Taşhoran Kilisesi yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri	27
Tablo 3.5. OT ve RT numunelerinin mineral bileşimi	36
Tablo 3.6. Duvarların ortalama Ultrasonik ses hızları ve Schmidt sertlik değerleri	38
Tablo 3.7. Tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile belirlenen OT ve RT' nin malzeme özellikleri	43
Tablo 4.1. Yığma Birim Malzeme Özellikleri	49
Tablo 4.2. Zemin Ortamının Mekanik Özellikleri	50
Tablo 5.1. Sonlu Eleman Modellerine ait Bilgiler	55
Tablo 5.2. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler.....	64
Tablo 5.3. KN düğüm noktasına ait maksimum yer değiştirme, hız ve ivme değerleri	72
Tablo 5.4. En büyük maksimum ve minimum asal gerilmeler.....	73
Tablo 6.1. Titreşim verilerinin ölçülmesinde kullanılan ivmeölçere ait özellikler.....	85
Tablo 6.2. Gürültü ve titreşim analizörüne ait özellikler	86
Tablo 6.3. İlk 6 moda ait deneysel doğal frekans ve sönüm değerleri	89
Tablo 6.4. Deneysel ve Numerik doğal frekanslar ve MGK değerleri.....	92
Tablo 6.5. Duyarlılık analizi için seçilen parametreler	95
Tablo 6.6. Güncellenmiş sonlu eleman özellikleri	96
Tablo 6.7. Model güncellemesinden sonra modal parametrelerin karşılaştırması	96
Tablo 7.1. Yapının performans noktaları ve maksimum göreceli kat ötelemeleri.....	107
Tablo 7.2. İtme Analizi Sonucu Elde Edilen Maksimum Asal Gerilmeler	109
Tablo 7.3. Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler	117
Tablo 7.4. Maksimum yer değiştirme değerleri (mm)	123
Tablo 7.5. Maksimum asal basınç ve çekme gerilmeleri (MPa)	133

SİMGELER

a_0	: Kütle orantılı sönüm katsayı
a_1	: Rijitlik orantılı sönüm katsayısı
$a_1^{(i)}$	: Spektral ivme
C	: Kılcal su emme katsayısı
c	: Kohezyon
$[C]$	: Global sönümleme matrisi
d_k	: Kuru birim hacim ağırlığı
d_d	: Doygun birim hacim ağırlığı
D	: Numune çapı
$d_1^{(i)}$	: Spektral değişim
E	: Elastisite modülü
E_{dyn}	: Dinamik elastisite modülü
E_{st}	: Statik elastisite modülü
$f_{mo,c}$	: Harç basınç dayanımı
$f_{c,yığma}$	: Homojenize yığma biriminin basınç dayanımı
G_k	: Kuru ağırlık
G_d	: Doygun ağırlık
G	: Kayma modülü
G_c	: Basınç altında kırılma enerjisi
G_f	: Mod-1 kırılma enerjisi
K_x, K_y	: Yatay yay rijitlikleri
K_z	: Düşey yay rijitliği
$[K]$	: Global rijitlik matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
P	: Porozite
R	: Schmidth sekme değeri
S_k	: Kütlece su emme oranı
s_n^*	: Yapı etki ettirecek yatay yük dağılımı
S_{di}	: Spektral yer değiştirme
t	: Numune kalınlığı
μ_{dyn}	: Dinamik poisson oranı
$U_{xN1}^{(i)}$	: Yatay yer değiştirme
$\{\ddot{u}\}$	: Serbest alan ivmesi
V	: Hacim
V_p	: P dalga hızı
V_s	: S dalga hızı
ν	: Poisson oranı
$(Vs)_{30}$	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı
$V_{x1}^{(i)}$	: Taban kesme kuvveti
σ_c	: Basınç mukavemeti
σ_t	: Çekme mukavemeti
ε_{d50}	: Tek eksenli basınç dayanımının %50'sine eşit enine şekil değiştirme
ε_{l50}	: Tek eksenli basınç dayanımının %50'sine eşit boyuna şekil değiştirme
ρ	: Yoğunluk

τ	: Kayma mukavemeti
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
ω	: Açısal frekans
ψ_a	: Numerik analizden elde edilen mod biçimi
ψ_d	: Deneysel modal analizden elde edilen mod biçimi
ϕ_n	: n. moda ait mod şekli
Γ	: Mod katılım faktörü
ξ_n	: Rayleigh sönümü



KISALTMALAR

ABS	: Sınır düğüm noktalarında viskoz sönümleyiciler kullanılan model
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASTM	: American Society for Testing and Material (Amerikan Malzeme ve Test Etme Derneği)
D-Ç	: Donma-Çözülme deneyi
EDAX	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FB	: Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı model
FBS	: Sınır düğüm noktalarına ankastre mesnet atanan model
FEMA	: Federal Emergency Management Agency (Federal Acil Durum Yönetim Ajansı)
FRF	: Sınır noktalarında sonsuz ortam oluşturulan model
FTAA	: Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GFTAA	: Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GÖ	: Göçmenin Önlenmesi
GSY	: Güç Spektral yoğunluk fonksiyonu
IRT	: İnfrared termografi
ISRM	: Kaya Mekaniği için Uluslararası Standart
KH	: Kontrollü Hasar
KK	: Kesintisiz Kullanım
KKO	: Etkin kütleli katılım oranı
KN	: Kontrol noktası
KSM	: Kapasite Spektrumu Metodu
LOI	: Kızdırma kaybı
MGK	: Modal Güvence Kriteri
MİA	: Modal İtme Analizi
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
OT	: Orijinal taş
PEER	: Peer Strong Motion Database NGA-West 2
RT	: Restorasyon taşı
SAB	: Stokastik Altalan Belirleme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sınırlı Hasar
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
UPV	: Ultrases hızı
WNK	: Yapının tabanına winkler yayları atanan model
XRD	: X-ışını kırınımı
ZTA	: Lineer olmayan Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

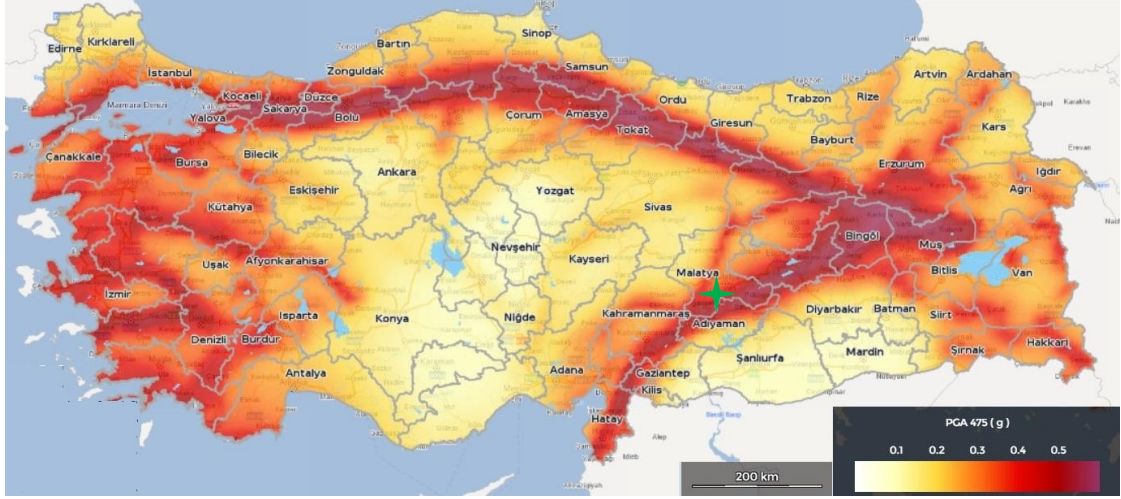
1. GİRİŞ

Dünyanın varoluşundan günümüze kadar, insanoğlu birçok ihtiyacını karşılamak üzere yapılar inşa etmiştir. İnşa edilen bu yapılar birçok özelliğiyle birbirinden ayrılmaktadır. İnsanoğlu bu yapıları inşa ederken yaşadığı coğrafya, dini inanışlar, örf ve adetlerinden etkilenmiştir ve inşa ettikleri yapılar üzerinde bu izleri görmek mümkündür. Bunun yanı sıra, inşa aşamasında genellikle o coğrafyada yer alan ve tabiatta rahatlıkla bulunabilecek malzemelerden faydalanmıştır. Geçmişten günümüze gelen yapılara bakıldığında genellikle ana taşıyıcı elemanların taş malzemeden inşa edildiği görülmektedir ve günümüzde de hala birçok yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan sistemlerinde taş kullanılmaktadır.

Tarihi yığma yapıları meydana getiren yığma birimler (taş, tuğla, vb.) ve harç gibi malzemeler yüksek basınç dayanımına sahipken, çekme dayanımları basınç dayanımlarına oranla oldukça düşüktür. Yapının ölü yükünden dolayı genellikle basınç gerilmeleri ortaya çıkar ve yığma yapılar bu gerilmeleri kolayca karşılayabilirler ancak, yanal kuvvetler altında (deprem vb.) genellikle çekme gerilmeleri ortaya çıkar ve tarihi yapıların hasar görmesine sebep olabilir.

Kültürel mirasımızın gelecek kuşaklara güvenle aktarılabilmesi için tarihi yığma yapıların hasar görmesine sebep olabilecek (deprem, sel, yangın, savaş vb.) etkilere karşı davranışını iyi anlamak ve yapılara doğru müdahaleleri yaparak yapıları korumak oldukça önemlidir.

Tarihi yığma yapılar, geçmişten günümüze gelen kültürel mirasımızın önemli bir parçasıdır. Bu yapılar, deprem, sel, yangın, savaş gibi etkilerden dolayı hasar görebilir veya yıkılabilir. Bu nedenle, tarihi yığma yapıların korunması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında geçmiş hakkında günümüze ışık tutan yapılardan biri olan ve Malatya ili Yeşilyurt ilçesinde yer alan Tarihi Yığma Taşhoran Kilisesinin deprem davranışı incelenmiştir. Taşhoran kilisesinin Türkiye Deprem Tehlike Haritası üzerindeki konumu Şekil 1.1 de görülmektedir. Şekil 1.1 incelendiğinde yapının Doğu Anadolu Fay hattı üzerinde yer aldığı ve ciddi bir deprem tehlikesiyle karşı karşıya olduğu görülmektedir. Bu nedenle yapının deprem davranışının iyi bir şekilde anlaşılması ve gerekli çalışmaların yapılması oldukça önemlidir.



Şekil 1.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve incelenen yapının konumu

1.1. Literatür Özetleri

Tarihi yapılar, geçmiş uygarlıkların yaşam biçimlerini ve tarihlerini gelecek nesillere aktaran en önemli yapılardandır. Bu yapılar birçok doğal ve insan kaynaklı dış etken tarafından zarar görmekte ve zaman içerisinde yıkılmaktadır. Bu yapıların en iyi şekilde korunabilmesi için bu yapıların davranışlarının iyi anlaşılması ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu yapıların davranışlarını analiz etmek için birçok farklı teknik önerilmiştir. Genel olarak bakıldığında tarihi yapıların inceleme prosedürü, yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi, modal davranışının ortaya koyulması ve yapının davranışını doğru bir şekilde temsil eden sonlu elemanlar modelinin oluşturularak gerekli analizlerin yapılması şeklinde sıralanabilir.

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi de kendi içinde farklı teknikler barındırmaktadır. Bunlar tahribatlı test teknikleri, yarı tahribatlı test teknikleri ve tahribatsız test teknikleridir.

1.1.1. Tarihi Yapıların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Geçmişte tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bunlar kendi içerisinde tahribatlı test teknikleri, yarı tahribatlı test teknikleri ve tahribatsız test teknikleri olarak gruplandırılabilir. Aşağıda tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde tahribatsız test teknikleri kullanılmış olan çalışmalar özetlenmiştir.

Aksoy ve Karaton [1] Diyarbakır'da bulunan Tarihi Ulu caminin malzeme özelliklerinin elde edilmesinde Schmidt çekici ve Ultrases test yöntemini kullanmıştır. Ayrıca taşıyıcı olmayan duvarlardan aldıkları horasan harcı örnekleri üzerinde asit kaybı deneyi uygulayarak horasan harcının karışım oranlarını ve agrega çaplarını elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda, caminin yapı malzemelerine ait basınç dayanımı ve çekme dayanımı gibi değerleri elde etmişlerdir.

Grinzato vd. [2] infrared termografi tekniği ile 30 yıllık bir binanın duvar kesitlerindeki deformasyonları ve değişimleri kaydetmişlerdir. Bu teknik sayesinde yapının genel durumu hakkında bilgi toplanmıştır. Ayrıca, duvarların nem durumları da incelenmiştir.

Fort vd. [3] İspanya, Valdemorillo da yer alan bir kilise ve Valdemaqueda da yer alan bir köprüyü incelemiş ve yapılarda kullanılan iki farklı granit tipi olduğu sonucuna varmışlardır. Hasarsız test yöntemlerinden olan Schmidt çekici ve Ultrases yöntemini kullanarak bu granitlerin özelliklerini elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda bu granitlerin ne kadar dayanım kaybına uğradığı tespit edilmiştir.

Pirchio vd. [4] Schmidt çekici ve Ultrases test tekniği ile İtalyan orta çağ kilisesine ait 72 adet duvar örneği üzerinde uygulamalar yapmışlardır. Hasarsız test tekniklerinden elde edilen sonuçları değerlendirmek için donatısız yığma duvarları farklı sınıflara ayırmış ve testlerden elde ettikleri sonuçları kullanarak, farklı yapı tipleri için mekanik özellikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü vb.) temsil edecek denklemler geliştirmişlerdir.

Hatır vd. [5] Kapadokya da yer alan ve 1834 yılında inşa edilmiş Küçükköy kilisesinin yapı malzemelerinde meydana gelen bozulmaları belirlemek için Schmidt çekici ve Ultrases tekniği kullanmışlardır. Çalışma sonucunda elde ettikleri bozulma etkilerinin andezit taşında meydana gelen bozulmalar ile oldukça benzer olduğu kanısına varmışlardır.

Ercan vd. [6] tarihi yığma bir köprünün sonlu elemanlar modelinde kullanmak üzere, malzeme özelliklerinin tespitinde, Schmidt çekici ve Ultrases tekniğinin yanı sıra, köprüden düşen taş ve harç örneklerini alarak laboratuvar testlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri mekanik özellikleri kullanarak köprünün sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır.

Karaton vd. [7] Diyarbakır ilinde bulunan Tarihi Malabadi köprüsünün lineer olmayan deprem davranışını araştırmışlardır. Köprünün malzeme özelliklerinin tespitinde hasarsız test yöntemlerinden olan Schmidt çekici ve Ultrases tekniğini kullanarak yapım taşlarının mekanik özelliklerini elde etmişlerdir. Ayrıca, köprüden aldıkları harç örneği üzerinde asit kaybı deneyi yaparak, harcın karışım oranlarını ve granulometrisini elde etmişlerdir. Elde ettikleri malzeme özelliklerini kullanarak köprünün lineer olmayan deprem davranışını araştırmışlardır.

Bazı durumlarda yapı üzerinden örnek almak veya yapıya ciddi olmayan hasarlar vererek çalışmak mümkün olabilir. Bu durumda tahribatlı veya yarı tahribatlı test teknikleri kullanılarak yapı malzemesine ait fiziksel ve mekanik özellikler elde edilebilir. Tahribatlı veya yarı tahribatlı test tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Noor-E-Khuda vd. [8] iki adet eski ve yeni bir kil tuğlasının basınç ve eğilme dayanımlarını araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında, Batı Avustralya'nın 4 farklı bölgesinden toplanmış toplam 52 adet örnek üzerinde çalışmışlardır.

Lombillo vd. [9] Kuzey İspanya, Santander de bulunan Riva-Herrera Sarayının malzeme özelliklerini elde etmek için tahribatsız ve yarı tahribatlı (flat jack, karot alma, sonik testler) yöntemleri kullanmışlardır.

Dorji vd. [10] Avusturalya da bulunan 100 yıllık bir tarihi köprünün malzeme özelliklerini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla köprünün farklı noktalarından 45 adet örnek almışlardır. Alınan karot örnekleri üzerinden malzemenin basınç ve çekme dayanımlarını elde etmişlerdir. Ek olarak, köprüye flat-jack testi de uygulanmış ve hasarlı yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Arede vd. [11] yığma derzlerinin ve dolgu malzemesinin materyal özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla yerinde tahribatlı deneyler ve yapıdan alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir.

Çelik vd. [12] hızlandırılmış eskitme deneyleri ile andezit taşının bozulmasını incelemişlerdir. XRD, XRF ve SEM teknikleri ile taşın mineralojik, petrografik ve kimyasal özelliklerini saptamışlardır. Daha sonra donma-çözülme, tuz kristalizasyon ve termal şok deneyleri yapıldıktan sonra ultrasonik ses hızı değişimi, basınç dayanımı değişimi gibi özelliklere bakarak sonuçları yorumlamışlardır.

Eren vd. [13] Kıbrıs'ta yer alan tarihi yapılardan alınan iki farklı taş örneğinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, özgül ağırlık, su emme, açık gözeneklilik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, doğrudan çekme dayanımı, yarma çekme dayanımı, nokta yük dayanımı, yangına dayanıklılık, aşınma direnci ve donma-çözülme direnci deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Amer vd. [14] çok yapraklı yığma duvarların malzeme özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla Mısırda yer alan çok yapraklı duvarlardan örnekler almışlar ve bu numuneler üzerinden bu duvarlara ait fiziksel, mekanik, petrografik, mineralojik ve kimyasal özellikleri elde etmişlerdir.

Gökçe vd. [15] Konya'daki tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan Göderni traverteninin donma-çözülme dayanımını araştırmışlardır. Ocaktan alınan traverten taşları üzerinde farklı döngü sayılarında dönme-çözülme testleri yaparak, taşlardaki fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir.

1.1.2. Tarihi Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşiminin Dikkate Alındığı Çalışmalar

Tarihi yapıların deprem davranışlarının incelendiği birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarında yapı ve zemin arasında etkileşim dikkate alınmıştır. Tarihi yapılarda, yapı- zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Güllü vd. [16] iki farklı sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır, bunlardan biri tabanda ankastre mesnetli diğeri ise yapının ve zeminin birlikte modellendiği yapı-zemin etkileşimi modelidir. Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin tarihi bir köprünün sismik davranışı üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, tarihi köprülerin sismik davranışının doğru bir biçimde incelenmesi için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Rovithis vd. [17] De Bosset Köprüsü'nün deprem davranışını araştırmışlardır. Dinamik analizlerde kullanılan malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yerinde testler ve laboratuvar deney sonuçlarını kullanmışlardır. Yapı-zemin etkileşimini göz önünde bulundurmak için Winkler yayları kullanmışlardır. Çalışmalarının son bölümünde, batı Yunanistan'da bulunan De Bosset köprüsü için güçlendirme yöntemleri önermişlerdir.

Martinelli vd. [18] İtalya, Lecco' da bulunan, tarihi bir köprünün yük taşıma kapasitesini araştırmışlardır. Lineer olmayan sonlu elemanlar modelinde zemin yapı etkileşimini dikkate almak için yaylar kullanılmıştır.

Giulio vd. [19] İtalya'da bulunan ve 14. yüzyılda inşa edilmiş bir taş köprünün deprem davranışını incelemişlerdir. Köprünün dinamik davranışını elde etmek için çevresel titreşim testi yapmışlardır. Yapı- zemin etkileşimini modellemek için köprünün her ayağının altında, 6 serbestlik dereceli yay-sönümleyici sistem kullanılmıştır.

Güllü ve Karabekmez [20] Gaziantep ilinde bulunan Kurtuluş Camisinin yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda, uzak ve yakın fay deprem etkisi altında sismik davranışını araştırmışlardır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında iki farklı sınır koşulu karşılaştırılmıştır. Viskoz ve elementer sınır şartları tanımlamışlardır. Viskoz sınır şartlarını oluşturmak için viskoz sönümleyiciler ve elementer sınırları oluşturmak için zeminin sınırlarına sabit mesnetler tanımlamışlardır.

Wang vd. [21] geçmişte meydana gelen depremlerde hasar gören Manchester mahkeme binasının, gelecekte meydana gelecek olası bir depremde nasıl bir davranış göstereceğini araştırmışlardır. Bu amaçla performansa dayalı bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizinde yapı-zemin etkileşimini de dikkate almışlardır. Yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için yapının tabanına yaylar yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda yapının olası bir depremde ciddi hasarlar göreceği ve yıkılabileceği sonucuna varmışlardır.

Fathi vd. [22] Tebriz, şehir merkezinde bulunan 14. yüzyıla ait tarihi bir yapının sismik performansını araştırmışlardır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için yay ve sönümleyici mekanizması kullanılmıştır. Bu etkileşimi dikkate alındığı durumda, modal davranışın, doğal titreşim frekanslarının tamamen değiştiği ve yapının devrildiği sonucuna varmışlardır.

Shabani vd. [23] Tønsberg, Norveç de bulunan yığma kulenin sismik davranışını araştırmışlardır. Bu amaçla yapıyı 3 boyutlu lazer tarayıcılarla taramış ve katı modelini oluşturmuşlardır. Daha sonra yapı üzerinde çevresel titreşim testi deneyi gerçekleştirerek sonlu elemanlar modelini iyileştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında yapı-zemin etkileşimini dikkate almak amacıyla ankastre

mesnetli, direkt metot ve altyapı metoduyla 3 farklı sonlu elemanlar modeli kullanmışlardır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumlarda rezonans etkisinden dolayı düşük genlikli deprem etkilerinde bile yapıda hasar meydana geldiği görülmüştür.

Hökelekli ve Al- Helwani [24] 1271 yılında inşa edilmiş Afyon ilinde bulunan Alaca camii minaresinin yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda, deprem etkisi altında yapıda meydana gelen hasar dağılımını araştırmışlardır. Farklı zemin özellikleri ve ankastre tabanlı durumlarda lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında, zemin ortamının sınırlarında sonsuz elemanlar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda ankastre taban durumunda, minare hasar görürken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda hasar görmemiştir.

Bayraktar ve Hökelekli [25] tuğla ve kesme taştan inşa edilmiş yarım daire kemerli köprülerin, sismik hasar mekanizmalarının, lineer olmayan zemin davranışından nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde doğrudan metodu kullanmışlardır.

Silva [26] yığma bir kulenin zemin-temel-yapı etkileşimini incelemiştir. Zemin ortamının yan ve taban sınırlarında serbest alan sınır koşulları uygulanmıştır. Zemin boyutları yatay yönlerde 70 m, derinlikte 30 m olarak modellenmiştir.

Güllü ve Özel [27] Gaziantep ilinde bulunan tarihi bir köprünün deprem davranışı üzerinde, yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığı durumda yakın ve uzak fay etkilerini araştırmışlardır. Yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için zeminin sınırlarında viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yapı-zemin etkileşimini dikkate alındığı durumda, yer değiştirmelerin ve gerilmelerin arttığı görülmüştür.

Homaie vd. [28] İran demiryolu ağındaki yer alan tarihi bir beton kemerli köprünün sismik tepkisi üzerinde yapı-zemin etkisini, artımsal dinamik analiz (IDA) yoluyla araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı durumda, yapının taşıma kapasitesinin aşıldığı görülmüştür.

Giulio [19] tarihi bir köprünün, taşıma kapasitesini ve sismik kırılgenliğini araştırmak için doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda yapısal kapasitenin doğru tahmin edilemeyeceği sonucuna varmışlardır.

Farklı yapı türlerinin davranışlarının incelendiği ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında yay ve sönümleyici sistemin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur [29], [30], [31]. Ayrıca yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde, zemin sınırlarında sonsuz elemanlar kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur [32], [33].

1.1.3. Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Analizinin Lineer Olmayan Statik İtme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Analiz Yöntemiyle Yapıldığı Çalışmalar

Tarihi yapıların sismik davranışlarını ve kapasitelerini belirlemek için farklı analiz metotları mevcuttur. Lineer olmayan statik itme analizi yöntemi ile çok büyük bilgisayar işlemci gücü olmadan yapının performans sınırlarını elde etmek mümkün olduğu için tarihi yapıların sonlu elemanlar analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Clementi [34] 2016 Central İtalya depremi sonrası, çeşitli yığma kiliselerde meydana gelen hasarları incelemiş ve bu yapıların sonlu elemanlar modelini oluşturarak, bu yapıları sayısal olarak analiz etmiştir. Çalışma sonucunda, deprem sonrası meydana gelen hasarlar ve sayısal veriler karşılaştırılmıştır.

Kalkbrenner vd. [35] düzensiz yığma binaların sismik değerlendirmesi için yatay yükleme yönü 0°'den 360°'ye döndürülerek binanın mekânsal modeli üzerinde bir dizi ardışık itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Çok yönlü itme analizi olarak adlandırılan bu yaklaşım, yapının yalnızca iki ana yönüyle sınırlı olan geleneksel itme analizine kıyasla daha fazla sayıda olası hasar mekanizmasını ortaya koyduğu sonucuna varmışlardır.

Jahangiri vd. [36] İran'da bulunan iki adet beton kemerli demiryolu köprüsünün sismik tepkilerini değerlendirmek üzere 22 farklı deprem kaydı kullanarak sonlu elemanlar metoduyla analiz etmişlerdir.

Jahangiri vd. [37] iki adet beton demiryolu köprüsünün sismik davranışını değerlendirmek için artımsal dinamik analiz yöntemini kullanmışlardır. Artımsal dinamik analizlerde 22 adet uzak fay deprem kaydı kullanmışlardır. Artımsal dinamik analiz sonuçları kullanılarak, performans seviyelerinin kapasiteleri, yıllık ortalama performans sınırlarını aşma sıklığı sismik performans hedeflerine ulaşma güven seviyeleri, kırılma eğrileri ve hasar durumu olasılıkları elde edilmiştir. Tecchio vd. [38] kagir tek açıklığa sahip bir köprünün hasar görebilirliğini araştırmak için lineer olmayan statik itme analizi ve artımsal dinamik analiz yöntemlerini uygulamışlardır. Lineer olmayan statik itme analizi ile yapının performans noktasını tespit etmiş ve 0.05 g ile 1.5 g arasındaki deprem kayıtlarını kullanarak yapıya ait kırılma eğrilerini elde etmişlerdir.

Rota vd. [39] yığma yapılarda kırılma eğrilerinin türetilmesi için yeni bir yaklaşım önerisinde bulunmuşlardır. Çalışma kapsamında seçilen yığma bir yapıya önce lineer olmayan statik analiz yöntemini uygulayarak, yapının performans seviyelerini elde etmişler daha sonra, artımsal dinamik analiz yöntemi ile farklı yer hareketi seviyelerine karşılık yer değiştirme taleplerini elde etmişlerdir.

Saloustros vd. [40] karmaşık bir geometriye sahip olan Barselona'daki Santa Maria del Mar kilisesinin sismik kırılma eğrilerini değerlendirmesini yapmışlardır. Yapıyı temsilen yapıya ait sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Lineer olmayan statik itme analizi yöntemi ile yapının performans sınırları elde edilmiş daha sonra, malzeme özelliklerinden kaynaklanan belirsizlikleri tahmin etmek için rastgele değerler kullanılarak, Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen değerler kullanılarak artımsal dinamik analiz gerçekleştirilmiş ve farklı sismik tehlike senaryoları için yapının güvenlik seviyesini ve yapıda beklenen hasarı elde etmişlerdir.

Martinez vd. [41] Meksika’da yer alan Morelia Katedralinin an kulesinin sismik davranışını elde etmek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar modelini kalibre etmek için çevresel titreşim testi yapılmıştır. Yapının kapasite eğrileri lineer olmayan statik itme analizi yapılarak farklı kontrol noktaları için elde edilmiştir. Daha sonra olasılıksal sismik tehlike analizi gerçekleştirilerek farklı sınır durumları için yapıya ait kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir. Analiz sonucunda tekrar etme süresi 475 ve 975 yıl olan depremlerde yapıda orta düzeyde bir hasar meydana gelebileceği ortaya koyulmuştur.

1.2. Çalışmanın nemi

Kültürel mirasımızın gelecek kuşaklara güvenle aktarılabilmesi için tarihi yığma yapıların hasar görmesine sebep olabilecek (deprem, sel, yangın, savaş vb.) etkilere karşı davranışını iyi anlamak ve yapılara doğru müdahaleleri yaparak yapıları korumak oldukça önemlidir.

Malatya ili Doğu Anadolu Fay hattı (DAF) zerindedir. Doğu Anadolu fayı üzerinde geçmişte birçok büyük deprem meydana gelmiştir (6 şubat 2023 Mw= 7.7 ve Mw= 7.6 Kahramanmaraş, 24 Ocak 2020 Mw=6.8 Sivrice (Elâzığ), 8 Mart 2010 Mw=6.1 Okçular (Elâzığ), 1 Mayıs 2003 Mw=6.4 Bingl, 27 Haziran 1998 Mw=6.2 Adana, 5 May 1986 Mw= 6.0 Malatya). Geçmişteki sismik aktiviteye bakıldığında deprem tehlikesinin bu bölgede daima dikkate alınması gerektiği grlmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, geçmiş dönemler hakkında günümüze ışık tutan yapılardan biri olan ve Malatya ili Yeşilyurt ilçesinde yer alan Tarihi Yığma Taşhoran Kilisesinin deprem davranışı incelenmiştir.

Geçmiş alışmalar incelendiğinde, tarihi yığma yapıların davranışlarının incelenmesinde birçok farklı tekniğin kullanılabilirliği grlmektedir. Ancak bu tekniklerin birbirini takip edecek şekilde bir işlem süreci oluşturduğu çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu alışma kapsamında bu teknikler sırayla uygulanarak incelenen tarihi yığma yapının deprem davranışı sıralı bir işlem süreci sonucunda elde edilecektir.

Geçmişte yapılmış çalışmalar incelendiğinde ilk olarak yapının malzeme özelliklerinin elde edilmesi gerektiği kanısına varılmıştır. Malzeme zelliklerinin belirlenmesinde tahribatlı, yarı tahribatlı ve tahribatsız test yöntemleri kullanılmaktadır. Yarı tahribatlı ve tahribatsız test yöntemlerinde malzemeye ait birçok belirsizlik dikkate alınamadığı için tahribatlı test tekniklerine göre bu yöntemden elde edilen sonuçların güvenilirliği daha düşük olmaktadır.

Bu çalışmada seçilen örnek yapı restorasyon aşamasındayken örnek numuneler alınabildiği için tahribatlı test tekniklerini uygulamak mümkün olmuştur. Ayrıca tahribatsız test teknikleri

kullanılarak malzeme özellikleri tekrar belirlenmiş ve tahribatlı test teknikleriyle elde edilen malzeme özellikleriyle karşılaştırılmıştır.

Sonraki aşamada yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve yerinde yapılan deneyler sonucu zeminin yumuşak zemin olduğu ve zemin davranışının yapının tepkilerini etkileyeceğinden dolayı yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiğine karar verilmiştir. Zemin ortamının ideal modelleme sistematiğini ortaya koymak amacıyla zemin boyutları ve mekanik özellikleri sabit kalmak koşuluyla zeminin yan sınırları, yay ve sönümleyici elemanlar teşkil edilerek, ankastre mesnetler teşkil edilerek, serbest alan kolonları atanarak ve tabanında, Winkler yayları kullanılarak modellenmiş daha sonra lineer olmayan itme analizi ve lineer olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sonraki aşamada sonlu elemanlar modelini kalibre etmek amacıyla Operasyonel Modal Analiz (OMA) gerçekleştirilmiş ve deneysel modlara en yakın modların elde edildiği zemin modeli kalibre edilerek çalışmanın sonraki bölümlerinde bu model kullanılmıştır.

Yedinci bölümde yapının performans noktalarını elde etmek amacıyla lineer olmayan statik analiz yapılmış ve yapının limit durumları elde edilmiştir.

Farklı yer hareketi seviyelerinde yapının hasar görebilirliğini değerlendirmek amacıyla zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi kullanılmış ve 11 farklı deprem kaydı altında yapının sismik davranışı elde edilmiştir.

2. MALATYA TAŞHORAN KİLİSESİ

Tarihi Taşhoran (Surp Yerrortutyun) Kilisesi kesme taştan tek kubbeli olarak inşa edilmiştir. Yapımına 1878 yılında başlanmış ve 1893 yılında bitirilmiştir. Kubbesi 1893'teki depremde sonra yıkılmış ve kubbe 1905'te yeniden onarılmıştır. 1969'ların sonlarında bir yangın meydana gelmiş ve kubbe tekrar çökmüştür. Kilisenin kitabesi ağır hasar gördüğü için okunamamıştır. Yapıya giriş, batı cephesinin ortasındaki mermer kapıdan yapılmaktadır. Bazı kemerlerin altında ve ana kapının her iki yanında haç sembolleri vardır. Binanın geniş bir oturma alanı ve birçok taş çörtlen vardır. Taştan yapılmış kubbe kasnağına sahiptir. Doğu cephesinin kuzey köşesinde bir vaftiz odası bulunmaktadır. Doğu cephesindeki apsisin önünde diyakon ve önünde bir koro yeri bulunmaktadır. Kilisenin ana duvarları kesme taştan inşa edilmiştir. Kilise 2021 yılında Malatya Büyükşehir Belediyesi tarafından restore edilerek güçlendirilmiştir. Görsel gözlemlere ve restorasyon projesine göre vaftiz odasının kapısı, apsis alanının iki sütunu ve kemerindeki taşlar yenilenmiş ve restorasyon taşları kullanılmıştır [42]. Şekil 2.1'de Tarihi Taşhoran Kilisesi'nin farklı görünümüleri verilmiştir. Ayrıca Malatya Taşhoran Kilisesine ait kesit özellikleri Şekil 2.2'de görülebilir.



a) Restorasyon öncesi durum

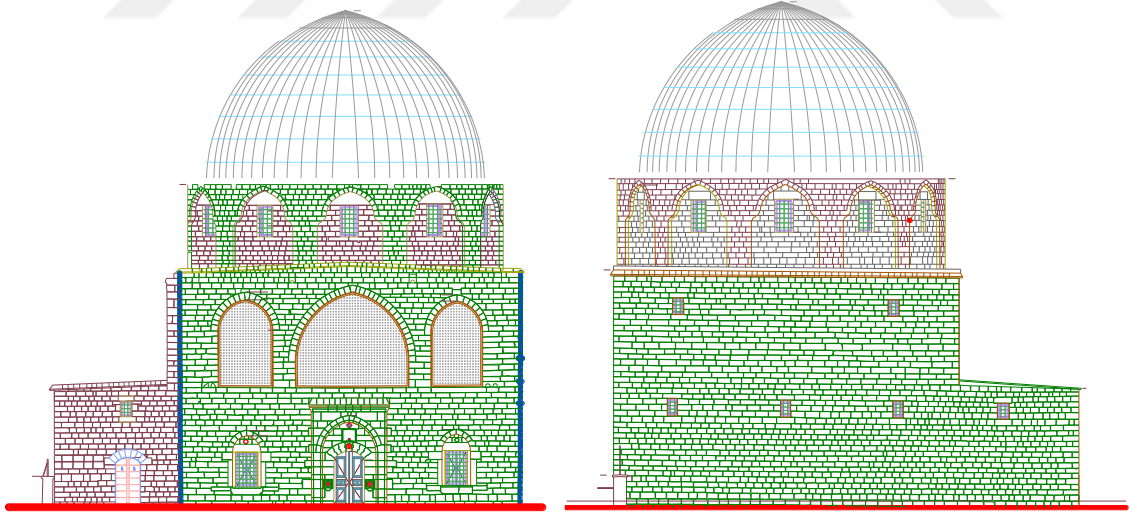
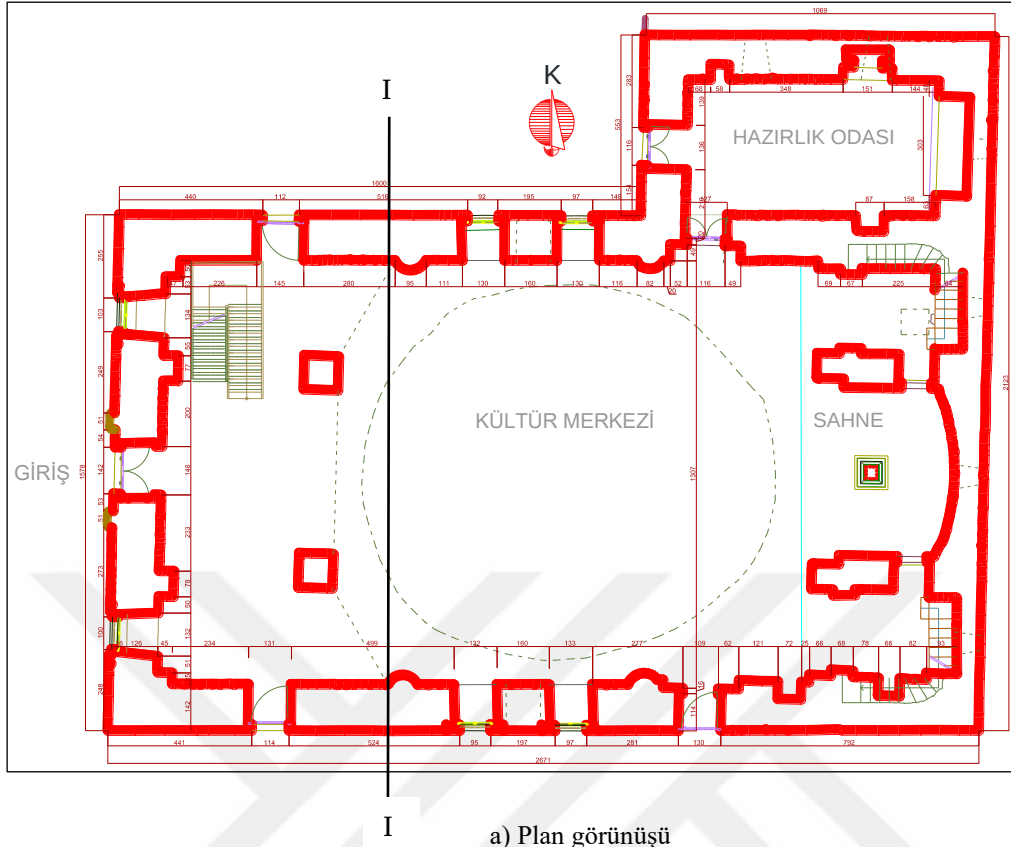


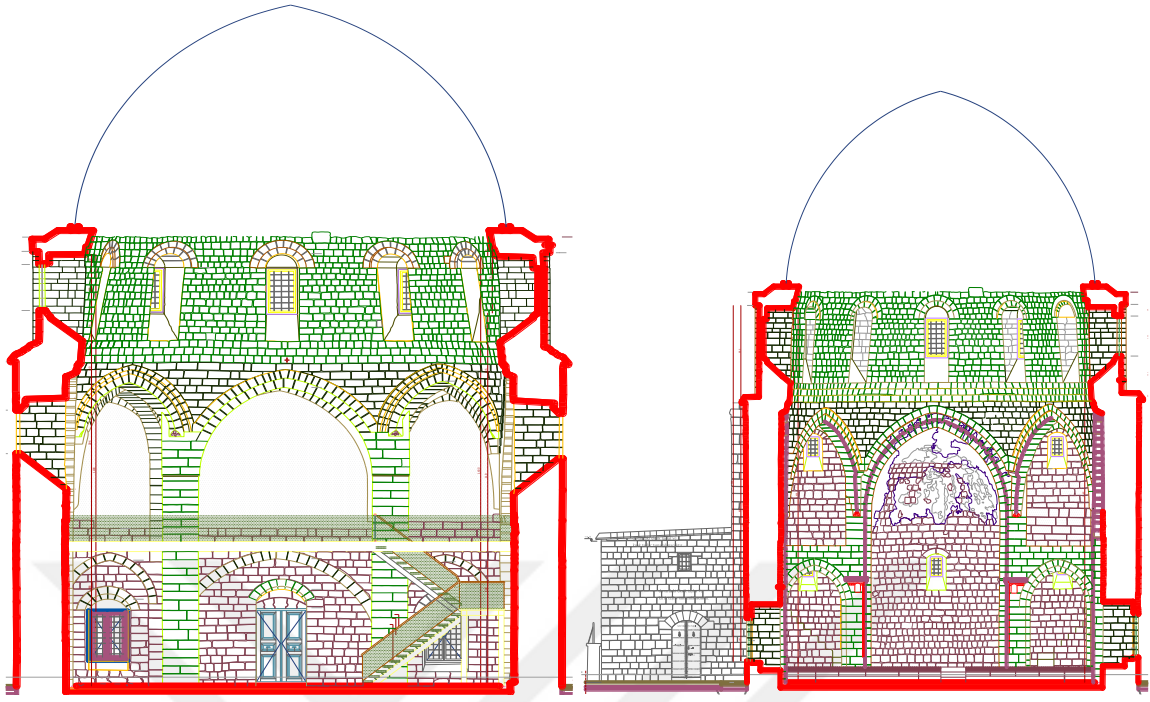
b) Restorasyon sonrası durum



c) Bazı detaylar

Şekil 2.1. Tarihi Taşhoran Kilisesine ait çeşitli fotoğraflar





c) I-I Kesiti

Şekil 2.2. Yapının kesit özellikleri

3. YAPIYA AİT MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, Tarihi Taşhoran Kilisesi'nin ana yapı malzemesi olan orijinal ve restorasyon taşlarının tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda fiziksel özellikler, mekanik özellikler, mikro yapısal özellikler elde edilmiş ve tahribatsız ve tahribatlı test yöntemlerinden (Laboratuvar deneyleri) elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanmak üzere, orijinal ve restorasyon taş bloklarından silindirik ve küp test numuneleri hazırlanmıştır. Taş bloklardan karot alma işlemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

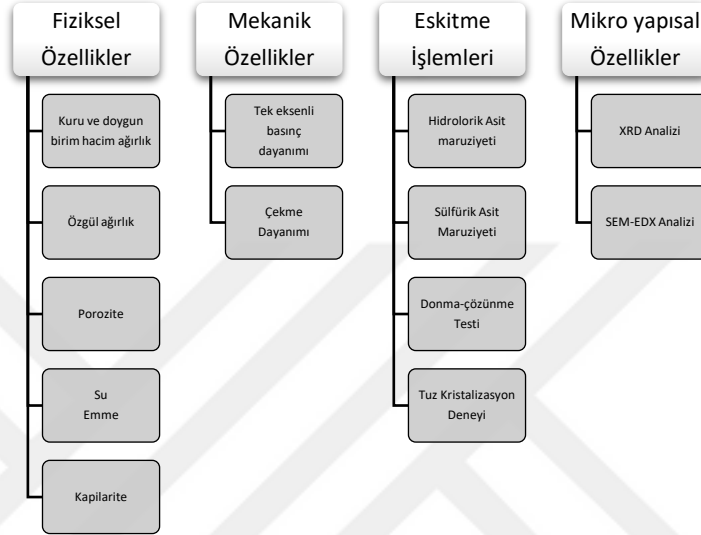


Şekil 3.1. Laboratuvar deneylerine numune hazırlanması (a) Taş bloklar (b) Karot alma işlemi (c) Silindirik karot numuneler (d) Kesme işleminde kullanılan alet

Şekil 3.1a'da şantiyeden getirilen taş bloklar görülmektedir. Şekil 3.1b'de taş bloklardan karot alma işlemi gösterilmektedir. Taş bloklardan çıkarılan karot numuneleri Şekil 3.1c'de verilmiştir. Karot numunelerinin ISRM (International Society for Rock Mechanics) standartlarına göre kesim işlemi Şekil 3.1d'de görülmektedir.

3.1. Tahribatlı Test Yöntemleri (Laboratuvar Deneyleri)

Bu çalışmada, Tarihi Taşhoran Kilisesi'nin ana yapı malzemesi olan orijinal ve restorasyon taşlarının mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Bu kapsamda fiziksel özellikler, mekanik özellikler, mikro yapısal özellikler elde edilmiş ve taş örneklerine bazı eskitme işlemleri uygulanmıştır. Laboratuvar deneylerine ait iş akışı Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Laboratuvar deneyleri iş akışı

3.1.1. Fiziksel Özelliklerin Tespiti

Aşağıda açıklanan deneyler, Tarihi Taşhoran Kilisesinden alınan orijinal taşlar (OT) ve restorasyon taşları (RT) üzerinde uygulanmıştır.

Kuru Birim Hacim Ağırlık, Doymuş Birim Hacim Ağırlık Tayini

TS EN 699 standartlarında Kuru Birim Hacim Ağırlık, Doymuş Birim Hacim Ağırlık tespiti için önerilen prosedür uygulanmıştır.

Birim Hacim ağırlık deneyinde, numuneler 105 °C'ye kadar ısıtılmış etüvde kurutulmuş ve sabit kütle elde edilene kadar bu işlem devam etmiştir. Daha sonra desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulan numuneler, 0,1 gram hassasiyetle tartılmıştır (G_k). Tartılan numunenin hacmi, numunenin suya doymuş ağırlığının farkına göre Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Benzer şekilde suyun içerisine bırakılmış numuneler kütlesi değişmeyinceye kadar suda bekletilir ve sabit kütleyle gelen numune (G_d) tartılarak, cismin hacmine bölünür. Denklem (3.1) ve (3.2)'de yer alan d_k: kuru birim hacim ağırlığı, d_d: doymuş birim hacim ağırlığı, V: cismin hacmini ifade etmektedir.

$$d_k = G_k/V \quad (3.1)$$

$$d_d = G_d/V \quad (3.2)$$

Özgöl Ağırlık Tayini

Özgöl ağırlık deneyi TS EN 699 standartları dikkate alınarak yapılmıştır. Etüvde kurutulduktan sonra, soğutulmuş olan malzeme 90 μ elekten geçecek şekilde öğütülmelidir. Belli bir miktar numune tartıldıktan sonra (G_k) içerisinde saf su bulunan piknometre içerisine konularak hacmi elde edilir (V). Özgöl ağırlık denklem (3.3) kullanılarak elde edilmiştir.

$$d_o = G_k/V \quad (3.3)$$

Porozite Tayini

Birim hacim ağırlığı ve özgöl ağırlığı hesaplanmış olan taş örneklerinin porozite tayininde Denklem (3.4) kullanılmaktadır. Denklemde, d_h : Taşın birim hacim ağırlığı (g/cm^3), P : porozite, d_o : taşın özgöl ağırlığı (g/cm^3)' dır.

$$\%P = 1 - \left(\frac{d_h}{d_o} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Ağırlıkça Su Emme Tayini

Ağırlıkça su emme oranının tayininde TS EN 699 standardından yararlanılmıştır. Örnek karotlar, bir kabın içine yerleştirilip su eklenerek yüksekliğinin 1/4'üne kadar daldırıldı. Ardından, her biri 1 saat süreyle sırasıyla yarısına ve 3/4'ü seviyelerine kadar suda bekletildi. En son olarak, karotlar yaklaşık 2 gün boyunca su içinde 1,2 - 2 cm su ile kaplanarak örtülmeli ve 0,1 gram hassasiyetle tartılması gerekmektedir. Bu işlemler sonucunda Denklem (3.5) kullanılarak kütlece su emme oranı hesaplanabilir. Denklemde G_d : suya doymuş ağırlık (g), G_k : kuru ağırlık (g), S_k : kütlece su emme oranı (%) olarak ifade edilmiştir.

$$S_k = \left(\frac{G_d - G_k}{G_k} \right) \quad (3.5)$$

Kapiler Su Emme Tayini

Kapiler su emme tayininde TS EN 1925 standardı dikkate alınmıştır. İlk olarak, etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulan deney numunelerinin yan yüzeyleri parafin ile kaplanır. Sadece bir yüzeyi suya maruz kalan taş örneklerinde zamanın bir fonksiyonu olarak su emiliminin neden olduğu kütle artışları çeşitli aralıklarla ölçülür (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 121, 144, 169, 196, 225, 256,

1440 ve 2880 dakika). OT ve RT örneklerinin kılcal (kapiler) su emme katsayısı Denklem (3.6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C = \frac{(m_i - m_d)}{A \cdot \sqrt{t_i}} \quad (3.6)$$

Burada; numunenin m_i i. dakikadaki ağırlığı (g), m_d , kuru numunenin ağırlığı (g), A, numunenin suya temas eden yüzey alanı (m^2), t_i , süre (s) olarak ifade edilmiştir.

3.1.2. Mekanik Özelliklerin Tespiti

Tarihi Taşhoran Kilisesinden alınan orijinal taşlar (OT) ve restorasyon taşlarının (RT) mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla aşağıda açıklanan deneyler, uygulanmıştır.

Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, [43] önerileri dikkate alınarak yapılmıştır. ISRM (1979)'a göre, 54 mm çapında ve yükseklik / çap oranı 2.5-3.0 olan dairesel numuneler hazırlanmıştır. Numunelere uygulanan gerilme 0.5 ile 1.0 MPa / s arasında değişmektedir. Numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışının hesaplanması için tek eksenli basınç dayanımı deneyi esnasında gerinim pulları kullanılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı deney düzeneği Şekil 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney düzeneği ve gerinim pulları

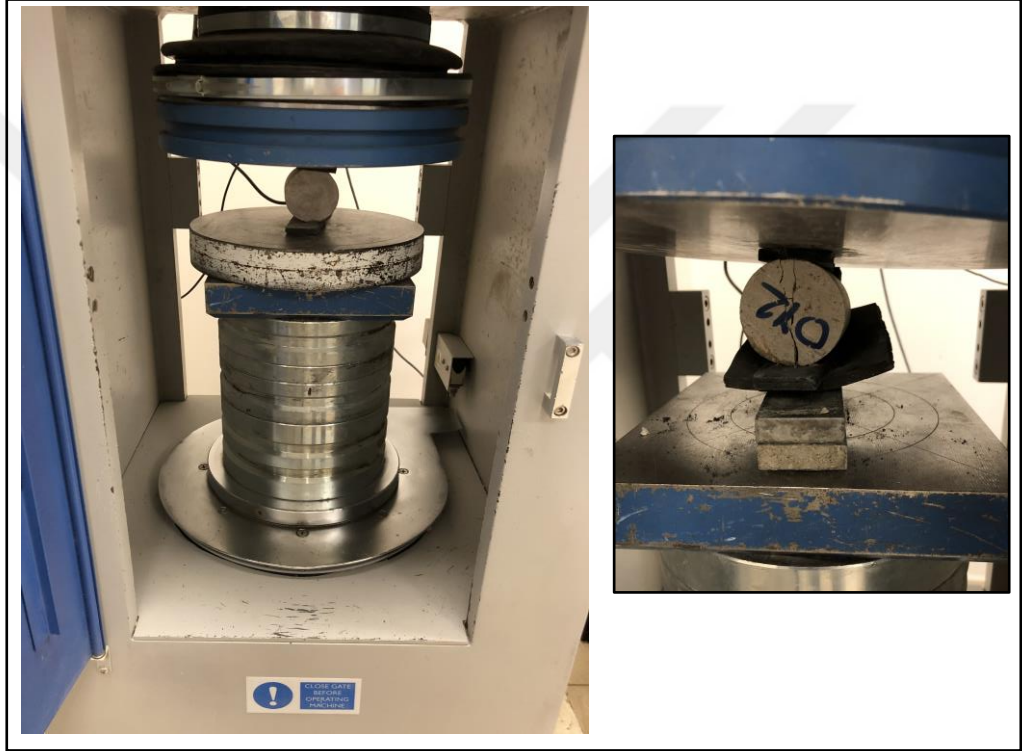
Dolaylı Çekme Dayanımı (Brezilyan) Deneyi

Taş numunelerin çekme dayanımını elde etmekte kullanılan Brezilya yöntemi dolaylı bir yöntemdir. Deney, ISRM 1978 [44] de verilen prosedürler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deney için 54 mm çap ve 54 mm boyunda numuneler hazırlanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.4' de

gösterilmiştir. Deneyde yükleme hızı 200 N/s'dir. Çekme mukavemetinin hesabı Denklem (3.7) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{0.636 \times P}{D \times t} \quad (3.7)$$

Bu denklemde, σ_c çekme mukavemeti (MPa), P maksimum yük (N), D numune çapı (mm) ve t numune kalınlığı (mm) olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 3.4. Çekme Dayanımı deney düzeneği

3.1.3. Eskitme İşlemleri

Taşların karşılaşılabilecekleri farklı dış etkenler karşısında, taşlarda meydana gelebilecek hasarları hızlandırılmış işlemlerle elde etmek için yapılan deneylerdir. Bu tez kapsamında hidroklorik asit (HCl) maruziyeti, sülfürik asit (H₂SO₄) maruziyeti, Tuz Kristalizasyon Deneyi ve Donma-Çözülme testi yapılmıştır.

HCl ve H₂SO₄ Maruziyeti

HCl ve H₂SO₄ asitle maruziyet döngüleri TS EN 14066 [45]'nin önerisine göre gerçekleştirilmiştir [46]. Deney için, 40mm x 40mm x 40mm küp şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan

numuneler farklı pH değerlerine sahip çözeltilere daldırılmıştır. Numuneler, oda sıcaklığında 6 saat boyunca iki farklı kimyasal çözeltiye daldırıldıktan sonra, 18 saat boyunca bir fırında 105 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Asitle maruziyet deneyi için %5H₂SO₄ ve %5HCl kimyasal çözeltileri hazırlanmış ve bu çözeltilerin pH değerleri ölçülmüştür. %5H₂SO₄ ve %5HCl çözeltilerinin pH değerleri sırasıyla 1.05 ve 0.87 olarak elde edilmiştir. Her 5 döngüden sonra ultrases geçiş hızı (UPV), kuru kütle kaybı ve görsel değişiklikler izlenmiş ve kaydedilmiştir. Deney toplam 20 döngü boyunca uygulanmıştır. 20 Döngünün sonunda numunelerin tek eksenli basınç dayanımı ölçülmüştür. Deney için hazırlanan çözeltiler Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Asitle maruziyet deney seti

Donma-Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyi TS EN 12371'e göre yapılmıştır [47]. Hazırlanan numuneler -20 °C'de 6 saat bekletilmiş, daha sonra 20 °C'de tamamen suda iken 18 saat çözölmüştür. Donma-çözülme testi için orijinal taşlar ve restorasyon taşlarından kesilen 55 mm x 75 mm ölçülerinde silindirik 5'er numune hazırlanmıştır. Toplam 35 donma-çözülme döngüsü gerçekleştirildi ve her 5 döngü sonunda ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı değişimi ve görsel değişiklikler kaydedilmiştir. 35 Döngünün sonunda numunelerin tek eksenli basınç dayanımına bakılmıştır. Donma-Çözülme deney seti Şekil 3.6' de verilmiştir.

Malatya ili, Türkiye'nin doğusunda yer almaktadır. Şehirde, kışlar soğuk ve karlı, yazlar sıcak ve kurak geçmektedir. Tipik karasal iklim özellikleri göstermektedir. Deniz seviyesinden 954 m yukarıda yer almaktadır. Kış aylarında sıcaklıklar genellikle 0°C'nin altına düşer (Tablo 3.1). Tablo 3.1'de Malatya ilinde meydana gelen, 1929 ile 2021 yılları arasındaki ortalama aylık don olan gün sayısı ve minimum sıcaklıklar verilmiştir. 1929 ile 2021 arasındaki tarihlerde kaydedilen sıcaklıklar incelendiğinde, bölgede Kasım-Nisan ayları arasında donma-çözülme etkisi olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. 1929- 2021 yılları arasında Malatya için aylık ve yıllık kaydedilen don olan ortalama gün sayısı

	<i>Oca.</i>	<i>Şub.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Nis.</i>	<i>May.</i>	<i>Haz.</i>	<i>Tem.</i>	<i>Ağu.</i>	<i>Eyl.</i>	<i>Ekim</i>	<i>Kas.</i>	<i>Ara.</i>	<i>Yıllık</i>
Don olan günler (ort.)	23	18	7	1	0	0	0	0	0	0	6	17	72
Min. sıcaklık (ort.)	3.3	-2	2.2	7.5	12	16.2	19.9	19.9	15.6	9.9	4	-0.8	8.4



Şekil 3.6. Donma- Çözülme deney seti

Tuz Kristalizasyon Deneyi

Tuz Kristalizasyon Deneyi TS EN 12370'e göre yapılmıştır [48]. TS EN 12370'e göre deney 15 çevrimden oluşmaktadır. Deney için %14Na₂SO₄ çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltinin pH değeri 6.85 olarak kaydedilmiştir. Her çevrimde, hazırlanan numuneler %14Na₂SO₄ çözeltisi içinde 20 C° 'de 2 saat bekletilir, ardından etüvde 105 ° C'de 20 saat ısıtılır ve oda sıcaklığında (20 ° C) 2 saat soğumaya bırakılır. Her 5 döngüden sonra ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve görsel değişim

kaydedilir. 15 Döngünün sonunda, numunelere tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılmış ve deney sonunda basınç mukavemetleri elde edilmiştir.

3.1.4. Mikro Yapı Analizleri

Tez kapsamında incelenen OT (Orinal Taş) ve RT (Restorasyon Taşı)'nın mineral birleşimleri, mineralojik ve mikro yapısal özelliklerini elde etmek ve malzemeler arasındaki iç yapısal benzerlik ve farklılıkları tespit etmek amacıyla X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDAX) analizleri kullanılmıştır.

X-ray Diffraction (XRD) Analizleri

Tarihi yapıdan alınan örneklerin, mineral bileşenlerini tespit etmek için X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılmıştır. XRD için toz haline getirilmiş OT ve RT örnekleri hazırlanmıştır. Dalga kırınım desenlerini kaydetmek için, toz haline getirilmiş numune (75 µm'lik bir elekten geçerek) bir cam üzerine eşit şekilde yayılır ve X-ışını aparatının numune tutucusuna yerleştirilmiştir [49]. XRD deneyini gerçekleştirmek için kullanılan cihaz Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Rikagu XRD cihazı

SEM-EDAX Analizleri

Taş örneklerinin, mineralojik ve mikroyapısal özelliklerini elde etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDAX) teknikleri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan SEM-EDAX analizlerinde, LEO (Zeiss) EVO40 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve entegre EDAX kullanılmıştır (Şekil 3.8). OT ve RT örneklerinin mineralojik ve mikro yapısal özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.8. LEO (Zeiss) EVO40 SEM-EDAX cihazı

3.2. Tahribatsız Test Teknikleri

Birçok durumda tarihi yapılar üzerinde herhangi bir fiziksel müdahalede bulunmak mümkün olmamaktadır. Örnek almanın veya yapı üzerinde tahribat bırakacak test tekniklerinin kullanılmasının mümkün olmadığı durumlarda tahribatsız test teknikleri tercih edilmektedir. Bu tez kapsamında, Schmidt Sertlik Çekici, Ultrases geçiş hızı testi ve infrared termografi (IRT) testi uygulanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde bu testlerin detaylı uygulamaları anlatılmıştır.

3.2.1. Schmidt Sertlik Çekici

Schmidt çekici deneyi, tarihi yapılarda en sık kullanılan tahribatsız test tekniklerinden biridir. Malzeme tarafından emilen elastik enerjinin mukavemet ile ilişkili olduğu fikrine dayanan test, taş ve benzeri yapı malzemelerini yüzey sertliğinin bir ölçümünü sağlamaktadır [50], [51]. Bu çalışmada, Schmidt Sertlik Çekici deneyi [52] EN 12504-2:2012 [53] standartları dikkate alınarak, sıvasız elemanlar üzerinde uygulanmıştır. Sertlik deneyinde zımba uçlu N Tipi Schmidt çekici kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. N Tipi Schmidt çekici

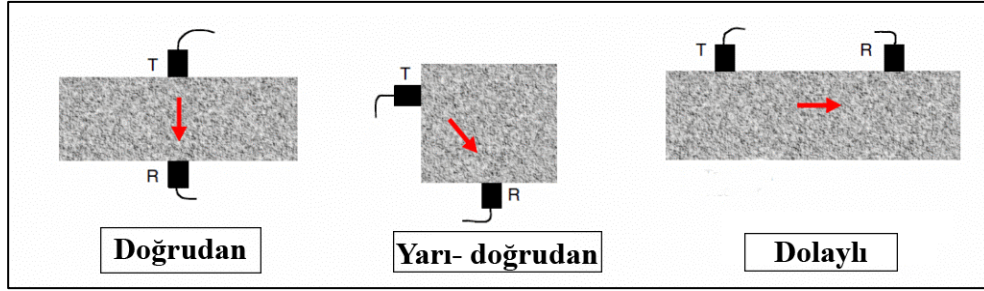
3.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrasonik ses dalgalarının yığılma duvarlardan ne kadar hızlı geçtiğini belirlemek için tahribatsız muayene yöntemi olan UPV testi kullanılır. İki başlıktan biri ultrasonik darbeyi iletir ve diğer başlık darbeyi alır. Darbenin ortalama hızı, dönüştürücülerin merkezleri arasındaki mesafenin, dalganın geçiş süresine bölünmesiyle hesaplanır. Ultrasonik dalga hızı testi, duvarın homojenliğini analiz etmek, çatlakların derinliğini belirlemek ve herhangi bir iç boşluğu tespit etmekte kullanılır [54], [55]. Ultrases dalga hızı testi ASTM C597 [56] ve EN 12504-4 [57] standartlarına göre uygulanmıştır.

Ultrasonik dalga hızını belirlemek için kullanılan test ekipmanı Şekil 3.10’da verilmiştir. UPV deneylerinde silindirik problu transdüserler kullanılmıştır. Problar 54 kHz nominal çalışma frekansı ile karakterize edilmiştir. Silindir numuneler için iki prob arasındaki mesafe 135 mm iken kübik numuneler için bu mesafe 40 mm dir. Problar ve numune yüzeyi arasındaki boşlukları ve havayı gidermek için özel bir jel kullanılmıştır. Her deneyde, eşit miktarda jel bir cam plaka üzerine alınmış ve numune yüzeyine homojen bir şekilde uygulanmıştır. Böylece her deneyde aynı miktarda jel kalınlığı sağlanmıştır. ASTM C597 [56]’ ye göre deneyin uygulanmasında, farklı ölçüm konfigürasyonları kullanılabilir (doğrudan, dolaylı ve yarı doğrudan) (Şekil 3.11). Her numune grubu için en az üç ölçüm yapılmıştır ve numunenin ultrases geçiş hızı, değerlerin ortalaması olarak belirlenmiştir. Okumaların ortalama ultrases geçiş hızının %30’ undan fazla saptığı ölçüm durumlarında üç okuma daha yapılır.



Şekil 3.10. Ultrases Hızı Test cihazı



Şekil 3.11. Ultrases hızı testi farklı ölçüm konfigürasyonları

3.2.3. İnfared Termografi (IRT)Testi

İnfared Termografi (IRT), gece görüşünü iyileştirmekten yapısal yüzeylerdeki çatlakları tespit etmeye kadar geniş bir kullanım alanına sahip ve yaygın olarak kullanılan tahribatsız bir test tekniğidir. IRT, yığma miras yapılarının, yapı malzemelerinin ve koruma durumlarının araştırılması için değerli bir tahribatsız test metodudur. Çünkü yapıya herhangi bir hasar vermeden araştırmaya olanak tanır ve geniş alanları incelemede kolaylık sağlar [58]. Tarihi yapıların bu teknikle incelenmesinde, iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır [59], [60]. Bu iki yaklaşıma pasif ve aktif termografi denir.

İlgilenilen özellikler doğal olarak arka plandan farklı bir sıcaklıkta olduğunda pasif termografi kullanılır. Pasif yaklaşım genellikle, incelenen malzemelerin tipik olarak niteliksel olarak denetlendiği mimari yüzey incelemesi için kullanılır (süreksizliklerin / ara yüzlerin, kusurların, boşlukların vb. tanımlanması). İlgilenilen özellikler çevre ile termal dengede olduğunda ve bu nedenle ayrılması zor olduğunda, ilgilenilen özellik ile zemin arasında bir termal kontrast (ısıtma veya soğutma) sağlamak için bir enerji kaynağının kullanıldığı yöntem aktif termografi yöntemi denir [61]. Bu tez çalışmasında yapılan termografi deneylerinde Testo 868 marka infared termal kamera kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Testo 868 infrared termal kamera

3.3. Tarihi Taşhoran Kilisesi Malzeme Özellikleri

Tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle elde edilen malzeme özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

3.3.1. Tahribatlı Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özellikleri

Yukarıda detayları verilen tahribatlı test yöntemleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde paylaşılmıştır.

Fiziksel Özellikler

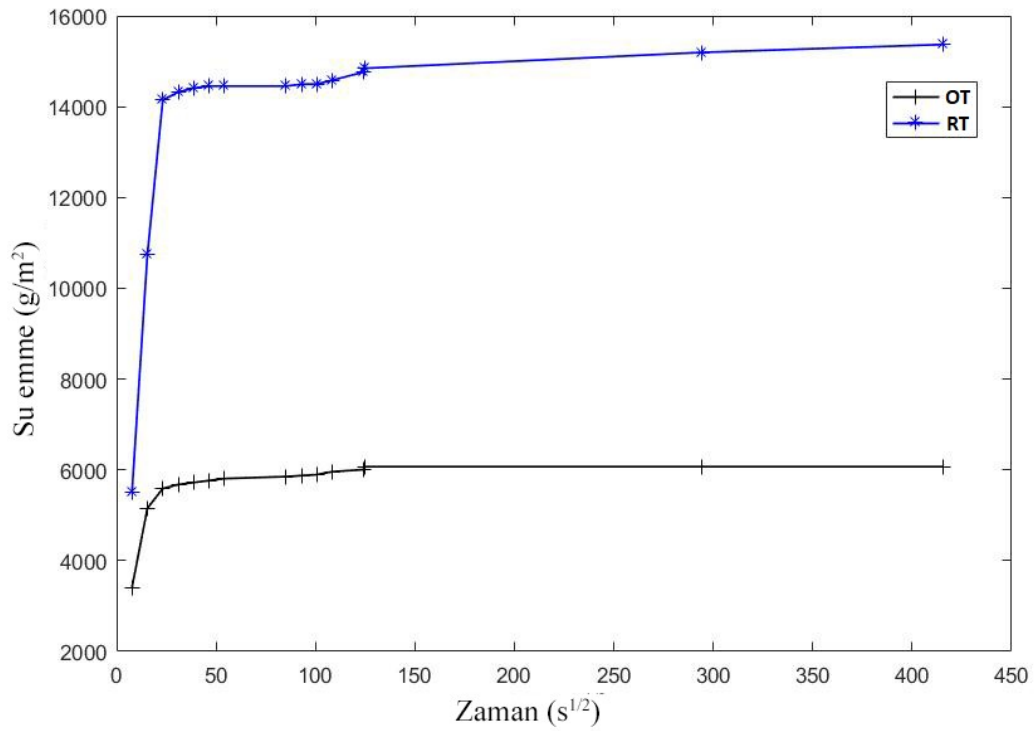
Orijinal taşların ve restorasyon taşlarının kuru ve doymuş birim hacim ağırlığı, özgül ağırlığı, ağırlıkça ve hacimce su emme miktarı ve kapiler su emme katsayısı TS 699'a göre belirlenmiştir. OT ve RT' ye ait fiziksel özellikler Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Kapiler su emme deneyi TS EN 1925'e göre yapılmıştır. Taş örnekleri tarafından emilen su miktarı 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 1440 ve 2880 dakikalık sürelerde kaydedilmiştir ve kılcal su emme katsayısı (c) Denklem (3.6)' ya göre belirlenmiştir. Su emme miktarının kaydedildiği her bir zaman aralığı için kılcal su emme katsayısı Tablo 3.3'de görülebilir. Zamana karşı kılcal su emme miktarı Şekil 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Tarihi Taşhoran Kilisesi taş örneklerine ait fiziksel özellikler

Özellik	Orijinal	Restorasyon
	Taş	Taşı
Kuru birim hacim ağırlık (g/cm^3)	2.69	1.52
Doygun birim hacim ağırlık (g/cm^3)	2.72	1.8
Özgül ağırlık (g/cm^3)	3.17	3.56
Ağırlıkça su emme (%)	1.3	18.9
Hacimce su emme (%)	3.2	28.7
Görünür porozite (%)	15	57

Tablo 3.3. OT ve RT için kapiler su emme katsayısı (c)

		Zaman	1	4	9	16	25	36	49	
		(dak.)								
(C)	Taş	RS	0.710	0.693	0.609	0.462	0.372	0.311	0.267	
(kg/m ² s ^{0.5})	Tipi	OS	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	
		Zaman	121	144	169	196	225	256	1440	2880
		(dak.)								
(C)	Taş	RS	0.170	0.156	0.144	0.134	0.119	0.119	0.052	0.037
(kg/m ² s ^{0.5})	Tipi	OS	0.015	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017	0.018	0.019

**Şekil 3.13.** Zamana karşı Kapiler su emme miktarı

Mekanik Özellikler

Tek eksenli basınç dayanımı testi için ISRM (1979) [43] standardına göre 54 mm çapında ve 135 mm yüksekliğinde altı adet silindir numune hazırlanmıştır. Basınç dayanımı testleri 3000 kN kapasiteli UTEST tam otomatik basınç presisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülünün belirlenmesi için, 10 mm uzunluğunda tek eksenli, 120 ohm' luk gerinim ölçerler kullanılmıştır. Yapı taşlarının (OT ve RT) gerilme-şekil değiştirme davranışları gerinim pulları yardımıyla elde

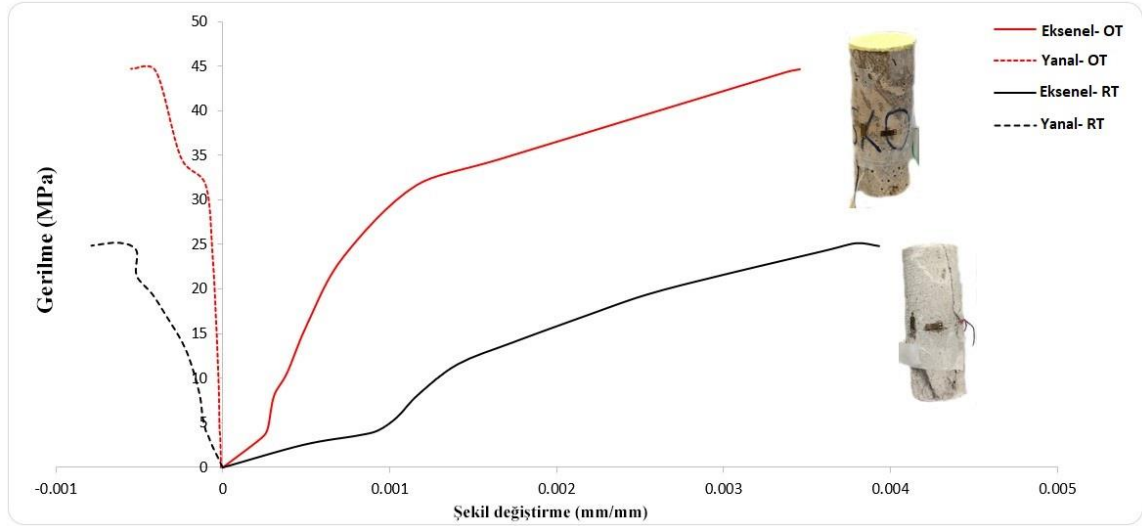
edilmiştir. Statik elastisite modülü (E_{st}) gerilme-şekil değiştirme diyagramına göre hesaplanmıştır. OT ve RT' ye ait mekanik özellikler Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Yapı taşlarına ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 3.14' te verilmiştir. Poisson oranı ve E_{st} , Şekil 3.14'te verilen grafik kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada elastisite modülü hesabında, tanjant elastisite modülü dikkate alınmıştır [62], [63].

Ayrıca çekme mukavemetinin hesaplanmasında dolaylı bir yöntem olan Brezilya test yöntemi kullanılmıştır. Brezilya testi için ISRM (1978) [44] standardında önerildiği üzere 54 mm çapında ve 54 mm yüksekliğinde altı adet silindir numune kullanılmıştır. OT ve RT' ye ait çekme mukavemeti (σ_t) Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4. Tarihi Taşhoran Kilisesi yapı taşlarının ortalama mekanik özellikleri

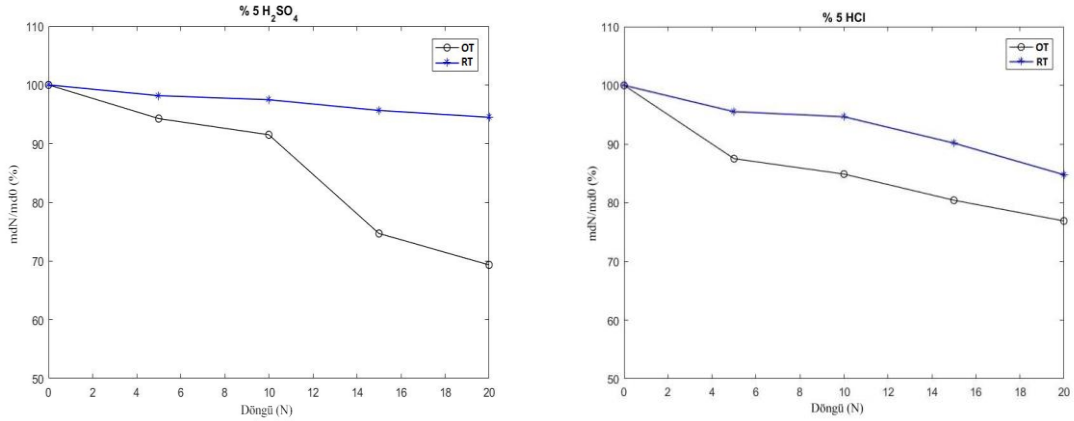
Tipi	P_c (N)	σ_c (MPa)	P_t (N)	σ_t (MPa)	E_{st} (MPa)	ν
RT	57650	25.20	12320	2.69	8570	0.20
Std.	2696.9	1.18	1709.27	0.37	624	0.0014
Sapma						
OT	102300	44.67	32120	7.01	33000	0.25
Std.	1903.3	0.83	3849.36	0.84	1985	0.011
Sapma						



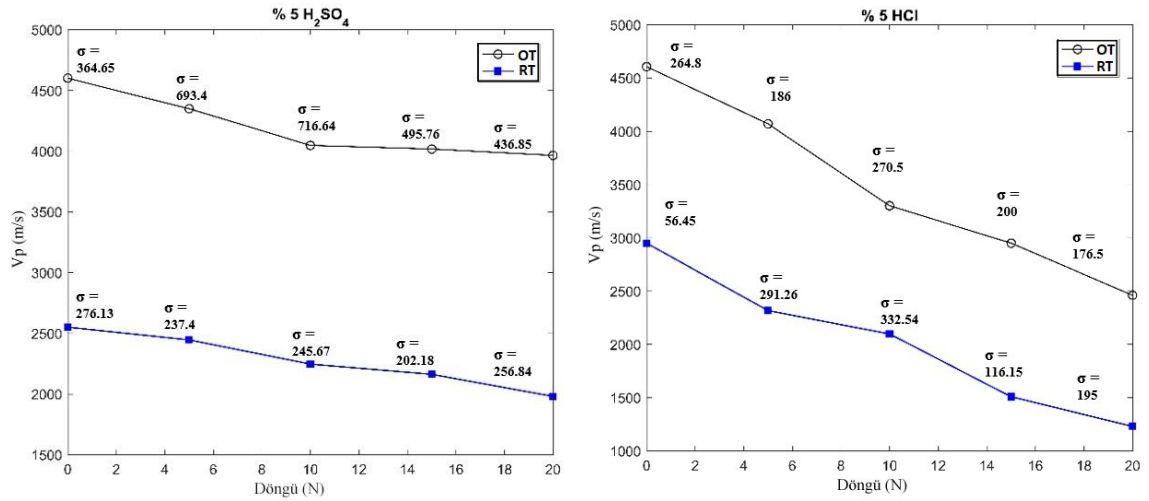
Şekil 3.14. Tek eksenli basınç gerilmesi altında ortalama gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Eskitme İşlemleri

Asitle maruziyet deneyleri için iki farklı asit çözeltisi kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, %5H₂SO₄ ve %5HCl kimyasal çözeltileri hazırlanmıştır. %5H₂SO₄ ve %5HCl çözeltilerine ait pH değerleri sırasıyla 1.05 ve 0.87 olarak ölçülmüştür. Her 5 döngüden sonra ultrases hızı, ağırlık kaybı ve görsel değişimler kaydedilmiştir. Test toplam 20 döngü olarak gerçekleştirilmiştir. Döngüler bittikten sonra OT ve RT' nin tek eksenli basınç dayanımlarına bakılmıştır. H₂SO₄ ve HCl ile maruziyet deneylerinin herhangi bir döngüsünde, taş numunelerinin kuru ağırlığının başlangıçtaki kuru ağırlığa göre değişimi Şekil 3.15'te gösterilmiştir. H₂SO₄ ve HCl asit maruziyeti sonucu tüm numunelerin kuru ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir. OT numunelerinde, H₂SO₄ ve HCl maruziyeti altında RT numunelerinden daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir. H₂SO₄'e maruz kalan numuneler, HCl'ye maruz kalan numunelerden daha fazla ağırlık kaybına uğramıştır. Ultrases hızı testi genellikle yapı malzemelerinin iç kusurlarının tahmini için kullanılmaktadır. Yeni mikro çatlakların gelişmesi veya halihazırda var olanların genişlemesi nedeniyle hem asit maruziyeti hem de tuz kristalizasyon testi sonrası, taş örneklerinin P dalga hızında düşüş görülmüştür [64]. H₂SO₄ ve HCl maruziyeti altında P-dalga hızının göreceli olarak değişimi Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi, 20 döngü H₂SO₄ ile maruziyet deneyi sonunda OT' nin ultrasonik P dalgası hızı başlangıç değerinin %13.8' ine RT'nin %22.35'ine düşmüştür. 20 döngü HCl ile maruziyet deneyi sonunda, OT ve RT' nin Ultrasonik P dalgası hızı sırasıyla başlangıç değerinin %46.58'ine ve %58.29'una düşmüştür.

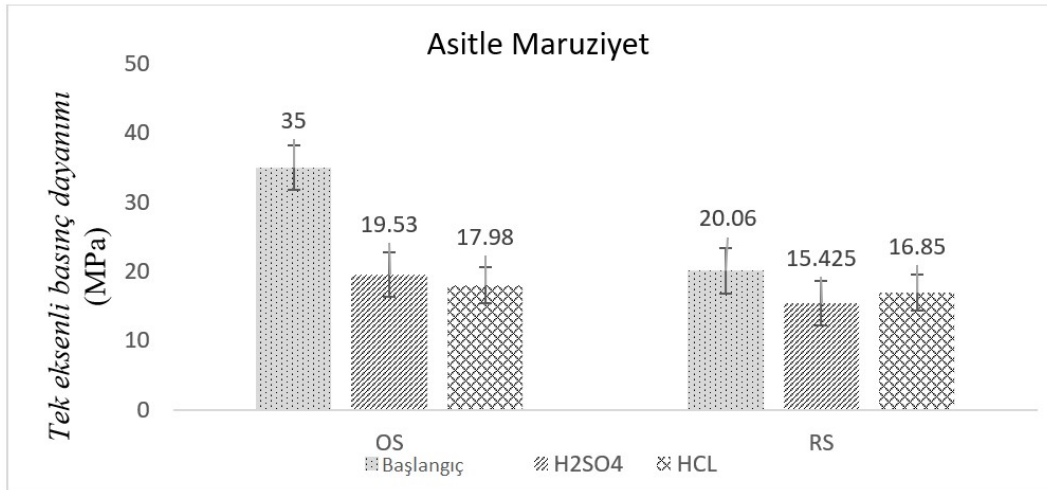


Şekil 3.15. Asitle maruziyet altında numunelerin ağırlık değişimi



Şekil 3.16. Asitle maruziyet altında P dalga hızının değişimi

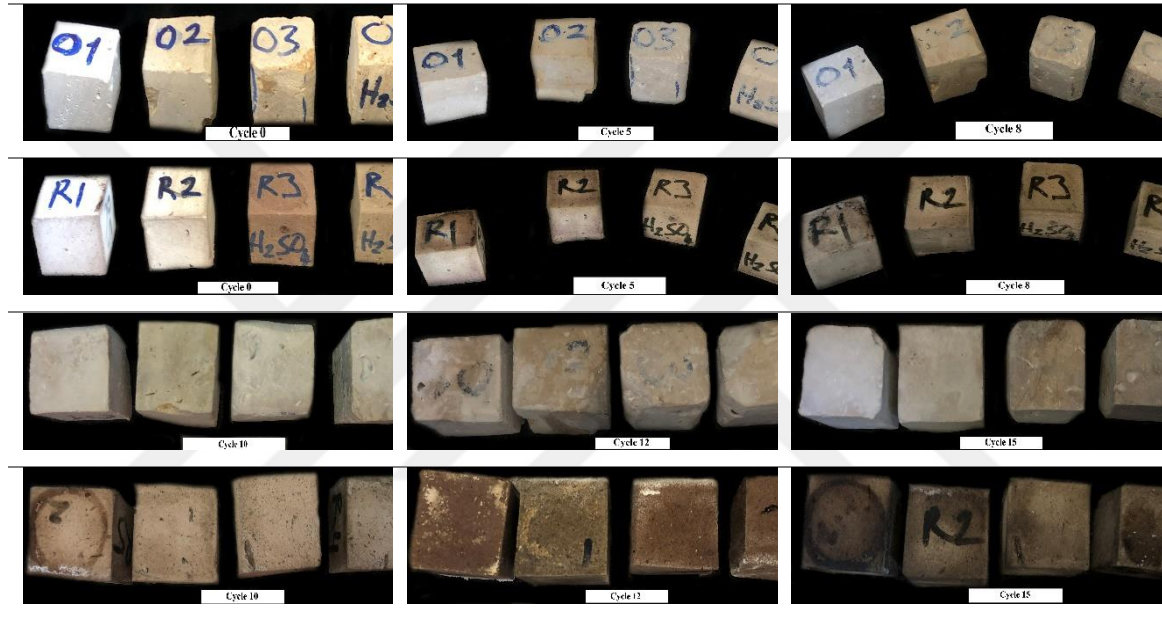
H₂SO₄ ve HCl'ye maruz kalan OT ve RT numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, her iki asit çözeltisi için de 20 döngüden sonra tek eksenli basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. 20 Döngü H₂SO₄ ve HCl ile maruziyetten sonra tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 3.17'de verilmiştir. Şekil 3.17'ye göre, H₂SO₄ ile maruziyet sonrası OT' nin tek eksenli basınç dayanımında %44 ve RT' nin tek eksenli basınç dayanımında %23 azalma meydana gelmiştir. Ek olarak, HCl ile maruziyet sonrası, OT 'nin tek eksenli basınç dayanımında %49 ve RT' nin tek eksenli basınç dayanımında %16 azalma meydana gelmiştir. OT' nin tek eksenli basınç dayanımında meydana gelen azalma hem H₂SO₄ hem de HCl ile maruziyet için daha büyüktür.



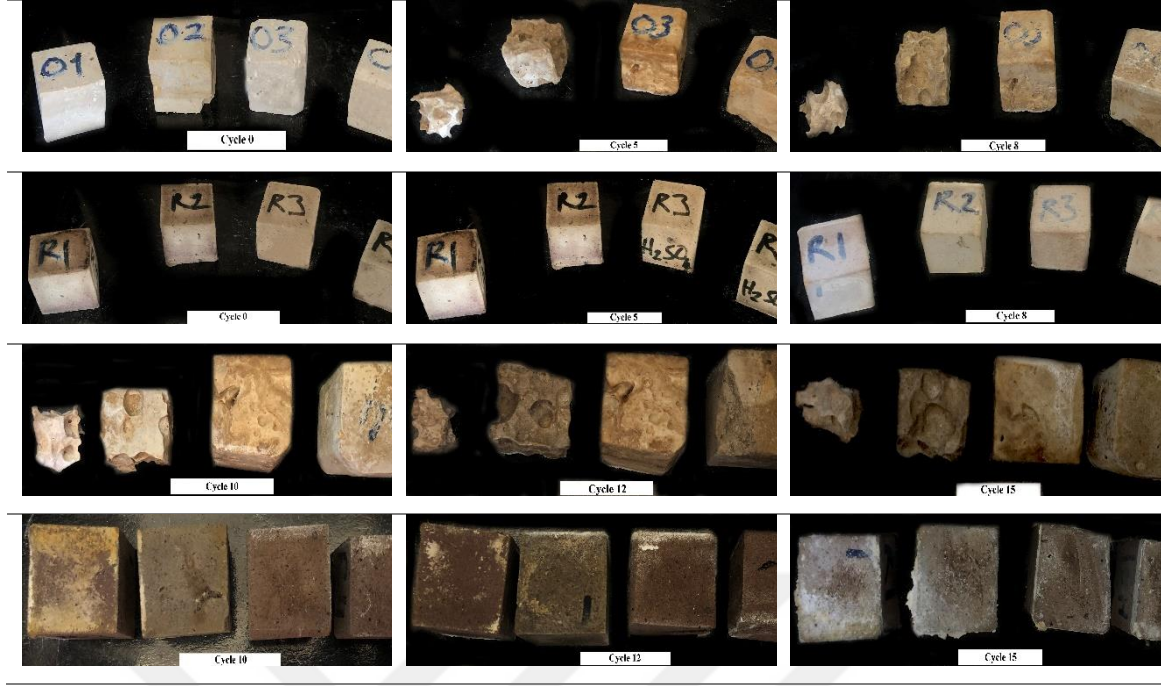
Şekil 3.17. 20 Döngü asitle maruziyet deneyi sonrası tek eksenli basınç dayanımı değişimi

H₂SO₄ ve HCl ile maruziyet sonrası meydana gelen görsel değişiklikler Şekil 3.18'de gösterilmiştir. H₂SO₄ ile maruziyet sonrası, OS örnekleri incelendiğinde, mikro yapısal çatlaklar, az miktarda

malzeme kaybı ve numune renginde bozulmalar açıkça gözlenmiştir. H_2SO_4 ile maruziyet sonrası RS numuneleri incelendiğinde, küçük gözenekler, malzeme kaybı ve numunenin yüzey renginde belirgin bozulmalar gözlenmiştir. HCl ile maruziyet sonrası OS numuneleri incelendiğinde, bazı numunelerde büyük miktarda malzeme kaybı gözlenmiştir. Ek olarak, büyük boyutlu gözenekler, mikro yapısal çatlaklar ve numunenin yüzey renginde bozulmalar görülmüştür. HCl ile maruziyet sonrası RS numuneleri incelendiğinde, az miktarda malzeme kaybı, küçük gözenekler ve numunenin yüzey renginde bozulmalar gözlenmiştir. Ayrıca, diğer numunelerden farklı olarak 12. döngüden sonra numunelerin yüzeylerinde tuz kristalleri meydana geldiği görülmüştür.



a) H_2SO_4 ile maruziyet

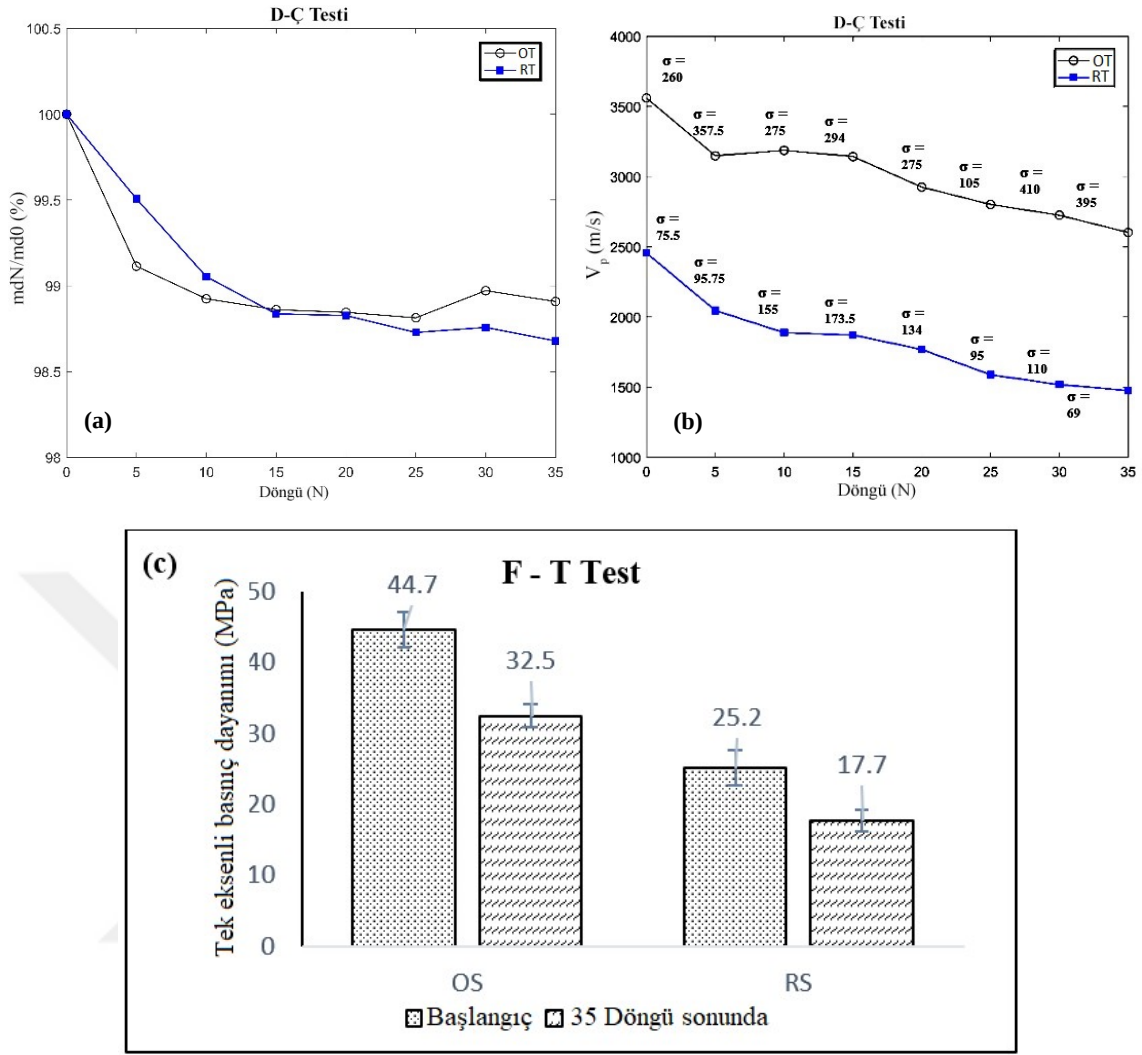


b) HCl ile maruziyet

Şekil 3.18. Asitle maruziyet altında OT ve RT’ de meydana gelen görsel değişimler

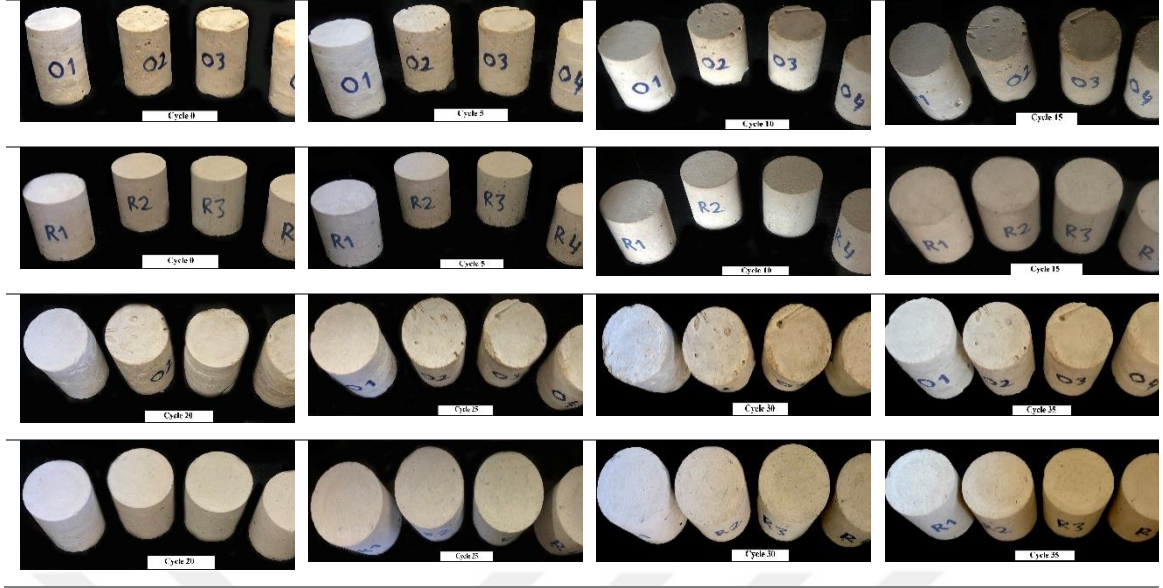
Donma-Çözülme (D-Ç) Deney Sonuçları

Donma-çözülme olayı, tarihi yapılarda önemli bozulma nedenlerinden biridir. Soğuk mevsimlerde taşlardaki bozulmanın büyük çoğunluğu genellikle donma-çözülme döngülerinden kaynaklanır. Taşların gözeneklerinin içindeki su, sıcaklık $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğünde donmaya başlar ve başlangıç hacminin yaklaşık %9'u kadar genişler [12]. Şekil 3.19a'da görüldüğü gibi, 35 döngü D-Ç testinden sonra, OT ve RT numunelerinin ağırlığı sırasıyla %1.09 ve %1.32 azalmıştır. P dalga hızının değişimi Şekil 3.19b'de verilmiştir. Şekil 3.19b'ye göre, OT örneklerinin P dalga hızı %26.9 azalırken, RT örneklerinin P dalga hızı % 39.91 azalmıştır. 35 Döngü D-Ç testinden sonra OT ve RT örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, her iki numune gurubu için de tek eksenli basınç dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır. 35 Döngü D-Ç deneyi sonrası tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 3.19c' de gösterilmiştir. Şekil 3.19c'ye göre, 35 döngü D-Ç deneyi sonunda, OT'nin tek eksenli basınç dayanımında %27.3 ve RT'nin tek eksenli basınç dayanımında %29.76 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.19. Donma-çözülme etkisi altında OT ve RT numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri a) Ağırlık kaybı b) P dalga hızı değişimi c) 35 döngü D-Ç deneyi sonunda tek eksenli basınç dayanımı

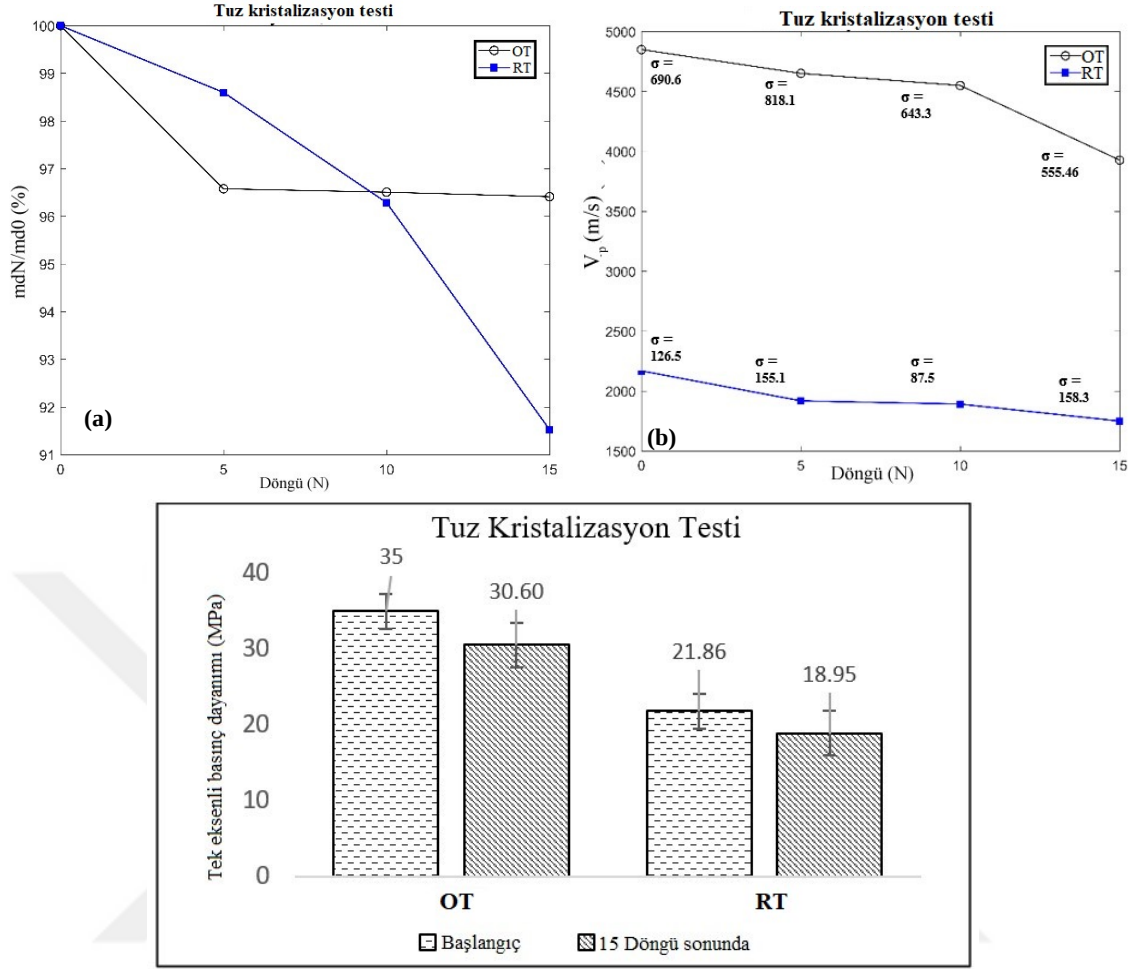
Her 5 döngü sonunda OT ve RT örneklerinin görsel değişimi Şekil 3.20’de verilmiştir. OT ve RT örneklerinin her birinde az miktarda malzeme kaybı, kenarlarında deformasyonlar ve mikro yapısal çatlaklar gözlenmiştir. Her iki numune grubu için 35 döngü sonunda az miktarda renk değişikliği gözlenmiştir. RT numunelerinde meydana gelen renk değişimi, OT numunelerinde meydana gelen renk değişiminden daha fazla olmuştur. Ayrıca, RT örneklerinde pürüzlülük ve parlaklık kaybı gözlenmiştir.



Şekil 3.20. D-Ç etkisi altında OT ve RT numunelerinde meydana gelen görsel değişimler

Tuz Kristalizasyon Deney Sonuçları

Tuz kristalleşmesi direncinin belirlenmesi amacıyla tuz kristalizasyon deneyi yapılmaktadır. Deney esnasında, her 5 döngü sonunda ağırlık kaybı, ultrasonik ses hızı (UPV) ve görsel değişiklikler kaydedilmiştir. Ayrıca, 15 döngü sonunda numunelerin tek eksenli basınç dayanımları kaydedilmiştir. Şekil 3.21a’da görüldüğü gibi, 15 döngünün sonunda, OT ve RT örneklerinin ağırlıkları sırasıyla %4.03 ve % 10.56 oranında azalmıştır. Özellikle, 10. döngüden sonra RT’ nin ağırlık kaybı artan bir eğilim göstermiştir. P dalga hızının değişimi Şekil 3.21b’de verilmiştir. Şekil 3.21b’ye göre, OT örneklerinin P dalga hızı %32.86 azalırken, RT örneklerinin P dalga hızı %34.16 azalmıştır. Ağırlık kaybı ve UPV sonuçlarına göre, OT numuneleri tuz kristalleşmesine karşı daha dirençlidir. Tuz kristalleşme basıncı, yapı taşının kohezyon sınırını aşarsa, ağırlık kaybı ortaya çıkmaktadır [12]. Tuz kristalizasyon testinin 15. döngüsünden sonra OT ve RT numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, tek eksenli basınç dayanımının her iki numune grubu için de azaldığı söylenebilir. 15. döngü sonunda elde edilen tek eksenli basınç dayanımı sonuçları Şekil 3.21c’ de sunulmuştur. Şekil 3.21c’ye göre, OT’ nin tek eksenli basınç dayanımında %12.57 ve RT’ nin tek eksenli basınç dayanımında %13.32 azalma meydana gelmiştir.



Şekil 3.21. Tuz Kristalleşme etkisi altında OT ve RT numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri a) ağırlık kaybı b) P dalga hızı değişimi c) 15 döngü tuz kristalizasyon deneyi sonunda tek eksenli basınç dayanımı

Her 3 döngü sonunda OT ve RT numunelerinin görsel değişimi kaydedilmiş ve Şekil 3.22’de verilmiştir. Hem OT hem de RT numunelerinin kenarlarında bozulma, az miktarda malzeme kaybı, küçük boyutlu gözenekler ve mikro yapısal çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Ek olarak hem OT hem de RT numunelerinde yüzey renginde bozulma gözlenmiştir, ancak RT numunelerinin renk değişimi OT numunelerinden daha fazla olarak kaydedilmiştir. RT numunelerinin yüzeyinde, 8. döngüden sonra tuz kristallerinin oluşumu gözlenmiştir. Şekil 3.22 incelendiğinde, RT örnekleri OT örneklerinden daha hızlı parçalanmaya başlamıştır.

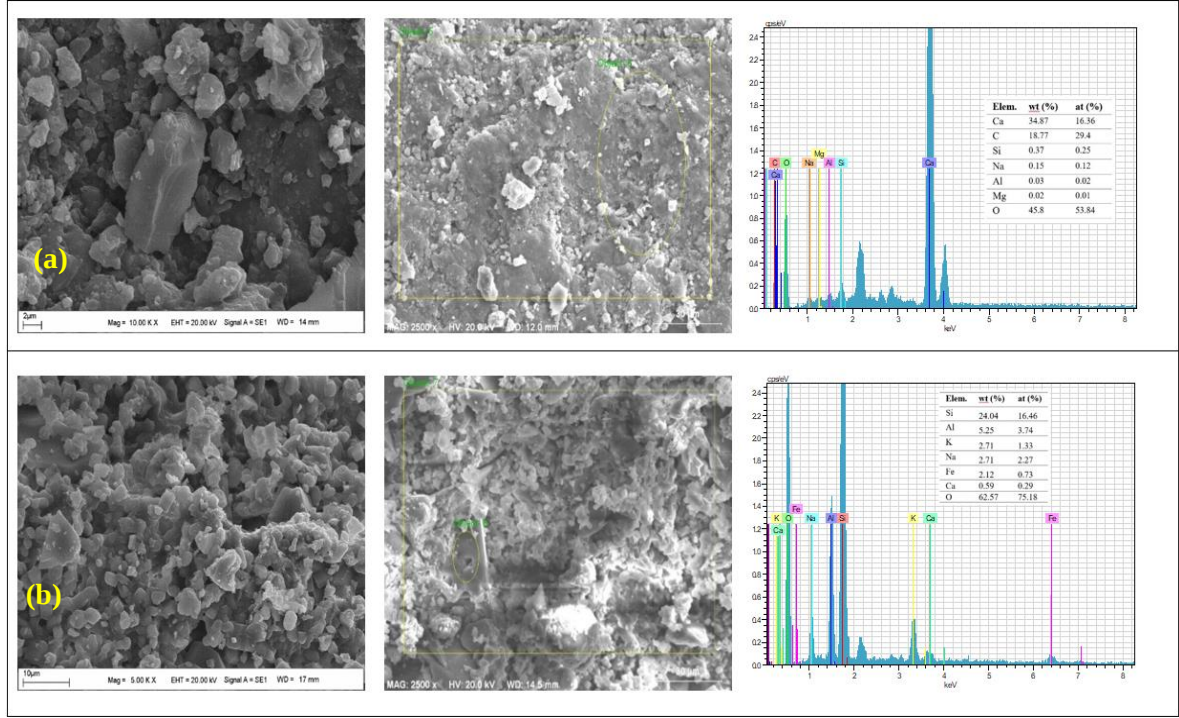


Şekil 3.22. Tuz Kristalizasyon etkisi altında OT ve RT numunelerinde meydana gelen görsel değişimler

Mikro Yapı Analizleri

OT ve RT numunelerinin yapısal morfolojisini ve mikro yapısını belirlemek, taşları meydana getiren mineralleri tanımlamak, boşlukları ve ayrışma durumunu tespit etmek için SEM-EDAX incelemesi yapılmıştır. Ayrıca, OT ve RT örneklerinin mineral bileşiminin tanımlanması için XRD tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle ilgili ayrıntılı bilgi ve temel ilkeler [65], [66], [67] çalışmalarında sunulmuştur.

SEM analizinde, incelenen numunenin düzensiz morfolojisi ve mikro gözenekliliklerini tespit etmek mümkündür. Şekil 3.23’de OT ve RT numunelerinin SEM görüntüleri ve EDAX sonuçları verilmiştir. Bu SEM-EDAX incelemesi sonucu elde edilen sonuçlar, XRD analizlerinden elde edilen sonuçlar ile tutarlılık göstermektedir. Şekil 3.23 incelendiğinde, OT için karbon ve kalsiyum fazlarının oldukça baskın olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar XRD analizinde de elde edilmiştir. Ayrıca boşluk yapıları incelendiğinde RT’ nin daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve bu nedenle daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu mekanik deneylerle ortaya konulmuştur.

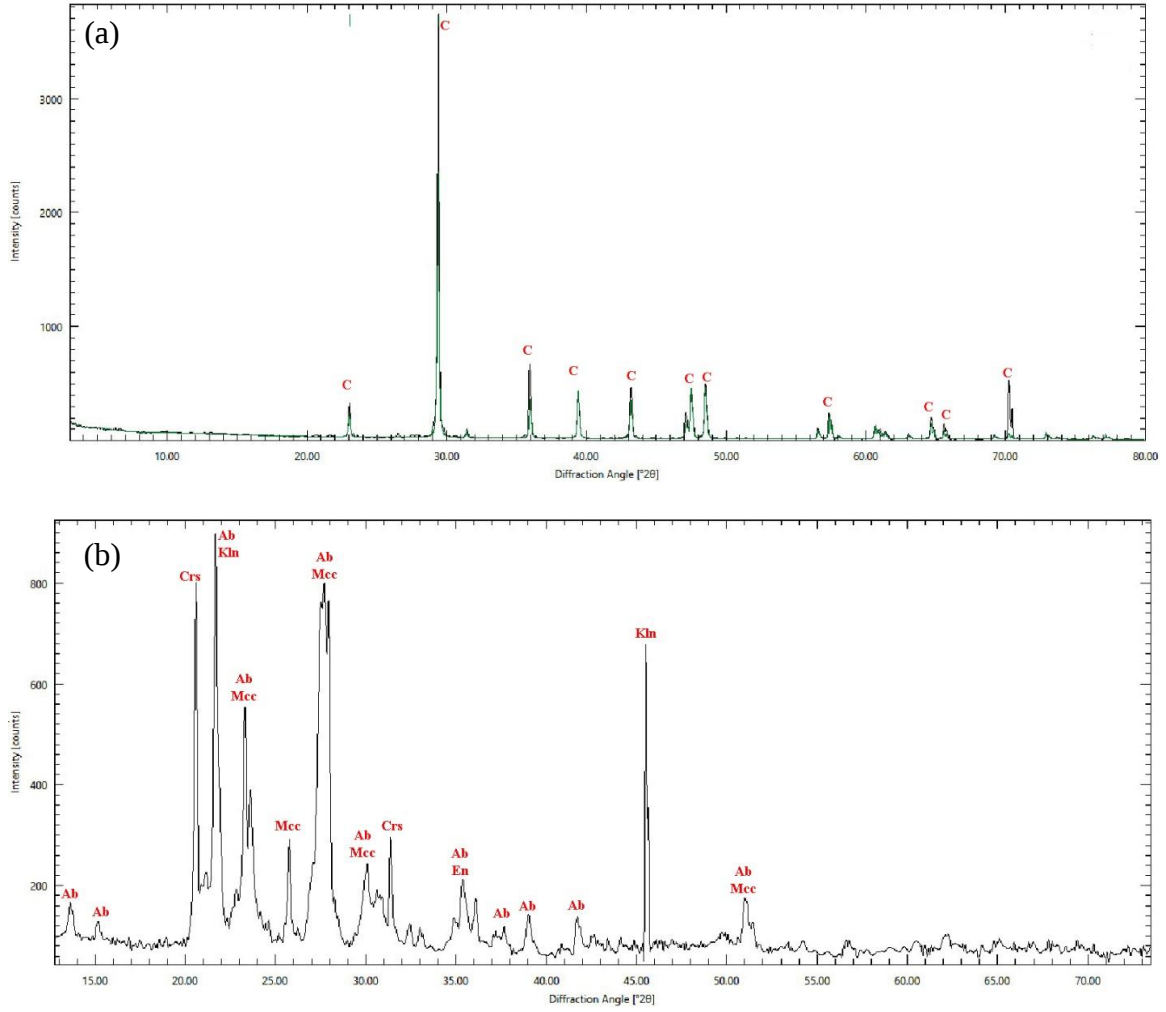


Şekil 3.23. SEM görüntüleri ve EDAX sonuçları a) OT b) RT

Tarihi Malatya Taşoran Kilisesi'nden alınan OT ve RT numunelerinin mineral birleşimlerinin elde edilmesinde XRD analizinden yararlanılmıştır. XRD analizlerinde Rigaku Miniflex 600 difraktometre kullanılmıştır. Majör ve minör mineralojik fazlar, XRD desenleri ve ilgili yarı kantitatif test ile elde edilmiştir. OT ve RT'nin mineral bileşimleri Tablo 3.5'te özetlenmiştir. Ek olarak, OT ve RT örneklerinin XRD dalga boyları Şekil 3.24'te görülebilir. XRD analiz sonuçları ile ilgili olarak, OT numuneleri baskın olarak az miktarda alçıtaşı fazı ile kalsit fazı içerir. RT numuneleri ise büyük miktarda Albit ve daha az miktarda Mikroklin, Kaolinit, Kristobalit ve Enstatit içerir. OT ve RT numuneleri, XRD sonuçlarına göre farklı mineral bileşimlerine sahiptir.

Tablo 3.5. OT ve RT numunelerinin mineral bileşimi

OT - %	RT - %
Kalsit (C) - 88	Albit (Ab) - 56
Alçıtaşı - 4	Mikrolin (Mcc) ($KAlSi_3O_8$) - 13
Kızdırma kaybı (LOI) -8	Kaolin (Kln) - 12
	Kristobalit (Crs) - 5
	Enstatit (En) - 8
	Kızdırma kaybı (LOI) - 6

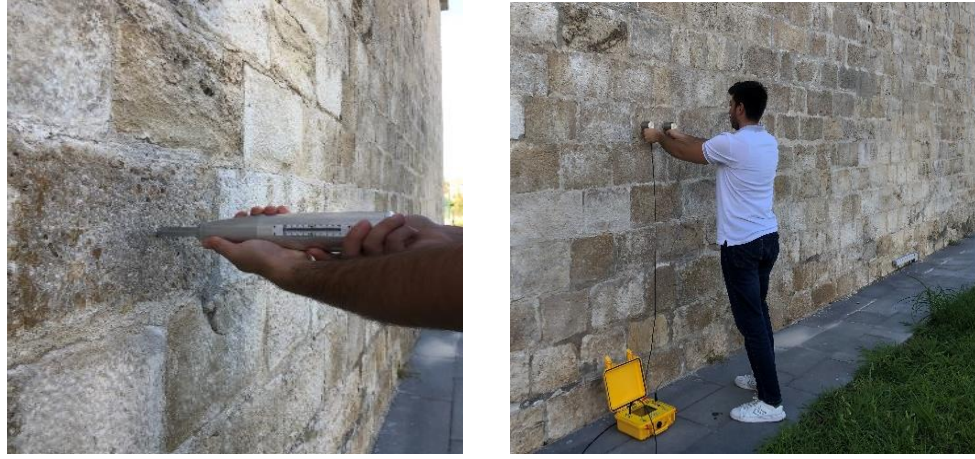


Şekil 3.24. OT ve RT numunelerinin XRD desenleri a) OT örnekleri b) RT örnekleri (C: Kalsit, Ab: Albit, Crs: Kristobalit, Kln: Kaolinit, Mcc: Mikroklin, En: Enstatit)

3.3.2. Tahribatsız Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özellikleri

Schmidt Sertlik Çekici Deney Sonuçları

Schmidt çekici, tarihi yığma yapıları yerinde incelenmesinde kullanılan düşük maliyetli ve kullanımı kolay bir deney yöntemidir [7], [68], [69]. Bu tez çalışmasında, Tarihi Taşhoran Kilisesinin duvarlarında kullanılan taşların yüzey sertliğini belirlemek için N tipi (Kaya tipi) Schmidt Çekici kullanılmıştır (Şekil 3.25). Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesi'nin altı farklı noktasında Schmidt Çekici deneyi yapılmıştır (Şekil 3.26). Yapı taşlarının basınç dayanımını Schmidt çekici sonuçlarını kullanarak hesaplamak için Büyüksağış ve Göktan [70] tarafından önerilen şema kullanılmıştır. İncelenen Kilisenin altı farklı konumuna ait ortalama Schmidt geri tepme değerleri Tablo 3.6'da sunulmuştur.

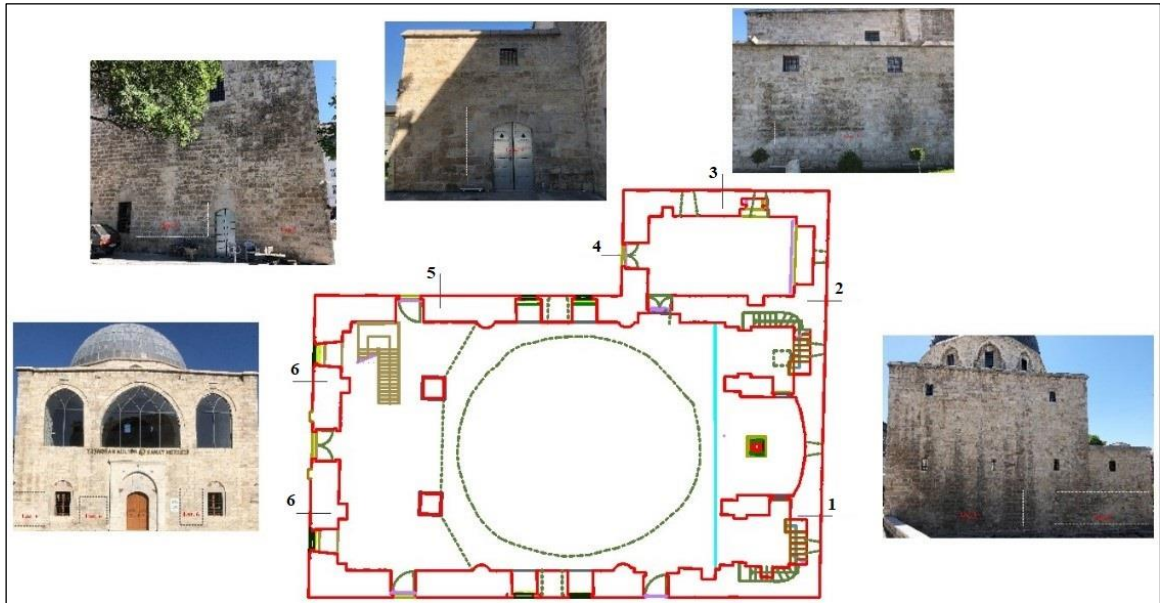


Şekil 3.25. Yerde Schmidt çekici ve Ultrasonik ses hızı (UPV) deneyi

Tablo 3.6. Duvarların ortalama Ultrasonik ses hızları ve Schmidt sertlik değerleri

Konum	1	2	3	4	5	6	Harç
Ortalama R	39	43	43	28	42	41	11
Ortalama Vp (m/s)	3390	3100	3350	2300	3210	3660	-
Ortalama Vs (m/s)	1885	1722	1861	1483	1783	2033	-

*R: Schmidt geri tepme değeri, Vp: P dalga hızı, Vs: Kayma dalga hızı



Şekil 3.26. Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesi'nin yerinde testlerde dikkate alınan lokasyonları

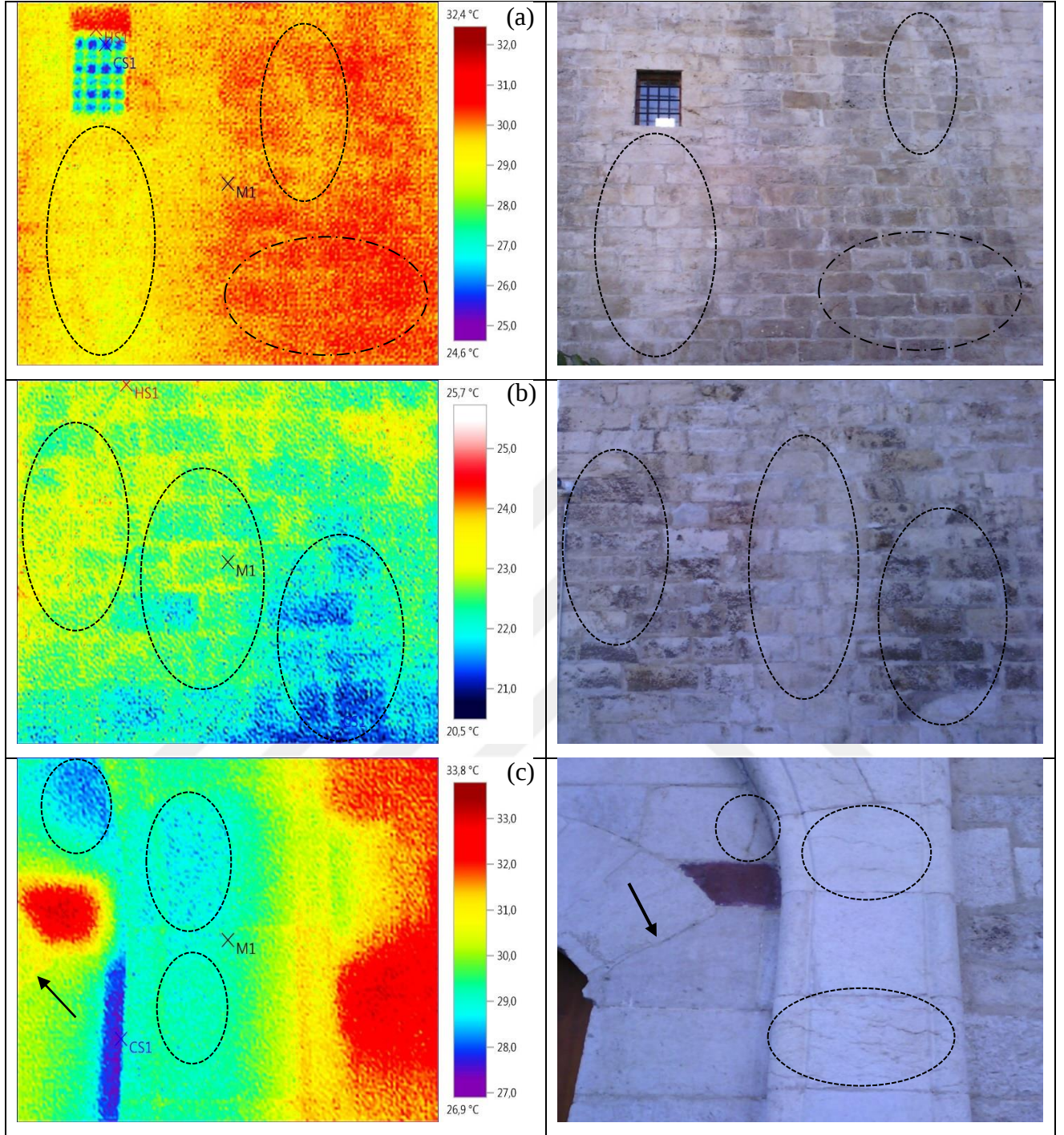
Ultrasonik Ses Hızı Deneyi (UPV)

Bu bölümde Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesi duvarlarının ultrasonik ses hızları ölçülmüştür. UPV testinde James Instruments V-Meter MK IV™ ultrasonik ses cihazı kullanıldı (Şekil 3.25). Yerinde yapılan UPV testinde dolaylı ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçülen ortalama S ve P hızları Tablo 3.6'da verilmiştir. Ayrıca, ölçüm lokasyonları Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Yapılan görsel incelemelere göre 4. lokasyonda RT, diğer lokasyonlarda ise OT kullanılmıştır. Bu nedenle, 4. lokasyon için ölçülen V_p değerleri diğer lokasyonların V_p değerlerinden daha düşük olarak elde edilmiştir. Ayrıca, orijinal taşların yüzeyleri pürüzlüdür. Bu nedenle, orijinal taşlardan alınan karot numunelerinin ortalama V_p değerleri, yerinde testlerden elde edilen V_p değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Orijinal taşlardan alınan karot örneklerinin ortalama V_p değerleri 5200 m/s olarak elde edilmiştir. Restorasyon taşlarının yüzeyleri ise oldukça düzgündür. Bu nedenle, restorasyon taşlarından alınan karot numunelerinin ortalama V_p değerleri ile yerinde testten elde edilen ortalama V_p değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Restorasyon taşlarından alınan karot numunelerinin ortalama V_p değerleri ise 2100 m/s olarak elde edilmiştir.

İnfrared Termografi Deneyi (IRT)

İnfrared Termografi (IRT) testi, yapısal yüzeylerdeki kusurları tanımlayabilen popüler bir tahribatsız muayene tekniğidir [58]. Isı birikimi, çatlakların olduğu bölümlerin diğer bölümlerden ayrı görünmesini sağlar. Bu tez kapsamında yapılan İnfrared Termografi Deneyinde TESTO 868 marka termal kamera kullanılmıştır.

Termografik görüntüler 320 (yatay) ve 240 (dikey) piksel formatına sahiptir. Bu kameranın gürültü eşdeğeri sıcaklık farkı 80 mK'nın altındadır ve kullanılan optik lens 50 mm odak uzaklığına sahiptir. Şekil 3.27a ve 3.27b, duvardan 2 m mesafede kaydedilirken, Şekil 3.27c, duvardan 0.7 m mesafede kaydedilmiştir. Bir konumdan diğerine ölçüm mesafesi her zaman sabit tutulmuş ve kamera ile duvar arasındaki açı 90 derece olmuştur. Tarihi Malatya Taşhoran Kilisesi'nin duvar yüzeylerinde bazı deformasyonlar gözlenmiştir. Bu duvarların IRT görüntüleri Şekil 3.27'de sunulmuştur. Görsel incelemeler ve termal kamera görüntüleri karşılaştırılarak Şekil 3.27a ve Şekil 3.27b'de iyi durumda olan ve hasar görmüş bölümler açıkça ayrılmaktadır. Ayrıca, Şekil 3.27c'de ince ve büyük çatlaklar farklı renkte görülmektedir.



Şekil 3.27. Tarihi Malatya Taşoran Kilisesinin İnfrared Termografi görüntüleri

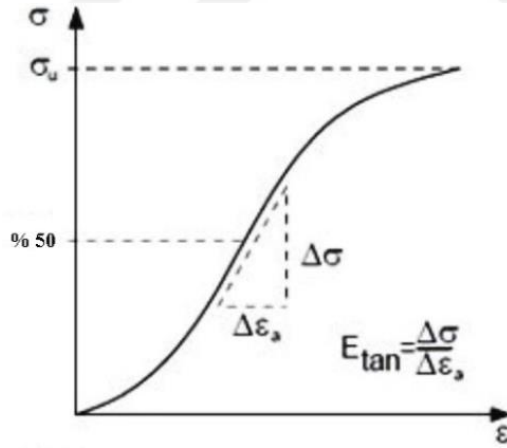
3.3.3. Tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerle Elde Edilen Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, tahribatsız ve tahribatlı yöntemler ile elde edilen OT ve RT'nin elastik malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır. Tahribatlı deney yöntemiyle, OT ve RT'nin ortalama tek eksenli basınç dayanımları sırasıyla, 44.7 MPa ve 25.2 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında elastisite modülü hesabında, tanjant elastisite modülü dikkate alınmıştır [62,63]. Tipik Tanjant

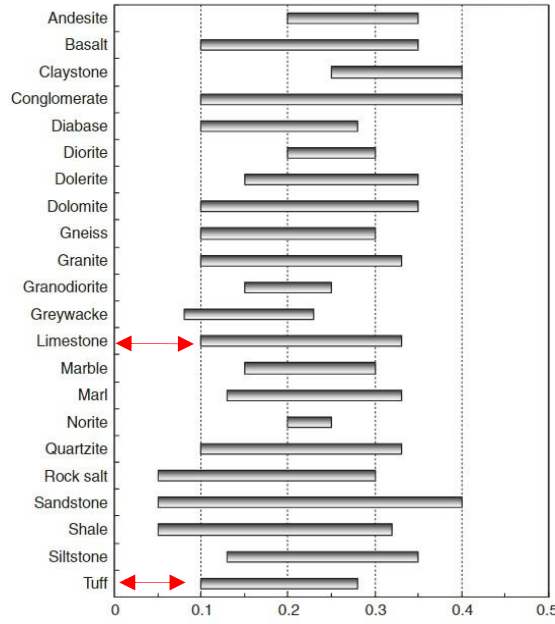
modülü hesabı Şekil 3.28’de gösterilmiştir. OT ve RT’nin tanjant elastisite modülleri, laboratuvar deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 3.14). OT ve RT’nin elastisite modülü sırasıyla 33000 MPa ve 8570 MPa olarak hesaplanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı hesaplanan numunelerin boyuna ve enine gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edildikten sonra OT ve RT numunelerinin, Poisson oranı hesaplanmıştır. Poisson oranı, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal olmaması nedeniyle teğet, ortalama ve sekant Poisson oranlarına bölünebilir [63]. Bu çalışmada sekant Poisson oranı dikkate alınmış ve Denklem (3.8) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\nu_{50} = \frac{\varepsilon_{d50}}{\varepsilon_{l50}} \quad (3.8)$$

Denklemde, ε_{d50} ve ε_{l50} , tek eksenli basınç dayanımının %50’sine eşit bir eksenel gerilime karşılık gelen enine ve boyuna şekil değiştirmelerdir. OT ve RT’ nin Poisson oranı, taş numunelerinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 3.14). OT ve RT’ nin sekant Poisson oranları sırasıyla 0.25 ve 0.20 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.29’da, çeşitli tipik kayalar için Poisson oranları verilmiştir [71]. Literatür taraması ve görsel gözleme dayalı olarak OT, traverten (kireçtaşı) ve RT volkanik tüf olarak sınıflandırılmıştır. OT ve RT için hesaplanan Poisson oranlarının, bazı kayaların tipik Poisson oranları ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 3.29).

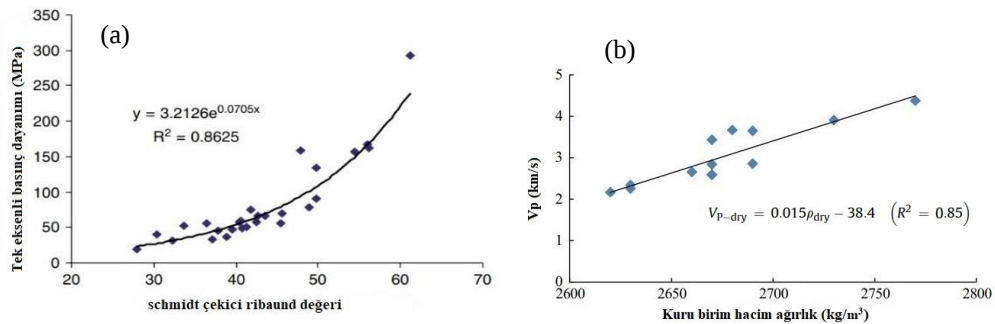


Şekil 3.28. Tipik Tanjant modülü hesabı



Şekil 3.29. Bazı kayaç türlerinin Poisson oranı aralıkları [71]

Schmidt çekici deneyi sonucu elde edilen tepme değerlerine göre 1,2,3,5 ve 6 numaralı lokasyonlarda aynı cins taş kullanıldığı sonucuna varılmıştır. OT ve RT' nin ortalama Schmidt tepme değerleri sırasıyla 42 ve 28 olarak elde edilmiştir. Büyüksağış ve Göktan [70]'ın önerdiği Schmidt geri tepme değeri ve tek eksenli basınç dayanımı ilişkisine göre OT ve RT'nin tek eksenli basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.30a'da Schmidt geri tepmesi ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki görülebilir. OT ve RT'nin tek eksenli basınç dayanımı sırasıyla 57.83 MPa ve 23.13 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, OT ve RT'nin kuru birim hacim ağırlığı, Chawre [72] tarafından önerilen ilişki kullanılarak hesaplanmıştır. P dalga hızı ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki Şekil 3.30b'de görülebilir.



Şekil 3.30. Tek eksenli basınç dayanımı ve kuru birim hacim ağırlığın belirlenmesi için önerilen ilişkiler a) Tek eksenli basınç dayanımı ile Schmidt geri tepmesi arasındaki ilişki [70] b) P dalga hızı ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki [72]

Yerinde yapılan ultrases hızı deney sonuçlarına göre, 1,2,3,5 ve 6 nolu lokasyonları aynı cins taş kullanılarak inşa edilmiştir. 1,2,3,5 ve 6 nolu lokasyonlarda elde edilen ortalama v_p değeri 3342 m/s ve 4 nolu lokasyonda ölçülen ortalama v_p değeri ise 2340 m/s olarak elde edilmiştir. 1,2,3,5 ve 6 nolu lokasyonlarda elde edilen v_s değeri 1856 m/s ve 4 nolu lokasyonda ölçülen ortalama v_s değeri ise 1483 m/s olarak bulunmuştur. Dinamik elastisite modülü hesabı, ASTM D2845-08 standardına göre yapılmıştır. ASTM D2845-08 [73]'e göre μ_{dyn} ve E_{dyn} göre sırasıyla Denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu_{dyn} = \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{[2(v_p^2 - v_s^2)]} \quad (3.9)$$

burada, v_s : s dalga hızı (m/s), v_p : p dalga hızı (m/s) ve μ : dinamik Poisson oranıdır. OT ve RT' nin dinamik Poisson oranı sırasıyla 0.27 ve 0.14 olarak hesaplanmıştır.

$$E_{dyn} = \frac{[\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)]}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3.10)$$

Burada, E: dinamik elastisite modülü (Pa) ve ρ : yoğunluk (kg/m³). OT ve RT'nin dinamik elastisite modülü sırasıyla 23930 MPa ve 9059 MPa olarak hesaplanmıştır. OT ve RT'ye ait Tahribatlı yöntemler ve tahribatsız yöntemlerle elde edilen malzeme özellikleri Tablo 3.7'de sunulmuştur. Tablo 3.7'ye göre tahribatlı yöntemler ve tahribatsız yöntemlerle elde edilen tek eksenli basınç dayanımı, ν , E ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle tarihi yapılarda, elastik malzeme özelliklerini belirlemek için tahribatsız test teknikleri de kullanılabilir.

Tablo 3.7. Tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile belirlenen OT ve RT' nin malzeme özellikleri

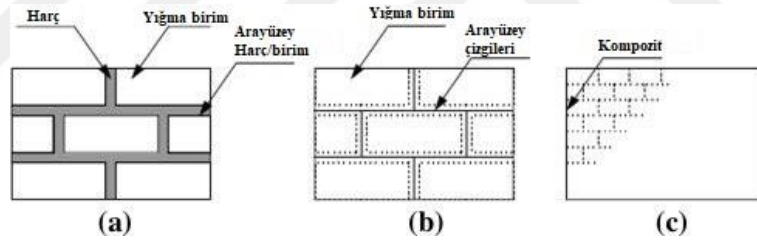
	Tahribatlı		Tahribatsız		Fark (%)	
	OT	RT	OT	RT	OT	RT
V _p (m/s)	5200	2100	3342	2340	36	12
V _s (m/s)	2888	1166	1856	1483	36	27
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	44.7	25.2	57.83	23.13	29	8
ν	0.25	0.22	0.27	0.14	8	29
E (MPa)	33000	8570	23930	9059	27	6
Kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)	2.69	1.52	2.72	2.6	1.11	71

4. YIĞMA YAPILARIN SONLU ELEMANLAR METODUYLA ANALİZİ

Bu bölümde tarihi yığma yapıların modellenmesinde kullanılan sonlu elemanlar metodu (SEM) anlatılmıştır. Bu kapsamda tez boyunca yapılacak olan lineer olmayan analizler, malzeme modelleri, kullanılan elemanlar hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Ayrıca zemin ortamının sınırlarının modellenmesinde dikkate alınacak teknikler incelenecektir.

4.1. Yığma Yapıların Modelleme Teknikleri

Tarihi yığma yapıların modellenmesi son yıllarda popüler olan konulardan biridir. Hem yeni yapılacak olan yığma yapı tasarımlarında hem de mevcut yapıların davranışlarının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tarihi yığma yapılar için üç ayrı modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler, ayrıntılı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme teknikleri olarak adlandırılmaktadır. Bu modelleme tekniklerinin şematik görünüm Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yığma yapılar için modelleme teknikleri (a) Detaylı mikro modelleme (b) Basitleştirilmiş mikro modelleme (c) Makro modelleme [74]

Detaylı mikro modelleme yönteminde, yığma birim ve harç ayrı ayrı modellenerek yapı meydana getirilir. Bu yöntem çok fazla bilgisayar işlem gücü gerektirdiğinden büyük ölçekli yapıların modellenmesi için tercih edilmez [74], [75], [76].

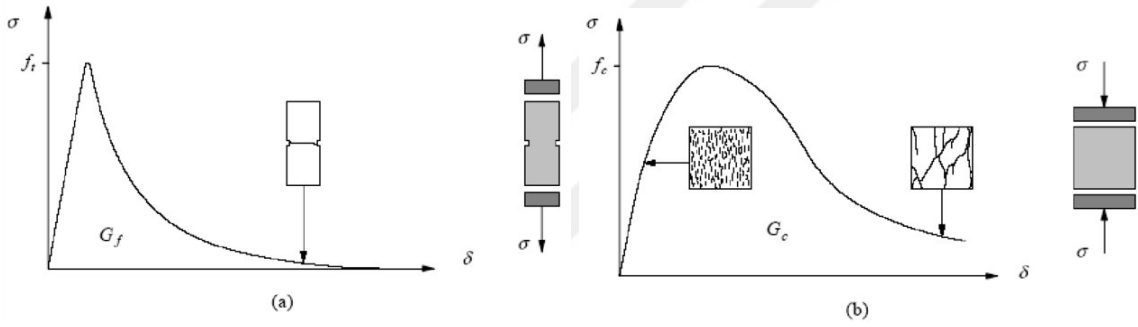
Basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminde yığma birimlerin boyutları, aradaki harç mesafesinin yarısı kadar genişletilir. Bu durumda harç tabakası ihmal edilmiş olur, yığma birimler ara yüzey çizgileri ile birleştirilir. Yığma yapı sisteminde oluşacak olan bozulmalar (çatlaklar, kaymalar) bu ara yüzey vasıtasıyla modellenmiş olurlar [74], [77].

Makro modelleme yöntemi, başlangıçta yığma kemer, kubbe, cephe duvarlarının davranışını analiz etmek için kullanılırken, daha sonraları kilise, çan kulesi, cami, köprü gibi farklı karmaşıklıkta yapı türlerinde uygulamaları literatürde görülmektedir [78], [79], [80], [81], [82], [83]. Makro modelleme yöntemi, detaylı ve basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımlarına göre çok daha az

bilgisayar işlem gücü gerektirir. Bu yöntemde yığma birimler ve harç tek bir kompozit malzeme olarak kabul edilmektedir. Yani yığma birimi ve harcın malzeme özelliklerini tek bir malzeme gibi temsil eden eşdeğer bir malzeme özelliği kullanılarak modellenmektedir [74], [84].

4.2. Lineer Olmayan Malzeme Modelleri

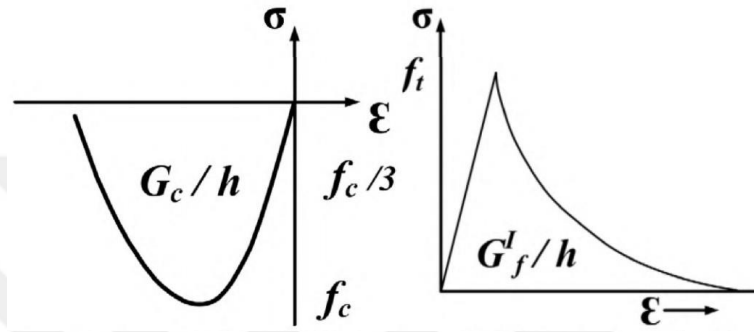
Tarihi yığma yapılar, düşük yük seviyelerinde (ölü yükü) doğrusal davranış gösterirken, yapıya etkiyen yükün belirli bir seviyeyi aşması durumunda, yapı malzemeleri lineer olmayan davranış sergileyebilmektedir. Deprem etkisi tarihi yapılarda çekme kuvvetlerine neden olduğu için yapı malzemelerinde lineer olmayan davranışlar meydana gelir. Taş gibi gevrek malzemelerin basınç ve çekme altında karakteristik gerilme-şekil değiştirme davranışları Şekil 4.2’ de verilmiştir. Bu nedenle tarihi yapıların deprem etkisi altında analizini gerçekleştirirken lineer olmayan malzeme modellerinin kullanılması gerekmektedir [85].



Şekil 4.2. Tek eksenli yükleme altında yarı kırılğan malzemelerin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri a) Çekme kuvveti altında davranış b) Basınç kuvveti altında davranış [74], [86]

Farklı sonlu elemanlar yazılımlarında yığma yapılar için farklı lineer olmayan malzeme modelleri mevcuttur. Bu tez kapsamında yapılan sonlu eleman analizlerinde DIANA FEA yazılımı kullanılmıştır. DIANA FEA yazılımında yığma yapıların modellemesinde en çok kullanılan malzeme modeli Total Strain-Based Crack (Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak) modelidir. Ayrıca tez çalışması kapsamında yapı-zemin etkileşimi de dikkate alındığından zemin ortamının da sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Toplam şekil değiştirme bazlı çatlak modeli esas olarak, Vecchio vd. [87] tarafından önerilen değiştirilmiş sıkıştırma alanı teorisi doğrultusunda geliştirilmiştir. Bu yöntemde, çatlamayı bir yön doğrultusunda dağıtılmış bir etki olarak kabul eder ve çatlamış malzeme, anizotropik özelliklere sahip sürekli bir ortam olarak simüle edilir [88]. DIANA FEA’ da yer alan toplam şekil değiştirme bazlı çatlak modeli, belirli bir malzemenin hem çekme hem de basınç kuvveti altında davranışını tek bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile tanımlamıştır. Çekme davranışındaki bu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, sabit, doğrusal, üstel ve kırılğan olmak üzere birkaç farklı yaklaşım kullanılarak idealleştirilebilir. Bu tez çalışması

boyunca yapılacak analizlerde çekme davranışı için üstel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılacaktır (Şekil 4.3). Toplam şekil değiştirme bazlı çatlak modelinde, basınç altında davranışı idealize etmek için, elastik, sabit ve parabolik gibi farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu çalışmada parabolik yaklaşım dikkate alınacaktır (Şekil 4.3) [89]. Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak modelinde gerekli parametreler: yoğunluk (p), Elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), basınç dayanımı (f_c), basınç altında kırılma enerjisi (G_c), çekme dayanımı (f_t) ve mod-1 kırılma enerjisi (G_f)' dir.

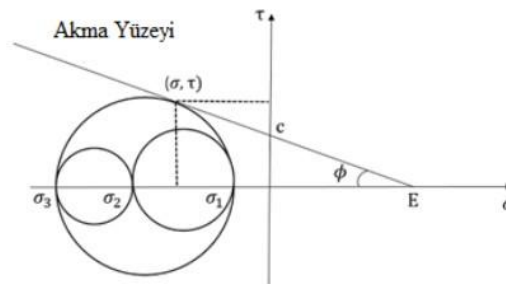


Şekil 4.3. Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak modelinde basınç ve çekme tipik altındaki davranış

Zemin ortamının lineer olmayan davranışını dikkate alabilmek için geçmiş çalışmalarda [20], [27], [28] önerilen Mohr-Coloumb malzeme modeli kullanılmıştır. Mohr-Coulomb Akma Kriteri, malzemenin akma veya kırılma mukavemetini belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Bu kriter, kayma gerilmesini temel alır ve bu gerilmenin etkilediği yüzeydeki normal gerilmeleri içsel sürtünme ile birlikte hesaba katar. Mohr-Coloumb akma kriterinde kayma mukavemeti Denklem (4.1)' de verilmiştir.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.1)$$

Denklemden yer alan, τ kayma mukavemeti, c kohezyon, σ kayma düzlemine dik olarak etkiyen gerilme ve ϕ içsel sürtünme açısıdır. Mohr-Coloumb akma yüzeyi Şekil 4.4' te verilmiştir.



Şekil 4.4. Mohr-Coloumb akma kriteri

Mohr daireleri, asal gerilmelerle ilişkili olarak çizilir. Bu dairelerden biri, akma yüzeyine teğet olduğunda incelenen malzemede akma başlar. Şekil 4.4'e göre, akma nedeniyle oluşan normal ve kayma gerilmeleri, Denklem (4.2) ve Denklem (4.3) tarafından ifade edilmektedir.

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos\theta \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin\theta \quad (4.3)$$

Eğer Denklem (4.2) ve Denklem (4.3), Denklem (4.1)'de verilen akma fonksiyonuna yerine yazılırsa, genel akma fonksiyonunu elde etmek üzere Denklem (4.4) elde edilir.

$$f(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin\theta - 2\cos\theta \quad (4.4)$$

4.3. Sonlu Elemanlar Modeli İçin Malzeme Özellikleri

Bu tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında, makro modelleme yaklaşımı dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımda harç ve taş tek bir malzeme olarak temsil edilir. Tarihi Taşhoran Kilisesinin taş ve harç örnekleri üzerinde yapılan tahribatlı ve tahribatsız deneyler ve deney sonuçları 3. bölümde detaylı bir şekilde sunulmuştur. Ancak kompozit malzeme özelliklerinin elde edilmesi için çeşitli çalışmalarda ve standartlarda önerilen ampirik formüller kullanılmaktadır [90].

4.3.1. Yığma Birim Malzeme Özellikleri

Yığma birimlerin, basınç dayanımının elde edilmesinde, harç ve taşın basınç dayanımlarının kullanıldığı, Proske ve Gelder [91] tarafından önerilen Denklem (4.5) kullanılmıştır.

$$f_{c,yığma} = a f_{c,taş}^b f_{c,harç}^c \quad (4.5)$$

Burada $f_{c,yığma}$, homojenize yığma biriminin basınç dayanımı, a, yığma biriminin sınıflandırma katsayısı, b ve c, sırasıyla taş / tuğla ve harcın hacimsel oranına bağlı olarak katsayılarıdır. Bu katsayılar Denklem (4.5) cinsinden Ril 805 [92]'de önerildiği gibi Denklem (4.6)'da verilmiştir. Ayrıca yığma birimin çekme dayanımı geçmişteki çalışmalarda önerildiği gibi basınç dayanımının 1/10'u oranında dikkate alınmıştır [7], [25], [90], [93].

$$f_{c,yığma} = 0.6 f_{c,taş}^{0.60} f_{c,harç}^{0.20} \quad (4.6)$$

Yığma birimlerin poisson oranı ve yoğunluğu Ersoy [94]'de önerilen Denklem (4.7a ve 4.7b) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\gamma_{yığma} = \gamma_{taş} \cdot V_{taş} + \gamma_{harç} \cdot V_{harç} \quad (4.7a)$$

$$v_{yığma} = v_{taş} \cdot V_{taş} + v_{harç} \cdot V_{harç} \quad (4.7b)$$

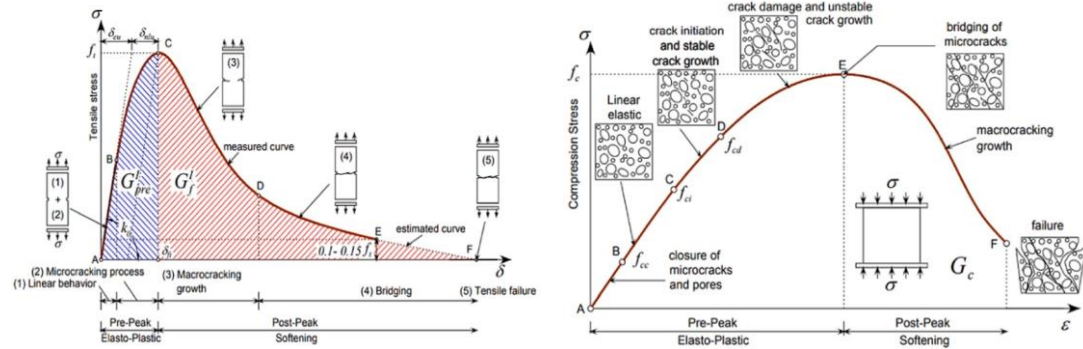
Burada, $V_{taş}$ ve $V_{harç}$ sırasıyla taş ve harcın hacimsel oranıdır. Yığma birimin elastisite modülü EN 1996-1-1'de önerildiği gibi, $E_{yığma} = 1000 \cdot f_c$ olarak alınmıştır [95]. Yığma birime ait malzeme özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur. Yapıda iki farklı taş cinsi kullanıldığı için 3. bölümde elde edilen malzeme özellikleri de dikkate alınarak orijinal taş ve restorasyon taşı için yığma birim özellikleri ayrı ayrı sunulmuştur. Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak modelinde lineer olmayan davranış, kırılma enerjisi yayılım kriterleri G_f ve G_c 'ye göre tanımlanmıştır. Kırılma enerjisi yayılım kriterine göre, basınç ve çekme gerilmesi davranışları Şekil 4.5'te verilmiştir [96]. Kırılma enerjisinin hem çekmede hem de basınçta tanımlanması, sırasıyla Denklem (4.8a ve 4.8b) de verilmiştir [97].

$$G_f = 0.025 \cdot (2 \cdot f_t)^{0.7} \quad (4.8a)$$

$$G_c = d f_m \quad (4.8b)$$

f_t ve f_m , sırasıyla yığma birimin çekme ve basınç dayanımıdır. d parametresi süneklik indeksini temsil etmektedir ve Denklem (4.9)'a göre tanımlanmıştır. Düşük mukavemetli malzemeler için 2.62 mm olarak önerilmiştir [89].

$$d = 2.8 - (0.1 \cdot f_m) \quad (4.9)$$



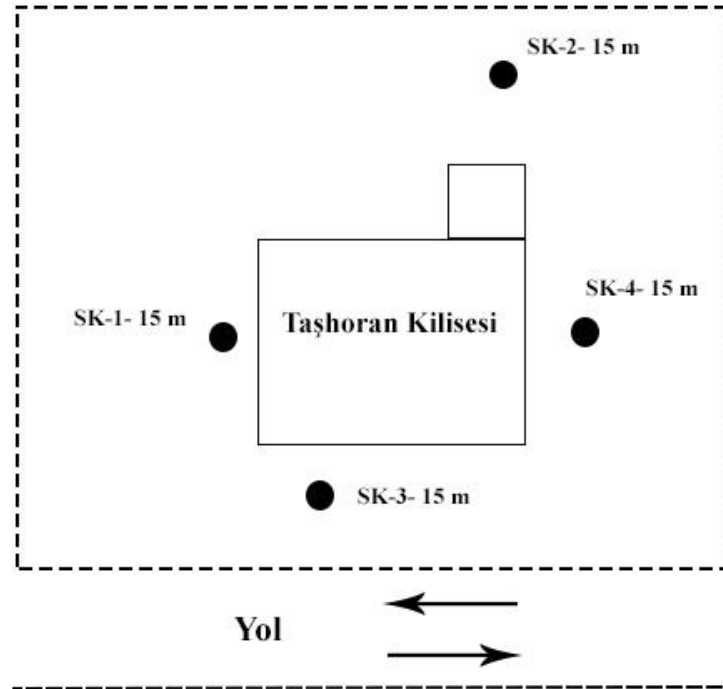
Şekil 4.5. Kırılma Enerjisi Yayılım Kriterlerine Göre Çekme ve Basınç Altında Davranış

Tablo 4.1. Yığma Birim Malzeme Özellikleri

Malzeme Özellikleri	Orijinal Taş Duvar	Restorasyon Taşı Duvar
E (MPa)	6500	4900
f_c (MPa)	6.5	4.9
f_t (MPa)	0.65	0.49
$\gamma_{yığma}$ (g/cm ³)	2.65	1.6
ν	0.24	0.20
Gc	17.03	12.84
Gf	0.030	0.0246

4.3.2. Zemin Ortamının Malzeme Özellikleri

Malatya Taşhoran Kilisesinin zemin özelliklerinin belirlenmesi için Delta Jeoteknik tarafından 2014 yılında zemin etüdü gerçekleştirilmiştir. Etüt alanı, suya doymun, az çakıllı kum, kil, silt ve tabanda marndan oluşmaktadır. Zemin ortamının jeolojisini belirlemek amacıyla kilisenin farklı noktalarında sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj çukurlarından, her biri 1.5 m’de bir alınan SPT örnekleri laboratuvar ortamında deneylere tabi tutulmuştur. 4 farklı noktadan 15 m derinlikte sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj lokasyonları Şekil 4.6’da görülmektedir.

**Şekil 4.6.** Sondaj Lokasyonları

Arazi ve laboratuvar çalışmaları neticesinde, yerel zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiştir. Zemin yatak katsayısı 2000 ton/m ve zemin emniyet gerilmesi 0.9kg/cm^2 olarak elde edilmiştir. Sondaj çalışmaları ve jeolojik veriler kıyaslandığında yapının üzerinde bulunduğu zemin düşük dayanımlı olarak düşünülebilir. Ayrıca saha çalışmaları kapsamında jeofizik yöntemlerden sismik yöntem kullanılmıştır.

Yer kabuğu elastik hız ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklere sahip farklı kayalardan oluşan tabakalardan meydana gelmiştir. Sismik yöntem, yeryüzünde bir enerji kaynağı ile oluşturulan (dinamit, ağırlık düşürme vb.) enerji sonucu açığa çıkan titreşimleri, enerjinin açığa çıktığı noktadan belirli noktalara yerleştirilmiş olan sismometreler (jeofon) ile kaydedildikten sonra elde edilecek sismogramlardan yeraltının jeolojik yapısını, değişik hesaplama yöntemleri ile ortaya çıkarma işlemidir. Arazi çalışmaları neticesinde, P dalga hızı, kayma dalgası hızı ve S dalga hızı profili elde edilmiştir. Zemin ortamına ait mekanik özellikler Tablo 4.2’de sunulmuştur. Kayma dalga hızlarının 30m derinliğe kadar ortalama değeri (V_{s30}), Kayma dalga hızı (V_s), boyuna dalga hızı (V_p) ve $\phi(^{\circ})$ içsel sürtünme açısıdır.

Tablo 4.2. Zemin Ortamının Mekanik Özellikleri

Kohezyon (MPa)	$\phi(^{\circ})$	$\gamma(\text{t/m}^3)$	E (MPa)	ν	V_{s30} (m/s)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
0.22	12	1.7	1000	0.20	386	450	825

5. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİNDE KULLANILAN YAKLAŞIMLAR

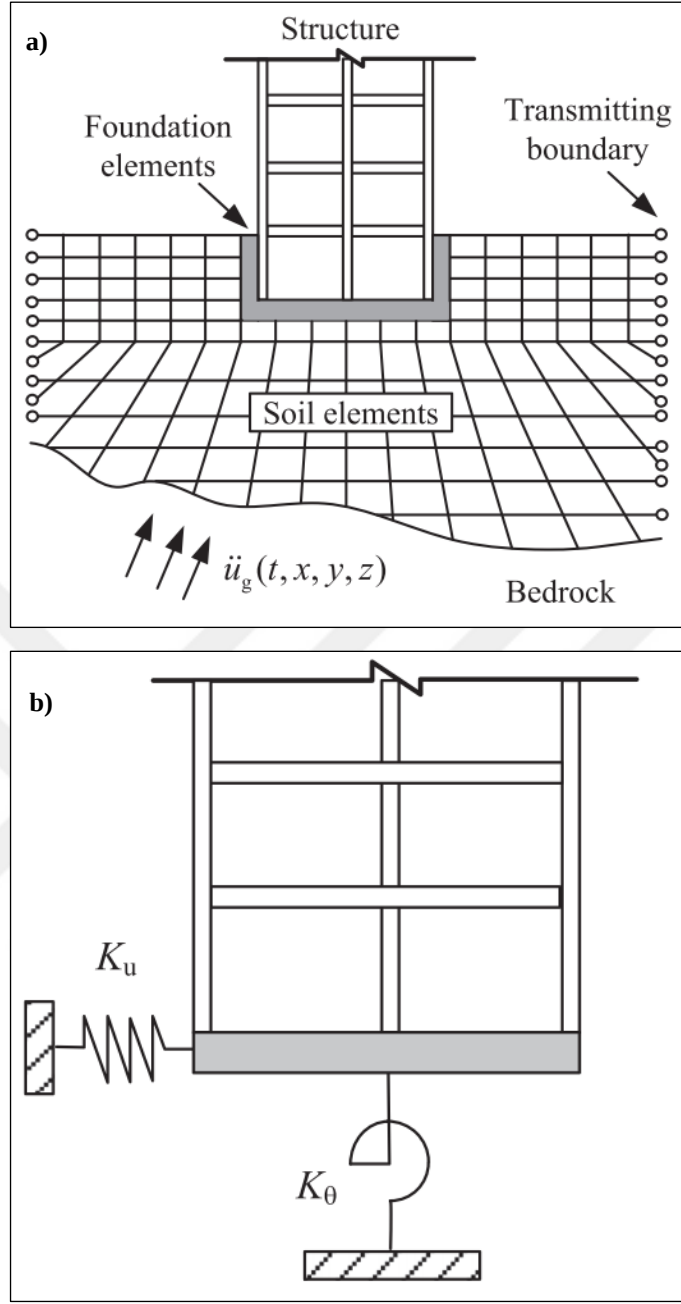
Tarihi yapıların deprem davranışlarının incelenmesinde son yıllarda yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmaya başlanmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalarda, yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde farklı modelleme yaklaşımları önerilmiştir. Yapı-zemin etkileşimini modellemek için kullanılan sayısal yöntemler doğrudan yöntem ve Substructure yöntemi olarak kategorize edilmektedir [98]. Doğrudan yöntemde, zemin, temel ve yapı aynı modelde, bütün bir sistem olarak analiz edilir. Doğrudan yöntemin şematik gösterimi Şekil 5.1a'da görülmektedir. Doğrudan yöntemde, zemin, temel ve üstyapıda deprem kuvvetleri altında meydana gelen tepkiler ve hasarlar detaylı şekilde görülebilmektedir. Bu avantajlarının yanı sıra kompleks yapılarda, çok fazla bilgisayar işlemci gücü gerektirdiğinden yöntemin uygulanmasında problemler yaşanmaktadır [20], [99]. Doğrudan yöntemde, yük altındaki sistemin tepkisi (Denklem 5.1) kullanılarak hesaplanır.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g(t, x, y, z)\} \quad (5.1a)$$

$$[K^*]\{\ddot{u}\} + [K] + i\omega[C] \quad (5.1b)$$

Burada $\{\ddot{u}_g(t, x, y, z)\}$ x; y; z sınır düğüm noktalarında belirtilen serbest alan ivmesi, [M] kütle matrisi; [K*] kompleks rijitlik matrisi; {u} bilinmeyen düğüm noktası yer değiştirme vektörü; [K] Global rijitlik matrisi; [C] Global sönümleme matrisi ve ω açısal frekanstır [100].

Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde kullanılan diğer yöntem ise Substructure yöntemidir [101]. Bu yöntemde zemin ortamını temsil etmek üzere yapının zeminle temas ettiği düğüm noktalarına zemini temsil edecek mesnet koşulları atanır (Şekil 5.1b).



Şekil 5.1. Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde dikkate alınan analitik yaklaşımlar a) Doğrudan yöntem b) Substructure yöntemi [99]

Birçok mühendislik uygulamasında normal boyutlardaki yapıların davranışlarını elde etmek için sonlu elemanlar yönteminin oldukça kullanışlı olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir [74], [76], [102]. Ancak yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde zemin ortamının büyük ölçüleri nedeniyle çok fazla bilgisayar işlemci gücü gerekmekte ve yöntemin kullanılabilirliğinde bazı kısıtlar ortaya çıkmaktadır [103]. Büyük zemin ortamlarının modellenmesinde, çözümlerin daha verimli bir şekilde elde edilebilmesi için eleman ve düğüm noktası sayısının makul bir sayıda tutulması gerekmektedir. Bu amaçla, dinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerinde zemin ortamının

boyutları sınırlandırılarak, zeminin sınır noktasında yer alan düğüm noktalarına yapay sınır koşulları eklenmelidir. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde sınır koşullarının tanımlanmasında farklı mesnet tiplerinin kullanıldığı görülmüştür.

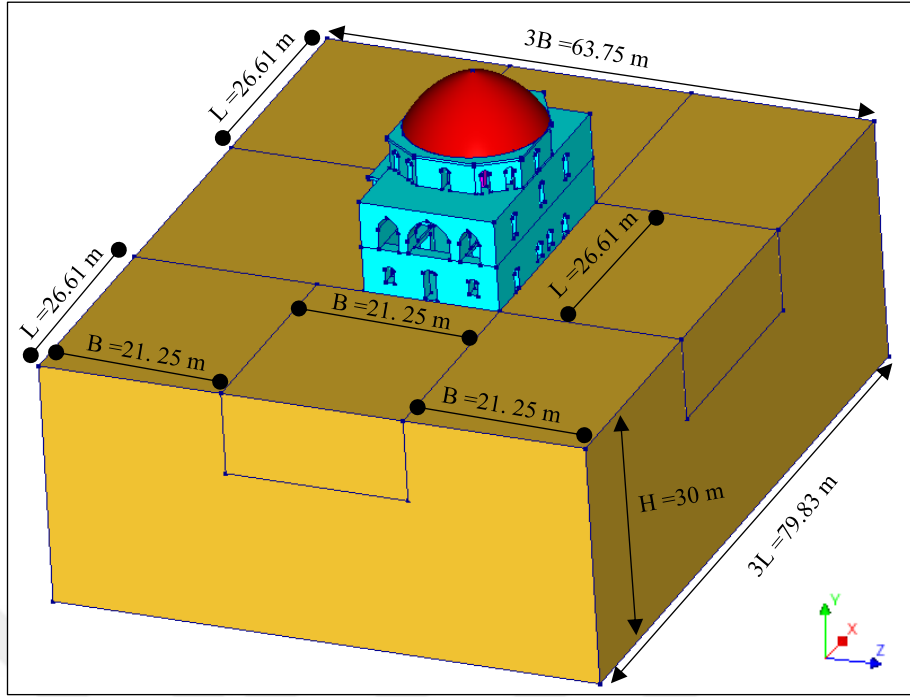
Zeminin sınırlarından yansıyan deprem dalgalarını sönümlemesi sebebiyle viskoz sönümleyici elemanlar oldukça avantajlıdır ancak hareketli, sabit veya ankastre mesnetler yapıdan yeterince uzak mesafeye yerleştirildiğinde, zemin sınırlarından yansıyan deprem dalgaları yeterince sönümlenebilir ve bu sınır koşullarının kullanılması da hesaplamalarda iyi sonuçlar vermektedir [100].

Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde zeminin sınır koşullarında farklı sınır koşullarının kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Sınır koşullarında hareketli mesnetler kullanılan [16], [104], [105], sınır koşullarında viskoz sönümleyiciler kullanılan [22], [27], [28], [32], [106], [107], [108], [109], sınır koşullarında ankastre mesnet kullanılan [16], [20], [110] çalışmalar mevcuttur. Ayrıca, sonlu eleman çözümleri için kullanılan yazılımlardan biri olan Abaqus programında yer alan sonsuz eleman seçeneğiyle, zemin ortamının sınırlarında sonsuz elemanlar kullanılarak yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar da mevcuttur [24], [25], [111], [112].

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda yapı-zemin etkileşimi hesapları doğrudan metot kullanılarak yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında substructure metodunun kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Substructure metoduyla, yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için birçok çalışmada yapının zeminle birleştiği noktada zemin ortamını temsil edecek yayların kullanılması önerilmiştir [21], [23], [113], [114].

Doğrudan yöntemde en önemli sorunlardan biri de zemin sınırlarından deprem dalgalarının yansımaları önlemek için ideal zemin ortamının boyutlarının tercih edilmesidir. Bu bölümde zemin sınır koşulları inceleneceğinden zemin ortamının boyutları literatürde geçmişte önerilen boyutlarda belirlenmiştir.

Yapı-zemin etkileşiminin incelendiği geçmişteki çalışmalarda zemin ortamının ideal derinliği 30 m olarak önerilmiştir [28], [108], [115], [116], [117], [118], [119]. Zemin ortamının enine ve boyuna olan ölçüleri için ise yapının o doğrultusundaki uzunluğu kadar sağında ve solunda zemin ortamının modellenmesinin yeterli olacağı öngörülmüştür [16], [20], [105], [106], [120], [121], [122]. Yani yapının x ekseninde boyu L ve z ekseninde eni B olarak kabul edilirse zeminin boyuna ve enine ölçüleri 3L ve 3B olacaktır. Bu çalışmada örnek yapı olarak seçilen Tarihi Taşhoran Kilisesinin katı modeli ve zemin boyutları Şekil 5.2'de verilmiştir.



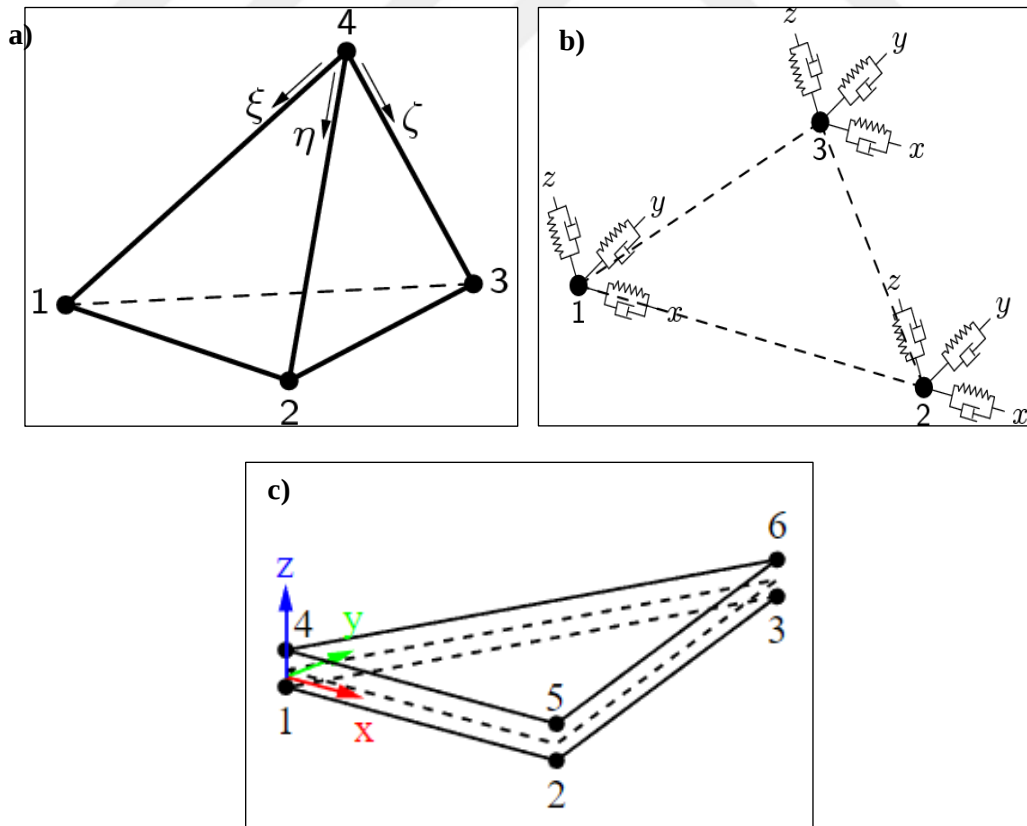
Şekil 5.2. Sonlu elemanlar modeli zemin boyutları

Çalışmanın bu bölümünde zemin ortamının boyutları sabit tutularak ve zemin ortamının sınır düğüm noktalarına farklı mesnet koşulları atanarak, farklı mesnet koşullarının yapının deprem etkisi altındaki davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla 5 farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bunlar, sınır düğüm noktalarına ankastre mesnet atanan FBS modeli, sınır düğüm noktalarında viskoz sönümleyiciler kullanılan ABS modeli, sınır noktalarında serbest alan kolonları modellenen FRF modeli, yapının tabanına Winkler yayları atanan WNK modeli ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı yapının tabanına ankastre mesnetlerin yerleştirildiği FB modelidir. Bu tez kapsamında yapılan sonlu eleman analizlerinde DIANA FEA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Zemin ortamı ve yapı katı elemanlar kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Bu bölümde oluşturulan 5 farklı modelde kullanılan eleman tipleri ve sonlu eleman modeli ile ilgili bilgiler Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Sonlu Eleman Modellerine ait Bilgiler

Model No	Model Kodu	Zemin Tipi	Mesnetlenme	Eleman Tipi	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
1	FBS	Ankastre mesnet		TE12L	162237	38434
2	ABS	Viskoz sönümleyiciler		T9TB/TE12L	172904	37304
3	FRF	Serbest alan		TE12L/T18FF	168220	37694
4	WNK	Winkler yayları		TE12L/T18IF	133574	33920
5	FB	-Zemin modellenmemiştir		TE12L	132629	33344

DIANA FEA, eleman kütüphanesinde yer alan TE12L elemanı dört düğüm noktalı, üç yüzeyle izoparametrik katı tetrahedron bir elemandır (Şekil 5.3a). T9TB elemanı, üç boyutlu modellerde uygulanabilen üç düğüm noktalı üçgen izoparametrik bir sınır elemandır. Viskoz sönümleyici sınır koşullarının modellenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 5.3b). T18FF, üç boyutlu 6 düğüm noktalı ve her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi bulunan bir serbest alan elemanıdır. Zemin ortamının sınırlarının sonsuz şekilde devam ettiği modelleme yaklaşımında kullanılır (Şekil 5.3c).

**Şekil 5.3.** Sonlu elemanlar modelinde kullanılan katı elemanlar a) TE12L b) T9TB c) T18FF [88]

Şekil 5.4'te, 5 farklı yaklaşıma ait sonlu eleman modelleri verilmiştir. Bu modellerde, yapının temeli ile zemin arasında temas yüzeyi tanımlanmamıştır. Model FBS' de zemin ortamının tabanına ve yan yüzeylerine ankastre mesnetler yerleştirilmiştir (Şekil 5.4a). Model ABS'de zemin ortamının tabanına ankastre mesnetler ve yan yüzeylerine viskoz sönümleyici elemanlar eklenmiştir. (Şekil 5.4b). Bu yöntem Kuhlemeyer vd. [123] tarafından önerilmiştir. Viskoz sönümleyici elemanlar 3 farklı eksende yay ve sönümleyici mekanizmadan meydana gelir. Yay rijitlikleri Denklem 5.3 kullanılarak hesaplanır. Sönümleyici elemanın sönümleme katsayısı C, Denklem 5.4 ile hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{AE}{l_i} \quad (5.3)$$

Denklemde, A düğüm noktasının üzerinde bulunduğu alan, E, zeminin elastisite modülü ve l_i yerel eksen yönlerinden birindeki karakteristik uzunluktur. Bu değerler geometrik özellikler ve malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra, DIANA yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.

$$C = d_i A \quad (5.4)$$

Burada, C sönüm katsayısı, d_i , Denklem 5.5a ve 5.5b ile hesaplanan düğümün üzerinde yer aldığı alan üzerindeki çarpma faktörü, c_p, c_s , sonlu eleman ağının (mesh'in) sonunda oluşan P ve S dalga hızları ve ρ zeminin yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$d_{xy} = \rho c_p \quad (5.5a)$$

$$d_{xy} = \rho c_s \quad (5.5b)$$

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı jeomekanik dinamik problemlerde, deprem, zemin temeline uygulanan bir taban uyarması ile simüle edilir. Bir yandan, yanal sabit sınır koşulları zeminde gerçekçi olmayan dalga yansımalarına ve çekmelerine neden olurken, diğer yandan temel kenarlarındaki serbest sınır koşulları da gerçekçi olmayan davranışlara yol açmaktadır. Bu davranışı en ideal şekilde modellemek için, zeminin her iki tarafında, kenarlardaki sabit sınır koşullarının yapıyı etkilemeyecek kadar geniş bir zemin alanı modellenmesi en ideal yaklaşımdır ancak bu, büyük ölçekte modellere ve yüksek hesaplama çabasına yol açacağı için pratik bir seçenek değildir. DIANA sonlu elemanlar yazılımında, simüle edilmeyen sonsuz zemin alanını temsil etmek için Serbest alan kolonları tanımlanmıştır. Serbest alan zemin kolonları, modelin yan taraflarında tanımlanır ve zemin ortamına Kuhlemeyer ve Lysmer [123] tarafından tanımlanan sönümleyiciler ile bağlıdır. Serbest alan elemanlarının malzeme özellikleri, bitişik zemin sonlu elemanlar alanından otomatik olarak alınır. DIANA yazılımında yer alan serbest alan elemanının uygulanması, Nielsen [124] tarafından sunulan formülasyona dayanmaktadır. Model FRF' de zemin ortamının etrafına sonsuz alan kolonları eklenmiştir (Şekil 5.4c). Model WNK'da altyapı

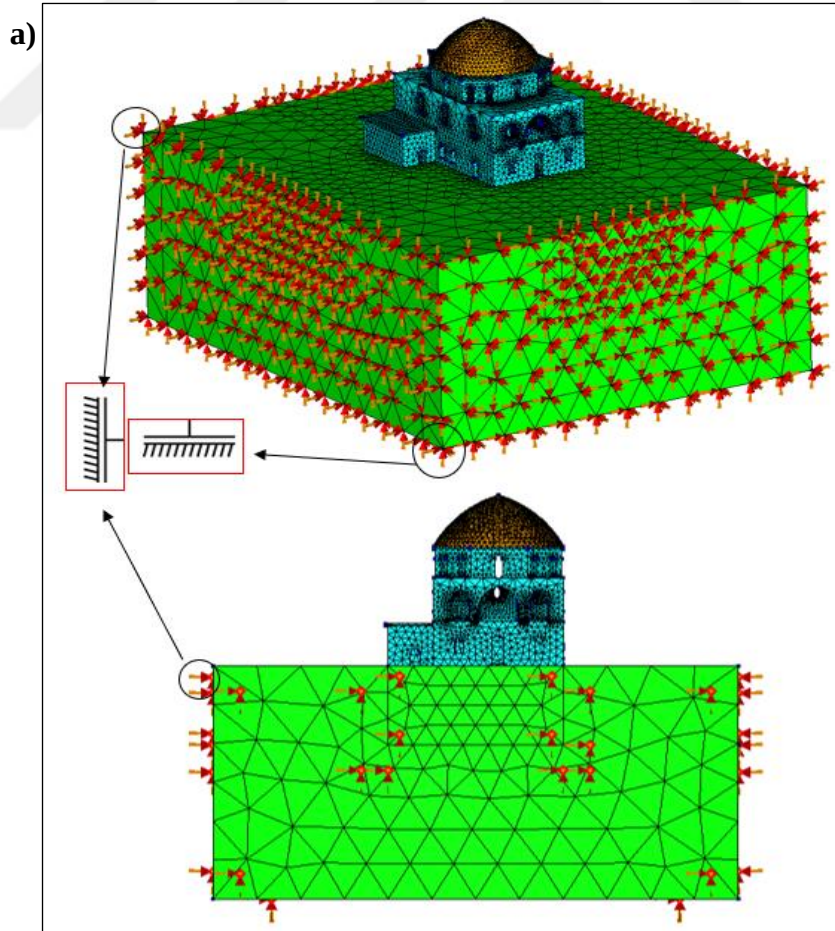
yaklaşımı dikkate alınmıştır. Hesap yükünü azaltmak amacıyla yapı-zemin etkileşimini dikkate almak için yapının tabanına Winkler yayları eklenmiştir (Şekil 5.4d). Bu yöntem Gazetas [125] tarafından geliştirilmiştir. Yapının tabanına eklenecek yayların rijitlikleri Denklem 5.6a, 5.6b ve 5.6c'ye göre hesaplanmaktadır.

$$K_z = \left[\frac{2GL}{(1-\nu)} \right] \left(0.73 + 1.54 \left(\frac{A_b}{4L^2} \right)^{0.75} \right) \quad (5.6a)$$

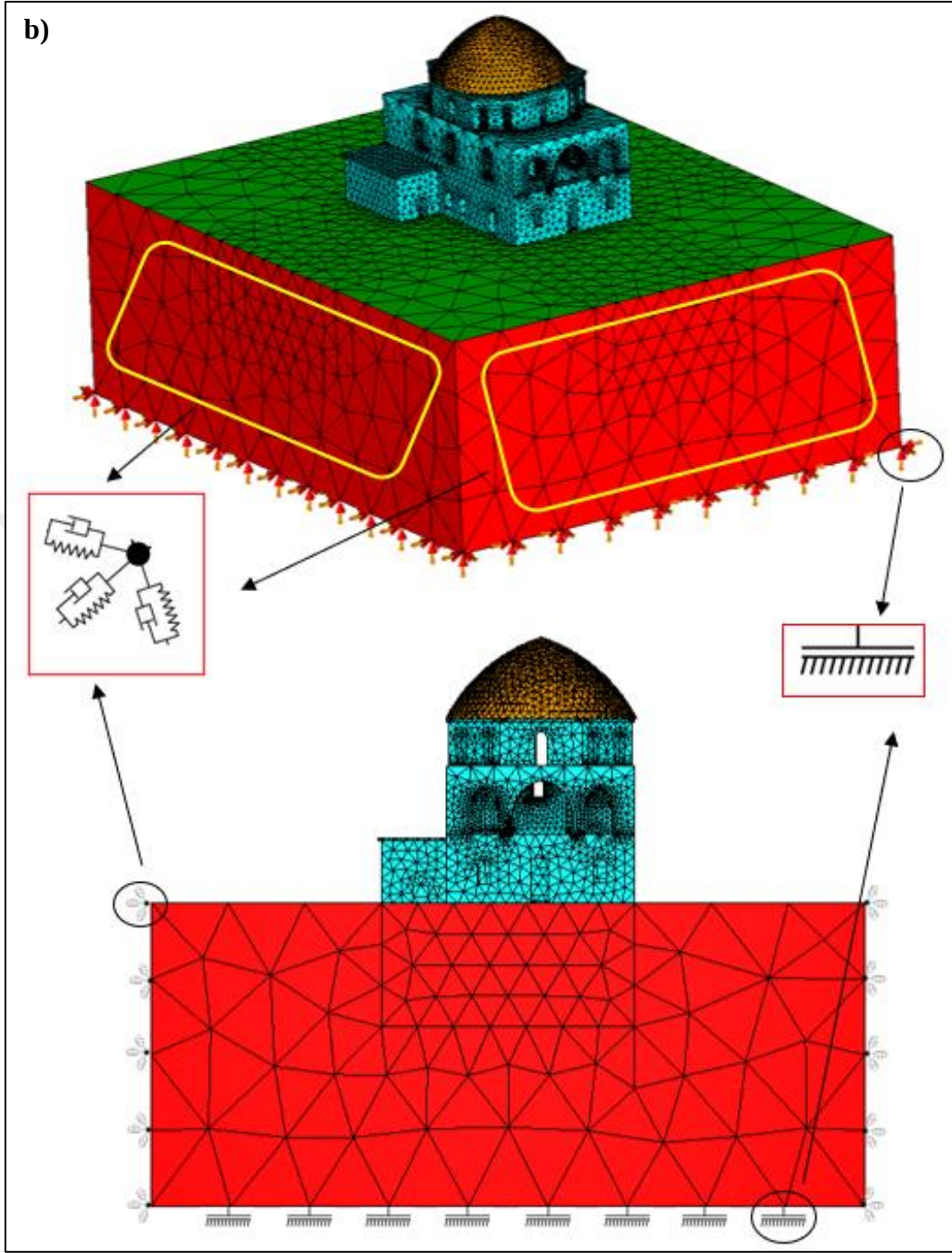
$$K_y = \left[\frac{2GL}{(2-\nu)} \right] \left(2 + 2.50 \left(\frac{A_b}{4L^2} \right)^{0.85} \right) \quad (5.6b)$$

$$K_x = K_y - \left[\frac{0.2}{(0.75-\nu)} \right] GL[1 - (B/L)] \quad (5.6c)$$

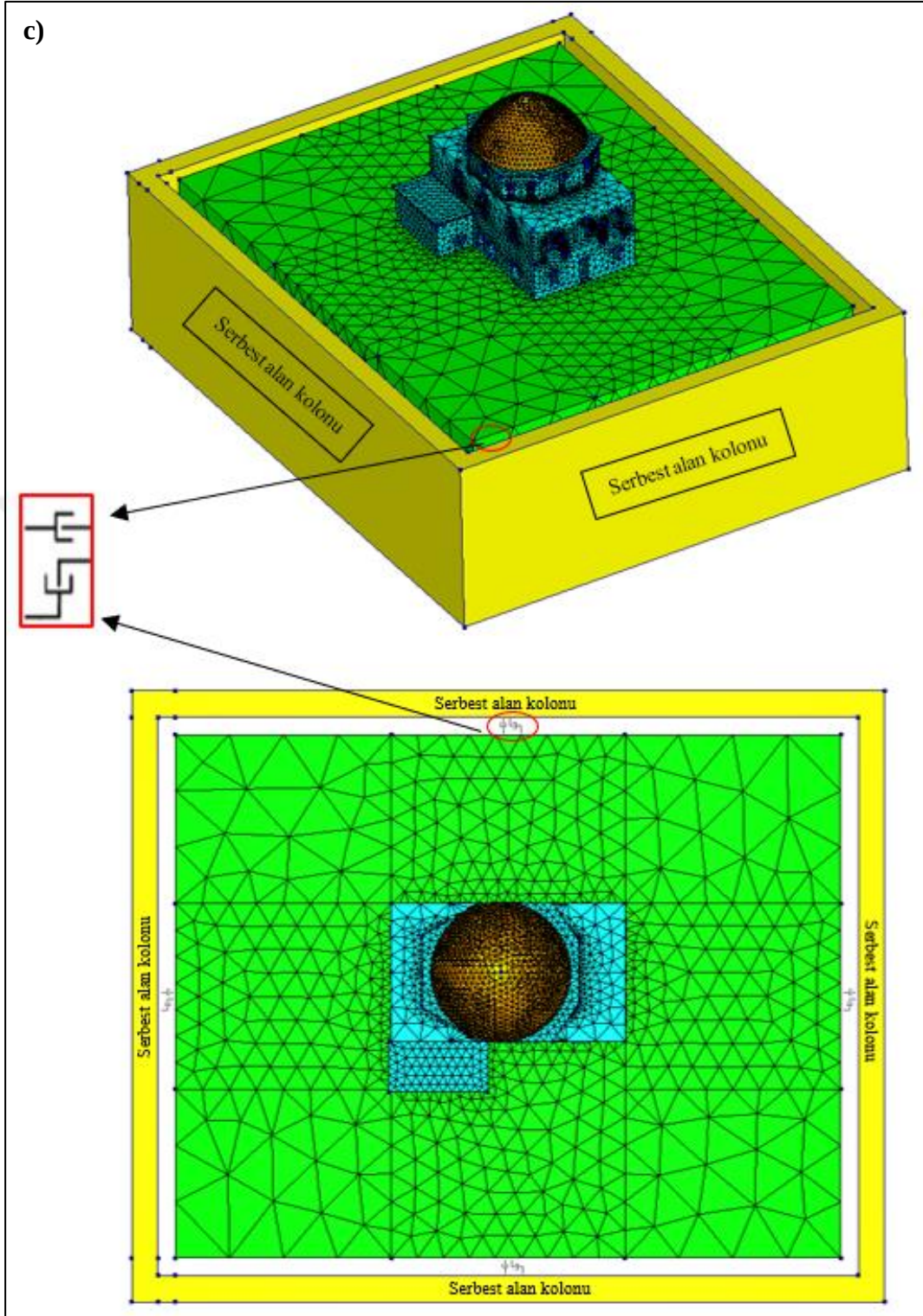
Denklemlerde, G kayma modülü, L temelin boyu, B temelin eni, poisson oranı, A_b temelin alanı, K_z düşey yay rijitliği, K_y , K_x yatay yay rijitlikleridir. Model FB' de yapının tabanına ankastre mesnetler yerleştirilmiştir (Şekil 5.4e). Bu modelde (KN) ifadesi kontrol noktası olarak adlandırılmış olup yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamıştır.



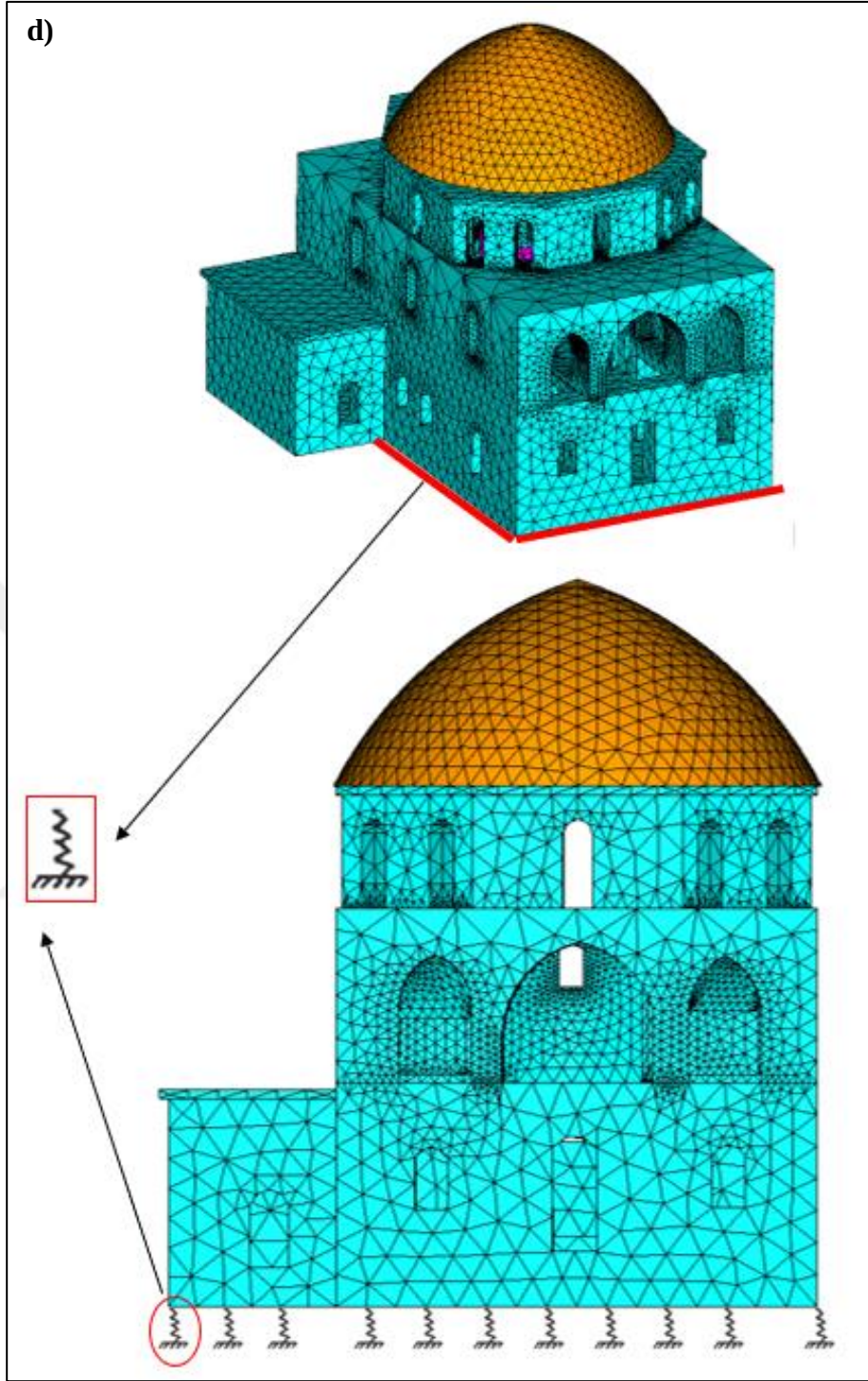
Şekil 5.4. 5 farklı modele ait sonlu eleman modelleri a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB



Şekil 5.4. Devam ediyor

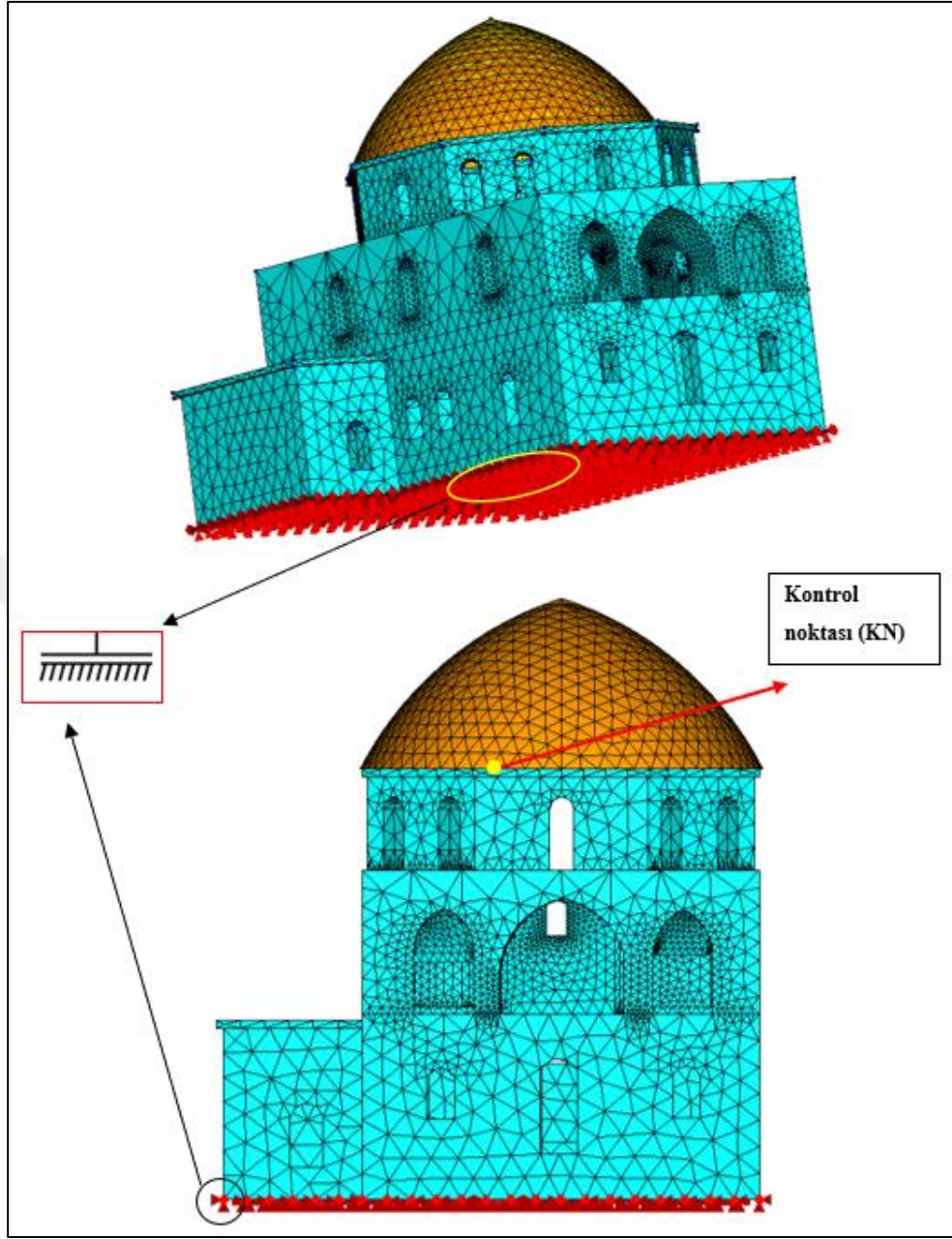


Şekil 5.4. Devam ediyor



Şekil 5.4. Devam ediyor

e)



Şekil 5.4. Devam ediyor

5.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan 4 sonlu eleman modeli ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı sabit tabanlı sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerde zemin ortamının sınır koşulları için farklı mesnet koşulları atanmıştır. İncelenen yapının deprem etkisi altındaki davranışını elde etmek için hazırlanan farklı sonlu eleman modelleri üzerinde zaman tanım alanında lineer olmayan analizler yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılmak üzere 3 farklı deprem kaydı seçilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan deprem kayıtları, Peer Strong Motion Database NGA-West 2 (PEER) [126] ve Türkiye İvme Veri tabanı ve Analiz Sisteminden [127] alınmıştır.

Deprem kayıtlarının seçilmesinde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [128]' de yer alan prosedürler dikkate alınmıştır. Buna göre zaman tanım alanında analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının, yapının koordinatlarına, yerel zemin sınıfına ve deprem yer hareketi düzeyine göre tanımlanacak yatay elastik tasarım spektrumu kullanılarak ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında seçilen örnek yapı olan Malatya Taşhoran Kilisesi 38.352203° enlem ve 38.308397° boylamı üzerinde yer almaktadır. Yapılan zemin etüt çalışmasına göre yerel zemin sınıfı ZC' dir. TBDY-2018'de 4 adet deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmıştır. Bunlar;

DD-1 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 olduğu ve bu olayın tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu, bu nedenle çok seyrek bir deprem yer hareketini temsil etmektedir. Aynı zamanda, bu deprem yer hareketi, göz önüne alınan en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır.

DD-2 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketini tanımlar. Aynı zamanda, bu deprem yer hareketi standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılır.

DD-3 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketini ifade eder.

DD-4 Deprem Yer Hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu çok sık deprem yer hareketini tanımlar. Ayrıca, bu deprem yer hareketi servis deprem yer hareketi olarak da adlandırılır.

Bu bölümde, yatay elastik tasarım spektrumunun oluşturulmasında DD-2 deprem yer hareketi seviyesi tercih edilmiştir. TBDY-2018 yönetmeliğinde, deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için iki farklı yöntem önerilmektedir. Bu yöntemler, Basit Ölçeklendirme Yöntemi ve Spektral Uyuşum Sağlanacak Şekilde Dönüştürülmesi yöntemidir.

Basit ölçeklendirme yönteminde kullanılan metodoloji aşağıda açıklanmıştır;

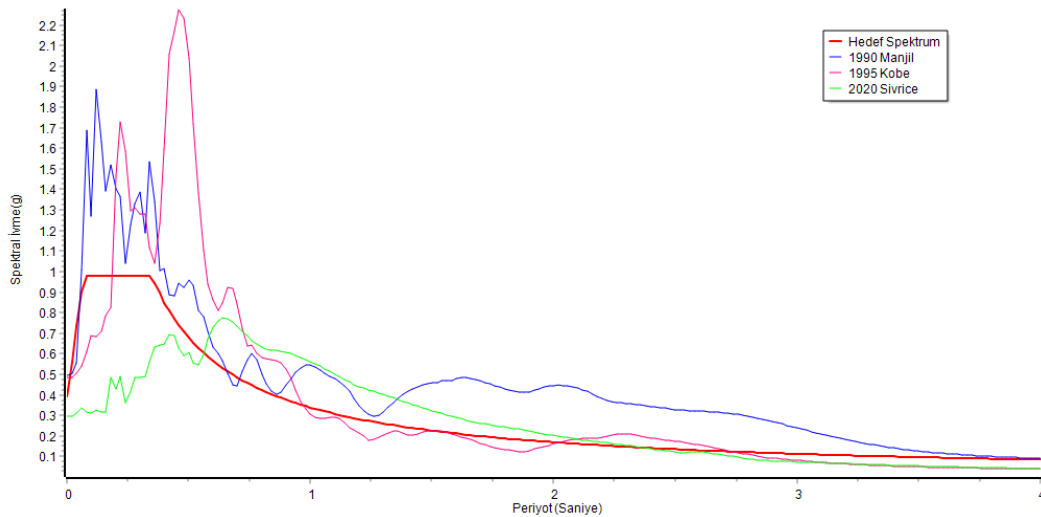
Deprem yer hareketlerinin genliklerini ölçeklendirme kurallarından biri, bir veya iki boyutlu hesaplar için seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, Yatay Elastik Tasarım spektrumuna göre belirlenen tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmamasıdır.

Üç boyutlu hesaplar için belirlenen kurala göre, bileşke yatay spektrumun elde edilmesinde, deprem kaydı takımlarının iki yatay bileşenine ait deprem spektrumlarının kareleri toplamının karekökü alınır. Çalışmada dikkate alınan tüm depremlere ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, Yatay Elastik Tasarım spektrumuna göre belirlenen tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir.

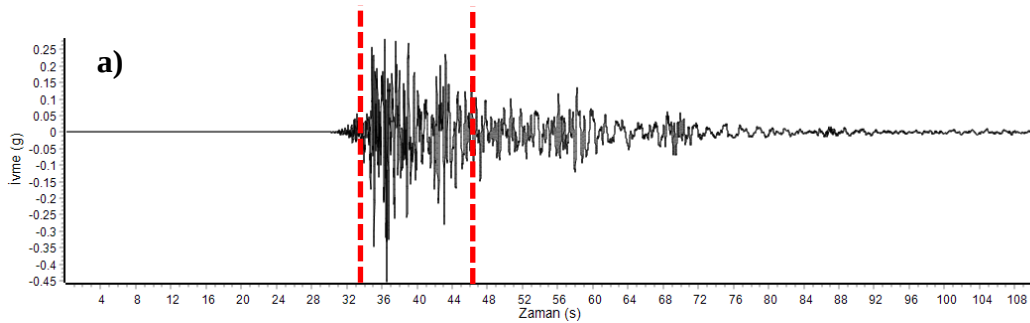
Bir diğerk yöntem olan Spektral Uyuşum Sağlanacak Şekilde Dönüştürülmesi yönteminin metodolojisi aşağıda verilmiştir;

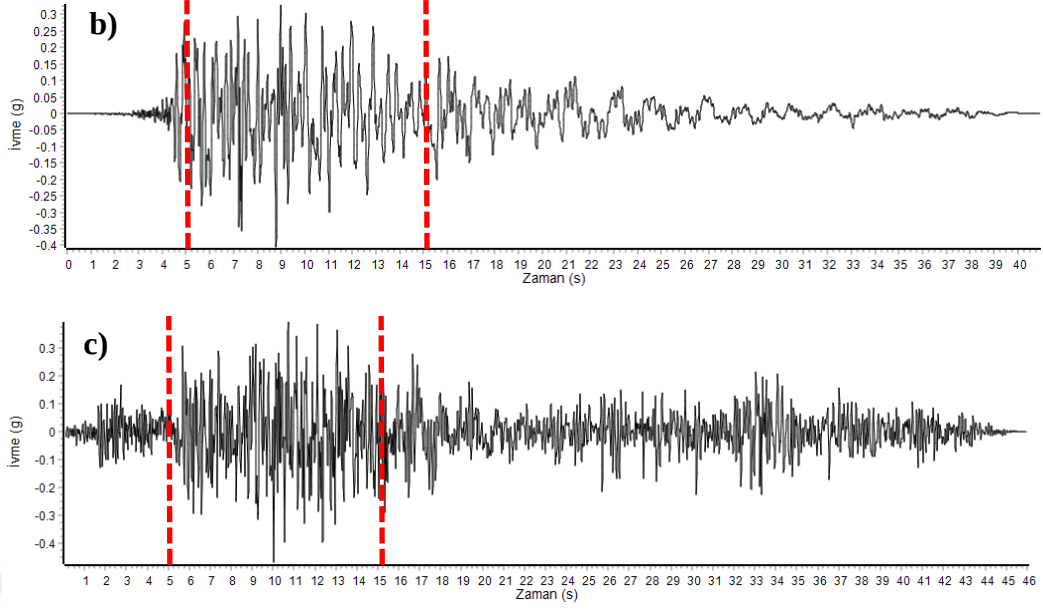
Zaman tanım alanında yapılacak hesaplar için deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarının Yatay Elastik Tasarım spektrumuna göre belirlenen tasarım spektrumuna spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülerek elde edilebilir. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrum ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır.

Bu çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde Seismomatch paket programı kullanılmıştır [129]. Hedef elastik tasarım spektrumu ve seçilen deprem kayıtlarına ait ivme spektrum grafiğı Şekil 5.5'te verilmiştir. Ayrıca seçilen depremlere ait detaylı bilgiler Tablo 5.2'de verilmiştir. Seçilen depremlere ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu bölümde zaman tanım alanında kullanılmak üzere 3 adet deprem kaydı seçilmiş ve bu kayıtlar Spektral Uyuşum sağlanacak şekilde ölçeklendirilmiştir.



Şekil 5.5. Seçilen deprem kayıtları ve hedef dizayn spektrumu





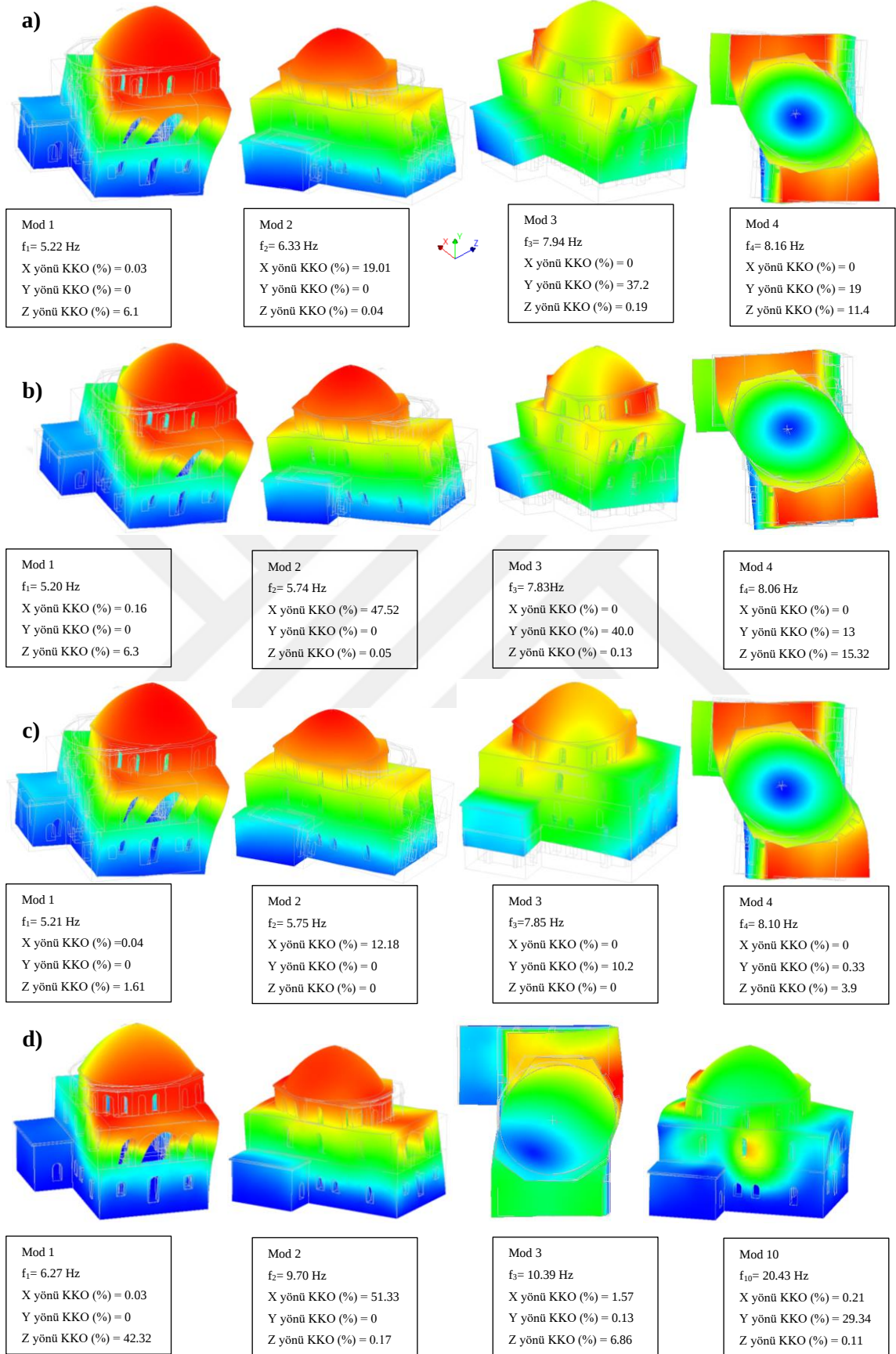
Şekil 5.6. Ölçeklendirilmiş Deprem Kayıtları a) 2020 Sivrice depremi, b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi

Tablo 5.2. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler

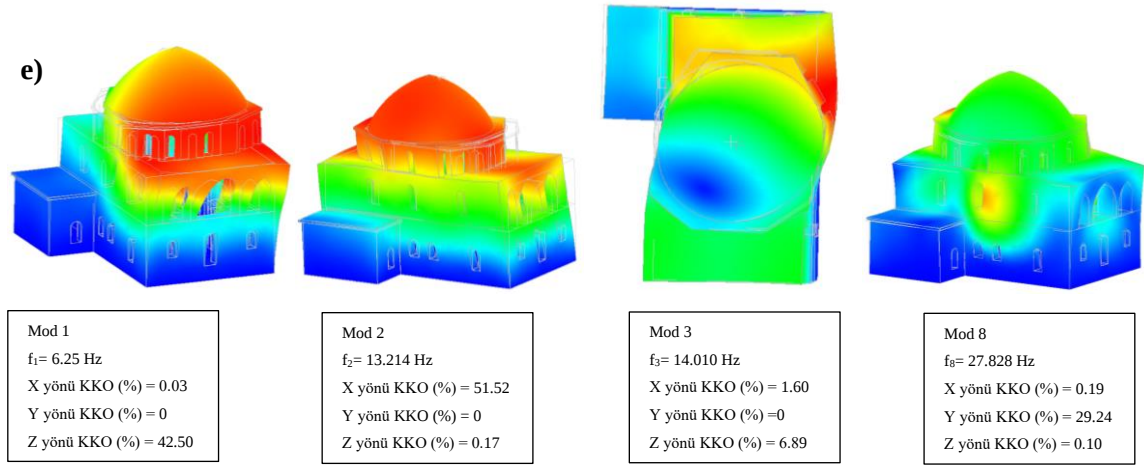
No	Deprem	Kayıt İstasyonu/ Yatay Bileşen	Magnitüt (M_w)	Uzaklık (km)	V_s (m/s)
1	2020 Sivrice	2308/ E1	6.8	23.81	450
2	1995 Kobe	KOBE/NIS000	6.9	7.1	609
3	1990 Manjil	MANJIL/ABBAR-T	7.4	12.6	724

5.2. Modal Analiz

İncelenen yapıların dinamik davranışlarının bir ön değerlendirmesini elde etmek amacıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli üzerinde modal (Eigen- frequency) analiz gerçekleştirilir. Modal analiz, etkin kütesel katılım oranıyla (KKO) karakterize edilen hâkim titreşim modlarının deforme olmuş şekilleri ve bu modlara karşılık gelen periyotları gösterir. Şekil 5.7’de 5 farklı sonlu eleman modeline ait hâkim mod şekilleri ve titreşim frekansları gösterilmiştir.

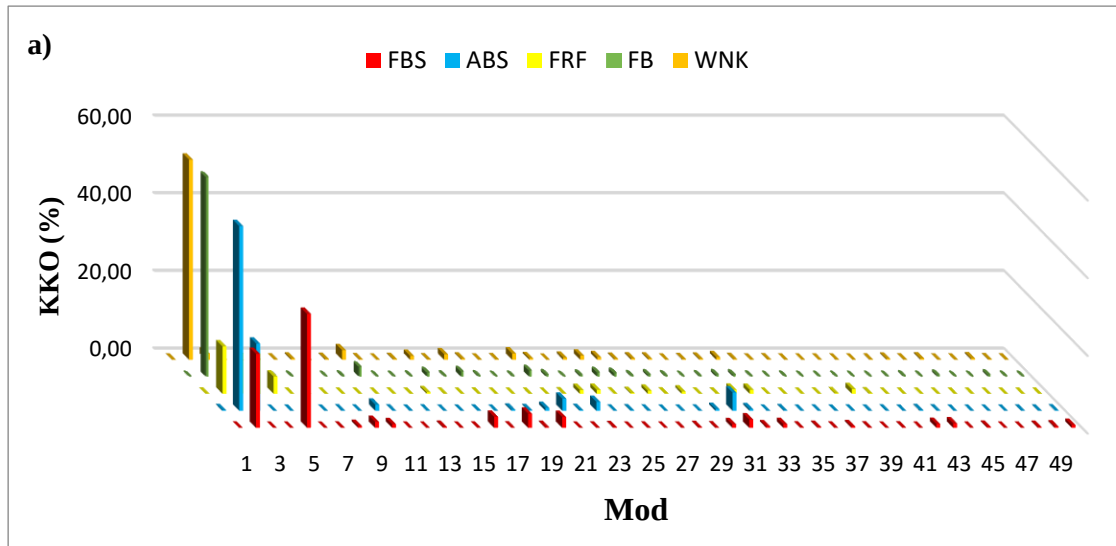


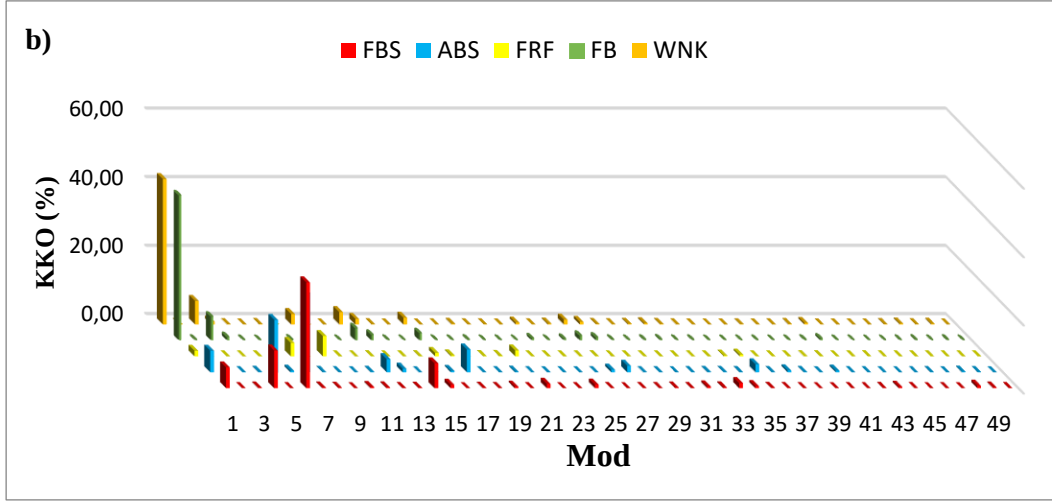
Şekil 5.7. Yapı-Zemin etkileşimi modellerine ait mod şekilleri ve frekansları a) Model FBS b) Model ABS c) Model FRF d) Model WNK e) Model FB



Şekil 5.7. Devam ediyor

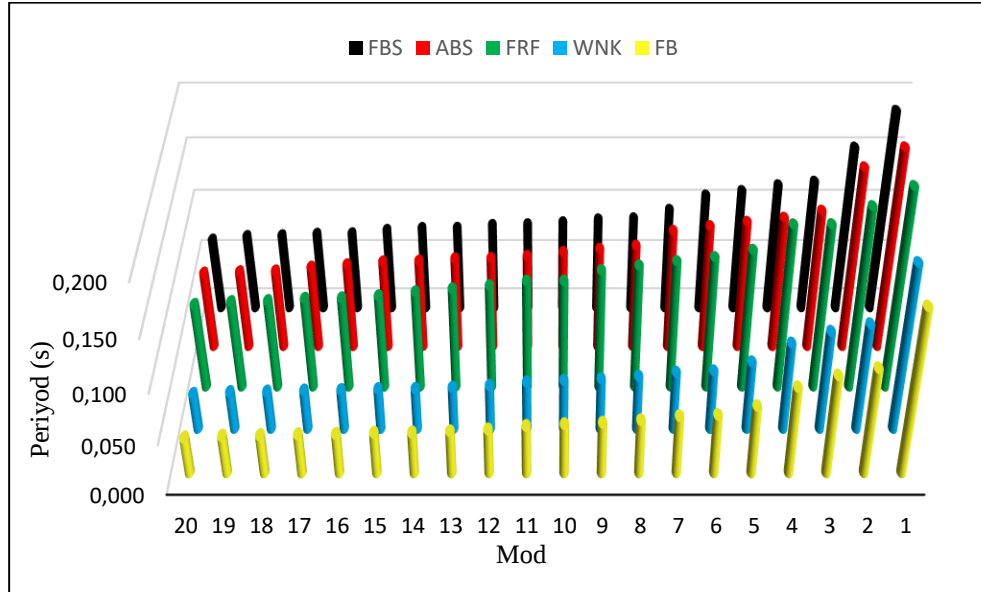
Şekil 5.7 incelendiğinde tüm modellerde 1. mod z yönünde öteleme, 2. mod x yönünde ötelenme şeklinde elde edilmiştir. Model 1,2 ve 3’de 3. mod düşey ötelenme şeklinde, Model 4 ve 5’de 10. mod düşey ötelenme şeklinde elde edilmiştir. 1, 2 ve 3. Modelde sırasıyla 4. mod burulma, diğer modellerde ise 3. mod burulma şeklinde elde edilmiştir. Zemin ortamının üç boyutlu olarak sisteme dahil edilmesiyle yapının mod şekillerinin ve titreşim frekanslarının değiştiği görülmektedir. Ayrıca ilk 50 mod için x ve z yönünde kütleli katılım oranları Şekil 5.8’de verilmiştir. Zemin ortamının 3 boyutlu olarak modellendiği durumlarda yüksek modlarda da kütleli katılımın yüksek olduğu mod şekilleri olduğu görülmektedir. Bu durum 3 boyutlu yapı-zemin etkileşimi durumunda yüksek modlarında yapının davranışında etkin rol oynadığını göstermektedir.





Şekil 5.8. İlk 50 modda elde edilen kütleli katılım oranları a) X yönü b) Z yönü

İlk 20 mod şekli için periyot değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.9’da sunulmuştur. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi yapının ilk 20 mod şeklinde meydana gelen titreşim periyodları zemin ortamının 3 boyutlu olarak modellendiği Model FBS, ABS ve FRF’de yapı-zemin etkileşiminin substructure metoduyla dikkate alındığı model WNK ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı model FB’den daha yüksektir. Bu durum 3 boyutlu yapı-zemin etkileşiminin, yapıların davranışı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda da ortaya koyulmuştur [16], [22], [28], [130]. Ayrıca ilk modlarda periyotlar arasındaki fark az olmasına rağmen yüksek modlar dikkate alındığında periyotlar arasındaki farkın arttığı görülmektedir.



Şekil 5.9. İlk 20 mod için periyotların karşılaştırılması

5.3. Zaman Tanım Alanında Analiz

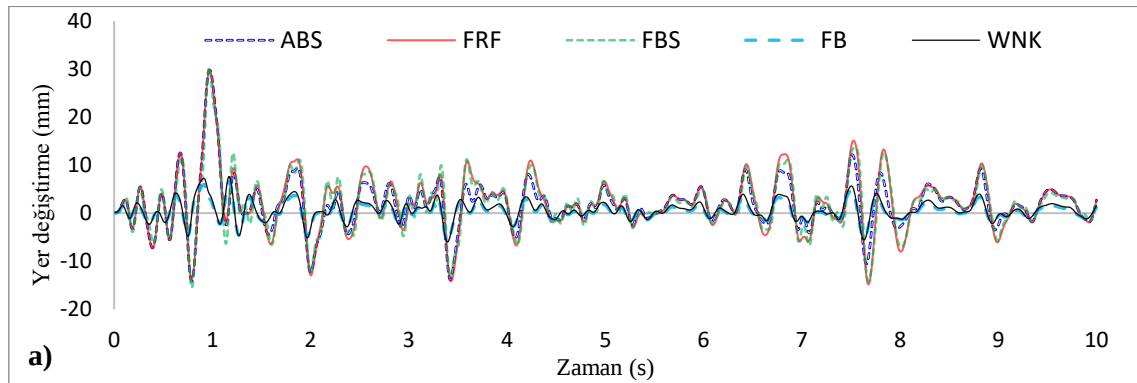
Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin yapının deprem davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla zaman tanım alanında lineer olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Analizlerde Tablo 5.2’de verilen 3 farklı deprem kaydı ölçeklendirilerek kullanılmıştır. Analiz süresini artırdığı ve çok fazla işlemci gücü gerektirdiğinden deprem kayıtlarının en etkili olduğu 10 saniyelik bölümler dikkate alınmıştır. Seçilen deprem kayıtlarında dikkate alınan 10 saniyelik kayıt aralığı Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Tüm modellerde, lineer olmayan sismik analizlerin başlangıç değeri olarak, statik analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Denge denklemlerinin çözümünde kütle ve rijitlik orantılı (Rayleigh) sönüm modeli kullanılmıştır. Rayleigh sönüm katsayıları Denklem 5.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

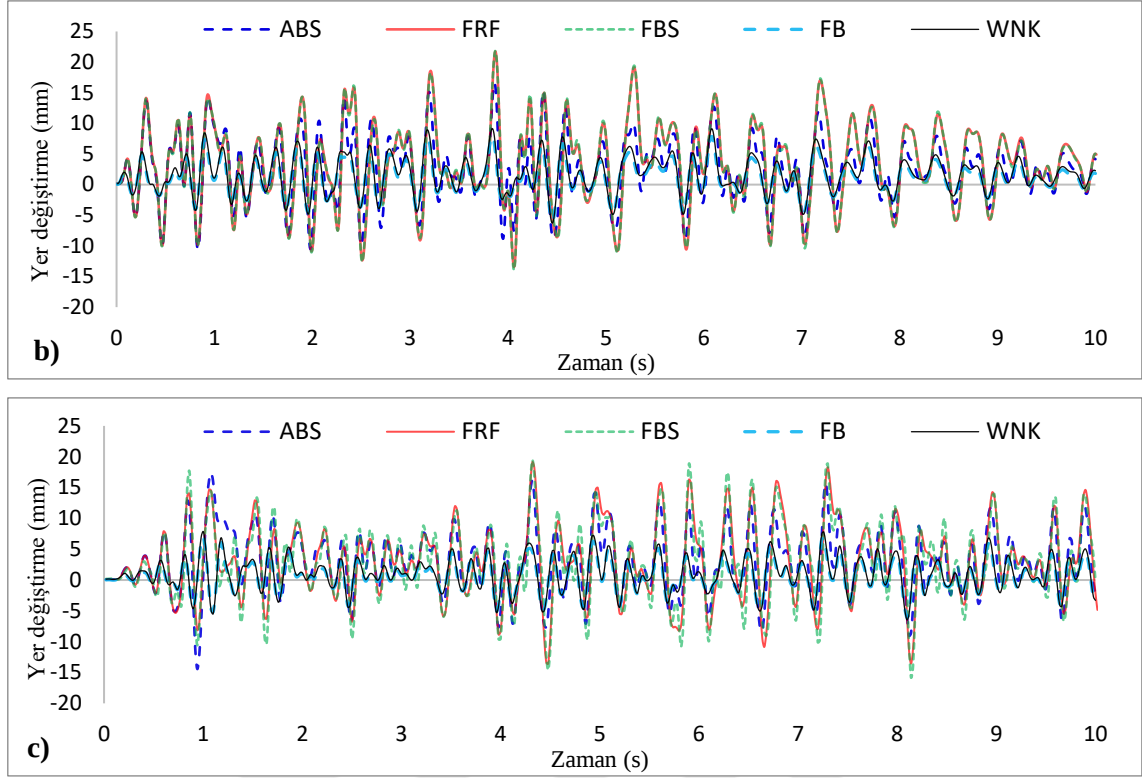
$$a_0 = \xi \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad a_1 = \xi \frac{2}{w_i + w_j} \quad (5.7)$$

Denklemde, ξ sönüm oranı, w_i i. modda elde edilen açısal frekans, w_j j. modda elde edilen açısal frekansdır. Sönüm matrisi C, Denklem 5.7’de hesaplanan katsayılar kullanılarak Denklem 5.8 kullanılarak elde edilir.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (5.8)$$

Lineer olmayan dinamik analizlerde yapının sönüm oranı geçmişte yapılan çalışmalar dikkate alınarak %5 olarak seçilmiştir [75], [131], [132]. Deprem ivmeleri yapıya z doğrultusu boyunca uygulanmıştır. Lineer olmayan zaman tanım analizi sonucunda meydana gelen yer değiştirme, hız ve ivme değerleri Şekil 5.4e’de gösterilen Kontrol Noktasından (KN) elde edilmiştir. 5 farklı sonlu eleman modelinden elde edilen Z doğrultusundaki yer değiştirme, hız ve ivme değerleri sırasıyla, Şekil 5.10-Şekil 5.12’de sunulmuştur.





şekil 5.10. KN düğüm noktasına ait yer değiştirme-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi

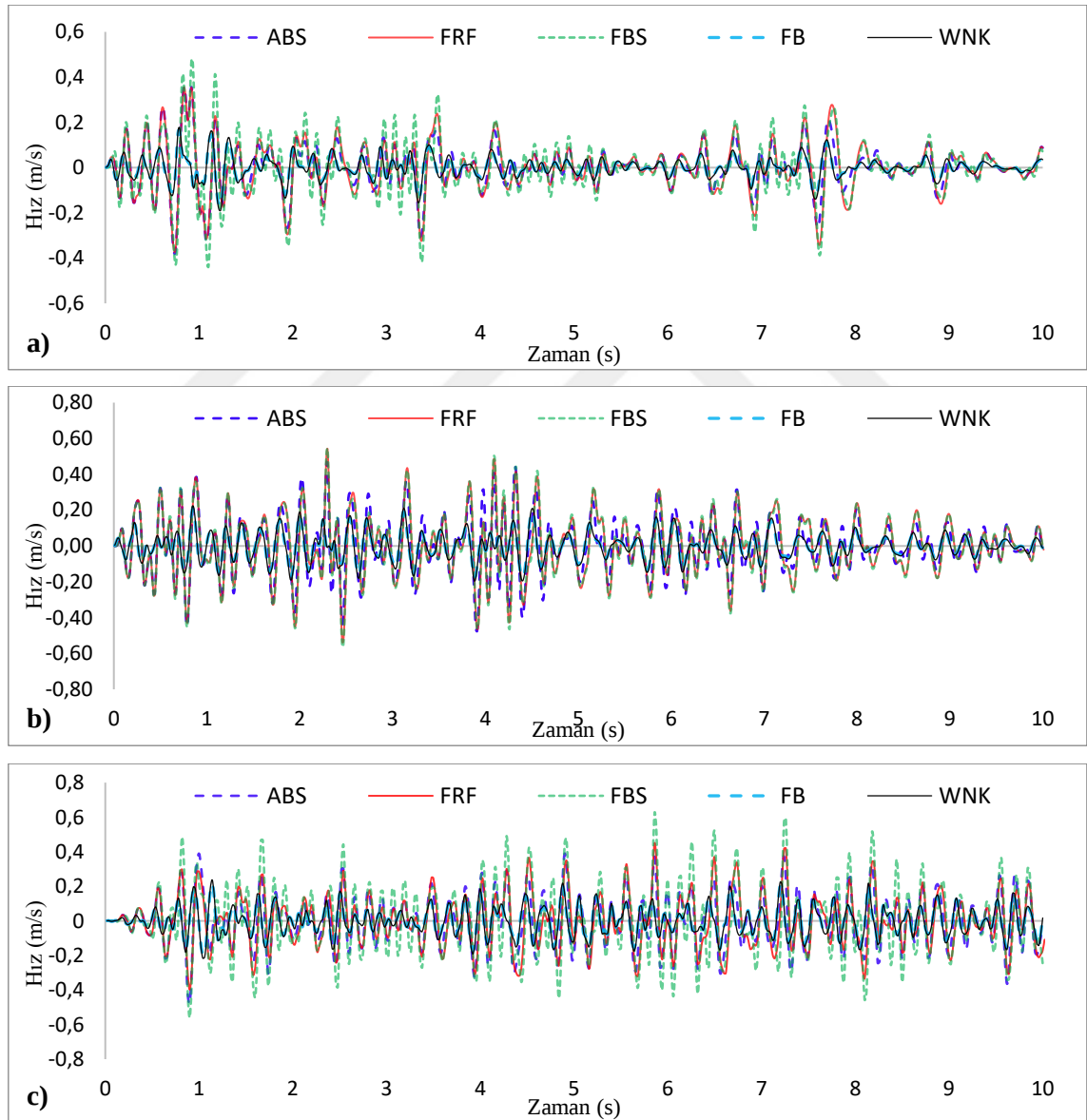
Yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde, en büyük yer değiştirme değerlerinin 2020 Sivrice depremi altında 30.26 mm olarak FBS modelinde meydana geldiği görölmektedir. Zemin modelleri arasında her 3 deprem kaydı için de FBS ve FRF modellerinde yer değiştirme değerleri diğer modellere kıyasla daha büyüktür. FRF ve FBF modellerinde meydana gelen yer değiştirmelerin ise birbirine yakın oldukları görölmektedir. Zemin ortamının sınırlarında sönümleyici mekanizmalar kullanılmadığı durumda yapıda daha büyük yer değiştirmeler meydana geldiği görölmüştür. Zemin ortamının sınırlarında elementer sınır elemanları (ankastre, sabit) kullanılması durumunda sisteme etkiyen deprem dalgaları sınırda yer alan mesnet koşullarından geri yansıyarak, farklı yapısal davranışlara sebep olmaktadır [20], [28], [107], [110].

Yapı-zemin etkileşiminin, zemin ortamı modellenerek dikkate alındığı (ABS, FRF, FBS) modeller ile sabit tabanlı Model 4 (WNK) ve Model 5 (FB) karşılaştırıldığında zemin ortamının 3 boyutlu olarak modellendiği tüm modellerde daha büyük yer değiştirmeler elde edildiği görölmektedir.

Substructure metodu kullanılarak oluşturulan model 4 (WNK) ve sabit tabanlı modelde (FB) meydana gelen yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin substructure metodu kullanarak dikkate alındığı WNK modelinde meydana gelen yer değiştirme değerlerinin her üç deprem kaydı için de daha büyük olduğu görölmektedir. Buna göre deprem etkisi altında, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan farklı durumlarda, sabit tabanlı duruma göre daha büyük yer

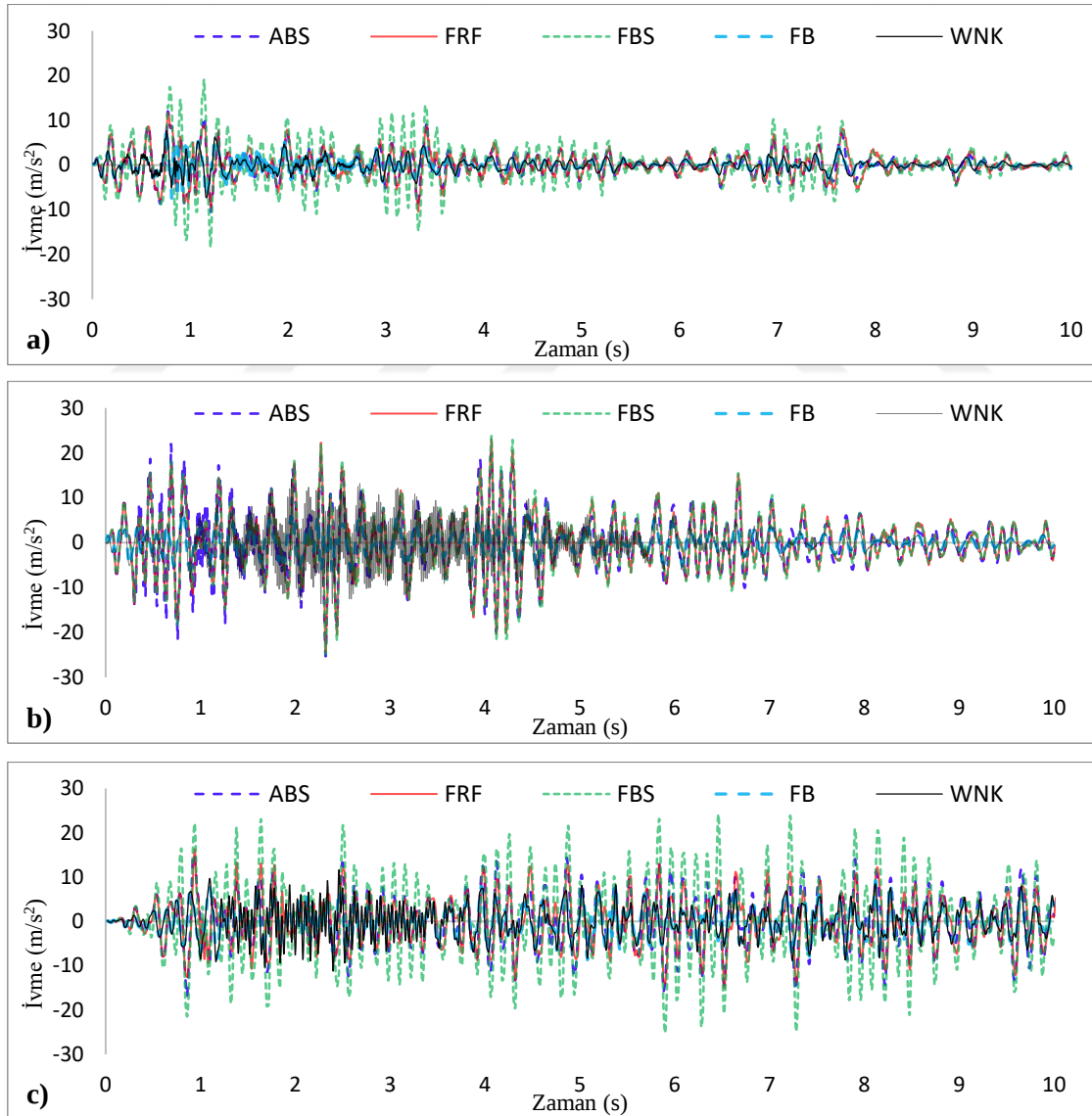
değiştirmenin meydana geldiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin farklı türden yapıların davranışı üzerine etkisinin incelendiği geçmişte yapılan çalışmalar bu durumu doğrulamaktadır [16], [20], [22], [24], [27], [107], [133].

Deprem kuvvetleri altındaki bir yapıdan elde edilen hız değerlerinin çok yüksek olması, yapının dinamik yükler nedeniyle aşırı titreşim veya deformasyon yaşadığını gösterebilir. Bu nedenle yapı üzerinde meydana gelen hız tepkilerinin incelenmesi yapının deprem etkisi altında davranışı belirlemek için önemlidir. Şekil 5.11 incelendiğinde, en büyük hız değerlerinin 1990 Manjil depremi altında maksimum 0.63 m/s olarak FBS modelinde meydana geldiği görülmektedir



Şekil 5.11. KN düğüm noktasına ait hız-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi

Zemin ortamının sınırlarında sönümleyici mekanizmalar kullanılmadığı durumda yapıda daha büyük hız tepkileri meydana geldiği görülmüştür. Zemin ortamının yan sınırlarında yalnızca yay ve sönümleyici kullanılan durum (ABS) ve serbest alan kolonları kullanılan durumda (FRF) elde edilen hız değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Zemin ortamının yan sınırlarında basit sınırlar (ankastre mesnet, sabit mesnet) kullanılması durumunda sisteme etkiyen deprem dalgaları sınırda yer alan mesnet koşullarından geri yansıyor, yapıda daha büyük tepkiler ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [103], [123], [134]. Yapı-zemin etkileşiminin, zemin ortamı modellenerek dikkate alındığı (ABS, FRF, FBS) modeller ile sabit tabanlı Model 4 (WNK) ve Model 5 (FB) karşılaştırıldığında zemin ortamının 3 boyutlu olarak modellendiği tüm modellerde daha büyük hız tepkileri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.12. KN düğüm noktasına ait ivme-zaman grafikleri a) 2020 Sivrice depremi b) 1995 Kobe depremi c) 1990 Manjil depremi

Substructure metodu kullanılarak oluşturulan model 4 (WNK) ve sabit tabanlı modelde meydana gelen hız değerleri karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin substructure metodu kullanarak dikkate alındığı WNK modelinde meydana gelen hız değerlerinin her üç deprem kaydı için de daha büyük olduğu görülmektedir. Buna göre deprem etkisi altında, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan farklı durumlarda, sabit tabanlı duruma göre daha büyük hız değerleri meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 5.12 incelendiğinde, en büyük ivme değerlerinin 1990 Manjil depremi altında maksimum 24.12 m/s^2 olarak, FBS modelinde meydana geldiği görülmektedir. Zemin ortamının sınırlarında sönümleyici mekanizmalar kullanılmadığı durumda yapıda daha büyük ivmeler meydana geldiği görülmüştür. Zemin ortamının yan sınırlarında yalnızca yay ve sönümleyici kullanılan durum (ABS) ve serbest alan kolonları kullanılan durumda (FRF) elde edilen ivme değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Zemin ortamının yan sınırlarında basit sınırlar (ankastre mesnet, sabit mesnet) kullanılması durumunda sisteme etkiyen deprem dalgaları sınırda yer alan mesnet koşullarından geri yansıyarak, yapıda daha büyük tepkiler ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [103], [123], [134]. Yapı-zemin etkileşiminin, zemin ortamı modellenerek dikkate alındığı (ABS, FRF, FBS) modeller ile sabit tabanlı Model 4 (WNK) ve Model 5 (FB) karşılaştırıldığında zemin ortamının 3 boyutlu olarak modellendiği tüm modellerde daha büyük ivme tepkileri elde edildiği görülmektedir. Substructure metodu kullanılarak oluşturulan model 4 (WNK) ve sabit tabanlı modelde (FB) meydana gelen ivme tepkileri karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin substructure metodu kullanarak dikkate alındığı WNK modelinde meydana gelen ivme değerlerinin her üç deprem kaydı için de daha büyük olduğu görülmektedir. Buna göre deprem etkisi altında, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan farklı durumlarda, sabit tabanlı duruma göre daha büyük ivme tepkileri meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca KN noktasına ait z doğrultusunda (yatay) elde edilen maksimum yer değiştirme, hız ve ivme değerleri Tablo 5.3’ de özetlenmiştir.

Tablo 5.3. KN düğüm noktasına ait maksimum yer değiştirme, hız ve ivme değerleri

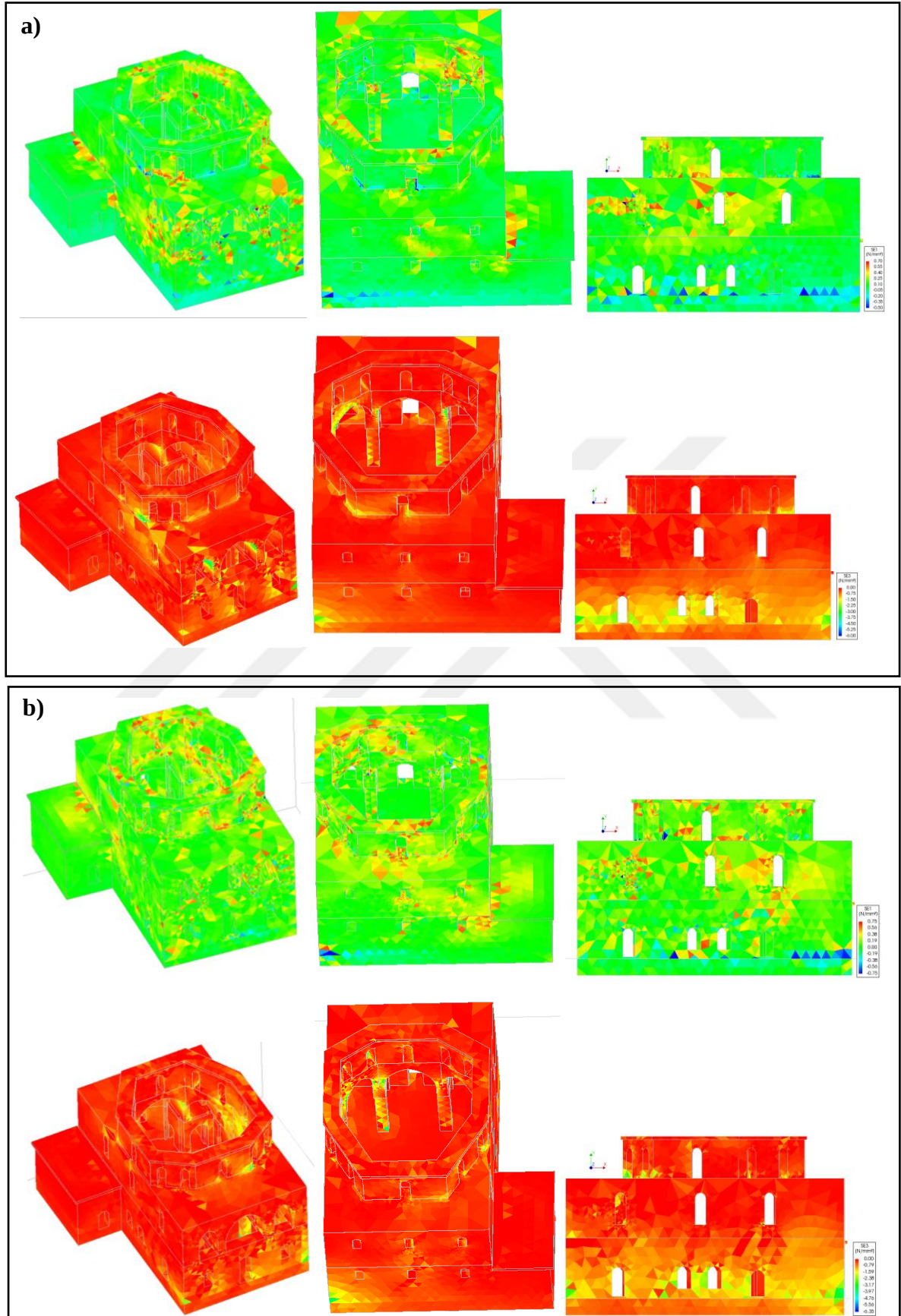
Model	2020 Sivrice			1995 Kobe			1990 Manjil		
	Yer Değiştirme (mm)	Hız (m/s)	İvme (m/s^2)	Yer Değiştirme (mm)	Hız (cm/s)	İvme (m/s^2)	Yer Değiştirme (mm)	Hız (cm/s)	İvme (m/s^2)
FBS	30.26	0.48	19.15	21.83	0.54	23.55	19.45	0.63	24.12
ABS	29.78	0.35	11.93	16.59	0.47	21.96	17.39	0.39	15.22
FRF	29.74	0.36	11.61	21.74	0.54	23.00	19.11	0.45	16.31
FB	6.56	0.16	7.91	7.88	0.21	6.81	6.95	0.22	9.07
WNK	7.64	0.18	7.66	9.15	0.23	14.11	7.87	0.24	11.66

Seçilen 3 farklı deprem kaydı altında yapılan lineer olmayan zaman tanım alanında analiz sonucunda yapıda meydana gelen maksimum ve minimum asal gerilme değerleri ve gerilmelerin yapı üzerinde dağılımları kaydedilmiştir. Seçilen örnek yapı üzerinde meydana gelen maksimum ve minimum asal gerilmeler Tablo 5.4’de özetlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en büyük maksimum ve minimum asal gerilmelerin FRF modelinde 2020 Sivrice depremi altında meydana geldiği görülmektedir. En büyük asal gerilme değerleri modellerin çoğunda 2020 Sivrice depremi altında elde edilmiştir. Bu nedenle 2020 Sivrice depremi altında meydana gelen gerilme dağılışı verilmiştir (Şekil 5.13).

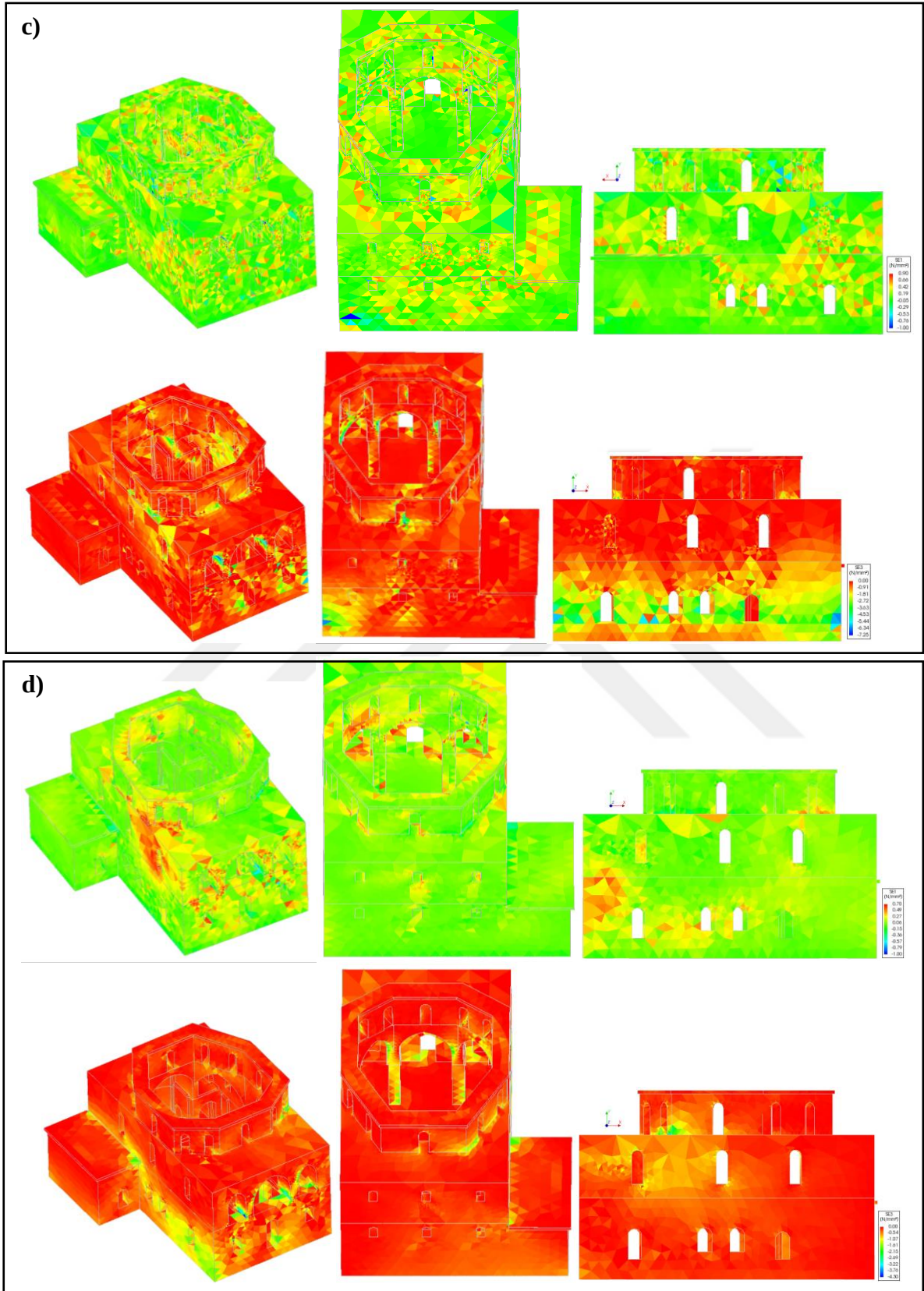
Tablo 5.4. En büyük maksimum ve minimum asal gerilmeler

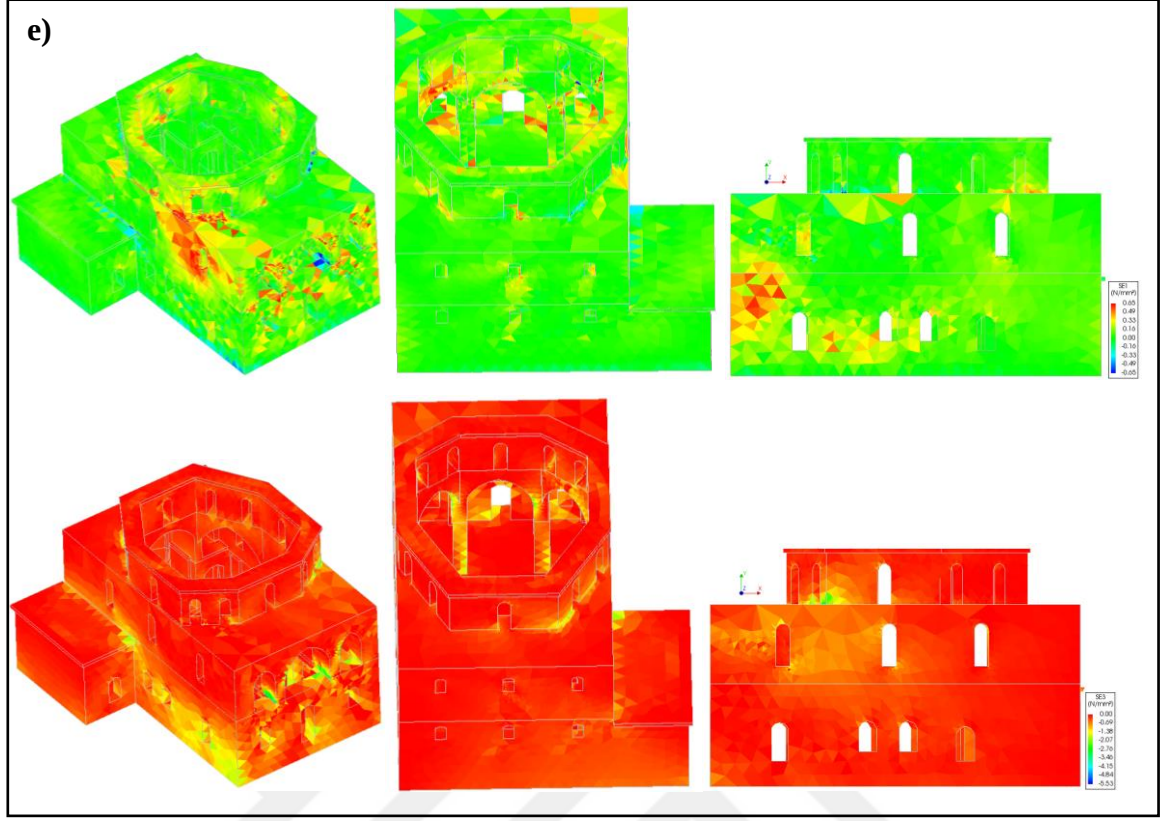
Model	2020 Sivrice		1995 Kobe		1990 Manjil	
	Max. Asal gerilme (MPa)	Min. Asal gerilme (MPa)	Max. Asal gerilme (MPa)	Min. Asal gerilme (MPa)	Max. Asal gerilme (MPa)	Min. Asal gerilme (MPa)
FBS	0.71	6.5	0.70	5.43	0.65	6.13
ABS	0.71	6.35	0.65	4.83	0.74	7.32
FRF	0.97	7.28	0.70	5.06	0.65	3.94
WNK	0.65	4.33	0.65	6.69	0.68	6.65
FB	0.65	5.53	0.65	3.3	0.68	6.64

Tarihi Taşhoran Kilisesinde orijinal ve restorasyon olmak üzere iki farklı dayanıma sahip taş kullanılmıştır. Orijinal duvarlarda basınç ve çekme dayanımı sırasıyla 6.5 MPa ve 0.65 MPa olarak dikkate alınmıştır. Restorasyon duvarlarda ise basınç ve çekme dayanımı sırasıyla 4.9 MPa ve 0.49 MPa olarak dikkate alınmıştır. Yapının apsis bölümünde yer alan kemer ayakları ve vaftiz bölümünün giriş kısmı restorasyon taşıyla örülen duvar geriye kalan bölümler orijinal duvarlardır. Gerilme dağılımları incelendiğinde çekme gerilmelerinin orijinal duvarlarda yoğunlaştığı görülmektedir. En düşük maksimum asal gerilmeler FB modelinde 2020 Sivrice ve 1995 Kobe depremleri altında 0.65 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük maksimum asal gerilmeler ise FB modelinde 3.3 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük gerilme durumunda dahi yapının çekme dayanımı bazı bölümlerinde aşılmaktadır. Bu bölümlerde yapı üzerinde olası çatlaklar beklenmektedir. Basınç gerilmeleri ise en düşük gerilme durumunda aşılmamıştır. Tablo 5.4 incelendiğinde en yüksek çekme ve basınç gerilmesinin FRF modelinde 2020 Sivrice depremi altında sırasıyla, 0.97 MPa ve 7.28 MPa olarak meydana geldiği görülmektedir. Buna göre yapı duvarlarının dayanım sınırı çekme ve basınç durumlarının her ikisinde de aşılmaktadır ve yapının gerilme yığılması olan bölümlerinde çatlak oluşumları beklenmektedir.



Şekil 5.13. Yapı üzerinde asal gerilmelerin dağılımı a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB



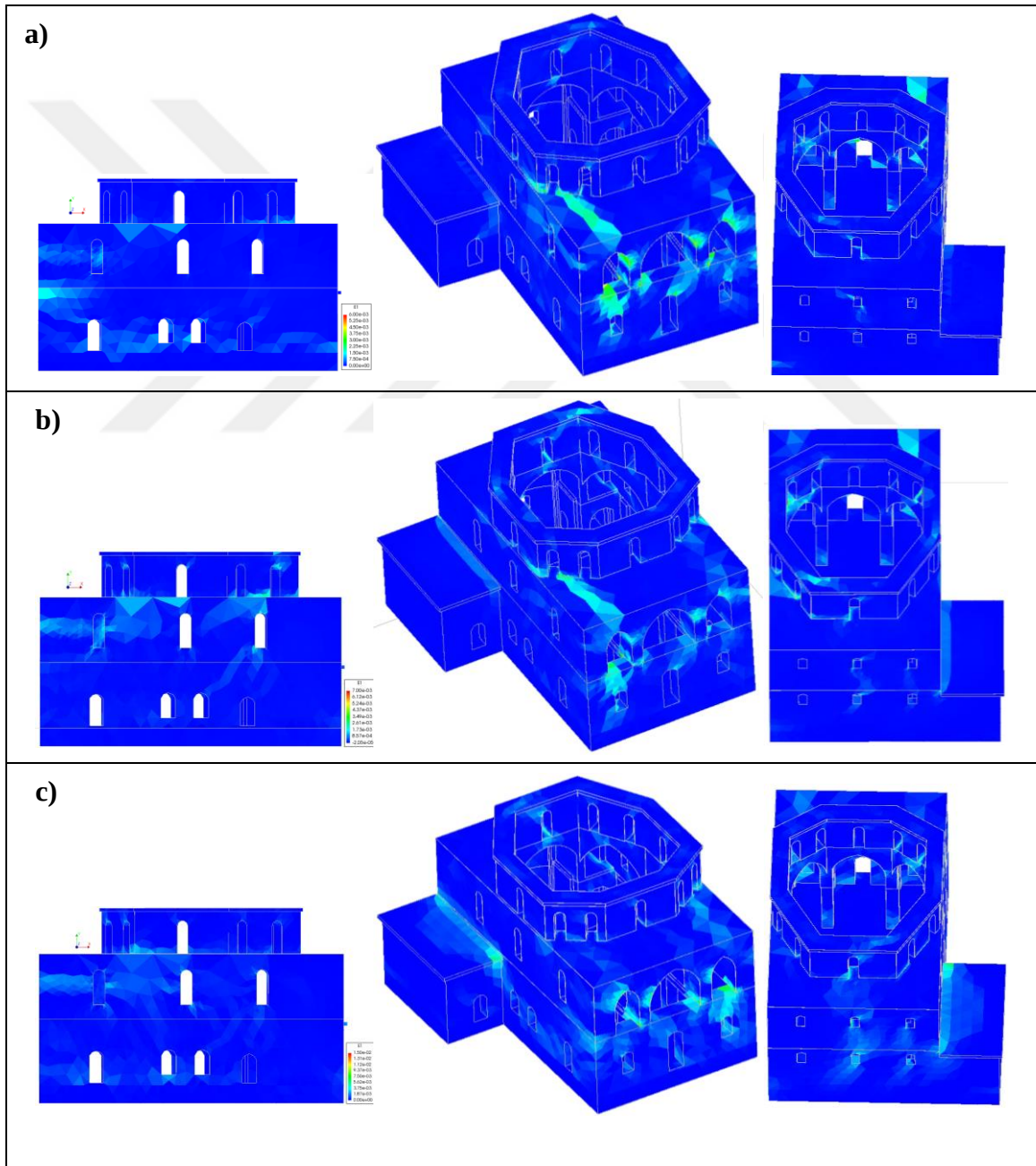


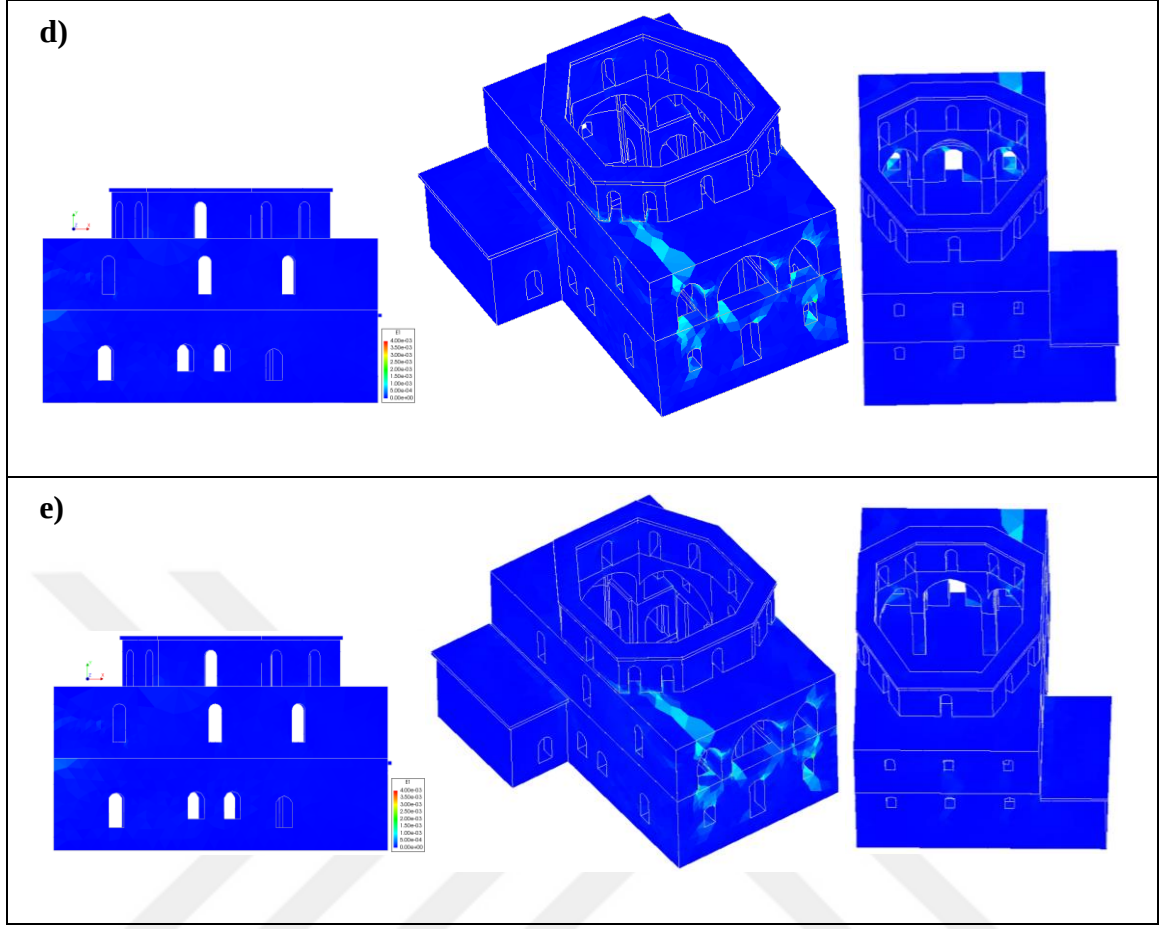
Şekil 5.13. Devam ediyor

Şekil 5.13 incelendiğinde, çekme gerilmelerinin tüm modellerde yaklaşık aynı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Çekme gerilmelerini, yapının pencere kenarlarında, iç kemerlerin kilit taşı bölgelerinde, kasnak ile duvarın birleşim yerlerinde ve girişte yer alan büyük kemerlerin ayaklarından pencere kenarlarına doğru olan doğrultuda meydana geldiği görülmektedir. Kontür diyagramları incelendiğinde, çekme gerilmelerinin yapının bütününe homojene yakın bir dağılım gösterdiğini söylemek mümkündür. Basınç gerilmelerinin dağılımı incelendiğinde, maksimum basınç gerilmelerinin, giriş bölümünde yer alan kemerlerin ayaklarında, iç kemerler üzerinde ve kasnak ile duvarların birleştiği yerlerde meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.13 incelendiğinde, basınç gerilmelerinin tüm modellerde yaklaşık olarak aynı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir.

Kubbe bölümü restorasyon çalışmasından sonra çelik taşıyıcı sistem olarak imal edilmiştir. Yığma bölümle mukayese edildiğinde çelik yapıda çok daha küçük zorlanmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle gerilme dağılımlarında çelik kubbe incelenmemiştir. Çelik kubbe yapıya sadece ölü yük olarak yansıtılmış ve analizlerde dikkate alınmıştır. Elde edilen asal gerilme değerleri incelendiğinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan modellerde daha büyük basınç ve çekme gerilmeleri meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, yapı-zemin etkileşiminin yapıların deprem davranışı üzerindeki etkisinin araştırıldığı geçmişte yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumludur [16], [22], [24], [27], [135].

Yığma yapılardaki hasarların büyük bir çoğunluğu çekme kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Çekme şekil değişimleri, yığma yapıların maruz kaldığı yüklere veya çevresel etkilere bağlı olarak ortaya çıkabilir. Yapının çekme yönünde uzaması sonucu ortaya çıkan şekil değişimi, yapıda çatlaklar ve göçme gibi hasarlara neden olabilir. Bu nedenle, yığma yapıların çekme şekil değişimlerinin doğru bir şekilde yorumlanması ve zamanında müdahale edilmesi önemlidir. Çekme şekil değiştirmesinin yapı üzerinde dağılımı 3 farklı deprem kaydı altında 5 farklı sonlu eleman modeli üzerinde elde edilmiştir ve 2020 Sivrice depreminden elde edilen çekme şekil değiştirmeleri Şekil 5.14’de sunulmuştur.





Şekil 5.14. 2020 Sivrice depremi altında Çekme şekil değiştirmesi dağılımı a) FBS b) ABS c) FRF d) WNK e) FB

Şekil 5.14’de 5 farklı sonlu eleman modeli için 2020 Sivrice depremi altında verilen çekme şekil değiştirmeleri incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında, zemin ortamının 3 boyutlu olarak oluşturulmadığı (FB ve WNK) modellerinde çekme şekil değiştirmeleri giriş bölümünde yer alan kemerlerden başlayarak giriş bölümünde yer alan pencerelere doğru ve kasağın alt bölümünde meydana gelmiştir. Zemin ortamının 3 boyutlu olarak oluşturulduğu modellerde, FB ve WNK’ da meydana gelen şekil değiştirmelere ek olarak iç kemerlerde, kasağın üst bölümlerinde ve yapının yan cephelerinde yer alan pencerelerin kenarlarında meydana gelmiştir. En büyük çekme şekil değiştirmeleri, ana girişte yer alan kemerlerde, kasağın bölgesinde ve iç bölümde bulunan bazı kemerlerde meydana gelmiştir. En büyük çekme şekil değiştirmeleri FRF modelinde ve en küçük çekme şekil değiştirmeleri FB modelinde meydana gelmiştir. Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin sonlu elemanlar metoduyla modellenmesinde zemin ortamının sınır koşullarının yapının sismik davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Örnek yapı olarak Malatya Taşhoran Kilisesi seçilmiştir. Örnek yapı, sonlu elemanlar metoduyla modellenmiş ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve alınmadığı farklı sonlu eleman modeli

oluşturulmuştur. Deprem etkisi olarak 2020 Sivrice, 1995 Kobe ve 1990 Manjil depremleri seçilmiş ve ölçeklendirilerek yapıya uygulanmıştır.

Modal analiz sonuçlarına bakıldığında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı sabit tabanlı modelde ve zemin ortamının modellenmesinde yapının tabanında yaylar bulunan sonlu eleman modelinde en büyük frekans değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra ilk iki mod şekli tüm modellerde benzer olarak ortaya çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan modeller kendi içinde karşılaştırıldığında, en düşük frekanslar sırasıyla zemin ortamının sınırlarında serbest alan kolonları ve yay/sönümleyici kullanılan durumda ortaya çıkmıştır.

Zaman tanım alanında analiz sonuçları incelendiğinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan durumların tümünde yer değiştirme, hız, ivme, asal gerilmeler ve çekme şekil değiştirmesi yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı duruma göre daha büyük değerlerde ortaya çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan modeller kendi içinde karşılaştırıldığında, zemin ortamının sınırlarında ankastre mesnet kullanılan durumlarda daha büyük yer değiştirme, hız, ivme, asal gerilmeler ve çekme şekil değiştirmeleri elde edilmiştir.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar ışığında yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadığı durumda yapının deprem altında meydana gelen tepkilerinin yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modellere göre farklı olduğu görülmüştür. Zemin ortamının yeterli boyutlarda oluşturulduğu durumlarda zeminin sınırlarına atanan elemanlar yapının tepkisini çok fazla değiştirmemiştir.

6. YAPININ DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde örnek yapı olarak seçilen Tarihi Taşhoran Kilisesinin deneysel frekansları incelenecektir. Deneysel frekans değerleri kullanılarak, 5. bölümde analiz edilen 5 farklı sonlu eleman modeli arasından seçilen bir model başlangıç modeli olarak seçilmiş ve daha sonra sonlu elemanlar modeli güncellenmiştir.

6.1. Dinamik Yapı İzleme Metotları

Yaşamlarımızı sürdürdüğümüz mühendislik yapıları, çeşitli dış etkilere (deprem, rüzgâr, araç trafiği vb.) dolayı sürekli bir titreşim halindedirler. Yapının bu doğal titreşimi ile yapıya dışarıdan etki eden titreşimin frekanslarının aynı olması halinde rezonans ortaya çıkmaktadır. Rezonans olayı yapılarda oldukça büyük gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır ve bu olay sonucunda yapılar hasar görebilmektedir [136]. Yapıların titreşim hareketini pratikte durdurmak imkânsız olduğundan, yapıların dinamik karakteristiklerinin iyi bilinmesi ve bu bilgi ışığında gerekli çalışmalar yapılması oldukça önemlidir. Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde iki tür metod kullanılmaktadır. Bu yöntemler teorik ve deneysel yöntemler olarak ikiye ayrılır.

6.1.1. Teorik Yöntemler

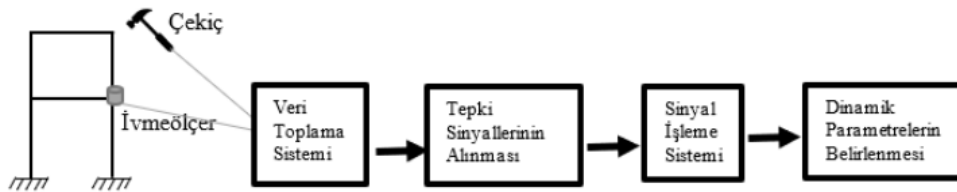
Teorik yöntemlerde incelenen yapının geometrik özellikleri, malzeme özellikleri, sınır koşulları gibi parametreler dikkate alınarak yapının dinamik davranışı elde edilir. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi metotlar yapının teorik dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak yapının modelini oluştururken kullanılan yukarıda belirtilmiş olan birçok parametredeki belirsizlikler yapının teorik dinamik karakteristikleri ile deneysel dinamik karakteristikleri arasında önemli mertebede farklar ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle özellikle tarihi yapıların dinamik davranışlarının elde edilmesinde teorik yöntemlerle elde edilen sonuçların, deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla kalibre edilmesi önemlidir [137]. Teorik yöntemlerle elde edilen sonuçların, yapının gerçek karakteristiğini temsil edip etmediğinin kontrolü için teorik yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristiklerle deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki fark incelenir. Eğer ikisi arasındaki fark % 5-10'dan fazla ise analitik modelin, yapının gerçek durumunu yansıtmadığına kanaat getirilir ve model güncelleştirmesi yapılır. Model güncelleştirmesi için, yapının modellenmesi aşamasında yapılan kabuller, malzeme özellikleri ve sınır şartları değiştirilir. Bu şekilde teorik ve deneysel dinamik özellikler birbirine en yakın olacak şekilde ayarlanmaya çalışılır [138].

6.1.2. Deneysel Yöntemler

Yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan deneysel yöntemler iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, Geleneksel (Deneysel) Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olarak isimlendirilmektedir. Bu iki yöntem temelde birbiriyle aynıdır ancak iki yöntemi birbirinden ayıran en önemli faktör dış etkinin varlığıdır. Diğer bir ifadeyle yapıdaki titreşimin zorlanmış veya serbest titreşim olmasındandır. Geleneksel Modal Analiz yönteminden titreşim bir dış etki vasıtasıyla oluşturulurken Operasyonel Modal Analiz (OMA) yönteminde serbest titreşim incelenmektedir [139]. Deneysel yöntemler yapının dinamik karakteristiklerinin (mod şekli, sönüm oranı ve doğal frekans) elde edilmesinde ve sayısal modellerin güncelleştirilmesi için kullanılmaktadır. Dinamik karakteristikleri incelenen yapılar gerçekte sonsuz sayıda serbestlik derecesine ve moda sahiptir. Ancak deneysel yöntemlerde seçilen serbestlik derecesi sayısı çok fazla ivme ölçer kullanılması gerektirdiği için maliyeti artırmaktadır. Bu nedenle test cihazlarının yerleştirileceği nokta sayısının sınırlı sayıda tutulması gerekmektedir [140].

Geleneksel (Deneysel) Modal Analiz Yöntemi

Deneysel modal analiz yönteminde yapıya dışarıdan bir etki uygulanır. Uygulanan bu etkinin, titreşim genliği ve bu genliğin zamanla değişimi bilinmektedir ve bu etki yapıya kontrollü şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntemde, bir tahrik elemanı ve ivme ölçer gereklidir. Bu yönteme ait akış diyagramı Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Bu yöntemde öncelikle yapıya bir dış yük uygulanır ve yapı titreştirildikten sonra ivmeölçerler kullanılarak yapının titreşimi kaydedilir ve kaydedilen veriler işlenerek yapının dinamik parametreleri elde edilir. Serbest titreşim etkisi altında, yapının yalnızca elastik dinamik parametreleri elde edilebilmekteyken, geleneksel modal analiz yönteminde hem elastik hem de yükün şiddetine bağlı olarak elastik ötesi dinamik yapı karakteristikleri elde edilebilmektedir.

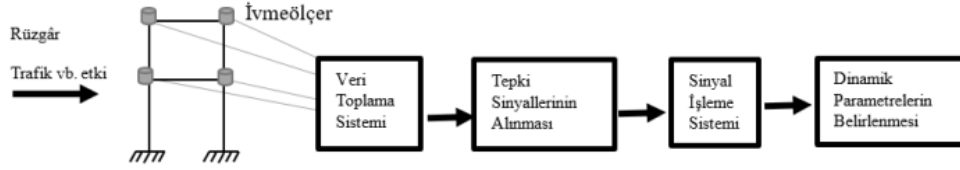


Şekil 6.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi Akış Diyagramı [141].

Operasyonel Modal Analiz (OMA) Yöntemi

OMA yönteminde deprem, araç trafiği, rüzgâr, yaya hareketleri gibi çevresel faktörler ile sürekli bir titreşim halinde olduğu düşünülen yapının, bu titreşimler altında vermiş olduğu tepkiler kaydedilmektedir. OMA yöntemine ait akış diyagramı Şekil 6.2’de verilmiştir. Bu tepkilerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi aşamasında birçok farklı yöntem kullanılmaktadır ancak matematik

temelinde bu yöntemler aynıdır. Veri işleme, denklem çözme tekniği ve matris dizilişlerinin birbirinden farklı olmasıyla ayrışır [142]. Bu metotları birbirinden ayıran temel fark, değişkenin zaman ya da frekans cinsinden olmasından gelmektedir. Değişkenin zamanla ilgili olduğu durumlarda, bu yöntemler zaman ortamında işleyen metotlar olarak adlandırılırken; değişkenin frekansla ilgili olduğu durumlarda ise, bu yöntemler frekans ortamındaki metotlar olarak sınıflandırılır.



Şekil 6.2. OMA yöntemi akış diyagramı [141].

Frekans ortamındaki teknikler şunlardır: Pik Seçimi (PS), Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Polimax. Zaman ortamındaki metotlar ise Rastgele Azaltma, Tekrarlanan Maksimum Olasılık ve SAB (Stokastik Alt Alan Belirleme) yöntemleridir [143].

Bu tez çalışmasında seçilen örnek yapı olan, Tarihi Taşhoran Kilisesinin OMA yöntemiyle dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde, geçmişteki birçok çalışmada önerilen Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılmıştır [144], [145], [146], [147].

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma stratejileri frekans odaklı tekniklerdir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yaklaşımında, yapının doğal frekansları ve mod şekillerinin yanı sıra, sönüm oranları da elde edilebilmektedir.

GFTAA yönteminde modlar, yapının davranışından elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen tekil ayrıştırma grafiklerindeki pik noktaların seçilmesi ile elde edilmektedir [148]. Bu yöntem rezonans frekansının ve belirli moddaki sönüm değerinin elde edilmesine olanak sağlar. Bir titreşimdeki tepe değeri etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu, Ters Ayırık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman alanına dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans, zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle hesaplanırken; sönüm, tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir. Bu teknik, OMA yönteminin kaydedilen sinyalleri işleme aşamasında sıklıkla kullanılmaktadır. GFTAA tekniğinde büyüklüğü bilinmeyen etki kuvveti ve yapıdan ölçülen tepki davranış fonksiyonu, Denklem 6.1’de gösterilmiştir.

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) * G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (6.1)$$

Denkleme göre, $G_{xx}(j\omega)$ terimi etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ terimi tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ terimi frekans davranış fonksiyonunu temsil etmektedir. Ayrıca, denklemde bulunan * ve T sembolleri sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini belirtir. Gerekli matematiksel düzenlemelerin ardından tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu, Denklem 6.2'deki gibi tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda ifade edilir.

$$H(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{R_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{R_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (6.2)$$

Burada; N mod sayısını, λ_r kutup fonksiyonunu ve R_r artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Denklem 6.2'de gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra Denklem 6.3 şeklinde elde edilmektedir.

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \left[\left(\frac{R_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{R_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \right] G_{xx}(j\omega) \left[\left(\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right) \right]^H \quad (6.3)$$

Bu bağlamda; s, tekil değerleri ifade ederken, H kompleks eşleniği ve transpozisini temsil etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde, tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda Denklem 6.4'teki gibi ifade edilir [149].

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left(\frac{A_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{A_r^H}{-j\omega - \lambda_r^*} + \frac{A_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} + \frac{A_r^T}{-j\omega - \lambda_r} \right) \quad (6.4)$$

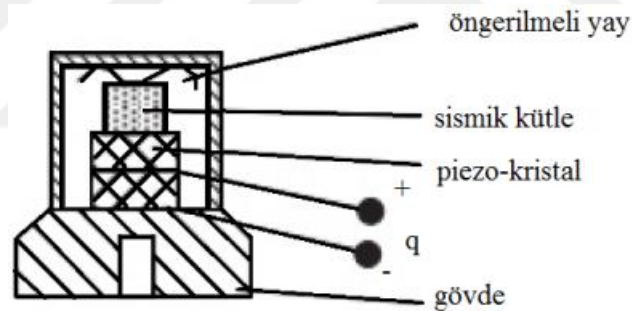
Bu durumda; A_r , tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini ifade eder. GFTAA yönteminin ilk adımı, GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinir ve ardından tekil değer ayrışım matrisi kullanılarak ayrıştırılır. Bu işlem, Denklem 6.4 üzerinde uygulandığında, Denklem 6.5 elde edilir.

$$G_{yy}(j\omega_i) = u_i s_i u_i^H \quad (6.5)$$

Burada; u_i tekil vektörleri, $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_i skaler tekil değerleri ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (6.5)'te verilen GSY fonksiyonunda, en büyük değerleri veren noktalar yapının doğal frekanslarına karşılık gelmektedir. Pik değerleri oluşturan tekil vektörler (u_{ij}) ise yapının doğal mod şekillerini göstermektedir. Doğal frekans ve sönüm, tepe noktası etrafındaki GSY fonksiyonundan elde edilen bir serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilir [149].

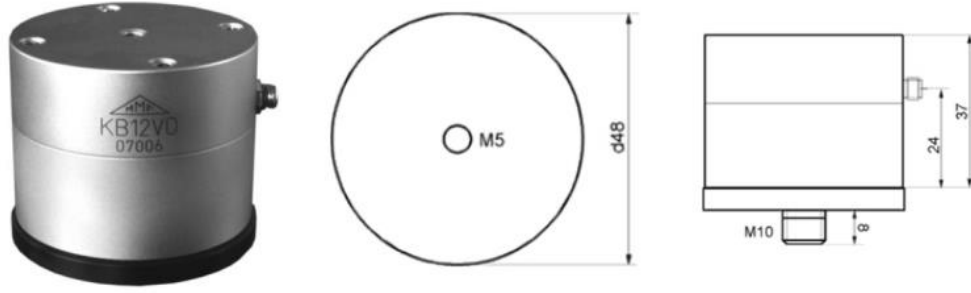
6.2. Seçilen Örnek Yapının Dinamik Karakteristiklerinin OMA Yöntemiyle Belirlenmesi

Operasyonel Modal Analiz deneyleri setinde bulunması gerekli minimum unsurlar ivmeölçerler, veri toplama sistemi ve sinyal işleme yazılımıdır. İvmeölçerler üzerinde bulunduğu yapının ivme hareketini algılayan sensörlerdir. Bu sensörler, rezonans frekanslarının altındaki frekans bandında meydana gelen ivmeyle orantılı sinyaller ortaya çıkaran, yay ve sönümleyiciden oluşan bir sistemdir. Dış bir ivmelenme etkisi meydana geldiğinde, kütle sabit durumundan ters yönde hareket etmektedir. Bu yer değiştirme büyüklüğü ivme büyüklüğü ile doğru orantılıdır ve sistemde yer alan yayın rijitliği ile ters orantılıdır. Sensörler bu yer değiştirmeyi algılar ve veri toplama cihazına iletir. Klasik sensörler yerine, piezoelektrik sensörler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, okuyabilen, kaydedebilen, güç kaynağı gerektirmeyen, dış gürültüden etkilenmeyen ve geniş bir doğal frekans ölçüm aralığını kapsayan cihazlardır [150], [151]. Piezoelektrik sensörün temsili iç yapısı Şekil 6.3'te verilmiştir. Verilerin iletimi ve kaydı, veri toplama sistemleri aracılığıyla yapılır. Sensörlerden gelen analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştürülmesi veri toplama işleminde yapılır. Dijital sinyaller daha sonra bir yazılım analizörü tarafından işlenir. Yapıya yerleştirilen ivmeölçerlerden iletilen sinyaller, belirli koşullar ve yöntemlerle geometrik lokasyonları dikkate alınarak veri toplama cihazlarında birleştirilir.



Şekil 6.3. Piezoelektrik ivmeölçere ait temsili iç yapı

Bu tez çalışmasında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan OROS-OR36 çok kanallı gürültü ve titreşim analizörü ve KB12VD tipi tek eksenli piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerlerin dış görünümü ve geometrik özellikleri Şekil 6.4'te paylaşılmıştır. Ayrıca bu ivmeölçere ait teknik özellikler Tablo 6.1'de görülebilir [152], [153]. OROS-OR36 çok kanallı gürültü ve titreşim analizörü, incelenen yapının dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için verileri toplar ve işler. Bu analizör, 16 kanallı ivmeölçer giriş devresine ve zorlamalı titreşim testleri sırasında bir darbe çekiciden gelen darbe sinyallerini algılamak için bir kuvvet sensörü girişine sahip mobil bir cihazdır (Şekil 6.5). Analizör özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir [152], [153].



Şekil 6.4. Kullanılan ivmeölçere ait görünüm ve geometrik özellikler [141].

Tablo 6.1. Titreşim verilerinin ölçülmesinde kullanılan ivmeölçere ait özellikler

Frekans Aralığı (Hz)	0.08-260
Duyarlılık (mV/g)	10000
Maksimum İvme (g)	± 0.6
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20 ile +80 arası
Ağırlık (gram)	150
Yükseklik (mm)	37
Çap (mm)	48

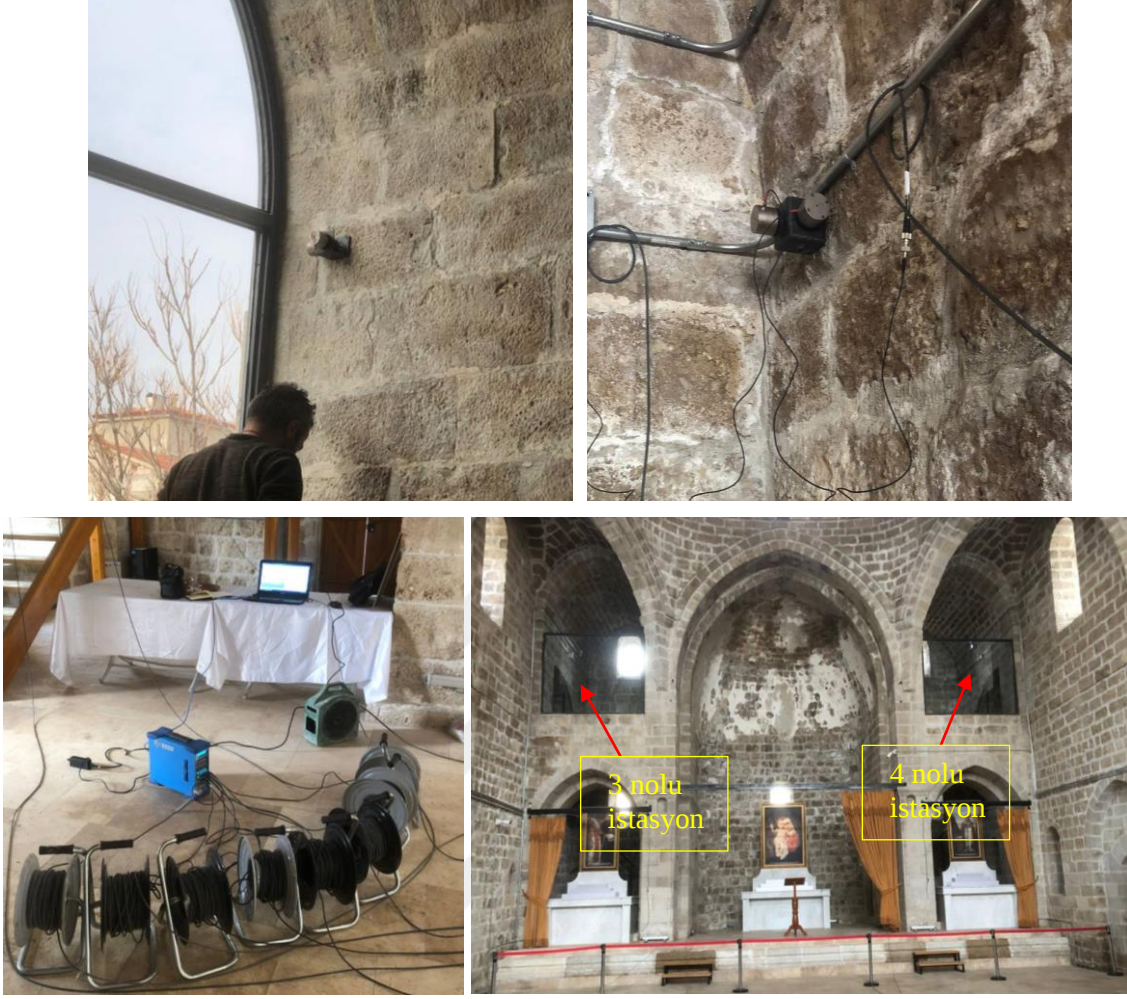


Şekil 6.5. OROS gürültü ve titreşim analizörü

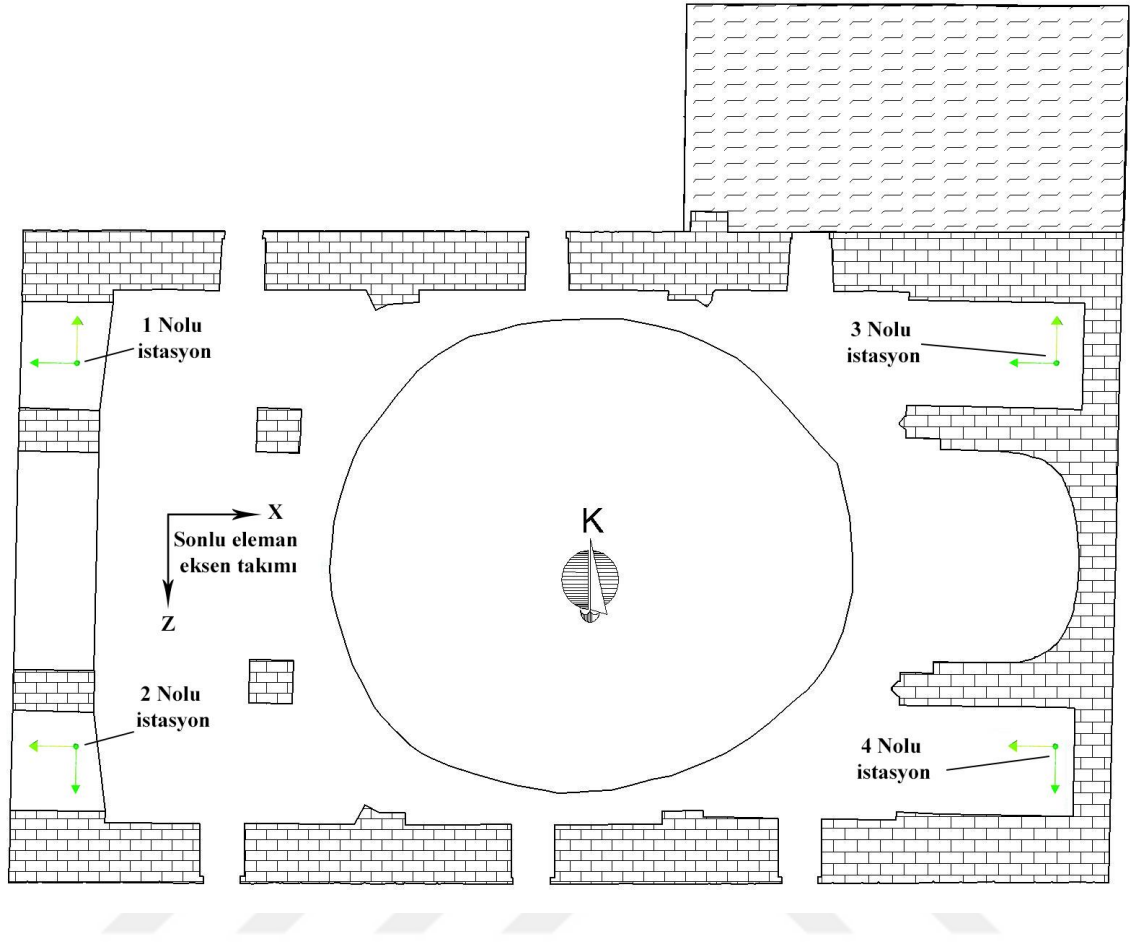
Tablo 6.2. Gürültü ve titreşim analizörüne ait özellikler

Analog Giriş Sayısı	16
DC Kanallar	4 Blok
Filtreleme	Mevcut
Çıkış	DC 40 kHz- $\pm 10V$ aralığı
Harici hard disk	60 GB
Ağırlık	5.2 kg
Boyutlar (w, h, d)	114 x 280 x 350 mm

Tez kapsamında seçilmiş olan örnek yapı Tarihi Taşhoran Kilisesinin Operasyonel Modal Analizi (OMA) çevresel faktörler (araç trafiği, insan hareketleri, rüzgâr vb.) altında gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan modal analiz neticesinde yapılacak olan ölçümün doğal frekans aralığı, süresi ve ivme ölçerlerin yerleştirileceği yerler önceden planlanmıştır. Her bir ölçüm 640 saniye olmak üzere 5 kere tekrarlanmış ve toplam 3200 saniyede gerçekleştirilmiştir. İncelenen yapıya ait dinamik karakteristikler kaydedilen ham sinyallerin özel bir yazılım ile işlenmesiyle elde edilmiştir. Sinyallerin işlenmesinde NVGATE yazılımı kullanılmıştır. Yapının çevresel titreşimlerinin kaydedilmesinde her biri tek eksenli olan 8 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Bunlar deney öncesinde numaralandırılarak yapı üzerinde sabitleneceği konumlar işaretlenmiştir. Her noktada iki adet ivme ölçer biri x diğer z yönünde konumlandırılmıştır (Şekil 6.6). İvme ölçerlerin yapı üzerinde sabitlendiği konumlar Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



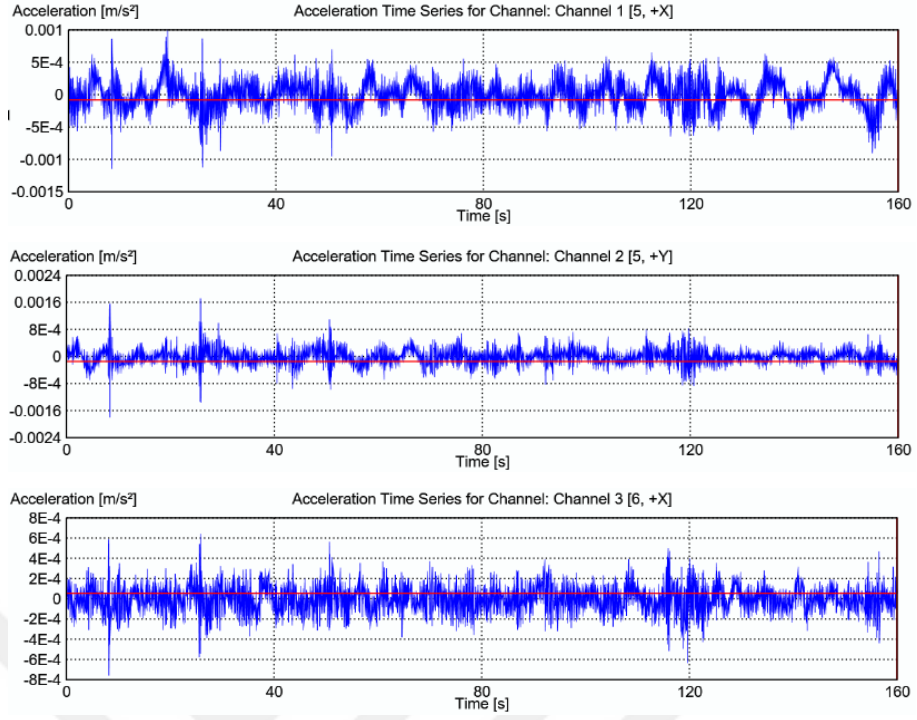
Şekil 6.6. İvmeölçerlerin yapı üzerine yerleştirilmesi



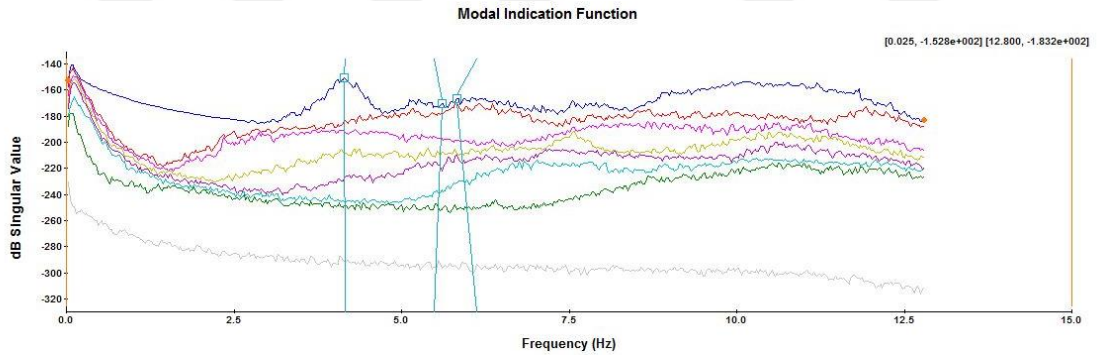
Şekil 6.7. İvmeölçerlerin yapı üzerinde konumları

İlk olarak ivmeölçerler ve veri toplama ünitesi arasında kablo bağlantısı yapılmıştır daha sonra önceden belirlenen konumlara ivmeölçerler sabitlenmiştir ve bilgisayar üzerinden veri aktarımı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Veri aktarımının başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin teyidinden sonra deney başlatılmıştır. Ölçümler sonucu bazı ivmeölçerlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 6.8’de verilmiştir. Ayrıca ölçümlerden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Modal piklerin meydana geldiği noktaların tespitinde Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Modal gösterge fonksiyonu üzerinden seçilen pik noktalar ile doğal frekans ve mod şekilleri NVGATE yazılımı tarafından hesaplanmaktadır. Yapıdan elde edilen deneysel doğal frekanslar ve bu frekanslarda meydana gelen sönüm oranları Tablo 6.3’de paylaşılmıştır.

Başlangıç sonlu elemanlar modelinin seçiminde 5. Bölümde oluşturulan 5 adet sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Bu modellerden gerçek dinamik davranışa en yakın olan Model ABS, başlangıç sonlu elemanlar modeli olarak seçilmiştir. Yapının deneysel dinamik analiz sonuçlarının işlenmesinde GFTAA yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 6.8. Yapıya ait ivme-zaman grafikleri



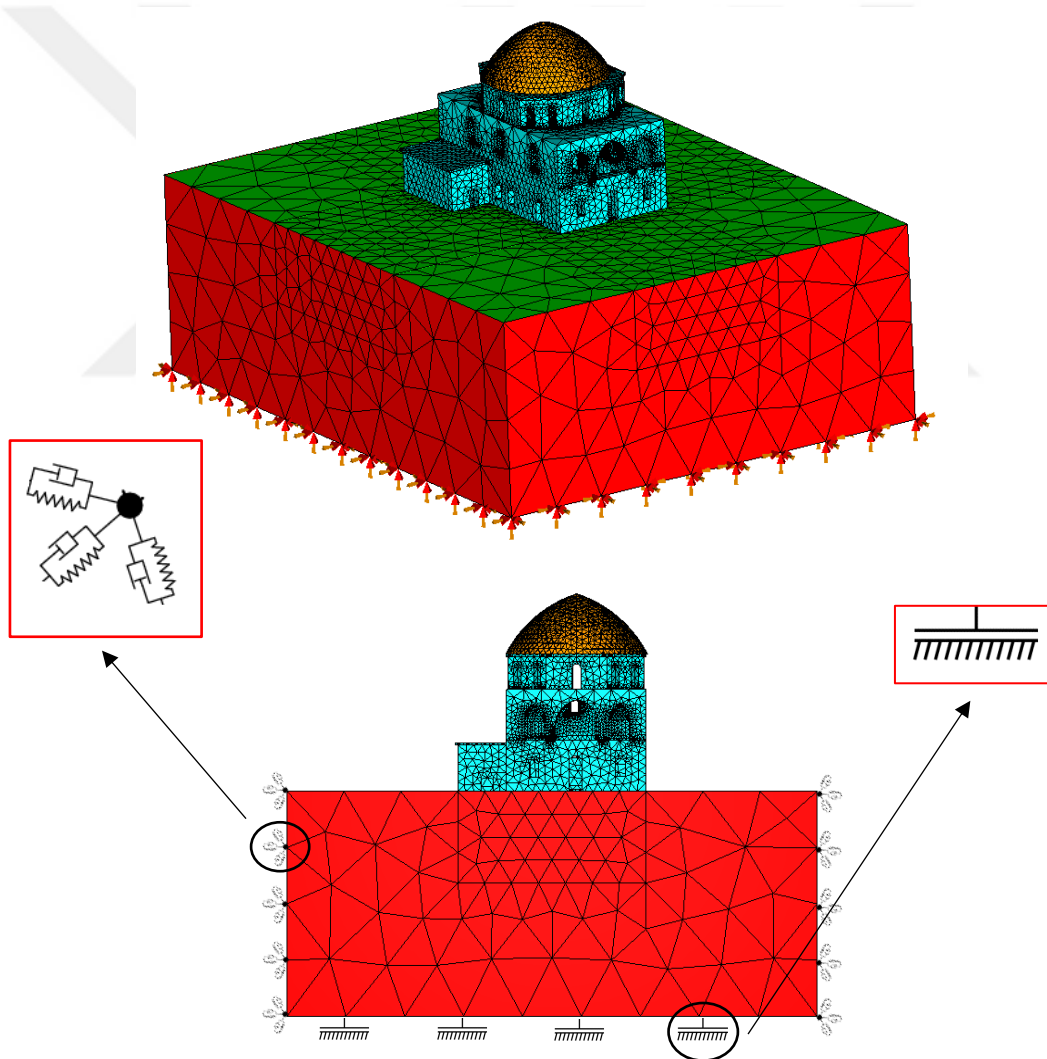
Şekil 6.9. Ölçümlerden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu

Tablo 6.3. İlk 6 moda ait deneysel doğal frekans ve sönüm değerleri

Mod	Deneysel Frekanslar	Sönüm Oranı (%)
1	4.16	4.15
2	5.39	8.11
3	6.13	7.56
4	7.54	6.47
5	7.6	2.41
6	9.02	3.86

6.3. Sonlu Elemanlar Modelinin İyileştirilmesi

Tez kapsamında seçilen örnek yapı olan Tarihi Taşhoran Kilisesinin sonlu elemanlar modeli DIANA FEA yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modelinin çevresel titreşim verileri kullanılarak kalibre edilmesi amacıyla 5. Bölümde oluşturulan 5 adet sonlu eleman modelinden deneysel verilere en yakın modal tepkileri veren model ABS seçilmiştir. Üstyapının modellenmesinde Total Strain-Based Crack (Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak) malzeme modeli zemin ortamının modellenmesinde ise Mohr-Coloumb malzeme modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinde 172904 adet katı eleman ve 37304 adet düğüm noktası bulunmaktadır. 3 boyutlu katı eleman ve zemin ortamının boyutları Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Zemin ortamının tabanında ankastre mesnetler ve yan yüzeylerde yay ve sönümleyiciler kullanılmıştır. Seçilen sonlu eleman modeli Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. Yapının 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli

Başlangıç sonlu elemanlar modeline ait malzeme özellikleri 4. bölümde paylaşılmıştır. Sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan numerik modal analiz ve deneysel modal analiz sonucunda

elde edilen doğal frekanslar Tablo 6.4’de verilmiştir. Deneysel ve numerik analizler sonucu elde edilen modal parametrelerin birbirine olan uyumunu değerlendirmek için Frekans Uygunluk Kontrolü ve Modal Güvence Kriteri (MGK) kullanılmıştır.

Frekans Uygunluk Kontrolü, elde edilen doğal frekans değerleri arasındaki yakınsamayı hesaplamak için kullanılmakta olan bir yöntemdir. Doğal frekanslar arasındaki uyumu hesaplayabilmek için Denklem 6.6 kullanılmaktadır.

$$\delta_{fj} = \frac{f_{aj} - f_{dj}}{f_{dj}} * 100 \quad (6.6)$$

Denklemde yer alan f_{dj} ve f_{aj} sırasıyla j’inci moda ait deneysel ve numerik analizlere ait doğal frekansları, δ_{fj} ise bu frekanslar arasındaki oransal farkı göstermektedir.

Modal Güvence Kriteri (MGK), mod şekillerinin sayısal karşılaştırma yöntemlerinde en çok tercih edilen araçlardan biridir. Yöntemin temeli en küçük kareler sistemini kullanan doğrusal olan bir regresyon analizine dayanmaktadır. Çeşitli deneysel metotlarla elde edilen mod şekillerine ait vektörlerin kıyaslanmasında, deneysel yollarla belirlenen ve analitik olarak hesaplanan analiz yöntemi kullanılmaktadır. Belirtilenler dışında literatürde bu analiz türü için kullanım amaçlarından bazıları aşağıda listelenmiştir [140], [145], [154], [155].

- Analitik modellerin modal korelasyonunda (mod eşleştirme)
- Deneysel ve analitik modeller arasındaki haritalamaların matrislerinde
- Modal vektörlerinin hata analizlerinde
- Modal vektör ortalamalarında
- Deneysel modal vektörlerin tanımlanmasında
- Model güncelleme algoritmalarında
- Modal vektör tutarlılığı tahmin algoritmalarında
- Yapısal hasar ve bozulmaların tespitinde
- Kalite kontrolünün değerlendirmelerinde
- İvmeölçerlerin sayısının ve yerinin optimumunun ölçümünde

Mod biçimleri arasındaki uyumu gösteren modal güvence kriteri Denklem 6.7’de verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$MGK(\psi_a, \psi_d) = \frac{|\psi_a^T \psi_d|^2}{(\psi_a^T \psi_a)(\psi_d^T \psi_d)} \quad (6.7)$$

Buradaki ψ_a numerik analizden elde edilen mod biçimini, ψ_d ise deneysel modal analizden elde edilen mod biçimini gösterir. MGK değerinin 1’e yakın olması durumunda sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekilleri ve deneysel mod şekillerinin birbiri ile uyumlu olduğu, bu değer sıfıra yakın olması durumunda ise mod şekillerinin birbiri ile uyumsuz olduğu anlaşılır.

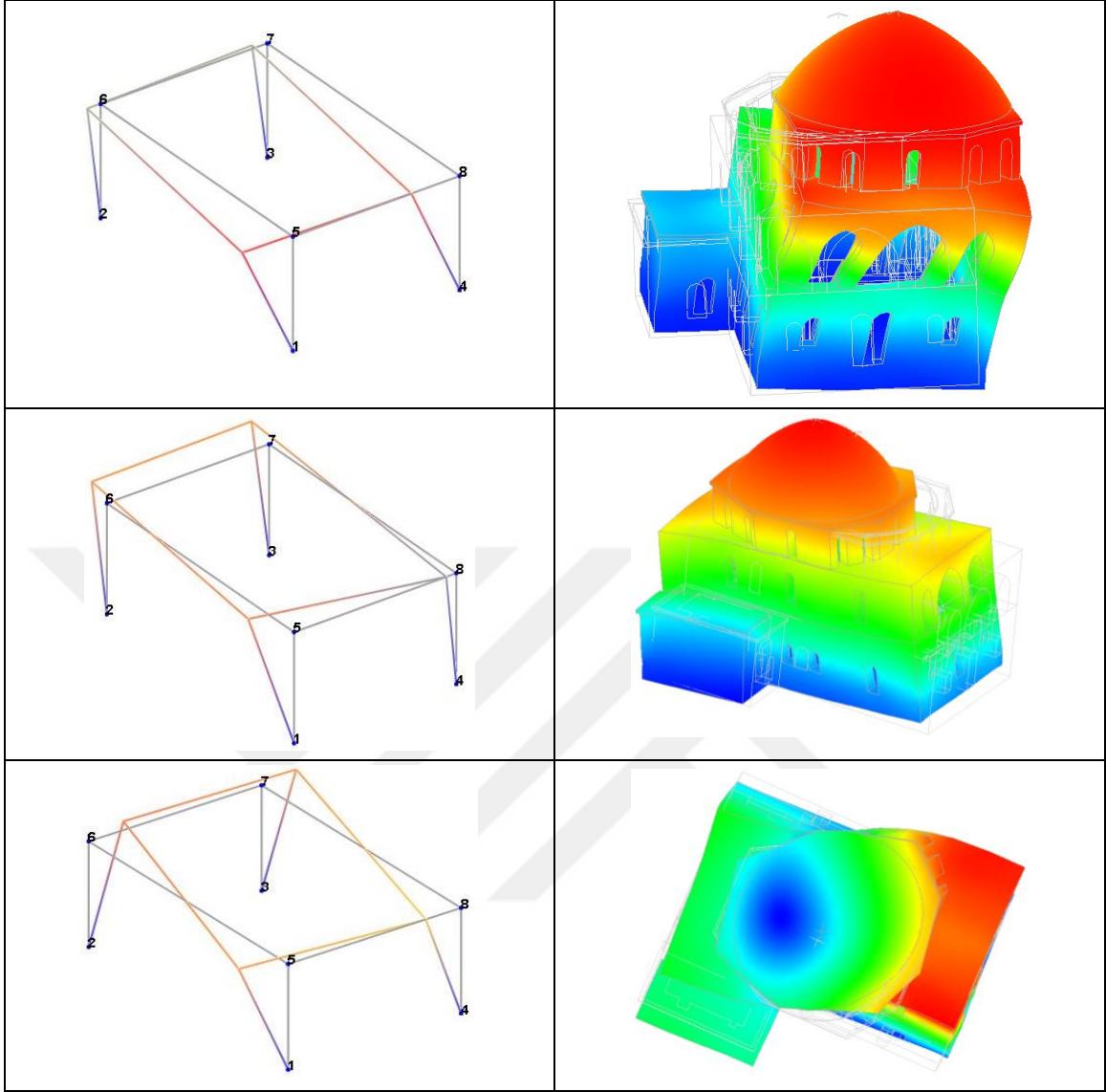
Geçmişte yapılmış olan çalışmalarda MGK değerinin %90'dan büyük olması durumunda, mod şekillerinin birbiri ile yeterince uyumlu olduğu kabul edilmektedir [143].

Deneysel modal analiz ve başlangıç sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen numerik modal analiz sonucu ilk 3 mod için elde edilen doğal frekans değerleri ve MGK değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 6.4'de sunulmuştur.

Tablo 6.4. Deneysel ve Numerik doğal frekanslar ve MGK değerleri

Mod	Deneysel	Sönüm Oranı	Numerik	Fark	Ortalama fark	%21.20	MGK
	Frekanslar (Hz)	(%)	Frekanslar (Hz)	(%)			(%)
1	4.16	4.15	5.21	25.24			94
2	5.39	8.11	5.76	6.86			89
3	6.13	7.56	8.06	31.48			80

Tablo 6.4'te görüldüğü gibi deneysel ve numerik frekanslar arasındaki fark %10'un üzerindedir. Bu durumda sonlu eleman modelinin kalibre edilmesi gerekmektedir. Deneysel modal analiz ve numerik modal analiz sonucu ilk 3 mod için elde edilen mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.11 incelendiğinde deneysel ve numerik modal analiz sonucu ortaya çıkan mod şekilleri birbiri ile aynı olarak elde edilmiştir. 1. ve 2. mod öteleme ve 3. mod burulma olarak ortaya çıkmıştır. Bir yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde son aşama numerik modelin kalibre edilmesidir.

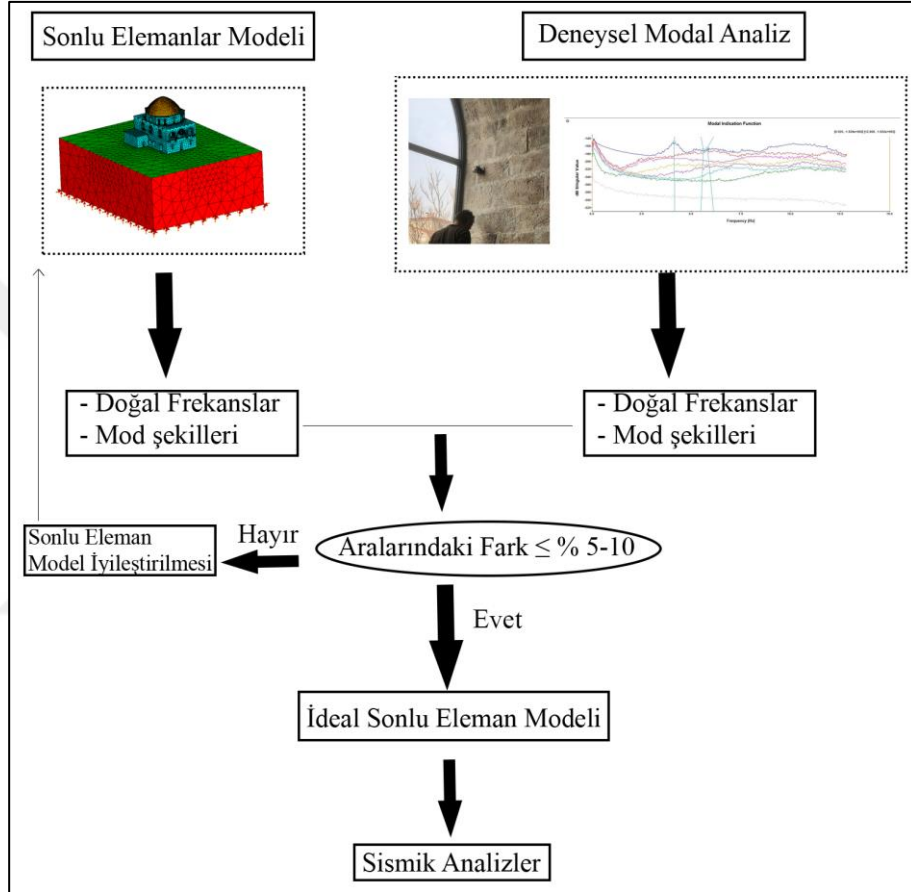


Şekil 6.11. Deneysel ve Numerik Mod Şekilleri

Sonlu eleman modelinin kalibre edilmesinde hangi temel parametrelerin yapının tepkilerini ne kadar değiştirdiğini görmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmelidir [156]. Bu bölümde, yapının malzeme özelliklerindeki değişimlerin, sonlu eleman modelinin doğal frekanslarına ve bu frekanslarla ilişkili mod şekillerine duyarlılığı incelenmiştir. Böylece hangi parametrelerin yapının tepkisini önemli ölçüde etkilediği değerlendirilebilir. Bilinmeyen girdi parametrelerindeki değişimlerin doğal frekanslarına olan duyarlılığı, duyarlılık katsayılarının hesaplanmasıyla değerlendirilir. Duyarlılık katsayısını hesaplamak için kullanılan eşitlik Denklem 6.8’de verilmiştir.

$$S_{ik}^f = 100 \times \frac{X_k}{f_i^{FEM}} \left| \frac{\Delta f_i^{FEM}}{\Delta X_k} \right| \quad (6.8)$$

Denklemden, X_k , k. referans belirsiz parametresi, f_i^{FEM} sayısal modelde ölçülen ilgili i. doğal frekansı ve Δ ise fark operatörüdür (yani analizdeki mevcut değer ile referans değer arasındaki fark). Denklem 6.8'e göre her bir duyarlılık katsayısı S_{ik}^f , k. belirsiz parametrenin %100'lük değişiminden kaynaklanan i. doğal frekansın göreceli değişiminin mutlak değerini temsil eder. Sonlu elemanlar modelinin kalibrasyon işleminin temel işlem basamakları Şekil 6.12'de gösterilmiştir.

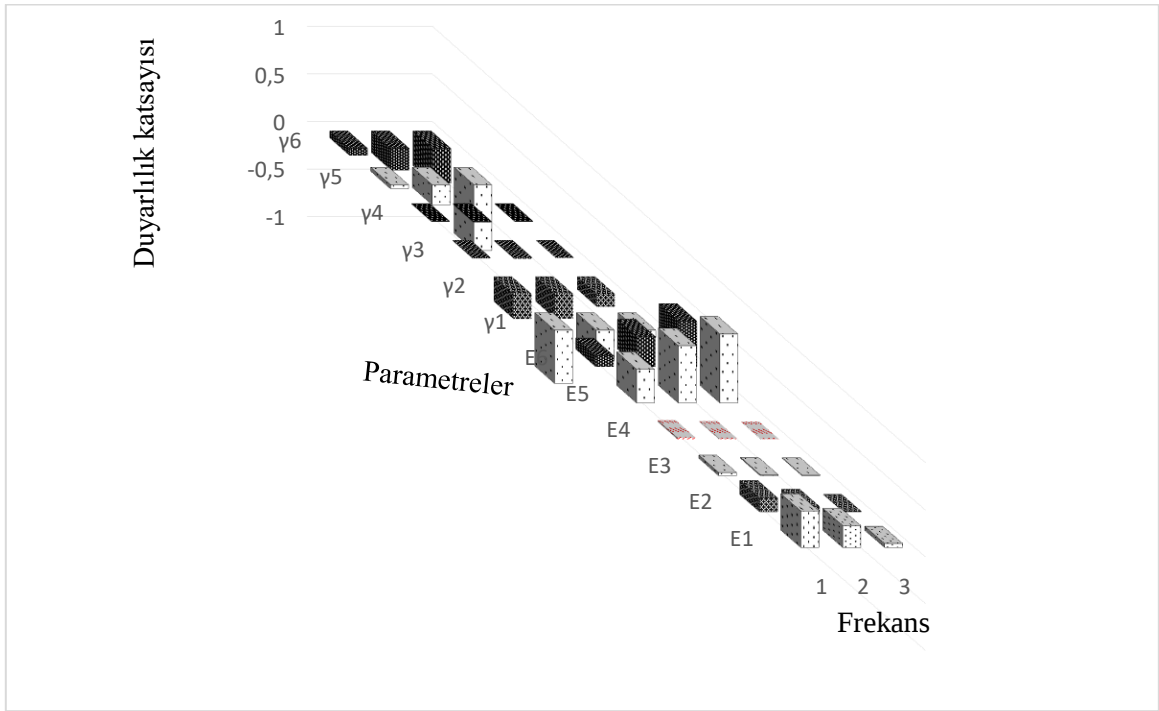


Şekil 6.12. Numerik ve Deneysel Modal Analiz akış diyagramı

Duyarlılık analizinde parametre olarak seçilen doğrusal özellikler ve bunların alt, üst sınırları Tablo 6.5'de verilmiştir. Tepki olarak yapının ilk üç frekans değeri seçilmiştir. Başlangıç referans model üzerinden farklı parametrelerin değerlerini değiştirerek bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Örnek yapıya ait orijinal taşın elastisite modülü (E_1 - E_2), restorasyon taşının elastisite modülü (E_3 - E_4), zeminin elastisite modülü (E_5 - E_6), sırasıyla orijinal taşın, restorasyon taşının ve zeminin yoğunlukları ise ($\gamma_1 - \gamma_6$) olarak adlandırılmıştır. Referans parametrelerin alt ve üst sınırlarını belirlemek amacıyla Mendes ve Lourenço [156] tarafından önerilen şekilde referans parametreler oldukça büyük bir varyasyon olarak sırasıyla 2'ye bölünmüş ve 2 ile çarpılmıştır.

Tablo 6.5. Duyarlılık analizi için seçilen parametreler

Özellik	Orijinal Taş			Restorasyon Taşı			Zemin		
E (MPa)	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır
	2250	4500	9000	1250	2500	5000	350	700	1400
$\gamma_{yığma}$ (g/cm ³)	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır	Alt Sınır	Ref.	Üst Sınır
	1.3	2.6	5.2	0.8	1.6	3.2	0.8	1.6	3.2



Şekil 6.13. Farklı parametre varyasyonları için duyarlılık grafiği

Duyarlılık analizi sonucunda, yapının ilk üç frekans değerini en çok etkileyen parametrelerin; zemin elastisite modülü ve yoğunluğu olduğu görülmektedir (Şekil 6.13). Orijinal taşın yoğunluğu arttıkça, 1. frekansın azaldığı görülmektedir ayrıca 1.frekası en çok etkileyen parametrelerin sırasıyla orijinal taşın yoğunluğu ve elastisite modülü olduğu görülmektedir. 2. frekans üzerinde birçok parametrenin etkisi birbirine yakın olarak elde edilmiştir. 3. frekans değerini en çok etkileyen parametreler sırasıyla zeminin elastisite modülü ve yoğunluğu olarak elde edilmiştir. Ayrıca zeminin yoğunluk parametresinin artışı, 3. frekans değerinin azalmasına sebep olmuştur. Duyarlılık analizi sonucuna göre deneysel ve numerik frekanslar ve mod şekillerinin birbirine daha yakın olmasını sağlamak amacıyla sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri güncellenmiştir. Sonlu eleman modeline ait güncellenmiş malzeme özellikleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.6. Güncellenmiş sonlu eleman özellikleri

Özellik	E (MPa)	γ (g/cm ³)	ν	f_c (MPa)	f_t (MPa)	G_c	G_f	C (MPa)	$\emptyset(o)$
Orijinal Bölüm	4500	2.6	0.24	4.5	0.45	11.8	0.023	-	-
Restorasyon Bölümü	2500	1.6	0.2	2.5	0.25	6.55	0.015	-	-
Kat 1 (5.75-11.46 m)	3200	2.65	0.24	3.2	0.32	8.384	0.018	-	-
Zemin Yakın Alan (0-10.30 m)	1100	1.25	0.2	-	-	-	-	0.22	12
Zemin Uzak Alan (10.3-30 m)	530	1.47	0.2	-	-	-	-	0.22	12

Sonlu elemanlar modeli güncellendikten sonra yapılan modal analiz sonucunda elde edilen modal parametreler ve deneysel modal parametreler Tablo 6.7’de karşılaştırılmıştır. Tablo 6.7’ye bakıldığında 1 ve 3. frekanslar arasındaki farklar %0 ve %0.16’ ya indirilmiştir. MGK değerleri ise 1. ve 3. frekanslar için %97.6 ve % 99.6’ ye çıkarılmıştır. 2 frekanslar arasındaki fark ise %2.97 ve MGK değeri %87.3 olarak elde edilmiştir.

Tablo 6.7. Model güncellemesinden sonra modal parametrelerin karşılaştırması

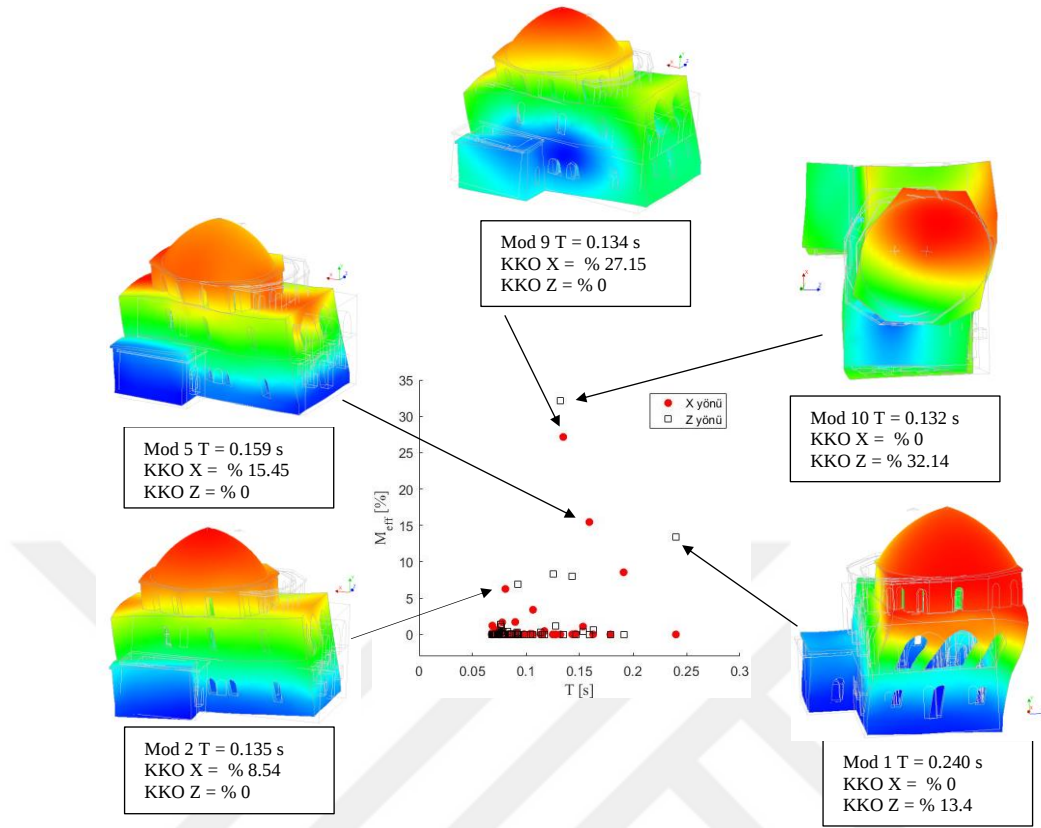
Mod	Deneysel Frekanslar (Hz)	Başlangıç Numerik Frekanslar	Güncellenmiş Numerik Frekanslar (Hz)	Fark (%)	Ortalama fark % 1.04	MGK (%)
1	4.16	4.26	4.16	0.00		97.6
2	5.39	5.12	5.23	2.97		87.3
3	6.13	6.32	6.14	0.16		99.6

7. YAPININ SİSMİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Önceki bölümde çevresel titreşim verileri kullanılarak seçilen sonlu elemanlar modeli kalibre edilmiştir ve bu bölümde kalibre edilen sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapının sismik performansı değerlendirilmiştir. Üstyapının modellenmesinde Total Strain-Based Crack (Toplam Şekil Değiştirme Bazlı Çatlak) malzeme modeli ve zemin ortamının modellenmesinde Mohr-Coloumb malzeme modeli kullanılmıştır. Güncellenmiş malzeme özellikleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Yapı üzerinde yapılan gözlemler sonucunda 5.75 m-11.46 m kotları arasındaki bölümde yer alan yapı taşlarında deformasyonlar olduğu görülmüş ve duyarlılık analizinde bu bölüme farklı bir malzeme parametresi tanımlanmış ve sonuçta bu bölümün elastisite modülünün yapının 2. mod frekansı üzerinde en büyük etkiye sahip parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca zeminin yapıya yakın olan bölgesi de ayrı bir malzeme özelliğiyle tanımlanmıştır. Sonlu eleman modelinde 172904 adet katı eleman ve 37304 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Zemin ortamının tabanında ankastre mesnetler ve yan yüzeylerde yay ve sönümleyiciler kullanılmıştır. Yapının sismik performansının değerlendirilmesinde modal analiz, lineer olmayan itme analizi ve lineer olmayan zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

7.1. Modal Analiz

İncelenen yapıların dinamik davranışlarının bir ön değerlendirmesini elde etmek amacıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli üzerinde modal (eigen- frequency) analiz gerçekleştirilir. Modal analiz, etkin kütleli katılım oranıyla (KKO) karakterize edilen hâkim titreşim modlarının deforme olmuş şekilleri ve bu modlara karşılık gelen periyotları gösterir [157]. Modal analiz sonucunda hâkim modlara ait mod şekilleri ve bu modlara ait etkin kütleli katılım oranları Şekil 7.1'de sunulmuştur. 1. mod z yönünde öteleme, 2. mod x yönünde öteleme, 3. mod düşey yönde öteleme ve 4. mod burulma şeklindedir. Ayrıca x yönünde en yüksek etkin kütleli katılım oranı (%27.15) 9. modda elde edilmiştir. Z yönünde ise en yüksek etkin kütleli katılım oranı (%32.14) 10. modda elde edilmiştir.



Şekil 7.1. Etkin Kütleli katılım oranları ve mod şekilleri

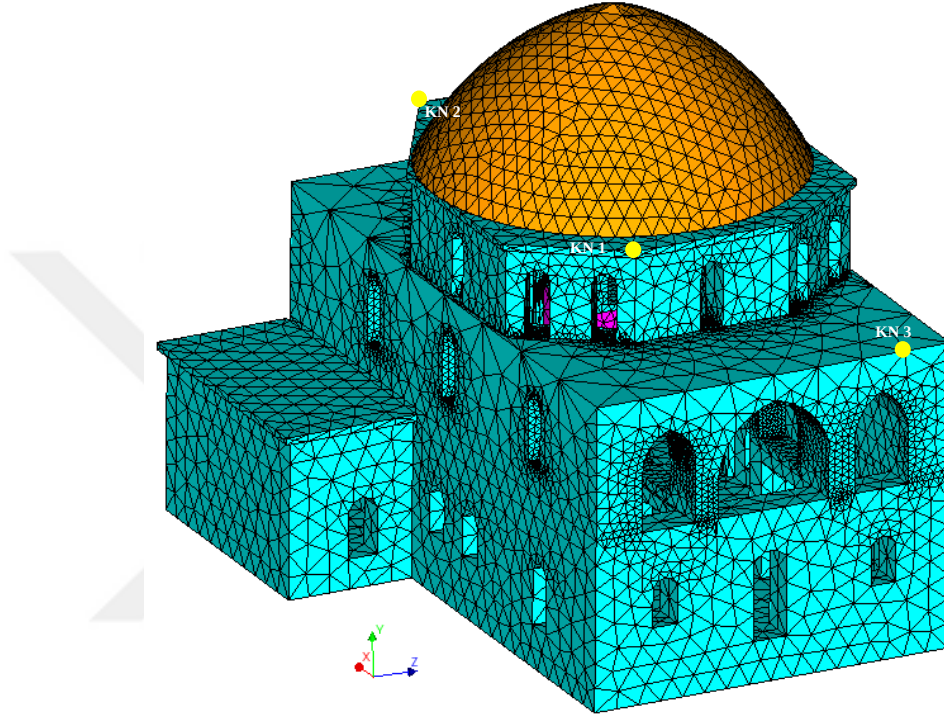
7.2. Lineer Olmayan İtme Analizi

Bu bölümde, seçilen örnek yapı için beklenen deprem hasarını değerlendirmek amacıyla Modal İtme Analizi (MİA) kullanılmıştır. MİA, çok katlı çerçeve yapılar için Chopra ve Goel [158] tarafından tek bir titreşim moduna orantılı kuvvet dağılımlarına dayalı bir itme yöntemi olarak geliştirilmiştir. Modal itme analizi yapılarak yapının yatay kuvvetler altında davranışı ve hasar mekanizmaları elde edilebilmektedir. Bu yöntemde öncelikle modal analiz yapılarak kütleli katılım oranı en yüksek modlar belirlenir. Daha sonra Denklem 7.1 kullanılarak yapıya etki ettirilecek yatay yük dağılımı hesaplanır.

$$s_n^* = M\phi_n \quad (7.1)$$

Denklemden yer alan M kütle matrisi ve ϕ_n n. moda ait mod şeklidir. Bu yöntemde yükler yapıya monolitik olarak etki ettirilir. Yapı göçme noktasına ulaşana kadar yük artırılmaya devam eder. Bu analiz sonucunda yapı üzerinde seçilen kontrol noktasının yer değiştirmesine karşılık taban kesme kuvveti eğrisi elde edilir. Bu eğriye kapasite eğrisi adı verilmektedir. Böylece yapının yatay yükler altındaki yük taşıma kapasitesi elde edilir [159]. Tarihi yapılarda uygulanan itme analizleri için

kontrol noktasının seçimi tartışmalı bir konudur [160], çünkü tarihi yapılarda davranış genellikle global değildir [161]. Ancak bu konuda yapılmış bazı çalışmalarda kontrol noktasının genellikle göçme mekanizmasının ortaya çıkması muhtemel makro bloklar üzerinde yüksek noktalarda seçilmesi önerilmiştir [162]. Yapının sonlu elemanlar modeli ve seçilen kontrol noktaları Şekil 7.2’de görülmektedir.



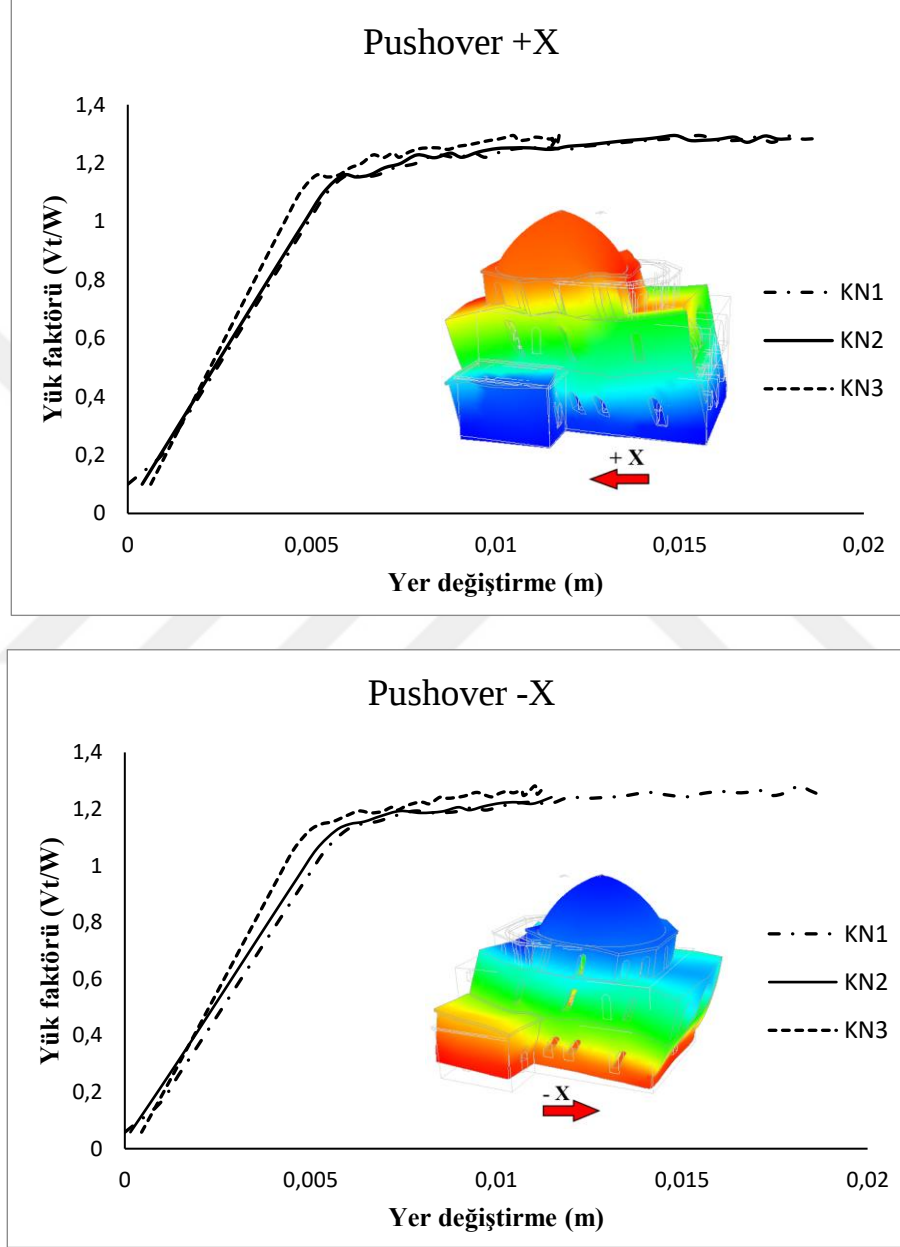
Şekil 7.2. Yapı üzerinde seçilen kontrol noktaları

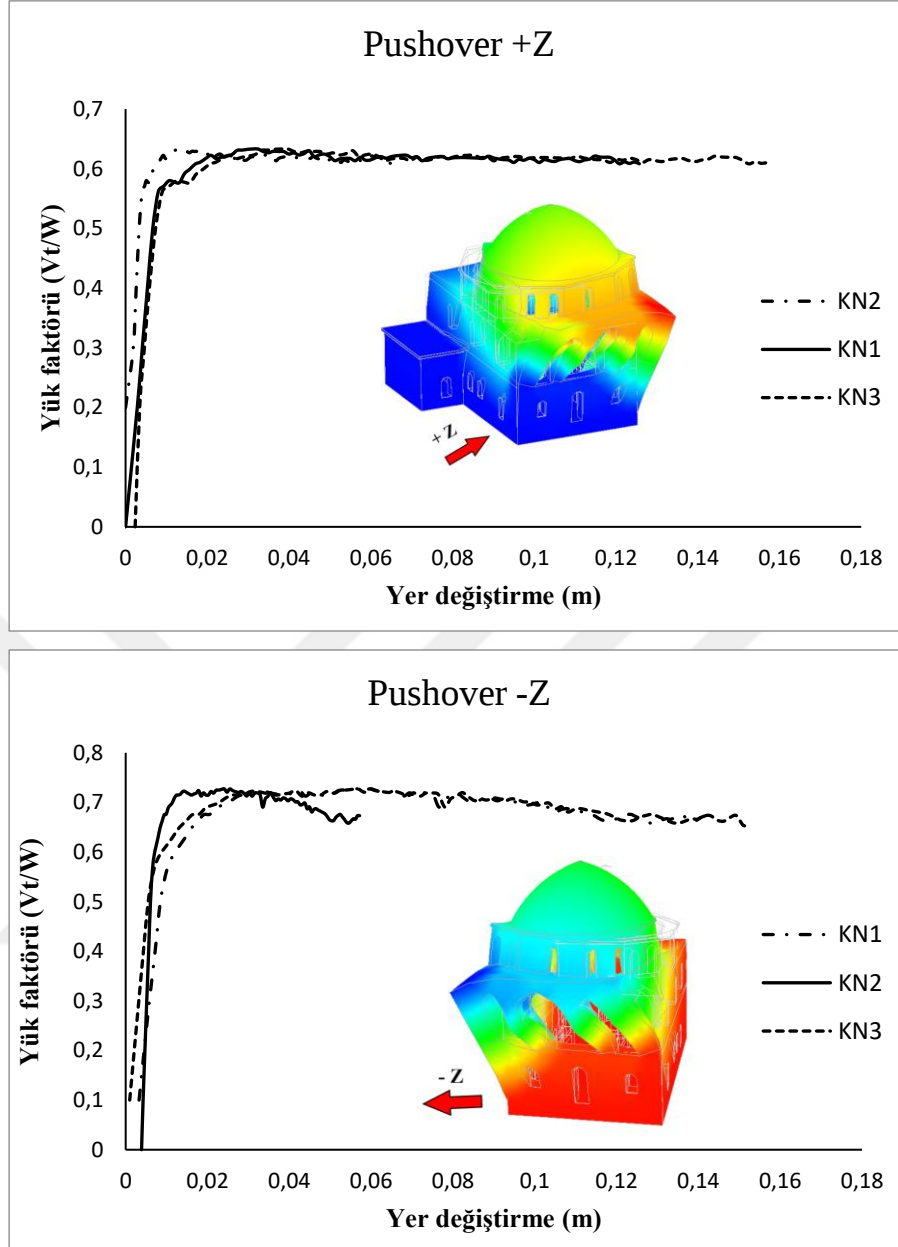
Lineer olmayan statik analiz sonucunda elde edilen kapasite eğrisi kullanılarak yapının performansını elde etmek mümkündür. İtme eğrisi kullanılarak yapının performansını belirlemek için literatürde birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan yöntemler; Kapasite Spektrumu Metodu (KSM) [163], N2-Metodu [164] ve Deplasman Katsayıları Metodudur. Bu tez kapsamında lineer olmayan statik analiz yöntemi kullanılarak yapılan sismik ve performans değerlendirmesi KSM tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin uygulanmasında aşağıda verilen adımlar izlenmiştir.

- Kapasite (itme) eğrisinin belirlenmesi
- Deprem seviyesinin ve sismik talebin belirlenmesi
- Yapısal performansın değerlendirilmesi

7.2.1. Kapasite eğrisinin elde edilmesi

Yapının kapasite eğrisinin elde edilmesi amacıyla yapıya +X, -X, +Z ve -Z yönlerinde itme kuvveti uygulanmıştır. İtme analizi sonucunda yapının 3 farklı kontrol noktası için elde edilen kapasite eğrileri Şekil 7.3’de verilmiştir.





Şekil 7.3. Yapının farklı kontrol noktaları için kapasite eğrileri

Şekil 7.3 incelendiğinde sırasıyla +X, -X, +Z ve -Z eksenleri için maksimum yer değiştirme değerleri 0.0189 m, 0.0191 m, 0.156 m, 0.103 m olarak elde edilmiştir. X ekseninde uygulanan itme sonucu elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri KN1 kontrol noktasında meydana gelmiştir. Z ekseninde uygulanan itme sonucu elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri ise KN3 kontrol noktasında elde edilmiştir. En düşük yer değiştirme değerlerine bakıldığında ise, sırasıyla +X, -X, +Z ve -Z eksenleri için 0.0119 m, 0.0180 m, 0.0537 m, 0.0397 m olarak elde edilmiştir. X ve Z ekseninde uygulanan itme sonucu elde edilen en düşük yer değiştirme değerleri KN2 kontrol noktasında elde edilmiştir. Şekil 7.3’de yer alan Yük faktörü- Yer değiştirme eğrilerinden görüldüğü üzere +X, -X, +Z ve -Z yönleri için KN2 ve KN3 kontrol noktaları daha az

yer deęiřtirme yapmıřtır. Kontrol noktaları arasında en dūřuk kapasite KN1 kontrol noktasında meydana gelmiřtir. KN2 ve KN3 kontrol noktaları daha rijit bir davranıř sergilemiřtir. Bu nedenle yapının performans noktalarının tayininde bundan sonraki ařamalarda KN1 kontrol noktasına ait kapasite eęrileri dikkate alınacaktır. řekil 7.3’de verilen kapasite eęrileri Denklem 7.2 ve 7.3 kullanılarak modal kapasite eęrisine dōnūřtūrūlmūřtır. KN1 kontrol noktası için +X, -X, +Z ve -Z yōnlerinde elde edilen modal kapasite eęrileri řekil 7.4’de sunulmuřtur.

$$a_1^{(i)} = \frac{V_{x1}^{(i)}}{M_{x1}} \quad (7.2)$$

$$d_1^{(i)} = \frac{U_{xN1}^{(i)}}{\phi_{xN1}\Gamma_{x1}} \quad (7.3)$$

Denklem (7.2) ve (7.3)’ de yer alan ifadelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

$a_1^{(i)}$ = Spektral ivme

$V_{x1}^{(i)}$ = Taban kesme kuvveti

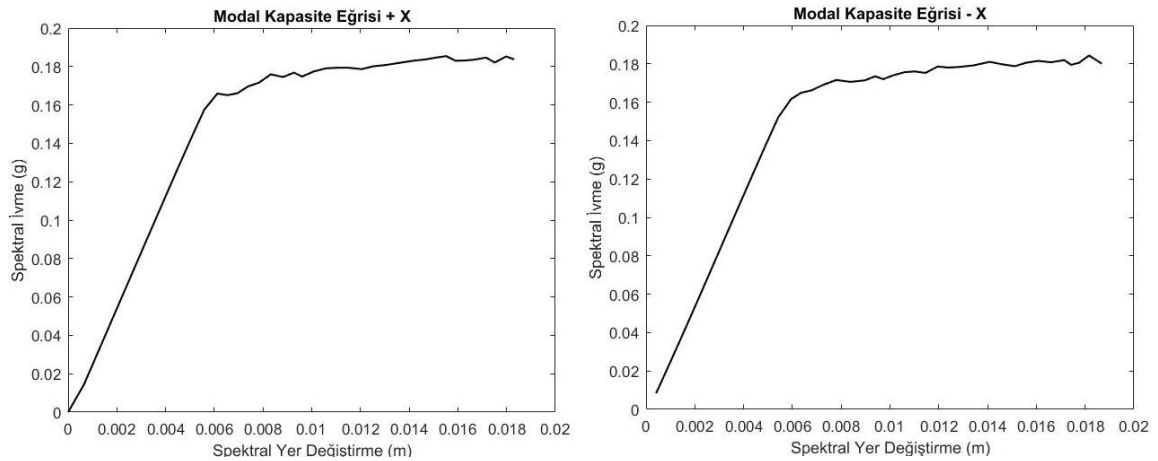
M_{x1} = Etkili kūtle

$d_1^{(i)}$ = Spektral değişim

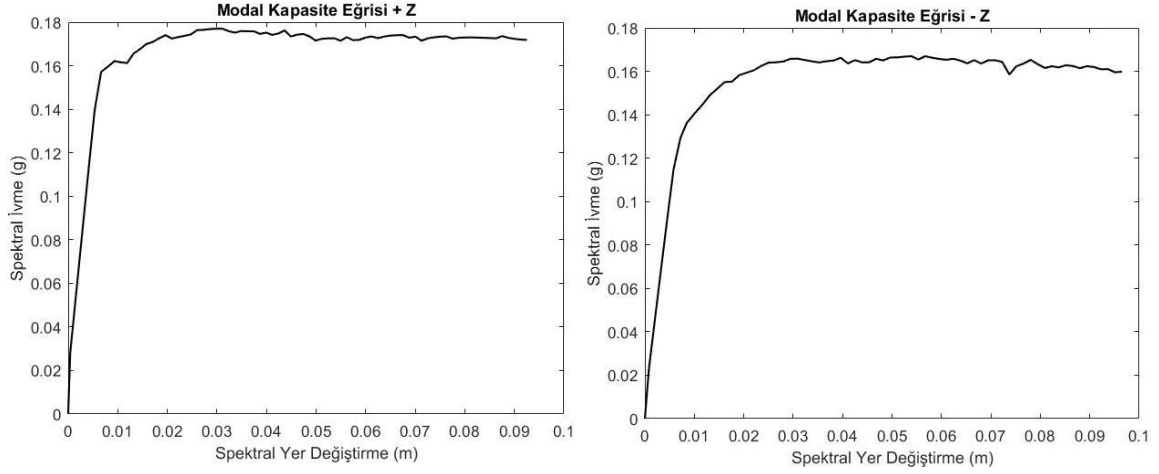
$U_{xN1}^{(i)}$ = Yatay yer değiştirme

ϕ_{xN1} = Tepe noktası mod şekli

Γ_{x1} = Mod katılım faktōrū



şekil 7.4. Modal kapasite eğrileri



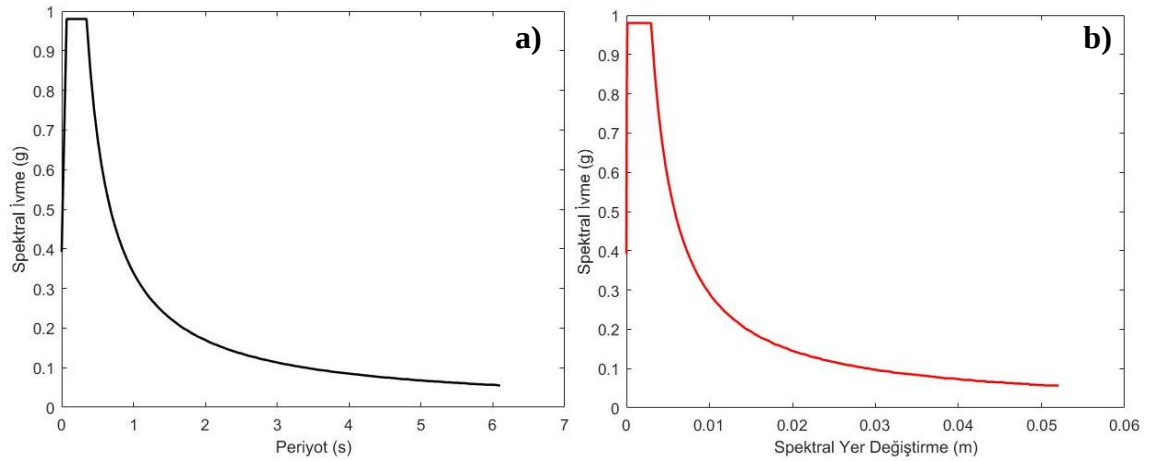
Şekil 7.4. Devam ediyor

7.2.2. Sismik Talep Eğrisi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY- 2018)'ne göre yapının performans noktasını lineer olmayan statik analiz yöntemi ile belirlemek için Türkiye İnteraktif Deprem Haritasından alınan elastik tasarım spektrumu kullanılmalıdır. Yapının koordinatları kullanılarak elde edilen elastik tasarım spektrumu Şekil 7.5a'da sunulmuştur. Yatay tasarım spektrumu, 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZC yerel zemin sınıfı için elde edilmiştir. TBDY-2018'e göre yapının performans noktasının elde edilmesi için tasarım spektrum eğrisinin, Denklem 7.4 yardımıyla spektral ivme-spektral deplasman tepki spektrumu formatına (talep eğrisi) dönüştürülmüştür (Şekil 7.5b).

$$S_{ai} = w^2 S_{di} \quad (7.4)$$

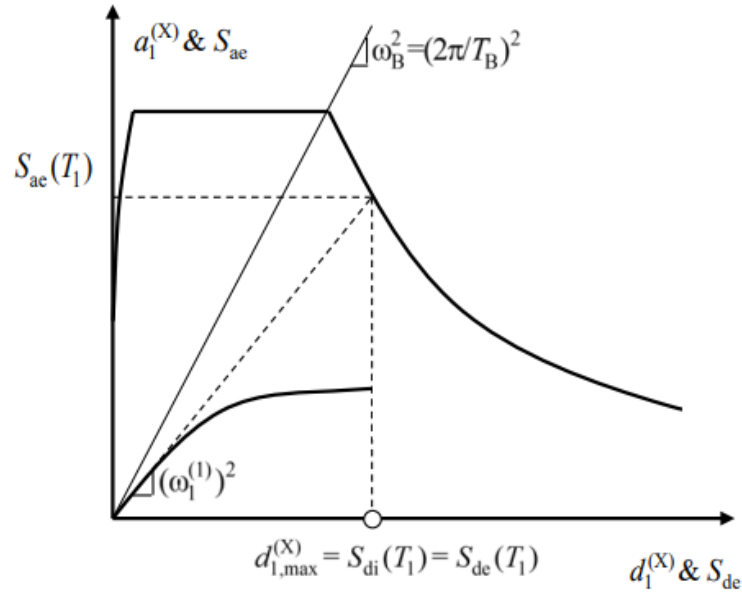
Denklemde yer alan, S_{ai} = Spektral ivme, w = Açısal frekans ve S_{di} = Spektral yer değiştirme'dir.



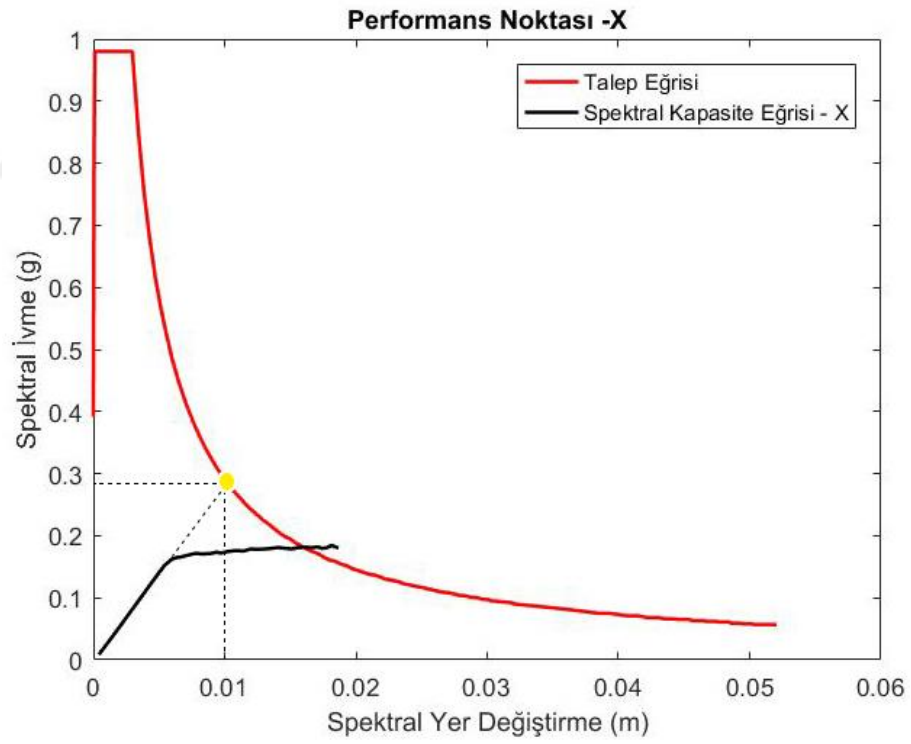
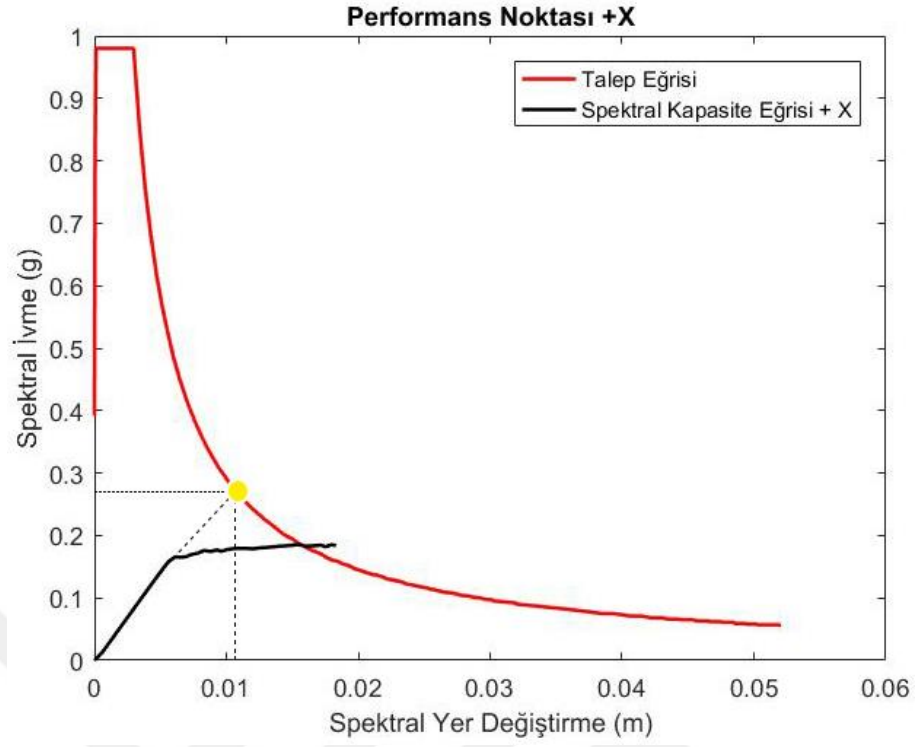
Şekil 7.5. Elastik tasarım spektrumu ve talep eğrisi

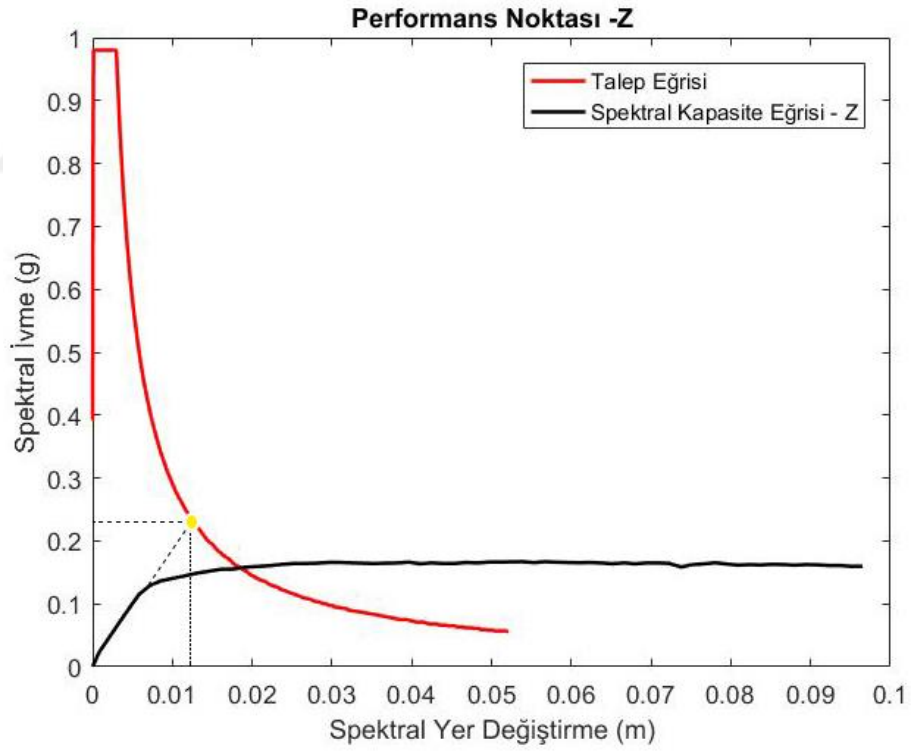
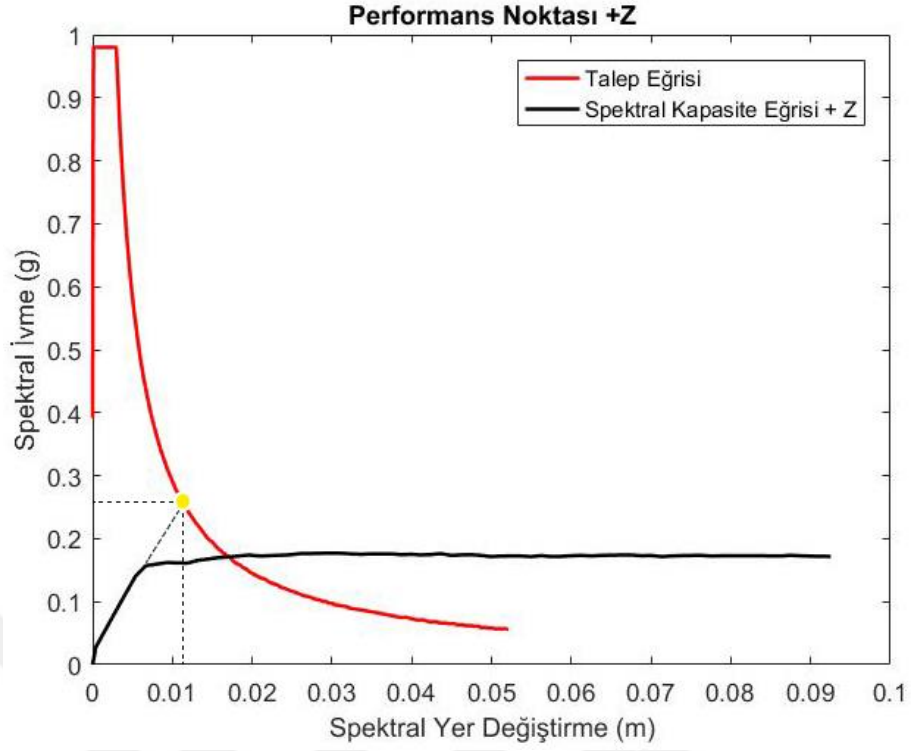
7.2.3. Performans Değerlendirmesi

TBDY-2018 yönetmeliğine göre yapının performans noktasının belirlenmesi için modal kapasite eğrisi ve talep eğrisinin aynı grafik üstünde çizilmesi gerekmektedir. Daha sonra modal kapasite eğrisinin başlangıç eğrisi uzatılarak talep eğrisi ile kesiştirilir ve yapının performans noktası elde edilir. TBDY- 2018'e göre yapının performans noktasının tayini şematik olarak Şekil 7.6'da verilmiştir. Bu çalışma kapsamında +X, -X, +Z ve -Z yatay yönlerinde elde edilen tüm kapasite eğrileri için performans noktaları belirlenmiştir (Şekil 7.7).



Şekil 7.6. TBDY-2018'e göre performans noktasının tayini





Şekil 7.7. Yapının +X, -X, +Z ve -Z eksenlerinde performans noktaları

Spektral yer değiştirmeler belirlendikten sonra, spektral yer değiştirme değerleri Denklem 7.3 kullanılarak yanal yer değiştirme değerlerine dönüştürülmüştür. Tablo 7.1'de spektral ve yanal yer değiştirmeler gösterilmektedir.

Yapıların performans düzeyleri, yüksek performanstan düşük performansa doğru, bina performans düzeyleri şu şekilde sınıflandırılmıştır: Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi, Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi, Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi.

KK performans düzeyi, bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın olmadığı veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde olduğu durumları kapsar.

SH performans düzeyi, yapının taşıyıcı elemanlarında sınırlı miktarda hasarın ortaya çıktığı, yani doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyine odaklanır.

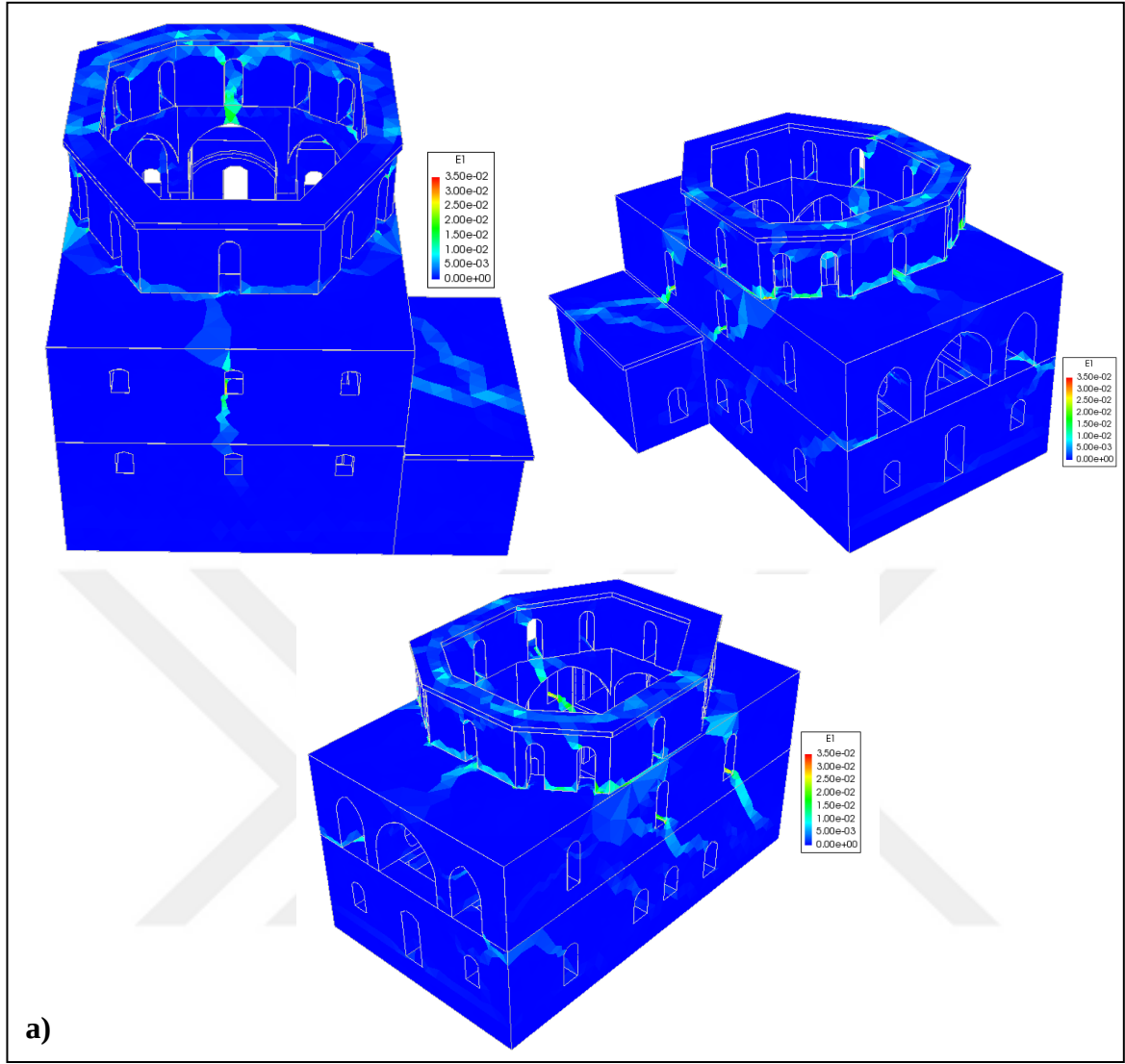
KH performans düzeyi, can güvenliğini sağlamak amacıyla yapının taşıyıcı elemanlarında çok ağır olmayan ve genellikle onarılabilir düzeydeki hasarlara karşı gelir.

GÖ performans düzeyi, yapının taşıyıcı elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi durumları ele alır. Bu performans düzeyinde, binanın kısmen veya tamamen göçmesi önlendiği bir durum söz konusudur. Tablo 7.1'de TBDY-2018 sınır göreceli öteleme değerleri ile karşılaştırıldığında incelenen yapının performans noktasında yönetmelik için verilen sınır değerleri sağladığı görülmektedir.

Tablo 7.1. Yapının performans noktaları ve maksimum göreceli kat ötelemeleri

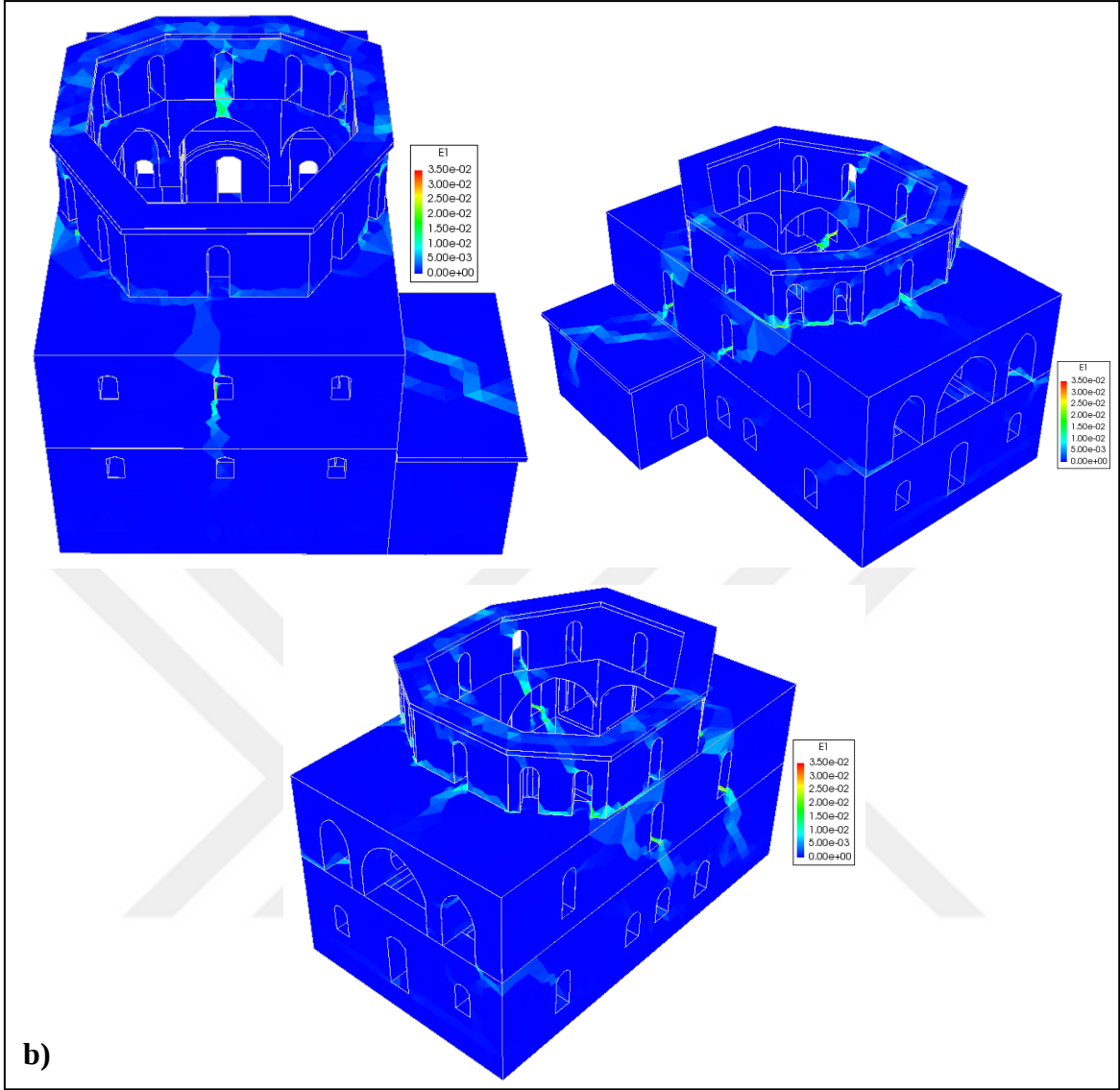
	+ X	- X	+ Z	- Z
Yer değiştirme (m)	0.0110	0.0103	0.0116	0.0129
Spektral İvme (g)	0.282	0.282	0.251	0.226
Maksimum göreceli ötelenme (%)	0.076	0.072	0.104	0.165
Limit göreceli öteleme oranı (%)	0.10	0.30	0.70	1.00
(TBDY-2018)	(KK)	(SH)	(KH)	(GÖ)

+X, -X, +Z ve -Z yönlerinde uygulanan lineer olmayan itme analizinin son adımına ait çekme şekil değiştirmesine ait kontür diyagramı Şekil 7.8'de paylaşılmıştır. Şekil 7.8 incelendiğinde X yönündeki itme sonucunda en büyük çekme şekil değiştirmelerinin yapının kasnak bölgesinde yer alan pencere kenarlarında meydana geldiği görülmektedir. Z yönünde uygulanan itme sonucunda ise en büyük çekme şekil değiştirmelerinin yapının giriş cephesinde yer alan kemerlerde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca şekil değiştirme değerlerine bakıldığında Z yönünde uygulanan itme sonucunda yapıda daha fazla şekil değiştirme meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca basınç altında şekil değiştirme değerlerinin +Z yönünde en büyük değerlerine ulaştığı görülmüştür ve +Z yönünde basınç şekil değiştirmesine ait kontür diyagramı Şekil 7.9'da verilmiştir. Şekil 7.9 incelendiğinde basınç altında şekil değiştirme dağılımının giriş bölümündeki kemerlerde yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 7.8. İtme analizi sonucunda çekme şekil değiştirmesi dağılımı a) +X b) -X c) +Z d) -Z

+X, -X, +Z ve -Z yönlerinde uygulanan lineer olmayan itme analizinin son adımına ait asal çekme ve basınç gerilme dağılımı ise Şekil 7.10'da sunulmuştur. Şekil 7.10 incelendiğinde asal çekme gerilmelerinin tüm itme yönleri için pencere kenarları ve kemerlerde meydana geldiği görülmektedir. Maksimum asal basınç gerilmeleri ise X yönündeki itme sonucunda kasnak üzerinde yer alan pencereler ve iç kemerlerde meydana geldiği görülmüştür. Z yönündeki itme sonucunda ise giriş bölümünde yer alan büyük kemerlerde ve kasnak ile duvarın birleşim noktalarında meydana gelmiştir. Lineer olmayan itme analizi sonucunda elde edilen maksimum asal basınç ve çekme gerilmeleri Tablo 7.2'de sunulmuştur.

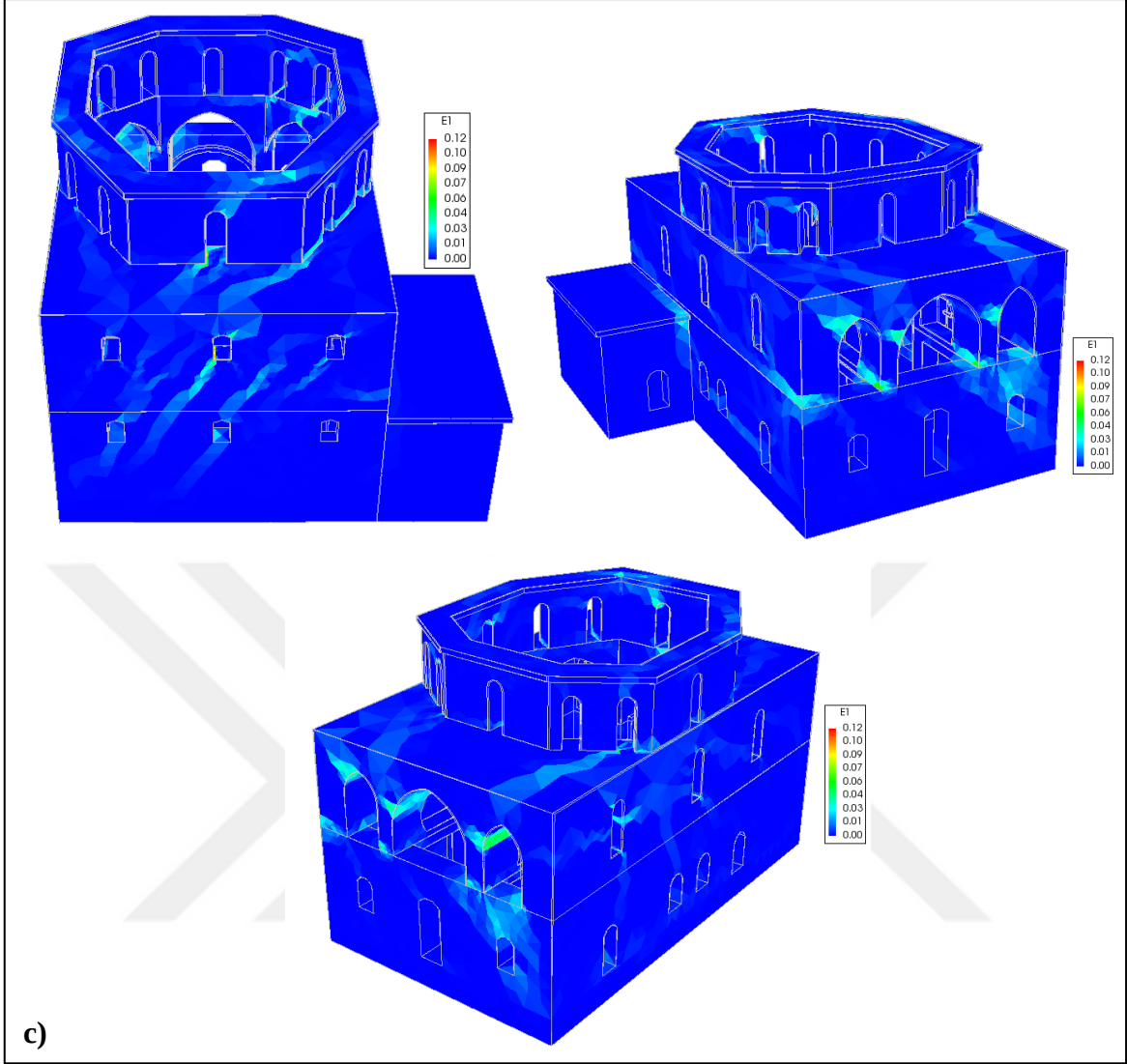


Şekil 7.8. Devam ediyor

Tablo 7.2. İtme Analizi Sonucu Elde Edilen Maksimum Asal Gerilmeler

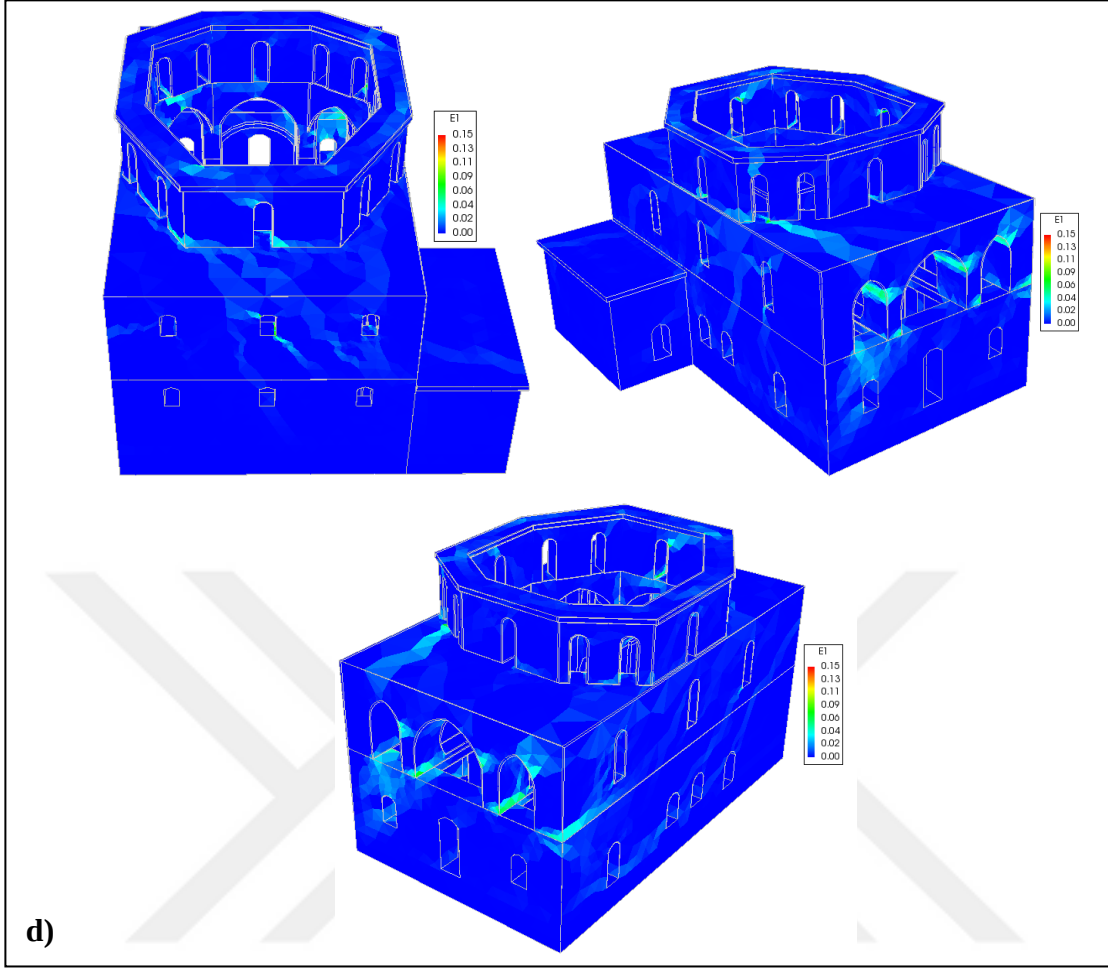
	+ Z	- Z	+ X	- X
Basınç (MPa)	8	7.5	5	6
Çekme (MPa)	1.75	1.25	0.7	0.9

Tablo 7.2 incelendiğinde maksimum asal gerilmelerin Z yönündeki itme sonucu meydana geldiği görülmektedir. Çekme şekil değiştirmesi ve asal gerilme dağılımları incelendiğinde +Z yönünde etkiyecek bir kuvvet etkisi altında yapıda daha büyük hasarlar meydana gelmesi beklenmektedir. Ayrıca yapının hasar mekanizmasını incelemek amacıyla Şekil 7.11’de yapının +Z yönündeki itme etkisi altında çatlak ilerlemesi verilmiştir.

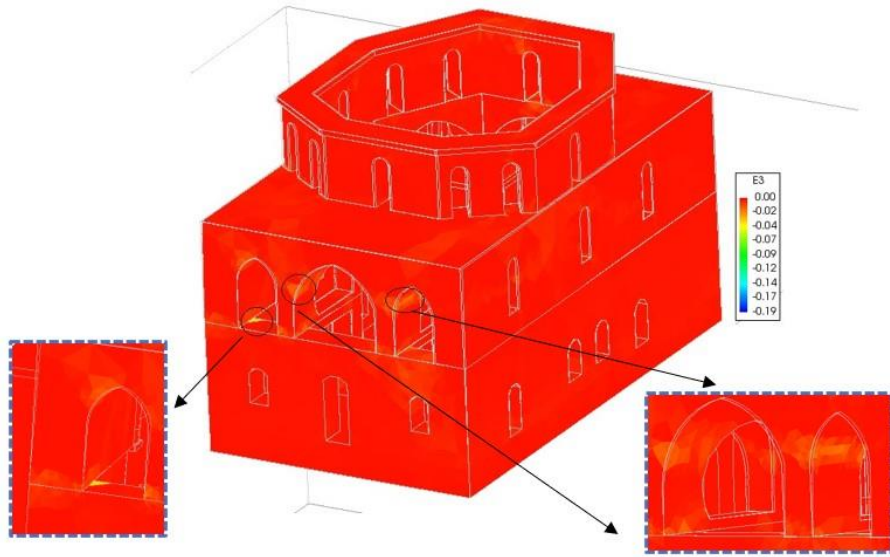


Şekil 7.8. Devam ediyor

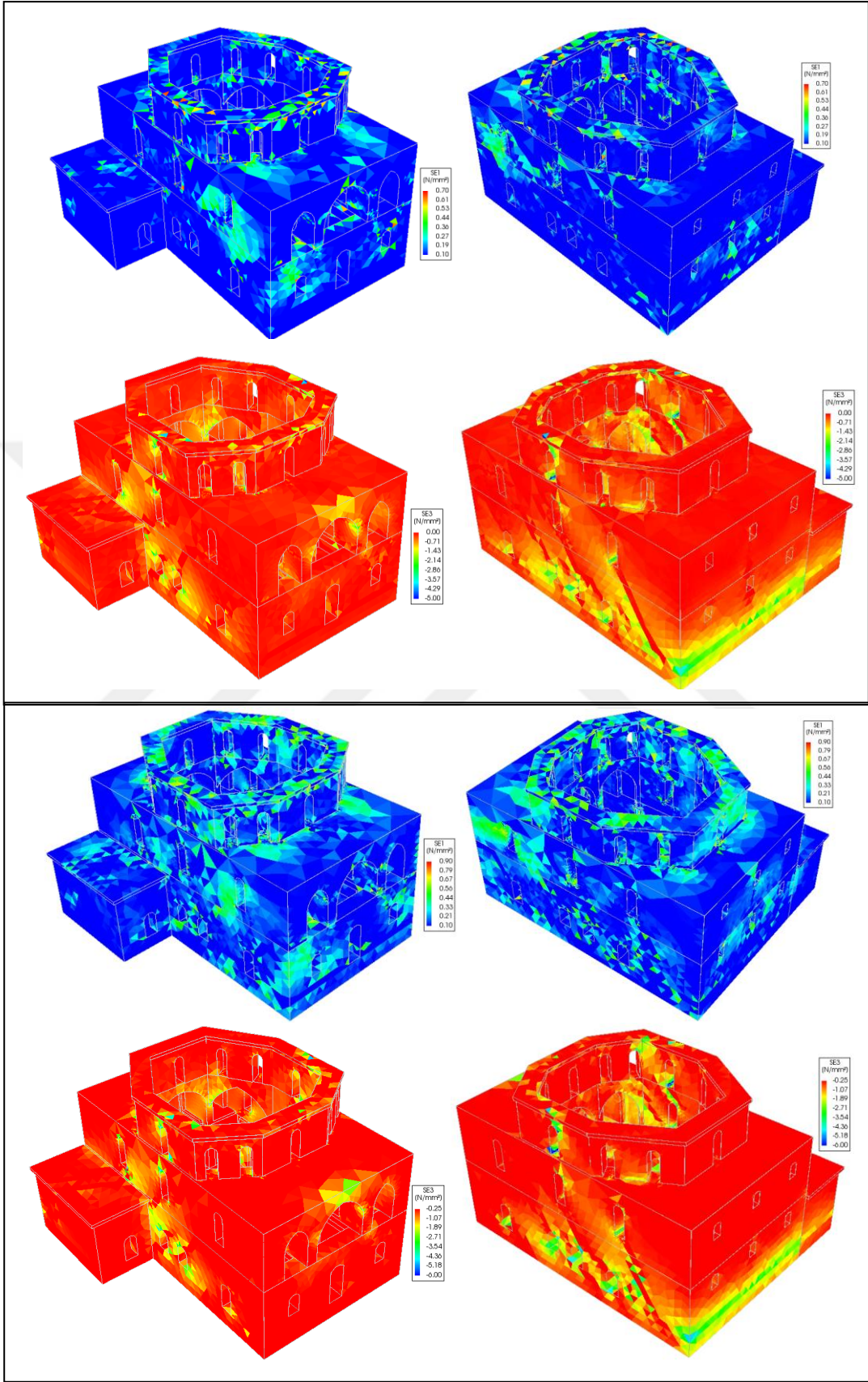
Şekil 7.11’de verilen çatlak ilerlemesi incelendiğinde yapının son itme adımında elde edilen çatlak mekanizması ile çekme şekil değiştirmesi dağılımının uyumlu olduğu görülmektedir.



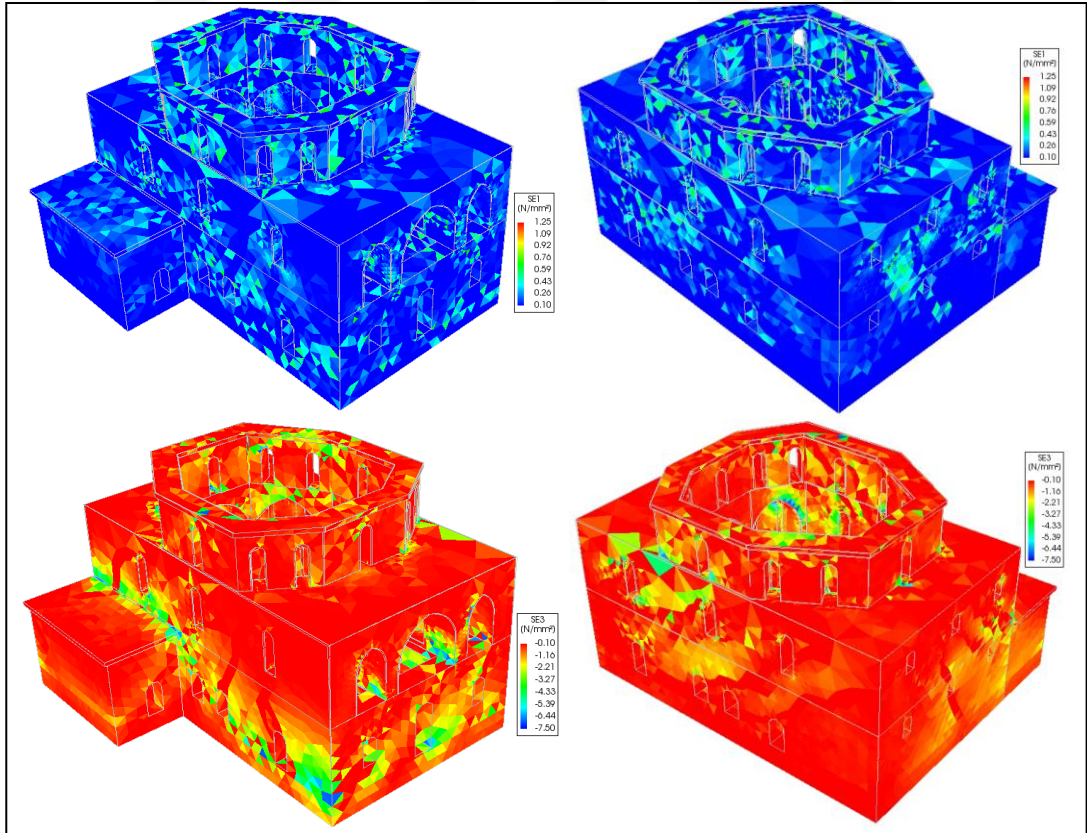
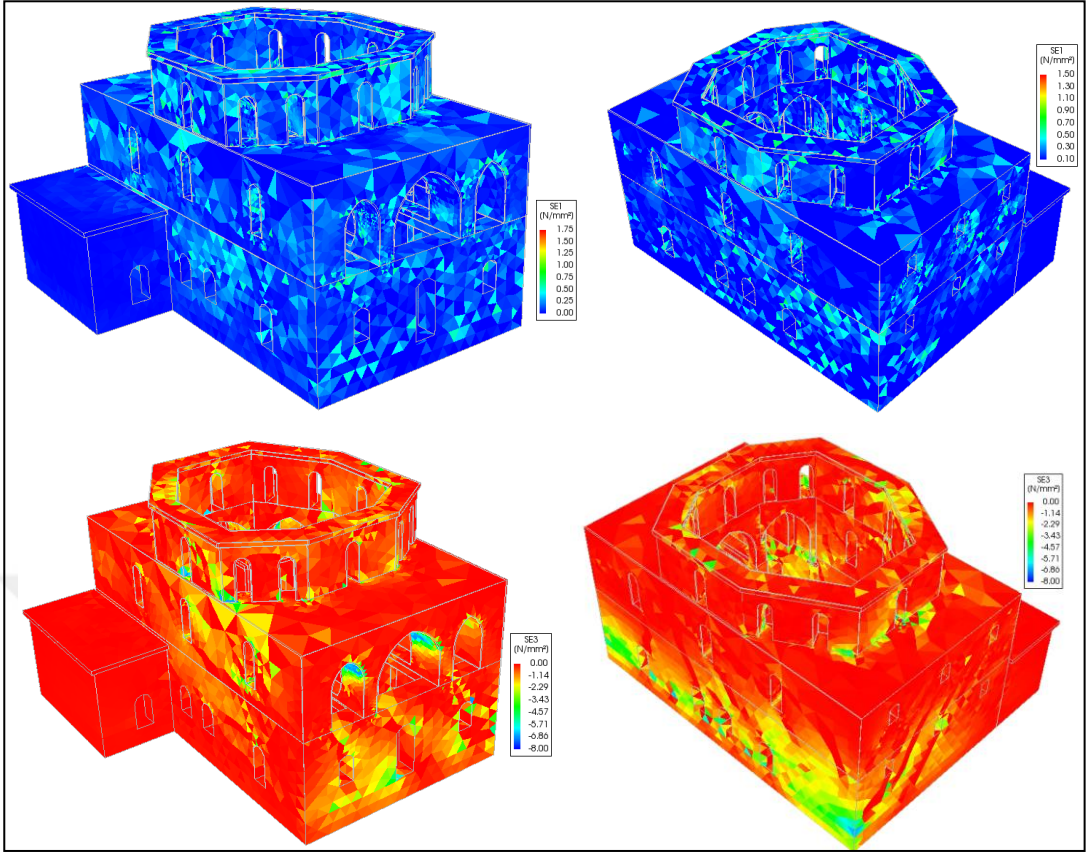
Şekil 7.8. Devam ediyor



Şekil 7.9. +Z yönünde itme sonucunda basınç şekil değişimi

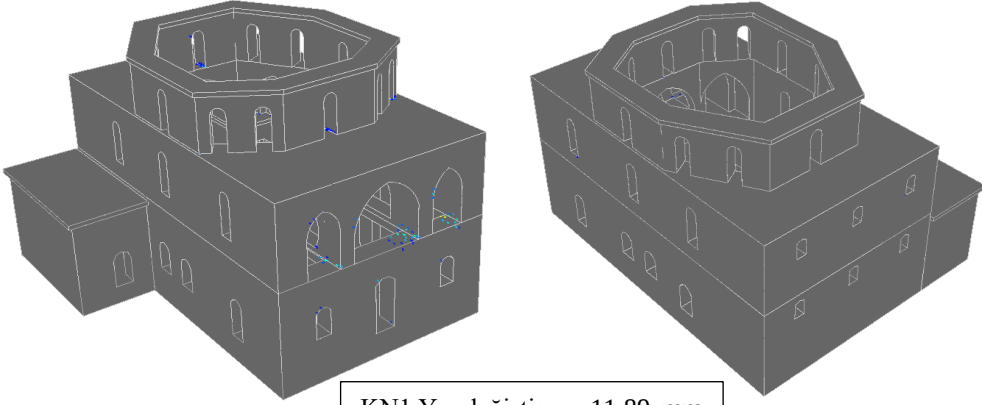


Şekil 7.10. İtme analizi sonucunda elde edilen asal basınç ve çekme gerilmesi dağılışı a) +X b) -X c) +Z d) -Z

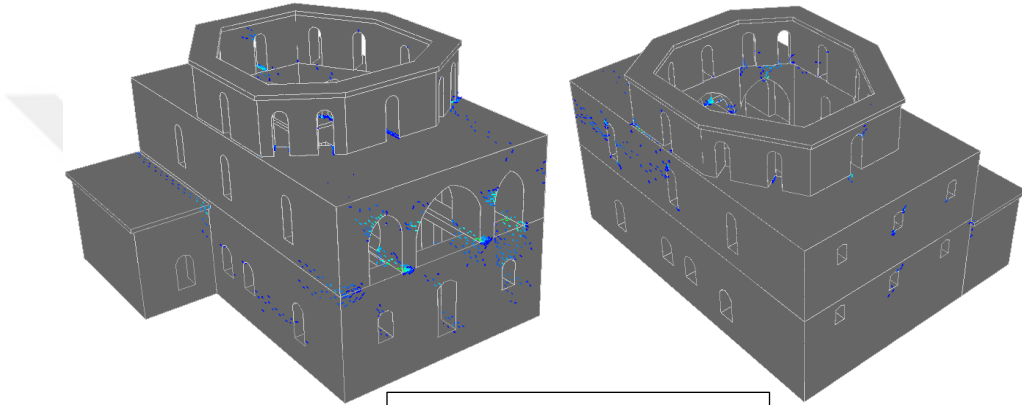


Şekil 7.10. Devam ediyor

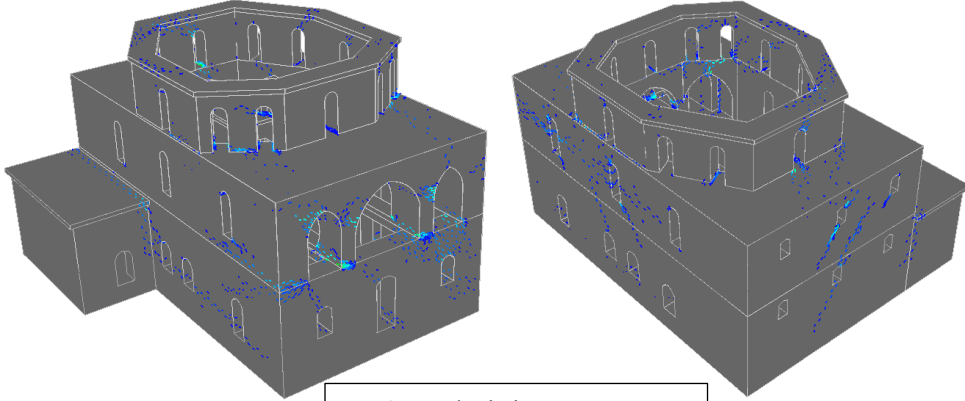
KN1 Yer değiştirme: 5.34 mm



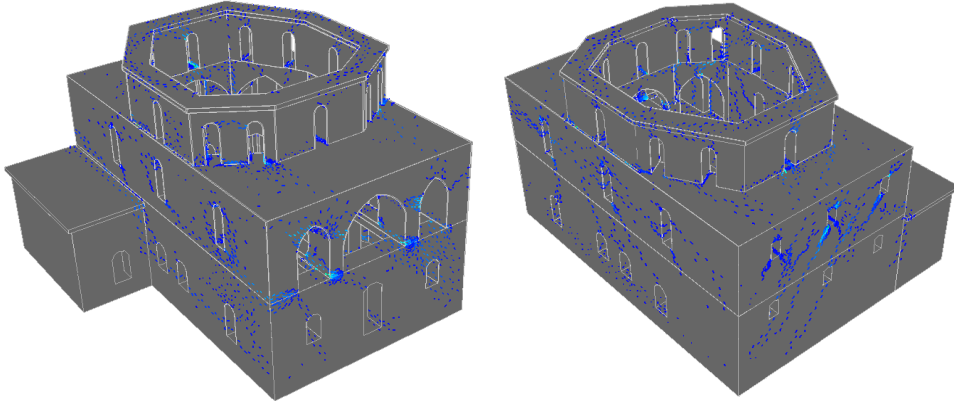
KN1 Yer değiştirme: 11.89 mm

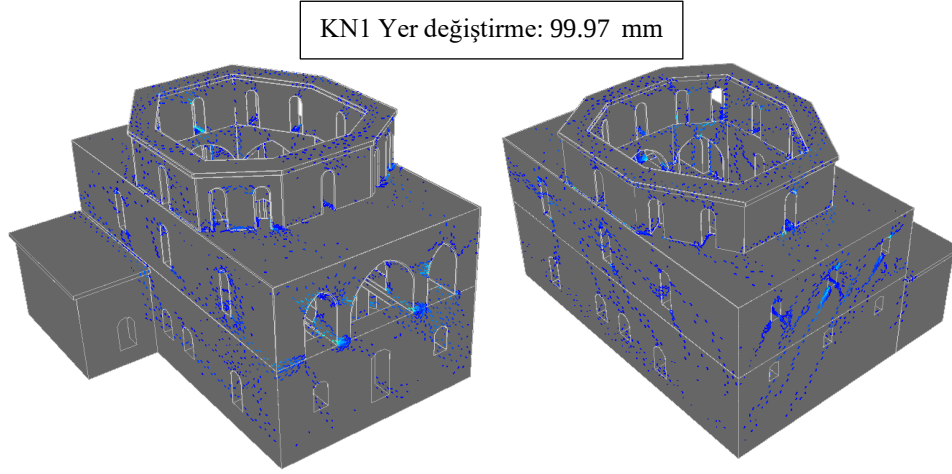


KN1 Yer değiştirme: 24.73 mm



KN1 Yer değiştirme: 75.04 mm





şekil 7.11. +Z yönünde itme sonucunda yapıda meydana gelen çatlak ilerlemesi

7.3. Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

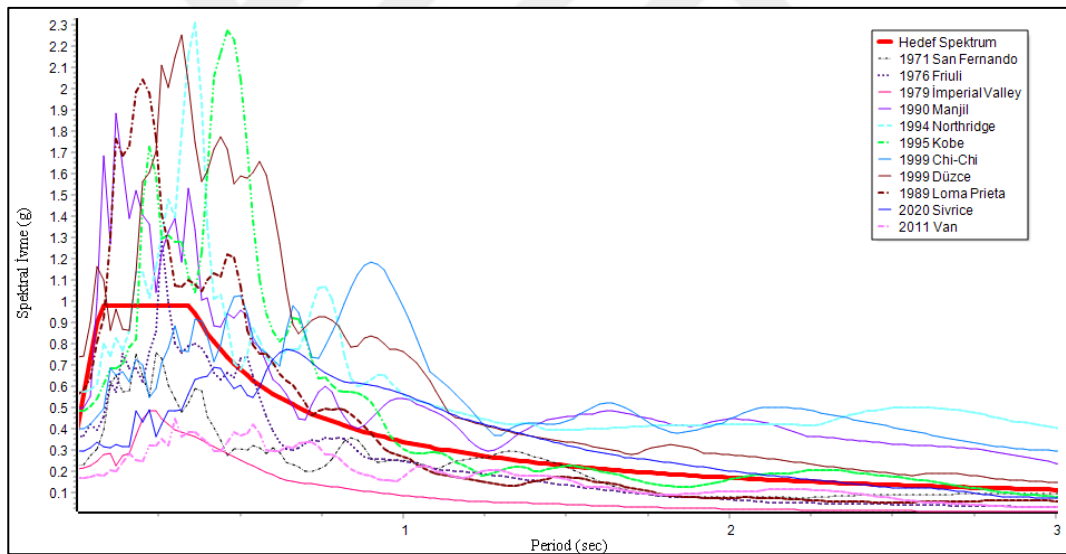
Lineer olmayan Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz (ZTA), doğrusal olmayan malzeme davranışına sahip yapıların, sismik risk değerlendirmesi için en gelişmiş araçtır [159]. Yöntemin genel formülasyonu için [165] bakılabilir. ZTA, günümüzde deprem yer hareketi veri tabanlarına ulaşımın kolaylaşması, bilgi işlem gücünün artması neticesinde tarihi yapıların sismik analizinde sıklıa tercih edilmeye başlanmıştır. Bu bölümde, Tarihi Taşhoran Kilisesinin farklı yer hareketleri altındaki sismik davranışları hakkında derin bir fikir edinmek amacıyla lineer olmayan zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. ZTA analizlerinde kullanılmak üzere TBDY-2018’de önerildiği üzere 11 adet ölçeklendirilmiş gerçek deprem kaydı kullanılmıştır. Lineer olmayan zaman tanım alanında analizlerin yapılmasında DIANA FEA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan sonlu eleman modeline ait detaylı bilgiler çalışmanın önceki bölümlerinde verilmiştir. Doğrusal olmayan denge denklemlerinin çözümünde Quasi (Secant) Newton yöntemi kullanılmıştır. Tüm modellerde, lineer olmayan sismik analizlerin başlangıç değeri olarak, statik analiz sonuçları dikkate alınmıştır. Denge denklemlerinin çözümünde kütle ve rijitlik orantılı (Rayleigh) sönüm modeli kullanılmıştır. Lineer olmayan dinamik analizlerde yapının sönüm oranı geçmişte yapılan çalışmalar dikkate alınarak %5 olarak seçilmiştir [75], [131], [132]. Deprem ivmeleri yapıya +Z doğrultusu boyunca uygulanmıştır.

7.3.1. Zaman Tanım Alanında Analizde Kullanılacak Deprem Kayıtlarının Seçimi

Çalışmanın bu bölümünde, Zaman tanım alanında analizlerde kullanılmak üzere TBDY-2018’de önerildiği üzere 11 adet ölçeklendirilmiş gerçek deprem kaydı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deprem kayıtları, Peer Strong Motion Database NGA-West 2 (PEER) ve Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sisteminden (AFAD) alınmıştır. Deprem kayıtlarının seçilmesinde, TBDY-2018’de yer alan prosedürler dikkate alınmıştır. Buna göre zaman tanım alanında analizlerde kullanılacak

deprem kayıtlarının, yapının koordinatlarına, yerel zemin sınıfına ve deprem yer hareketi düzeyine göre tanımlanacak yatay elastik tasarım spektrumu kullanılarak ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında seçilen örnek yapı olan Malatya Taşhoran Kilisesi 38.352203° enlem ve 38.308397° boylamı üzerinde yer almaktadır. Yapılan zemin etüt çalışmasına göre yerel zemin sınıfı ZC'dir.

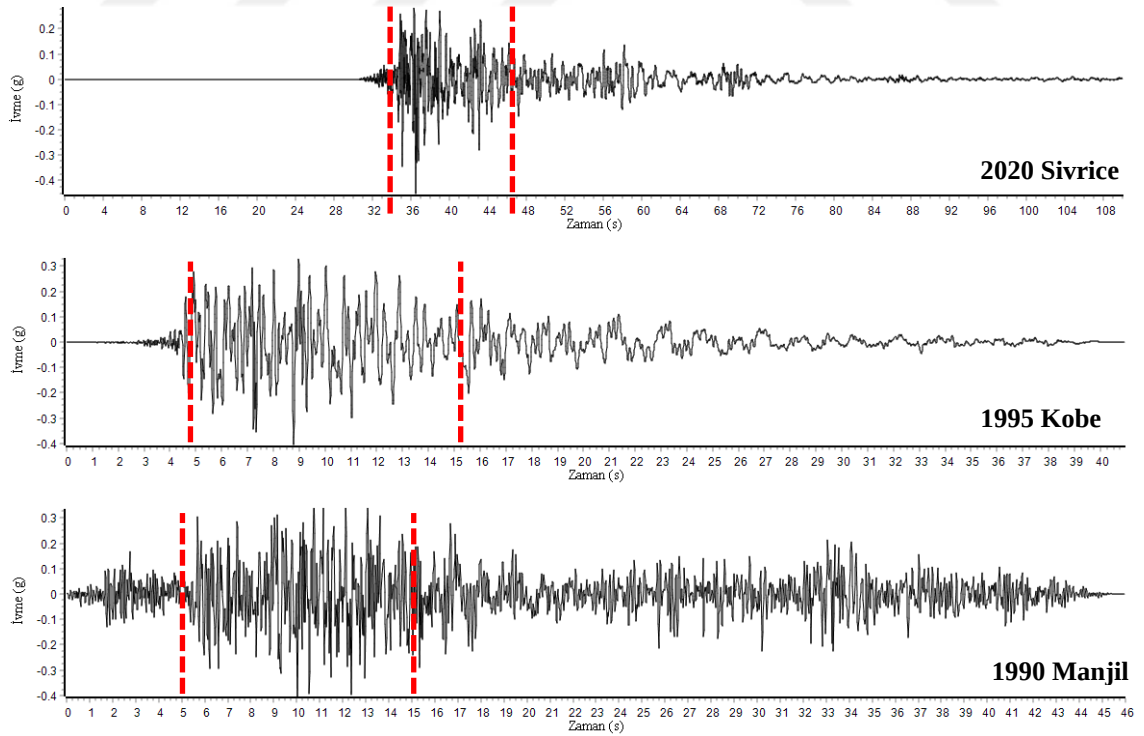
Yatay elastik tasarım spektrumunun elde edilmesinde 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (tekrarlanma periyodunun 475 yıl) DD-2 deprem yer hareketi düzeyi seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde Seismomatch paket programı kullanılmıştır [129]. Hedef elastik tasarım spektrumu ve seçilen deprem kayıtlarına ait ivme spektrum grafiği Şekil 7.12'de verilmiştir. Ayrıca seçilen depremlere ait detaylı bilgiler Tablo 7.3'de verilmiştir. Seçilen depremlere ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri Şekil 7.13'de gösterilmiştir. Analiz süresini artırdığı ve çok fazla işlemci gücü gerektirdiğinden, geçmişte tarihi yapıların zaman tanım alanında dinamik analizinin yapıldığı birçok çalışmada önerildiği üzere [24], [166], [167] deprem kayıtlarının en etkili olduğu 10 saniyelik bölümleri dikkate alınmıştır (Şekil 7.13).



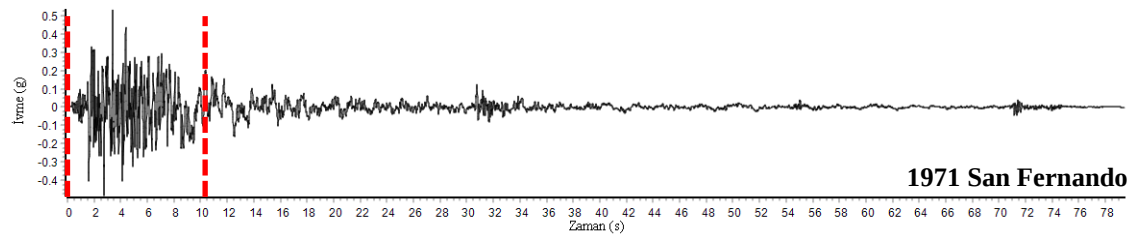
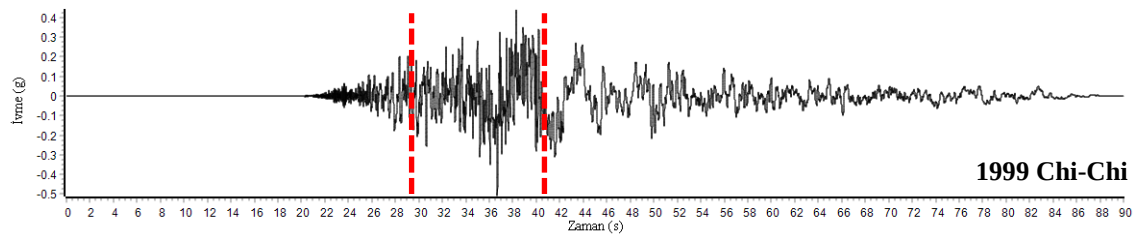
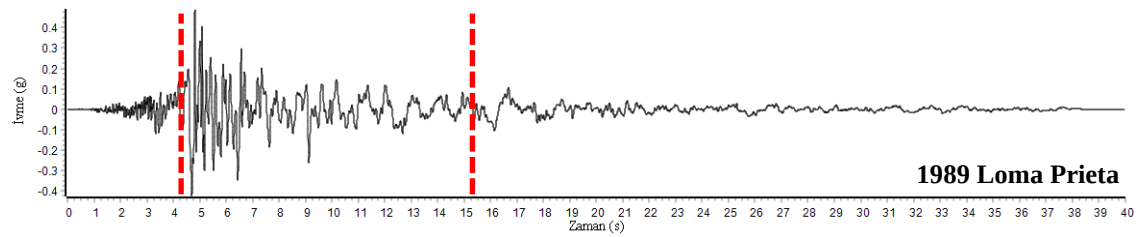
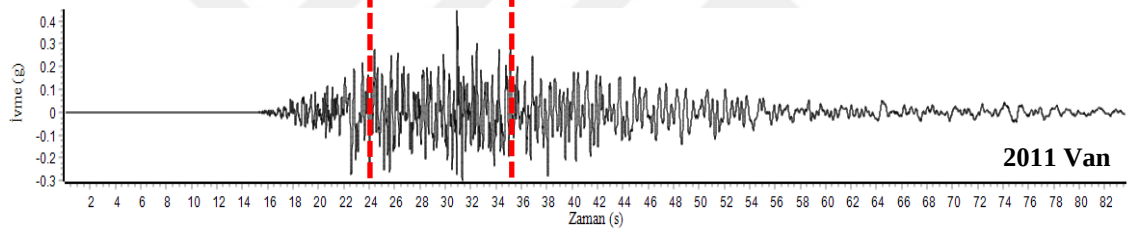
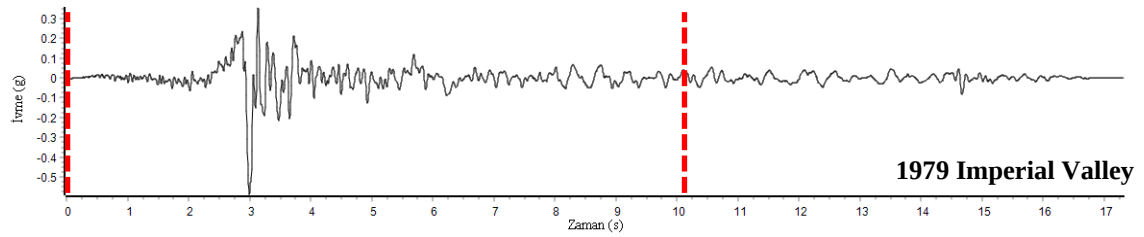
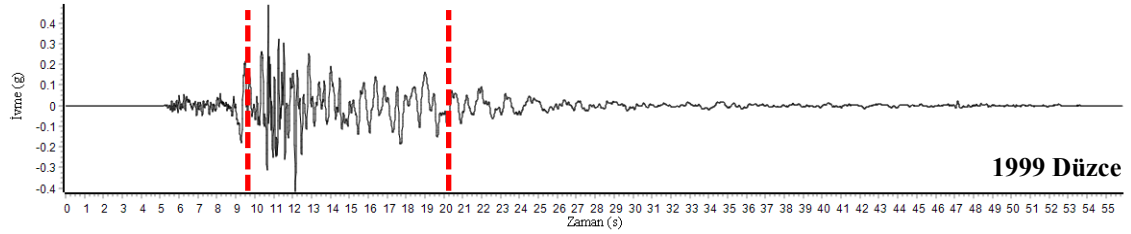
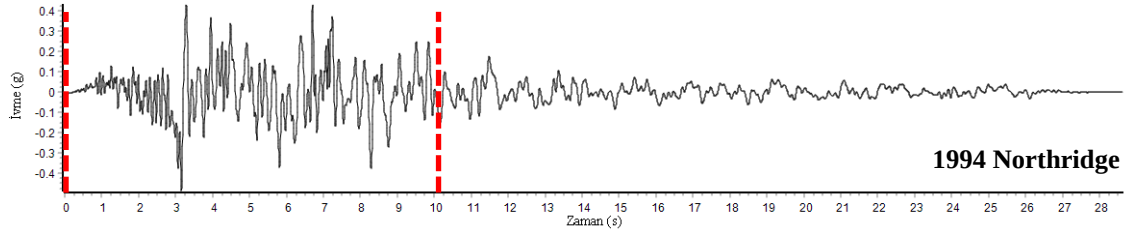
Şekil 7.12. Seçilen deprem ivme spektrumları ve hedef spektrum

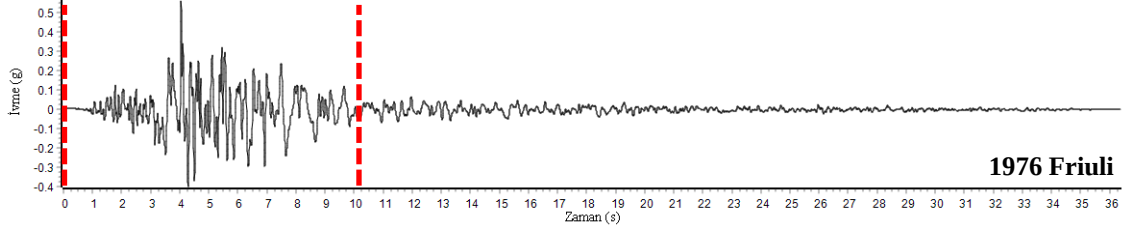
Tablo 7.3. Seçilen deprem kayıtlarına ait bilgiler

No	Deprem ismi	Kayıt İstasyonu/ Yatay Bileşen	Magnitüd (Mw)	Uzaklık (km)	Vs (m/s)
1	2020 Sivrice	2308/ E1	6.8	23.81	450
2	1995 Kobe	KOBE/NIS000	6.9	7.1	609
3	1990 Manjil	MANJIL/ABBAR-T	7.4	12.6	724
4	1994 Northridge	Canyon Country WLC/ LOS270	6.7	12.4	309
5	1999 Düzce	Bolu/ DUZCE/BOL000	7.1	12	326
6	1979 Imperial Valley	El Centro Array #11/H-E11140	6.5	12.5	196
7	2011 Van	Muradiye Meteoroloji 3852/ E	6.9	7.1	609
8	1989 Loma Prieta	Gilroy Array #3/ LOMAP/G03000	6.9	12.8	350
9	1999 Chi-Chi	CHY101/ CHICHI/CHY101-N	7.6	10	259
10	1971 San Fernando	LA-Hollywood Stor/ SFERN/PEL090	6.6	22.8	316
11	1976 Friuli	Tolmezzo/ FRIULI/A-TMZ270	6.5	15.8	425



Şekil 7.13. Ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri

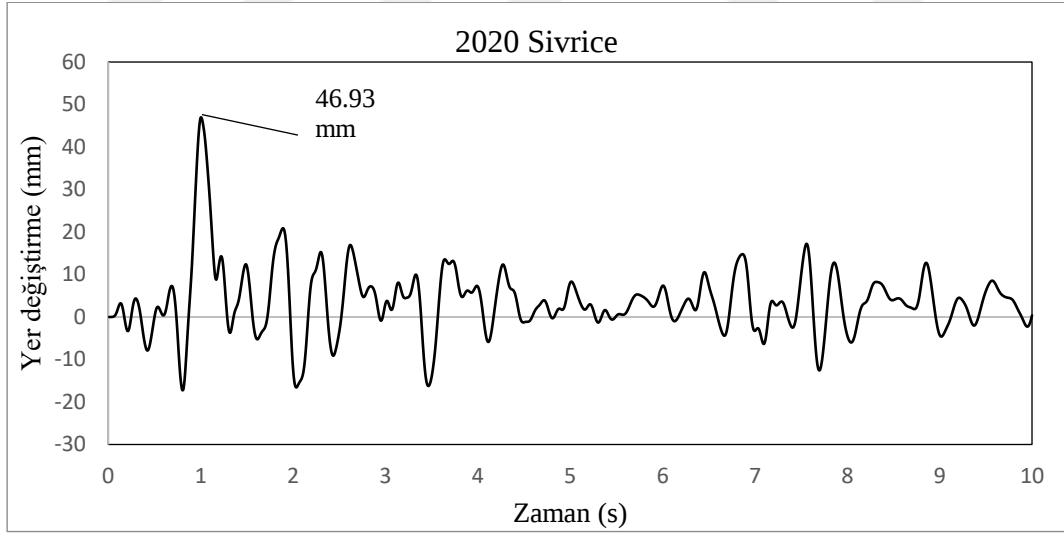




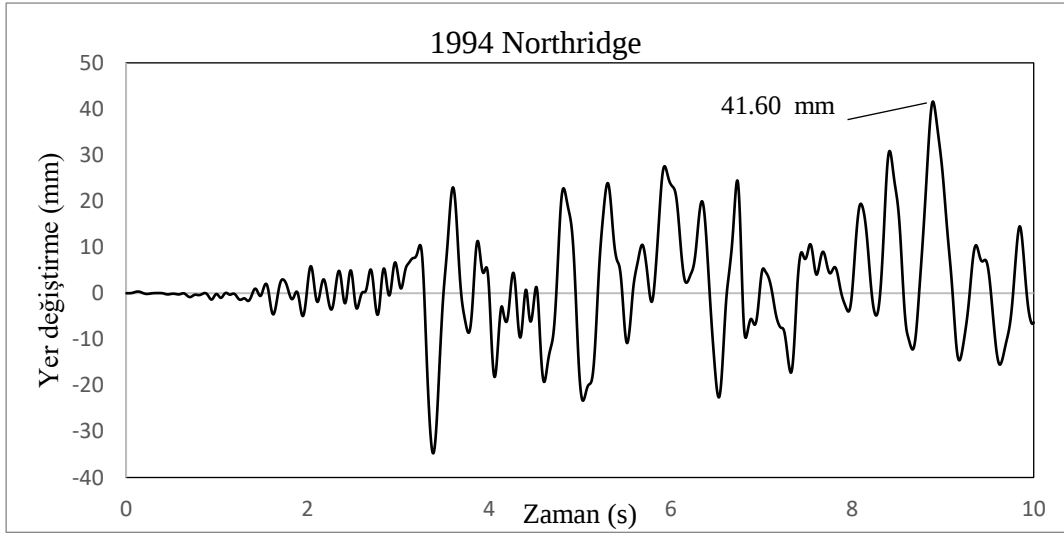
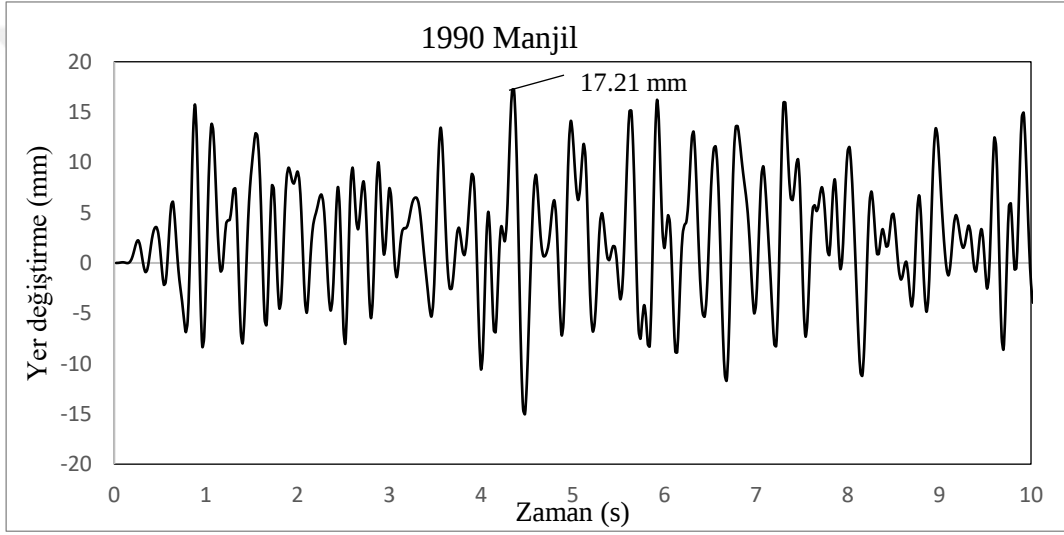
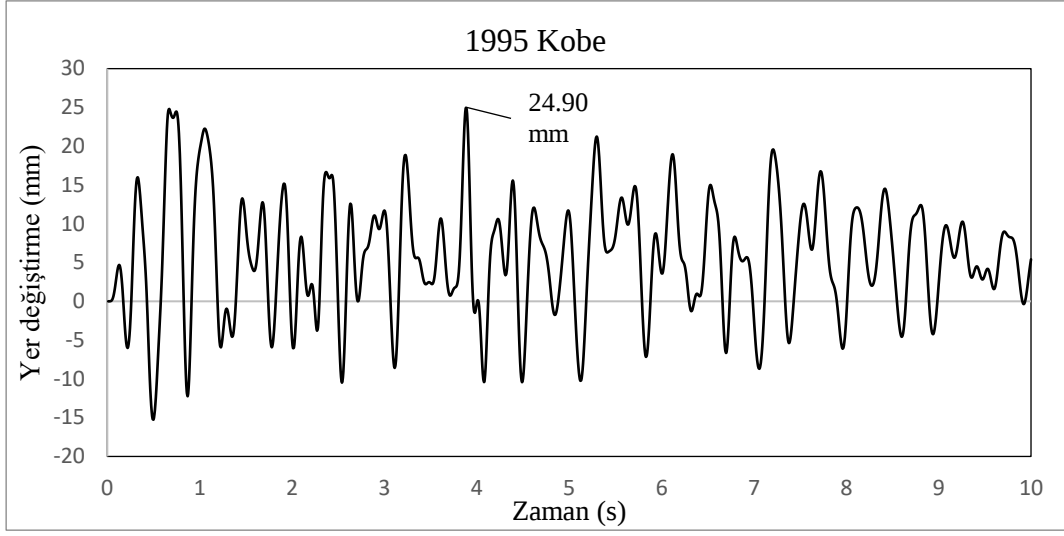
Şekil 7.13. Devam ediyor

7.3.2. Analiz Sonuçları

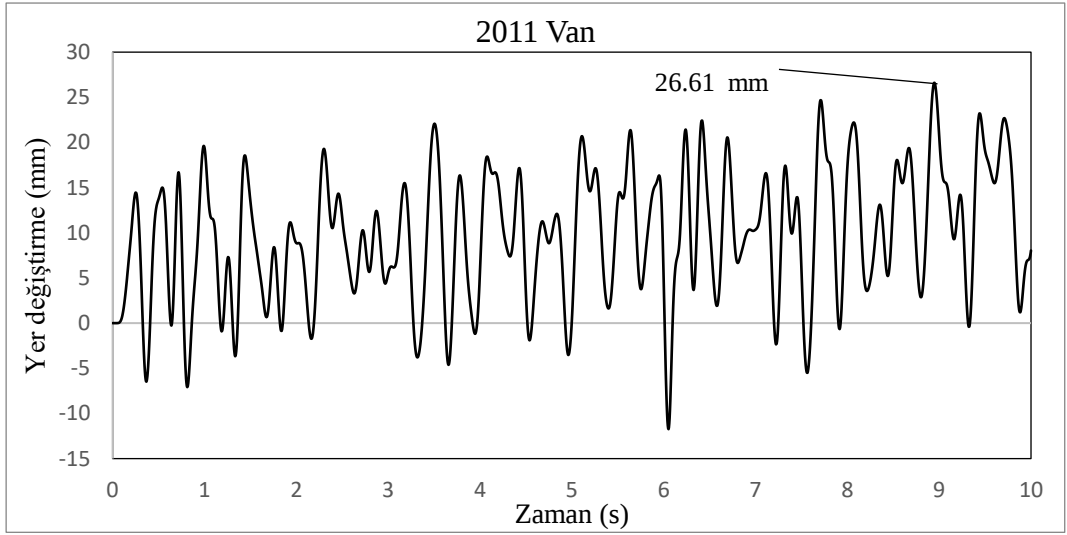
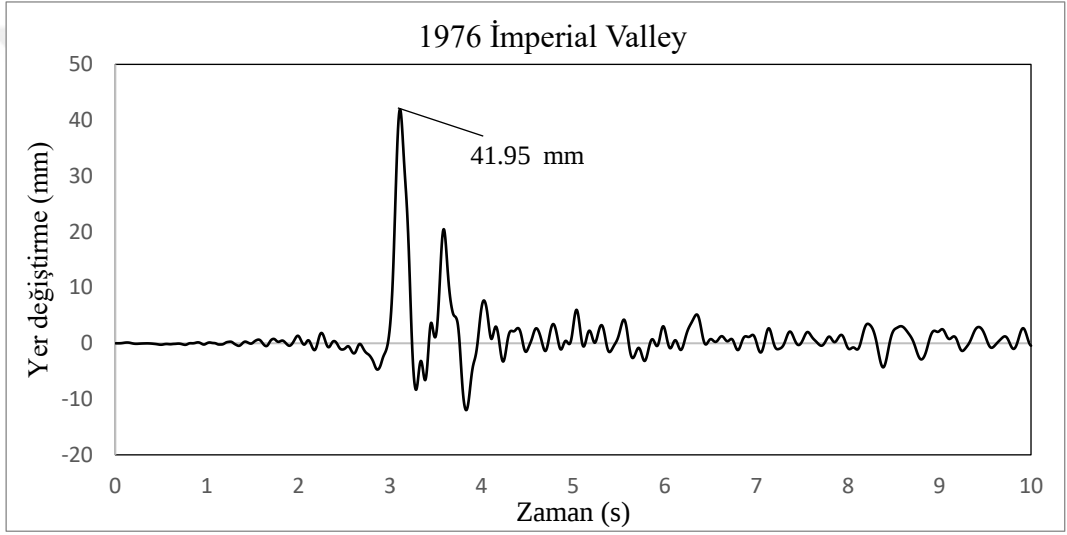
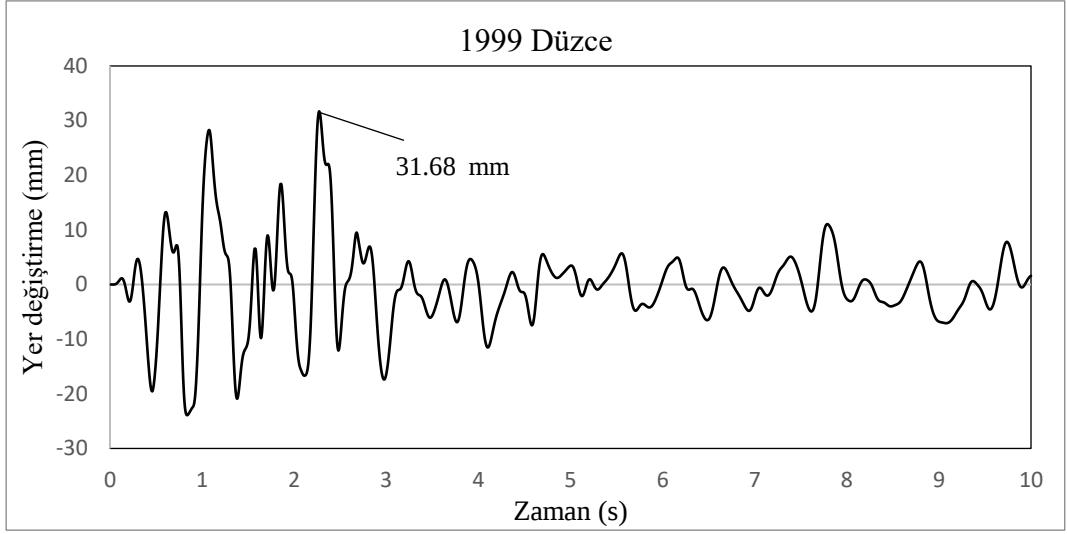
Yapının 11 farklı deprem ivmesi altında doğrusal olmayan davranışlarını elde etmek amacıyla lineer olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Deprem ivmeleri yapıya Z eksenini boyunca uygulanmıştır. Yapının deprem davranışını incelemek amacıyla en çok yer değiştirme yapan nokta olan KN3 noktasında meydana gelen mutlak yer değiştirme değerleri, çekme şekil değiştirmesi, maksimum çekme ve basınç gerilmeleri elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. KN3 noktasında 11 farklı deprem kaydı için z doğrultusunda elde edilen yer değiştirme zaman grafikleri Şekil 7.14’de verilmiştir. Tablo 7.4’te x ve z doğrultularında KN3 noktasından elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri sunulmuştur.



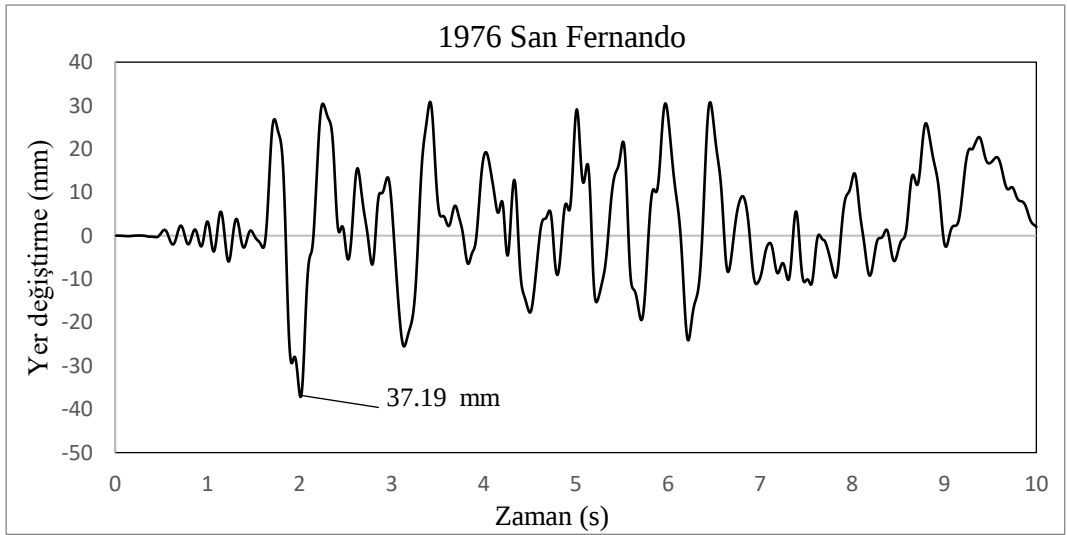
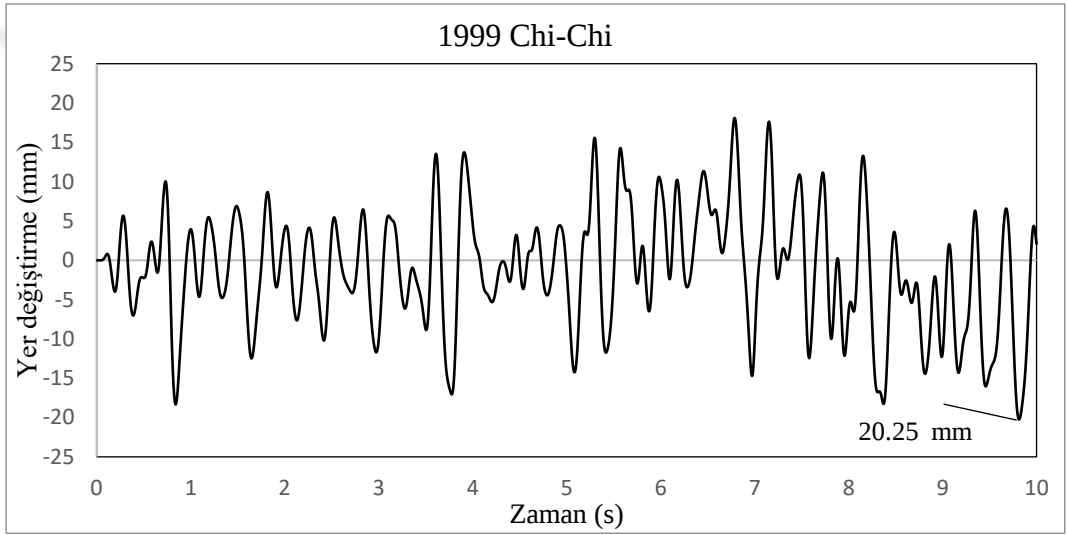
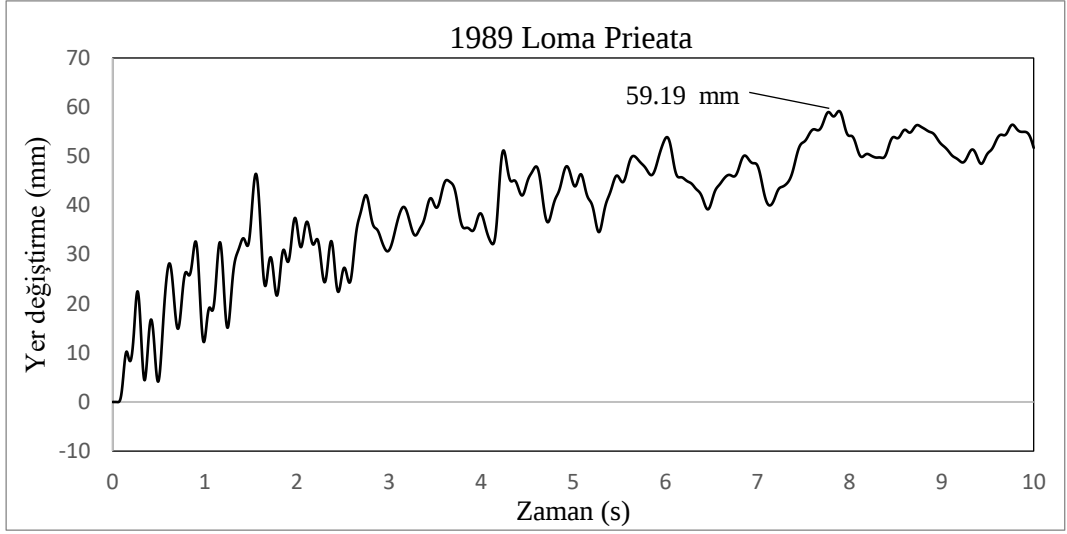
Şekil 7.14. KN3 noktasından elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



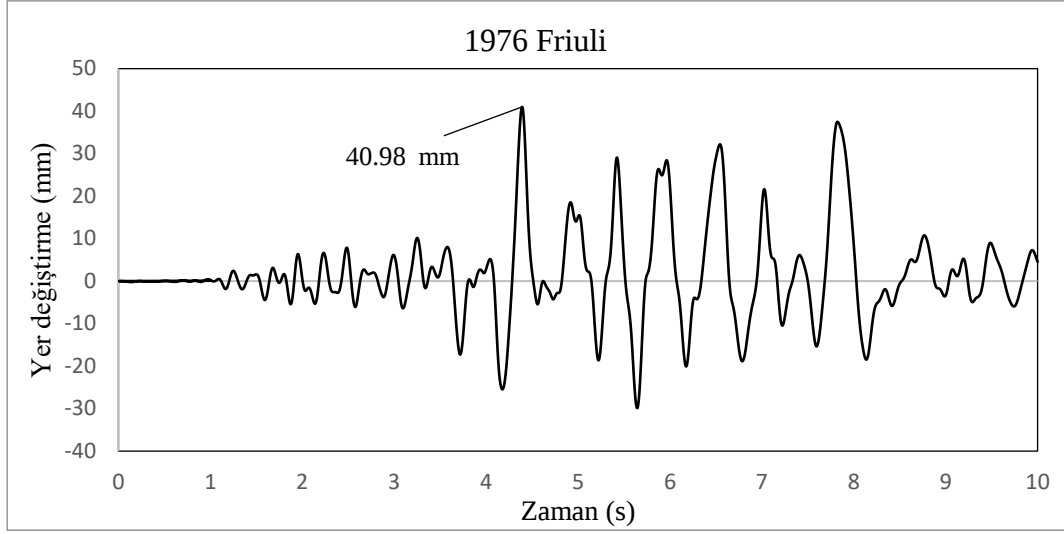
şekil 7.14. Devam ediyor



şekil 7.14. Devam ediyor



şekil 7.14. Devam ediyor

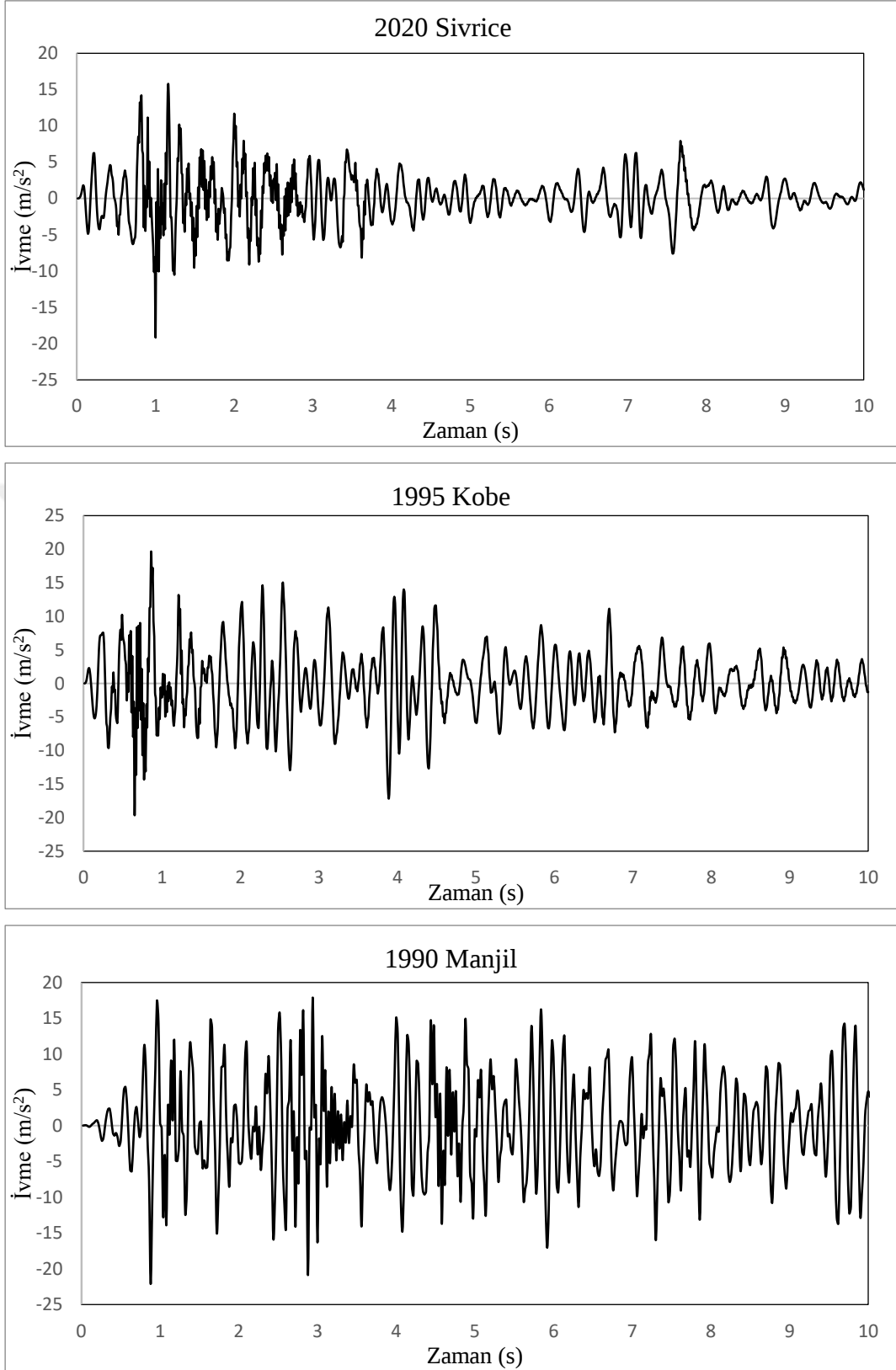


şekil 7.14. Devam ediyor

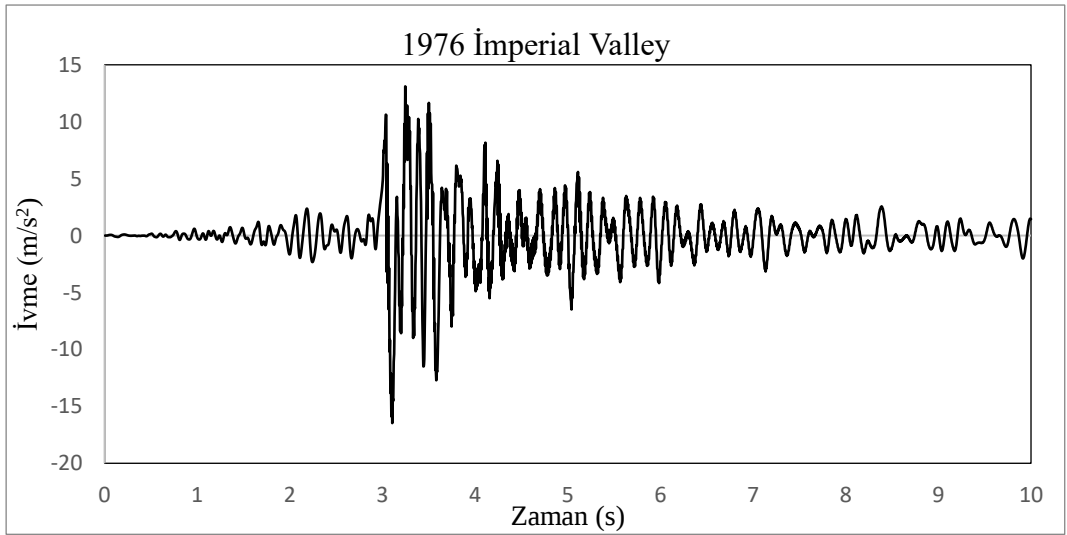
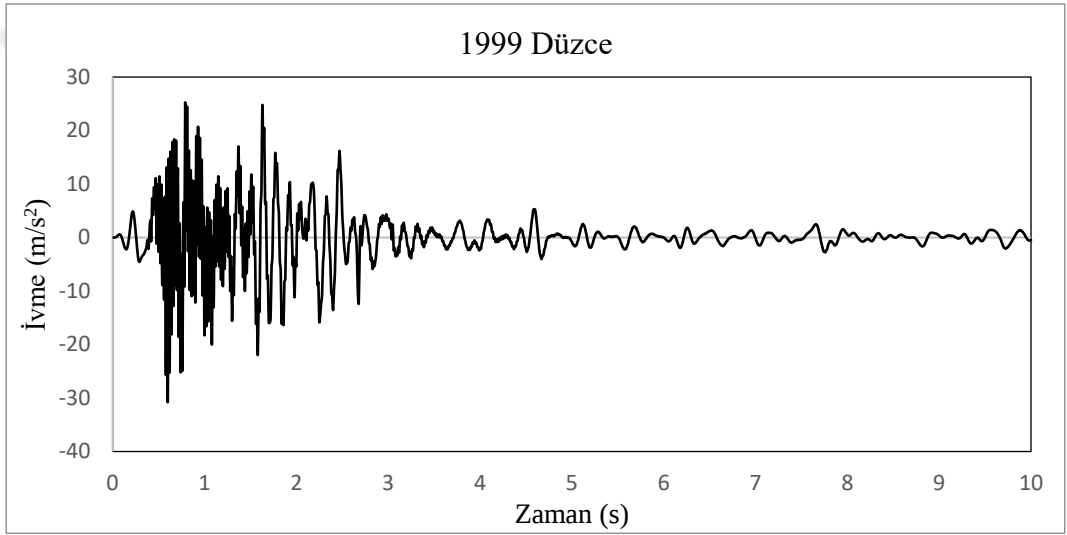
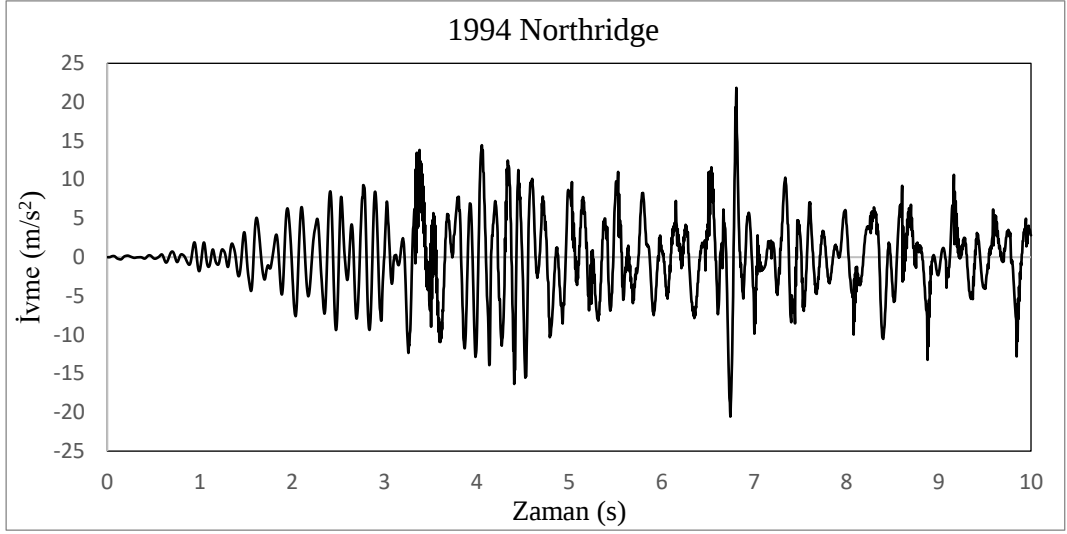
Yer değiştirme- zaman grafikleri incelendiğinde z ekseninde mutlak maksimum yer değiştirme değerinin 1989 Loma Prieta deprem kaydı altında, 59.19 mm olarak meydana geldiği görölmektedir. En düşük yer değiştirme değeri ise 1990 Manjil deprem kaydı altında 17.21 mm olarak elde edilmiştir. 1989 Loma Prieta depremi altında yapının deforme olmuş durumu şekil 7.16' te verilmiştir. şekil 7.16 incelendiğinde en büyük yer değiştirmelerin KN3 noktası üzerinde olduğu görölmektedir. KN3 noktasında 11 farklı deprem kaydı için z doğrultusunda elde edilen ivme zaman grafikleri şekil 7.15'de verilmiştir. En büyük ivme değeri ise 1999 Düzce depremi altında 30.78 m/s^2 olarak elde edilmiştir. İvme değeri, yapısal ve yapısal olmayan bileşenlere etki eden sismik kuvvetler açısından bir diğer önemli mühendislik parametresidir [166].

Tablo 7.4. Maksimum yer değiştirme değerleri (mm)

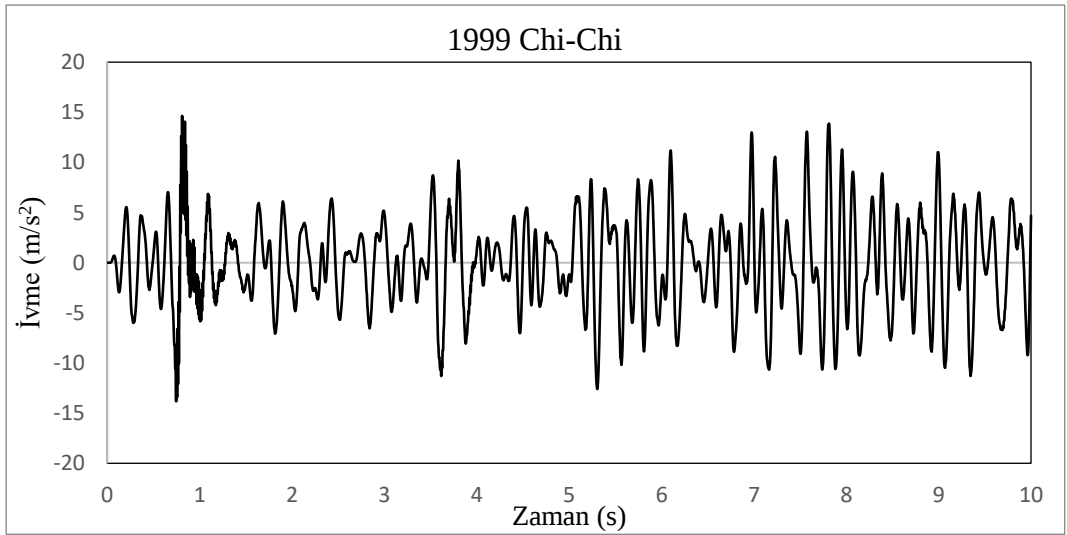
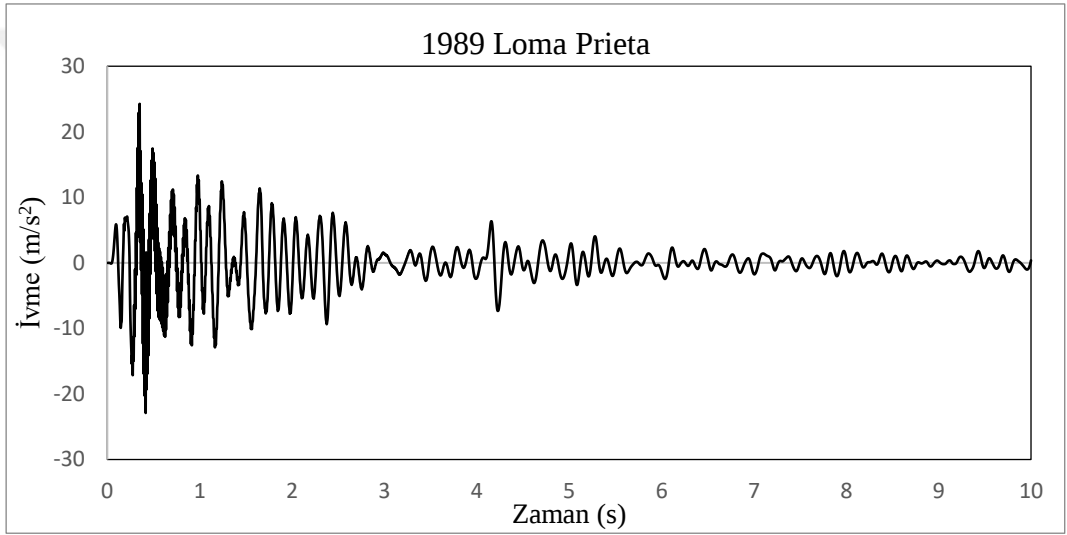
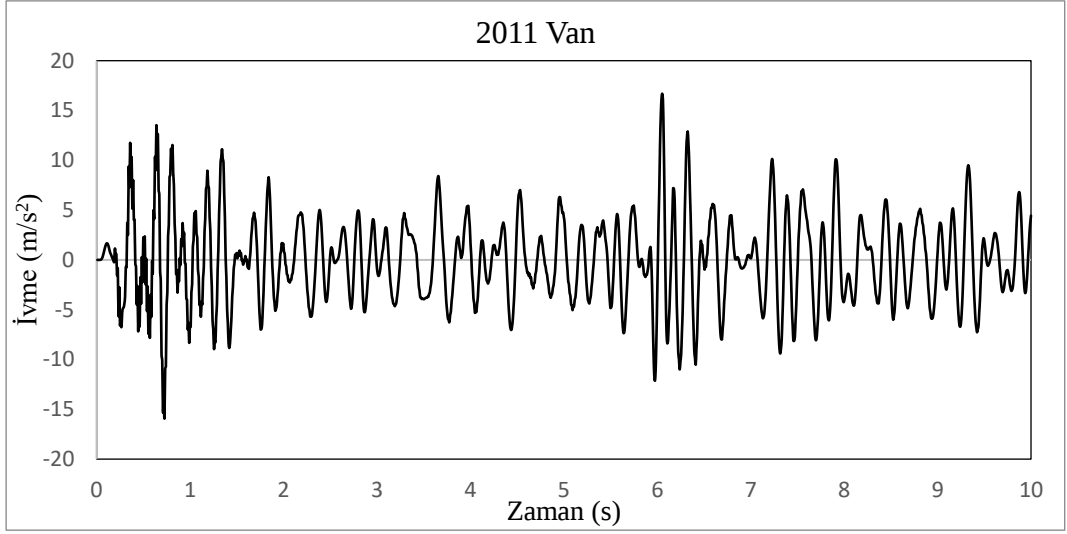
	2020	1995	1990	1994	1999	1979	2011	1989	1999	1971	San	1976
Doğrultu	Sivrice	Kobe	Manjil	Northridge	Düzce	İmperial Valley	Van	Loma Prieta	Chi-Chi	Fernando		Friuli
X	1.68	2.57	1.28	3.56	3.58	2.46	1.49	1.32	1.77	4.75		3.21
Z	46.93	24.9	17.21	41.6	31.68	41.95	26.61	59.19	20.25	37.19		40.98
Ortalama yer değiştirme (Z)									35.32			



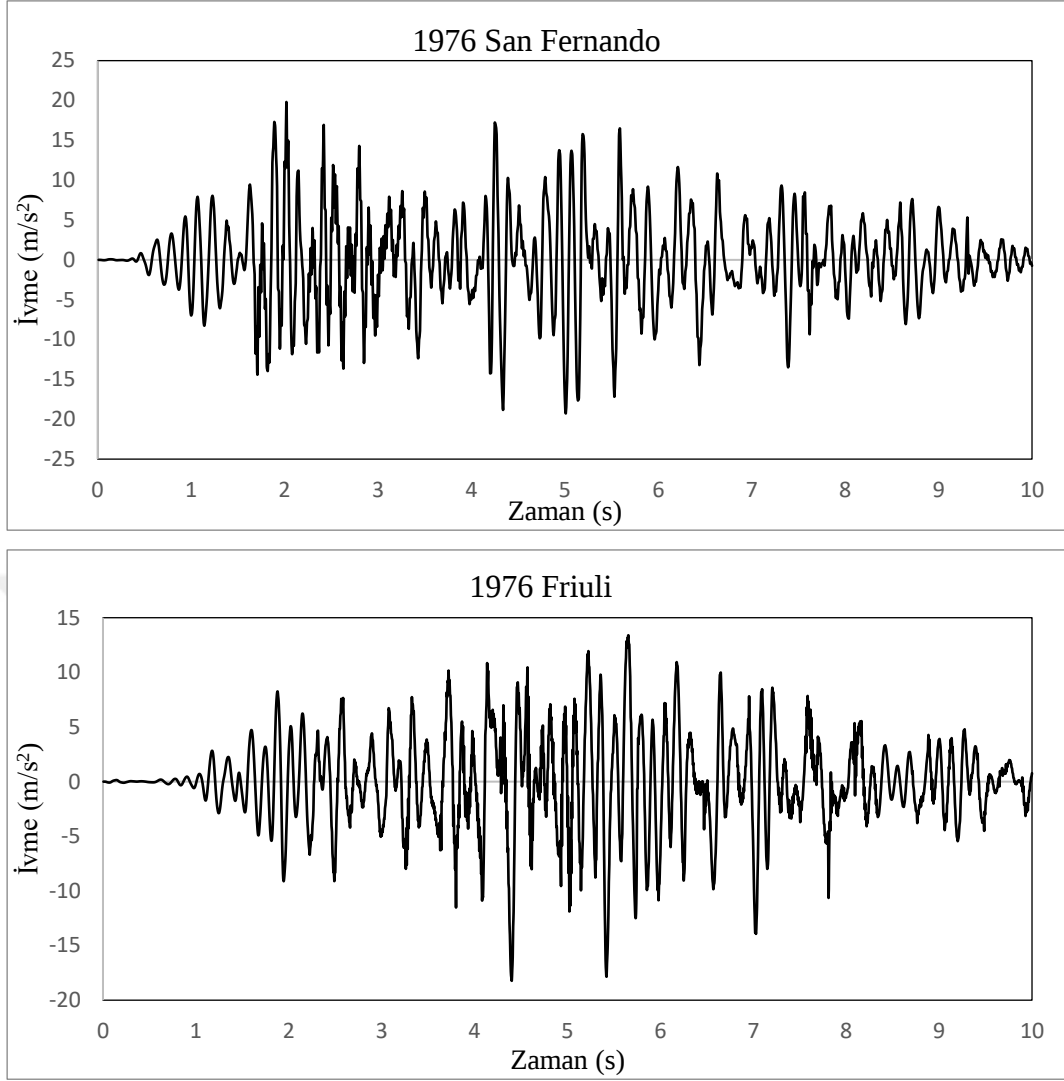
Şekil 7.15. KN3 noktasından elde edilen z ekseninde ivme-zaman grafikleri



Şekil 7.15. Devam ediyor

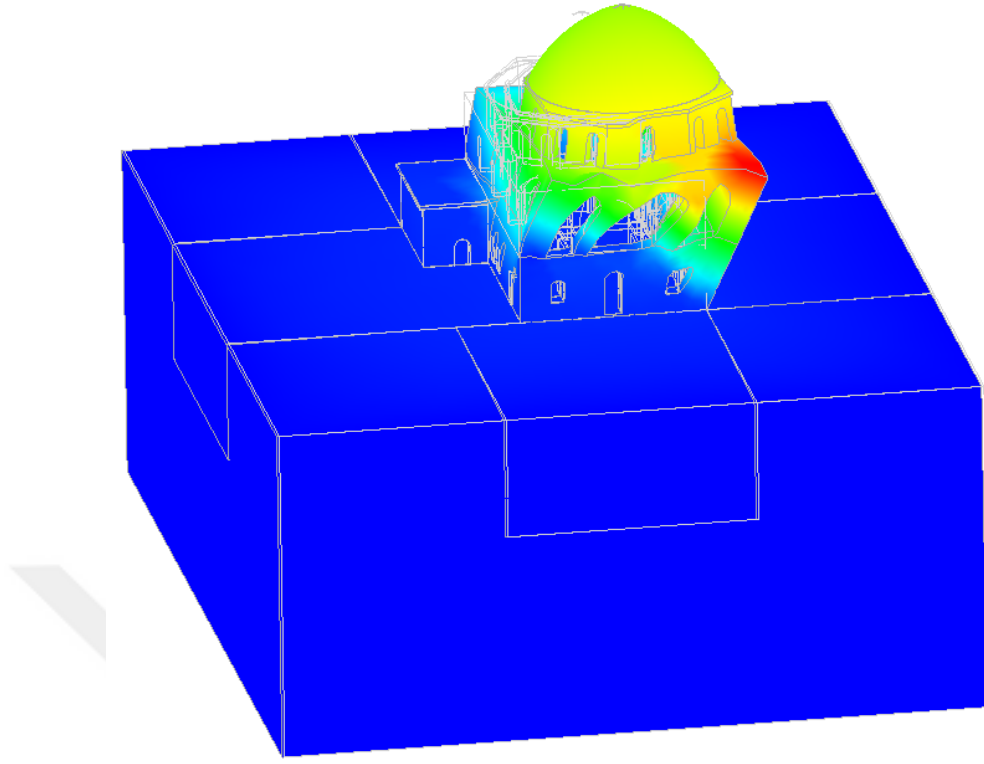


Şekil 7.15. Devam ediyor



Şekil 7.15. Devam ediyor

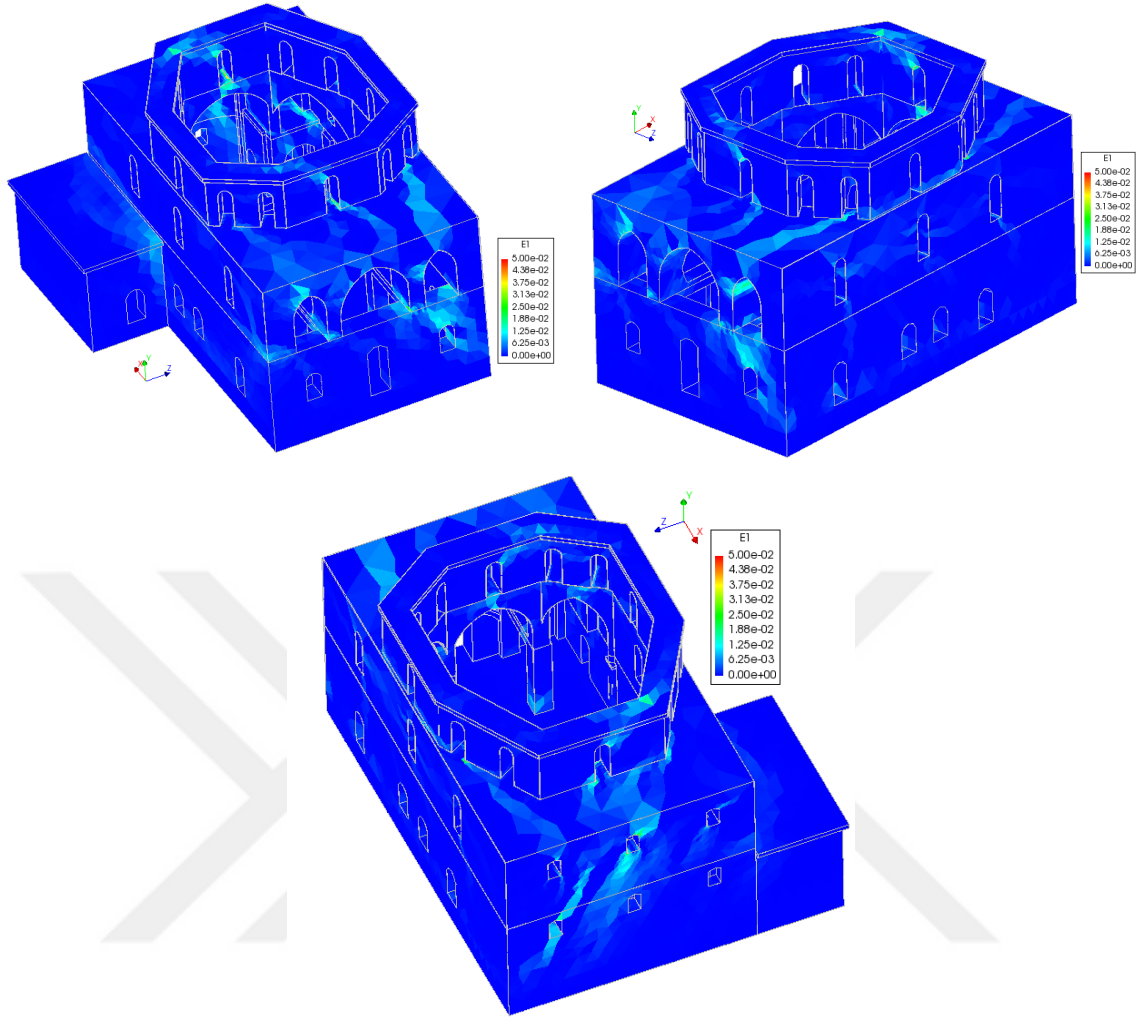
Asal çekme şekil değiştirmesi, yığma yapıların deprem davranışını değerlendirmede önemli bir parametredir. Bu değerlendirme, yığma yapıların deprem dayanımını ve hasar eğilimini belirlemeye yardımcı olur. Çekme şekil değiştirmesi, yığma yapıların göçmesi veya elemanların çatlaması gibi hasarlara yol açabileceği için, yapıların deprem performansının belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. En büyük yer değiştirme değerleri 1989 Loma Prieta deprem kaydı altında elde edilmiştir. Bu nedenle asal çekme şekil değiştirmeleri, asal basınç ve asal çekme gerilmeleri 1989 Loma Prieta depremi için paylaşılmıştır. 1989 Loma Prieta depremi altında asal çekme şekil değiştirme Şekil 7.17’de paylaşılmıştır.



Şekil 7.16. 1989 Loma Prieta depremi altında yapının deforme olmuş hali

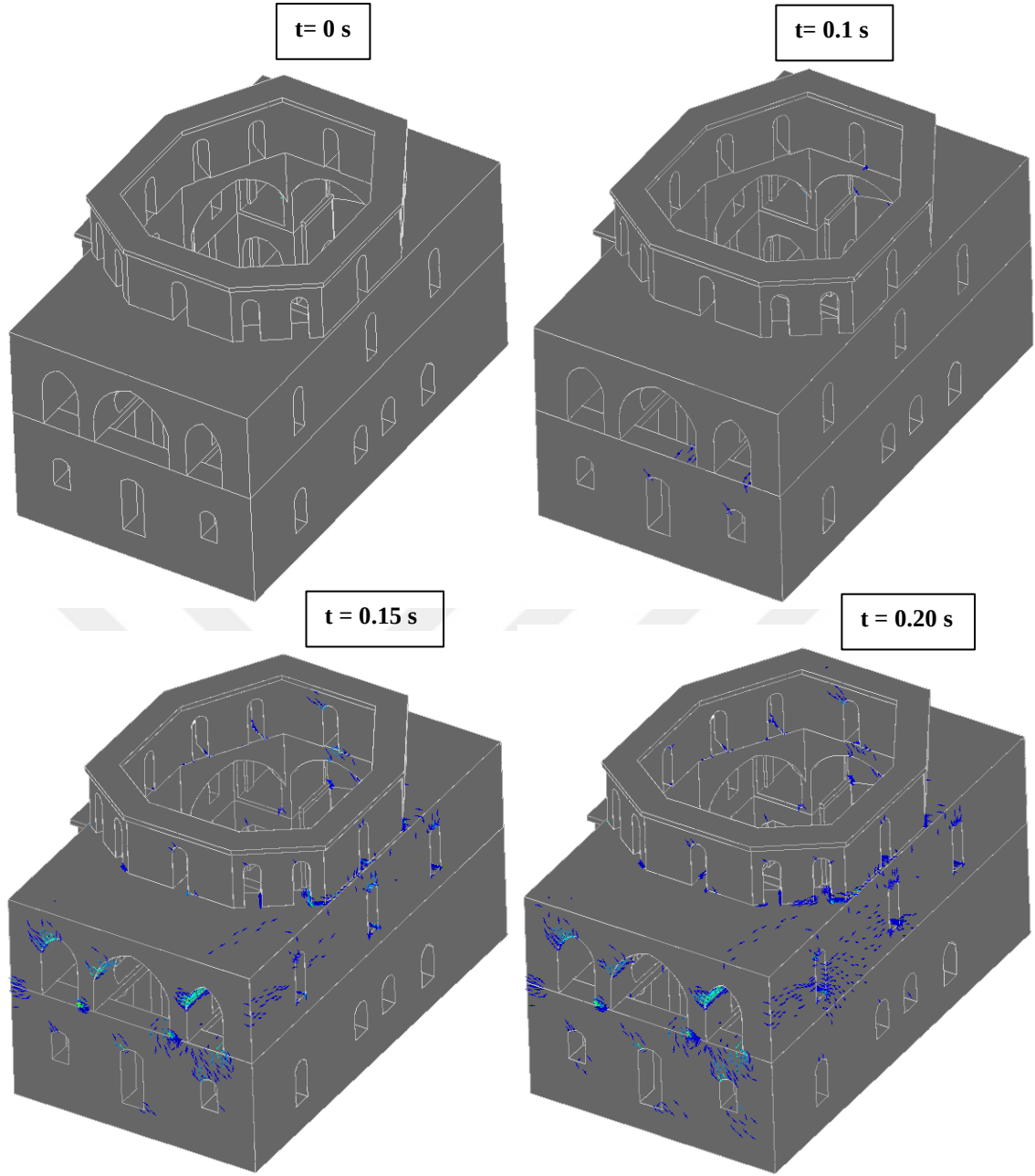
Deprem etkisi sonundaki kalıcı yanal yer değiştirme tipik bir hasar göstergesidir [159]. İncelen yapı için meydana gelen maksimum kalıcı yer değiştirme, 1989 Loma Prieta deprem kaydı altında 52.35 mm olarak elde edilmiştir. 11 analizden elde edilen kalıcı yer değiştirmelerin ortalama değeri ise 7.64 mm olarak elde edilmiştir.

Şekil 7.16 incelendiğinde, modelin büyük bir kısmı koyu mavi renkle gösterilen nispeten düşük gerilmelere sahipken, daha açık renkli küçük kısımlar çatlama bölgelerini temsil etmektedir. Buna göre, giriş bölümünde yer alan ana kemerlerin ayaklarında, kilit taşına yakın bölgelerinde ve kasnak üzerinde yer alan pencereler üzerinde olası çatlaklar beklenmektedir. 1989 Loma Prieta depremi altında yapı üzerinde çatlak ilerleme mekanizması Şekil 7.18’de verilmiştir.



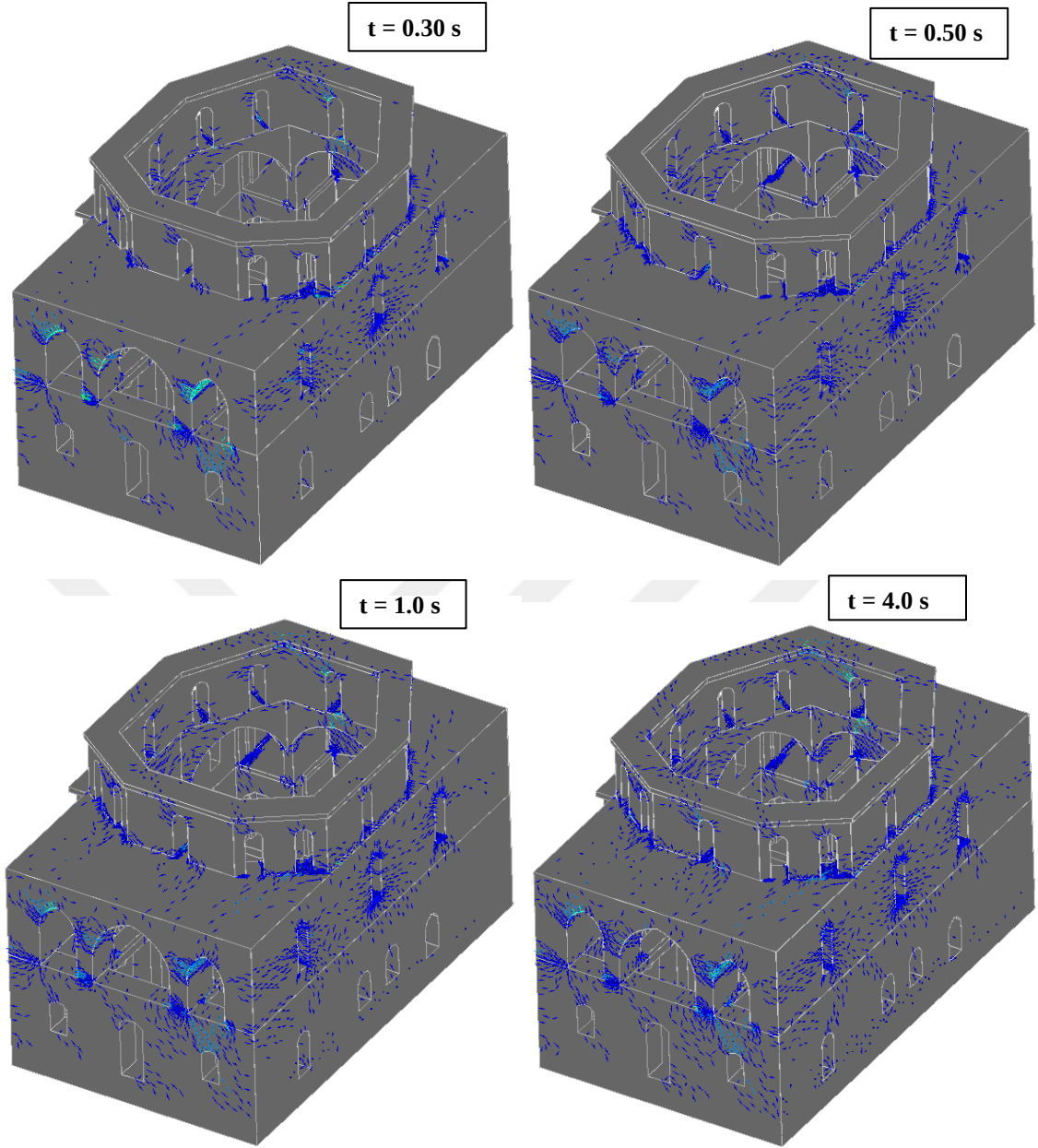
Şekil 7.17. 1989 Loma Prieta depremi altında asal çekme şekil değıştirmesi (7.91 saniye)

Şekil 7.18 incelendiğinde çatlak ilerleme mekanizmasının asal çekme şekil değıştirmesi ile uyumlu olduğu görölmektedir. Maksimum asal basınç ve çekme gerilmeleri ise Şekil 7.19’da verilmiştir. Şekil 7.19’a göre asal çekme gerilmelerinin, kasnak üzerinde yer alan pencere kenarlarında, giriş bölümündeki kemerlerde ve yan duvarlar üzerinde yer alan pencere kenarlarında yoğunlaştığı görölmektedir. Asal basınç gerilmelerinin ise giriş bölümünde yer alan ana kemer ayaklarında, apsis bölümünde yer alan karesel kolonların zeminle birleşim noktalarında ve iç bölümde yer alan kemerler üzerinde yoğunlaştığı görölmektedir. 1989 Loma Prieta depremi altında yapıda meydana gelen çatlak genişlikleri Şekil 7.20’de paylaşılmıştır. Yapının basınç ve çekme dayanımının aşıldığı noktalarda çatlak oluşumu gözlenmektedir (Şekil 7.20). Analizin son adımında maksimum çatlak genişliği 12.03 mm olarak, giriş bölümünde yer alan kemerlerin üzerinde meydana gelmiştir.

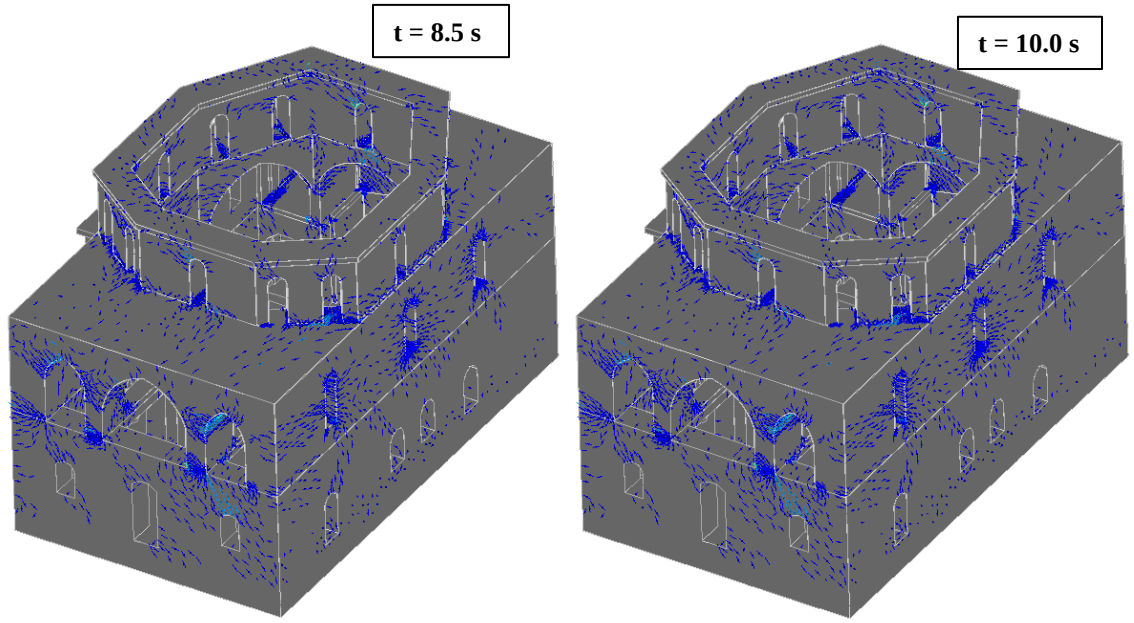


Şekil 7.18. Loma Prieta depremi altında yapının çatlak ilerlemesi

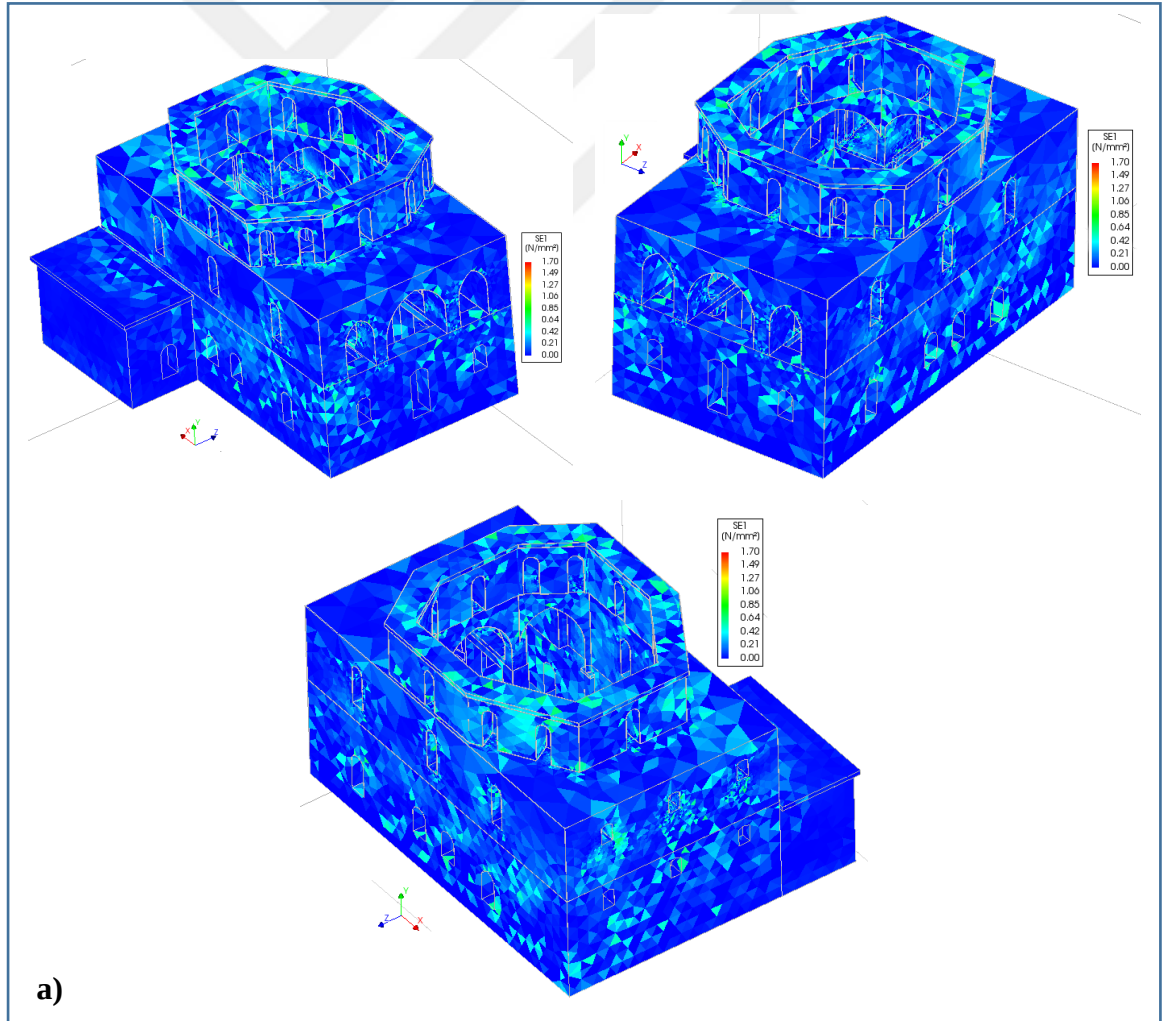
11 farklı deprem kaydı altında elde edilen maksimum asal çekme ve basınç gerilmeleri Tablo 7.5’de sunulmuştur. Tablo 7.5 incelendiğinde en büyük asal çekme gerilmesinin 1989 Loma Prieta depremi altında 1.52 MPa olarak ve en büyük asal basınç gerilmesinin 1999 Düzce depremi altında 8.28 MPa olarak elde edildiği görülmüştür.



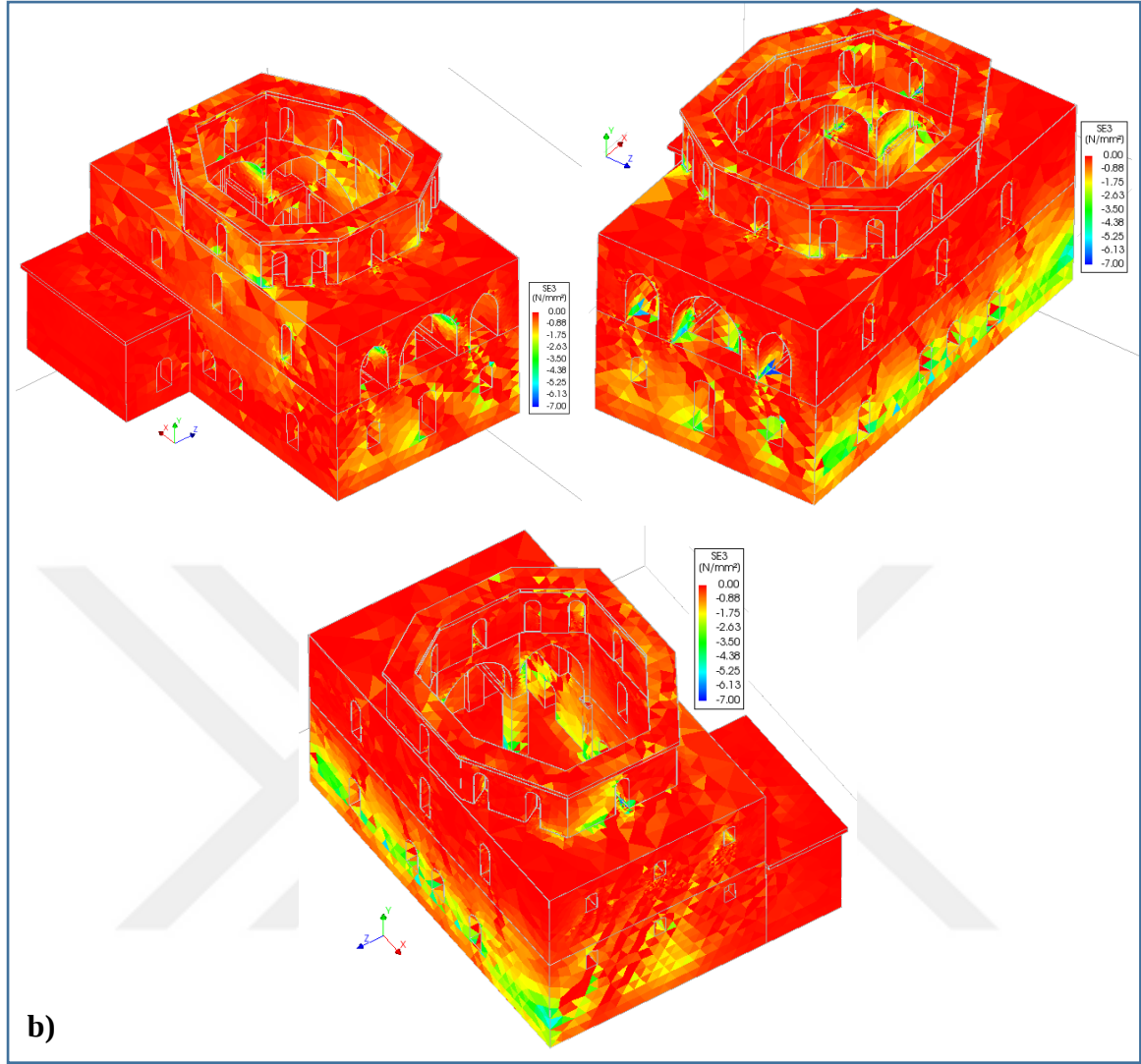
Şekil 7.18. Devam ediyor



Şekil 7.18. Devam ediyor



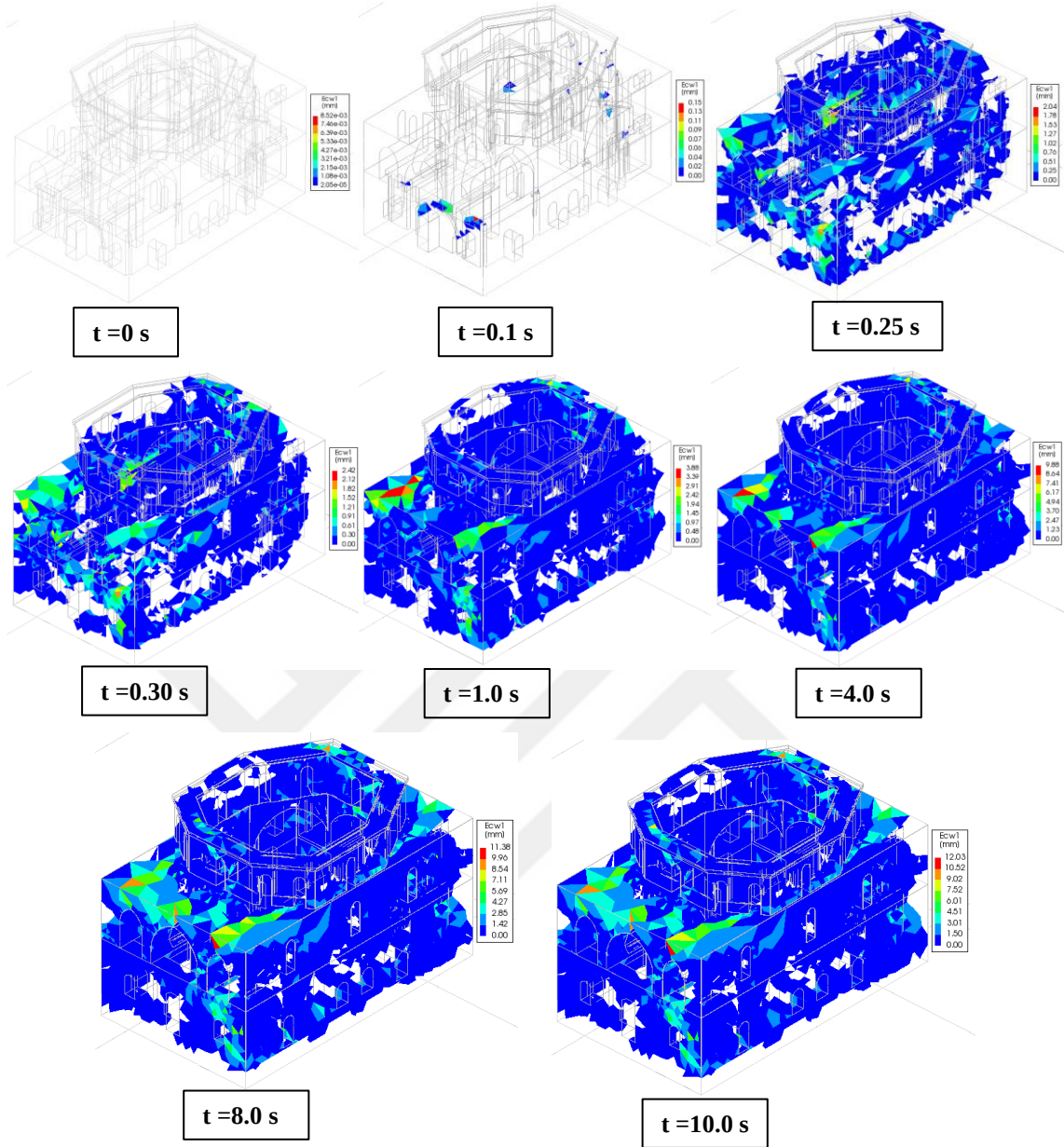
Şekil 7.19. 1989 Loma Prieta depremi altında elde edilen maksimum asal gerilmeler a) Asal çekme gerilmeleri b) Asal basınç gerilmeleri



Şekil 7.19. Devam ediyor

Tablo 7.5. Maksimum asal basınç ve çekme gerilmeleri (MPa)

	2020 Sivrice	1995 Kobe	1990 Manjil	1994 Northridge	1999 Düzce	1979 İmperial Valley	2011 Van	1989 Loma Prieta	1999 Chi- Chi	1971 San Fernando	1976 Friuli
Çekme Gerilmesi	0.87	0.70	0.75	0.69	0.83	0.69	1.02	1.52	0.97	1.15	0.85
Basınç Gerilmesi	7.20	7.18	4.29	5.25	8.28	6.89	6.90	7.00	6.91	6.91	6.92
Ortalama çekme / Basınç gerilmesi							0.91 / 6.70				



Şekil 7.20. 1989 Loma Prieta depremi altında elde edilen çatlak genişlikleri

7.4. İtme Analizi ve Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde itme analizi ve lineer olmayan zaman tanım alanında analiz sonuçlarını yapısal davranış açısından ve sayısal olarak karşılaştırarak, bu alandaki literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır. Davranış açısından, hem itme analizi ve Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Analiz benzer gerilme ve şekil değiştirme dağılımları sunmaktadır. Bu durum Şekil 7.8 ile Şekil 7.17 karşılaştırılarak gözlemlenebilir. Ancak, daha yüksek modların baskın olduğu durumlarda hasar dağılımı itme analizinde gözlemlenenden farklı olabilir. Bu nedenle, Lineer Olmayan Zaman Tanım Alanında Analizin, itme analizine kıyasla daha fazla bilgi sağladığı söylenebilir, çünkü itme

analizleri yapının yüksek modları tarafından tetiklenen hasar mekanizmalarını tespit edememektedir.

ZTA sonuçlarının, itme analizi sonuçlarına göre daha büyük tepkilere sebep olduğu görülmüştür. Bu durumun bir nedeni, yer değiştirmelerinin ilk mod şekline benzer olması ve modal itme analizinin daha yüksek modları dikkate almaması nedeniyle ZTA sonuçlarının itme analizi sonuçlarından sapmasına neden olan yüksek modların etkisi olabilir. Ayrıca, ivme tepki spektrumlarının çoğunun ilgili periyot aralığı için hedef spektrumun üzerinde bulunması, bu durumun bir başka nedeni olarak düşünülebilir. Son olarak, incelenen yapının sismik tepkisinin karmaşıklığı da bir diğer neden olabilir. Yapıda en büyük yer değiştirme tepkilerine sebep olan 1989 Loma Prieta depremi altında meydana gelen maksimum görelî kat ötelemesi oranı 0.52 olarak elde edilmiştir. Bu değer, KH (Kontrollü Hasar) performans düzeyi, can güvenliğini sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyine karşı gelmektedir. İtme analizi sonuçlarına göre yapı KH (Kontrollü Hasar) performans düzeyine karşılık gelmektedir. Ayrıca, arada meydana gelen bu fark lineer olmayan zaman tanım alanında dikkate alınan deprem kayıtlarının elastik yatay tasarım spektrumunun üstünde olmasından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca itme analizi sonucunda elde edilen performans noktasındaki yer değiştirme değeri z doğrultusunda 12.9 mm iken zaman tanım alanında analiz sonucunda 11 deprem kaydından elde edilen ortalama yer değiştirme değeri z doğrultusu için 35.32 mm olarak elde edilmiştir. Ancak itme analizi sonucunda yapının göçmeden önce Z yönünde 131.2 mm deplasman yapabileceği görülmüştür. Bu nedenle zaman tanım alanında analiz sonucunda yapıda çatlaklar meydana gelmesi beklenmektedir. Ancak yapı göçmeden ayakta kalabilecektir.

8. SONUÇLAR

Tarihi yapılar geçmişte yaşamış uygarlıkların, yaşam biçimlerini günümüze taşıyan en önemli kültürel miraslarımızdandır. Tarihi yapılar birçok sebeple hasar görmekte ve zaman içinde yıkılmaktadır. Bu yapıların uzun yıllar boyunca ayakta kalabilmesi ve gelecek kuşaklara taşınabilmesi için doğru bir biçimde analiz edilmesi ve korunması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Malatya ilinde bulunan Tarihi Taşhoran Kilisesinin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak, lineer olmayan statik ve dinamik analizlerle deprem performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapının deprem performansının belirlenmesinde sistematik bir yaklaşım dikkate alınmıştır. İlk olarak tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle yapının mekanik özellikleri elde edilmiştir. Daha sonra yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasında farklı yazarlar tarafından önerilen modelleme yaklaşımları kullanılarak parametrik bir analiz yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri DIANA FEA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sonraki aşamada, yapının dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla çevresel titreşim testi yapılmış ve Operasyonel modal analiz tekniği kullanılarak önceki aşamalarda oluşturulan sonlu elemanlar modeli kalibre edilmiştir. Kalibre edilmiş sonlu elemanlar modeli kullanılarak lineer olmayan itme analizi ve lineer olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Zaman tanım alanında analizlerde 11 adet deprem kaydı seçilmiş ve hedef tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilerek yapıya uygulanmıştır. Analizler neticesinde, yapının deprem performansı elde edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Yapının mekanik özelliklerini elde etmek amacıyla yapılan deneyler neticesinde, yapıda kullanılan RT ve OT taşlarının fiziksel, mekanik, mikroyapı ve kimyasal özelliklerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. OT taşının yoğunluğu, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranının RT'den büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca OT, tuz kristalizyon ve donma-çözülme etkilerinden RT'ye kıyasla daha az etkilenmiştir. Asit maruziyetinde ise OT, RT'den daha fazla ağırlık ve dayanım kaybına uğramıştır.

Tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle elde edilen mekanik özellikler birbiriyle kıyaslandığında basınç dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı, birim hacim ağırlık gibi doğrusal mekanik özelliklerin birbirine oldukça yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Bu durum, doğru sayısal formüllerin kullanımıyla, tahribatsız yöntemlerin de tarihi yapıların mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

3 boyutlu yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinde farklı sınır koşullarının kullanımı incelendiğinde, sınır koşullarında elementer sınır koşullarından olan zemin ortamının sınırlarında ankastre mesnet kullanılan durumlarda daha büyük yer değiştirme, hız, ivme, asal gerilmeler ve çekme şekil değiştirmeleri elde edilmiştir.

Modal analiz sonuçlarına bakıldığında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı sabit tabanlı modelde ve zemin ortamının modellenmesinde yapının tabanında yaylar bulunan sonlu eleman modelinde en büyük frekans değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra ilk iki mod şekli tüm modellerde benzer olarak ortaya çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan modeller kendi içinde karşılaştırıldığında, en düşük frekanslar sırasıyla zemin ortamının sınırlarında serbest alan kolonları ve yay/sönümleyici kullanılan durumda ortaya çıkmıştır. Yerel zemin koşullarının iyi olmadığı yapılarda, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı taktirde yapının deprem davranışının doğru bir biçimde elde edilemeyeceği görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında incelenen yapılar gibi kompleks geometrik özelliklere sahip yapılarda, lineer olmayan itme analizi yönteminin kullanılması durumunda birden fazla kontrol noktası seçilmesi ve en gayri müsait nokta üzerinden analizlere devam edilmesi, yapısal davranışın daha doğru biçimde ele alınmasını sağlayacaktır. İncelenen yapı üzerinde yapılan lineer olmayan itme analizleri sonucunda, yapının farklı makro elemanları üzerinde farklı davranış biçimleri ortaya çıktığı görülmüştür.

Lineer olmayan itme analizi sonucu elde edilen kapasite grafiği kullanılarak, kapasite spektrum metodu kullanılarak yapının performans noktası elde edilmiştir. Yapının performans noktası durumunda KH performans düzeyinde olduğu görülmüştür.

11 farklı deprem kaydı kullanılarak, lineer olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde en büyük yer değiştirme ve ivme değerlerinin 1989 Loma Prieta depremi altında elde edilmiştir. Zaman tanım alanında analiz ve itme analizi sonuçları karşılaştırıldığında zaman tanım alanında analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değerlerinin itme analizi sonucu elde edilenlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Kompleks tarihi yapılarıda yüksek modların da yapının davranışında oldukça etkili olduğu bilinmektedir. İtme analizinde yapının ilk modları dikkate alındığında yüksek modlardaki davranış göz ardı edilebilmektedir. Bu nedenle zaman tanım alanında elde edilen büyüklükler daha büyük olarak ortaya çıkmıştır.

ÖNERİLER

Tarihi yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi ve analizlerinin yapılmasında malzeme özellikleri ve sınır koşullarının belirlenmesinde birçok kabul yapılmaktadır. Bu kabuller yapının gerçek davranışından farklı bir davranış göstermesine sebep olabilmektedir. Ayrıca yapıların bulunduğu yerel zemin koşullarının kötü olması durumunda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmaması yapısal davranışın doğru bir şekilde elde edilmesine engel olmaktadır. Bu nedenle tarihi yığma yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde sistematik bir süreç izlenmesi gerekmektedir. Öncelikle incelenen yapıya ait malzeme özellikleri tahribatlı veya tahribatsız yöntemlerle tespit edilmelidir. Daha sonra yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak başlangıç sonlu elemanlar modeli oluşturulmalı nümerik modal analizler yapılmalıdır. Çevresel titreşim testleri yapılarak, yapının deneysel mod şekilleri ve frekansları tespit edilmeli ve sonlu elemanlar modeli kalibre edilmelidir. Kalibre sonlu elemanlar modeli kullanılarak hem lineer olmayan statik analizler hem de zaman tanım alanında analizler yapılmalıdır. İtme analizleri yapının kapasitesini ortaya koyarken, zaman tanım alanında analizler yapının gerçek deprem kayıtları altında davranışını ortaya koymaktadır.

Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde yukarıda belirtilen sistematik yöntemler sırasıyla uygulanmalı ve incelenen yapının davranışı daha doğru bir şekilde elde edilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] H.S. Aksoy ve M. Karaton, “Tarihi Yığma Yapıların Malzeme Karakteristiklerinin Hasarsız Yöntemlerle Belirlenmesi: Diyarbakır Ulu Camii Örneği”, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2019.
- [2] E. Grinzato, P. G. Bison, ve S. Marinetti, “Monitoring of ancient buildings by the thermal method”, J Cult Herit, c. 3, sy 1, ss. 21-29, 2002.
- [3] R. Fort, M. A. de Buergo, ve E. M. Perez-Monserrat, “Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, c. 61, ss. 296-305, 2013.
- [4] D. Pirchio vd., “An aggregated non-destructive testing (NDT) framework for the assessment of mechanical properties of unreinforced masonry Italian medieval churches”, Constr Build Mater, c. 342, s. 128041, 2022.
- [5] M. E. Hatır, M. Korkanç, ve M. E. Başar, “Evaluating the deterioration effects of building stones using NDT: the Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, c. 78, sy 5, ss. 3465-3478, 2019.
- [6] E. Ercan, N. Alver, ve A. Nuhoglu, “Evaluation of material properties by NDT methods and FEM analysis of a stone masonry arch bridge”, Challenge Journal of Structural Mechanics, c. 1, sy 4, ss. 168-172, 2015.
- [7] M. Karaton, H. S. Aksoy, E. Sayın, ve Y. Calayır, “Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels”, Eng Fail Anal, c. 79, ss. 408-421, Eyl. 2017, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2017.05.017.
- [8] S. Noor-E-Khuda ve F. Albermani, “Mechanical properties of clay masonry units: destructive and ultrasonic testing”, Constr Build Mater, c. 219, ss. 111-120, 2019.
- [9] I. Lombillo, L. Villegas, ve J. Elices, “Minor destructive techniques applied to the mechanical characterization of historical rubble stone masonry structures”, Structural Survey, c. 28, sy 1, ss. 53-70, 2010.
- [10] J. Dorji, T. Zahra, D. Thambiratnam, ve D. Lee, “Strength assessment of old masonry arch bridges through moderate destructive testing methods”, Constr Build Mater, c. 278, s. 122391, 2021.
- [11] A. Arêde, C. Almeida, C. Costa, ve A. Costa, “In-situ and lab tests for mechanical characterization of stone masonry historical structures”, Constr Build Mater, c. 220, ss. 503-515, 2019.
- [12] M. Y. Çelik ve M. Sert, “Accelerated aging laboratory tests for the evaluation of the durability of hydrophobic treated and untreated andesite with respect to salt crystallization, freezing–thawing, and thermal shock”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, c. 79, sy 7, ss. 3751-3770, 2020.
- [13] Ö. Eren ve M. Bahali, “Some engineering properties of natural building cut stones of Cyprus”, Constr Build Mater, c. 19, sy 3, ss. 213-222, 2005.
- [14] O. Amer, D. Aita, E. K. Mohamed, A. Torky, ve A. Shawky, “Experimental Investigations and Microstructural Characterization of Construction Materials of Historic Multi-Leaf Stone-Masonry Walls”, Heritage, c. 4, sy 3, ss. 2390-2415, 2021.
- [15] M. V. Gökçe, I. Ince, M. Fener, T. Taşkiran, ve K. Kayabali, “The effects of freeze–thaw (F–T) cycles on the Gödene travertine used in historical structures in Konya (Turkey)”, Cold Reg Sci Technol, c. 127, ss. 65-75, 2016.
- [16] H. Güllü ve H. S. Jaf, “Full 3D nonlinear time history analysis of dynamic soil–structure interaction for a historical masonry arch bridge”, Environ Earth Sci, c. 75, sy 21, ss. 1-17, 2016.
- [17] E. N. Rovithis ve K. D. Pitilakis, “Seismic assessment and retrofitting measures of a historic stone masonry bridge”, Earthquake and Structures, c. 10, sy 3, ss. 645-667, 2016.
- [18] P. Martinelli vd., “Bearing capacity assessment of a 14th century arch bridge in Lecco (Italy)”, International Journal of Architectural Heritage, c. 12, sy 2, ss. 237-256, 2018.

- [19] Z. Giulio, M. Paolo, G. Andrea, G. Carmelo, ve di P. Marco, “Seismic Assessment of a 14th-Century Stone Arch Bridge: Role of Soil–Structure Interaction”, *Journal of Bridge Engineering*, c. 24, sy 7, s. 05019008, Tem. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001441.
- [20] H. Güllü ve M. Karabekmez, “Effect of near-fault and far-fault earthquakes on a historical masonry mosque through 3D dynamic soil-structure interaction”, *Eng Struct*, c. 152, ss. 465-492, 2017.
- [21] G. Wang, E. D. R. Castillo, L. Wotherspoon, ve J. M. Ingham, “Performance-based seismic assessment of an historic high-rise masonry building considering soil-structure interaction”, içinde *Structures*, Elsevier, 2021, ss. 38-53.
- [22] A. Fathi, A. Sadeghi, M. R. Emami Azadi, ve N. Hoveidae, “Assessing the soil-structure interaction effects by direct method on the out-of-plane behavior of masonry structures (case study: Arge-Tabriz)”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 18, sy 14, ss. 6429-6443, Kas. 2020, doi: 10.1007/s10518-020-00933-w.
- [23] A. Shabani, M. Feyzabadi, ve M. Kioumarsi, “Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction”, *Case Studies in Construction Materials*, c. 16, s. e00957, 2022.
- [24] E. Hökelekli ve A. Al-Helwani, “Effect of soil properties on the seismic damage assessment of historical masonry minaret–soil interaction systems”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, c. 29, sy 2, s. e1694, 2020.
- [25] A. Bayraktar ve E. Hökelekli, “Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges”, *International Journal of Damage Mechanics*, c. 30, sy 3, ss. 431-452, 2021.
- [26] F. de Silva, “Influence of soil-structure interaction on the site-specific seismic demand to masonry towers”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 131, Nis. 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.106023.
- [27] H. Güllü ve F. Özel, “Microtremor measurements and 3D dynamic soil–structure interaction analysis for a historical masonry arch bridge under the effects of near- and far-fault earthquakes”, *Environ Earth Sci*, c. 79, sy 13, Tem. 2020, doi: 10.1007/s12665-020-09086-0.
- [28] F. Homaei ve M. Yazdani, “The probabilistic seismic assessment of aged concrete arch bridges: The role of soil-structure interaction”, *Structures*, c. 28, ss. 894-904, Ara. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.038.
- [29] G. Minasidis, G. D. Hatzigeorgiou, ve D. E. Beskos, “SSI in steel frames subjected to near-fault earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 66, ss. 56-68, 2014.
- [30] S. Shahbazi, M. Khatibinia, I. Mansouri, ve J. W. Hu, “Seismic evaluation of special steel moment frames subjected to near-field earthquakes with forward directivity by considering soil-structure interaction effects”, *Scientia Iranica*, c. 27, sy 5, ss. 2264-2282, Eyl. 2020, doi: 10.24200/sci.2018.50241.1594.
- [31] G. D. Hatzigeorgiou ve D. E. Beskos, “Soil–structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 30, sy 9, ss. 851-861, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.03.010>.
- [32] D. Van Nguyen, D. Kim, ve D. D. Nguyen, “Nonlinear seismic soil-structure interaction analysis of nuclear reactor building considering the effect of earthquake frequency content”, içinde *Structures*, Elsevier, 2020, ss. 901-914.
- [33] A. H. Lazizi ve H. Tahghighi, “Influence of soil–structure interaction on seismic demands of historic masonry structure of Kashan Grand Bazaar”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, ss. 1-26, 2022.
- [34] F. Clementi, “Failure analysis of apennine masonry churches severely damaged during the 2016 central Italy seismic sequence”, *Buildings*, c. 11, sy 2, s. 58, 2021.
- [35] P. Kalkbrenner, L. Pelà, ve C. Sandoval, “Multi directional pushover analysis of irregular masonry buildings without box behavior”, *Eng Struct*, c. 201, s. 109534, 2019.
- [36] V. Jahangiri, M. Yazdani, ve M. S. Marefat, “Intensity measures for the seismic response assessment of plain concrete arch bridges”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 16, sy 9, ss. 4225-4248, 2018.

- [37] V. Jahangiri ve M. Yazdani, “Seismic reliability and limit state risk evaluation of plain concrete arch bridges”, *Structure and Infrastructure Engineering*, c. 17, sy 2, ss. 170-190, 2021.
- [38] G. Tecchio, M. Donà, ve F. da Porto, “Seismic fragility curves of as-built single-span masonry arch bridges”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 14, sy 11, ss. 3099-3124, 2016.
- [39] M. Rota, A. Penna, ve G. Magenes, “A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses”, *Eng Struct*, c. 32, sy 5, ss. 1312-1323, 2010.
- [40] S. Saloustros, L. Pelà, F. R. Contrafatto, P. Roca, ve I. Petromichelakis, “Vulnerability assessment of monumental masonry structures including uncertainty”, içinde *Structural Analysis of Historical Constructions*, Springer, 2019, ss. 1219-1228.
- [41] G. Martínez, R. Gaytán, ve R. Rojas, “Displacement Fragility Curves for the Morelia Cathedral Bell Towers”, *EURODYN-International Conference on Structural Dynamics*, 2011, ss. 363-369.
- [42] Malatya Büyükşehir Belediyesi, *Malatya Kültür Envanteri*. Malatya, 2021.
- [43] Z. T. Bieniawski ve M. J. Bernede, “Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, c. 16, sy 2, ss. 138-140, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91451-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91451-7).
- [44] ISRM, “Suggested methods for determining tensile strength of rock materials”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, c. 15, sy 3, ss. 99-103, Haz. 1978, doi: 10.1016/0148-9062(78)90003-7.
- [45] TS EN, “14066, Natural Stone Test Methods-Determination of Resistance to Ageing by Thermal Shock”, *Türk Standartları Enstitüsü (TSE)*, Ankara, s. 3, 2004.
- [46] E. Özdemir, F. Kantarcı, ve D. Eren Sarıcı, “Effects of acid-base solutions on some Turkish natural building stones: physico-mechanical and color changes”, *Innovative Infrastructure Solutions*, c. 7, sy 1, ss. 1-12, 2022.
- [47] TS EN 12371, *Natural stone test methods - Determination of frost resistance*. 2019.
- [48] TS EN 12370, *Natural stone test methods-determination of resistance to salt crystallization*. Ankara, Turkey, 2001.
- [49] A. K. Kasthurba, M. Santhanam, ve H. Achyuthan, “Investigation of laterite stones for building purpose from Malabar region, Kerala, SW India-Chemical analysis and microstructure studies”, *Constr Build Mater*, c. 22, sy 12, ss. 2400-2408, 2008.
- [50] E. Vasaneli, A. Calia, D. Colangiuli, F. Micelli, ve M. A. Aiello, “Assessing the reliability of non-destructive and moderately invasive techniques for the evaluation of uniaxial compressive strength of stone masonry units”, *Constr Build Mater*, c. 124, ss. 575-581, 2016.
- [51] G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, C. A. Alves, ve J. Pamplona, “Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and Schmidt hammer hardness”, 2007.
- [52] ASTM C805/C805M-13a, *Standard test method for rebound number of hardened concrete*. 2013.
- [53] TS EN 12504-2:2012, *Testing Concrete In Structures—Part 2: Non-destructive Testing—Determination of Rebound Number*. 2012.
- [54] D. M. McCann ve M. C. Forde, “Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures”, *Ndt & E International*, c. 34, sy 2, ss. 71-84, 2001.
- [55] R. Martini, J. Carvalho, N. Barraca, A. Arêde, ve H. Varum, “Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests”, *Procedia Structural Integrity*, c. 5, ss. 1108-1115, 2017.
- [56] ASTM C597-97, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, 1997.
- [57] EN 12504-4, “Concrete Tests—Part 4: Determination of Ultrasonic Pulsed Wave Velocity”. Turkish Standards Institution Ankara, Turkey, 2012.

- [58] A. Moropoulou, K. C. Labropoulos, E. T. Delegou, M. Karoglou, ve A. Bakolas, “Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage”, *Constr Build Mater*, c. 48, ss. 1222-1239, 2013.
- [59] X. Maldague, “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, 2001.
- [60] N. P. Avdelidis ve A. Moropoulou, “Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures”, *J Cult Herit*, c. 5, sy 1, ss. 119-127, 2004.
- [61] F. Bisegna, D. Ambrosini, D. Paoletti, S. Sfarra, ve F. Gugliermetti, “A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography—A case study”, *J Cult Herit*, c. 15, sy 2, ss. 199-202, 2014.
- [62] M. C. Acar, Z. Gündüz, ve H. B. Kara, “Modulus of elasticity determination of rocks using compressometer, strain gauge and LVDT”, *Proceedings of ACE*, c. 11, ss. 1-6, 2014.
- [63] L. Dong, H. Xu, P. Fan, ve Z. Wu, “On the Experimental Determination of Poisson’s Ratio for Intact Rocks and Its Variation as Deformation Develops”, *Advances in Civil Engineering*, c. 2021, 2021.
- [64] H. Yavuz, “Effect of freeze–thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, c. 70, sy 2, ss. 187-192, 2011.
- [65] Y. Waseda, E. Matsubara, ve K. Shinoda, *X-ray diffraction crystallography: introduction, examples and solved problems*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [66] B. E. Warren, *X-ray Diffraction*. Courier Corporation, 1990.
- [67] E. W. Nuffield, “X-ray diffraction methods”, 1966.
- [68] B. O. Caglayan, K. Ozakgul, ve O. Tezer, “Assessment of a concrete arch bridge using static and dynamic load tests”, *Structural Engineering and Mechanics*, c. 41, sy 1, ss. 83-94, 2012.
- [69] A. Brencich ve D. Sabia, “Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge”, *Constr Build Mater*, c. 22, sy 10, ss. 2087-2099, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.031>.
- [70] I. S. Buyuksagis ve R. M. Goktan, “The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, c. 44, sy 2, ss. 299-307, 2007.
- [71] H. Gercek, “Poisson’s ratio values for rocks”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, c. 44, sy 1, ss. 1-13, 2007.
- [72] B. Chawre, “Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, c. 10, sy 3, ss. 594-602, 2018.
- [73] ASTM D2845-08, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*. ASTM International, 2008.
- [74] P. Lourenco, “Computational Strategy for Masonry Structures”, Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands, 1996.
- [75] E. Sayin, “Nonlinear seismic response of a masonry arch bridge”, *Earthquakes and Structures*, c. 10, sy 2, ss. 483-494, 2016.
- [76] G. Milani ve P. B. Lourenço, “3D non-linear behavior of masonry arch bridges”, *Comput Struct*, c. 110-111, ss. 133-150, Kas. 2012, doi: 10.1016/J.COMPSTRUC.2012.07.008.
- [77] A. Bayraktar ve E. Hökelekli, “Seismic Performances of Different Spandrel Wall Strengthening Techniques in Masonry Arch Bridges”, *International Journal of Architectural Heritage*, 2020, doi: 10.1080/15583058.2020.1719234.
- [78] A. Özmen ve E. Sayın, “3D Soil Structure Interaction Effects on the Seismic Behavior of Single Span Historical Masonry Bridge”, *Geotechnical and Geological Engineering*, c. 41, sy 3, 2023.
- [79] M. M. Maraş, A. Özmen, E. Sayın, ve Y. Ayaz, “Seismic assessment of the historical sütlü minaret mosque”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, c. 66, sy 2, ss. 445-459, 2022.
- [80] Ş. Sekin, “Yığma Minarelerin Dinamik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2022.

- [81] K. Akın, “Tarihi Yığma Köprülerin Farklı Sönüm Oranları Altında Sismik Tepkisinin Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [82] A. Özmen, “Yakın ve Uzak Fay Hareketlerine Maruz Tarihi Yığma Bir Köprünün Sismik Performansının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2019.
- [83] E. Sayın, “Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2009.
- [84] A. Özmen ve E. Sayın, “Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi”, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 9, sy 2, ss. 956-965, 2020.
- [85] A. Aslan, “Süleymaniye Camii” nin Yerel Zemin Koşullarına Bağlı Deprem Performansının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [86] L. Pelà, Continuum damage model for nonlinear analysis of masonry structures. Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [87] F. J. Vecchio ve M. P. Collins, “The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear.”, ACI J., c. 83, sy 2, ss. 219-231, 1986.
- [88] DIANA FEA, “User’s Manual Release 10.5”, The Netherlands, 2022.
- [89] P. B. Lourenço ve J. M. Pereira, Seismic retrofitting project: recommendations for advanced modeling of historic earthen sites. Getty Conservation Institute, 2018.
- [90] S. Gönen ve S. Soyöz, “Seismic analysis of a masonry arch bridge using multiple methodologies”, Eng Struct, c. 226, s. 111354, 2021.
- [91] D. Proske ve P. van Gelder, Safety of historical stone arch bridges. Springer Science & Business Media, 2009.
- [92] Ril 805, Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges: Advices on the use of advanced methods. 2007.
- [93] A. Baykasoğlu, H. Güllü, H. Çanakçı, ve L. Özbakır, “Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming”, Expert Syst Appl, c. 35, sy 1-2, ss. 111-123, 2008.
- [94] H. Y. Ersoy, “Composite material”, Literature, Istanbul, Turkey, 2001.
- [95] Eurocode 6, “Design of masonry structures—part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures”, Comité Européen de Normalisation: Brussels, Belgium, 2005.
- [96] Van der Mersch W.A., “Modelling the seismic response of an unreinforced masonry structure”, Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, 2015.
- [97] T. Krejčí, T. Koudelka, V. Bernardo, ve M. Šejnoha, “Effective elastic and fracture properties of regular and irregular masonry from nonlinear homogenization”, Comput Struct, c. 254, s. 106580, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106580>.
- [98] ATC, Soil-structure interaction for building structures. Redwood City, California, 2012.
- [99] M. Li, X. Lu, X. Lu, ve L. Ye, “Influence of soil–structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, c. 6, sy 5, ss. 477-485, 2014.
- [100] S. L. Kramer, Geotechnical earthquake engineering. Pearson Education India, 1996.
- [101] D. Pitilakis ve D. Clouteau, “Equivalent linear substructure approximation of soil–foundation–structure interaction: model presentation and validation”, Bulletin of Earthquake Engineering, c. 8, sy 2, ss. 257-282, 2010.
- [102] D. V Oliveira, P. B. Lourenço, ve C. Lemos, “Geometric issues and ultimate load capacity of masonry arch bridges from the northwest Iberian Peninsula”, Eng Struct, c. 32, sy 12, ss. 3955-3965, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.006>.
- [103] T. Cakir, “Evaluation of the effect of earthquake frequency content on seismic behavior of cantilever retaining wall including soil–structure interaction”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 45, ss. 96-111, 2013.

- [104] H. R. Tabatabaiefar ve A. Massumi, "A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 30, sy 11, ss. 1259-1267, 2010.
- [105] C. Yoo, "Interaction between tunneling and bridge foundation-A 3D numerical investigation", *Comput Geotech*, c. 49, ss. 70-78, 2013.
- [106] R. Livaoglu ve A. Dogangun, "Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 27, sy 9, ss. 855-863, 2007.
- [107] A. S. Hokmabadi, B. Fatahi, ve B. Samali, "Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations", *Comput Geotech*, c. 55, ss. 172-186, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.compgeo.2013.08.011.
- [108] F. Homaei, H. Shakib, ve M. Soltani, "Probabilistic seismic performance evaluation of vertically irregular steel building considering soil-structure interaction", *International Journal of Civil Engineering*, c. 15, sy 4, ss. 611-625, 2017.
- [109] H. Güllü ve M. Pala, "On the resonance effect by dynamic soil-structure interaction: a revelation study", *Natural hazards*, c. 72, sy 2, ss. 827-847, 2014.
- [110] H. Torabi ve M. T. Rayhani, "Three dimensional finite element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil", *Comput Geotech*, c. 60, ss. 9-19, 2014.
- [111] A. Bayraktar ve E. Hökelekli, "Influences of earthquake input models on nonlinear seismic performances of minaret-foundation-soil interaction systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 139, s. 106368, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106368>.
- [112] S. Casolo, V. Diana, ve G. Uva, "Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower", *Bulletin of Earthquake Engineering*, c. 15, sy 5, ss. 1991-2014, 2017, doi: 10.1007/s10518-016-0061-y.
- [113] A. Drougkas vd., "Numerical modeling of a church nave wall subjected to differential settlements: soil-structure interaction, time-dependence and sensitivity analysis", *International Journal of Architectural Heritage*, 2019.
- [114] S. Bhattacharya ve S. Adhikari, "Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, c. 31, sy 5-6, ss. 805-816, 2011.
- [115] M. S. Power, C. Y. Chang, ve I. M. Idriss, "Variation of earthquake ground motion with depth", içinde *3rd US National Conference on Earthquake Engineering*, Charleston, USA, 1986, ss. 369-380.
- [116] J. G. Anderson, Y. Lee, Y. Zeng, ve S. Day, "Control of strong motion by the upper 30 meters", *Bulletin of the Seismological Society of America*, c. 86, sy 6, ss. 1749-1759, 1996.
- [117] M. H. Rayhani ve M. H. El Naggar, "Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil", *International Journal of Geomechanics*, c. 8, sy 6, ss. 336-346, 2008.
- [118] P. Anbazhagan, M. N. Sheikh, ve A. Parihar, "Influence of rock depth on seismic site classification for shallow bedrock regions", *Nat Hazards Rev*, c. 14, sy 2, ss. 108-121, 2013.
- [119] B. Fatahi, S. Tabatabaiefar, ve B. Samali, "Soil-structure interaction vs site effect for seismic design of tall buildings on soft soil", *Geomechanics and Engineering*, c. 6, sy 3, ss. 293-320, 2014.
- [120] J. H. Park, J. F. Choo, ve J.-R. Cho, "Dynamic soil-structure interaction analysis for complex soil profiles using unaligned mesh generation and nonlinear modeling approach", *KSCE Journal of Civil Engineering*, c. 17, sy 4, ss. 753-762, 2013.
- [121] S. H. Reza Tabatabaiefar, B. Fatahi, ve B. Samali, "Seismic behavior of building frames considering dynamic soil-structure interaction", *International Journal of Geomechanics*, c. 13, sy 4, ss. 409-420, 2013.
- [122] J. Su ve Y. Wang, "Equivalent dynamic infinite element for soil-structure interaction", *Finite elements in analysis and design*, c. 63, ss. 1-7, 2013.
- [123] R. L. Kuhlemeyer ve J. Lysmer, "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, c. 99, sy 5, ss. 421-427, 1973.

- [124] A. H. Nielsen, “Absorbing boundary conditions for seismic analysis in ABAQUS”, ABAQUS users’ conference, 2006, ss. 359-376.
- [125] G. Gazetas, “Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations”, Journal of geotechnical engineering, c. 117, sy 9, ss. 1363-1381, 1991.
- [126] PEER, “NGA West 2 | Pacific Earthquake Engineering Research Center”, <https://peer.berkeley.edu/research/nga-west-2>.
- [127] AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Turkey, Ankara, 2020.
- [128] TBEC, Turkish building earthquake code 2018. 2018.
- [129] Seismomatch, “Earthquake software for response spectrum matching”. Seismosoft Ltd., 2021. Erişim: 04 Ocak 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://seismosoft.com>
- [130] M. Ouanani ve B. Tiliouine, “Effects of foundation soil stiffness on the 3-D modal characteristics and seismic response of a highway bridge”, KSCE Journal of Civil Engineering, c. 19, sy 4, ss. 1009-1023, 2015.
- [131] A. Özmen ve E. Sayın, “Seismic Response of a Historical Masonry Bridge under Near and Far-fault Ground Motions”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, c. 65, sy 3, ss. 946-958, 2021, doi: 10.3311/PPci.17832.
- [132] A. C. Altunışık ve A. F. Genç, “Earthquake response of heavily damaged historical masonry mosques after restoration”, Natural Hazards and Earth System Sciences, c. 17, sy 10, ss. 1811-1821, 2017.
- [133] C. Cortez, R. Jünemann, C. Fernández, A. Urrutia, J. G. F. Crempien, ve R. Cienfuegos, “Performance of an RC building under seismic and tsunami actions in sequence via nonlinear dynamic analysis including soil-structure interaction”, Eng Struct, c. 272, s. 114942, 2022.
- [134] J. P. Wolf ve C. Song, “Some cornerstones of dynamic soil–structure interaction”, Eng Struct, c. 24, sy 1, ss. 13-28, 2002.
- [135] A. Burman, P. Nayak, P. Agrawal, ve D. Maity, “Coupled gravity dam–foundation analysis using a simplified direct method of soil–structure interaction”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 34, sy 1, ss. 62-68, 2012.
- [136] E. Hökelekli, “Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Orerasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2015.
- [137] Ö. Dabanlı, “Nur-U Osmaniye Camii’nin Deprem Performansının Belirlenmesi ve Koruma Önerileri”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [138] B. Sevim, “Kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
- [139] S. Güneş, “Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
- [140] M. Yetkin, “Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2016.
- [141] H. Erkek, “Yığma Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Deprem Davranışının İncelenmesi: Adana Büyük Saat Kulesi Örneği”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2021.
- [142] A. C. Altunışık, “Karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
- [143] A. Şahin, “Yapıların deneysel ve operasyonel modal analizleri için sayısal sinyal işleme”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
- [144] E. Alpaslan, K. Hacıfendioğlu, G. Demir, ve F. Birinci, “Response surface-based finite-element model updating of a historic masonry minaret for operational modal analysis”, The Structural Design of Tall and Special Buildings, c. 29, sy 9, s. e1733, 2020.
- [145] Y. Calayır, M. Yetkin, ve H. Erkek, “Finite element model updating of masonry minarets by using

operational modal analysis method”, içinde Structures, Elsevier, 2021, ss. 3501-3507.

- [146] A. Bayraktar, I. Çalik, ve T. Türker, “A simplified fundamental frequency formulation based on in-situ tests for masonry stone minarets”, *Exp Tech*, c. 46, sy 2, ss. 225-238, 2022.
- [147] A. C. Altunışık, F. Y. Okur, A. F. Genç, M. Günaydin, ve S. Adanur, “Automated model updating of historical masonry structures based on ambient vibration measurements”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, c. 32, sy 1, s. 04017126, 2018.
- [148] N.-J. Jacobsen, P. Andersen, ve R. Brincker, “Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis”, içinde *Proceedings of ISMA2006: international conference on noise & vibration engineering*, Katholieke Universiteit, 2006.
- [149] R. Brincker, L. Zhang, ve P. Andersen, “Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition”, içinde *Proceedings of the 18th international modal analysis conference (IMAC)*, San Antonio, TX, USA, 2000, ss. 625-630.
- [150] E. di Lorenzo, “Operational Modal Analysis for Rotating Machines”, Doktora Tezi, University of Naples" Federico II", 2017.
- [151] D. Hanson, *Operational modal analysis and model updating with a cyclostationary input*. University of New South Wales Sydney, 2006.
- [152] http://marmatek.com/urunler/oros_or36_analizor/, “OR36 Çok Kanallı Titreşim Analizörü | Marmatek”.
- [153] URL-2. [Online]. Available: <http://www.oros.com/3889-multi-channel-analyzers.htm>., “OROS”.
- [154] R. J. Allemang, “The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse”, *Sound and vibration*, c. 37, sy 8, ss. 14-23, 2003.
- [155] E. Aytulun, “System Identification, Model Updating And Seismic Performance Assessment of Stone Arch Bridges”, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2017.
- [156] N. Mendes ve P. B. Lourenço, “Sensitivity analysis of the seismic performance of existing masonry buildings”, *Eng Struct*, c. 80, ss. 137-146, 2014.
- [157] M. Valente ve G. Milani, “Seismic response and damage patterns of masonry churches: seven case studies in Ferrara, Italy”, *Eng Struct*, c. 177, ss. 809-835, 2018.
- [158] A. K. Chopra ve R. K. Goel, “A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings”, *Earthq Eng Struct Dyn*, c. 31, sy 3, ss. 561-582, 2002.
- [159] F. Minghini, E. Bertolesi, A. del Grosso, G. Milani, ve A. Tralli, “Modal pushover and response history analyses of a masonry chimney before and after shortening”, *Eng Struct*, c. 110, ss. 307-324, 2016.
- [160] L. Pelà, A. Aprile, ve A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges”, *Eng Struct*, c. 31, sy 8, ss. 1777-1788, 2009.
- [161] S. Cattari, S. Degli Abbatì, D. Ferretti, S. Lagomarsino, D. Ottonelli, ve A. Tralli, “Damage assessment of fortresses after the 2012 Emilia earthquake (Italy)”, *Bulletin of earthquake engineering*, c. 12, sy 5, ss. 2333-2365, 2014.
- [162] S. Tiberti, M. Acito, ve G. Milani, “Comprehensive FE numerical insight into Finale Emilia Castle behavior under 2012 Emilia Romagna seismic sequence: Damage causes and seismic vulnerability mitigation hypothesis”, *Eng Struct*, c. 117, ss. 397-421, 2016.
- [163] S. ATC, “Evaluation and retrofit of concrete buildings. vol. 1, ATC-40 report”, Redwood City (CA): Applied Technology Council, 1996.
- [164] P. Fajfar, “A nonlinear analysis method for performance-based seismic design”, *Earthquake spectra*, c. 16, sy 3, ss. 573-592, 2000.
- [165] E. L. Wilson, I. Farhoomand, ve K. J. Bathe, “Nonlinear dynamic analysis of complex structures”, *Earthq Eng Struct Dyn*, c. 1, sy 3, ss. 241-252, 1972.
- [166] A. Aşıkoğlu, Ö. Avşar, P. B. Lourenço, ve L. C. Silva, “Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey”, *Bulletin of Earthquake*

Engineering, c. 17, sy 6, ss. 3365-3395, 2019, doi: 10.1007/s10518-019-00603-6.

- [167] M. Valente ve G. Milani, “Damage survey, simplified assessment, and advanced seismic analyses of two masonry churches after the 2012 Emilia earthquake”, *International Journal of Architectural Heritage*, c. 13, sy 6, ss. 901-924, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Alper ÖZMEN

[illegible]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. A. Özmen, E. Sayin, 3D Soil Structure Interaction Effects on the Seismic Behavior of Single Span Historical Masonry Bridge, *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, 2023-2041, 2023.
2. A. Özmen, M. M. Maraş, Y. Ayaz, E. Sayin, Assessments of Masonry Buildings and Historical Structures during the 2020 Sivrice-Elâzığ Earthquake, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 67, no. 2, pp. 530–544, 2023
3. O. Onat, F. Deniz, A. Özmen, E. Özdemir, E. Sayin, Performance evaluation and damage assessment of historical Yusuf Ziya Pasha Mosque after February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, *Structures*, 58, 2023.

4. A. Özmen, E. Sayın, Evaluation of material properties of cultural heritage building by destructive and non-destructive testing: Malatya Taşhoran Church case study, *Construction and Building Materials*, 392, 2023.
5. A. Özmen, E. Sayın, Seismic Response of Single Span Masonry Arch Bridges Located in Elazığ and Malatya, *International Journal of Bridge Engineering*, 11(1), 2023.
6. A. Özmen, M. M. Maraş, Y. Ayaz, E. Sayın, Assessments of Masonry Buildings and Historical Structures during the 2020 Sivrice-Elâzığ Earthquake, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 2023.
7. M. Atar, O. İnce, Ö.F. Taş, A. Özmen, E. Sayın, Betonarme Prefabrik Endüstri Yapılarının 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Hasarlarının İncelenmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 5(2), 291-300, 2023.
8. A. Özmen, E. Sayın, Seismic Behaviour of a Single Span Historical Masonry Bridge. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 10(3), 4345- 356, 2023.
9. E.G. Yılmaz, E. Sayın, A. Özmen, Dynamic Analysis of Historical Masonry Arch Bridges under Different Earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge, *Turkish Journal of Science and Technology*, 2022.
10. M. M. Maraş, A. Özmen, E. Sayın, Y. Ayaz, Seismic Assessment of the Historical Sütlu Minaret Mosque, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 2022.
11. K. Akın, E. Sayın, A. Özmen, Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2022.
12. A. Özmen, E. Sayın, Deprem Etkisinde Çok Katlı Betonarme Bir Binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Eşdeğer Deprem Yüklerinin Karşılaştırılması, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 2021.
13. A. Özmen, E. Sayın, Seismic Response of a Historical Masonry Bridge under Near and Far-fault Ground Motions, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(3), 2021.
14. A. Özmen, E. Sayın, Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 2020.
15. A. Özmen, E. Sayın, Seismic assessment of a historical masonry arch bridge, *Journal of Structural Engineering Applied Mechanics*, 1(2), 2018.

Bildiriler:

1. O. Onat, F. Deniz, E. Özdemir, A. Özmen, E. Sayın Capacity evaluation of historical Yusuf Ziya Pasha Mosque and damage comparison after February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23), 2023.
2. A. Özmen, E. Sayın, Assessment of the Mechanical Properties of a Masonry Church in Malatya by NonDestructive Testing, *The International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE)*, 2023.
3. A. Özmen, E. Sayın, Seismic Assesment of A Masonry Arch Bridge Under Different Earthquakes, *International Engineering and Natural Sciences Conference*, 2019.
4. A. Özmen, E. Sayın, Tarihi Yığma Bir Köprünün Lineer Dinamik Analizi, III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, 2019.
5. A. Özmen, E. Sayın, Seismic Behaviour of Mavılık Masonry Arch Bridge, *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018)* , 2018.

6. A. Özmen, E. Sayın, Linear Dynamic Analysis of a Masonry Arch Bridge, International Conference on Innovative Engineering Applications (CIEA' 2018), 2018.

Projeler:

1. TÜBİTAK 1002-C Doğal Afetler Odaklı Saha Çalışması, Araştırmacı. Malatya'da Bulunan Tarihi Yapıların 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Değerlendirilmesi, 2023.
2. Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Etkisi Altında Lineer ve Lineer Olmayan Davranışının İncelenmesi, 2021.
3. Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı. Malatya'daki Tarihi Eserlerin Operasyonel Modal Analizi ve Sismik Performans Değerlendirmesi, 2021.
4. Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı. Farklı Sönüm Tipleri ve Farklı Sönüm Oranları Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkisinin Değerlendirilmesi, 2020.
5. Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı. Yakın ve Uzak Fay Hareketlerine Maruz Tarihi Yığma Bir Köprünün Sismik Performansının Değerlendirilmesi, 2019.
6. Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı. Tarihi Yığma Dutpınar Köprüsünün Sismik Değerlendirilmesi, 2019.