

**T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TARİHİ KAYALAR CAMİİ ORTAMSAL TİTREŞİM TESTLERİ,
MODEL KALİBRASYONU VE YAPISAL DEĞERLENDİRMESİ**

Serap TOPÇU

Danışman

Prof.Dr.Murat Emre Kartal

II.Danışman

Doç.Dr. İbrahim Serkan Mısır



İZMİR, 2021

TEZ ONAYI

Serap TOPÇU tarafından hazırlanan " Tarihi Kayalar Camii Ortamsal Titreşim Testleri, Model Kalibrasyonu ve Yapısal Değerlendirmesi" adlı tez çalışması 14/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde İzmir Demokrasi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Prof. Dr. Murat Emre KARTAL**
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Elif Çağda KANDEMİR**
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Engin AKTAŞ**
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

TAAHÜTNAME

Bu tezin İzmir Demokrasi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Serap TOPÇU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLO DİZİNİ.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix

1 GİRİŞ.....	1
1.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Tarihi Yığma Yapılarda Deprem Etkisi Altında Gözlenen Hasar Türleri ve Hasar Mekanizmaları	2
1.3 Yığma Yapı Duvarlarının Düzlemdışı Deprem Davranışı	5
2 TARİHİ YIĞMA YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE MEVCUT DURUM DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ	8
2.1 Mevcut Durum Değerlendirme Yöntemleri	8
2.1.1 Arşiv Taraması ve Gözlemsel Değerlendirmeler	8
2.1.2 Tahribatsız Deneyler	9
2.1.3 Az Tahribatlı Deneyler.....	11
2.2 Yığma Yapılarda Mekanik Özellikler	12
2.2.1 Basınç Gerilmesi Davranışı.....	12
2.2.2 Çekme Gerilmesi Davranışı	13
2.2.3 Kayma Gerilmesi Davranışı	14
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
3.1 Yığma Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilmiş Saha ve Laboratuvar Testleri..	15
3.2 Yığma Yapıları Sayısal Modelleme Teknikleri.....	23
3.2.1 Mikro Modelleme.....	24
3.2.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme (Mezo Modelleme)	25
3.2.3 Makro Modelleme	25

3.3	Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	27
3.3.1	Ölçüm Ekipmanları	29
3.3.1.1	İvmeölçerler (Titreşim Sensörleri).....	29
3.3.1.2	Veri Toplama Sistemleri	29
3.3.2	Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	30
4	TARİHİ KAYALAR CAMİİ ÜZERİNDE YÜRÜTÜLEN ÇALIŞMALAR	34
4.1	Tarihi Kayalar Camiinin Tarihsel Gelişimi ve Yapısal Özellikleri.....	34
4.2	Kayalar Camii Ortamsal Titreşim Testleri	36
4.3	Operasyonel Modal Analiz ile Sayısal Model Kalibrasyonu	41
5	TARİHİ YAPININ SİSMİK ANALİZİ	43
5.1	Doğrusal olmayan statik itme analizi	43
5.1.1	Malzeme Modelinin Tanımlanması	44
5.1.2	Doğrusal olmayan statik itme analizinin sonuçları	47
5.2	Kinematik Analiz Yöntemi İle Yapısal Değerlendirme	53
5.3	Doğrusal olmayan dinamik analiz	57
6	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
7	KAYNAKÇA.....	65
	ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yığma duvar düzlemiçi göçme mekanizmaları (a) diyagonal kesme göçmesi (b) Kayma-kesme göçmesi (c) devrilme ve (d) topuk ezilmesi.....	4
Şekil 1.2 Düzlemdışı hasar mekanizmaları	4
Şekil 1.3 (a) Rijit diyaframı olmayan yığma duvarın düzlemdışı deprem hasarı (b) yığma duvarın mesnetleri boyunca çatlayarak ayrılması	6
Şekil 1.4 Christchurch depremi sonrasında gözlenen düzlemdışı hasarlar	6
Şekil 1.5 Darfield depremi sonrası yığma yapılarda gözlenen düzlemdışı hasarlar	7
Şekil 2.1 Basınç yükleme altında tuğla ve harç birimlerin gerilme durumu	13
Şekil 2.2 Tek eksenli çekme gerilmesi altında yığma yapıların tipik davranışı.....	13
Şekil 2.3 Başlangıç kayma gerilmesi belirleme deney düzeneği	14
Şekil 2.4 Kayma gerilmesi altında yığma yapıların davranışı	14
Şekil 2.5 Yığma yapılar üzerinde gerçekleştirilecek araştırma teknikleri ve uygulanabilecek test prosedürü	17
Şekil 2.6 Single Flat-jack testi uygulama aşamaları	18
Şekil 2.7 Double flat-jack test uygulaması	19
Şekil 2.8 Hava yastığı ile düzlemdışı doğrultuda üniform yarı-statik yükleme test düzeneği.....	20
Şekil 2.9 Aktivatör ile dört seviyeden yarı-statik düzlemdışı yükleme testi.....	21
Şekil 2.10 Aktivatör ile tepeden yarı-statik düzlemdışı yükleme testi.....	22
Şekil 2.11 Uzun ve kısa duvarlarda oluşan farklı çatlak tipleri	23
Şekil 3.1 Mikro modelleme tekniği.....	25
Şekil 3.2 Mezo modelleme tekniği.....	25
Şekil 3.3 Makro modelleme tekniği	26
Şekil 3.4 Malzeme özelliklerinin homojenleştirilmesi.....	26
Şekil 3.5 (a) Üç eksenli ivmeölçer (b) tek eksenli ivmeölçer	29
Şekil 3.6 (a) Veri toplama ünitesi (b) ivmeölçer ile veri toplama sistemi bağlantı kablosu	30
Şekil 4.1 Kayalar Camii Konumu	34
Şekil 4.2 Kayalar camii kesit ve plan görünümleri	35
Şekil 4.3 Kayalar Camii Arşiv Fotoğrafları ve Mevcut Durumu.....	36
Şekil 4.4 Ön sayısal modelin ilk dört serbest titreşim frekansına karşılık gelen mod şekilleri.....	37
Şekil 4.5 Kayalar Camii cephe ivmeölçer yerleşim planları.....	38
Şekil 4.6 Kayalar Camii cephe duvarları üzerine yerleştirilen ivmeölçerin konumu	39
Şekil 4.7 Tarihi Kayalar Camii SSI yöntemine göre elde edilen stabilizasyon diyagramı.....	40

Şekil 4.8 Tarihi yığma yapı örneği OMA sonuçları (a-c) SSI yöntemine göre elde edilen 1., 5. ve 8. mod şekilleri ve frekans değerleri (Hz)	40
Şekil 4.9 Yığma yapı örneğinin kalibre edilen modlara ait sayısal mod şekilleri: 3., 9. ve 11.mod	42
Şekil 5.1 Kayalar Camii için kullanılan yatay elastik spektral ivme katsayısı grafiği, (b) kurulan sayısal model üzerinde sonlu elemanlar ağı ve duvar isimlerinin gösterimi.....	44
Şekil 5.2 CDP malzeme modeli (a) tek eksenli çekme gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (b) tek eksenli basınç gerilme- birim şekil değiştirme davranışı	45
Şekil 5.3 CDP malzeme modeli tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme)	47
Şekil 5.4 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (MPa) (b) yerdeğiştirme profili (mm)	48
Şekil 5.5 -y yönünde kuvvet uygulanan yatay kuvvetler etkisindeki modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (b) yer değiştirme profili	49
Şekil 5.6 +y yönünde uygulanan yatay kuvvetler etkisinde modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (b) yer değiştirme profili	50
Şekil 5.7 Güney-kuzey (-y) yönünde uygulanan yatay kuvvet etkisi altındaki duvarlar için yanal yük-tepe ötelenme oranı eğrileri.....	51
Şekil 5.8 Kuzey-güney (+y) yönünde uygulanan yatay kuvvet etkisi altındaki duvarlar için yanal yük-tepe ötelenme oranı eğrileri	51
Şekil 5.9 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda verilen statik itme eğrisi ve sınır durumları	52
Şekil 5.10 Şekil 5.10 (a-d) Güney-kuzey (-y) yönünde etkiyen yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme hasarının gelişme evreleri	52
Şekil 5.11 (a-d) Kuzey-Güney (+y) yönünde etkiyen yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme hasarının gelişme evreleri.....	53
Şekil 5.12 (a) Mekanizma I (MI) ve (b) Mekanizma II (MII)	54
Şekil 5.13 Duvar modelinin açılma mekanizma durumu.....	54
Şekil 5.14 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları.....	55
Şekil 5.15 Kayalar Camii geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu. 56	
Şekil 5.16 Doğrusal olmayan dinamik analizde kullanılan ivme kayıtları	58
Şekil 5.17 Farklı deprem kayıtları için zaman-tepe deplasman eğrileri.....	59
Şekil 5.18 Farklı deprem kayıtları için hasar gelişimleri; (a) çekme hasarının başlangıcı; (b) gelişmesi ve (c) analiz sonu	60

TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Yığma yapı örneği ön sayısal modelinin ve deneysel modların karşılaştırılması.....	41
Tablo 1.2 Yığma yapı kalibre edilmiş sayısal modelinin ve deneysel modların karşılaştırılması	42
Tablo 1.3 Yığma yapı örneğinin ön ve güncel sayısal modeline ait model parametresi parametreleri	42
Tablo 1.4 CDP malzeme modeline ait parametreler	47

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve birikimlerini benimle paylaşarak akademik gelişimime büyük katkı sağlayan ilgi alaka ve hoşgörüsünü hiçbir zaman eksik etmeyen değerli tez danışmanlarım Doç.Dr. İbrahim Serkan MISIR ve Prof.Dr. Murat Emre Kartal'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar; AFAD-Ulusal Deprem Araştırma Programı'nın UDAP-Ç-16-05 kodlu araştırma projesinin maddi desteği, T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün teknik desteği ile gerçekleşmiştir.

Tez çalışmalarımın bağlı olduğu UDAP-Ç-16-05 kodlu araştırma projesine katkıda bulunan araştırmacılar Prof.Dr. Özgür Özçelik, İnş. Yük. Müh. Fikret KURAN, İnş. Yük. Müh. Ercan TUNA, Dr.Müh. Umut YÜCEL, Dr.Öğr.Üyesi Erkan DURMAZGEZER, Arş.Gör. Gökhan YÜCEL ve Arş.Gör.Cansu Beril ESER'e teşekkür ederim.

Akademik alanda bilgi ve tecrübelerini esirgemeyerek, tez çalışmamın ilerlemesine katkı sağlayan tüm lisans ve yüksek lisans hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca tüm başarılarım sevgili annem Gülşenem TOPÇU, babam Mücahit TOPÇU, ikiz kardeşim Y.Mimar Elif TOPÇU ve değerli ablalarım Aylin GÜMÜŞGERDAN ve İnş.Müh.Aysun AKBAŞAK'ın bana verdikleri destek ile mümkün olmuştur.

Serap TOPÇU

İzmir,2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARİHİ KAYALAR CAMİİ ORTAMSAL TİTREŞİM TESTLERİ, MODEL KALİBRASYONU VE YAPISAL DEĞERLENDİRMESİ

Serap TOPÇU

İzmir Demokrasi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat Emre KARTAL

II.Danışman: Doç.Dr. İbrahim Serkan MISIR

Tez kapsamında gerçek bir tarihi yığma yapı ele alınmış, yapı duvarlarının düzlemiçi ve düzlemdışı doğrultudaki davranışını temsil edebilecek bir doğrusal olmayan sayısal model oluşturularak çeşitli analizler ile yapısal değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda seçilen tarihi Foça Kayalar Cami yapısının dinamik karakteristikleri saha testleri ile belirlenmiştir. Bu aşamada, çevresel etkilerin yapıda meydana getirdiği düşük genlikli titreşimlerin ölçümüne dayanan Operasyonel Modal Analiz tekniklerinden yararlanılmıştır. Yapı duvarlarına yerleştirilen ivmeölçerler ile çevresel etkiler altında yapıda meydana gelen titreşim sinyalleri zaman tanım alanında alınarak frekans tanım alanında işlenmiştir. Bu sayede yapının dinamik karakteristiğini yansıtan mod şekilleri ve doğal titreşim frekansları elde edilmiş, makro modelleme tekniği ile oluşturulan katı sonlu elemanlar modeli bu deneysel veriler ile kalibre edilmiştir. Böylece gerçek yapının elastik davranışını mümkün olduğunca temsil eden

bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sunulan tezin bağı olduğu araştırma projesi kapsamında benzer yapılar üzerinde yürütülen mekanik test sonuçları kullanılarak doğrusal olmayan malzeme parametreleri tanımlanmıştır. İncelenen tarihi yığma yapı duvarlarının sismik davranışı, doğrusal olmayan statik itme analizi, kinematik analiz ve doğrusal olmayan dinamik analizler ile değerlendirilerek hasar senaryoları elde edilmiştir.

2021, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tarihi yığma yapılar, operasyonel modal analiz, sonlu elemanlar modellemesi, sayısal model kalibrasyonu, sismik değerlendirme, düzlemsiz hasar.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AMBIENT VIBRATION TESTS, MODEL CALIBRATION AND STRUCTURAL ASSESSMENT OF HISTORICAL KAYALAR MOSQUE

Serap TOPÇU

**Izmir Democracy University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor : Prof. Dr. Murat Emre KARTAL

II.Supervisor: Assoc.Prof. İbrahim Serkan MISIR

Within the scope of the thesis, a real historical masonry building was discussed, a non-linear numerical model that could represent the behavior of the building walls in the in-plane and out-of-plane directions was created and its structural evaluation was carried out with various analyzes. In this context, the dynamic characteristics of the historical Foça Kayalar Mosque structure selected were determined by field tests. At this stage, Operational Modal Analysis techniques based on the measurement of low amplitude vibrations caused by environmental effects in the structure were used. With the accelerometers placed on the building walls, vibration signals occurring in the building under environmental effects are taken in the time domain and processed in the frequency domain. In this way, mode shapes and natural vibration frequencies reflecting the dynamic characteristics of the structure were obtained, and the solid finite element model created with the macro modeling technique was calibrated with

these experimental data. Thus, a finite element model that represents the elastic behavior of the real structure as much as possible is constructed. Within the scope of the research project to which the presented thesis is connected, nonlinear material parameters are defined by using the mechanical test results on similar structures. Damage scenarios were obtained by evaluating the seismic behavior of the examined historical masonry walls with nonlinear static pushover analysis, kinematic analysis and nonlinear dynamic analysis.

2021, 77 pages

Keywords: Historical masonry structures, operational model analysis, finite element modeling, numerical model calibration, seismic assessment, out-of-plane damage.

1 GİRİŞ

Tarihi yığma yapılar, bulunduğu toplumun kültürel ve sanatsal mirasını temsil eden en önemli yapılardır. Pek çoğu deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunan bu eşsiz yapıları gelecek nesillere aktarmak, ancak bu yapıların sismik davranışları hakkında yeterli bilgiye sahip olmakla mümkün olacaktır. Yapım tekniğinin basitliğine rağmen, insanlık tarihindeki ilk yapı örneklerinden biri olan yığma yapıların sismik davranışlarını tahmin etmek oldukça zor ve detaylıdır. Her bir yığma yapının taşıyıcı sistem türü ve malzeme özelliği farklı olabilmektedir. Bu sebeple yığma yapılar konusunda yapılan çalışmalar hem yerinde hem de laboratuvar testleri ile desteklenmelidir (Costa ve ark., 2016; Mısır ve ark., 2017).

Tarihi yığma binaların duvarları depremler sırasında farklı doğrultudaki yüklere maruz kaldığı halde araştırmaların büyük kısmında duvarların yalnızca düzlemiçi doğrultudaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca yapıda kullanılan yığma birimler arasındaki birleşimin zayıf olması, harç boşluklarının varlığı, duvar tabakaları arasındaki yetersiz bağlantı, mesnetlenmemiş duvar uzunluğunun fazla olması ve rijit diyafram etkisi gösteren elemanların olmaması gibi nedenler duvarın düzlemiçi dayanıma ulaşmadan düzlemdışı doğrultuda göçmesine öncülük etmektedir (Mısır ve ark.,2018). Son yıllarda meydana gelen depremler sonrası yerinde yapılan incelemeler, yığma yapıların düzlemdışı hasar görebilirliğinin azımsanmayacak derecede olduğunu ortaya koymuştur. (Valente ve Milani, 2019; Oyarzo-Vera ve ark.,2009)

Bu nedenle tarihi mirasımız olan yığma yapıların düzlemdışı hasar mekanizmalarına öncülük eden hasar limitlerinin belirlenmesi, sismik değerlendirmenin yapılması için hem deneysel hem sayısal yöntemler kullanılmalı ve gerçek yapının mekanik özelliklerini en iyi şekilde temsil eden kalibre edilmiş sonlu elemanlar modelleri ile hasar senaryoları ve müdahale planları oluşturulmalıdır.

1.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Tarihi yapılar geçmiş ile gelecek arasında kültürel aktarımı sağlayan, bulunduğu bölgenin simgesi haline gelerek, kültürel mirasımızı oluşturan en önemli yapılardır. Bu sebeple varlığını koruması ve gelecek nesillere aktarılması büyük önem arz etmektedir. Günümüze ulaşan tarihi yapıların birçoğu yığma yapı formundadır. Yığma yapıların sismik analizi, yapım tekniklerindeki çeşitlilikler, düzensiz geometriye sahip olmaları, kullanılan malzemelerdeki farklılıklar gibi nedenlerden dolayı oldukça kapsamlı ve karmaşıktır. Bu nedenle yığma yapıların analizinde sayısal yöntemlerin yanı sıra gerçek yapıyı en iyi temsil edebilecek sayısal model oluşturabilmek adına deneysel yöntemlerin de kullanılması büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında tarihi bir yığma yapı için, duvarların düzlemiçi ve düzlem dışı yükler altındaki davranışını temsil edebilecek bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, yapıdan alınan deneysel veri ile model kalibrasyonu tamamlanmıştır. Gerçek yapıyı temsil edebilen bu sayısal model üzerinde doğrusal olmayan sismik analizler yürütülmüş, hasar senaryoları değerlendirilmiştir.

1.2 Tarihi Yığma Yapılarda Deprem Etkisi Altında Gözlenen Hasar Türleri ve Hasar Mekanizmaları

Yığma yapı malzemeleri; etkili ısı ve ses yalıtımı, estetik, mimari görünüm, yangında dayanıklılık ve ekonomik olması gibi avantajlara sahip olduğundan dolayı hem tarihte hem de günümüzde tercih edilmiştir. Bununla birlikte özellikle kâgir yığma yapıların düşük süneklığe sahip olması, depremler sırasında elastik ötesi deformasyonlar yoluyla kısıtlı miktarda enerji tüketebilmesi, depremde oluşan gevrek hasar modları ile doğrudan ilişkilidir. Yığma blokları birbirine bağlamak amacıyla kullanılan harcın mekanik ve kimyasal özellikleri de kullanılan yapı malzemeleri gibi yığma yapı davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

Düşey yüklerin yanı sıra sismik yatay yüklere de karşı koyması beklenen yığma yapı duvarlarında deprem anında düzlemiçi ve düzlem dışı atalet kuvvetleri meydana gelir. Duvarın düzlemiçi davranış göstermesine etki eden yük kombinasyonları, kullanılan malzemenin özelliklerine, yapı geometrisine ve yükleme çeşidine

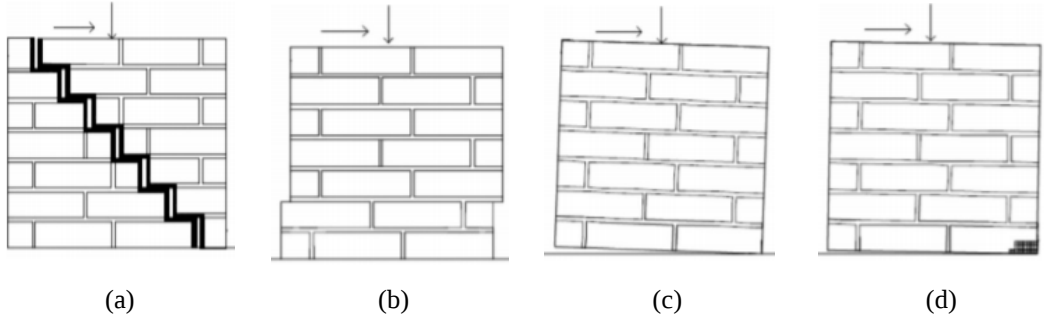
(çevrimsel ve monotonik) bağı olarak değişmektedir (Zhuge ve ark.,1998). Yığma yapı duvarının kalınlığı belirlenirken temel olarak duvara etkiyen düşey yüklerin oluşturduğu basınç gerilmelerinin duvar basınç emniyet gerilmesini aşmaması, deprem kuvveti etkisi ile oluşacak kayma gerilmelerinin de kullanılan malzemelerin kayma emniyet gerilmesini geçmemesi gereklidir.

Düzlemiçi sismik yükler altında duvarda oluşacak hasar mekanizmaları; kesme göçmesi, kayma-kesme göçmesi, devrilme ve tabanda ezilme göçmesi olarak gruplandırılır (Şekil 1.1). Bu hasar mekanizmaları, kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve yığma duvarın boyutlarına bağı olarak değişmektedir (Khan ve ark.,2017).

Diyagonal kesme göçmesi: Sismik kuvvetler altında yığma yapıda yaygın olarak gözlenen tipik hasar modudur. Duvarın asal çekme gerilme değeri çekme dayanım değerini aştığı durumda meydana gelir. Bu hasar modunda yığma yapı duvarında zayıf harç birimleri boyunca diyagonal çatlaklar oluşarak duvar göçer.

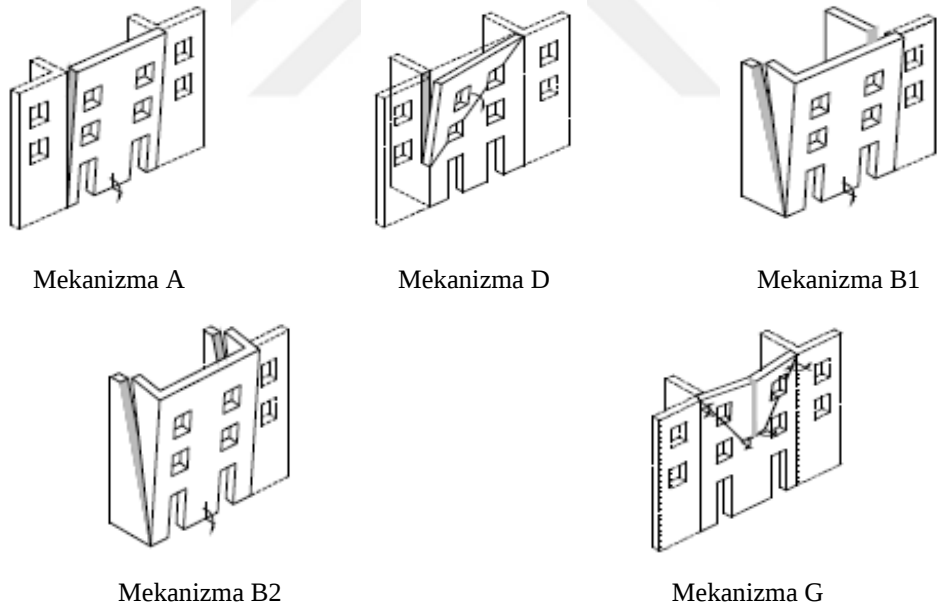
Kayma-kesme göçmesi: Düşük eksenel kuvvetler ve yığma birimleri bağlayan harç malzemesinin düşük kalitede olduğu durumlarda gözlenen bir hasar modudur. Bu durumda sismik kuvvetler harç derzinin yatay olarak kaymasına sebep olur.

Devrilme ve topuk ezilmesi: Sismik kuvvet etkisinde yanal kuvvet arttıkça yığma duvarın alt bölgelerinde çekme çatlakları oluşur ve devrilme mekanizması ortaya çıkar. Tabandaki basınç bölgesinde meydana gelen mafsallaşmadan dolayı devrilme meydana gelir.



Şekil 1.1. Yığma duvar düzlemiçi göçme mekanizmaları (a) diyagonal kesme göçmesi, (b) kayma-kesme göçmesi, (c) devrilme ve (d) topuk ezilmesi. (Khan ve ark., 2017)

Yığma yapı duvarlarında, duvara dik etki eden sismik kuvvetler sebebiyle düzlemdışı hasar mekanizmaları meydana gelir. Duvarların yapısal konfigürasyonlarındaki karmaşıklığa ve duvar köşelerindeki bağlantının tipi ve gücüne bağlı olarak düzlemdışı göçme birkaç olası hasar mekanizması türü ile oluşmaktadır (Shı Yanan ve ark., 2008) (Şekil1.2).



Şekil 1.2 Düzlemdışı hasar mekanizmaları (Shı Yanan ve ark., 2008)

Mekanizma A, ön cephenin sağ ve sol duvarlarla birleşiminin düzlemdışı göçmeyi engellemeye yeterli olmadığı veya yan duvarlar ile herhangi bir bağlantının bulunmadığı durumlarda ortaya çıkar. Cephenin bir kısmının çapraz bir çizgi boyunca

hasar aldığı D mekanizması, cephenin sadece bir kenarda kuvvetli bağlantıya sahip olduğunu durumda gözlenir. Köşelerdeki tek taraflı bağlantı, yan duvarı cepheye dahil edecek kadar güçlü olduğunda B1 mekanizmasının meydana gelmesi de mümkündür. Her iki yan duvar da bu duruma dahil oluyorsa mekanizma B2 meydana gelebilir. Cephe açıklığı fazla olduğu durumlarda göçme, duvarın tepe noktasından uzanan yamuk parçanın merkezinden başlar ve köşelere doğru ilerleyerek G mekanizması meydana gelir (Shi ve ark.,2008).

1.3 Yığma Yapı Duvarlarının Düzlemdışı Deprem Davranışı

Bilinen en eski yapım teknikleri arasında olmalarına karşın, yığma yapıların yapısal davranışları oldukça karmaşıktır. Yapının global davranışına genellikle düzlemiçi doğrultudaki duvar karakteristikleri öncülük ederken, düzlemdışı doğrultuda oluşacak hasarlar da önemli boyutlarda olmaktadır. Deprem etkisi altında, özellikle rijit diyafram etkisi oluşturacak yapısal elemanı bulunmayan yığma duvarlarda, düzlemdışı doğrultuda yerdeğiştirmeler/göçmeler meydana gelmektedir. Geçmiş depremlerde gözlenen yapısal davranış ve hasar türleri yığma yapı duvarlarının düzlemdışı doğrultudaki hasar görülebilirliğini ortaya koymaktadır.

2009 yılı başlarında İtalya / L'Aquila'da meydana gelen depremlerde çok sayıda yığma binada rijit diyaframla desteklenmeyen çok tabakalı yığma duvarlarda düzlemdışı doğrultuda göçme (Şekil 1.3a) ve duvarın mesnet bölgelerinden çatlayarak ayrılması (Şekil 1.3b) gibi düzlemdışı hasar mekanizmaları gözlenmiştir (Augenti ve Parisi, 2010).

Yeni Zelanda'da 2011 yılında gerçekleşen Christchurch depremi sonrasında hasar alan yığma yapılar incelenerek meydana gelen tek yönlü eğilme ve çift yönlü eğilme olarak gelişen düzlemdışı hasarlara rastlanmıştır (Dizhur ve ark., 2011) (Şekil 1.4).



(a)

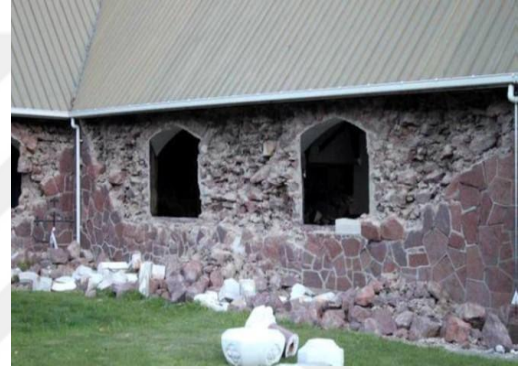


(b)

Şekil 1.3 (a) Rijit diyaframı olmayan yığma duvarın düzlemdışı deprem hasarı (b) yığma duvarın mesnetleri boyunca çatlayarak ayrılması (Augenti ve Parisi, 2010)



(a)



(b)

Şekil 1.4 Christchurch depremi sonrasında gözlenen düzlemdışı hasarlar

4 Eylül 2010 tarihinde Yeni Zelanda’da gerçekleşen Darfield depreminin ardından yapılan incelemelerde birçok yığma yapıda düzlemdışı hasar tespit edilmiştir. Ismail ve ark., (2011); bölgede yaptığı araştırmalar sonucunda hasar istatistiklerini inceleyerek gözlenen hasar türünün, döşemelerin duvarlara yük aktarmadığı durumlarda geliştiğini vurgulamışlardır. Bölgede en sık gözlenen hasar türünün yığma duvarların döşeme veya çatı ile birleştiği bölgedeki düzlemdışı doğrultuda ayrışma olduğu vurgulanmıştır (Şekil 1.5).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1.5 Darfield depremi sonrası yığma yapılarda gözlenen düzlemsel hasarlar

2 TARİHİ YIĞMA YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE MEVCUT DURUM DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

2.1 Mevcut Durum Değerlendirme Yöntemleri

2.1.1 Arşiv Taraması ve Gözlemsel Değerlendirmeler

Bulundukları coğrafyanın sosyolojik, ekonomik ve kültürel öğelerini bünyesinde barındıran tarihi yapıları korumak ve daha dayanıklı kılmak amacı ile yapılacak müdahalelerden önce mevcut yapıyı tanımak ve hakkında bilgi sahibi olmak büyük önem taşımaktadır. Tarihi yapıları anlamak amacı ile yapılan tarihi araştırmalar, yapı hakkında bilinmeyen noktaları aydınlatarak bilgiyi elde etmeye yardımcı olur. Tarihi bir araştırma sayesinde yapı hakkında elde edilen bilgiler ile yapının geçirdiği doğal afetler, onarım çalışmaları ve aldığı hasarlar ile ilgili belirsizlikler açığa çıkmaktadır. Arşiv belgeleri depremlerin meydana geldiği zamanı, bölgeleri, hangi yapılara hasar verdikleri ve yapılan onarımlar hakkında bilgi verirler. Tarihi bir yapı hakkında yapılacak araştırma ve arşiv taraması ile ilgili yapılması gerekenleri şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Yapının arşiv kayıtlarında bulunan fotoğraflar, planlar, proje çizimleri ve her türlü kayıt belgeleri detaylı bir şekilde incelenerek değerlendirilebilir. İncelenen yapı hakkında yapılan çalışmalar ve yayınlar takip edilerek daha güncel bilgilere sahip olmak mümkündür.
- İlk yapım ve onarım kitabeleri günümüze ulaşmış olan tarihi yapılar için bu belgeler incelenerek yapım ve onarım tarihleri, inşaat sırasında geçirdiği aşamalar ile ilgili bilgiler edinmek mümkündür.
- Onarım keşif ve belgeleri, yapıya zaman içerisinde yapılan müdahalelerin boyut ve niteliğinin anlaşılmasını sağlarlar.
- Yapının tarih boyunca geçirdiği depremler, onarım ve güçlendirme çalışmaları, farklı dönemlerde uygulanan çeşitli yapısal müdahaleler ve geçmiş hasarlar tespit edilmesi gereken önemli noktalardır.

Anıtsal olmayan tarihi yapılar için bu belge ve arşiv kayıtlarına ulaşmak mümkün olmayabilir bu durumda eserin önceki durumunu anlamak ve geçirdiği

değişimleri tespit etmek amacıyla geçmiş dönemlerde yapıyı ziyarete giden seyyahların kitaplarından ve arşivlerinden, yapının çevresinde bulunan diğer tarihi eserlerle ilgili kaynaklardan ve özel aile arşivlerinden yararlanmak mümkündür.

Yapının mevcut durumunu saptamada yerinde yapılan inceleme ve gözlemler büyük öneme sahiptir. Yerinde yapılacak incelemelerde göz önünde bulundurulması gereken hususları özetleyecek olursak;

- Yapı taşıyıcı sistemi incelenmeli ve yük aktarımının hangi elemanlar vasıtasıyla sağlandığı ile yük taşıma mekanizması tespit edilmelidir.
- Yapı elemanlarında ve yapı malzemelerinde meydana gelen hasarların seviyesi ve boyutları incelenerek kayıt altına alınmalıdır.
- Yapının geometrisi incelenmeli ve meydana gelebilecek değişiklikler kayıt altına alınmalıdır.
- Yapıda görülen hasarlar, çatlaklar ve göçme biçimleri ve duvarlarda meydana gelen düşeyden sapmalar tespit edilmeli ve basit aletlerle ölçümleri yapılmalıdır. Yapılan tespitler, hasar haritalarını oluşturmak amacı ile video ve fotoğraflar ile kayıt altına alınmalıdır.
- Yapılacak uzun dönemli araştırmalar ve gözlemler sonucunda , nem ve sıcaklık değişimleri, çatlak genişliğinin değişimi, yapıda oluşan farklı oturmalar ve yerdeğiştirmeler tespit edilebilir. Yapılan uzun dönem araştırmalar ile malzeme içeriğindeki bozulmalar, taşıyıcı sistemde oluşan zayıflıklar, iklim değişimi kaynaklı problemleri ve etkilerinin anlaşılmasında büyük yarar sağlamaktadır.

2.1.2 Tahribatsız Deneyler

Yapıda gözle görülür bir hasara neden olmadan kullanılan malzemelerin tespiti ve duvarın mevcut durumunu değerlendirmede kullanılan tahribatsız test yöntemleri, mukavemet ve rijitlik gibi malzeme özelliklerinin doğrudan ölçümünü sağlamaz. İncelenen yapı malzemesinin göreceli kalitesi hakkında bilgi verirler. İncelenecek yapıya uygun deney yönteminin seçimine, sayısına ve uygulanacağı bölgeye uzaman

ekip tarafından karar verilmelidir. Tahribatsız deney yöntemlerinin bazı kısa açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

Darbeli çekiç deneyi (Sertlik ölçümü) : Yüzey sertliği, genellikle geri sıçramanın ölçülmesi prensibine dayanan Schmidt Çekici ile ölçülür. Betonun değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan yöntem, aynı zamanda duvar malzemesi homojenliğindeki varyasyonları tanımlamak için de kullanılır. N tipi normal ve P tipi pandüllü olmak üzere iki tip çekiç mevcuttur. N tipi, dayanımı yüksek olan beton, doğal taş gibi malzemelerde, P tipi ise harç, tuğla gibi dayanımı düşük olan malzemelerde tercih edilmektedir. Sertlik ölçümü, yığma yapı malzemesi olan doğal taşlarda, harçlarda ve betonda tek başına yeterli değildir. Yapı genelinde dağılımın belirlenmesi ve veri elde etmek amacıyla kullanılır.

Ultrases deneyi: Yüksek frekanslı ses dalgası üreten aletler ile ölçüm alınır. Ses geçiş hızı ile malzemelerin homojenliği hakkında fikir sahibi olunur. Elemanlarda meydana gelen çatlak yönü ve derinliğinin araştırılması amacıyla da uygulanabilir.

Termografi yöntemi: Yüzeye yakın bölgelerdeki hasarların varlığını ve yerini tespit etmek amaçlı kullanılan elektromanyetik radyasyon esasına dayalı bir test yöntemidir. Termografi yönteminde hasarlı bölgelerin farklı termal iletkenlik göstermesinden dolayı ısı akışı etkilenecek yüzey sıcaklığının değişimine sebep olur. Yüzey sıcaklığı kızılötesi tarayıcılar ile ölçülerek hasar tespiti yapılır.

Radar tarama /Georadar yöntemi: İncelenen ortam içerisine elektromanyetik dalgalar iletilir, alıcı ile verici arasında geçen zaman kaydedilerek bölge taranır. Bu yöntem ile yapı elemanlarının karot alınamayan ve ulaşamayan bölgelerindeki çatlak varlığı ve malzeme fiziksel özellikleri tahmin edilebilir.

2.1.3 Az Tahribatlı Deneyler

Az tahribatlı deneyler başlıca; malzemeyi kimyasal, fiziksel ve mekanik açıdan karakterize etmek, onarım için mevcut yapıya uyumlu malzeme kullanımı amacıyla harç bileşimini ve içeriğinin tespiti, restorasyon için kullanılacak malzemelerin seçiminin doğru yapılması amacıyla uygulanabilmektedir. Deneyler için malzeme numunelerine ihtiyaç duyulursa, yapıya mümkün olan en düşük hasarı verecek şekilde duvarlardan numune alınmalıdır. Numune alma tekniği numunelerin malzemeyi tam olarak temsil edebilmesi için yapının uygun bölgesinden ve mümkün olduğunca hasarsız bir şekilde alınmalıdır. Az tahribatlı deney yöntemleri kısaca aşağıda sunulmuştur.

Yerinde gerilme deneyi (Flat-Jack): (Flat-jack) (yerinde gerilme) testi ile mekanik özellikleri ve duvardaki mevcut düşey basınç gerilmesi miktarı tespit edilebilmektedir. Deneyin yapılmasına ilişkin ASTM C1197 ve RILEM standartları bulunmaktadır. Tekli plak ile yapısal elemanın şekil değiştirme ve gerilme seviyesi, çift plak ile elastisite modülü ve basınç mukavemeti elde edilebilir.

Yerinde kayma deneyi: Yapı elemanındaki kayma dayanımının belirlenmesi amacıyla uygulanır. Ölçüm yapılacak bölgenin iki tarafı açılarak tek taraftan yatay kuvvet uygulanarak yer değiştirme ölçülür. Ölçülen en büyük yatay kuvvet kayma dayanımının tespitinde kullanılır.

Endoskopi uygulaması: Duvar tipolojisini belirlemek amacıyla ucunda kamera bulunan kablolu bir çubukla yeteri kadar derine ilerleyerek alınan video kayıt ve/veya görüntülerle malzeme cinsine karar verilir. Endoskopik gözlem, yapıda kullanılan taşıyıcı elemanların boyutları sebebiyle, karot almak için ulaşamayan bölgelerde ve gözle görülemeyecek bölgelerde kullanılan malzemelerin neler olduğu ile ilgili bilgi sahibi olmak için oldukça tercih edilen bir yöntemdir.

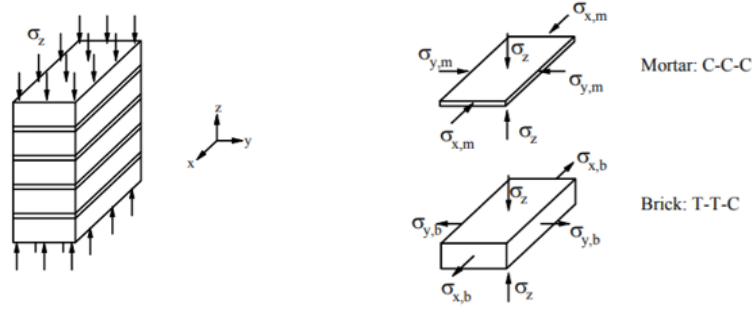
Yapıdan numune alınması: Kullanılan yapı malzemesinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin tespiti için yapının uygun bölgelerinden taş,tuğla ve harç örneklerin alınarak laboratuvar deneylerinin uygulanmasını kapsar.

2.2 Yığma Yapılarda Mekanik Özellikler

2.2.1 Basınç Gerilmesi Davranışı

Yığma yapı elemanları basınç gerilmeleri altında oldukça yüksek mukavemet gösterirken çekme gerilmeleri altında düşük mukavemet değerine sahiptirler. Yığma yapıların tasarımı bu husus göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Yığma yapıların basınç dayanımı; kullanılan yığma birimlerin cinsine, derz kalınlığına, harç malzeme özelliklerine ve uygulanan farklı imalat aşamalarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Özen, 2006). Yığma yapı elemanlarının basınç dayanımı, yığma birim ve harçtan meydana gelen örneğin taşıdığı maksimum yükün eleman en kesit alanına bölünmesi ile elde edilir (Ünay, 2002).

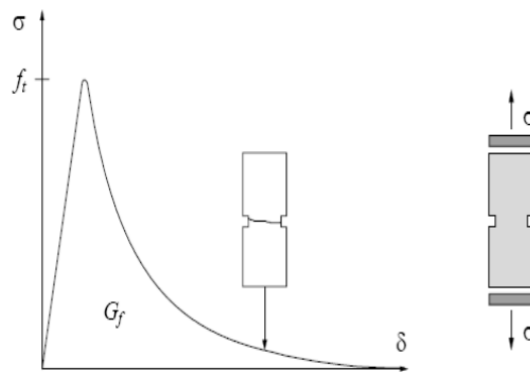
Oliveira (2000), tuğla ve harç özelliklerinin yığma elemanın dayanım ve deformasyon özelliklerin üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, tuğla birimler arasında çimento prizmalar oluşturmuştur. Bu prizmaları döngüsel yükleme altında test etmiştir. Yığma yapılarda harç ve tuğla farklı elastik özelliklere sahip olduğu için tek eksenli basınç yüklemesi altında harç tuğlaya göre yanal olarak daha fazla genleşme eğilimindedir. Tuğla ve harç arasında kohezyon ve sürtünme ile sağlanan süreklilik sebebiyle harç, tuğla birim tarafından sınırlandırılır. Bu sebeple, harç-tuğla arayüzünde gelişen kesme gerilmeleri, tuğla birimde iki taraflı çekme ve tek taraflı basınç gerilmesi oluştururken, harçta üç eksenli basınç gerilmesi oluşmasına sebep olur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Basınç yüklemesi altında tuğla ve harç birimlerin gerilme durumu (Oliveira, 2000)

2.2.2 Çekme Gerilmesi Davranışı

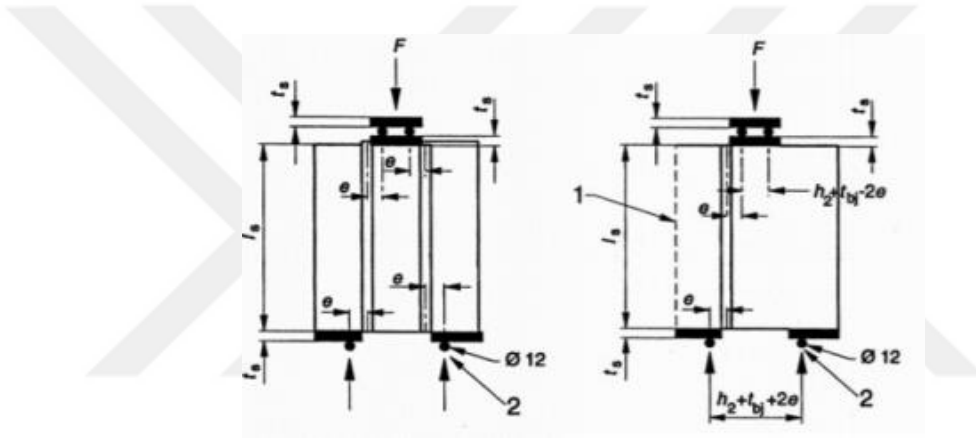
Yığma yapılar çekme gerilmeleri altında kırılğan davranış gösterirler. Duvarın çekme dayanımı oldukça düşük olduğundan dolayı duvar analizine yönelik bazı analitik modellerde malzemenin çekme dayanımı olmadığı varsayılır. Yığma yapılarda yapıyı doğrudan çekme gerilmesine maruz bırakan bir yük bileşeni bulunmadığından eğilmenin sebep olduğu çekme gerilmesi daha büyük önem arz etmektedir. Ayrıca nem ve hava sıcaklığında meydana gelen değişim sebebiyle yığma birimlerde meydana gelen kısılma ve uzama da çekme gerilmesini oluşturmaktadır (Ünay, 2002). Şekil 2.2’de tek eksenli çekme gerilmesi altındaki bir yığma birimin gerilme-şekil değiştirme diyagramı incelendiğinde oldukça gevrek bir davranış sergilediği ve ani bir kırılma ile bu davranışın sonlandığı görülmektedir (Lourenço,1998).



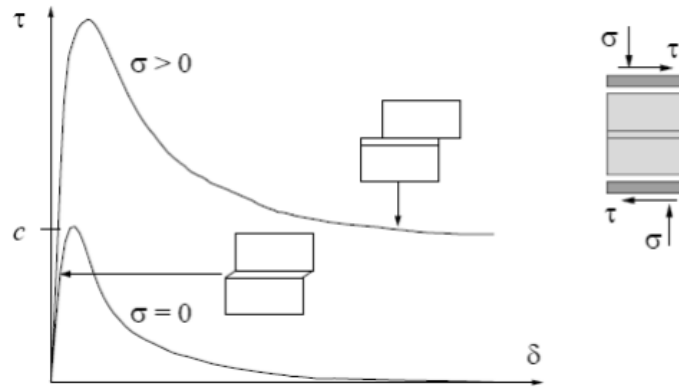
Şekil 2.2 Tek eksenli çekme gerilmesi altında yığma yapıların tipik davranışı (Lourenço,1998)

2.2.3 Kayma Gerilmesi Davranışı

Yığma duvarın kayma mukavemeti, harç ile yığma birim arayüzündeki bağlanma durumuna bağlıdır. Kayma gerilmesi altında harç ve yığma birim arayüzünde meydana gelen bağlanma mukavemeti kaybı sebebiyle deformasyonlar meydana gelmektedir. TS-EN 1052- 3'e göre harcın başlangıç kayma gerilmesi ve içsel sürtünme açısının tespiti için kullanılan test metodları Şekil 2.3' de gösterilmiştir. Kayma gerilmesi altındaki duvarın gerilme-şekil değiştirme diyagramını incelendiğinde duvarın düşey gerilmesi arttıkça kayma gerilmesinin de arttığı görülmektedir. Şekil 2.4



Şekil 2.3 Başlangıç kayma gerilmesi belirleme deney düzeneği (TS-EN 1052-3)



Şekil 2.4 Kayma gerilmesi altında yığma yapıların davranışı (Lourenço,1998)

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Yığma Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilmiş Saha ve Laboratuvar Testleri

Birbirinden farklı yapım teknikleri ve mevcut yerel olanaklara bağlı olarak inşa edilen tarihi yığma yapılar, düzensiz geometrilere ve oldukça farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Yığma duvarlar, birim taşlardan ve birleşim harçlarından oluşan heterojen yapılardır. Yığma birimi olarak kesme taş, kerpiç, doğal taş ve tuğla blok, derz birleşimleri için kil harcı, bitüm ve kireç/çimento esaslı harç tercih edilen en yaygın malzemelerdir. Yapının mevcut durumunu tespit etmek ve güçlendirilmesi gereken yapılar için güçlendirme yöntemlerini belirlemek amacı ile gerçekleştirilen saha testleri sonucunda; yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri ve yapının dinamik parametrelerinin tespiti hedeflenir. Yapı üzerinde gerçekleştirilecek saha ve laboratuvar testleri kadar yerinde gerçekleştirilecek gözlemsel çalışmalar da oldukça önem taşımaktadır. Yerinde yapılan dikkatli gözlemler ile yapının mevcut taşıyıcı sisteminin durumu, deprem etkileri ile oluşan çatlaklar, birleşim elemanlarında meydana gelen hasarlar ve bozulmalar tespit edilebilmektedir.

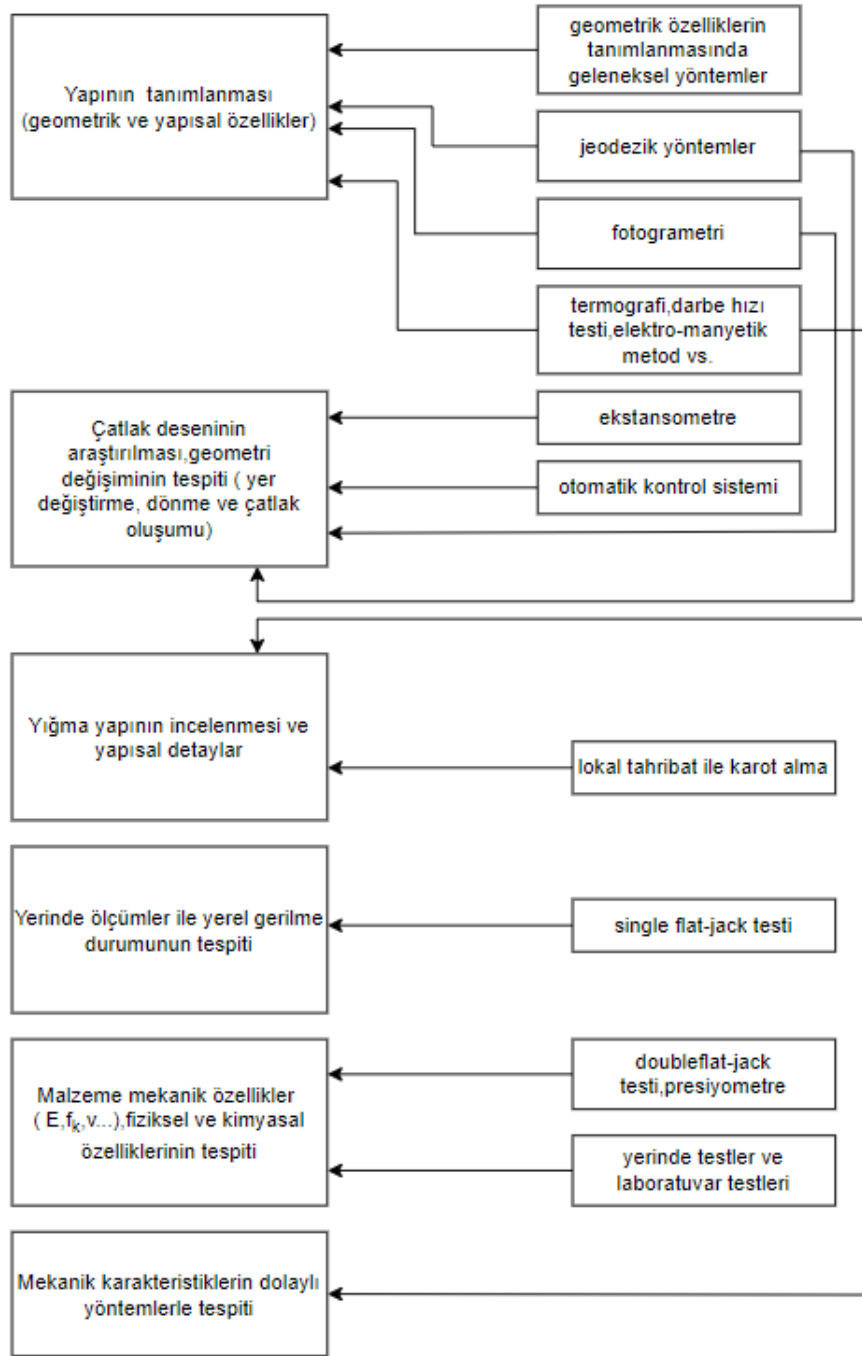
Tarihi yığma yapılarda uygulanan saha testleri yapının tarihi dokusuna zarar vermeme adına tahribatsız ve az tahribatlı testler olmaktadır. Yapının mevcut durumu, yapı üzerinde gerçekleştirilmiş restorasyon çalışmaları, mimari özellikleri, tarihi özellikleri ve yapının bulunduğu konum özellikleri göz önüne alınarak uygulanacak test yöntemine karar verilmelidir. Binda ve Saisi (2001), tarihi bir yığma yapıda uygulanacak araştırma teknikleri ve test prosedürleri ile ilgili geniş çaplı çalışmalar yapmıştır. (Şekil 2.5)

Yığma yapıda kullanılan mevcut malzeme özelliklerinin tayini amacı ile uygulanan saha testleri; yapı üzerinden malzeme numunesi alınması ve Flat-jack testleridir. Yığma yapılarda kullanılan yapı malzemelerinin homojen özellik göstermemesi ve yığma birimlerinin çeşitli bağlayıcı harçlarla kompozit bir bileşimde kullanılmış olması sebebiyle malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça güçtür. Bu durumda bir duvardan alınan harç, tuğla ve taş içeren malzeme numunesinin yapının kagir elemanlarında kullanılan kompozit durumdaki malzemeyi ne ölçüde temsil ettiği oldukça tartışmalıdır. Ayrıca malzeme numunesi alınırken

yapıya mümkün olan en az hasarı verecek şekilde ve sayıda numune alınmalı, numunenin alınacağı bölge iyi seçilmeli ve yapının tarihi dokusu korunmalıdır. Tüm bu nedenlerden dolayı hem mevcut yapının sağlığı hem de yapılan testin güvenilirliği bakımından yapıdan numune almadan, tahribatsız veya onarılabilen az tahribatlarla gerçekleştirilebilen testlerin önemini artmaktadır. Bu anlamda tarihi yapılara zarar vermeden ve yapı kullanımda iken yerinde uygulanabilen az tahribatlı Flat-jack testleri ile malzeme mekanik özelliklerini belirlemek mümkündür.

Mısır ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada Tarihi yığma yapı örneği olan İsabey Camii avlu duvarlarının düzlemdışı doğrultudaki modal parametreleri tespiti amaçlı avlu duvarlar üzerinde operasyonel modal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Yerinde flatjack testleri, endoskopik muayene ve yapıdan alınan harç örneklerinin analizlerini gerçekleştirerek duvarın ortalama mekanik özellikleri belirlenmişlerdir. Elde edilen veriler laboratuvar ortamında hazırlanan 1/6 ölçekli duvar numunelerinin yarıstatik testlerinde kullanılmıştır.

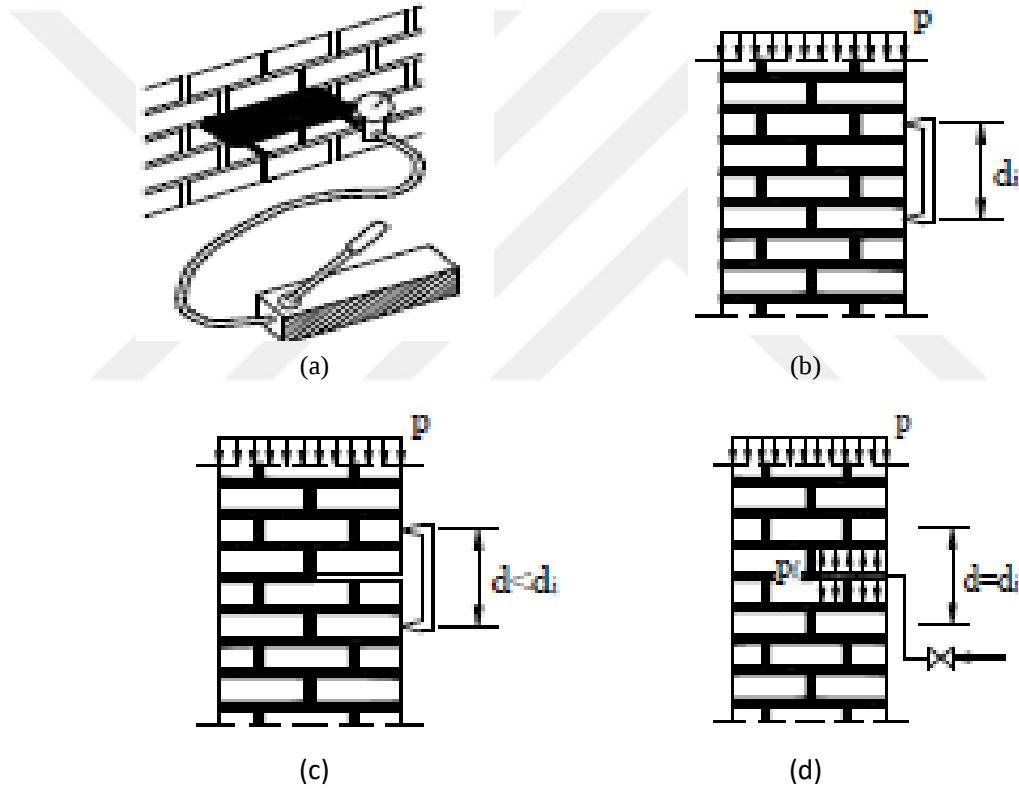
Aoki ve ark. (2004), Japonya'da bulunan taş kemer köprüsü üzerinde ortamsal titreşim testi ile elde edilen ivme verilerini kullanarak köprünün dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Zaman tanım alanında veri işleme yöntemi kullanılarak köprünün mod şekli ve doğal frekansları elde edilmiştir. Köprü malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla yerinde malzeme testleri uygulanarak elde edilen malzeme parametreleri ile üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli analizi gerçekleştirilerek köprünün teorik mod şekli ve doğal frekansları elde edilmiştir. Belirlenen teorik ve deneysel sonuçlar kıyaslanarak aradaki uyum gözlenmiştir.



Şekil 2.5 Yığma yapılar üzerinde gerçekleştirilecek araştırma teknikleri ve uygulanabilecek test prosedürü (Binda ve Saisi, 2001).

Flat-jack testleri, ASTM C1197-14a (2014) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen, mevcut duvarın basınç dayanımı, Poisson oranı, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlayan çok yönlü ve güçlü bir test yöntemidir. Flat-jack deneyinin uygulanması iki yassı plaka kullanılan double flat-jack test ve tek yassı plaka kullanılan single flat-jack test olarak ikiye ayrılmaktadır.

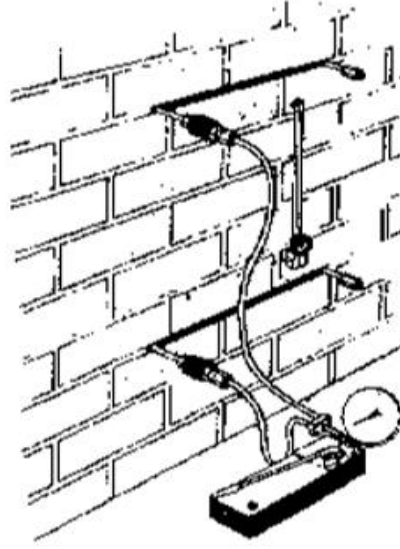
Double flat-jack testinde; duvarın elastisite modülü, basınç dayanımı ve Poisson oranı belirlenebilmektedir. Single flat-jack testinde ise duvardaki mevcut basınç gerilmesi seviyesi tespit edilebilmektedir. Gregorczyk ve Lourenço (2000), Flat-jack testinin uygulama aşamaları konusunda geniş araştırmalar yapmıştır. Test düzeneğinin kurulmasında öncelikle duvar yüzeyi üzerinde iki ölçüm noktası belirlenir ve bu iki nokta arasındaki başlangıç uzaklığı okunur (d_i), (Şekil.2.6a), duvar yüzeyine normal doğrultuda okunan referans uzaklığından kısa olacak şekilde bir kesik açılır ($d < d_i$) (Şekil.2.6b) ve ince plaka yerleştirilerek basınç uygulanır, uygulanan basınç; $d = d_i$ mertebesine kadar kademeli olarak arttırılır. (Şekil.2.6d).



Şekil 2.6 Single Flat-jack testi uygulama aşamaları (Gregorczyk ve Lourenço ,2000)

İki yassı plaka kullanılarak yapılan double Flat-jack deneyi ile bir yığma duvarın basınç dayanımını belirlemek için duvar arasında derz hizalarından yuvalar açılarak iki yassı plaka bu yuvalara yerleştirilmektedir. Bu plakalara hidrolik pompa yardımı ile yağ verilerek plakalarda hacim genişlemesi meydana gelmesi sağlanmakta ve iki plaka arasında kalan bölgedeki duvar parçası sıkıştırılarak duvara yük

uygulanmaktadır. Ekstensometreler; düşey şekil değiştirmelerini ölçmek için iki yassı plaka arasına dikey doğrultuda, yanal şekil değiştirmeleri ölçmek için ise yatay doğrultuda yerleştirilmektedir. Ekstensometrelerdeki deformasyonlar ile hidrolik pompadaki basınç değeri ölçülür ve uygulanan basınç kademeli olarak artırılarak, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi belirlenebilir. (Şekil 2.7)

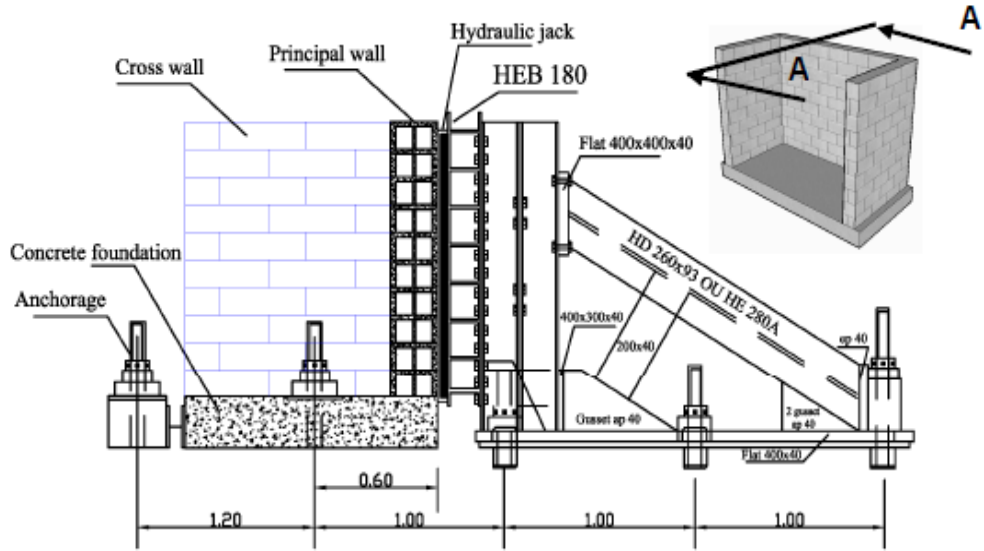


Şekil 2.7 Double flat-jack test uygulaması (Gregorczyk ve Lourenço,2000)

Fanning ve Boothby (2001), operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak mevcut yapılar üzerinde ortamsal titreşim testleri gerçekleştirerek üç adet tarihi yığma köprünün dinamik parametrelerini elde etmiştir. Köprülerin servis yükleri altında üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kurularak lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Düzlemdışı duvar davranışını incelemek amacı ile laboratuvar ortamında oluşturulan numuneler üzerinde yapılan testlerde genellikle aktivatör veya hava yastığı kullanılarak düzlemdışı doğrultuda monotonik veya çevrimsel yüklemeler gerçekleştirilmiştir.

Bui ve ark. (2010), laboratuvarında karbon fiber liflerle (CFRP) güçlendirilmiş 1 adet yığma yapı duvarı ve güçlendirilmemiş 2 adet yığma yapı duvarı üzerinde duvarların düzlemdışı doğrultudaki taşıma kapasitelerini tespit etmek amacıyla hava yastığı kullanarak uniform yarı-statik düzlemdışı yükleme yapmıştır. Laboratuvarında oluşturulan duvar modelleri her biri sağ ve sol kanat duvarlar ile alttan beton bloğa bitişik olarak oluşturulmuştur (Şekil 2.8). Ayrıca duvarların sonlu elemanlar modeli ayırık elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile sayısal simülasyonlar kıyaslanmıştır. CFRP ile güçlendirilen yığma duvarlarda düzlemdışı yükleme altında taşıma kapasitesinin %143 oranında arttırdığı gözlenmiştir.

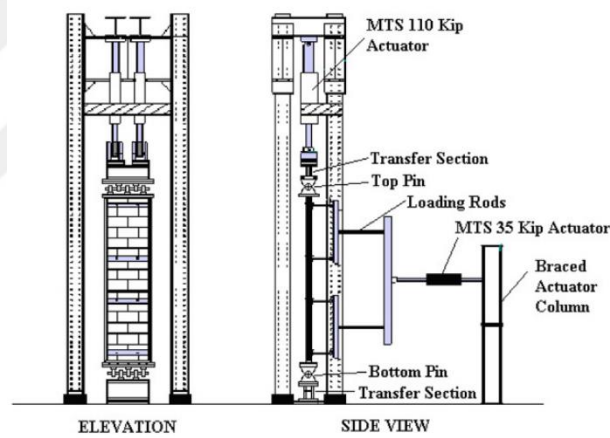


Şekil 2.8 Hava yastığı ile düzlemdışı doğrultuda üniform yarı-statik yükleme test düzeneği (Bui ve ark., 2010)

Bothara ve ark. (2010), iki katlı yığma bir yapının deprem etkisi altında sismik performansını belirlemek amacı ile oluşturulan 1:2 ölçekli yapı modeli ile sarsma tablası üzerinde farklı doğrultuda ve aşamalı olarak artan deprem verileri kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda yapısal elemanlarda meydana gelen hasarlar ve oluşan çatlak boyutu incelenerek yapıda bölgesel düzlemdışı hasarların meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca yapının kırılma eğrisi verilerek yapı davranışı değerlendirilmiştir.

Corradi ve ark. (2003), malzeme özelliklerini belirlemek amacı ile yığma duvarlar üzerinde yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen testler uygulamıştır. Yığma duvarlar üzerinde yerinde basınç testi, diyagonal basınç testi ve kayma basınç testleri gerçekleştirilerek, çalışma sonucunda kayma dayanımı, elastisite modülü ve kayma elastik modülü elde edilmiştir ve sonuçlar farklı standartlara göre kıyaslanmıştır.

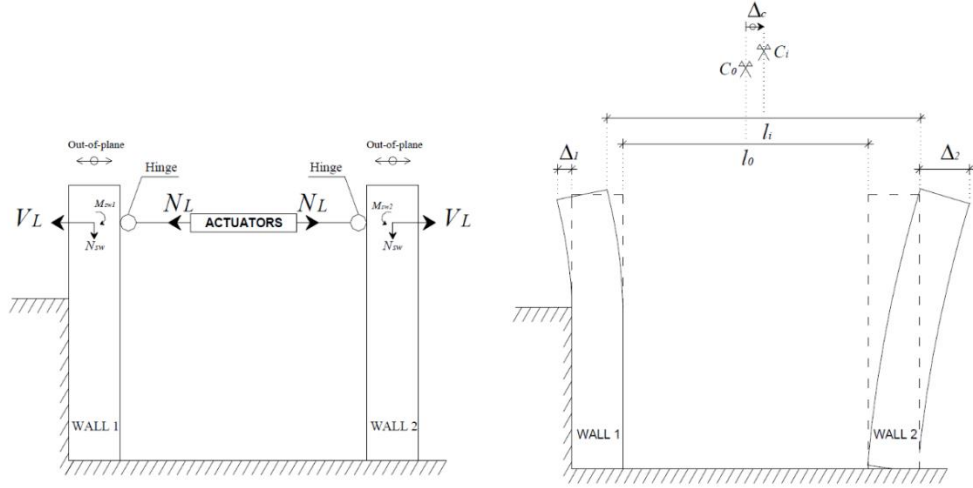
Popehn ve ark. (2008), yığma yapı duvarları üzerinde aktivatör ile dört seviyeden yarı-statik düzlemsiz yükleme testi gerçekleştirmiştir (Şekil 2.9). Duvarlar yükleme kapasitesine ulaşıncaya kadar yüklenerek meydana gelen çatlaklar gözlenmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme davranışı geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile doğrulanmıştır.



Şekil 2.9 Aktivatör ile dört seviyeden yarı-statik düzlemsiz yükleme testi (Popehn ve ark., 2008)

Magenes ve ark. (2014), iki yapraklı taş duvarlara sahip tam ölçekli yığma yapının sarsma tablası testlerini gerçekleştirmiştir. Diyafram-duvar ve çatı-duvar birleşimlerindeki güçlendirme çözümlerinin etkisini incelemiş, birleşimlerin güçlendirilmesine odaklanan yöntemde lokal düzlemsiz hasarların da engellendiği gösterilmiştir.

Costa (2012), laboratuvar ortamında incelediği yığma duvarlar üzerinde aktivatör kullanarak tepeden yarı statik çevrimsel yüklemeler yapmış ve düzlemsel davranışı incelemiştir (Şekil 2.10).



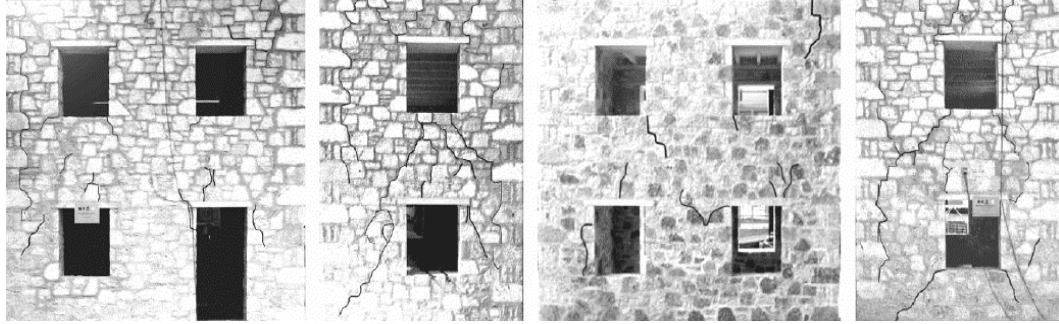
Şekil 2.10 Aktivatör ile tepeden yarı-statik düzlemsel yükleme testi (Costa, 2012)

Juhászová ve ark. (2002), yığma yapıların orta ve şiddetli derecedeki sismik hareketler etkisi altında sismik dayanım kapasitelerinin nasıl etkileneceğini belirlemek amacıyla; altı serbestlik dereceli bir yığma yapı modelinin sarsma tablası testlerini gerçekleştirerek modelin tepki davranışı incelemiştir. Model arayüz malzemesi olarak kullanılan harcın dayanımının, tuğla dayanımından daha düşük olması sebebiyle modelde meydana gelen hasarların çatlak şeklinde bu kısımlarda meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Žarnić ve ark. (2001), Laboratuvar ortamında iki adet yığma dolgu duvarlı çerçeve modelinin $\frac{1}{4}$ oranında küçültülmüş modelini oluşturarak sismik davranışlarını belirlemek amacı ile sarsma tablası testlerini gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan prototiplerin nümerik hesaplarla bulunan sonuçları ile deneysel sonuçların benzerliği irdelenerek deney sonucu elde edilen veriler ile matematiksel model geliştirilmiştir.

Vintzileou ve ark. (2015), üç yapraklı taş yığma duvarlara sahip yığma binanın $\frac{1}{2}$ ölçekli numunesi üzerinde sarsma tablası testleri gerçekleştirmiş ve hâkim hasar

modunun düzlemiçi kesme kaynaklı olmasının, yapı duvarlarının görünüm oranının görece az olmasıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Uzun ve kısa duvarlarda oluşan farklı çatlak tipleri (Vintzileou ve ark., 2015)

Tomažević ve Lutman (1996), yığma duvarların sismik davranışını incelemek amacıyla 32 adet aynı özellikteki yığma yapı duvarı üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Oluşturulan yığma yapı numunelerine yüksek ve düşük seviyede düzgün, tekrarlı deprem yükleri uygulanarak davranışları incelenmiştir. Önceden hesaplanan sonuçlar ile deneysel elde edilen sonuçlar irdelenerek karşılaştırılmıştır.

3.2 Yığma Yapıları Sayısal Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların sayısal modellenmesi başlıca; yapım süresinin ve sırasının tam olarak tespit edilememesi, kullanılan malzeme çeşitliğinin zengin olması, yapı geometrisi ile ilgili yeterli veri olmaması, yapıda mevcut olan hasarların dayanım ve stabiliteye etkisinin tam olarak saptanamaması, kullanılan bağlayıcı harcın homojen özelliğe sahip olmaması ve malzeme özelliklerinin tespitindeki zorluklar gibi nedenlerle güçleşmektedir. (Lourenço, 2002). Buna rağmen gelişen bilgisayar teknolojisi ve yazılımlar ile birlikte yığma yapıların analizi yaygınlaşmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) gibi sayısal yaklaşımlar kullanılmaya başlanmıştır. (Lourenço 1996, Ferreira ve ark. 2015). Yığma yapıların yapısal analizinde sonlu elemanlar yöntemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal analizin yapının tamamının ya da bir bölümünün matematiksel modelinin oluşturulması ile başlar ve oluşturulan modele yapının

geometrik boyutları, mesnet ve birleşim noktalarının serbestlik dereceleri ve yapıya etkiyen yükler tanımlanır.

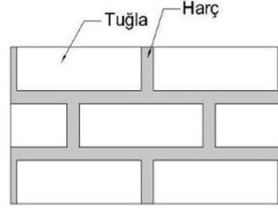
Sayısal modellemenin amacı yapının çeşitli yükler ve fiziksel koşullar altında gerçek davranışının gözlemlenmesini sağlamaktır. Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal modellenmesinde taş ve tuğla gibi taşıyıcı yığma birimler ve farklı mekanik özelliklere sahip harcın bulunması sebebiyle tek tip sonlu eleman kullanmak uygun değildir. Bu sebeple yapının sayısal modelinde birçok sadeleştirme yapılarak yalın ve daha basit bir model elde edilmesi ve malzeme mekanik özelliklerinin uygun bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Analiz amacının ve kapsamının dışına çıkan ayrıntılı modeller yerine yapının özelliklerini yansıtan en basit model her zaman daha iyi sonucu vermektedir (Toker ve ark., 2004). Yapının gerçek davranışını en iyi yansıtan kusursuz bir sayısal model oluşturmak için malzeme davranışı ve yapısal elemanların davranışının çok iyi incelenmesi gerekmektedir.

Yığma yapıların sayısal analizinde mikro modelleme, makro modelleme ve basitleştirilmiş mikro (mezo) modelleme olarak üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır.

3.2.1 Mikro Modelleme

Mikro modelleme tekniğinde yığma birimlerin ve bağlayıcı harcın mekanik özellikleri, Poisson oranları, elastisite modülleri ve elastik ötesi diğer özellikler ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Harç ve yığma birim arasında arayüz tanımlanarak modelleme yapılır. Arayüzde meydana gelen kayma düzlemi sanal bir rijitlik göstererek elemanları birbirinden ayırmış olur (Şekil 3.1). Bununla beraber yığma birim ve harç arasındaki arayüzeyde çatlak oluşumu meydana gelir (Lourenço, 1996). Analiz süresinin uzunluğu ve modelleme aşamasının zahmetli olması sebebiyle yığma yapının tamamının modelleneyeceği analizlerde tercih edilmemektedir. Hassas gerilme ve şekil değiştirmelerin tespitinde kullanılabilir. Malzeme özellikleri ve sınır şartları doğru tanımlanmış bir mikro model analizinde duvarın kırılma mekanizması,

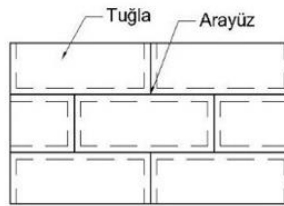
taşıyabileceği maksimum yük ve harçta oluşacak çatlakların ilerleyişinin belirlenmesi mümkündür (Asteris, 2003).



Şekil 3.1 Mikro modelleme tekniği (Lourenço, 1996)

3.2.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme (Mezo Modelleme)

Bu modelleme tekniğinde taşıyıcı yığma birimler elastik ortam elemanları ile modellenirken harç derzleri doğrusal olmayan parametreler ile arayüz olarak modellenmektedir (Dolatshahi ve ark., 2014). Taş ve tuğla gibi yığma birimler harç bölgesinin ortasına kadar genişletilerek arayüzey elemanları ile birleştirilmektedir (Şekil 3.2). Bu yaklaşımda rijit elemanlarda meydana gelen çatlakların sadece eleman orta bölgesinde oluşacağı kabul edilir. Aynı zamanda ara yüzlerde meydana gelen çatlaklar sadece açılma ve kayma etkisi için dikkate alınmaktadır.

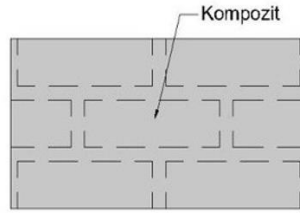


Şekil 3.2 Mezo modelleme tekniği (Lourenço, 1996)

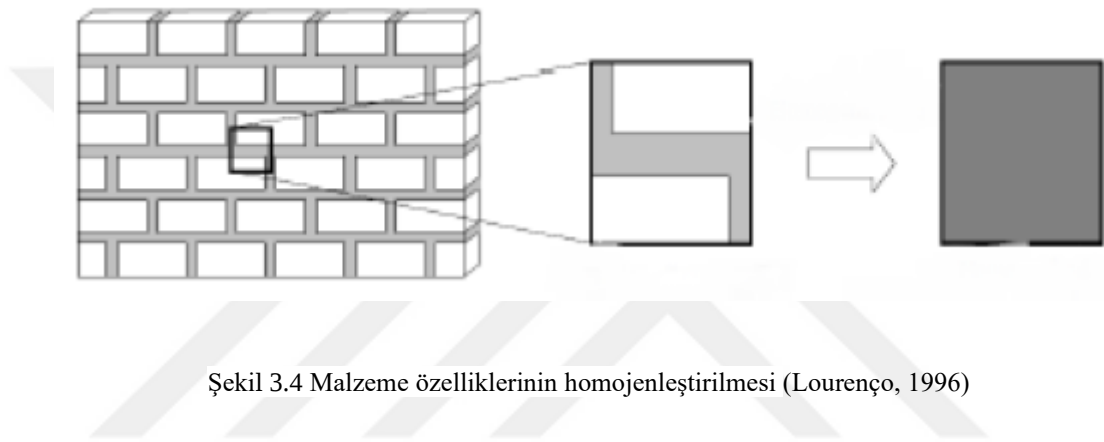
3.2.3 Makro Modelleme

Makro modelleme yaklaşımında malzeme kompozit kabul edilerek tüm yapı davranışını incelerken yığma birim ile harç arasındaki etkileşim ihmal edilir. (Şekil 3.3). Yığma birimler ile harç arasında arayüzey elemanı olmadan homojen, olarak modellenmektedir. Bu modellemede yapının farklı bölgelerindeki farklı malzeme

özelliklerinin ortalaması alınarak homojenize edilmekte ve tüm duvar sürekli ortam elemanları ile temsil edilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3 Makro modelleme tekniği (Lourenço, 1996)



Şekil 3.4 Malzeme özelliklerinin homojenleştirilmesi (Lourenço, 1996)

Casarin ve Modena (2008), yığma bir katedralin sonlu elemanlar modelini makro model tekniği ile oluşturarak yapının sismik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kinematik analiz yöntemi ile yapının göçme modlarını değerlendirmişlerdir. Ramalho ve ark., (2005), çok tabakalı tarihi bir yapının makro modelleme tekniği ile sonlu elemanlar modelini oluşturarak laboratuvar testleri ile sayısal model sonuçlarını kıyaslamışlardır, D'Ambrisi ve ark. (2012), tarihi yığma bir kule üzerinde yaptıkları çalışmada yapının sismik davranışını belirlemek amacıyla makro modelleme tekniğini kullanarak oluşturdukları sonlu elemanlar modelinde doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Milani ve Valente (2015), inceledikleri kiliselerin üç boyutlu makro sonlu elemanlar modellerini oluşturarak makro modelleme tekniğinin hasar mekanizmalarını tespit etmede yetersiz kaldığını belirtmişlerdir.

Pau ve Vestroni (2013), Roma'daki Maxentius Bazilikası'nın ortamsal titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Sadece-çıktı metodu kullanılarak, yapının doğal titreşim

frekansı ve mod şekilleri elde edilmiş, sonlu elemanlar modelinin kalibrasyonu sırasında kullanılan elastik malzemenin özellikleri elde edilmiştir. Modelin analizlerinde yapı tabanı için sınır şartı olarak ankastre seçilmiştir. Makro modelleme ile yapının modal özellikleri değerlendirilmiştir. Ortamsal titreşimin ivme genlikleri düşük olduğundan analizler, doğrusal malzeme kabulü altında gerçekleştirilmiştir.

Rabinovitch ve Madah (2011), tabanı ve tepesinden tutulu yığma dolgu duvarların tek yönlü eğilme davranışını sarsma tablası deneyleri ve sonlu elemanlar modellemesi ile incelemiştir. Modelde, tekrarlı basınç yükü altında oluşacak çatlaklar ve doğrusal olmayan davranışı elde etmek için arayüz elemanları kullanılmıştır. Oluşturulan model, büyük deplasman, orta miktarda dönme, küçük birim şekil değiştirmeler ve Rayleigh tipi bir viskoz sönümleyici içeren birinci mertebe bir kayma-deformasyon teorisine dayandırılmıştır. Deneysel olarak gözlenebilen dinamik kemerlenme, devrilme etkileri, eksenel ve devrilme doğrultularındaki birleşik tepkiler gibi davranışlar sayısal modelle de elde edilebilmiştir.

3.3 Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Operasyonel modal analiz, düşük düzeyli titreşimlere maruz bırakılan bir sistemin modal parametrelerinin tahmininde kullanılan bir yöntemdir. Yapının tahmin edilen modal parametreleri doğal titreşim frekansları, mod şekilleri, modal sönüm oranları ve modal katılım faktörleridir. Testlerin hızlı gerçekleşmesi ve bu sırada yapının kullanımına engel teşkil etmemesi sebebiyle, günümüzde oldukça tercih edilen yapısal bir test yöntemidir (Atamturktur ve Laman, 2012). Tarihi binalarda hasar ya da güçlendirmeden kaynaklı yapısal değişiklikler olduğunda yapının dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişim izlenerek rijitliği ve hasar düzeyi hakkında bilgi sahibi olunabilir. OMA yönteminde, ölçümler yapının bulunduğu doğal ortamsal titreşimler altında (rüzgâr yükleri, taşıt ve yaya trafiği, dalga hareketleri, deprem vb.) yapıldığından dolayı tanımlanan modal parametreler, yapının bulunduğu mevcut koşullardaki gerçek davranışını temsil eder. Yapı üzerine ivme ölçerler yerleştirilerek gerçekleştirilen ortamsal titreşim testlerine (AVT) ait ivme verisi, OMA yöntemleri ile işlenerek yapının dinamik karakterleri (doğal frekans değeri, mod şekli ve sönüm

oranı) kesin olarak belirlenebilmektedir. Elde edilen dinamik parametreler temel olarak sonlu elemanlar modelinin güncellemesine, hasar tespit durumunun belirlenmesine, yapısal kontrollere ve uzun vadeli yapı sağlığının izlenmesine hizmet eder (Bayraktar ve ark.,2009).

Modal parametrelerin tahmini, sensörlerin uygun yerleşim yeri ve sayısının belirlenmesi, düşük titreşimler altında yapı davranışının belirlenmesi ve bu davranışın sıcaklık değişimi gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişmesi gibi nedenlerle güçleşmektedir (Doebling ve ark., 1998; Sohn ve ark., 2003).

Yapı sağlığının izlenmesi işlemlerinde kullanılan sistem tanımlama yöntemlerini girdi-çıkı ve sadece çıkı yöntemleri olarak ikiye ayırmak mümkündür. Büyük ölçekli yapılarda, yapıyı doğru şekilde ölçebilecek kuvvetler ile tahrik etmek oldukça zor olduğundan yapının bulunduğu bölgedeki çevresel etkilerin yarattığı titreşimler altında ölçüm almak daha pratik ve uygulanabilir yöntemdir. Bu sebeple büyük ölçekli inşaat mühendisliği yapılarının dinamik karakteristiğini belirlemede sadece çıkı yöntemleri olarak adlandırılan operasyonel modal analiz yönteminin kullanılması daha uygundur (Özçelik ve ark, 2013).

Operasyonel modal analiz sonuçlarının başlıca kullanım alanları,

- Yapının deneysel çalışmalarla elde edilen dinamik karakteristikleri ile teorik analiz sonucunda elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılarak sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi
- Yapının projelendirme aşamasındaki teorik analizlerde yapılan kabullerin gerçekte ne kadar sağlandığının tespiti
- Mevcut yapılarda yapı sağlığının izlenmesi ve yapıların kullanılabilirlik durumlarının tespiti ve hasarların belirlenmesi olarak sıralanabilir.

Sohn ve ark. (2003), tarafından hazırlanan, 1996-2001 yılları arasında sistem tanımlama ve YSİ alanında yapılan çalışmaları kapsayan raporda, kullanılan yöntemler, veri toplama, sinyal işleme ve bunlara dair mühendislik uygulamaları özetlenmektedir. Raporda yapı sağlığının izlenmesi işlemleri, işlevsel değerlendirme

(yapı fonksiyonu/durumu, YSİ'nin gerekliliği), veri toplama, veri normalizasyonu ve temizlik işlemleri, özellik seçimi, özellik tahmini (sistem tanımlama), seçilen özellikler için istatistiksel modelleme aşamalarını içermektedir.

3.3.1 Ölçüm Ekipmanları

3.3.1.1 İvmeölçerler (Titreşim Sensörleri)

Tepki dönüştürücüler sistem tepkileri olarak tanımlanan hız, yerdeğiştirme, ivme ve kuvvet gibi fiziksel büyüklükleri veri alma ünitesinde elektrik sinyaline dönüştürmeye yarayan test ekipmanlarıdır. Operasyonel modal analiz yönteminde en çok tercih edilen dönüştürücüler ivmeölçerlerdir. İvmeölçerler; ölçüm alınacak yapıya vida, yapıştırıcı veya dübellerle sabitlenerek tespit ettikleri ivmeleri x,y,z eksenlerinde ölçen ve kaydeden cihazlardır. Uygulanacak yapıya göre seçilen tek veya üç eksenli ivmeölçerler bulunmaktadır. (Şekil 3.5). İvmeölçer seçiminde ölçüm frekans aralığı, ortam sıcaklığı, maksimum ivme değeri ve ölçüm hassasiyetine dikkat edilmelidir (Türker, 2011).



(a)



(b)

Şekil 3.5 (a) Üç eksenli ivmeölçer (b) tek eksenli ivmeölçer.

3.3.1.2 Veri Toplama Sistemleri

Veri toplama sistemi, dönüştürücüler (ivmeölçerler) ile alınan ivme verilerini elektrik sinyaline dönüştürülerek bilgisayar ortamında gerçek zamanlı olarak işlenmesine olanak sağlayan sistemlerdir. Veri toplama ünitesine ulaşan sinyaller burada filtrelenerek bilgisayar ortamına zaman tanım alanında aktarılır ve burada

sinyal işleme programı yardımıyla frekans tanım alanına dönüştürülür İvmeölçerler ve veri toplama ünitesi arasında kablolar ile bağlantı kurulmaktadır. (Şekil 3.6)



(a)



(b)

Şekil 3.6 (a) Veri toplama ünitesi (b) ivmeölçer ile veri toplama sistemi bağlantı kablosu

3.3.2 Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Yığma yapıların sonlu elemanlar modeli, ortamsal titreşim testleri ve model güncellemesi ile birçok çalışma mevcuttur. Costa ve ark. (2016), Portekiz’de 19. yy. sonlarında inşa edilmiş taş yığma yapı örneklerinden biri olan Durrães demiryolu köprüsü üzerinde yaptığı çalışmada, demir yolu köprüsünün matematiksel modelini ortamsal titreşim testlerinden elde edilen dinamik parametreleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Köprünün yapısal bileşenleri ve yapı malzemeleri gerçeği temsil edecek şekilde üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Mevcut yapı üzerinde Ménard basınçölçer testi, zemine penetre radar testleri (GPR), DPSH testi ve flat-jack testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapıdan alınan numune taşlar ile laboratuvar testleri gerçekleştirilerek taş blokların elastisite modülü, birim ağırlığı, basınç ve çekme dayanımı ile duvar derzinin kayma rijitliği ve normal rijitliği elde edilmiştir. Yapı üzerine ivmeölçerler yerleştirilerek gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri (AVT) ile elde edilen ivme verisi, OMA yöntemleri ile işlenerek yapının doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakterleri belirlenmiştir. Yapının sayısal modeli ile OMA yöntemi ile elde edilen dinamik parametreler kıyaslanarak yapının kalibrasyon çalışması yapılmıştır.

Yapıya ait dinamik karakteristikler deneysel olarak operasyonel modal analiz yöntemi ile belirlenirken, teorik olarak da yapının geometrisi göz önünde bulundurularak oluşturulan sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenir. Oluşturulan sonlu

elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar ile, deneysel elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında bazı farklılıklar saptanır. Bu farklılıkları mümkün olduğunca ortadan kaldırmak amacıyla; oluşturulan sonlu elemanlar modeli malzeme parametreleri veya sınır koşulları gibi değişen belirsiz parametreler ile güncellenmelidir. Bu işlem model güncelleme olarak adlandırılmaktadır (Friswell ve Mottershead, 2013).

Operasyonel modal analiz yönteminin uygulanmasında çevresel koşulların test sonucuna etkisi büyüktür. Brown ve ark. (1995), mevcut sıcaklığın OMA ile elde edilen dinamik parametrelere etkisini tarihi bir yığma köprü üzerinde çalışarak araştırmıştır. Donma noktasının altındaki sıcaklıklar hariç tutulduğunda sıcaklık ve yağıştaki değişiklikler; yığma köprü yapısının ilk üç doğal frekansını maksimum %3 değiştirdiğini rapor etmiştir. Ancak, donma noktasının altındaki sıcaklıklar için, doğal frekanslardaki değişimin %12 kadar yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Titreşime dayalı çalışmalar, yığma yapı elemanlarında meydana gelecek hasarı tespit amaçlı kullanıldıkları gibi, yapının güçlendirilmesinden sonra oluşan yapısal gelişmeleri tespit etmek için de kullanılmıştır. Turek ve ark. (2002), onarılan yığma bir tarihi kilisede ortamsal titreşim testleri gerçekleştirerek güçlendirme öncesi ve sonrası belirlenen doğal frekansları karşılaştırmış ve dinamik rijitlikte bir artış gözlemlenmiştir.

Brencich ve Sabia (2008), 1866 yılında inşa edilen 18 açıklıklı bir yığma yapı olan Tanaro köprüsü üzerinde çalışmışlardır. Köprü; zaman içerisinde oluşan tahribat ve mevcut durumdaki hizmet koşulları açısından araştırılmıştır. Yapı üzerine dinamik testler uygulanarak yapıya ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranı elde edilmiştir. Yapının matematiksel modeli, elde edilen deneysel veriler ile güncellenmiştir.

Costa ve ark. (2015), üç adet yığma köprü üzerinde çalışmalar yapmıştır. Orta çağda inşa edilen, yaklaşık 28m uzunluğunda, 7,5m ve 2,3m açıklığa sahip iki adet

kemere sahip olan St. Lázaro köprüsü, 150 m uzunluğunda ve 3,5 m genişliğe sahip Lagoncinha köprüsü ve 2007 yılında inşa edilmiş, simetrik uzun bir profile sahip olan Vila Fria köprüsü üzerinde operasyonel modal analiz yöntemi ile dinamik karakterlerini belirlemiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli, mikro modelleme stratejilerine dayanarak, laboratuvar testleri ve yerinde uygulanan malzeme testleri ile belirlenen mekanik özellikler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Model kalibrasyonu, elastik malzeme parametreleri üzerinde manuel olarak gerçekleştirilmiştir.

Bayraktar ve ark. (2009), 19.yy'a ait iki açıklıklı bir yığma köprü kemeri üzerinde doğal uyarılar altında 15 adet tek eksenli ivme ölçer, 17 kanallı veri toplama sistemi ve tek eksenli sinyal kabloları kullanılarak AVT testleri gerçekleştirilmiştir. Köprünün dinamik karakterlerini belirlemek için PP ve SSI yöntemleri kullanılarak Operasyonel modal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli yerinde incelemeler ve mevcut çizimler kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan malzeme özellikleri literatürde yer alan değerlere göre seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve analitik modal analiz sonuçları karşılaştırıldığında mod şekillerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu fakat doğal frekanslar arasında farklılıklar bulunduğu gözlenmiştir. Bu farklılıkların en büyük nedeni sonlu elemanlar modeli analizleri sırasında sınır şartlarında ve malzeme özellikleri tanımlamasında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanmamasıdır. Bu nedenle malzeme özellikleri literatürde var olan değerlere göre alındığından dolayı sadece sınır şartlarındaki değişim göz önüne alınarak sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Güncelleme sonrasında mod şekilleri arasındaki uyum devam ettiği ve doğal frekanslar arasındaki farklılıkların ortalama %18'den %7 ye düştüğü gözlemlenmiştir.

Çalık de ark. (2016), Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan üç adet ahşap çatılı yığma taş Camii'nin dinamik karakteristiklerini hasarı deney yöntemleri ile belirlemek amacıyla yapı duvarlarına ivmeölçerler yerleştirilerek ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak her mod için frekans değerlerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu, camilerin 1.modunun yanal hareket olarak oluştuğu ve camilerin sönüm oranının yaklaşık %5 değerine ulaştığı saptanmıştır.

(Zapico ve ark. (2003), 4 m uzunluğunda ve dört açıklığa sahip bir karayolu köprüsünün dinamik parametrelerinin ve sismik davranışının belirlenmesi için laboratuvar ortamında 1/50 ölçekli modelini oluşturmuşlardır. Köprünün dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla sarsma tablası üzerinde zorlanmış titreşim testleri gerçekleştirilerek köprüye ait doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modeli oluşturularak deneysel elde edilen veriler ile sonlu elemanlar modeli analizi sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Oluşan farklılıkları en aza indirmek amacı ile modeldeki sınır şartları ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak sayısal model güncellemesi gerçekleştirilmiştir.



4 TARİHİ KAYALAR CAMİİ ÜZERİNDE YÜRÜTÜLEN ÇALIŞMALAR

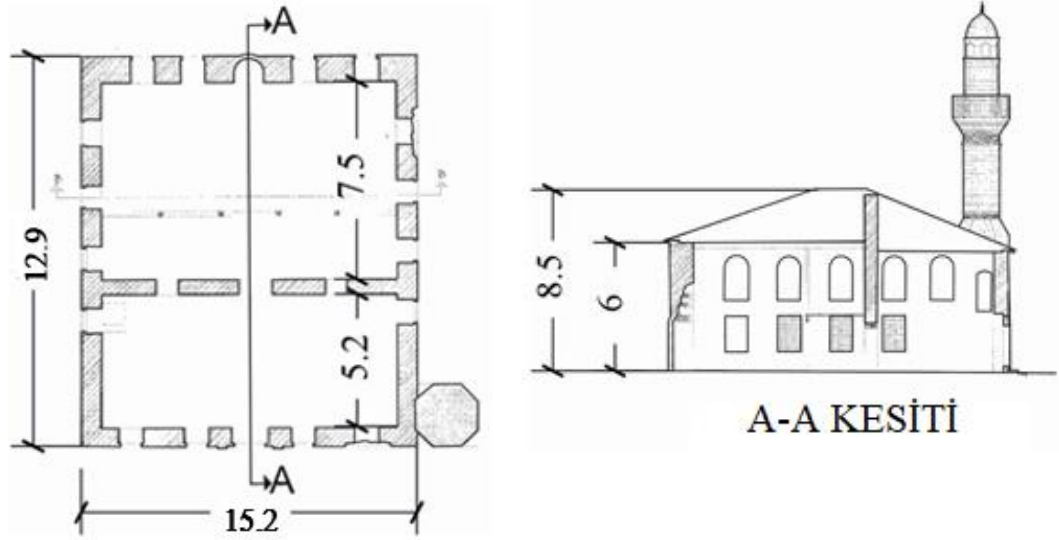
4.1 Tarihi Kayalar Camiinin Tarihsel Gelişimi ve Yapısal Özellikleri

Osmanlı Döneminde inşa edilen Kayalar Camii, İzmir'in Foça ilçesinde bulunmaktadır. Foça'da bulunan Osmanlı dönemine ait üç ibadethaneden birisi olup, Fatih camisinin 200 metre kuzey doğusundadır. Yarımadanın rakımı en yüksek noktasında inşa edildiği için çevreden rahatlıkla görülebilen bir konumdadır. (Şekil 4.1) Camiinin kitabesi günümüze kadar gelmediğinden dolayı inşa edildiği tarih hakkında kesin bir bilgi yoktur. Taç kapının doğu köşesinde, yapının 1456 yılında inşa edildiğini belirten Latin harfleriyle yazılmış mermer bir levha mevcuttur. Yapının mimari üslubuna bakıldığında Foça'nın fethinden sonra 15. Yüzyılın ikinci yarısında ya da 16. yüzyılda inşa edildiği tahmin edilmektedir (Çakmak,1996).



Şekil 4.1 Kayalar Camii Konumu (Yandex, b.t.)

İzmir Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivindeki fotoğraflar incelendiğinde caminin antik döneme ait devşirme taşlardan ve moloz taşlardan meydana gelen yığma yapı formunda olduğu ve dikdörtgen planlı mimarisi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. (Şekil 4.2). Yapının güney cephe duvarı, orta duvar ve kuzey cephe duvarı kalınlıkları sırasıyla; 100 cm, 60 cm ve 75 cm olup, duvar yüksekliği 6 m'dir.



Şekil 4.2 Kayalar camii kesit ve plan görünümleri

Camiinin Kuzey cephesi düzgün kesme taş diğer cepheler kabayonu taşla kaplanmıştır. Yapının üzeri kiremit ile kaplı dört yöne eğimli bir kırma çatı ile örtülüdür. Doğu, batı ve güney cephelerinde altta ve üstte dörder pencere açıklığı bulunmaktadır. Alt sırada yer alan pencereler düz atkı taşlı, üst sıradakiler sivri kemerlidir. Alt sıradaki pencerelerin söveleri devşirmedir (Çakmak,1996). Caminin batı cephesinin kuzey köşesinde kesme taştan oluşan minaresi yapıya sonradan eklenmiştir. Taş kaide üzerine yuvarlak gövdeli tek şerefeli minaresi dönemin estetik anlayışını yansıtır biçimde soğan kubbelidir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kayalar Camii Arşiv Fotoğrafları ve Mevcut Durumu (T.C. Başbakanlık İzmir Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşiv, b.t.)

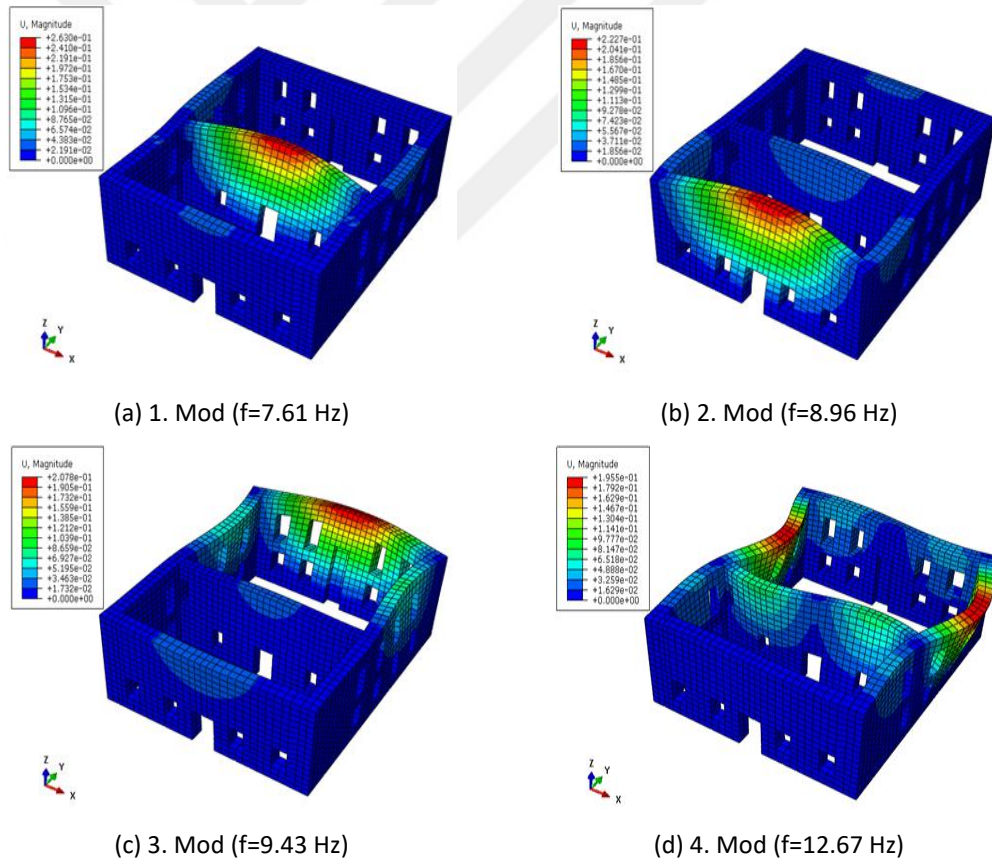
4.2 Kayalar Camii Ortamsal Titreşim Testleri

AFAD-UDAP projesi kapsamında incelenmek üzere seçilen Tarihi Kayalar Camiinin doğu, batı ve güney cephesi olmak üzere üç duvarının dinamik karakterlerini belirlemek amacıyla ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Saha ölçümlerinde 16-bit hassasiyetli 16 kanallı taşınabilir Digitex veri toplama sistemi ve 12 adet kuvvet dengeli $\pm 3g$ tam ölçekli tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır.

Duvar üzerine sabitlenecek ivme ölçer yerleşiminin seçimi, incelenen yapı örneğine ait mümkün olduğu kadar çok sayıda mod şeklinin belirlenebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle saha çalışmaları öncesinde incelenen yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve frekans analizi ile serbest titreşimine ait mod şekilleri elde edilmiştir. İncelenen yapının ön sayısal modeli makro modelleme tekniği kullanılarak ABAQUS (ABAQUS, 2017) sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. SolidWorks (2014) yazılımında oluşturulan geometriye, ABAQUS modelleme arayüzü ile malzeme özellikleri atanmış ve sınır koşullar tanımlanmıştır. Sistemin

dinamik özelliklerini temsil edecek oldukça basit bir sayısal model seçmenin, model güncelleme çalışmalarında yakınsama problemlerinin çözümü için önemli olduğu bilinmektedir (Özçelik ve ark., 2018).

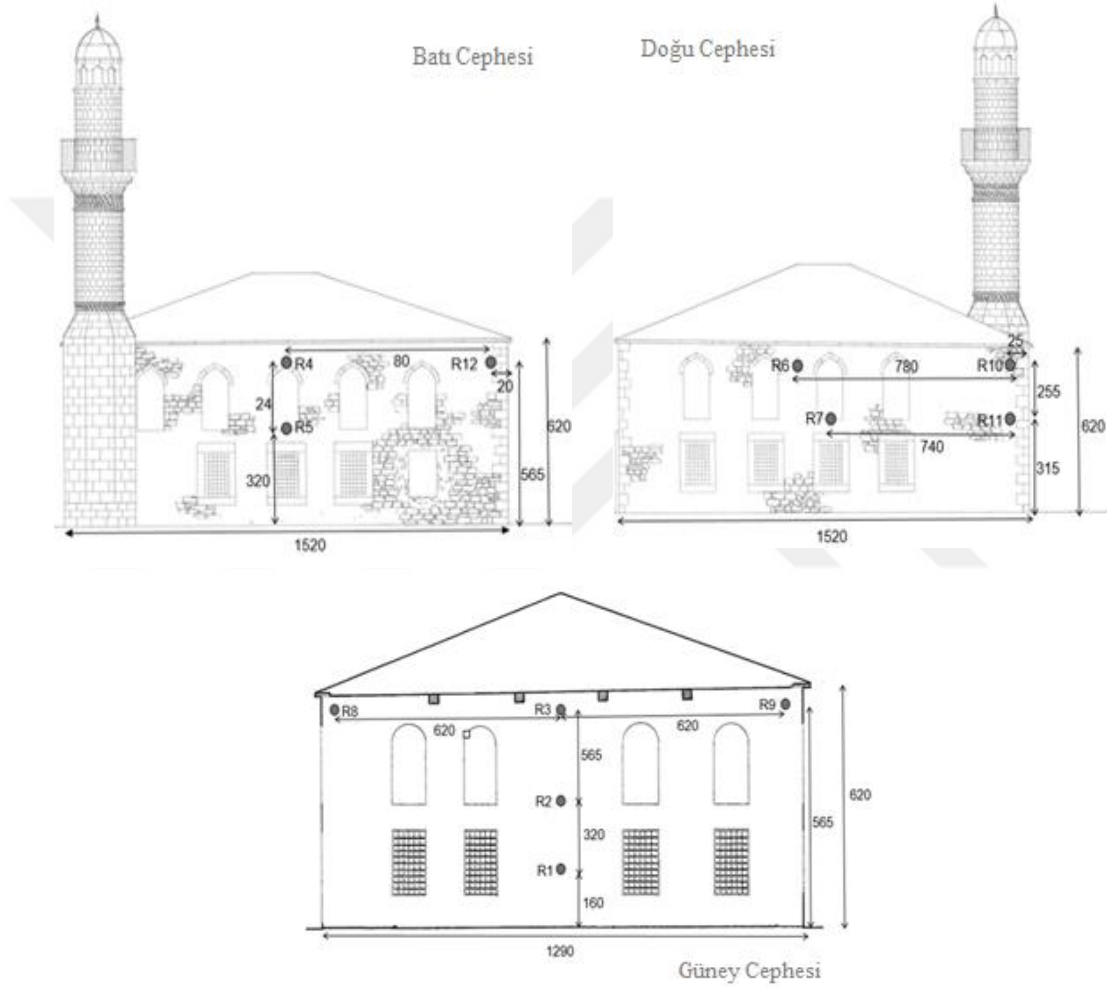
Ön makro modele atanan malzeme özellikleri, literatürdeki benzer yapılar için kullanılan değerler ile uyumlu seçilmiştir. Ön modele birim hacim ağırlığı (ρ), elastisite modülü (E) ve Poisson oranı için sırasıyla 24 kN/m^3 , 4500 MPa ve 0.25 değerleri atanmıştır. Toplam nokta sayısı 7902 ve sonlu eleman sayısı 4683 adet olan modelde boyutları 40-50 cm arasında değişen üç boyutlu sekiz düğüm noktalı hexahedral C3D8R sürekli ortam elemanları kullanılmıştır. Elde edilen mod şekilleri (Şekil 4.4)'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Ön sayısal modelin ilk dört serbest titreşim frekansına karşılık gelen mod şekilleri

Ön sayısal analiz sonucunda bulunan mod şekilleri göz önüne alınarak saha testleri öncesinde ivmeölçer yerleşim planı hazırlanmıştır (Şekil 4.5).

Test setinde mevcut 12 adet ivmeölçer; güney cephe duvarı üzerine 5 adet, batı cephe duvarı üzerine 3 adet ve doğu cephe duvarı üzerine 4 adet olacak şekilde yerleştirilerek ölçüm alınmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.5 Kayalar Camii cephe ivmeölçer yerleşim planları (ölçüler cm dir)

Testler tek bir set halinde gerçekleştirilmiştir. Test setinde 20 dakika ölçüm yapılmış olup örnekleme frekansı 250 Hz olarak seçilmiştir. Alınan ivme verisine MATLAB® yazılımında filtreleme işlemi uygulanmıştır. Bu veri, operasyonel modal analiz yazılımı olan ARTeMIS (ARTeMIS, 2016) kullanılarak Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) (Brincker ve ark.,2001) ve Stochastic Subspace

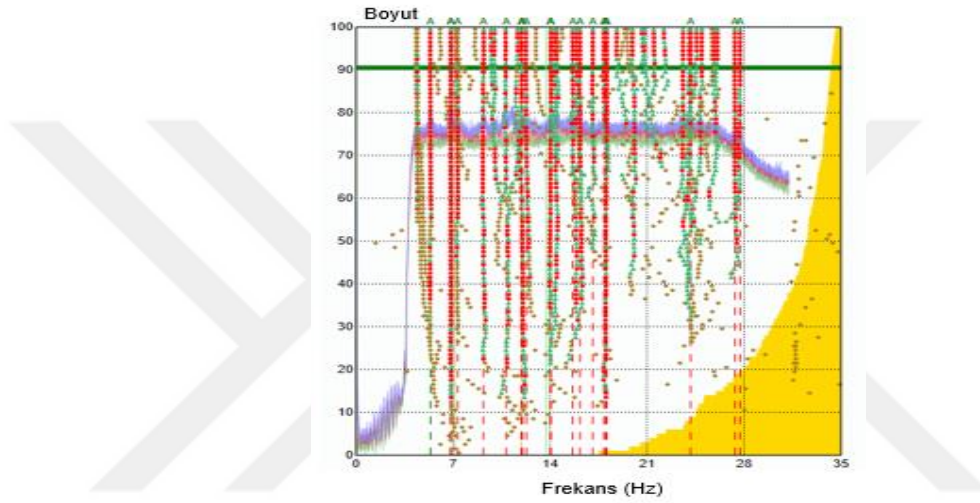
Identification (SSI) (Van Overschee ve De Moor, 1996) yöntemleri ile işlenmiş ve yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir (Şekil 4.7).



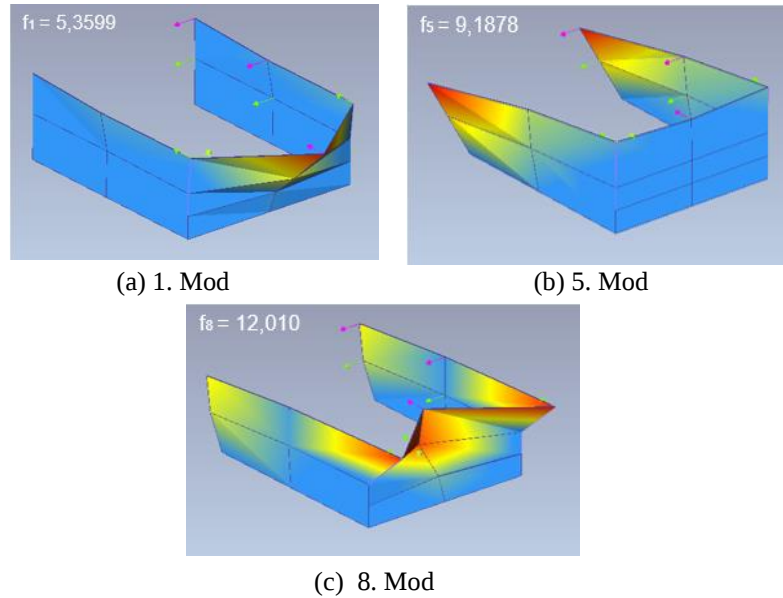
Şekil 4.6 Kayalar Camii cephe duvarları üzerine yerleştirilen ivmeölçerin konumu

Test setinde alınan ivme verileri kullanılarak oluşturulan stabilizasyon diyagramı Şekil 4.7’de sunulmuştur. Bu aşamada deneysel modlar ile sayısal ön modele ait modlar eşleştirilmiş ve benzerlik gösteren modlar (sayısal/deneysel: 3/1, 9/5 ve 11/8 değerlendirilmiştir. Buna göre, SSI yöntemine göre modal frekans değerleri 1., 5. ve 8. modlar için sırasıyla 5.36 Hz, 9.19 Hz ve 12.01 Hz olarak; modal sönüm değerleri ise %3.66, %1.98 ve %2.21 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.8).

Saha testlerinde çevresel etkiler altında yapıya etkiyen rastgele titreşimlerin uyardığı ve dolayısıyla ayrıklaştırılabilen modların sırası ile analitik olarak bulunan modların sırasının farklı olması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Fakat her iki yöntemle bulunan serbest titreşim modları arasında benzerliğin yüksek olduğu mod şekillerinin bulunması, ölçümlerde karşılaşılan titreşim düzeylerinde, revize edilen analitik modelin gerçek yapıyı uygun şekilde temsil edebileceğinin bir göstergesidir (Mısır ve ark., 2017; Yücel G.,2019).



Şekil 4.7 Tarihi Kayalar Camii SSI yöntemine göre elde edilen stabilizasyon diyagramı



Şekil 4.8 Tarihi yığma yapı örneği OMA sonuçları (a-c) SSI yöntemine göre elde edilen 1., 5. ve 8. mod şekilleri ve frekans değerleri (Hz)

4.3 Operasyonel Modal Analiz ile Sayısal Model Kalibrasyonu

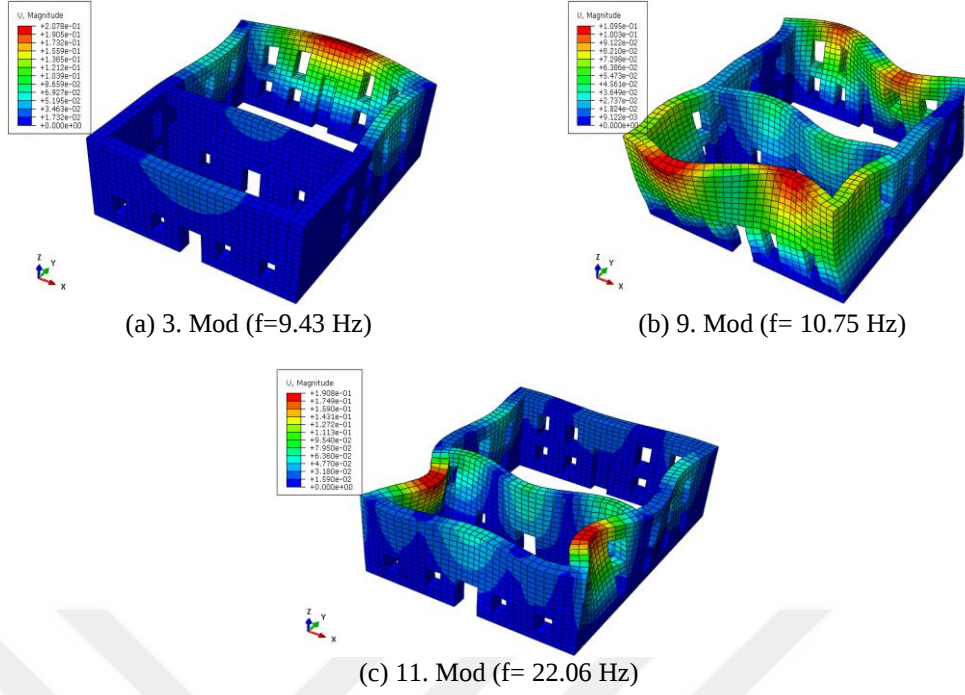
Tarihi yığma yapıların sismik davranışını temsil eden sonlu elemanlar modelinin oluşturulması düzensiz geometrileri, kullanılan malzeme özelliklerinin karmaşıklığı ve yapısal elemanlar arasındaki sınır koşullarının belirsizliği gibi sebeplerle oldukça güçtür. Bu sebeple yapının sayısal modeline ait tanımlamaların, gerçek yapı üzerinde yürütülerek elde edilecek deneysel veriler ile kalibre edilmesi gerekmektedir. (D’Ambrisi ve ark., 2012; Gentile ve ark., 2015).

Ön sayısal modelden (ABAQUS) ve deneylerden (ARTEMIS) elde edilen modal parametre sonuçları Tablo 1.1’de karşılaştırılmıştır. Tabloda, SSI yöntemiyle elde edilen mod şekillerinin benzerlik oranı, tablo üzerinde modal güvence kriterleri (MAC) ile gösterilmiştir (Allemang, 2003). Sayısal ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin %75’ten yüksek MAC değerlerine sahip olmasından, mod şekillerinin oldukça iyi uyduğu söylenebilir. Bununla birlikte, frekans tahminleri için görece yüksek tutarsızlıklar elde edilmiştir (örneğin 1. mod için ~%75 fark hesaplanmıştır). Bu açıdan, ilk sayısal modelin gerçek yapısal sistemi tamamen temsil etmediği ve belirsiz model parametrelerinin gerçeğe daha yakın bir model elde etmek için güncellenmesinin gerekli olduğu söylenebilir.

Tablo 1.1 Yığma yapı örneği ön sayısal modelin ve deneysel modların karşılaştırılması

Mod [Say. – Den.]	Sayısal Ön Model Frekans [Hz]	Deneysel Frekans [Hz]	Frek. Fark [%]	MAC [%]
3 - 1	9.43	5.36	-75.94	93.20
9 - 5	19.67	9.19	-114.11	79.20
11 - 8	22.06	12.01	-83.73	76,60

Ön sayısal modelin kalibrasyonu FEMtools (FEMtools, 2017) yazılımında Bayesian tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Güncellemede karşılaştırma parametresi olarak serbest titreşim frekansları ve MAC değerleri, güncellenecek model parametresi olarak Elastisite Modülü (E) seçilmiştir. Güncelleme sonrası elde edilen mod şekilleri, Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Yığma yapı örneğinin kalibre edilen modlara ait sayısal mod şekilleri: 3., 9. ve 11.mod.

Tablo 1.2’de, güncellenen sonlu elemanlar modelinin doğal frekanslarının (parantez içindeki değerler) deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Güncelleme işleminden önce ve sonra hesaplanan frekans farkları için ise oldukça önemli azalma gözlenmiştir. Güncelleme sonrası elde edilen model parametre değeri Tablo 1.3’te verilmiştir.

Tablo 1.2 Yığma yapı kalibre edilmiş sayısal modelinin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)

<i>Mod</i> [Say. – Den.]	<i>Sayısal Ön Model</i> <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Deneysel</i> <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frek. Fark</i> [%]	<i>MAC</i> [%]
3- 1	9.43 (5.16)	5.36	-75.94 (-7.35)	93.20
9- 5	19.67 (10.75)	9.19	-114.11 (12.74)	79.20
11- 8	22.06 (12.06)	12.01	-83.73 (-3.26)	76.60

Tablo 1.3 Yığma yapı örneğinin ön ve güncel sayısal modeline ait model parametresi

<i>Model Parametresi</i>	<i>Başlangıç</i>	<i>Güncel</i>	<i>Fark (%)</i>
E (MPa)	4500	1345	-70.11

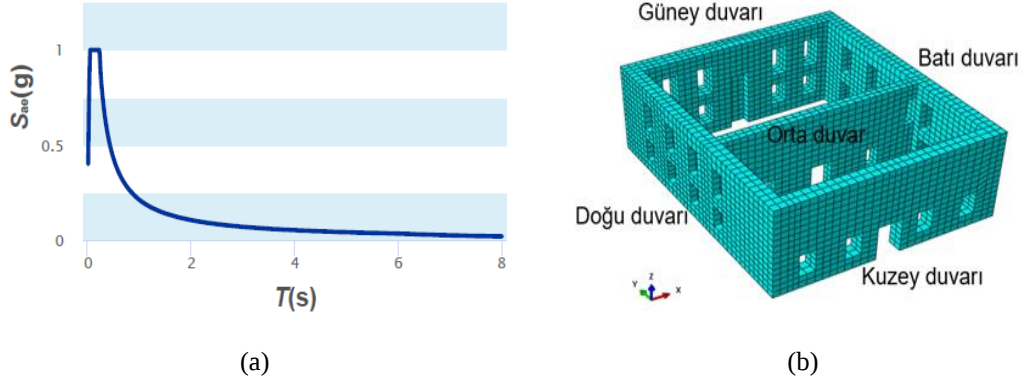
5 TARİHİ YAPININ SİSMİK ANALİZİ

5.1 Doğrusal olmayan statik itme analizi

Tarihi Kayalar Camiinin sayısal modelinin yatay yükler altında düzlemsel davranışı doğrusal olmayan statik itme analizi ile incelenmiştir. Literatürde tarihi yapıların sismik davranışının doğrusal olmayan statik analiz ile incelendiği çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. (Valente ve Milani, 2019; Maccarini ve ark., 2018; Lourenço ve ark., 2012). Kayalar Camii'nin bölüm 4.3'te detayları verilen kalibre edilmiş ABAQUS sonlu elemanlar modeline doğrusal olmayan malzeme parametreleri tanımlanarak yapının yer ivmesinden kaynaklı yatay atalet kuvvetleri ile öz ağırlığından kaynaklı düşey kuvvetler etkisindeki davranışı incelenmiştir. Doğrusal olmayan statik analiz iki aşamadan oluşmaktadır. Analizin ilk aşamasında model düşey kuvvetler altında analiz edilmiştir. Düşey kuvvetler altında analiz edilen modele yatay atalet kuvvetleri uygulanarak analizin ikinci aşaması tamamlanmıştır. Bu aşamada yatay atalet kuvvetleri yapı uzunluğu boyunca artımsal olarak uygulanmıştır. Oluşturulan modele Concrete Damaged Plasticity (CDP) doğrusal olmayan malzeme parametreleri tanımlanmıştır.

Tarihi Kayalar Camii'nin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli makro modelleme yaklaşımı ile ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. Oluşturulan model toplam 7902 nokta sayısına ve 4683 adet sonlu eleman sayısına sahiptir. Modelde boyutları 40-50 cm arasında değişen üç boyutlu sekiz düğüm noktalı hexahedral C3D8R sürekli ortam elemanları kullanılmıştır.

Düzlemsel doğrultuda uygulanacak kuvvetler 'y' doğrultusunda iki yönde ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu kuvvetin büyüklüğü, yapının konum bilgileri kullanılarak Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması (TDTH, 2018) üzerinden belirlenmiştir. Yatay elastik tepki spektrumunda sayısal modelin serbest titreşim periyoduna karşılık gelen yatay spektral ivme değeri 0.91 g olarak belirlenmiştir (Şekil 5.1).

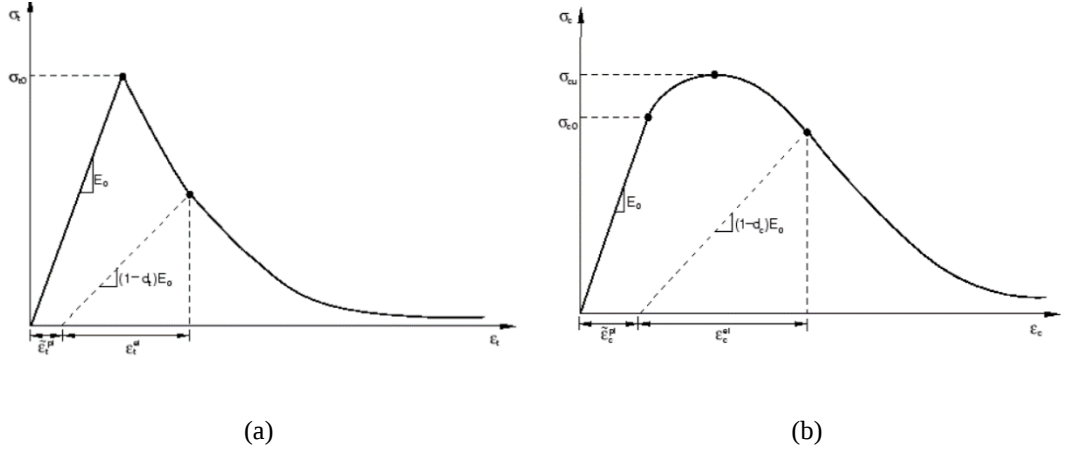


Şekil 5.1 (a) Kayalar Camii için kullanılan yatay elastik spektral ivme katsayısı grafiği, (b) kurulan sayısal model üzerinde sonlu elemanlar ağı ve duvar isimlerinin gösterimi

5.1.1 Malzeme Modelinin Tanımlanması

Tarihi yığma yapıların sismik davranışının incelenmesi amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde sıklıkla CDP malzeme modeli benimsenmiştir. (Lee ve Fenves, 1998; Meoni ve ark.,2019). Bu malzeme modeli; beton malzemenin temel iki kırılma mekanizmasının çekme ve basınç kırılması olduğu esasına dayanarak malzemenin dinamik yükler veya çevrimsel yükler altındaki davranışını temsil etmektedir.

CDP malzeme modelinde, malzeme tek eksenli çekme gerilmesi etkisi altında mikro çatlakların başladığı çekme dayanımı değerine (σ_{to}) ulaşana kadar doğrusal davranış göstermektedir. Malzeme çekme dayanımı değerinde ulaştığı anda ilk mikro çatlakların oluştuğu varsayılmaktadır. Çekme dayanımı değerine ulaştıktan sonra gerilme-birim şekil değiştirme yumuşaması meydana gelerek malzeme yapısında oluşan mikro çatlaklar ilerlemektedir. (Şekil 5.2a). Tek eksenli basınç gerilmeleri altında ise malzemenin doğrusal elastik davranış gösterdiği basınç dayanımının (σ_{co}) aşılmasının ardından sırasıyla basınç dayanımına (σ_{cu}) ulaşılmadan önceki rijitliğin azaldığı pekleşme ve sonrasındaki yumuşama bölgesinden meydana gelmektedir (Şekil 5.2b)



Şekil 5.2.CDP malzeme modeli .(a) tek eksenli çekme gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (b) tek eksenli basınç gerilme- birim şekil değiştirme davranışı

Başlangıç elastisite modülü E_0 (hasarsız) için aşağıdaki ilişkiler tek eksenli çekme (σ_t) ve basınç (σ_c) gerilmelerini tanımlamaktadır:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$$

Burada d_t ve d_c çekme ve basınç altında skaler hasar değişkenlerini, ε_t ve ε_c çekme ve basınç altındaki toplam birim deformasyonu, ε_t^{pl} ve ε_c^{pl} ise çekme ve basınç altındaki eşdeğer plastik birim deformasyonu ifade etmektedir.

Çekme altında hasar sonrası davranış, çatlamaya karşılık gelen birim deformasyonun fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikle tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el}$$

Burada ε_t toplam çekme birim deformasyonu, ε_{0t}^{el} ise elastik çekme birim deformasyonudur. Çekme altındaki eşdeğer plastik birim deformasyon ε_t^{pl} aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0}$$

Elastik rijitlik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$(1 - d) = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t)$$

Bu eşitlikte s_t ve s_c gerilme ve elastik rijitlik yenileme katsayılarının fonksiyonudur. Bu ifadeler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$s_t = 1 - w_t H(\sigma)$$

$$s_c = 1 - w_c (1 - H(\sigma))$$

Burada w_t ve w_c rijitlik yenileme katsayılarını ifade eden malzeme parametresidir. Rijitlik yenilemesinin olmadığı durumu ifade eden ‘0’ ve tam yenilemeyi ifade eden ‘1’ arasında tanımlanır. $H(\sigma)$, $\sigma \leq 0$ için 0, $\sigma > 0$ için 1 olarak tanımlanan *Heaviside* fonksiyonudur.

Malzeme modeline ilişkin tanımlanan ‘genleşme açısı’, kesme gerilmeleri altında bulunan elemanın hacmindeki değişimi ifade eden açıyı; ‘ σ_{bo}/σ_{co} ’, başlangıç iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranını ve ‘K’ ise çekme ve basınç bölgesindeki ikinci gerilme sabitleri arasındaki oranı ifade etmektedir (ABAQUS Theory Guide, Versiyon 6.14.). Tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme) davranışı için varsayılan rijitlik yenileme katsayıları $w_t=0$ ve $w_c=1$ ile ifade edilmiştir (Şekil 5.3).

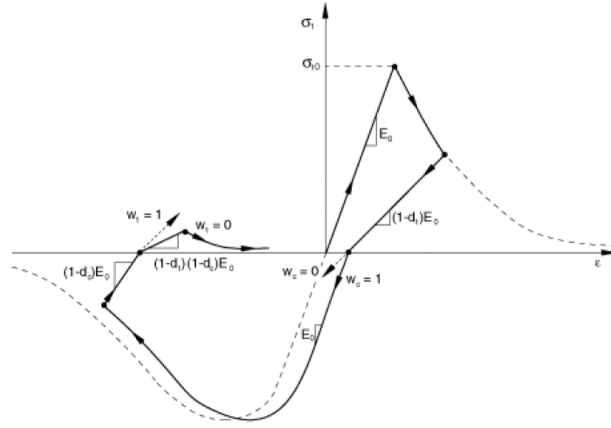
Viskozite parametresi μ ve rijitlik azalmasını idare eden parametre d için visko-plastik birim deformasyon oranı ε_v^{pl} ve viskoz rijitlik azalmasını temsil eden değişken aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl})$$

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu} (d - d_v)$$

Bu durumda viskoplastik model için gerilme-birim deformasyon ilişkisi aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\sigma = (1 - d_v) E_0 (\varepsilon - \varepsilon_v^{pl})$$



Şekil 5.3 CDP malzeme modeli tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme)

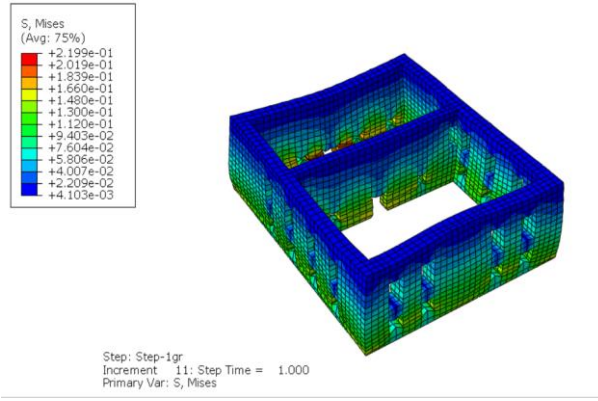
Tarihi Kayalar Camii'nin modelinde tanımlanan elastik malzeme özellikleri Bölüm 4.3'te verilen güncel elastisite modülü $E = 1345 \text{ MPa}$ ve $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ olarak tanımlanmıştır. Plastik davranışa ait parametreler benzer çalışmalar göz önüne alınarak basınç dayanımı $2,30 \text{ MPa}$, çekme dayanımı $0,23 \text{ MPa}$ olarak tanımlanmıştır. ABAQUS malzeme kütüphanesinde tanımlı olan CDP malzeme modeline ait kullanılan diğer parametreler Tablo 1.4 'de verilmiştir. Tabloda verilen 'K' değeri çekme ve basınç bölgesindeki ikinci gerilme sabitleri arasındaki oranı, ' σ_{bo}/σ_{co} ', iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranını, 'genleşim açısı' ise kesme gerilmesi altındaki elemanın hacim değişimini ifade etmektedir (ABAQUS Theory Guide, Versiyon, 6.14.).

Tablo 1.4 CDP malzeme modeline ait parametreler (Abaqus theory guide, Versiyon, 6.14.)

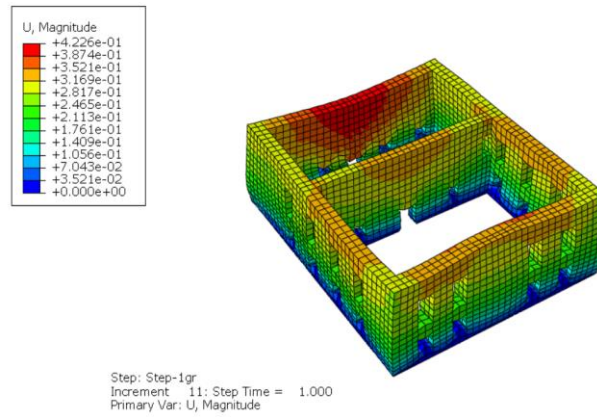
Genleşim açısı	Dış merkezlilik	σ_{bo}/σ_{co}	K
10°	0.1	1.16	0.666

5.1.2 Doğrusal olmayan statik itme analizinin sonuçları

Doğrusal olmayan statik itme analizinin ilk adımında yapının kendi öz ağırlığından kaynaklanan düşey yükler altındaki davranışı incelenerek yığma yapıda meydana gelen gerilme dağılımı elde edilmiştir (Şekil 5.4a). Oluşan şekil değişiminin izlenmesi amacıyla deplasman renklendirmesi de Şekil 5.4b'de verilmiştir.



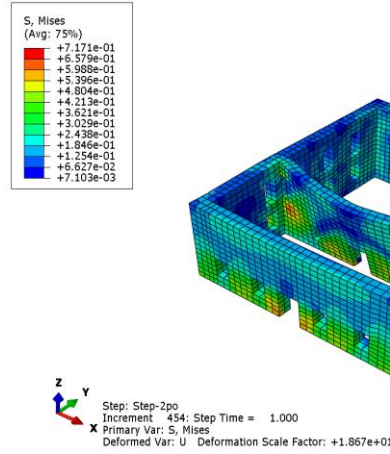
(a)



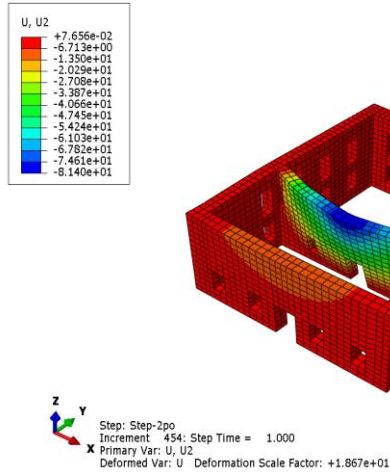
(b)

Şekil 5.4 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (MPa), (b) yerdeğiştirme profili (mm)

Analizin ikinci adımında tanımlanan yatay atalet kuvvetleri yapı uzunluğu boyunca artımsal olarak uygulanmıştır. Yatay kuvvetler öncelikle -y doğrultusunda (güneyden kuzeye) uygulanarak gerilme dağılımı ve kuvvet uygulanan doğrultudaki yerdeğiştirme profili elde edilmiştir. (Şekil 5.5-a-b)



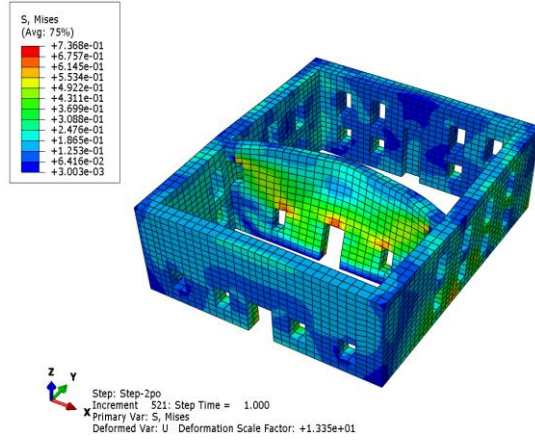
(a) -y yönünde uygulanan yatay kuvvetler etkisinde oluşan gerilme dağılımı



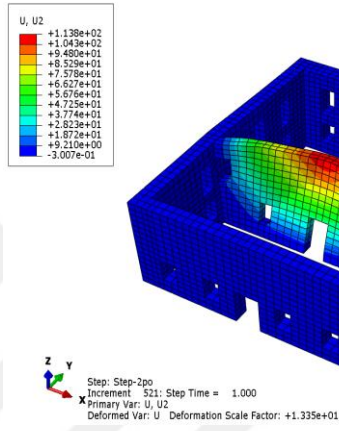
(b)

Şekil 5.5 -y yönünde kuvvet uygulanan yatay kuvvetler etkisindeki modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (b) yer değiştirme profili

Yatay kuvvetlerin +y doğrultusunda (kuzeyden güneye) uygulanarak elde edilen gerilme dağılımı ve yerdeğiştirme profili Şekil 5.6 (a-b)' de verilmiştir.



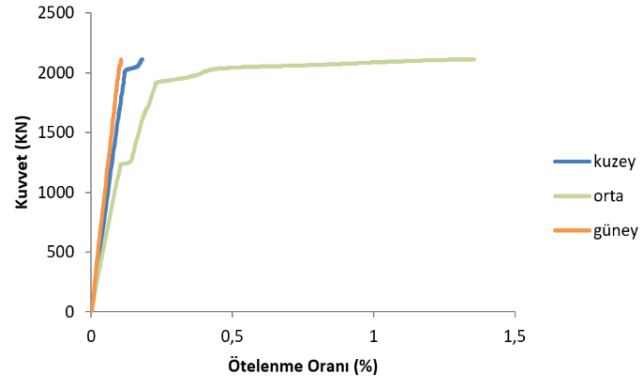
(a)



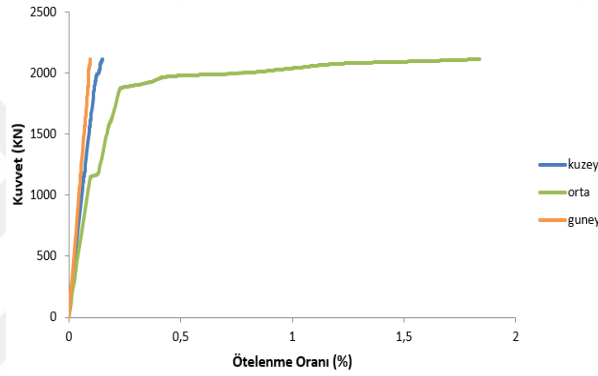
(b)

Şekil 5.6 +y yönünde uygulanan yatay kuvvetler etkisinde modelde oluşan (a) gerilme dağılımı (b) yer değiştirme profili

Analizler sonucunda güney, kuzey ve orta duvarın tepe noktasında meydana gelen en büyük yanal deplasman değerleri ölçülmüştür. Buna göre-y yönünde kuvvet uygulanan modelde güney, kuzey ve orta duvarlar için elde edilen tepe deplasman değerleri sırasıyla; 6.5 mm, 11 mm ve 81 mm'dir. +y yönünde kuvvet uygulanan modelde ise sırasıyla; 6 mm, 9 mm ve 113.7 mm'dir. Analiz sonunda yapı ağırlığı ile sayısal modelin tabanına meydana gelen düşey reaksiyon kuvveti ve tabana yakın bölgelerdeki sonlu elemanlarda meydana gelen ilgili gerilme ifadesi tutarlıdır. Yatay kuvvetler altında elde edilen kuvvet-tepe ötelenmesi eğrileri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.

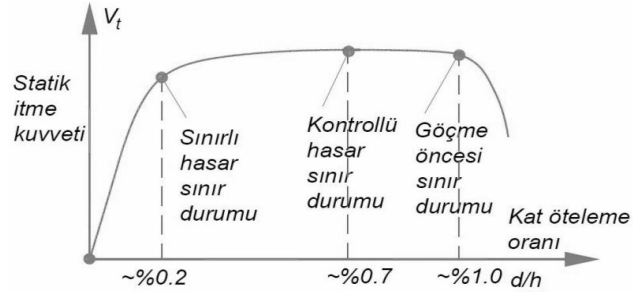


Şekil 5.7. Güney-kuzey (-y) yönünde uygulanan yatay kuvvet etkisi altındaki duvarlar için yanal yük-tepe ötelenme oranı eğrileri



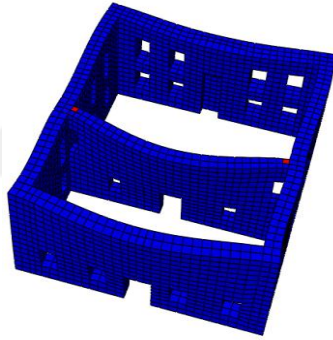
Şekil 5.8. Kuzey-güney (+y) yönünde uygulanan yatay kuvvet etkisi altındaki duvarlar için yanal yük-tepe ötelenme oranı eğrileri

Yüksekliği 6 m olan modelin tepe noktasında oluşan en büyük düzlemsiz yer değiştirme değeri orta duvar için ve 113.7 mm (%1.89 tepe ötelenmesi) bulunmuştur. Bu ötelenme değeri Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) verilen 'Statik itme eğrisi ve sınır durumları' grafiğine göre %1.00'lik tepe ötelenmesi olan 'Göçme öncesi sınır durumu'nu aşmaktadır (Şekil 5.9). Grafiğe göre; Sınırlı Hasar (SH) sınır durumu için ötelenme oranı %0.3, Kontrollü Hasar (KH) sınır durumu için ötelenme oranı %0.7 ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınır durumu için ötelenme oranı % 1.0 olarak verilmektedir.

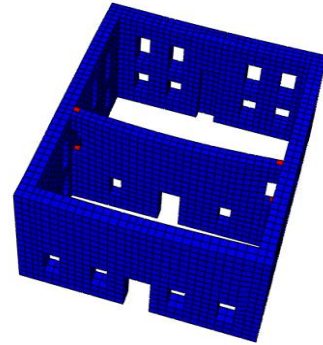


Şekil 5.9 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzunda verilen statik itme eğrisi ve sınır durumları

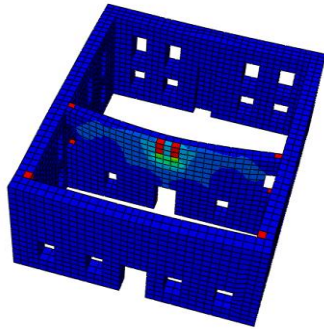
Yatay kuvvetler altında yapıda hesaplanan çekme hasarı gelişme evreleri Şekil 5.10 ve 5.11’de verilmiştir. Bu görsellere göre hasar öncelikle orta duvarın üst bölgesinde, doğu ve batı duvarları ile birleşiminde başlamış, kapı ve pencere boşluklarına doğru ilerlemiştir.



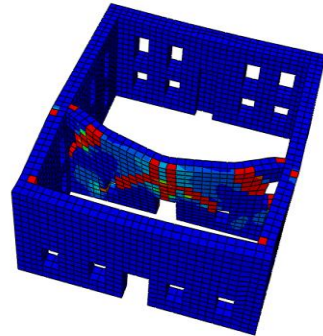
(a) Analiz adımı: 0.56



(b) Analiz adımı: 0.84

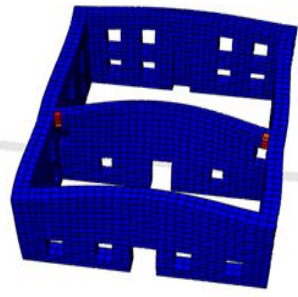


(c) Analiz adımı: 0.95

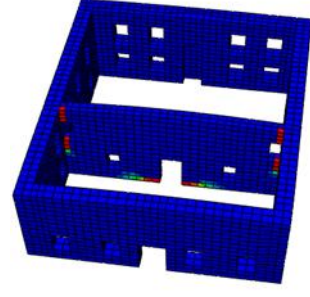


(d) Analiz adımı: 1.00

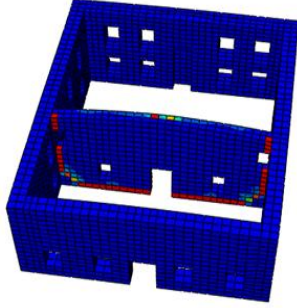
Şekil 5.10 (a-d) Güney-kuzey (-y) yönünde etkiyen yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme hasarının gelişme evreleri (analiz adımı sözde zamanı ifade etmektedir)



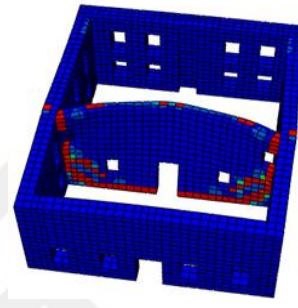
(a) Analiz adımı: 0.50



(b) Analiz adımı: 0.82



(c) Analiz adımı: 0.93



(d) Analiz adımı: 1.00

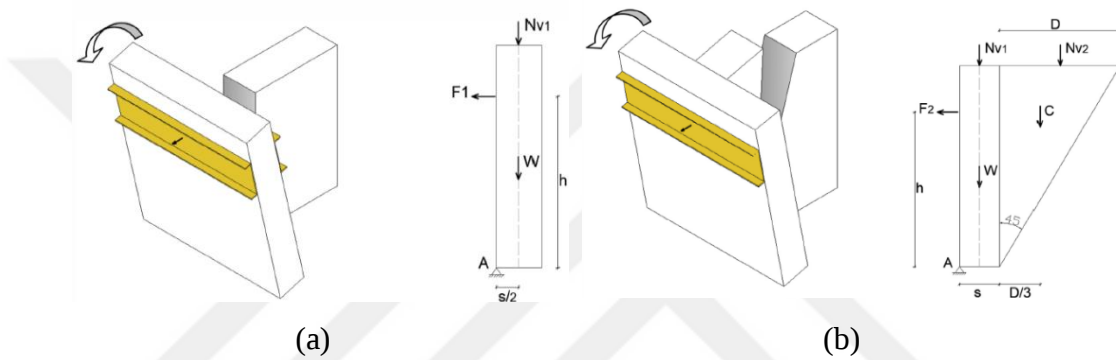
Şekil 5.11 (a-d) Kuzey-Güney (+y) yönünde etkiyen yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme hasarının gelişme evreleri (analiz adımı sözde zamanı ifade etmektedir)

5.2 Kinematik Analiz Yöntemi İle Yapısal Değerlendirme

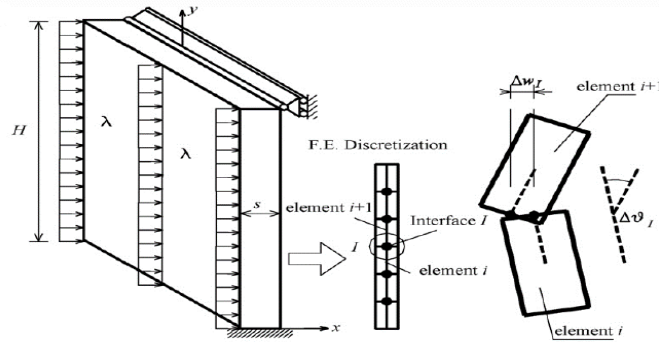
Tarihi yığma yapıların sismik davranışının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan kinematik analiz yöntemi göçme mekanizma durumlarını esas alarak yapının bu mekanizma durumlarını harekete geçiren yatay kuvvetin ve bu yatay kuvveti oluşturmak için gereken yatay deprem ivmesinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu kuvvetler, tarihi yapının deprem yatay ivme talebinin belirlenmesi ve ortaya çıkabilecek mekanizma durumunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bir yığma yapının tümünün veya bir bölümünün düşey ve yatay yükler altındaki güvenliğinin belirlenmesi amacıyla çok sayıda mekanizma durumunun göz önüne alınarak irdelenmesi gerekmektedir. (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

Maddaloni ve ark. (2016), kinematik hesabı esas alan, duvarlar arası bağlantısının olmadığını kabul eden basit devrilme mekanizması (MI) ve ana duvarı dik kesen duvarın topuktan belirli bir açı (45 derece) ile ana duvar ile beraber döndüğünü kabul eden devrilme mekanizması (MII) için değerlendirmeler vermiştir (Şekil 5.12)

Cecchi ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada dikdörtgen plak şeklindeki duvara düzlemdışı doğrultuda uygulanan kuvvet ile duvar modelinin açılma mekanizmasını inceleyerek makro ölçekli hasar arayüzlerinin tanımlandığı bir kinematik analiz modeli sunmuştur (Şekil 5.13).



Şekil 5.12 (a) Mekanizma I (MI) ve (b) Mekanizma II (MII) (Maddaloni ve ark., 2016)

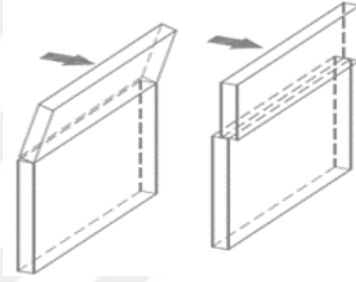


Şekil 5.13 Duvar modelinin açılma mekanizma durumu (Cecchi ve ark., 2007)

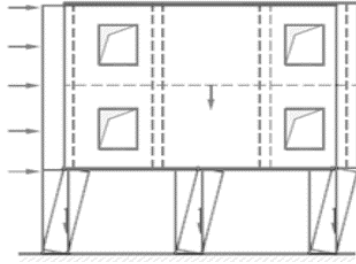
Betti ve Galano (2012), yaptıkları çalışmada İtalya’da bulunan tarihi yığma Vicarious Sarayı’nın sismik davranışını tespit etmek amacıyla sayısal modelini oluşturmuştur. Oluşturdukları sonlu elemanlar modelinde gerçekleştirdikleri itme analizi ile kinematik limit analiz yönteminden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. İtalyan Teknik Şartnamesine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda itme analizi ve kinematik analiz sonuçlarına göre güney ve batı cephesinde yer alan duvarların daha zayıf olduğu sonucuna varmışlardır.

Milani (2013), İtalya'nın Emilia kentinde gerçekleşen depremler sonucunda yıkılan ve ağır hasar alan yığma üç adet kilisenin nümerik analizleri sonucunda İtalyan Yönetmeliğinde yer alan göçme mekanizma durumlarının gözlemledikleri durumlarla aynı olduğu sonucuna varmıştır.

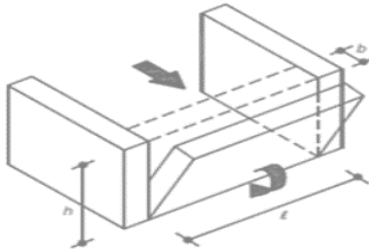
Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018), yığma yapı duvarının güç tükenmesi mekanizma durumları; eğilme ve kayma, yumuşak kat ve cephe duvarı güç tükenmesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.14a-c). Bu mekanizma yaklaşımında; duvarın rijit blok davranışına sahip olduğu ve yığma elemanların çekme dayanımının olmadığı kabulü yapılmaktadır.



(a) Eğilme ve kayma mekanizma durumu



(b) Yumuşak kat mekanizma durumu

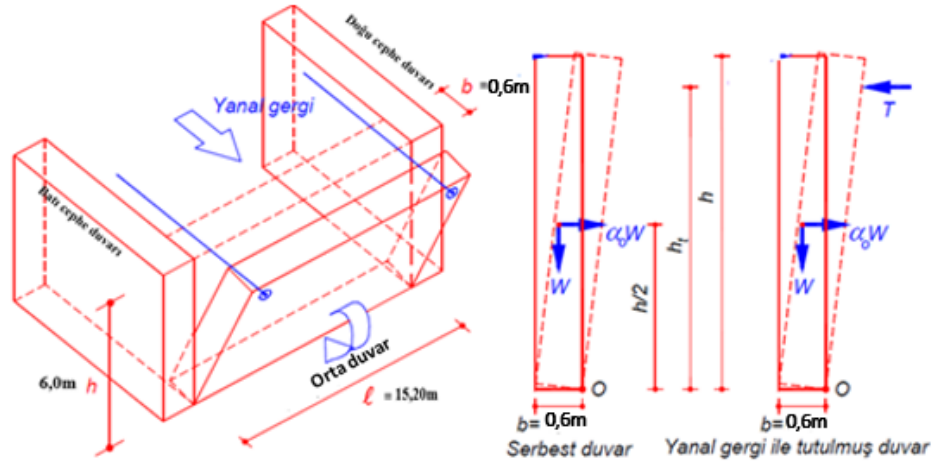


(c) Cephe duvarı güç tükenmesi mekanizma durumu

Şekil 5.14 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları

Bu bölümde, incelenen tarihi Kayalar Camii cephe duvarlarının geometrik özellikleri ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları ve hesap yöntemi göz önünde bulundurularak kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde detayları verilen doğrusal olmayan statik analiz sonuçlarına göre 'Statik itme eğrisi ve sınır durumları' grafiğine göre %1,0'lik tepe ötelenmesi olan 'Göçme Öncesi Sınır Durumu'nu aştığı tespit edilen orta duvar için kinematik analiz gerçekleştirilerek duvarın yapısal değerlendirilmesi sunulmuştur. Sayısal analizlerde kılavuzda belirtilen güç tükenmesi mekanizma durumu esas alınmıştır. Yapı örneğinin geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu Şekil 5.15'te verilmiştir.

Hesaplarda yapının birim hacim ağırlığı (ρ) = 24 kN/m³ olarak alınmıştır. Yapının bulunduğu bölgede Deprem Tehlike Haritası'ndan en büyük yer ivmesi DD2 depremi için $a_g=0.459g$ bulunmuştur. Yapı ağırlığı (W), pencere ve kapı boşlukları çıkarılarak hesaplanmıştır. Cephe duvarının esas alınan mekanizma durumuna sebep olan $\alpha_0 W$ atalet kuvvetini oluşturacak α_0 parametresi, tanımlanan devrilme noktası (O) moment dengesi yazılıp 0.1 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.15 Kayalar Camii geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu

$$\frac{Wb}{2} - \frac{\alpha_0 W h}{2} = 0 \Rightarrow \alpha_0 = \left(\frac{Wb}{2}\right) / \left(\frac{hW}{2}\right) \Rightarrow \alpha_0 = \frac{183 \times 1}{\frac{2}{6 \times 183}} = 0.1$$

Bu mekanizma durumunda etkin olan kütlenin toplam kütleyle oranı:

$$e^* = \frac{M^*}{W/g} = \frac{\left(\frac{Wh}{2}\right)^2}{W \left(\frac{Wh^2}{4}\right)} = 1$$

$$M^* = \left(\frac{Wh}{2}\right)^2 = \left(\frac{183 * 6}{2}\right)^2 = 301.401 \text{ t/s}^2$$

$$a_{kapasite}^* = \frac{\alpha_0 W}{M^*} = \frac{\alpha_0 g}{e^*} = \frac{0.1g}{1} = 0.1g$$

İncelenen göçme mekanizmasında duvar, yapının tabanından itibaren devrildiği için can güvenliği performans seviyesi için;

$$a_{kapasite}^* = 0.1g < \frac{a_g}{R_a} = \frac{0.459}{2} = 0.223g$$

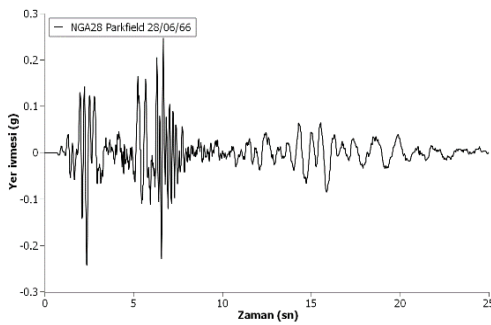
Bu durumda orta duvarın düzlemdışı devrilme etki/kapasite oranı 1.0'den küçüktür. DD2 deprem düzeyinde, bu duvarın düzlemdışı devrilme güvenliği bulunmamaktadır. Bu duvarın yeterli düzlemdışı deprem güvenliğinin sağlanabilmesi için yan duvarlar ile birleştiği köşelerden tutulması durumunda, duvarı 0.223g kapasiteye ulaştıracak toplam kuvvet T, benzer şekilde O noktasına göre denge yazılarak $h_t=5$ m için;

$$\frac{Wb}{2} - \frac{\alpha_0 Wh}{2} + Th_t = 0 \Rightarrow T=13.51 \text{ ton olarak bulunmuştur.}$$

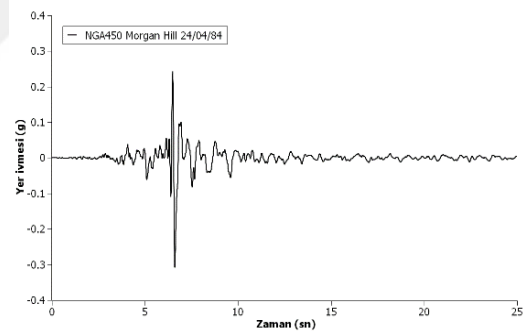
5.3 Doğrusal olmayan dinamik analiz

Tarihi yığma yapıların deprem yükleri altında dinamik tepkisinin belirlenmesi için uygulanan zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler, oluşturulan sayısal modelin tabanına deprem ivmesi kaydı tanımlanarak zaman tanım alanında gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde Kayalar Camii'nin sayısal modelinin dinamik tepkisini elde etmek için oluşturulan model üzerinde bir dizi doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir.

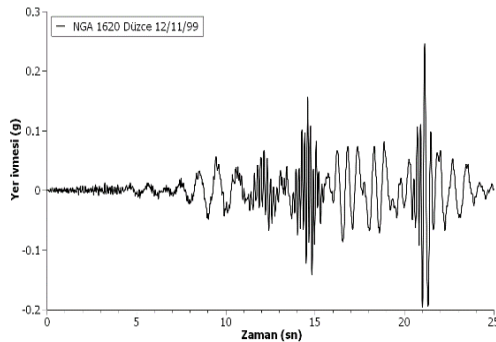
Analizlerde caminin bulunduğu bölgenin depremselliği göz önüne alınarak üç farklı ölçeklenmiş ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 5.16). Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz için gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanmasında kullanılacak ham deprem kayıtları Fahjan ve ark. (2008) tarafından önerilen kayıtlar arasından seçilerek, en son arşivlenmiş PEER veri tabanından (PEER, 2014) alınmıştır. Bölgenin depremselliği göz önünde bulundurularak NGA28 (Parkfield), NGA450 (Morgan Hill) ve NGA1620 (Düzce) deprem kayıtları seçilmiştir. Yatay elastik tasarım ivme spektrumu, güncellenen Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH, 2018) kullanılarak oluşturulmuştur. Gerçek yer hareketi kayıtları, maksimum yer ivmesi, frekans içeriği, etkin olduğu süreler vb. bakımından farklılık göstermektedir. Bu nedenle benzer bir deprem seviyesini yansıtmaları için ölçeklendirilmeleri gerekir. Bu aşamada yetkinliği kabul görmüş SeismoMatch yazılımında (SeismoSoft, 2018) hedef tasarım spektrumu göz önüne alınarak spektral uyum sağlanacak şekilde ölçeklenmiştir.



(a) NGA 28 (Parkfield)



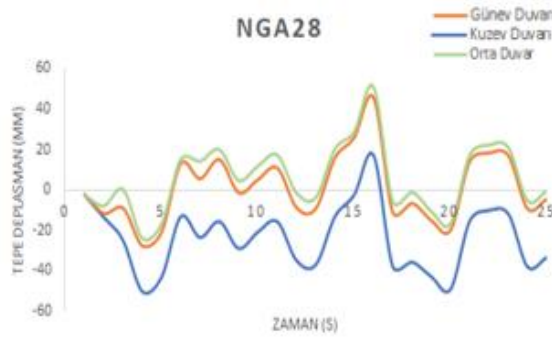
(b) NGA 450 (Morgan Hill)



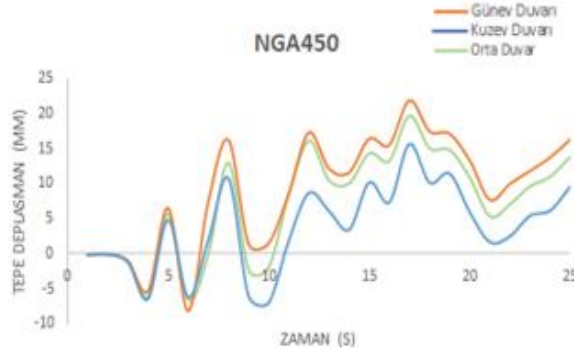
(c) NGA 1620 (Düzce)

Şekil 5.16 Doğrusal olmayan dinamik analizde kullanılan ivme kayıtları

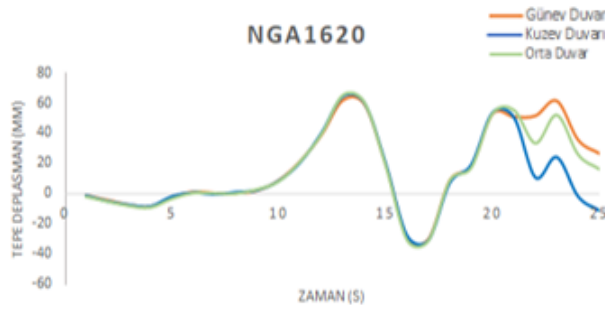
Tanımlanan yer ivmelerinin sonucunda kuzey, güney ve orta duvar için elde edilen zaman-tepe deplasmanı eğrileri Şekil 5.17’de verilmiştir. Yüksekliği 6 m olan modelin duvarlarının tepe noktasında oluşan en büyük deplasman değerleri sırasıyla NGA28 deprem kaydında kuzey duvarı 50 mm (%0.8), güney duvarı 46 mm (%0.8) ve orta duvar 51 mm (%0.9), NGA450 deprem kaydında kuzey duvarı 16 mm (%0.3), güney duvarı 22 mm (%0.4) ve orta duvar 20 mm (%0.3), NGA1620 deprem kaydında kuzey duvarı 60 mm (%1.0), güney duvarı 62 mm (%1.0) ve orta duvar 66 mm (%1.1) olarak bulunmuştur.



(a) NGA28 (Parkfield)



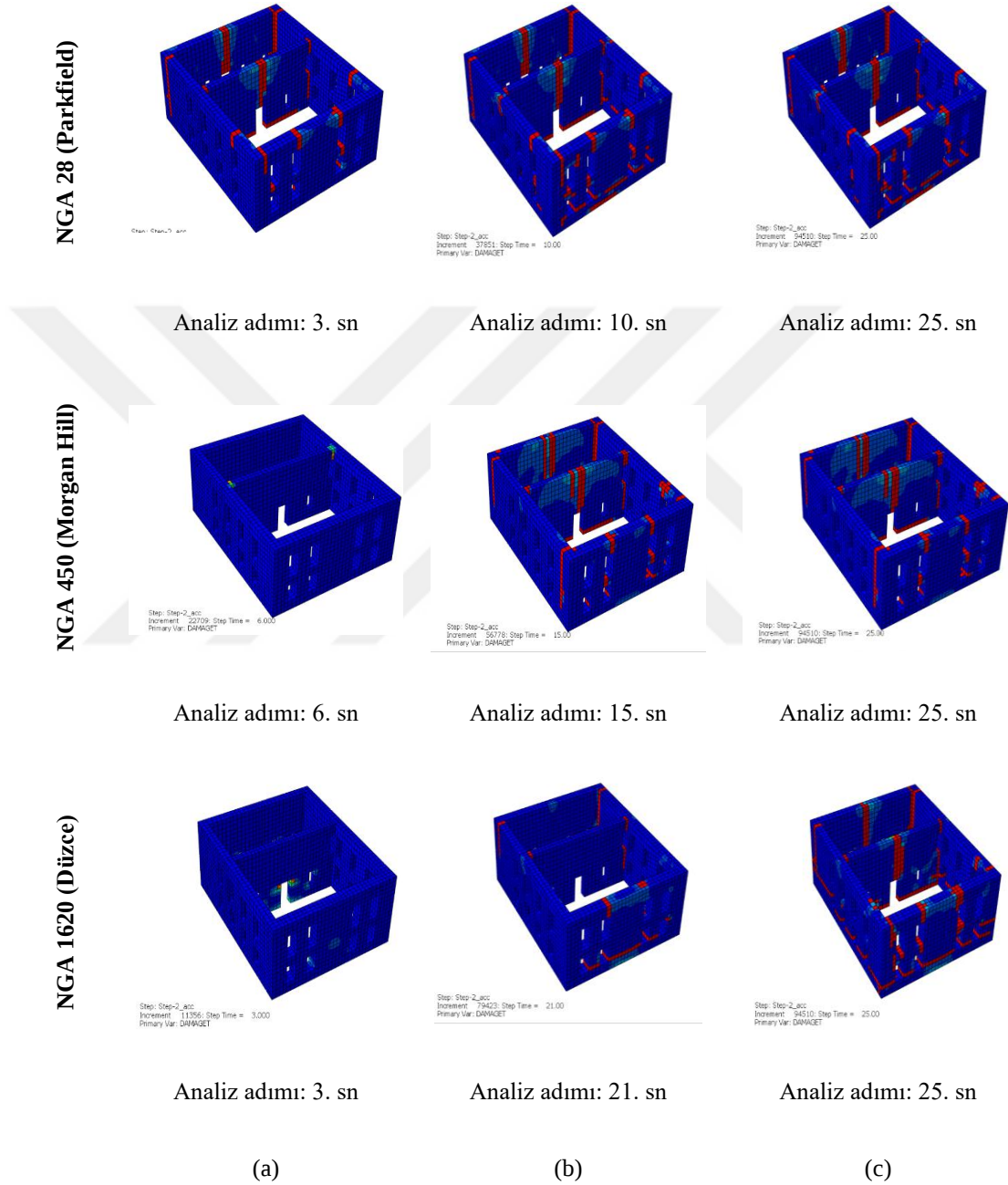
(b) NGA450 (Morgan Hill)



(c) NGA1620 (Düzce)

Şekil 5.17 Farklı deprem kayıtları için zaman-tepe deplasman eğrileri

Kullanılan üç farklı ivme kaydı için modelde meydana gelen çekme hasarlarının başlangıcı, gelişimi ve son durumunu ifade eden görseller Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 Farklı deprem kayıtları için hasar gelişimleri; (a) çekme hasarının başlangıcı; (b) gelişmesi ve (c) analiz sonu

Farklı deprem kayıtları için elde edilen çekme hasarı dağılımı incelendiğinde meydana gelen hasarların iki duvarın birbirini dik kestiği birleşim bölgesinde ve duvarların tabana yakın bölgelerinden başlayıp pencere ve kapı boşluklarına doğru ilerlediği hat üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durumun doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçlarından elde edilen hasar dağılımı ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik analiz sonuçlarına göre yüksekliği 6 m olan modelin orta duvar tepe noktasında, yatay kuvvetler altında oluşan en büyük yanal deplasman değeri, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) verilen 'Statik itme eğrisi ve sınır durumları' grafiğine göre %1.00'lik tepe ötelenmesi olan 'Göçme öncesi sınır durumu'nu aşmaktadır. Orta duvar düzlemdışı devrilme mekanizma durumunu esas alan kinematik analize göre incelendiğinde duvarın DD2 depreminde can güvenliği performans seviyesini sağlaması için yan duvarlar ile birleştiği köşelerden tutulması durumunda, duvar tabanından 5m yükseklikte uygulanacak kuvvetin 13.51 ton olacağı sonucuna varılmıştır. Analiz sonuçları göz önüne alındığında doğrusal olmayan statik itme analizi, kinematik analiz ve doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu ve modelin orta duvarında düzlemdışı devrilme riski taşıdığı görülmektedir.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında incelenen tarihi yığma yapının deneysel yöntemlerle dinamik karakteristiklerinin belirlenerek oluşturulan sonlu elemanlar modelinin yapının dinamik karakterini gerçeğe yakın olarak temsil edecek şekilde kalibre edilmesi ve yapı duvarlarının düzlemdışı stabilite kaybına öncülük eden hasar sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapının sismik değerlendirmesi yapılarak olası hasar senaryoları elde edilmiştir. Bu bağlamda tarihi yığma yapı örneği olarak İzmir/Foça’da bulunan 15.-16.yy’da inşa edildiği tahmin edilen tarihi Kayalar Camii seçilmiştir.

Tarihi Kayalar Camii duvarları üzerinde ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilerek yapının dinamik karakteristiği operasyonel modal analiz yöntemi ile elde edilmiştir. Deneysel çalışma öncesinde ABAQUS programında makro modelleme yöntemi ile yapının ön sayısal modeli oluşturularak frekans analizi ile serbest titreşimine ait mod şekilleri elde edilmiştir. Mümkün olduğu kadar çok sayıda mod şeklinin belirlenebilmesi amacıyla ön sayısal analiz sonucundan elde edilen mod şekilleri göz önüne alınarak ivmeölçer yerleşim planı hazırlanmıştır. Yapının doğu, batı ve güney cephesi duvarlarından alınan ivme verisi, operasyonel modal analiz yazılımı olan ARTeMIS (ARTeMIS, 2016) kullanılarak Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) ve Stochastic Subspace Identification (SSI) yöntemleri ile işlenmiş ve yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Ön sayısal modelden ve operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen modal parametreler karşılaştırılarak mod şekli benzerlik oranı modal güvence kriteri (MAC) ile elde edilmiştir. Mod şekillerinin %75’den yüksek MAC değerlerine sahip olmasından mod şekillerinin oldukça iyi uyduğu fakat frekans tahminlerinde görece farklılıklar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum ön sayısal modelin gerçek yapıyı tamamiyle temsil etmediği ve belirsiz model parametrelerinin güncellenerek sayısal modelin kalibre edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Sayısal model güncelleme parametresi olarak elastisite modülü seçilerek yapının sayısal modeli güncellenmiştir. Güncelleme sonrası sonlu elemanlar modelinin doğal frekansları ile deneysel elde edilen frekansların uyumlu olduğu karşılaştırmalı tablo ile verilmiştir. Sonuç olarak yapının dinamik karakterini en iyi temsil edecek sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Güncellenmiş sayısal model üzerinde doğrusal olmayan statik analiz ve üç farklı yer ivmesi etkisi altında

dinamik analizler gerçekleştirilerek duvarlarda oluşacak olası hasarlar gözlemlenmiştir. Bulunan sonuçlar ayrıca kinematik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Böylece bu elverişsiz analiz senaryosunda düzlemdışı doğrultuda incelenen duvarların münferit davranışları ve hasar profilleri belirlenebilmiştir.

Sismik değerlendirmelerin ilk aşamasında tarihi yığma yapı modelinin doğrusal olmayan statik analizi ile yatay yükler altında düzlemdışı davranışı incelenmiştir. Analizin ilk adımında yapının kendi ağırlığından kaynaklı düşey kuvvetler etkisi altında gerilme ve yerdeğiştirme profili verilmiştir. Analizin ikinci adımında yatay atalet kuvvetleri yapı uzunluğu boyunca artımsal olarak uygulanmıştır. Analiz sonunda yapı ağırlığı ile sayısal modelin tabanına meydana gelen düşey reaksiyon kuvveti ve tabana yakın bölgelerdeki sonlu elemanlarda meydana gelen ilgili gerilme ifadesi tutarlıdır. Yatay kuvvetler altında elde edilen kuvvet-tepe ötelenmesi grafikleri elde edilmiştir. (-y) yönünde kuvvet uygulanan modelde güney, kuzey ve orta duvarlar için elde edilen tepe deplasman değerleri sırasıyla; 6.5 mm, 11 mm ve 81 mm olmuştur. (+y) yönünde kuvvet uygulanan modelde ise sırasıyla; 6 mm, 9 mm ve 113.7 mm tepe yer değiştirmesi belirlenmiştir. Yüksekliği 6 m olan modelin tepe noktasında oluşan en büyük düzlemdışı yer değiştirme değeri orta duvar için ve 113.7 mm (%1.89 tepe ötelenmesi) bulunmuştur. Bu ötelenme değeri Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) verilen 'Statik itme eğrisi ve sınır durumları' grafiğine göre %1.00'lik tepe ötelenmesi olan 'Göçme Öncesi Sınır Durumu'nu aşmaktadır. Yatay kuvvetler altında sayısal modelde hesaplanan çekme hasarı dağılımları verilmiştir. Buna göre hasar öncelikle orta duvarın doğu ve batı duvarları ile üst bölgede birleşiminden başlamış, kapı ve pencere boşluklarına doğru ilerleme göstermiştir.

Sismik değerlendirmelerin ikinci aşamasında Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) verilen kinematik analiz yöntemi ile tarihi yığma yapı örneğinin yapısal davranışı incelenmiştir. Kinematik analiz, doğrusal olmayan statik analiz sonuçlarına göre göçme öncesi sınır durumunu aşan ve en büyük düzlemdışı yerdeğiştirme değeri elde edilen orta duvar için uygulanmıştır. Mekanizma durumunu esas alan bu hesap aşamasında kılavuzda belirtilen cephe duvarının düzlemdışı devrilme mekanizma durumu esas alınmıştır. Duvarın DD2 depreminde

can güvenliği performans seviyesini sağlaması için yan duvarlar ile birleştiği köşelerden tutulması durumunda uygulanması gereken toplam kuvvetin 13.51 ton olacağı sonucuna varılmıştır.

Sismik değerlendirmenin son aşamasında tarihi yığma yapı modeli üzerinde bir dizi doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, bölgenin depremselliği dikkate alınarak seçilen üç farklı ivme kaydı kullanılmıştır. Analizler sonucunda sayısal modelde hesaplanan çekme hasarı dağılımı üç farklı ivme kaydı için elde edilmiştir. Bu durum yapının farklı yer ivmeleri etkisinde sergileyeceği sismik davranış hakkında fikir vermiştir. Özellikle duvarlarda oluşacak hasar dağılımını ve binanın en savunmasız bölgelerinin tespiti için önemlidir. Analiz sonucunda güney, kuzey ve orta duvar için tepe ötelenmesi-zaman grafikleri elde edilmiştir. NGA1620 ivme kaydına göre üç ayrı duvarda oluşan en yüksek ötelenme oranına göre ‘Göçme Öncesi Sınır Durumu’ aşılmaktadır. Her üç deprem kaydı için de duvarlarda meydana gelen hasar; iki duvarın birbirini dik kestiği birleşim bölgesinde ve duvarların tabana yakın bölgelerinden başlayıp pencere ve kapı boşluklarına doğru ilerlediği hat üzerinde yoğunlaşmaktadır.

7 KAYNAKÇA

Abaqus theory guide. Versiyon, 6.14.

ABAQUS. (2017). Dassault Systemes Simulia Corp., Jonhston, RI, USA.

Allemang, R.J. (2003). The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, 37 (8), 14-23.

Aoki, T., Komiyama, T., Sabia, D.ve Rivella, D. (2004, ağustos). Theoretical and experimental dynamic analysis of Rakanji stone arch bridge, Honyabakei, Oita, Japan. *7th International Conference on Motion and Vibration Control MOVIC* (4),9.

ARTEMIS Extractor Pro (2016). *Structural Vibration Solutions*, Aalborg, Denmark.

Asteris, P.G., ve Tzamtzis, A.D., (2003). On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls, *Electronic Journal of Structural Engineering* ,3, Pg 23 42.

ASTM (2014). ASTM C1197-14a – Standard Test Method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method.

Atamturktur, S. ve Laman, J. A. (2012). Finite element model correlation and calibration of historic masonry monuments. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21 (2), 96-113.

Augenti, N. ve Parisi, F. (2010). Learning from construction failures due to the 2009 L'Aquila, Italy earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24 (6), 536-555.

Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T. (2009). Finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge. *Journal of Performance of Constructed facilities*, 24 (1), 46-52.

Betti, M., Galano, L. (2012). Seismic analysis of historic masonry buildings: the vicarious palace in Pescia (Italy), *Buildings*, 2(2), 63-82.

Binda L., Saisi A (2001), On site and laboratory tests for the diagnosis of historic structures, *7th International Conference on "Inspection, Appraisal, Repairs & Maintenance of Buildings & Structures"*, 11-13 September 2001, Nottingham, (UK). 29-42.

Bothara, J. K., Dhakal, R. P., Mander, J. B. (2010). Seismic performance of an unreinforced masonry building: An experimental investigation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39 (1), 45-68.

Brencich, A. ve Sabia, D. (2008). “Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge.” *Construction. Building. Materials*, 22(10), 2087–2099.

Brincker R., Zhang L. ve Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10 (3), 441 445.

Brown, G., Pretlove, A. J., Ellick, J. C. A., Hogg, V., ve Choo, B. S. (1995). Changes in the dynamic characteristics of a masonry arch bridge subjected to monotonic loading to failure. *1. International Conference on Arch Bridges ,Bolton, İngiltere on 3–6 Eylül 1995* (375-383). Thomas Telford Yayıncılık.

Bui, T. T., Limam, A., David, B., Ferrier, E. ve Brun, M. (2010). Masonry walls submitted to out-of-plane loading: Experimental and numerical study. *8th International Masonry Conference*, 2, 1153-1162.

Casarin, F. ve Modena, C. (2008). Seismic assessment of complex historical buildings: application to Reggio Emilia Cathedral, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 2 (3), 304-327.

Cecchi, A., Milani, G. ve Tralli, A. (2007). A Reissner–Mindlin limit analysis model for out-of-plane loaded running bond masonry walls. *International journal of solids and structures*, 44 (5), 1438-1460.

Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A. (2003). Experimental study on the determination of strength of masonry walls, *Construction and Building Materials*, (17), 325-337.

Costa, A. A. M. G. (2012). *Seismic assessment of the out-of-plane performance of traditional stone masonry walls*. Doktora tezi, Universidade do Porto, Portekiz.

Costa, C., Ribeiro, D., Jorge, P., Silva, R., Arêde, A. ve Calçada, R. (2016). Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 123, 354-371.

Çakmak Ş. (1996). Foça'daki Türk Eserleri. *Geçmişten Günümüze Foça Uluslararası Sempozyumu. 23-25 Ağustos, İzmir (Bildiriler kitabı, 47-60)*.

Çalık İ. Bayraktar A. Turker T. (2016). Tarihi Ahşap Çatılı Yığma Taş Camilerin DeneySEL Dinamik Karakteristikleri. *Vakıflar Dergisi*, 45, 189-207.

D'Ambrisi, A., Mariani, V. ve Mezzi, M. (2012). Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests. *Engineering Structures*, 36, 210-219.

Dizhur, D., Ingham, J., Moon, L., Griffith, M., Schultz, A., Senaldi, I., ve diğer. (2011). Performance of masonry buildings and churches in the 22 February 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44 (4), 279-296.

Doebbling, S. W., Farrar, C. R. ve Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2), 91-105.

Dolatshahi, K. M., Aref, A. J., ve Yekrangnia, M. (2014). Bidirectional behavior of unreinforced masonry walls. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(15), 2377-2397.

Fahjan YM (2008). Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007), Tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi. *İMO Teknik Dergi* 4423-4444, Yazı 292.

Fanning, P.J. ve Boothby, T.E. (2001). Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers and Structures*, 79(29-30), 2645-2662.

FEMtools (2017). *Dynamic Design Solutions*. Leuven, Belgium.

Ferreira, T. M., Costa, A. A. ve Costa, A. (2015). Analysis of the out-of-plane seismic behavior of unreinforced masonry: A literature review. *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (8), 949-972.

Friswell, M. ve Mottershead, J. E. (2013). *Finite element model updating in structural dynamics* (Vol. 38). Springer Science & Business Media.

Gentile, C., Saisi, A. ve Cabboi, A. (2015). Structural identification of a masonry tower based on operational modal analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (2), 98-110.

Gregorczyk, P.ve Lourenço, P. B. (2000). A review on flat-jack testing, *Engenharia Civil*,(Ocak,2000).,39-50

https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf.

Ismail, N., Griffith, M. ve Ingham, J. M. (2011). Performance of masonry buildings during the 2010 Darfield (New Zealand) earthquake. *The Eleventh North American Masonry Conference*, 30 Ekim 2019, <http://hdl.handle.net/2292/6807>.

Juhásová, E., Hurák, M., ve Zembaty, Z. (2002). Assessment of seismic resistance of masonry structures including boundary conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12), 1193-1197.

Khan, H. A., Nanda, R. P., ve Das, D. (2017). In-plane strength of masonry panel strengthened with geosynthetic. *Construction and Building Materials*,156, 351-361.

Lee, J. ve Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (8), 892-900.

Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301-319.

Lourenço, P. B., Trujillo, A., Mendes, N. ve Ramos, L. F. (2012). Seismic performance of the St. George of the Latins church: Lessons learned from studying masonry ruins. *Engineering Structures*, 40, 501-518.

Lourenço, P., B.,(1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behavior of masonry, P. Roca et al. (eds): *Structural Analysis of Historical Constructions II. CIMNE*, Barcelona, 57-91.

Lourenço, P.B., (1996), Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

Maccarini, H., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Ortega, J. ve Lourenço, P. B. (2018). Out-of-plane behavior of stone masonry walls: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 179, 430-452.

Maddaloni, G., Balsamo, A., Di Ludovico, M. ve Prota, A. (2016). Out of plane experimental behavior of T-shaped full scale masonry orthogonal walls strengthened with innovative composite systems. *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 30 Ekim 2019, <http://www.claisse.info/2016%20papers/S282.pdf>.

Magenes, G., Penna, A., Senaldi, I. E., Rota, M.ve Galasco, A. (2014). Shaking table test of a strengthened full-scale stone masonry building with flexible diaphragms. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(3), 349-375.

Meoni, A., D'Alessandro, A., Cavalagli, N., Gioffré, M. ve Ubertini, F. (2019). Shaking table tests on a masonry building monitored using smart bricks: Damage detection and localization. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 48 (8), 910-928.

Mısır, I. S., Youssouf, I. B., ve Yucel, G. (2018). Out-of-Plane Damage Limits for the Walls in Historical URM Buildings under Earthquake Actions: A Case Study for İsabey Mosque. *Third International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 24-27 Nisan, Çeşme, İzmir

Mısır, İ.S., Kuran F., Yücel G., Yiğiter H., Eser C.B., Topçu S., Tuna E. (2019). Tarihi Yığma Binaları Oluşturan Kesme Taş Duvarların Düzlem dışı Yükler Altındaki Davranışı. 7. *Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı*, 4-5 Ekim, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, Türkiye, 153-158.

Mısır, İ.S., Özcelik, Ö., Durmazgezer, E., Yücel, U., Amaddeo, C., Kuran, F., ve diğer. (2017). Tarihi Yığma Binaları Oluşturan Üç Tabakalı Taş Yığma Duvarların Düzlem dışı Etkilere Göre Model Kalibrasyonu: İsabey Camii Örneği. 6. *Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, 1, 483-492.

Milani, G. (2013). Lesson learned after the Emilia-Romagna, Italy, 20–29 May 2012 earthquakes: a limit analysis insight on three masonry churches. *Engineering Failure Analysis*, 34, 761-778.

Milani, G. ve Valente, M. (2015). Failure analysis of seven masonry churches severely damaged during the 2012 Emilia-Romagna (Italy) earthquake: non-linear dynamic analyses vs conventional static approaches. *Engineering Failure Analysis*, 54, 13-56.

Oliveira, D.V., (2000), Mechanical characterization of stone and brick masonry, Report 00-DEC/E-4, University of Minho, Department of Civil Engineering, Portugal.

Oyarzo-Vera, C. ve Griffith, M. C. (2009). The Mw 6.3 Abruzzo (Italy) earthquake of April 6th, 2009. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(4), 302-307.

Özcelik, O., Gundogan, M. ve Kahraman, S. (2013). Modal Parameter Estimation of Model Steel Bridge Using System Identification Methods. *TEKNIK DERGI*, 24(3), 6471-6478.

Özçelik, Ö., Mısır, İ.S., Yücel, U., Girgin, Ö., Durmazgezer, E., Amaddeo, C., ve diğer. (2018). Model updating studies of a masonry courtyard wall of Isabey mosque using out-of-plane ambient vibration measurements. *13. International Congress on Advances in Civil Engineering*, 30Ekim2019,

https://www.researchgate.net/profile/Erkan_Durmazgezer/publication/327629783.

Özen, G., Ö. (2006), *Comparison of elastic and inelastic behavior of historic masonry structures at the low load levels*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Pau, A. ve Vestroni F. (2013). Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1), 454-466.

Popehn, J. R. B., Schultz, A. E., Lu, M., Stolarski, H. K. ve Ojard, N. J. (2008). Influence of transverse loading on the stability of slender unreinforced masonry walls. *Engineering Structures*, 30 (10), 2830-2839.

Rabinovitch, O. ve Madah, H. (2011). Finite element modeling and shake-table testing of unidirectional infill masonry walls under out-of-plane dynamic loads. *Engineering structures*, 33(9), 2683-2696.

Ramalho, M., Taliércio, A., Anzani, A., Binda, L. ve Papa, E. (2005). Experimental and numerical study of multi-leaf masonry walls. *WIT Transactions on the Built Environment*, 83 (1), 333-342.

SeismoSoft. (2018). SeismoMatch, A computer application capable of adjusting earthquake accelerograms to match a specific target response spectrum, Version 2018. [Online]. Available: <http://www.seismosoft.com> (İngilizce).

Shi, Y., D. D'Ayala ve J. Prateek. (2008). Analysis of out-of-plane damage behaviour of unreinforced masonry walls. *In Proceedings of the 14th International Brick and Block Masonry Conference*. Sydney, Australia, February 17–20.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. ve Czarnecki, J. J. (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. *Los Alamos National Laboratory, İngiltere*, 1.

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. (2018). 11 Kasım 2019, Toker, S., Unay, A.I. (2004). Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, *G.U. Journal of Science*, 17(2), 129-139

TDTH (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı- AFAD, <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/>

Tomažević, M.ve Lutman, M. (1996). Seismic behavior of masonry walls: modeling of hysteretic rules. *Journal of structural engineering*, 122(9), 1048-1054.

TS EN 1052-3. (2004). Kagir-Deney metotları- Bölüm 3: Başlangıç kayma dayanımının tayini.

Turek M, Ventura CE, Placencia P. (2002). Dynamic characteristics of a 17th century church in Quito. *Proceedings of the International Society of Optical Engineering*, 4753(2), 1259–1264.

Türker, T. (2011). *Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Ünay, A. İ. (2002), *Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı*, O.D.T.Ü Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara.

Valente, M. ve Milani, G. (2019). Damage assessment and collapse investigation of three historical masonry palaces under seismic actions. *Engineering Failure Analysis*, 98, 10-37.

Van Overschee, P. ve De Moor, B. L. (1996). *Subspace identification for linear systems* (1). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Vintzileou, E., Mouzakis, C., Adami, C. E. ve Karapitta, L. (2015). Seismic behavior of three-leaf stone masonry buildings before and after interventions: Shaking table tests on a two-storey masonry model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(10), 3107-3133.

Yücel G. (2019). *Tarihi Üç Tabakalı Taş Duvarların Düzlemdışı Deprem Hasar Limitlerinin Deneysel Ve Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Zapico, J.L., Gonzalez, M.P., Friswell, M.I., Taylor, C.A. ve Crewe, A.J. (2003). Finite element model updating of a small scale bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 268(5), 993-1012.

Žarnić, R., Gostič, S., Crewe, A. J. ve Taylor, C. A. (2001). Shaking table tests of 1: 4 reduced-scale models of masonry infilled reinforced concrete frame buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(6), 819-834.

