

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ ÜÇ TABAKALI TAŞ DUVARLARIN
DÜZLEMDIŞI DEPREM HASAR LİMİTLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ

Gökhan YÜCEL

Aralık, 2019
İZMİR

**TARİHİ ÜÇ TABAKALI TAŞ DUVARLARIN
DÜZLEMDİŞİ DEPREM HASAR LİMİTLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**

Gökhan YÜCEL

Aralık, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

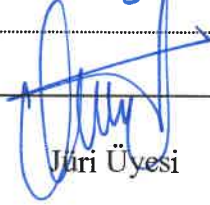
GÖKHAN YÜCEL, tarafından **DOÇ. DR. İBRAHİM SERKAN MISIR** yönetiminde hazırlanan **“TARHI ÜÇ TABAKALI TAŞ DUVARLARIN DÜZLEMDİŞİ DEPREM HASAR LİMİTLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. İbrahim Serkan MISIR

Yönetici

Doç. Dr. Özgür Özcelik



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Engin AKTAŞ



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez kapsamındaki 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 ve Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Çalışma Grubu'nun katkıları ile gerçekleştirilmiştir.

Tez danışmanlığımı yürüten ve tezimin her aşamasında bana sayısız konuda destek olan Doç. Dr. İbrahim Serkan MISIR'a ve yüksek lisans eğitimime önemli katkı sağlayıp tez çalışmalarım boyunca görüş ve önerilerini esirgemeyen Prof. Dr. Serap KAHRAMAN ve Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirilen laboratuvar testlerine önemli katkılar sağlayan Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER ve Doç. Dr. İbrahim GÜNDOĞAN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca değerli yardımlarından dolayı, çalışma grubunda bulunan İnş. Yük. Müh. Fikret KURAN, İnş. Yük. Müh. Ercan TUNA, İnş. Yük. Müh. Umut YÜCEL, İnş. Yük. Müh. Erkan DURMAZGEZER, İnş. Yük. Müh. İsmail BACHABİ YOUSSEUF, İnş. Yük. Müh. Özgür GİRGIN ve değerli dostum İnş. Müh. Mert Sezer ŞENYÜREK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bunlar sevgili annem Naciye YÜCEL ve babam Orhan YÜCEL ve canım kardeşlerim Uğurhan YÜCEL ve Duygu YÜCEL'in hayatım boyunca bana verdikleri destek ile mümkün olabilmektedir.

Gökhan YÜCEL

TARİHİ ÜÇ TABAKALI TAŞ DUVARLARIN DÜZLEMDIŞI DEPREM HASAR LİMİTLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

ÖZ

Bu tez kapsamında tarihi yığma yapıları oluşturan duvarların düzlemdışı doğrultudaki deprem hasar limitleri araştırılmıştır. Çalışmada özellikle rijit diyaframı olmayan ve düzlemdışı doğrultuda desteklenmemiş uzunluğu fazla olan çok tabakalı kesme taş duvarlar incelenmiştir. Bu kapsamda, yakın dönemde meydana gelen depremlerin tarihi yığma yapılar üzerindeki etkisi araştırılmış ve tarihi yığma yapıların sismik değerlendirilmesine yönelik çalışmalar derlenmiştir. Seçilen tarihi yığma yapı örneğinin avlu duvarları üzerinde ortamsal titreşim testleri ve az tahribatlı testler gerçekleştirilerek yapının dinamik karakteristikleri ve malzeme özellikleri tahmin edilmiştir. Elde edilen parametreler büyük ölçekli laboratuvar numunelerinin düzlemdışı yarı-statik testlerinde ve sayısal analizlerde kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sayısal modeller ile laboratuvar testlerinin makro ve mezo ölçekli simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca incelenen tarihi yığma yapı örneğinin avlu duvarlarının sismik davranışı kinematik analiz yaklaşımı, doğrusal olmayan statik itme analizi ve doğrusal olmayan dinamik analizler ile değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tarihi yığma yapı, düzlemdışı hasar, yarı-statik laboratuvar testleri, sonlu elemanlar modellemesi, sismik değerlendirme

DETERMINING OUT-OF-PLANE EARTHQUAKE DAMAGE LIMITS OF HISTORICAL THREE-LEAF STONE MASONRY WALLS USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

ABSTRACT

Within the scope of this thesis, the earthquake damage limits of the walls forming historical masonry structures were investigated. During the studies, especially the multi-leaf cut stone walls without rigid diaphragms and which have long unsupported length in out-of-plane direction were examined. In this context, the effect of the recent earthquakes on historical masonry structures was investigated and studies on the seismic assessment of historical masonry structures were compiled. Ambient vibration tests and semi-destructive tests were carried out on the courtyard walls of a historical masonry case structure, and the dynamic characteristics and material properties of the structure were estimated. The obtained parameters were used in out-of-plane quasi-static tests of large-scale laboratory specimens and numerical analyses. Macro and meso-scale simulations of laboratory tests were performed with numerical models consist of finite elements. In addition, the seismic behavior of the courtyard walls of historical masonry case structure was evaluated with kinematic analysis approach, nonlinear static pushover analysis and nonlinear dynamic analyses.

Keywords: Historical masonry structures, out-of-plane damage, quasi-static laboratory tests, finite element modeling, seismic assessment

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
 BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	 1
1.1 Tarihi yığma yapı duvarlarının düzlem dışı deprem davranışı.....	1
1.2 Araştırmanın amacı.....	4
1.3 Tez düzeni.....	5
 BÖLÜM İKİ – LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	 6
2.1 Yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen saha testleri.....	6
2.2 Yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar testleri	9
2.3 Yığma duvarların sayısal modellenmesi.....	13
 BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	 19
3.1 Saha testleri.....	19
3.1.1 Tarihi yığma yapı örneği: İsabey Camii	19
3.1.2 Ortamsal titreşim testleri.....	22
3.1.3 Duvar tipolojisi	28
3.1.4 Harç içeriği tayini	29
3.1.5 Flat-jack testleri	32
3.2 Laboratuvar testleri.....	34
3.2.1 Tarihi harcın mekanik karakterizasyonu.....	34

3.2.2 Duvar numuneleri için düzlemdışı test altyapısının hazırlanması	39
3.2.3 Duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri	44
3.2.4 Duvar numuneleri üzerinde yürütülen düzlemdışı yarı-statik testler ve ön sonuçlar	51
BÖLÜM DÖRT – SAYISAL MODELLEME.....	59
4.1 Operasyonel modal analiz ile model kalibrasyonu.....	59
4.1.1 İsabey Camii avlu duvarlarının model kalibrasyonu	59
4.1.2 Laboratuvar numunelerinin OMA ile model kalibrasyonu.....	64
4.2 Düzlemdışı yarı-statik testlerin simülasyonu	66
4.2.1 Makro ölçekli sonlu elemanlar modeli ile simülasyon	66
4.2.2 Mezo ölçekli sonlu elemanlar modeli ile simülasyon.....	69
4.3 Tarihi İsabey Camii avlu duvarlarının sismik analizi.....	75
4.3.1 Kinematik analiz yöntemi ile yapısal değerlendirme	75
4.3.2 Doğrusal olmayan statik itme analizi.....	79
4.3.3 Doğrusal olmayan dinamik analiz	85
BÖLÜM BEŞ – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 1998 Azores depremi sonrası oluşan düzlemdışı hasar	2
Şekil 1.2 (a) Cephenin tamamının göçtüğü düzlemdışı hasar, (b) Tek yönlü eğilme davranışı, (c) Çift yönlü eğilme davranışı	2
Şekil 1.3 (a) Çatı ile bağlantısı zayıf olan duvarın düzlemdışı hasarı, (b) Çok tabakalı yığma duvarın düzlemdışı hasarı.....	3
Şekil 1.4 (a) Birbirini dik kesen duvarların ayrılması, (b) Çok tabakalı yığma duvarın düzlemdışı hasarı	3
Şekil 1.5 (a) Yığma duvarın düzlemdışı hasarı, (b) Çok tabakalı yığma duvarın tabakalarının düzlemdışı doğrultuda ayrılması hasarı, (c) Rijit diyaframı olmayan yığma duvarın düzlemdışı göçmesi	4
Şekil 2.1 Uniform yarı-statik düzlemdışı yükleme için test düzeneği	9
Şekil 2.2 1:2 ölçekli yığma binaların sarsma tablası testleri.....	10
Şekil 2.3 Hava yastığı ile düzlemdışı yarı-statik yükleme testleri	11
Şekil 2.4 Çok tabakalı duvarın alt sistem testleri.....	12
Şekil 2.5 Tam ölçekli iki yapraklı yığma duvar numuneleri üzerinde deplasman kontrollü monotonik ve çevrimsel yükleme testleri	13
Şekil 2.6 (a) Makro, (b) Mezo ve (c) Mikro modelleme yaklaşımları.....	14
Şekil 3.1 Tarihi İsabey Camii	20
Şekil 3.2 İsabey Camii konumu	21
Şekil 3.3 İncelenen avlu duvar bölümünün geometrik ölçüleri	22
Şekil 3.4 İsabey Camii plan görünüşü	23
Şekil 3.5 Ön sayısal modelin ilk dört frekansına karşılık gelen mod şekilleri.....	24
Şekil 3.6 Batı cephesi avlu duvarı ivmeölçer yerleşim planı	24
Şekil 3.7 Kuzey cephesi avlu duvarı ivmeölçer yerleşim planı	25
Şekil 3.8 Tarihi yığma yapı örneği OMA sonuçları (a) EFDD yönteminden elde edilen tekil değerler, (b-d) EFDD yöntemine göre elde edilen ilk üç mod şekli ve frekans değerleri.....	26
Şekil 3.9 Tarihi yığma yapı örneğinde birinci test seti ile oluşturulmuş stabilizasyon diyagramı.....	27
Şekil 3.10 Avlu duvarları üzerinde endoskopik muayene çalışmaları.....	28

Şekil 3.11 Harç örneğin polarizan mikroskop görüntüleri. // N: Paralel Nikol, + N: Haç Nikol polarizan mikroskop görüntüsü.....	30
Şekil 3.12 Harç örneğin polarizan mikroskop görüntüleri. // N: Paralel Nikol, + N: Haç Nikol polarizan mikroskop görüntüsü.....	31
Şekil 3.13 Flat-jack testleri (a) duvar üzerinde yatay kesimler, (b) plaka ve deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi.....	32
Şekil 3.14 İkinci test birinci çevrime ait gerilme-birim deformasyon eğrisi	33
Şekil 3.15 İkinci test birinci çevrim sonucu elastisite modülü tayini	33
Şekil 3.16 Harç kumunun gradasyonu	35
Şekil 3.17 Deneme harçları üzerinde (a) üç noktalı eğilme ve (b) basınç testleri	36
Şekil 3.18 TS-EN 1052-3'e göre başlangıç kayma dayanımı test şemaları	37
Şekil 3.19 Başlangıç kayma dayanımı tayini test düzeni	38
Şekil 3.20 Tip-1 numunesinin (a) plan boyutları ve (b) perspektif görünümü	39
Şekil 3.21 Tip-2 numunesinin (a) plan boyutları ve (b) perspektif görünümü	40
Şekil 3.22 Laboratuvarında iki adet betonarme yastığın imalatı.....	40
Şekil 3.23 Betonarme yastığın stoper ve saplamalarla sabitlenmesi	41
Şekil 3.24 Aktivatörün yerleştirilmesi ve gerekli kontrollerin yapılması	41
Şekil 3.25 Yük dağıtma çerçevesi	42
Şekil 3.26 Koruma iskelesi (a) plan boyutları ve (b) izometrik görünüşü	43
Şekil 3.27 Sensörlerin veri toplama sistemine bağlanması ve kalibrasyonu	43
Şekil 3.28 S1 numunesi ortamsal titreşim test ortamının genel görünümü.....	45
Şekil 3.29 S1 numunesi cephe duvarı üzerine uygulanan ivmeölçer yerleşim planı .	45
Şekil 3.30 S1 numunesi kanat duvarları üzerine uygulanan ivmeölçer yerleşim planı	46
Şekil 3.31 S1 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen tekil değer grafiği	47
Şekil 3.32 S1 numunesi için deneysel ve sayısal ilk üç mod şeklinin karşılaştırılması	48
Şekil 3.33 S2 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen tekil değer grafiği	49
Şekil 3.34 S2 numunesi için deneysel ve sayısal olarak benzeştirilen iki mod şeklinin karşılaştırılması	50
Şekil 3.35 S1 numunesi deplasman ölçer yerleşim planı	52
Şekil 3.36 S1 numunesi deplasman ölçer yerleşimi.....	52

Şekil 3.37 S1 numunesi düzlemdışı yarı-statik test ortamının genel görünümü.....	53
Şekil 3.38 İpli ölçerlerin kullanımına bir örnek	53
Şekil 3.39 S1 numunesine uygulanan yüklerin yayılması	54
Şekil 3.40 (a) Mekanizma I (MI) ve (b) Mekanizma II (MII)	54
Şekil 3.41 S1 numunesi cephe duvarı orta noktasının (S1d12 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği	55
Şekil 3.42 S1 numunesi cephe duvarı tepe orta noktasının (S1d2 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği ve hasar limitlerinin tayini	55
Şekil 3.43 S1 numunesinin (a) 50 mm, (b) 80 mm ve (c) 110 mm tepe ötelenmesi anında şekil değiştirmiş hali	55
Şekil 3.44 S2 numunesi düzlemdışı yarı-statik test ortamının genel görünümü.....	56
Şekil 3.45 S2 numunesi deplasman ölçer yerleşim planı	57
Şekil 3.46 S2 numunesi cephe duvarı orta noktasının (S2d12 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği	57
Şekil 3.47 S2 numunesi cephe duvarı tepe orta noktasının (S2d6 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği ve hasar limitlerinin tayini	58
Şekil 3.48 S1 ve S2 numuneleri için tepe yükü-tepe deplasmanı zarf eğrileri ve esas alınan mekanizma durumları kıyaslaması	58
Şekil 4.1 Yığma yapı örneği sayısal modelinin ilk moduna ait yakınsaklık grafiği ..	60
Şekil 4.2 Sınır koşulu gurupları (a) SG-1, (b) SG-2, (c) SG-3 ve (d) SG-4.....	61
Şekil 4.3 Yığma yapı örneğinin ön sayısal modeline ait mod şekilleri (1., 5. ve 14. mod).....	62
Şekil 4.4 S1 numunesinin (a) sonlu elemanlar modeli ve (b) sonlu eleman ağı	67
Şekil 4.5 S1 numunesinin makro ölçekli sayısal modelinin analizi sonucu elde edilen yer değiştirme profili	67
Şekil 4.6 S1 numunesi üzerinde yarı-statik yüklemelerin, seçilen iki ölçüm noktası için deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri ile kıyaslanması	68
Şekil 4.7 S2 numunesi üzerinde yarı-statik yüklemelerin, seçilen iki ölçüm noktası için deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri ile kıyaslanması	68
Şekil 4.8 (a) S1 numunesi mezo modeli ve (b) basitleştirilmiş blok-mezo modeli ...	70

Şekil 4.9 S1 numunesi mezo sonlu elemanlar modeli ve deneysel ötelenmelerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.10 Arayüz modeline ait (a) <i>Traction-seperation</i> ve (b) sürtünme davranışı .	72
Şekil 4.11 S2d6 noktasının kuvvet-deplasman grafiğinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.12 S2 numunesi cephe duvarı dış yüz hasar profilinin (a) deneysel ve (b) sayısal olarak karşılaştırılması	74
Şekil 4.13 S2 numunesi cephe duvarı ve kanat duvarı kesişim bölgesi iç yüz hasar profilinin (a) sayısal ve (b,c) deneysel olarak karşılaştırılması.....	74
Şekil 4.14 Dikdörtgen plak şeklinde duvar modelinin merkezi açılma mekanizma durumu.....	76
Şekil 4.15 (a) Temeli dönen yığma duvarın hareketi ve (b) hareketin kinematik tanımı.....	76
Şekil 4.16 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları	77
Şekil 4.17 Yapı örneğinin geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu	77
Şekil 4.18 Sayısal model üzerinde (a) sınır şartları ve yükler ve (b) sonlu eleman ağı	79
Şekil 4.19 CDP malzeme modeli çekme ve basınç davranışı	81
Şekil 4.20 CDP malzeme modeli tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme) davranışı (varsayılan rijitlik artışı katsayıları ile $w_t=0$ ve $w_c=1$).....	82
Şekil 4.21 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan deplasman renklendirmesi	82
Şekil 4.22 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan gerilme renklendirmesi (MPa).	83
Şekil 4.23 Statik itme eğrisi ve sınır durumları.....	84
Şekil 4.24 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan gerilme renklendirmesi (MPa) .	84
Şekil 4.25 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan deplasman renklendirmesi.....	84
Şekil 4.26 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan Kuvvet (kN)-Tepe ötelenmesi (%) eğrisi	85
Şekil 4.27 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme çatlakları (a) çekme çatlaklarının başlangıcı, (b) gelişmesi, (c) son durumu.....	85
Şekil 4.28 Analizlerde kullanılan deprem kayıtları.....	86
Şekil 4.29 Farklı deprem kayıtları için zaman-tepe deplasmanı eğrileri	87
Şekil 4.30 Farklı deprem kayıtları için çatlak gelişimleri (a) çekme çatlaklarının başlangıcı; (b) gelişmesi; (c) son durumu.....	87

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Deneme harç karışımlarına ait içerik oranları ve taze harç kıvamları	36
Tablo 3.2 Deneme harçlara ait basınç ve eğilmede çekme dayanımları	37
Tablo 3.3 Başlangıç kayma dayanımı (f_{voi}) ve içsel sürtünme açısının karakteristik değerleri (α_k)	38
Tablo 3.4 S1 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen frekans, sönüm ve karmaşıklık değerleri	47
Tablo 3.5 S2 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen frekans, sönüm ve karmaşıklık değerleri	49
Tablo 4.1 Yığma yapı örneği sayısal ön modelin ve deneysel modların karşılaştırılması.....	59
Tablo 4.2 Yığma yapı örneğinin kalibre edilmiş sayısal modelinin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir).....	60
Tablo 4.3 Yığma yapı örneğinin ön ve güncel sayısal modeline ait model parametreleri.....	60
Tablo 4.4 S1 numunesi sayısal ön modelinin ve deney modlarının karşılaştırılması	61
Tablo 4.5 S1 numunesine ait kalibre edilmiş sayısal modelin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)	62
Tablo 4.6 S2 numunesine ait kalibre edilmiş sayısal modelin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)	63
Tablo 4.7 Harçlı birleşim için tanımlanan arayüz parametreleri.....	69
Tablo 4.8 CDP malzeme model parametreleri.....	78

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kültürel mirasın bir parçası olan ve bulundukları bölgelerin simgesi haline gelen tarihi yığma yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması önemlidir. Günümüzde sıklıkla uygulanan betonarme ve çelik yapı tasarımına ait hesap yöntemleri yığma yapılarda doğrudan uygulanamamaktadır. Bu yapıların taşıyıcı sistem özellikleri ve malzeme özellikleri oldukça karmaşıktır ve aynı yapı içerisinde dahi değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle her bir tarihi yığma yapı kendi içerisinde saha ve laboratuvar destekli testler ile değerlendirilmeli ve uygulanacak sayısal deprem hesap yöntemine karar verilmelidir.

Yakın dönemde meydana gelen depremler sonrası yapılan incelemeler, tarihi yığma duvarların düzlemdışı doğrultudaki zafiyetini ortaya koymuştur (Costa, 2012; Augenti ve Parisi, 2010). Taşıyıcı sistemi oluşturan elamanların zayıf çekme ve kesme mukavemetleri, yığma yapıların kötü deprem davranışının başlıca sebeplerindendir. Ayrıca rijit diyafram etkisi oluşturacak döşemelerin olmayışı ve duvarları düzlemdışı doğrultuda destekleyecek yapısal bağlantı elemanlarının eksikliği, duvarların düzlemiçi dayanıma ulaşmadan düzlemdışı doğrultuda göçmesine neden olmaktadır. Tarihi yığma yapıların düzlemdışı doğrultudaki zafiyeti çok iyi bilinen bir sorun olmasına rağmen yapıyı oluşturan elemanların mekanik özellikleri ve malzeme parametreleri üzerine literatürde var olan bilgi yetersizdir. Bu nedenle gerçekleştirilecek saha ve laboratuvar testleri ile oluşturulacak sayısal modeller üzerinde düzlemdışı hasar mekanizmaları ve hasara öncülük eden dayanım limitleri araştırılmalıdır.

1.1 Tarihi yığma yapı duvarlarının düzlemdışı deprem davranışı

Tarihi yığma yapıları oluşturan duvarların yapısal davranışı, bu yapıları oluşturan malzeme özellikleri ve zaman içerisinde maruz kaldıkları bozulmalar nedeniyle oldukça karmaşıktır. Özellikle rijit diyafram etkisi oluşturacak döşemeleri bulunmayan taşıyıcı yığma yapı duvarlarında düzlemdışı doğrultuda farklı lokal

davranışlar meydana gelmektedir. Yakın dönemde meydana gelen depremler sonrası yürütülen saha gözlem çalışmaları yığma yapıların düzlemdışı doğrultudaki zafiyetini ortaya koymuştur.



Şekil 1.1 1998 Azores depremi sonrası oluşan düzlemdışı hasar (Costa, 2012)

Yığma duvarlarda düzlemdışı göçme genellikle yapı elemanlarının dayanım limitlerinden ziyade stabilite kaybından dolayı gerçekleşmektedir. 1998 yılında Portekiz’de meydana gelen Azores depremi sonrası ahşap çatı döşemesine sahip yapıda oluşan tipik düzlemdışı hasar Şekil 1.1’de verilmiştir (Costa, 2012). Rijit diyafram etkisinin olmayışı ve döşeme seviyesindeki bağlantı elemanlarının yetersizliği, düzlemdışı devrilmeye öncülük eden başlıca nedenlerdendir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.2 (a) Cephenin tamamının göçtüğü düzlemdışı hasar, (b) Tek yönlü eğilme davranışı, (c) Çift yönlü eğilme davranışı (Dizhur ve diğer., 2011)

2011 yılında Yeni Zelanda’da meydana gelen *Christchurch* depremi sonrası yapı gözlemlerinde en sık gözlemlenen hasar tipi düzlemdışı hasar olmuştur. Birçok iki katlı yığma yapıda cephenin tamamının göçtüğü tespit edilmiştir (Şekil 1.2a).

Gözlemlenen başlıca düzlemdışı hasar tipleri: uç kısımlarında destek elemanı olmayan ve uzunluğu fazla olan duvarlarda oluşan tek yönlü eğilme (Şekil 1.2b) ve en az bir düşey kenarında destek olan duvarlarda oluşan çift yönlü eğilme davranışı (Şekil 1.2c) olmuştur (Dizhur ve diğer., 2011).



(a)



(b)

Şekil 1.3 (a) Çatı ile bağlantısı zayıf olan duvarın düzlemdışı hasarı, (b) Çok tabakalı yığma duvarın düzlemdışı hasarı (Ismail, Griffith ve Ingham, 2011)

2010 *Darfield* depremi sonucu Yeni Zelanda'nın Christchurch şehrinde birçok tarihi yığma yapı düzlemdışı doğrultuda hasar almıştır. Ismail, Griffith ve Ingham (2011), bu deprem sonrası bölgedeki yığma yapılar üzerinde yapı karakteristiklerini ve hasar istatistiklerini incelemişlerdir. Düzlemdışı doğrultuda oluşan ve çatı veya döşeme diyaframları ile yığma duvarların ayrışması hasar tipi, en sık gözlemlenen hasar tipi olmuştur (Şekil 1.3).



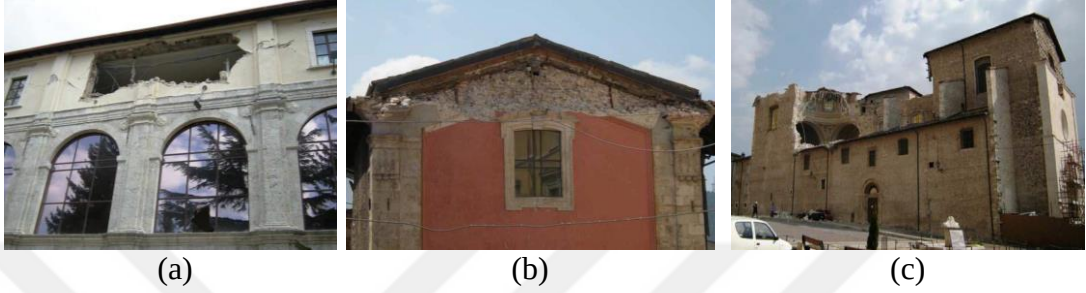
(a)



(b)

Şekil 1.4 (a) Birbirini dik kesen duvarların ayrılması, (b) Çok tabakalı yığma duvarın düzlemdışı hasarı (Sayın, Yön, Calayır ve Karaton, 2011)

2011 Elazığ-Maden depremi sonrası bölgedeki yığma yapılar üzerinde incelemeler yapılmıştır (Sayın ve diğer., 2011). Zayıf malzeme özellikleri, birleşim detaylarındaki zayıf işçilik (Şekil 1.4a) ve çok tabakalı duvarlarda tabakalar arası bağlantı elemanlarının olmayışı nedeniyle düzlemdışı doğrultuda hasarlar (Şekil 1.4b) tespit edilmiştir.



Şekil 1.5 (a) Yığma duvarın düzlemdışı hasarı, (b) Çok tabakalı yığma duvarın tabakalarının düzlemdışı doğrultuda ayrılması hasarı, (c) Rijit diyaframı olmayan yığma duvarın düzlemdışı göçmesi (Augenti ve Parisi, 2010)

2009 yılında İtalya'nın L'Aquila bölgesinde meydana gelen ve 305 can kaybının yaşandığı şiddetli deprem sonucu birçok tarihi yığma duvarda önemli seviyelerde düzlemdışı hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 1.5). Deprem sonrası yapılan saha gözlemlerinden çok sayıda göçme karakteristiği ortaya konmuştur (Augenti ve Parisi, 2010).

1.2 Araştırmanın amacı

Tarihi yığma yapılar, kültürel mirasın vazgeçilmez bir unsurudur ve bulundukları ülkelerin ekonomisine önemli katkıda bulunurlar. Bu nedenle bu yapıların korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması önemlidir. Bu anlamda bu yapılar üzerinde uygulanacak koruma yöntemleri ve öncelikli olarak ele alınması gereken yapıların belirlenmesi gerekmektedir. Tez kapsamında tarihi yığma duvarların düzlemdışı doğrultudaki deprem davranışının deneysel ve sayısal yöntemler ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmalarda özellikle rijit diyaframı olmayan ve düzlemdışı doğrultuda desteklenmemiş uzunluğu fazla olan tarihi çok tabakalı kesme taş duvarların düzlemdışı doğrultudaki deprem hasar limitleri araştırılmıştır. Seçilen

tarihi yığma yapı örneği üzerinde gerçekleştirilen saha deneyleri ve tarihi yığma duvarları temsil edecek büyük ölçekli laboratuvar testleri ile düzlemdışı doğrultudaki hasara öncülük edecek dayanım limitlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Oluşturulacak sonlu elemanlar modelleri üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilerek tarihi yığma duvarların düzlemdışı davranışının temsil edilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Tez düzeni

Sunulan tez, bir önceki alt başlıkta belirtilen amaçlar doğrultusunda seçilen örnek bir tarihi yığma yapı duvarının deneysel ve sayısal çalışmalarını da içeren beş ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde araştırmanın amacı, problem ve araştırılan yapısal davranış açıkça ifade edilmiştir. İkinci bölümde tarihi yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen saha ve laboratuvar deneyleri ile bu duvarların sayısal analizine ilişkin literatürde var olan çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, bu çalışma kapsamında incelenen tarihi yığma yapı örneği tanıtılmış ve gerçekleştirilen saha ve laboratuvar deneyleri ilgili alt başlıklar ile verilmiştir. Dördüncü bölümde, incelenen tarihi yapı örneğinin duvar bölümlerinin ve laboratuvar numunelerinin dinamik karakterini belirlemek üzere gerçekleştirilen sayısal model güncelleme çalışmaları, düzlemdışı yarı-statik laboratuvar testlerinin mezo ölçekli sonlu elemanlar modeli ile simülasyonu ve yapı örneğinin sismik değerlendirmesine yönelik gerçekleştirilen kinematik analiz yaklaşımı, doğrusal olmayan statik itme analizi ve dinamik analizler sunulmuştur. Son bölümde ise deneysel ve sayısal çalışmalara ilişkin kısa sonuçlara ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen saha testleri

Tarihi yığma yapılar üzerinde gerçekleştirilen yapısal saha testleri, yapıların mevcut durumunu değerlendirme, öncelikli olarak güçlendirilmesi gereken yapıları tespit etme ve güçlendirilme yöntemlerine karar verme amaçlı uygulanmaktadır. Genellikle koruma altında olan bu yapılarda gerçekleştirilecek testler, yapının tarihi dokusuna zarar vermeme adına tahribatsız ve az tahribatlı testler olmaktadır. Test yöntemlerine karar vermeden önce incelenen yapının tarihi özellikleri, mimari özellikleri, üzerinde gerçekleştirilen geçmiş onarım çalışmaları ve atlatmış olduğu depremler ile ilgili kaynak araştırması yapılmaktadır. Ayrıca yapı üzerinde gerçekleştirilecek gözlemsel çalışmalar ile hasar ve çatlak konumları, taşıyıcı sistem elemanlarının mevcut durumu ve bağlantı elemanlarındaki bozulmalar belirlenmektedir.

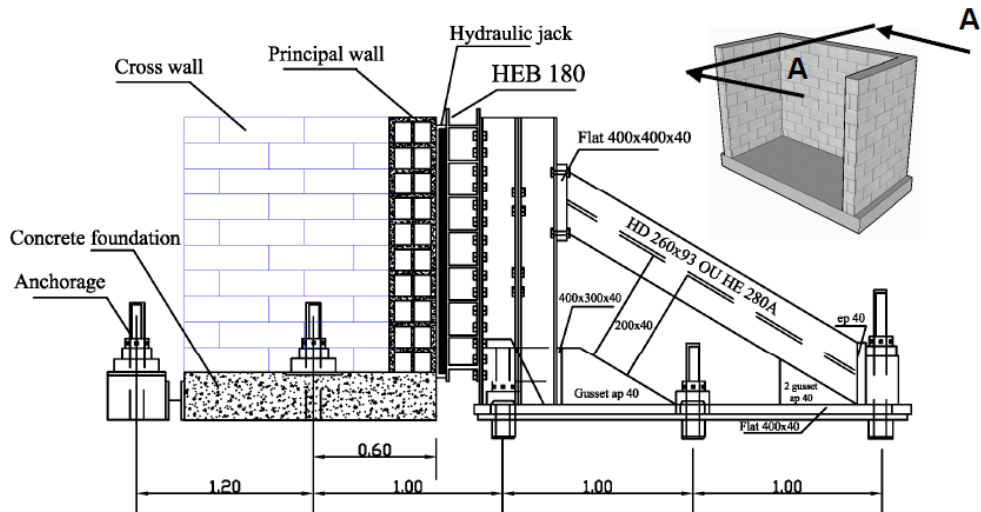
Tarihi yığma yapıların mevcut durumunun sismik değerlendirilmesi üzerine yürütülen saha testleri, malzeme testleri ve yapısal testler olarak uygulanmaktadır. Malzeme testleri yapı üzerinden malzeme numuneleri alma ve ASTM C1197-14a (2004) standardında belirtilen Flat-jack testleri olarak gerçekleştirilmektedir. Yapısal test olarak günümüzde, yapı sağlığı izleme yöntemlerinden olan operasyonel modal analizi yöntemi (OMA), tarihi yığma yapıların dinamik karakterini belirlemede popüler bir yöntem haline gelmiştir (Atamturktur ve Laman, 2012). Yapı üzerine yerleştirilen ivme ölçerler yardımıyla gerçekleştirilen ortamsal titreşim testlerine (AVT) ait ivme verisi, OMA yöntemleri ile işlenerek yapının dinamik karakterleri (mod şekilleri, frekans değerleri ve sönüm oranı) belirlenmektedir. Yapının serbest titreşimine ait modal parametrelerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için mümkün olduğunca fazla ivmeölçer kullanılmalıdır. Kısıtlı sayıda ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilen testlerde, ivmeölçer sensörlerinin yerleşim planı önem kazanmaktadır (Mısıır ve diğer., 2017). Bu amaçla ön sayısal modeller oluşturularak yapının mod şekilleri belirlenmektedir. OMA sonuçları ile elde edilen

dinamik parametreler ile yapının sayısal modeli kıyaslanarak sayısal model kalibrasyon çalışması yapılmaktadır (Costa ve diğer., 2016). Böylece yapının doğrusal olmayan davranışının tahmin edileceği ve yapısal analizinde kullanılabilecek tutarlı bir sayısal model elde edilmektedir. Model kalibrasyon çalışması birçok araştırmacı tarafından uzun yıllardır ele alınan bir konudur. Atamturktur ve Laman (2012), bu konuda detaylı bir literatür incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Bayraktar, Altunışık, Birinci, Sevim ve Türker (2009), Osmanlı döneminden kalma yığma bir köprü üzerinde ortamsal titreşim testleri gerçekleştirip, model kalibrasyon çalışmaları yürütmüşlerdir. Bu çalışmada model kalibrasyonu, manuel kalibrasyon yöntemi ile sayısal modele ait sınır koşulları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Ramos ve diğer. (2010), iki tarihi yığma yapı üzerinde, erken hasar tespiti amaçlı modal ve yapısal değerlendirmeler yapmışlardır. İncelenen yapıların yüksek karmaşıklığından dolayı manuel kalibrasyon yöntemi tercih edilmiş ve kalibrasyon parametreleri olarak elastisite modülü ve sınır koşulları seçilmiştir. Bartoli, Betti ve Giordano (2013), tarihi yığma bir kule üzerinde statik ve dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Flat-jack testleri ve yapı üzerinden alınan örnek numuneler değerlendirilerek yapıya ait malzeme parametreleri elde edilmiştir. Tespit edilemeyen malzeme özellikleri (duvar tabakaları arasındaki dolgu malzemesine ait elastisite modülü ve sınır koşulları) model kalibrasyon parametresi olarak seçilmiştir. Russo (2013), tarihi yığma duvarın dinamik düzlemsiz davranışını uzun süreli izleme (*long-term monitoring*) yöntemi ile araştırmıştır. Döşeme ve çatı bağlantılarının olduğu bölümlerdeki sınır koşulları kalibrasyon parametresi olarak ele alınmıştır. Costa ve diğer. (2015), iki tarihi ve bir de günümüzde inşa edilmiş yığma taş köprü üzerinde çalışmışlardır. Yapıların malzeme özellikleri, tarihi araştırma, saha ve laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Yapılara ait sayısal modellerin kalibrasyon işlemi elastik malzeme parametreleri üzerinde manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Gentile, Saisi ve Cabboi (2015), tarihi yığma bir kule üzerinde yürütülen geniş kapsamlı yapısal değerlendirme programında, yapıya ait dinamik karakterleri ortamsal titreşim testleri ile belirlemişlerdir. Başlangıç sayısal model parametreleri (elastisite modülü ve sınır şartları) manuel kalibrasyon yöntemi ile kalibre edilmiştir. Costa ve diğer. (2016), yığma bir kemer köprü üstünde model kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yapının dinamik karakteri ortamsal

titreşim testleri ile tespit edilmiştir. Yapının başlangıç sonlu elemanlar modeline ait malzeme parametreleri saha testlerinden (Flat-jack, Menard basınçölçer ve zemine penetre radar testleri) ve laboratuvar testlerinden elde edilen veriler ile seçilmiş ve *genetik algoritma* kullanılarak sayısal modeller kalibre edilmiştir. Torres, Almazan, Sandoval ve Boroschek (2017), yaptıkları çalışmada tarihi bir katedral yapının sonlu elemanlar modelinin modal kalibrasyonunu OMA yöntemleri ile gerçekleştirmişlerdir. Yapının malzeme özellikleri, bölgesel değişimler ihmal edilerek temsili olarak belirlenmiştir. Böylece yapının tamamını temsil edecek üç farklı malzeme özelliği tanımlanmıştır. Başlangıç malzeme parametrelerini belirlemek için ön kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Altunışık, Okur, Genç, Günaydın ve Adanur (2018), tarihi bir yığma yapı üzerinde sonlu elemanlar modeli kalibrasyon çalışması yürütmüşlerdir. Yapı, çelik kolonlar, betonarme döşemeler, yığma duvarlar ve tonoz olmak üzere dört ana bileşene ayrılarak modellenmiştir. Bu bileşenlere ait karakteristikler belirlenirken literatürden yararlanılmıştır. Modelin tabanı ankastre mesnet olarak seçilip kalibrasyon şemasından çıkarılmıştır. Manuel kalibrasyon ve optimizasyon algoritması ile model kalibre işlemi gerçekleştirilmiştir. Ercan (2018), yığma ve ahşap birimlerden oluşan güçlendirilmiş bir tarihi yapının yapısal davranışını incelemiştir. Sayısal modele ait elastisite modülü ve sınır koşulları, güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için ayrı ayrı kalibre edilmiştir. Özçelik ve diğer. (2018), sunulan tez kapsamında da ele alınan tarihi İsbey Camii avlu duvarları üzerinde ortamsal titreşim testleri gerçekleştirmiştir. Makro ölçekli sonlu elemanlar modelinin model güncelleme çalışmalarını, model güncelleme yazılımı kullanarak sonlu elemanlar bazında ve farklı güncelleme parametreleri ile uygulamıştır. Güncelleme sonucunda elde edilen sonlu elemanlar modelinin, yapının dinamik karakterini daha iyi bir şekilde temsil ettiği belirtilmiştir. Ancak model güncelleme işleminin, farklı başlangıç parametreleri ve bu parametrelerin güncelleme sınırlarının farklı seçilmesi durumlarına bağımlı olduğu ve bu nedenle model güncelleme işleminin otomatikleştirilemeyeceği ve her zaman bir uzman denetiminde gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

2.2 Yığma duvarlar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar testleri

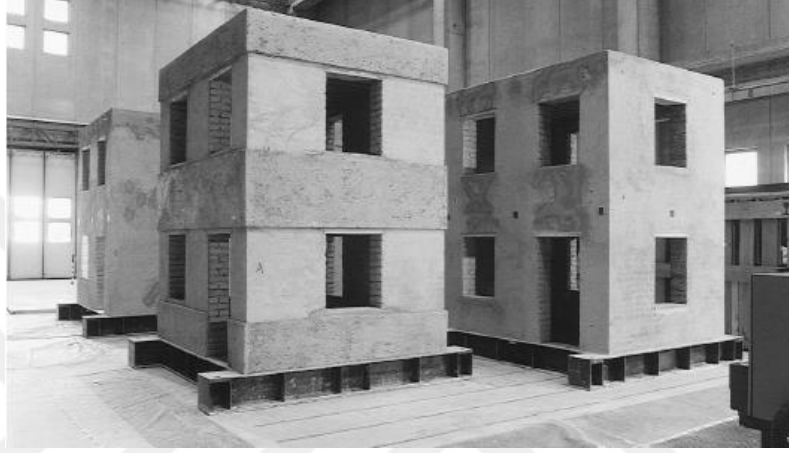
Yığma yapıların laboratuvar testleri ile ilgili ilk çalışmalar 90'lı yılların başlarında yayınlanmakla birlikte, 2005-2015 yılları arasında yükleme koşulları ve numune türü anlamında farklılaşan çok sayıda araştırmanın sonucu yayınlanmıştır. Stabilitate kaybı ile sonuçlanan düzlemdışı duvar davranışını incelemek için yapılan testlerde genellikle iki farklı yükleme sistemi kullanılmıştır. İlk gruptaki testlerde, hava yastığı (Derakhshan, Griffith ve Ingham, 2013; Dolatshahi ve Aref, 2016) veya aktivatör ile (Calvi ve Bolognini, 2001; Popehn, Schultz, Lu, Stolarski ve Ojard, 2008), düzlemdışı doğrultudaki atalet kuvvetlerini temsil edecek şekilde, deplasman kontrollü monotonik veya çevrimsel yüklemeler uygulanmış (Şekil 2.1), ikinci gruptaki testlerde ise atalet kuvvetlerini oluşturmak üzere sarsma tablaları kullanılmıştır (Magenes, Penna, Senaldi, Rota ve Galasco, 2014; Giaretton, Dizhur ve Ingham, 2016; Graziotti, Tomassetti, Penna ve Magenes, 2016).



Şekil 2.1 Uniform yarı-statik düzlemdışı yükleme için test düzeneği (Bui, Limam, David, Ferrier ve Brun, 2010)

Benedetti, Carydis ve Pezzoli (1998), yığma yapılar üzerine uygulanabilecek farklı güçlendirme yöntemlerini araştırdıkları çalışmalarında 1:2 ölçekli iki katlı 24 adet yığma bina numunesi üzerinde sarsma tablası testleri gerçekleştirmiş (Şekil 2.2) ve taş duvar içerisindeki yatay bağların, yapının dayanımına önemli katkıları olduğunu bulgulamıştır. Oliveria, Lourenço, Garbin, Valluzzi ve Modena (2006),

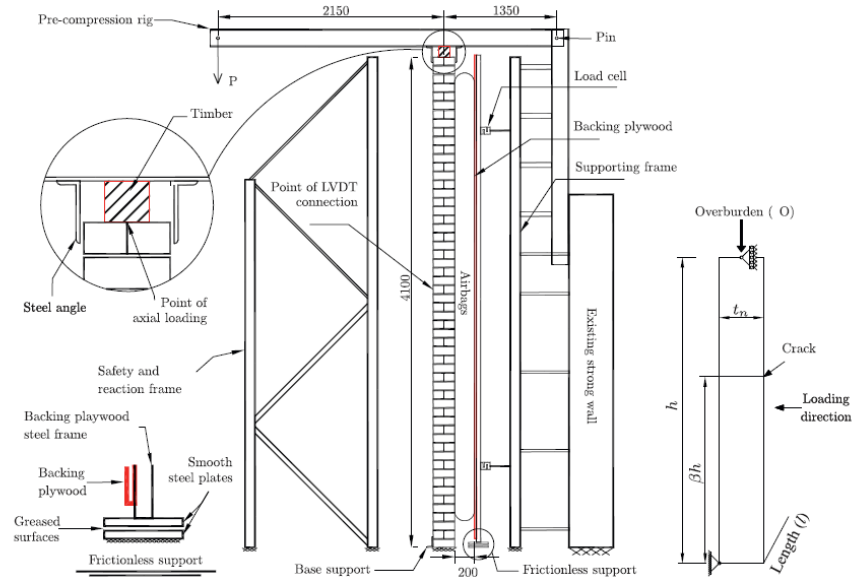
yığma duvar biriminin mekanik özelliklerini ve çeşitli güçlendirme yöntemlerini incelemek amacıyla üç tabakalı granit taşlar üzerinde yarı-statik basınç testleri gerçekleştirmiştir. Kesme taşlar arasında bulunan moloz dolgunun ve tabakalar arasındaki ara yüzün zayıflığına vurgu yapılmış ve tabakaları düzlemdışı doğrultuda bağlarla (GFRP bağlantılar) güçlendirmenin basınç dayanımını %71 oranında arttırdığı bulgulanmıştır.



Şekil 2.2 1:2 ölçekli yığma binaların sarsma tablası testleri (Benedetti, Carydis ve Pezzoli, 1998)

Tarihi yığma yapı duvarlarının düzlemdışı davranışını temsil edecek olan numuneler, laboratuvarı numune üretiminin zorlukları, münferit yapıların geometrik özelliklerinin karmaşıklığı ve boyutlarının büyüklüğü nedeniyle genellikle basitleştirilmiştir. Çoğunlukla küçük ölçekli numuneler kullanılmaktadır fakat duvarı oluşturan taş ve harç fazlarının yük altındaki tepkisi farklı oranda değişeceğinden dolayı ölçek küçültüldükçe benzetim yasalarının gereklerini yerine getirmek de giderek zorlaşmaktadır. Örneğin; tuğla birimleri küçültülmekte fakat harç kalınlıklarının bir noktadan sonra aynı kalması gerekmektedir. Çünkü tam ölçekli duvarlarda beklenen hasar tiplerini elde etmek için, küçük ölçekli duvar numunelerindeki tuğla/taş birimlerinin ve harçların farklı oranlarda ölçeklendirilmesi gerekir (Petry ve Beyer, 2012). Test ortamının hazırlanmasındaki zorluklar, yapım tekniği ve malzeme farklılıkları nedeniyle tam ölçekli yığma yapı numunelerine ender rastlanmaktadır. Mevcut tam ölçekli testlerde ise yapının tamamını değil bir bölümünü (alt sistem) temsil eden numuneler kullanılmıştır (Pinto ve diğer., 1998; Ferreira, Costa, Arede, Gomes ve Costa, 2015).

Test altyapısı hazırlanırken, hedeflenen davranışı elde edebilmek için numune üzerinde oluşturulan sınır şartları ve uygulanan yükleme tipi büyük önem taşır. Yığma yapıyı temsil etmesi hedeflenen numunelerde yaygın olarak konsol davranışı veya iki ucu sabit mesnetli kiriş davranışı elde etmek için iki farklı tür sınır koşul kullanılmıştır (Derakhshan ve diğer., 2013; Ferreira ve diğer., 2015). Derakhshan ve diğer. (2013), 6 adet tam ölçekli iki ve üç yapraklı yığma duvar numuneleri üzerine hava yastığı ile düzlemdışı yarı-statik yüklemeler uygulamıştır (Şekil 2.3). Numuneler tabandan ve tepeden dönmesi engellenmeyecek şekilde mesnetlenmiştir. Mesnet koşulları ile erken ara yüz hasarı ilişkilendirilmiştir. Birçok durumda doğrusal olmayan elastik davranışa yakın duvar davranışı elde edilmiştir.



Şekil 2.3 Hava yastığı ile düzlemdışı yarı-statik yükleme testleri (Derakhshan ve diğer., 2013)

Demir ve İlki (2014), çok tabakalı tarihi yığma duvarların malzeme karakterizasyonu amaçlı 1:3 ölçekli yığma birimler üzerinde basınç testleri gerçekleştirmiştir. Magenes ve diğer. (2014), iki tabakalı 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 düzlemdışı hasarların da engellendiği bulgulanmıştır. Karatzetzou ve diğer. (2014), üç tabakalı taş yığma duvarlara sahip yığma binanın 1:2 ölçekli numunesi üzerinde sarsma tablası testleri

gerçekleştirmiş ve hakim hasar modunun kesme kaynaklı olmasının, yapı duvarlarının görünüm oranının görece az olmasıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Ferreira ve diğer. (2015), iki tabakalı taş yığma duvar birimlerinin mekanik özelliklerini iki farklı yükleme türü ile belirlemiştir. İlk gruptaki testlerde, hava yastığı kullanılarak yarı-statik düzgün yayılı yüzeysel bir yük uygulanmıştır. Diğer gruptaki testlerde ise deplasman kontrollü hidrolik aktivatör ile çizgisel yatay yük uygulanmıştır. Kullanılan iki tür yükleme tipi de yığma duvarın düzlemdışı davranışını uygun şekilde yansıtabildiği gösterilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Çok tabakalı duvarın alt sistem testleri (Ferreira ve diğer., 2015)

Maddaloni, Balsamo, Ludovico ve Prota (2016), tam ölçekli iki yapraklı yığma duvar numuneleri üzerinde deplasman kontrollü monotonik ve çevrimsel yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Kinematik hesabı esas alan, duvarlar arası bağlantının olmadığını kabul eden basit devrilme mekanizması (MI) ve ana duvarı dik kesen duvarın topuktan belirli bir açđı (45 derece) ile ana duvar ile beraber devrildiğini kabul eden devrilme mekanizması (MII) için değerlendirmeler verilmiştir. Planda birbirine dik olan duvar birleşimlerinin güçlendirilmesi ile numunelerin düzlemdışı hasarının önemli ölçüde azaltılabildiği bulgulanmıştır (Şekil 2.5).



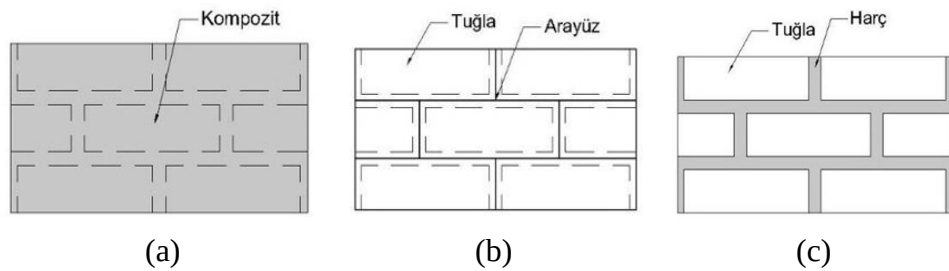
Şekil 2.5 Tam ölçekli iki yapraklı yığma duvar numuneleri üzerinde deplasman kontrollü monotonik ve çevrimsel yükleme testleri (Maddaloni ve diğer., 2016)

2.3 Yığma duvarların sayısal modellenmesi

Yığma yapım tekniği, bilinen en eski yapım tekniklerinden olmasına karşın bu yapıların yapısal analizleri ile ilgili çalışmalar ancak 90'lı yılların başlarında artış göstermeye başlamıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve yazılımlar ile birlikte, yığma yapıların sismik kapasitesinin değerlendirilebildiği nispeten gerçeğe yakın sayısal modeller oluşturulabilir hale gelmiştir. Literatürde var olan sayısal modelleme çalışmalarında Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) olmak üzere başlıca iki farklı modelleme yöntemi uygulanmaktadır (Giordano, Mele ve Luca, 2002; Ferreira, Costa ve Costa, 2015). Oluşturulan sayısal modeller üzerinde deprem yüklerini simüle etme amaçlı uygulanacak analiz yöntemlerinin başlıcaları basitleştirilmiş eşdeğer statik analiz, modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizdir (Peña, Lourenço, Mendes ve Olivera, 2010; Valente ve Milani, 2019). Eşdeğer statik hesap yönteminde deprem yükleri, yapının dinamik tepkisinden kaynaklı yatay yüklerin yapı uzunluğu boyunca dağıtılması ile uygulanır. Modal analiz yöntemi ile sismik hesap ise çoğunlukla sonlu elemanlar programından elde edilen özvektörler ve özdeğerler kullanılarak uygulanır. Bu analiz yönteminde yapıya uygulanacak yükler, özvektörlerin şekli ve yapının dinamik hareketine katkısı göz önüne alınarak belirlenir ve yapıya yüksekliği boyunca yatay olarak uygulanır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde yapının tepkisi, tabanına tanımlanan ivme verisi ile elde edilmektedir. Genellikle

incelenen yapıya ve yapının bulunduğu bölgenin sismik karakteristiklerine göre ölçeklendirilmiş ivme kayıtları kullanıldığından, bu analiz yöntemi önceki yöntemlere göre yapının davranışının daha detaylı incelenebildiği bir yöntemdir. Fakat geçmiş yıllarda meydana gelen depremler sonucu elde edilen uzun ivme kayıtları kullanıldığından oldukça zaman alıcı bir hesap yöntemidir.

Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modellenmesinde başlıca iki unsur modelleme aşamasını güçleştirmektedir. Bunlardan ilki, yığma yapıların taşıyıcı sistem tipolojisi nedeniyle basitleştirilmiş statik şemaların oluşturulamaması, diğeri ise önceden tahmin edilmesi güç olan yüksek doğrusal olmayan malzeme davranışdır (Giordano, Mele ve Luca, 2002). Yığma duvar birimi, harç malzeme ile birbirine bağlı yığma elemanlardan oluşmaktadır. Yığma yapıların global davranışını temsil eden tek bir sürekli ortam elemanı ile oluşturulmuş makro sonlu elemanlar modellerinin (Şekil 2.6a) yanı sıra bu iki farklı malzeme ve bağlantı bölgelerinin tanımlandığı detaylı sonlu elemanlar modelleri de oluşturulabilmektedir (Lourenço, 1996). İki farklı malzeme kullanılarak oluşturulan mikro modellerde, harç ve tuğla elemanlar homojen elemanlar ile modellenirken, harç ve tuğla birim arası ara yüz tanımlanmaktadır (Şekil 2.6c). Hem modelleme aşamasının karmaşıklığı hem de analiz süresinin uzunluğu nedeniyle bu modelleme yöntemi yapının tamamının modellendiği analizlerde tercih edilmemektedir. Basitleştirilmiş mikro model yaklaşımında (mezo modelleme yaklaşımı) tuğla birimlerin boyutları harç bölgesinin ortasına kadar uzatılmakta ve harç bölgesini temsil edecek ara yüzler ile birleştirilmektedir (Şekil 2.6b). Bu modellemede tuğla birimler elastik ortam elemanları ile modellenirken, doğrusal olmayan parametreler ara yüzlerde tanımlanmaktadır.



Şekil 2.6 (a) Makro, (b) Mezo ve (c) Mikro modelleme yaklaşımları (Lourenço, 1996)

Ramvalho, Taliercio, Anzani, Binda ve Papa (2005), tarihi çok tabakalı taş yığma duvarın sayısal analizlerini ABAQUS sonlu elemanlar programı ile makro ölçekli gerçekleştirmiştir. Duvarda oluşacak çatlak dağılımının simüle edilebilmesi için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde hasar tensörleri tanımlanmıştır. Sayısal modellerden elde edilen sonuçlar laboratuvar test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Milani, Lourenço ve Tralli (2006), düzlemdışı yükler altında olan yığma duvarın sayısal analizlerine yönelik homojenleştirme yaklaşımı önermiştir. Milani ve Lourenço (2007), yığma duvarların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi üzerinde detaylı bir literatür taraması yayınlamıştır. Mallardo, Malvezzi, E. Milani ve G. Milani (2008), tarihi bir yığma yapının sismik analizlerini iki ve üç boyutlu doğrusal olmayan modeller ile gerçekleştirmiştir. Eşdeğer çerçeve yaklaşımı, elastoplastik malzemeli sonlu elemanlar modeli ve kinematik yaklaşım ile yapı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak yapının düzlemiçi doğrultuda dayanım gösterirken düzlemdışı doğrultuda kısmi göçmeler olduğu bulgulanmıştır. Popehn, Schultz, Lu, Stolarski ve Ojard (2008), düzlemdışı yüklerin narin yığma duvarların stabilitesindeki etkisini incelemiştir. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar modeli ve elastik burkulma modeli olmak üzere iki farklı matematiksel model karşılaştırılmıştır. Casarin ve Modena (2008), İtalya’da bulunan tarihi yığma katedral yapının sismik analizlerini kinematik yaklaşım ve doğrusal olmayan makro sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirmiştir. Kinematik hesaplar ile yapının olası göçme modları üzerinde değerlendirme yapılarak global sonlu elemanlar modeli ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar modeline ait göçme moduna öncülük eden parametrenin doğrusal olmayan malzeme model parametreleri olduğu bulgulanmıştır. Senthivel ve Lourenço (2009), yığma taş kayma duvarları üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar testlerine ait sonuçların simülasyonunu, iki boyutlu mikro ölçekli sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar, oluşan hasar tipi ve yük-deplasman eğrileri değerlendirilerek kıyaslanmıştır. Milani ve Lourenço (2010), düzlemdışı yüklenen yığma duvarın sayısal analizlerine yönelik basitleştirilmiş bir homojenleştirme modeli önermiştir. Rijit-plastik olan bu modelin rastgele dağılmış bloklardan oluşan yığma duvarlarda hızlı ve güvenilir sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Peña ve diğer. (2010), Hindistan’da bulunan tarihi yığma bir kulenin sismik analizlerini sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirmiştir.

Uniform ivme dağılımlı doğrusal olmayan statik itme analizleri için üç boyutlu katı modeller oluşturulurken, beş farklı ivme kaydının kullanıldığı zaman tanım alanında dinamik analizler için iki boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Statik analizlerde göçme yapının tabanında meydana gelirken dinamik testlerde yapının üst bölümlerinde oluşmuştur. Statik analizlerde uygulanan yatay yük dağılımının ve ele alınan serbest titreşim modlarının sayısı, yapının davranışı üzerinde önemli değişikliklere yol açmıştır. Bu nedenle yazarlar, yığma kulelerin sismik değerlendirilmesinde, doğrusal olmayan statik analizler yerine dinamik analizlerin kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Betti ve Vignoli (2011), İtalya’da bulunan tarihi yığma bir bazilika yapısının statik ve dinamik değerlendirmesini makro ölçekli sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirmiştir. Statik analizde yapının kendi ağırlığından gelen düşey yükler altında değerlendirme yapılmıştır. Dinamik analizler ise İtalyan standartlarında verilen spektrum eğrileri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Statik düşey yükler altında analizlerde yapı dayanım gösterirken, dinamik analizlerle uygulanan yatay yüklemelerde yapının çeşitli bölgelerinde lokal hasar mekanizmaları tespit edilmiştir. D’Ambrisi, Mariani ve Mezzi (2012), tarihi yığma bir kulenin doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerini makro ölçekli sonlu elemanlar modelleri ile tamamlamıştır. Uygulanan iki analiz tipinde de yapının göçme modu benzerlik göstermektedir. Fakat dinamik analizlerden elde edilen deplasman kapasitesi seviyeleri statik analizlerdekinden daha düşük olmuştur. Lourenço, Trujillo, Mendes ve Ramos (2012), tarihi yığma bir kilise yapısının sismik performansını kinematik yaklaşım ve doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler ile araştırmıştır. Makro modellerde yapı kabuk elemanlar ile değerlendirilmiştir. Aref ve Dolatshahi (2013), laboratuvar testleri yapılmış olan yığma duvarın sayısal modellerini sonlu elemanlar yöntemi ile mezo ölçekli olarak oluşturmuştur. Casolo ve Milani (2013), üç tabakalı yığma duvarların sayısal modellemesine ilişkin basitleştirilmiş düzlemsel modelleme yöntemi önermiştir. Milani ve Valente (2015), yedi farklı kilisenin sismik değerlendirmesini, oluşturulan üç boyutlu doğrusal olmayan makro sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada, makro modelleme yönteminin, yapının lokal hasar mekanizmalarını tespit etmedeki yetersizliği vurgulanmıştır. Aynı araştırmacılar (Valente ve Milani, 2016) sekiz farklı

yığma kuleyi dinamik ve statik analizler ile değerlendirmiş ve her iki farklı analizde de benzer hasar mekanizmaları tespit etmiştir.

Ayrık elemanlar yöntemi Cundall ve Hart (1992), tarafından tanımlanmış bir hesap yöntemidir. Bu hesap yönteminde yapı elemanları birbiri ile etkileşimi tanımlanmış ayrık bloklar olarak modellenmektedir. Rijit blokların hareket denklemlerinin sayısal entegrasyonunun açık bir şekilde hesaplandığı bu yöntem, blokların kayma, dönme ve ayrılma gibi büyük yer değiştirmelerini simüle etme amaçlı kullanılmaktadır. Blokların bağlantıları, sonlu elemanlar yönteminde tanımlanan ara yüzler gibi sabit değildir. Bu sayede bloklar analiz süresince bağlantılarını yitirip yeni ara yüz bağlantıları oluşturabilirler. Bu yöntem, büyük deplasmanlar oluşan yapının göçme mekanizmasını gerçeğe yakın bir şekilde simüle ederken, içinde oluşan gerilme değerlerinin incelendiği analizlerde yetersizdir (Cundall, 1971).

Bui ve diğer. (2010), laboratuvarında inşa edilen ve üzerinde CFRP güçlendirme yönteminin araştırıldığı, düzlemsiz yüklenen ‘u’ tipi yığma duvarın sayısal modellerini ayrık elemanlar yöntemi ile oluşturmuştur. Duvarın harç bölümleri doğrudan modellenmeyip, bloklar arası Mohr-Coulomb formülasyonlarına dayanan ara yüzler olarak tanımlanmıştır. Tran, Vincens, Morel, Dedeker ve Le (2014), moloz taş bir yığma köprünün kalıp alma sırasındaki davranışını ayrık elemanlar ile modellemiştir. Isfeld ve Shrive (2015), tarihi bir taş yığma yapının sayısal analizlerini ayrık elemanlar yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Yakın dönemde meydana gelen sismik faaliyetler sonucunda önemli bozulma ve ayrılmaların gözlemlendiği, iki yüzü kesme taş ve ortası moloz dolgu olan üç tabakalı duvarlara sahip bu yapının onarım ve güçlendirme çalışmalarına ilişkin yöntemler belirlenmiştir. Sayısal analizler sonucu, hasara öncülük eden model parametresinin, iç dolgu ve dış duvar tabakalarını birbirine bağlayan kohezyon olduğu tespit edilmiştir. Stabil olmayan kesitlerdeki yapışma mukavemetini güçlendirmek adına, yapı duvarlarının derz dolgu enjekte edilerek güçlendirilmesi gerektiği öngörülmüştür. Smoljanovic, Nikolic ve Zivaljic (2015), çelik bağlantı elemanları ile güçlendirilmiş kuru birleşimli taş yığma duvarın sayısal modellerini ayrık elemanlar yöntemi ile oluşturmuştur. Model,

blokların kırılması ve parçalanmasının yanı sıra çevrimsel malzeme davranışı, akma mukavemeti, sertlik bozulması, göçme ve çelik bağlantıların taş bloktan ayrılması hasar tiplerini simüle etmektedir. Pulatsu, Bretas ve Lourenço (2016), yığma duvarların düzlemdışı doğrultudaki muhtemel göçme mekanizmalarını ayırık elemanlar yöntemi ile oluşturulan modeller ile incelemiştir. Çalışmada malzeme parametreleri ve duvar kesitinin morfolojik özelliklerindeki değişimin, duvarın dayanım limitleri ve göçme mekanizması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak ayırık elemanlar yönteminin, yığma yapıların doğrusal olmayan davranışını uygun bir şekilde simüle edebildiği ortaya konmuştur. Orduna (2017), rijit blok modelin doğrusal olmayan statik analizi için, bloklar arasındaki ara yüzlerin sayısal entegrasyonunu hesaplayan bir formülasyon önermiştir. Tanımlanan bu ara yüz, basınç gerilmeleri altında doğrusal elastik, çekme gerilmeleri altında gevrek veya yarı-gevrek davranış göstermekte ve kayma hasarı için Coulomb modelini içermektedir. Model validasyon süreci, önerilen modelleme yönteminin, duvar elemanlarının ve yapıların yapısal davranışının temel özelliklerini yakaladığını göstermiştir. Cannizzaro, Panto, Caddemi ve Calio (2018), yığma kemer yapılarının doğrusal olmayan yapısal davranışını modellemek üzere yeni bir ayırık-makro-eleman yöntemi önermiştir. Önerilen modelde düzlem bloklar birbirleri ile tek serbestlik dereceli yaylar ile bağlanmıştır. Deneysel sonuçlarla ve analize ait simülasyonlar ile önerilen modelleme yönteminin doğruluğu ortaya konmuştur. Tavafi, Mohebkhah ve Sarhosis (2019), tarihi yığma kule yapıyı sismik yükler altında ayırık elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Farklı ivme kayıtları ile analiz edilen yapının olası göçme senaryoları tespit edilmiştir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Saha testleri

Tarihi yığma yapıların mevcut durumunu değerlendirmek amacıyla uygulanan saha testleri ile yapı taşıyıcı sistemi ve malzemesi hakkında birçok önemli parametre elde edilmektedir. İlgili kurumlarca koruma altına alınmış olan tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilecek saha testleri tahribatsız ve az-tahribatlı deneyler olmaktadır. Bu tez kapsamında öncelikli olarak araştırma amacına uygun tarihi bir yığma yapı örneği incelenmek üzere seçilmiştir. Seçilen tarihi İsabey Camii üzerinde arşiv taraması ve görsel değerlendirmeler yapılmıştır. Yapının mevcut durumuna ait dinamik karakterlerini tespit etmek amacıyla ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir, yapıyı oluşturan yığma duvarların kesit özelliklerini belirlemek amacıyla endoskopik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca, duvarda kullanılan harcın malzeme içeriği ve oranları mineralojik-petrografik yöntemle belirlenmiş ve yığma duvarın mekanik özellikleri Flat-jack testleri ile belirlenmiştir.

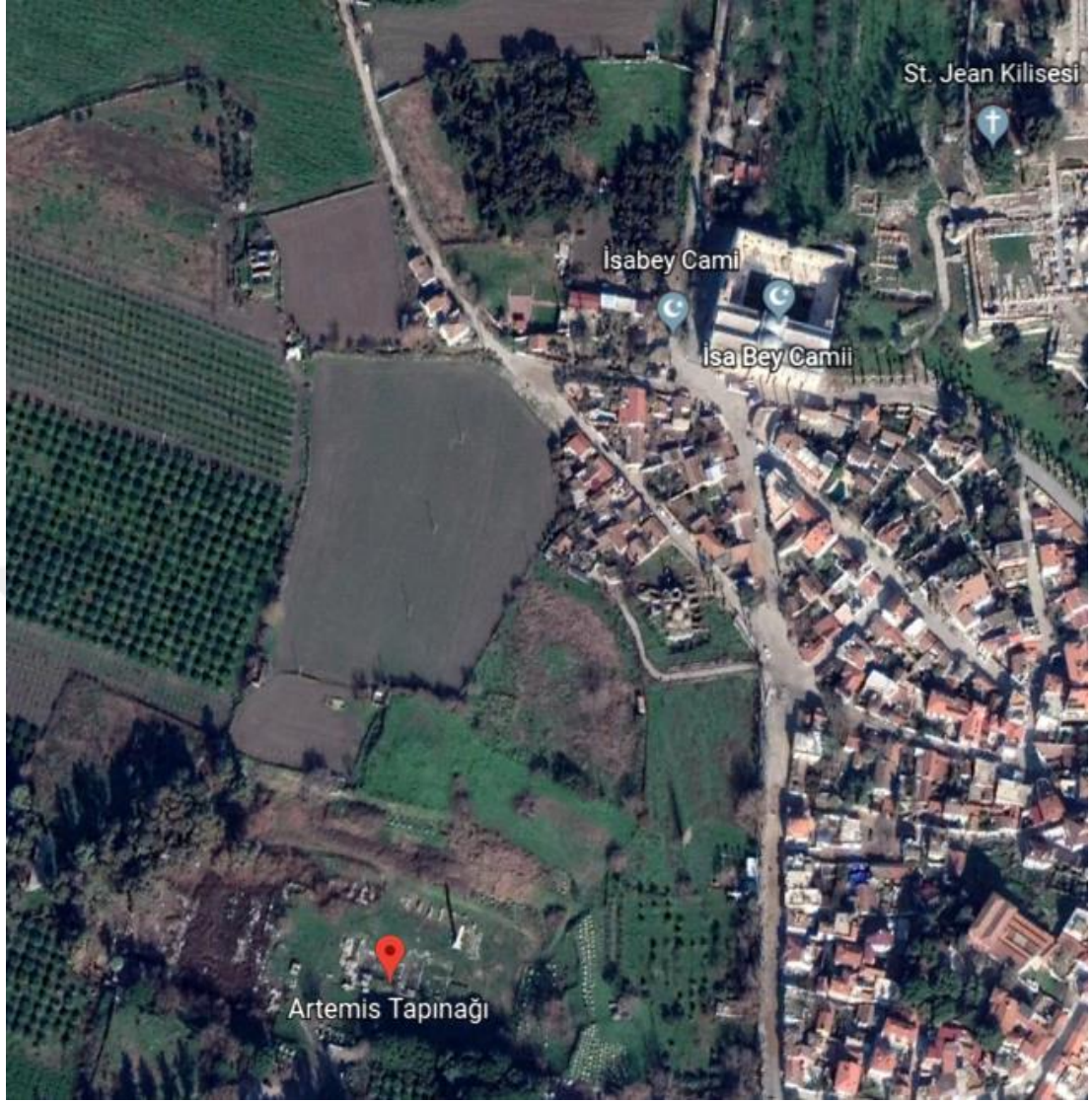
3.1.1 Tarihi yığma yapı örneği: İsabey Camii

Günümüzde hala ibadete ve turistik gezilere açık olan tarihi İsabey camii (Şekil 3.1), Osmanlı Anadolu Beylikler döneminde Aydınoğlu İsabey tarafından inşa ettirilmiştir. Mimarı Şamlı Ali olan bu eser İzmir'in Selçuk ilçesinde bulunmaktadır.



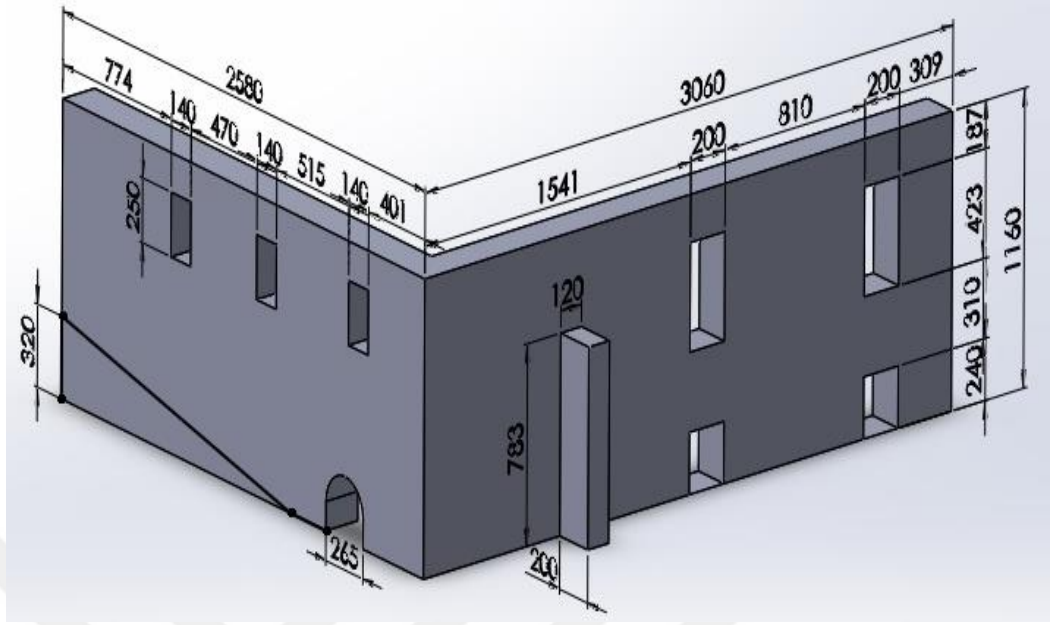
Şekil 3.1 Tarihi İsabey Camii (T.C. Başbakanlık İzmir Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşiv, b.t.)

Cami ilk yapıldığı dönemde, enine uzanan bir ana ibadet binası ile kuzeyden bitişen revak yapısına sahip bir avludan oluşmakta idi. Günümüzde bu revak yapısı mevcut değildir. Yapının doğu ve batı girişlerinde inşa edilmiş olan 2 adet minareden günümüzde sadece batı cephesindeki mevcuttur. Duvarlarında kullanılan yığma eleman kesme taş olup çoğunlukla kireçtaşı özelliğindedir. Yapı, St. Jean Kilisesi ve Artemis Tapınağı'nın ortasında konumlanmıştır (Şekil 3.2). Birçok eski medeniyete ev sahipliği yapmış bölgedeki konumu itibari ile de dikkat çekmektedir. Yapım aşamasında eski kalıntı yapılardan da taş ve sütun malzemeler kullanıldığı düşünülmektedir (Ertuğrul, 1995).



Şekil 3.2 İsabey Camii konumu (Google Earth, b.t.)

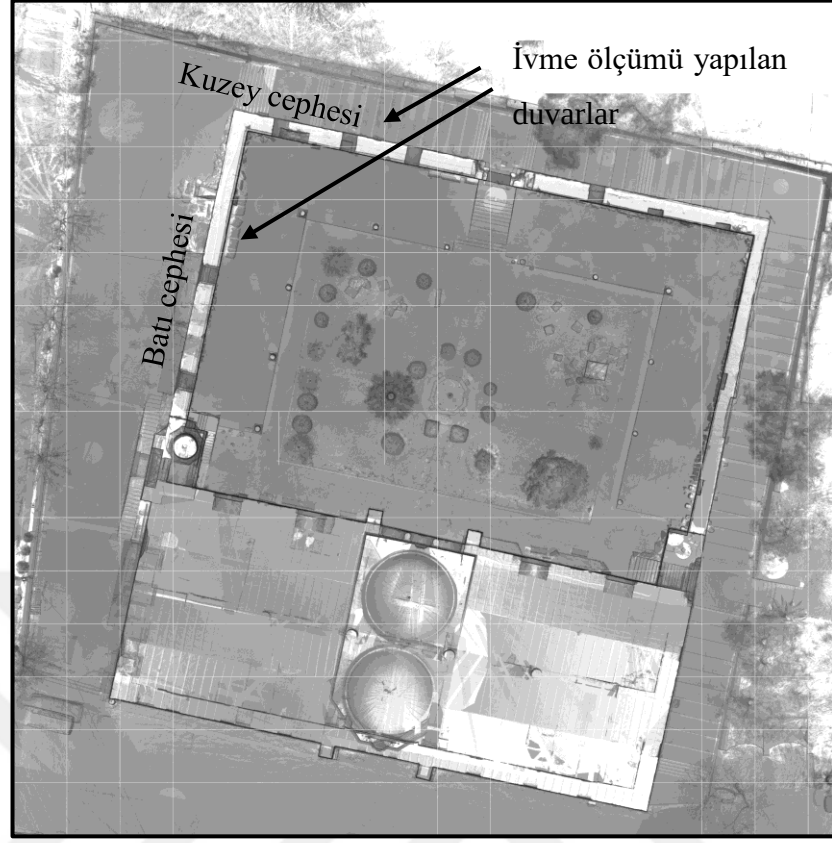
Tez kapsamında, yapının birbirini dik kesen kuzey ve batı cephesi avlu duvarları, düzlemsiz davranışlarının belirlenmesi amacıyla incelenmiştir. İlk yapıldığı dönemdeki revak yapısını içermemesi ve rijit diyafram etkisi oluşturacak yapısal elemanların olmaması nedeni ile incelenen bu duvarlar düzlemsiz doğrultuda hasar görme potansiyeline sahiptir. Avlu duvarları ortalama 180 cm kalınlığa ve 11,6 m serbest (iç kot) ve 15,0 m toplam yüksekliğe (dış kot) sahiptir. İncelenen duvar bölümünün toplam uzunluğu 55 m'dir. Ana bina ve avluyu oluşturan duvarlar çok tabakalı duvarlar olup benzer tipolojidedir. İncelenen duvar bölümünün SolidWorks (2014) yazılımında oluşturulan geometrisi Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.3 İncelenen avlu duvar bölümünün geometrik ölçüleri (ölçüler cm'dir)

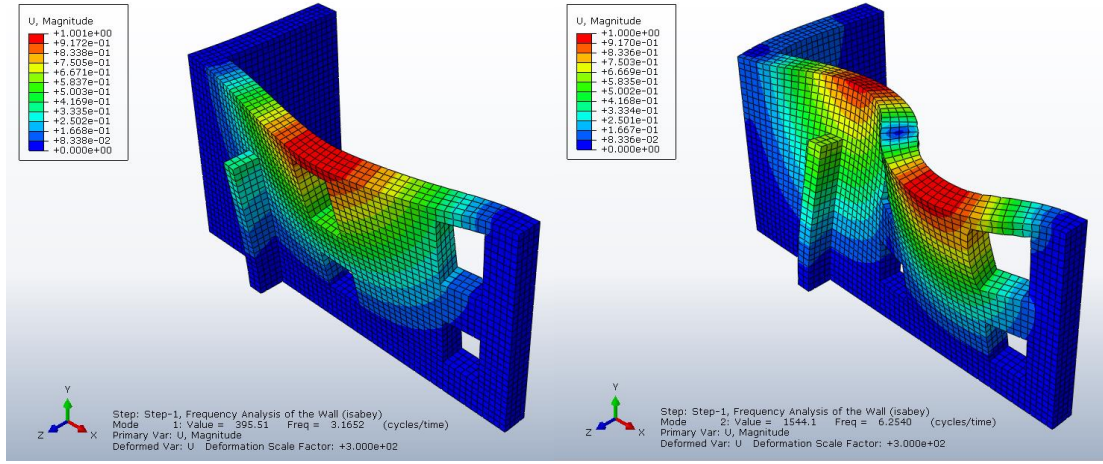
3.1.2 Ortamsal titreşim testleri

Tez çalışmaları kapsamında incelenen tarihi yığma yapı örneğinin birbirini dik kesen iki avlu duvarının (Şekil 3.4) 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.



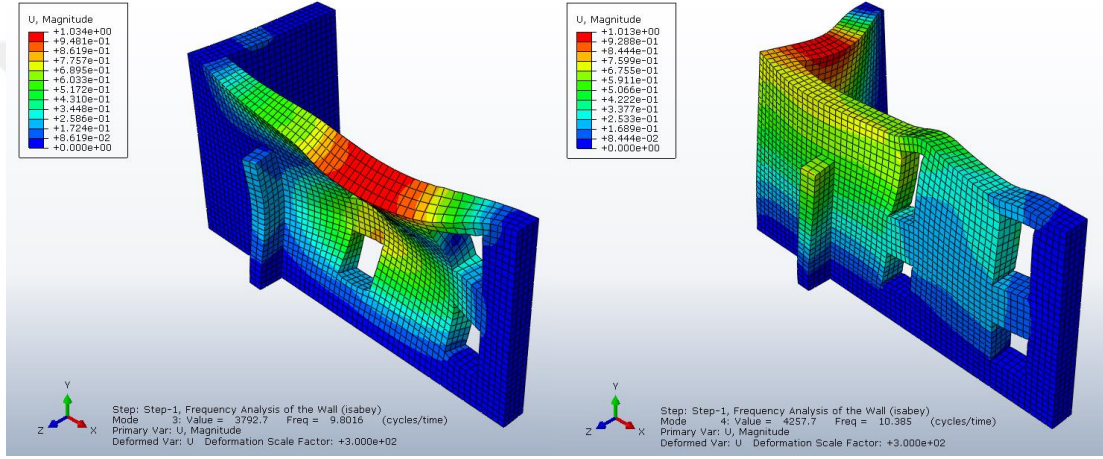
Şekil 3.4 İsabey Camii plan görünüşü (T.C. Başbakanlık İzmir Vakıflar Bölge Müdürlüğü Arşiv, b.t.)

İncelenen yapı örneğine ait mümkün olduğu kadar çok sayıda mod şeklinin belirlenebilmesi için duvar üzerine sabitlenecek ivmeölçerlerin yerleşim düzeni önemli olmaktadır. Bu nedenle saha çalışmalarından önce incelenen yapı bölümünün sonlu elemanlar modeli kurulmuş ve serbest titreşimine ait mod şekilleri elde edilmiştir (Şekil 3.5). Ön sayısal modeller ABAQUS (ABAQUS, 2017) sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. Modelleme sırasında üç boyutlu sekiz düğüm noktalı hexahedral C3D8R sürekli ortam elemanları kullanılmış ve oluşturulan model ABAQUS yazılımında standart modül ile analiz edilmiştir. Ön sayısal analiz sonucunda bulunan mod şekilleri göz önüne alınarak saha testleri öncesinde ivmeölçer yerleşimleri planlanmıştır (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).



(a) 1. mod

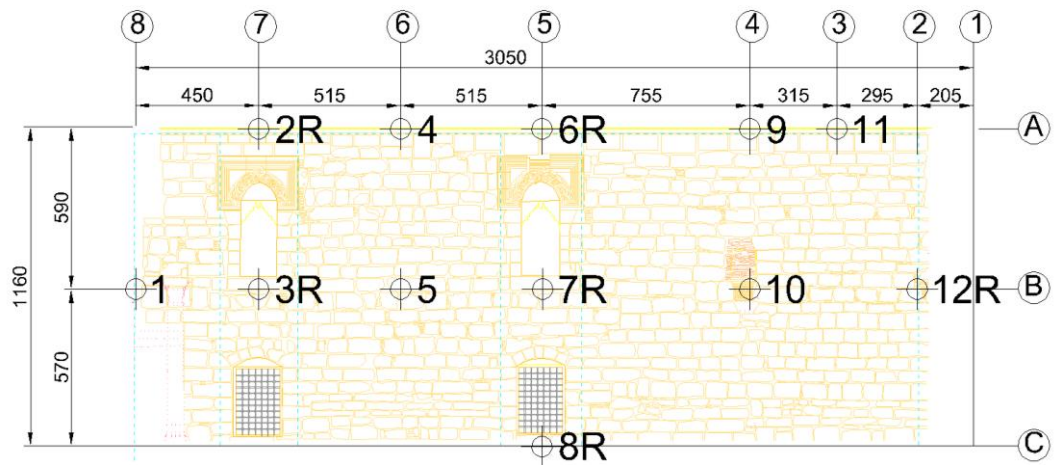
(b) 2. mod



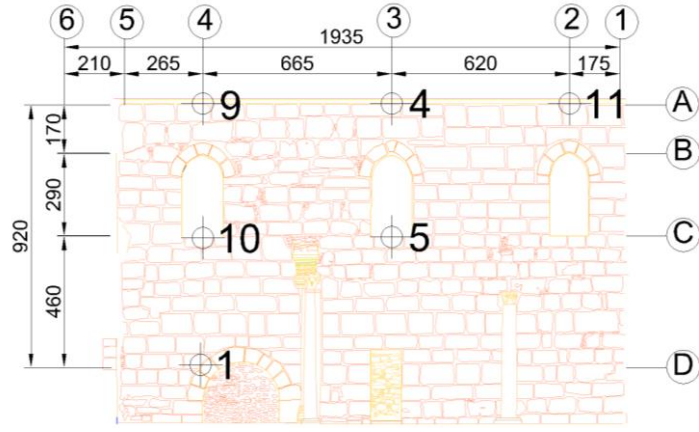
(c) 3. mod

(d) 4. mod

Şekil 3.5 Ön sayısal modelin ilk dört frekansına karşılık gelen mod şekilleri



Şekil 3.6 Batı cephesi avlu duvarı ivmeölçer yerleşim planı (ölçüler cm'dir)

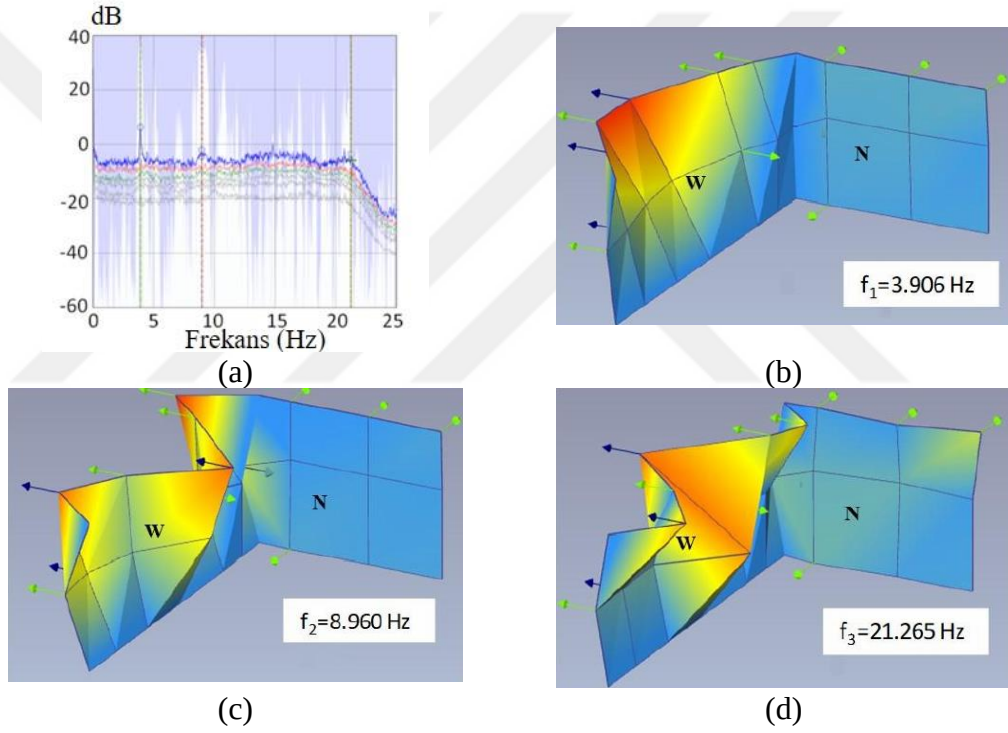


Şekil 3.7 Kuzey cephesi avlu duvarı ivmeölçer yerleşim planı (ölçüler cm'dir)

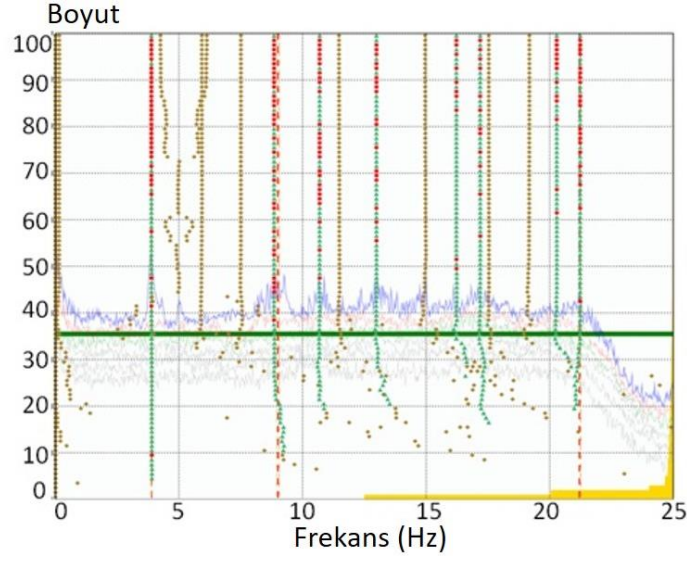
Testler iki set halinde gerçekleştirilmiştir. İlk test setinde mevcut 12 adet ivmeölçer batı cephesine yerleştirilerek (Şekil 3.6) ölçümler alınmış daha sonra 6 adet ivme ölçer kuzey cephesine taşınarak ikinci set test (Şekil 3.7) gerçekleştirilmiştir. 6 adet ivmeölçer batı cephesinde 'referans' (R) olarak tutulmuştur. Her test setinde 14 dakika ölçüm yapılmış olup örnekleme frekansı 250 Hz olarak seçilmiştir. Ölçüm yapılan duvar bölümünün ön görülen doğal titreşim frekansı (3-5 Hz) ve sönüm oranı ($\xi < 0.3$) değerleri göz önünde bulundurulduğunda ölçüm süresinin yeterli ($T_{top} > 10/(\xi \times f_{min})$) olduğu görülmektedir (Brincker ve Ventura, 2015). 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, Zhang ve Andersen, 2001) ve *Stochastic Subspace Identification* (SSI) (Van Overschee ve De Moor, 1996) yöntemleri ile işlenmiş ve yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir (Mısır ve diğer., 2017).

EFDD (Brincker ve diğer., 2001) yönteminde, sadece ölçülen (çıktı) ivme verileri ile frekans tanım alanında oluşturulan spektral matrislere tekil değer ayrışımı yapılarak modal parametreler tahmin edilmektedir. Ortamsal titreşimde sistemi harekete geçiren fonksiyonun geniş bantlı olması, sistemin düşük sönüm değerlerine sahip olması durumlarında her bir tekil değer; sistemin tek bir moduna karşılık gelen oto-spektral yoğunluk fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Modal parametreler, EFDD yönteminde her iki test setinde elde edilen ivme verilerinin birleştirilmesi ile

elde edilmiş olup Şekil 3.8a’da spektral matrisin tekil değer ayrışımı sonucunda elde edilen serbest titreşim frekans değerleri gösterilmiştir. Bu frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri ise Şekil 3.8b-d’de sunulmuştur. Duvarın düzlemdışı doğrultudaki davranışı incelendiğinden, ivmeölçerlerin bu doğrultuda yerleştirilmesi sonucu ilgili doğrultudaki 3 adet mod elde edilmiştir. Düzlemiçi modlar ise, güncelleştirilecek olan sonlu eleman modelleri üzerinden dolaylı olarak elde edilebilecektir. Şekil 3.8b-d’de gösterilen modlara ait sönüm değerleri sırasıyla %1,64, %1,56, %0,06 olarak belirlenmiştir. Sönüm değerlerinin %2,00’nin altında elde edilmiş olması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 3.8 Tarihi yığma yapı örneği OMA sonuçları (a) EFDD yönteminden elde edilen tekil değerler, (b-d) EFDD yöntemine göre elde edilen ilk üç mod şekli ve frekans değerleri



Şekil 3.9 Tarihi yığma yapı örneğinde birinci test seti ile oluşturulmuş stabilizasyon diyagramı

Yapının serbest titreşimine ait modal değerlerin elde edilebildiği diğer yöntem olan SSI (Van Overschee ve De Moor, 1996) yönteminin teorisine göre, ivme ölçümleri temel alınarak, doğrusal faz-uzayı formunda oluşturulan matematiksel modelden faydalanılmaktadır. Ölçülen ivme tepkilerinden oluşturulan Hankel matrisinin yatay olarak iki parçaya ayrıştırılmasıyla elde edilen “geçmiş” ve “gelecek” çıktı alt matrislerinin oluşturduğu “projeksiyon matrisi”, gözlemlenebilirlik ile Kalman faz matrisinin çarpımından oluşmaktadır. Projeksiyon matrisinin tekil değer ayrışımı ile birlikte elde edilen tekil değerler ve bu tekil değerlere karşılık gelen vektörlerden modal parametrelerin tahminleri yapılmaktadır. Tahmin aşamasında alt uzay boyutuna göre karakterize edilen blok Hankel matrisi, artan alt-uzay boyutları için tekrarlanarak oluşturulan stabilizasyon diyagramı vasıtasıyla sayısal ve fiziksel modlar birbirinden ayrıştırılabilmektedir. Birinci test setinde alınan ivme verileri kullanılarak oluşturulan stabilizasyon diyagramı Şekil 3.9’da sunulmuştur. Buna göre, SSI yöntemine göre modal frekans değerleri sırasıyla 3,9 Hz, 9,0 Hz, 21,21 Hz olarak; modal sönüm değerleri ise %1,78, %5,05, %3,43 olarak elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen mod şekilleri EFDD yöntemi ile elde edilen mod şekillerine benzerlik gösterdiğinden ayrıca sunulmamıştır (Mısır ve diğer., 2017).

3.1.3 Duvar tipolojisi

İncelenen tarihi yığma yapı örneğinin avlu duvarları üzerinde, duvarların kesit özelliklerinin belirlenmesi amacıyla endoskopik muayene gerçekleştirilmiştir. Kalınlığı ortalama 180 cm olan avlu duvarlarının, yatayda ve düşeyde belirli bölgelerinden 100-120 cm derinliğinde ve 2 cm çapında delikler açılmıştır. Açılan delikler boyunca duvar kesitindeki faz değişimi izlenmiştir.



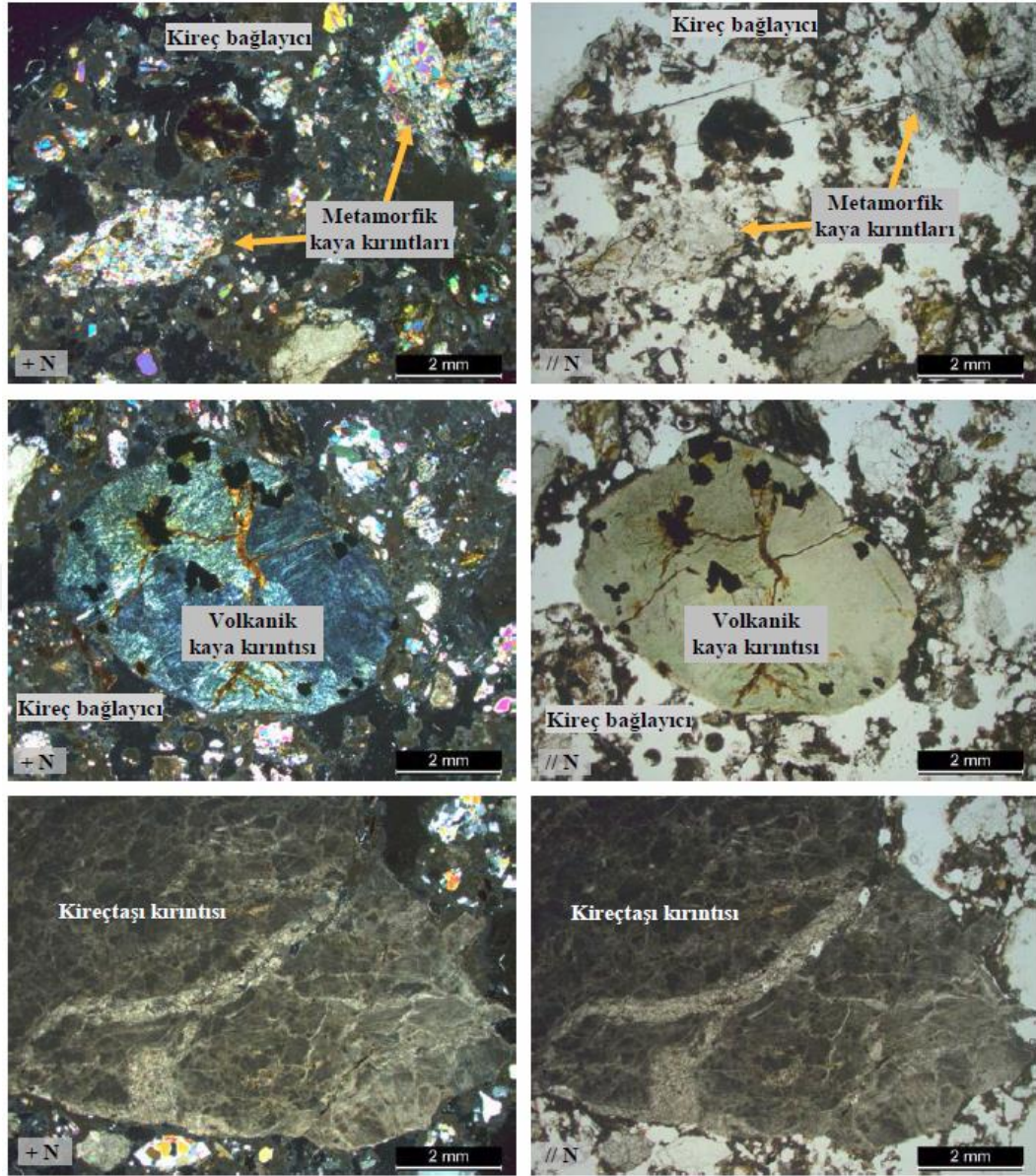
Şekil 3.10 Avlu duvarları üzerinde endoskopik muayene çalışmaları (Kişisel arşiv, 2018)

Endoskopik testler sonucunda duvarın iç bölgelerindeki boşluk durumu, harç kalınlıkları ve kullanılan taşların kalınlıkları belirlenmiştir. Duvarın zemin seviyesine yakın bölgelerindeki incelemelerde iki tabakalı (taş-harç-taş) olduğu, eskiden revak yapısının bağlandığı seviyelerde (iç kota göre yaklaşık 6 m) ise ortadaki harcın kalınlığının giderek arttığı ve üst seviyelerde üç tabakalı (taş-moloz-taş) forma geldiği belirlenmiştir. Buna göre duvarın belirli bir seviyeye kadar çift tabakalı, daha sonra ise üç tabakalı yapıda olduğu söylenebilir. Duvar içerisinde kesme taşları birbirine bağlamak amacıyla kurşun kenetlerin kullanılmadığı da deneyler sırasında tespit edilmiştir. Endoskopik testler sırasında delik açılan derz bölgelerinden tarihi harç örneği alınmıştır. Tarihi harcın içeriği mineralojik-petrografik yöntemle belirlenmiştir ve ilgili çalışmalar bir sonraki alt başlıkta sunulmuştur.

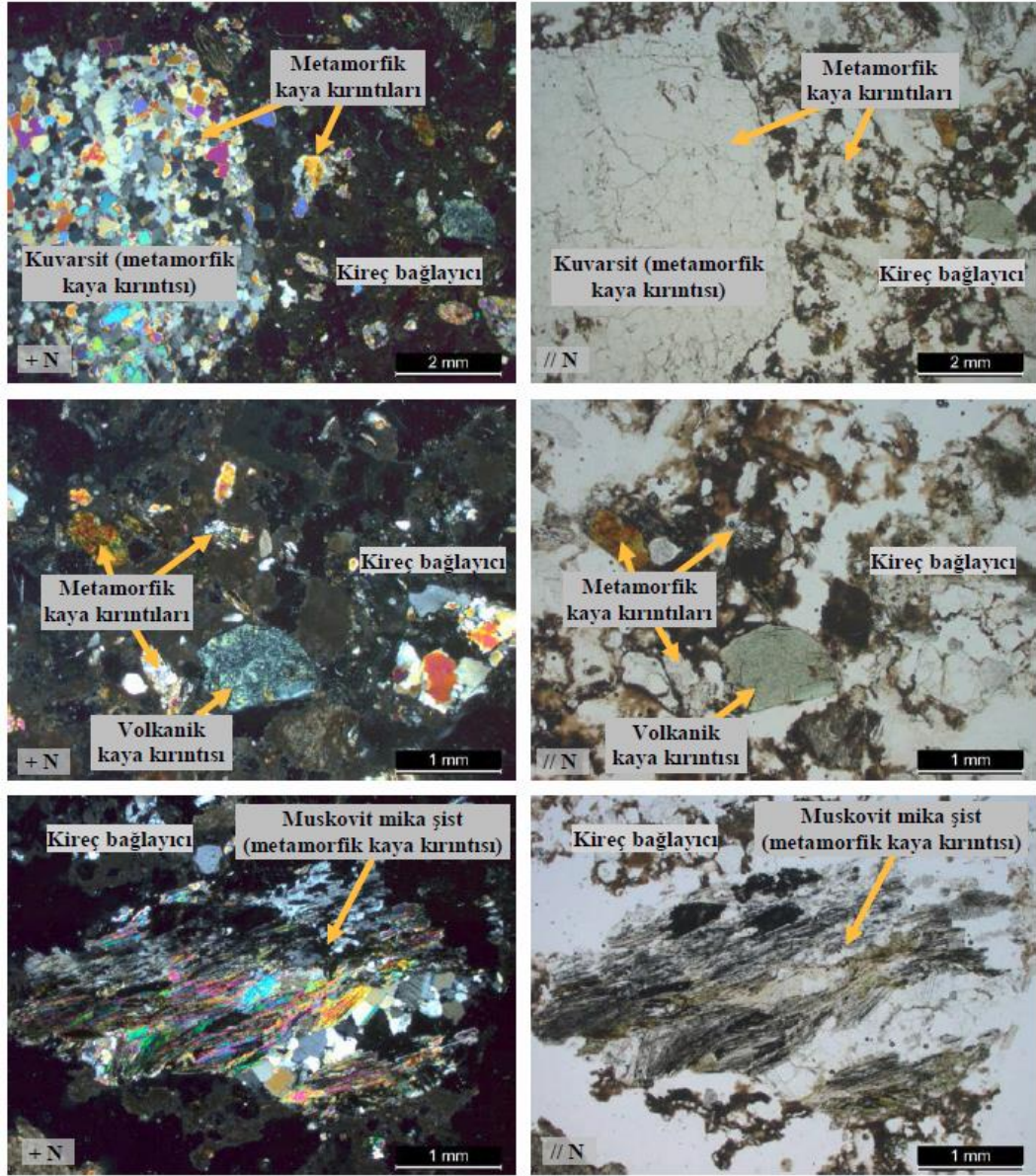
3.1.4 Harç içeriği tayini

Araştırma kapsamında incelenen tarihi İsabey Camii duvarlarında kullanılan harcın içeriği mineralojik-petrografik yöntemle belirlenmiştir. Duvarlardan alınan harç örneği önce stereo binoküler mikroskop (Olympus BX50) altında doğal haliyle incelenmiştir. Kireç bağlayıcı oranını sağlıklı ve doğru bir şekilde belirleyebilmek için hazırlanan örnek seyreltilmiş (%10) HCl asit çözeltisiyle yıkanarak agrega ve bağlayıcı oranlaması yapılmıştır. Oranlama için standart “alan oranlama abakları” kullanılmıştır. Mineralojik-petrografik inceleme için örnek öncelikle 80°C deki etüvde 10 saatlik zaman dilimi içinde kurutulmuştur. Örselenebilir özellikteki örnek plastik kap içine alınarak araldit ile karıştırılmış ve vakum altında yaklaşık 4 saatlik bir sürede araldit bağlayıcısı ile sertleşmesi sağlanmıştır. Sertleştirilen örnek yağlı sistemle çalışan elmas testere ile kesilmiş ve döner disk üzerinde çeşitli aşındırıcılarla parlatılmıştır. Parlatılan örnek UV ile sertleşen özel bir yapıştırıcı ile 50 x 55 mm boyutunda lama yapıştırılmış ve elmas aşındırıcılar sayesinde 30 mikron kalınlığına gelene kadar inceltilerek polarizan mikroskop incelemesi için ince kesiti hazırlanmıştır. İnce kesit incelemeleri ve fotoğraflama çalışmaları Leica DM 750P polarizan mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Örnek ortalama 35 mm kalınlığındadır. Genel olarak az miktarda çakıl ve baskın olarak kum boyu kaya kırıntıları ve kireç bağlayıcısından oluşmaktadır. Örnekte yapılan inceleme sonucunda yaklaşık %19 boşluk hacmi çıkarıldıktan sonra bileşiminde dokusal olarak ortalama %36 kireç, %4 çakıl boyu (2 mm’den büyük) ve %60 kum ve silt boyu (2 mm’den küçük) kaya kırıntısı (agrega) tespit edilmiştir (Şekil 3.11 ve 3.12). Örnek içinde en büyük tane boyu 8,1 x 5,3 x 3,2 mm olarak ölçülmüştür. Polarizan mikroskop altında incelemesi yapılan örnekte kireç bağlayıcı içinde baskın olarak köşeli metamorfik kayalarından türeme kuvars şist, kuvars ve muskovit mineral kırıntıları ile tortul kayalardan türeme mikritik kireçtaşı kırıntıları tespit edilmiştir. Örnek içinde az miktarda iyi yuvarlaklaşmış volkanik kaya kırıntısı tespit edilmiştir.



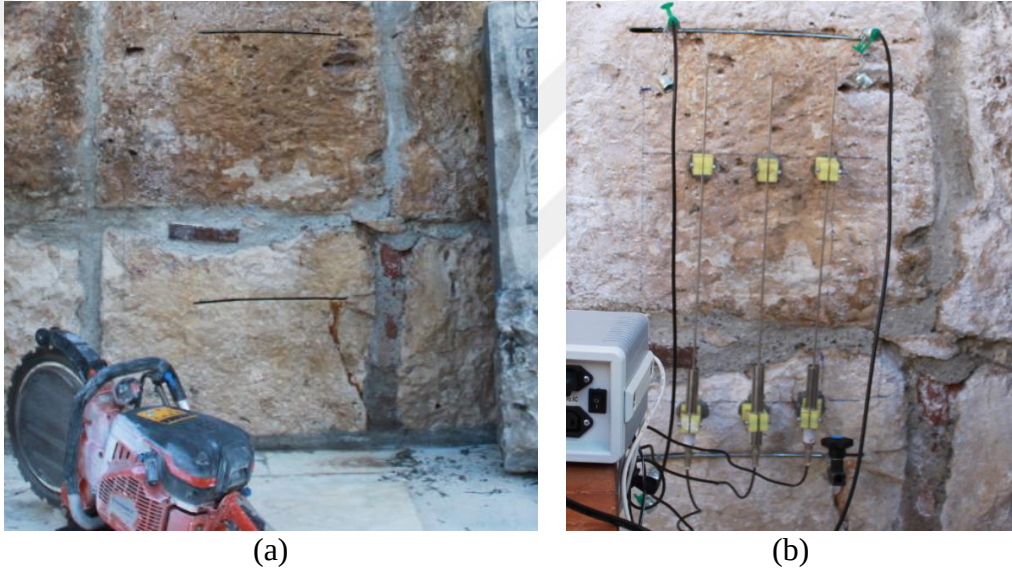
Şekil 3.11 Harç örneğin polarizan mikroskop görüntüleri. // N: Paralel Nikol, + N: Haç Nikol polarizan mikroskop görüntüsü



Şekil 3.12 Harç örneğin polarizan mikroskop görüntüleri. // N: Paralel Nikol, + N: Haç Nikol polarizan mikroskop görüntüsü

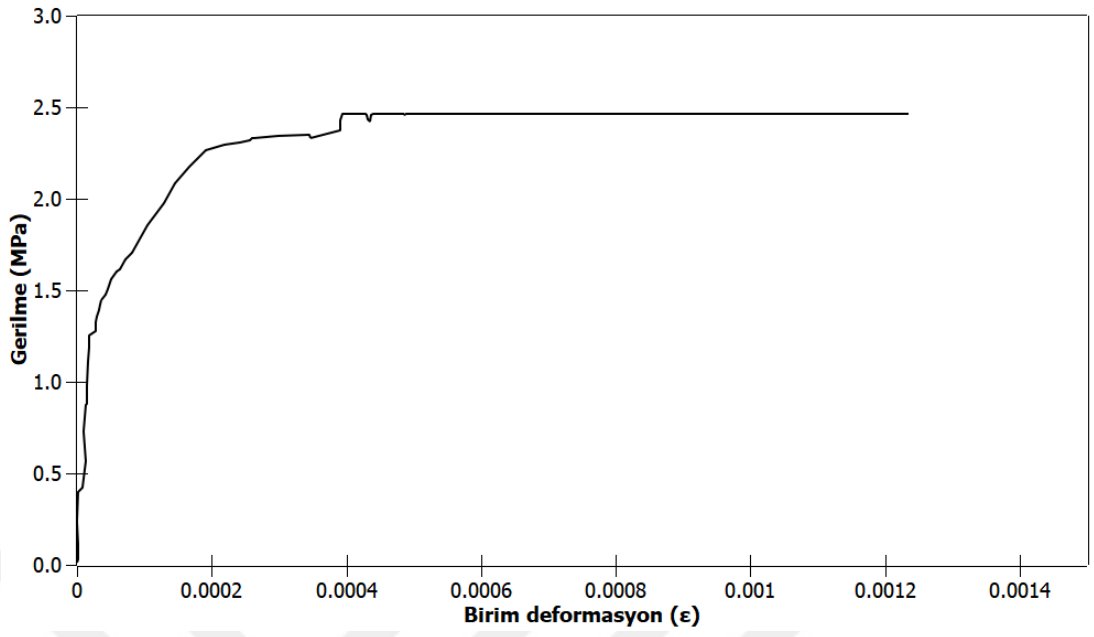
3.1.5 Flat-jack testleri

Flat-jack testleri, yığma birim üzerine yerleştirilen plakalara hidrolik basınç uygulanarak gerilme ve birim deformasyon ölçümlerinin elde edilebildiği, yerinde uygulanan az-tahribatlı testlerdir. İncelenen İsabey Camii yığma duvarları üzerinde üç farklı noktada Flat-jack testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler için kullanılan test prosedürü ASTM C1197–14a (2014) ve RILEM MDT. D.4 (2004) ile uyumludur. Test yapılan duvar birimde öncelikle ara mesafesi 40 cm olan iki yatay kesim yapılmıştır (Şekil 3.13a). Kesiklerin içerisine plakalar yerleştirilip aralarına 3 adet LVDT deplasman ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.14b).

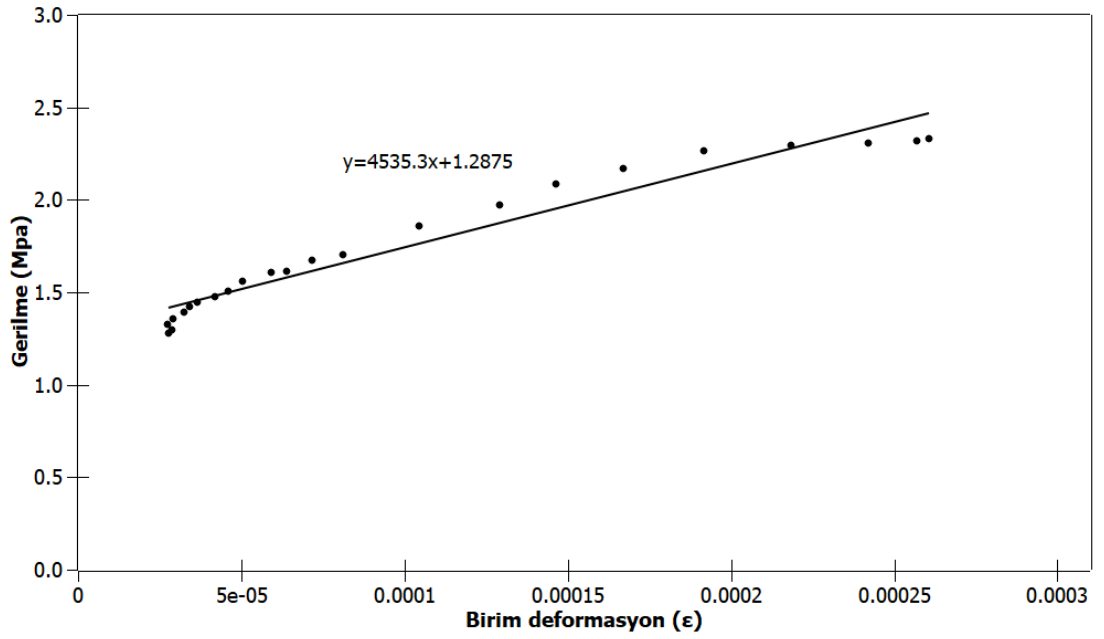


Şekil 3.13 Flat-jack testleri (a) duvar üzerinde yatay kesimler, (b) plaka ve deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2018)

Birinci ve üçüncü test batı cephesi avlu duvarı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda duvar biriminin basınç dayanımı sırasıyla 2,43 ve 2,04 MPa olarak elde edilmiştir. Deplasman değerleri sıfıra yakın çok küçük değerler olduğundan anlamlı bir elastisite modülü elde edilememiştir. İkinci test doğu cephesi duvarında gerçekleştirilmiştir ve duvar biriminin elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 4535 ve 2,47 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15). Bu üç test sonucuna göre duvar biriminin ortalama elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri sırasıyla 4535 ve 2,30 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14 İkinci test birinci çevrime ait gerilme-birim deformasyon eğrisi



Şekil 3.15 İkinci test birinci çevrim sonucu elastisite modülü tayini

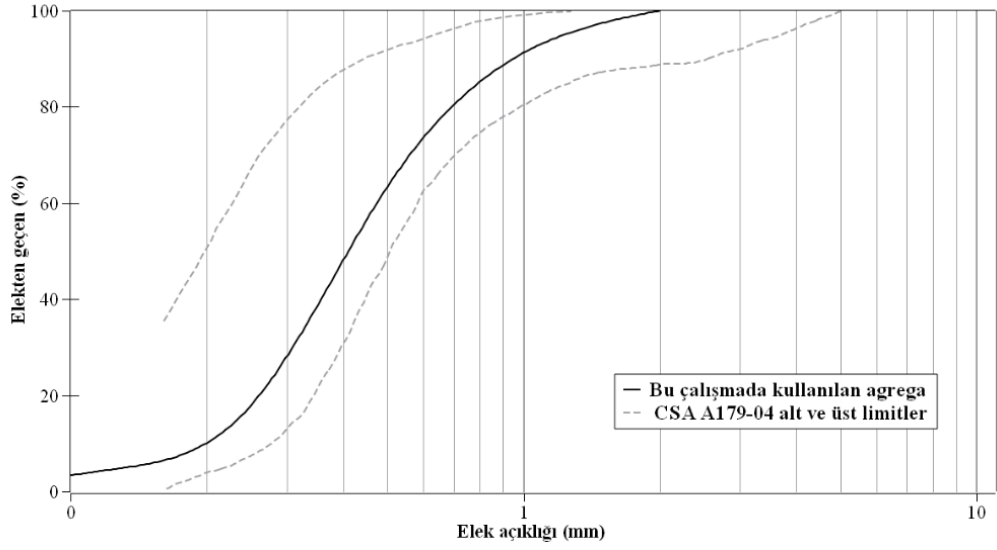
3.2 Laboratuvar testleri

3.2.1 Tarihi harcın mekanik karakterizasyonu

Seçilen tarihi yığma yapı örneğinin avlu duvarlarını temsil edecek laboratuvar numunelerinde kullanılacak harcın içeriği Bölüm 3.1.4’de verilmiştir. Doğal hidrolik kireç kullanılarak oluşturulması planlanan harcın karışım oranları ve mekanik özelliklerinin tespiti amacıyla malzeme testleri gerçekleştirilmiştir. Harç içerisinde kullanılan kumun gradasyonu elek analizi ile belirlenmiş ve ilgili yönetmelikle uygunluğu gösterilmiştir. Duvar testlerinde kullanmak için hazırlanan hidrolik kireç harcı, incelenen gerçek yapıda karşılaşılan içerikte ve ortalama basınç dayanımını yansıtacak şekilde tasarlanmış, çeşitli bağlayıcı/agrega oranlarına sahip harç örneklerinin malzeme testleri, harçlı duvar birimleri üzerinde doğrudan kesme ve basınç testleri ile hedeflenen karışıma karar verilmiştir.

Elek analizi

Tarihi İsabey Camii duvarlarındaki derz kalınlıkları değerlendirilerek laboratuvarda inşa edilecek duvar numunelerinde kullanılacak harcın kalınlığı 1,5-2 mm olarak belirlenmiştir. Uygulaması oldukça ince olacak harçta kullanılacak kumun en büyük dane çapı değeri 1 mm olarak planlanmıştır. Kumun gradasyonunu belirlemek amaçlı standart elekler ile elek analizi gerçekleştirilmiştir. Harç kumunun gradasyonunu ve CSA A-179-04 standardına uyumu Şekil 3.16’da sunulmuştur.



Şekil 3.16 Harç kumunun gradasyonu

Deneme harç karışımları

Harcın az miktarda çakıl ve baskın olarak kum boyu kaya kırıntıları ve kireç bağlayıcısından oluştuğu belirlenmiştir. Alınan harç örneklerinde yaklaşık %19 boşluk hacmi çıkarıldıktan sonra bileşiminde ortalama %36 kireç, %4 çakıl boyu (2 mm'den büyük) ve %60 kum ve silt boyu kaya kırıntısı tespit edilmiştir (Bölüm 3.1.4). Yapı üzerinde gerçekleştirilen Flat-jack testlerinden elde edilen ortalama duvar basınç dayanımı (2,30 MPa), duvar numunesinde kullanılacak harç için hedef dayanım alınarak ve literatürde var olan benzer çalışmalar değerlendirilerek (Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas, Karatasios ve Kilikoglou, 2005; Lanas, Sirera ve Alvarez, 2006; Chan ve Bindiganavile, 2010; Demir, 2012; Garijo, Zhang, Ruiz, Ortega ve Wu, 2018) çeşitli deneme harç karışımları hazırlanmıştır (Tablo 3.1). Bağlayıcı olarak literatürde sıklıkla NHL-3,5 olarak anılan Kimtaş-SuperCalco marka doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Beş farklı karışım için ağırlıkça 1:2/3/4/5/6 oranlarında bağlayıcı/agrega karışımına işlenebilirlik sağlanacak kadar su eklenmiştir. Deneme karışımlarının kıvam tayini TS EN 1015-3'e göre yapılmıştır.

Tablo 3.1 Deneme harç karışımlarına ait içerik oranları ve taze harç kıvamları

	M I	M II	M III	M IV	M V
Bağlayıcı (gr)	1000	1000	1000	1000	1000
Agrega (gr)	2000	3000	4000	5000	6000
Su (gr)	697	902	1067	1100	1163
Su/Bağlayıcı	0,7	0,9	1,1	1,1	1,2
Kıvam (mm)	150	183	175	160	145

Harç numuneleri üzerinde basınç ve üç noktalı eğilme testleri

Harcın basınç ve eğilmede çekme dayanımı değerlerini elde etmek üzere 40 x 40 x 160 mm ve 50 x 50 x 50 mm boyutlu numuneler oluşturulup havada ve nemli ortamda sertleşmeye bırakılmıştır. 7, 14 ve 28 günlük sürelerde kırılmalar TS EN 1015-11'e göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17).



(a)



(b)

Şekil 3.17 Deneme harçları üzerinde (a) üç noktalı eğilme ve (b) basınç testleri (Kişisel arşiv, 2019)

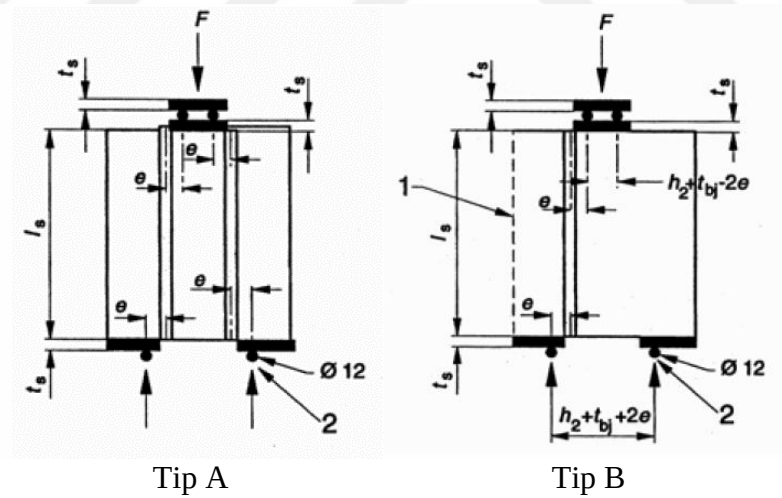
Üç noktalı eğilme testi gerçekleştirilen numunelerin parçaları üzerinde ve hazırlanan küp numuneler üzerinde 40 x 40 mm yükleme başlığı kullanılarak basınç testleri uygulanmıştır. Her bir karışım tipi için kırım süreleri ve ortalama basınç (f_c) ve eğilmede çekme dayanımı (f_t) değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Testler sırasında anlamlı ölçüm yapılamayan numuneler için tabloda ilgili kısımlar boş bırakılmıştır.

Tablo 3.2 Deneme harçlara ait basınç ve eğilmede çekme dayanımları

	7 günlük		14 günlük		28 günlük	
	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)
M I	1,12	4,31	1,05	5,82	2,81	10,50
M II	0,52	2,18	0,63	3,26	1,50	7,67
M III	0,32	1,55	0,47	2,35	1,13	4,39
M IV	-	1,11	0,28	1,50	0,38	2,31
M V	-	0,74	-	0,91	0,23	1,12

Başlangıç kayma dayanımı tayini

Harcın başlangıç kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı değerleri TS-EN 1052-3'e göre gerçekleştirilen başlangıç kayma dayanımı testleri ile belirlenmiştir. İlgili standartta verilen test şemaları Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Testlerde kullanılacak kagir elemanların boyutları göz önüne alınarak Tip A test şemasına karar verilmiştir.



Şekil 3.18 TS-EN 1052-3'e göre başlangıç kayma dayanımı test şemaları

Testlerde 60 x 100 x 200 mm boyutlarında kagir elemanlar kullanılmıştır. Ele alınan beş farklı harç tipi için üç ayrı eksenel basınç yükü altında (0,2 N/mm², 0,6 N/mm² ve 1,0 N/mm²) yığma numuneler test edilmiştir. Uygulanan test düzeni Şekil 3.19'da verilmiştir. Test sonuçları ilgili standartta verilen hesap yöntemi ile

değerlendirilmiş ve beş farklı harç karışımı için ortalama başlangıç kayma dayanımı (f_{voi}) ve içsel sürtünme açısının karakteristik değeri (α_k) elde edilmiştir (Tablo 3.3).



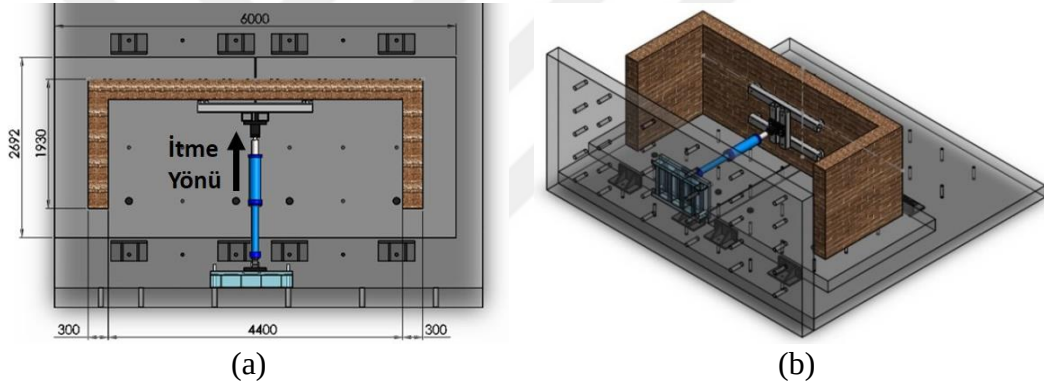
Şekil 3.19 Başlangıç kayma dayanımı tayini test düzeni (Kişisel arşiv, 2019)

Tablo 3.3 Başlangıç kayma dayanımı (f_{voi}) ve içsel sürtünme açısının karakteristik değerleri (α_k)

	M I	M II	M III	M IV	M V
f_{voi} (MPa)	0,45	0,37	0,35	0,23	0,18
α_k	-	0,46	0,33	0,39	-

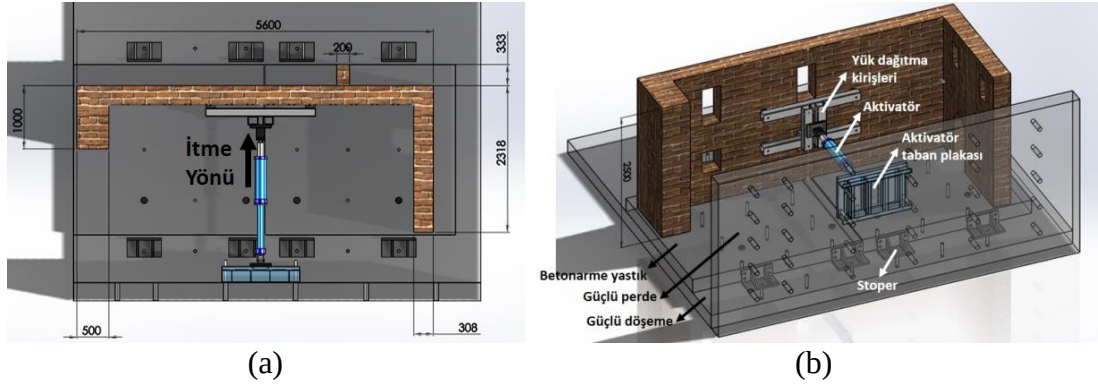
3.2.2 Duvar numuneleri için düzlemdışı test altyapısının hazırlanması

Tez çalışmaları kapsamında, ülkemizdeki tarihi yığma binaların yapısal özelliklerini temsil edebilecek nitelikte toplam beş laboratuvar numunesinin test edilmesi planlanmıştır. Temel olarak tarihi İsabey Camii avlu duvarlarındaki ortalama taş boyutları ve harç özellikleri örnek alınarak oluşturulan duvar numunelerinde 60 x 100 x 200 mm boyutlu mermer birimler kullanılmaktadır. İlk üç numune planda simetriye sahip olup (Tip-1) ilk numune (S1) kuru derzli, ikinci numune (S2) düşey ve yatay derzleri harçlı, üçüncü numune (S3) ise hem derzleri harçlı hem de iki yüzü kesme taş, ortası moloz dolgulu olarak üretilmektedir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Tip-1 numunesinin (a) plan boyutları ve (b) perspektif görünümü (ölçüler mm'dir)

Testleri gerçekleştirilecek olan diğer iki numune ise (Tip-2) incelenmekte olan tarihi İsabey Camii'nin batı ve kuzey yönlerine bakan birbirine dik iki avlu duvarının geometri ve malzeme özellikleri benzeştirilerek 1/6 geometrik ölçekte üretilecektir. Böylece hem özel nitelikteki bu tarihi yapının olası sismik davranışının belirlenmesi adına daha objektif bir deneysel veri sağlanacak hem de araştırma sonuçlarının görünürlüğü arttırılacaktır. Ayrıca bu fiziksel model olası güçlendirme senaryolarının değerlendirilmesi için de bir altlık oluşturacaktır. Testlerin, laboratuvarımızdaki güçlü duvar-güçlü döşeme sistemi üzerinde gerçekleştirilmesi planlanmıştır. İsabey Camii avlu duvarı göz önüne alınarak oluşturulacak 1/6 geometrik ölçekli laboratuvar numunesi ve planlanan deney ortamının temsili görünüşü Şekil 3.21'de verilmiştir. Her iki tip numunenin de yüksekliği 2,5 m'dir.



Şekil 3.21 Tip-2 numunesinin (a) plan boyutları ve (b) perspektif görünümü (ölçüler mm'dir)

Üzerine numunelerin yerleştirileceği betonarme yastık (temel) DEÜ Yapı Mühendisliği Laboratuvarında oluşturulmuş ve imalat aşamalarıyla ilgili görseller Şekil 3.22'de sunulmuştur. Testler sonrasında bu temelin laboratuvar dışına çıkarılmasını kolaylaştırmak için (toplam plan boyutları 6 x 3 m'dir) betonarme imalat iki parça halinde oluşturulmuştur.



(a) Kalıpların yerleştirilmesi



(b) Demir işçiliği



(c) Beton işçiliği



(d) Numune-temel arası aderanslı yüzey

Şekil 3.22 Laboratuvarda iki adet betonarme yastığın imalatı (Kişisel arşiv, 2018)

İmalatı yapılan her bir parçanın yükleme doğrultusundaki yatay hareketi dörder adet stoper ile mesnetlenmiş, ayrıca devrilme doğrultusundaki hareketine engel

olabilmek için dörder adet saplama kullanılarak her bir temel güçlü döşemeye montajlanmıştır (Şekil 3.23). Yarı-statik yükleme sistemlerinin hidrolik bakımları yapılmış, test ortamına taşınarak sabitlenmiş ve uygun şekilde çalıştığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.24). Yükleme sisteminde 500 kN kapasiteli, pozisyon kontrollü bir hidrolik aktivatör kullanılmıştır.

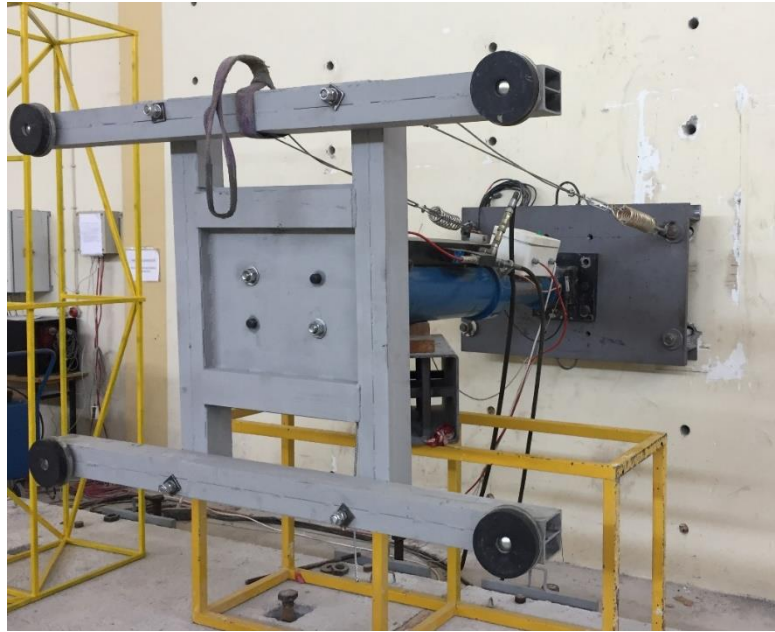


Şekil 3.23 Betonarme yastığın stoper ve saplamalarla sabitlenmesi (Kişisel arşiv, 2018)



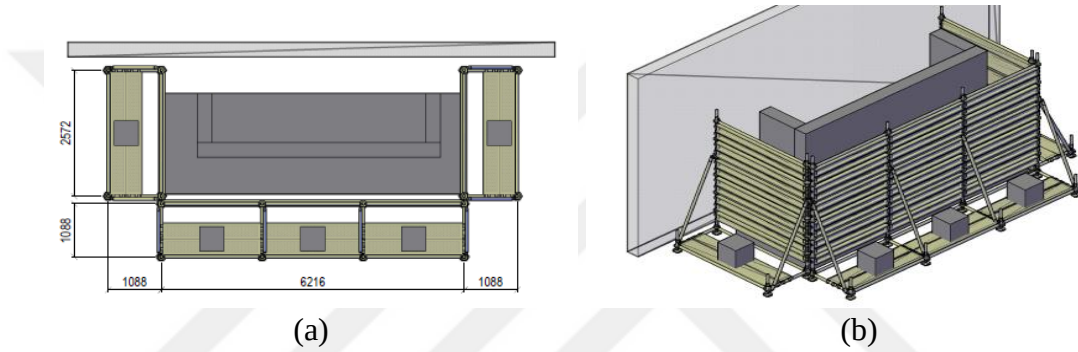
Şekil 3.24 Aktivatörün yerleştirilmesi ve gerekli kontrollerin yapılması (Kişisel arşiv, 2018)

Temsil ettiği gerçek yapıdaki durumu göz önüne alınarak duvar numunesi üzerine ilave herhangi bir ağırlık yerleştirilmeyecek, düzlemdışı doğrultudaki hareketini kısıtlayacak başkaca bir yapısal eleman da eklenmeyecektir. Duvar numunelerine uygulanacak düzlemdışı yanal yüklerin, bileşkesi numunenin kütle merkezinden geçecek şekilde duvar yüzeyine yarı-statik noktasal yükler olarak uygulandığı örnekler uluslararası literatürde bulunmaktadır (Bölüm 2.2.2). Planlanan testlerde de düzlemdışı yükler, benzer şekilde bir yük dağıtma plakası kullanılarak numuneye dört temas noktasından uygulanacaktır (şekil 3.25). Yükleme altında numune şekil değiştirecek olup bu durumda temas noktalarından numune üzerine iletilecek yükün üniform kalabilmesi için imal edilen dağıtma plakası ile aktivatör arasındaki mafsal küresel özellikte seçilmiştir. Bu mafsal, her iki eğilme doğrultusunda serbestçe dönebilmektedir. Plakanın kendi ağırlığı ile kontrolsüz şekilde dönmesine ve duvar üzerine ilave yükler iletmesine engel olmak için, plaka üzerine elik halat ve yaylardan oluşan bir denge sistemi monte edilmiş ve plakanın öngörülen açıda kalması sağlanmıştır. Kurulan sistem sayesinde numuneye iletilecek pozisyon kontrollü yükler dört noktadan, tek yönlü (sadece itme yönünde) yarım çevrimler şeklinde uygulanacaktır.



şekil 3.25 Yük dağıtma erevesi (Kişisel arşiv, 2018)

Yürütülecek testlerin, numunelerin güç tükenmesi anına kadar sürdürülmesi planlanmaktadır. Bu durumda numuneden kopabilecek parçaların serbest düşmesine engel olmak için düzlemsiz devrilmeyi önleyici modüler bir iskele sistemi tasarlanmış ve kullanılmıştır (Şekil 3.26). Testlerde kullanılacak Opkon DWP 900D potansiyometrik cetvel ve Leuze ODSL 9/V6 optik mesafe sensörlerinin mevcut veri toplama sistemi ile bağlantıları yapılarak kalibre edilmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.27). Testler sırasında üç adet TDG marka TextBox1001 model veri toplama sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.26 Koruma iskelesi (a) plan boyutları ve (b) izometrik görünüşü (ölçüler mm'dir)



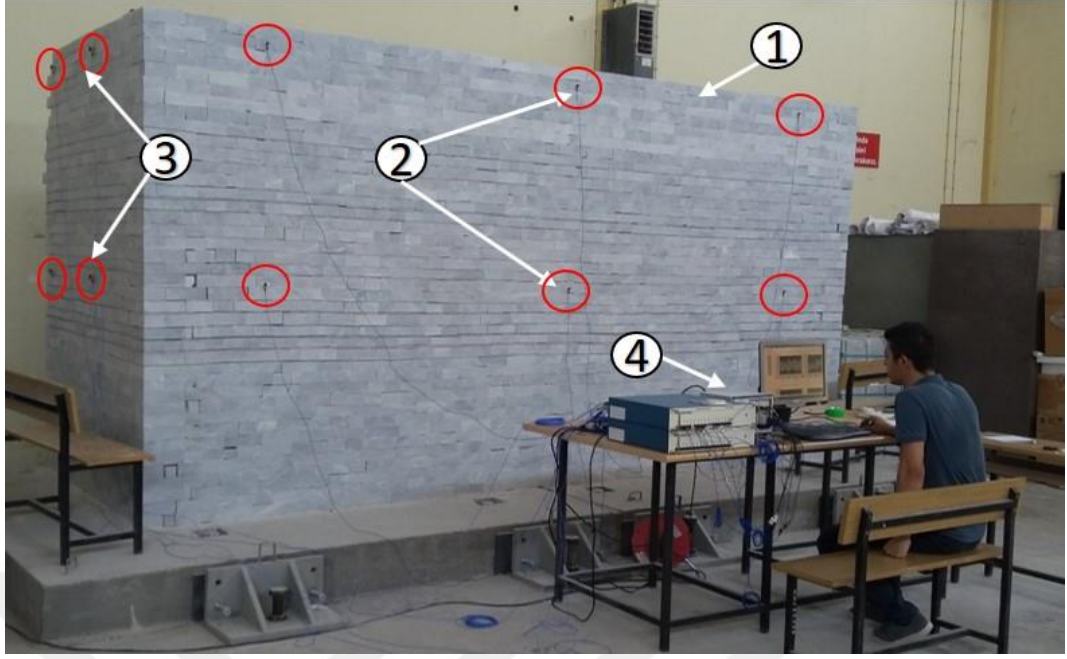
Şekil 3.27 Sensörlerin veri toplama sistemine bağlanması ve kalibrasyonu (Kişisel arşiv, 2019)

3.2.3 Duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri

Laboratuvarda inşa edilen ve sunulan tez kapsamında değerlendirilen S1 ve S2 yığma duvar numunelerinin dinamik karakterlerinin ve oluşturulacak sonlu elemanlar modellerinin elastik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında 4 adet üç eksenli ve 6 adet tek eksenli piezoelektrik ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerler $\pm 5g$ tam ölçekli ve 0,25-300 Hz frekans bandında olup 1000 mV/g hassasiyetlidir. Kullanılan veri toplama sistemi, eşzamanlı örnekleme özelliğine sahip PXI-4472 A/D kartı ve kenar yumuşatma filtrelerinden oluşan bir NI-PXI sistemidir. Gerçekleştirilen testler ve OMA sonuçları alt başlıklar halinde sunulmuştur.

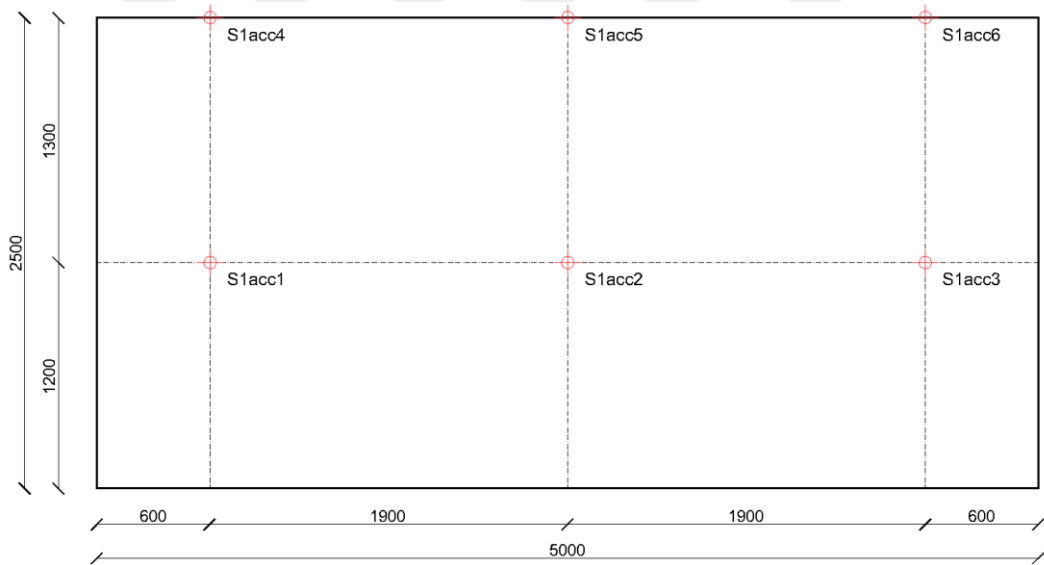
S1 numunesi

Numune üzerinde iki set halinde test gerçekleştirilmiştir. İlk test setinde 6 adet tek eksenli ivmeölçer pozitif yön duvar düzlemine dik ve içeri doğru olacak şekilde cephe duvarı üzerine, diğer 4 adet üç eksenli ivme ölçer ise yine pozitif yönü duvar düzlemine dik ve içeri doğru olacak şekilde sol kanat duvarına yerleştirilmiştir (Şekil 3.28). İkinci test setinde ise cephe duvarı üzerinde bulunan 6 adet ivmeölçer referans olarak tutulup sol kanat duvarında bulunan 4 adet ivmeölçer sağ kanat duvarına simetrik olarak taşınmıştır. Ortamsal titreşim test ortamı genel görünümü Şekil 3.28’de verilmiştir. Her test setinde 15 dakika dinamik veri alınmış olup örnekleme frekansı 1000 Hz olarak seçilmiştir. S1 numunesi üzerine uygulanan ivmeölçerlerin yerleşim planı Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da verilmiştir.

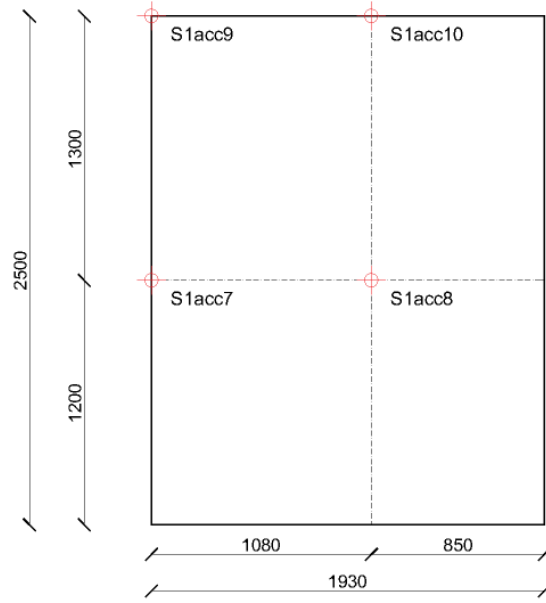


(1) S1 numunesi, (2) Tek eksenli ivmeölçerler, (3) Çok eksenli ivmeölçerler, (4) Veri toplama sistemi

Şekil 3.28 S1 numunesi ortamsal titreşim test ortamının genel görünümü (Kişisel arşiv, 2019)

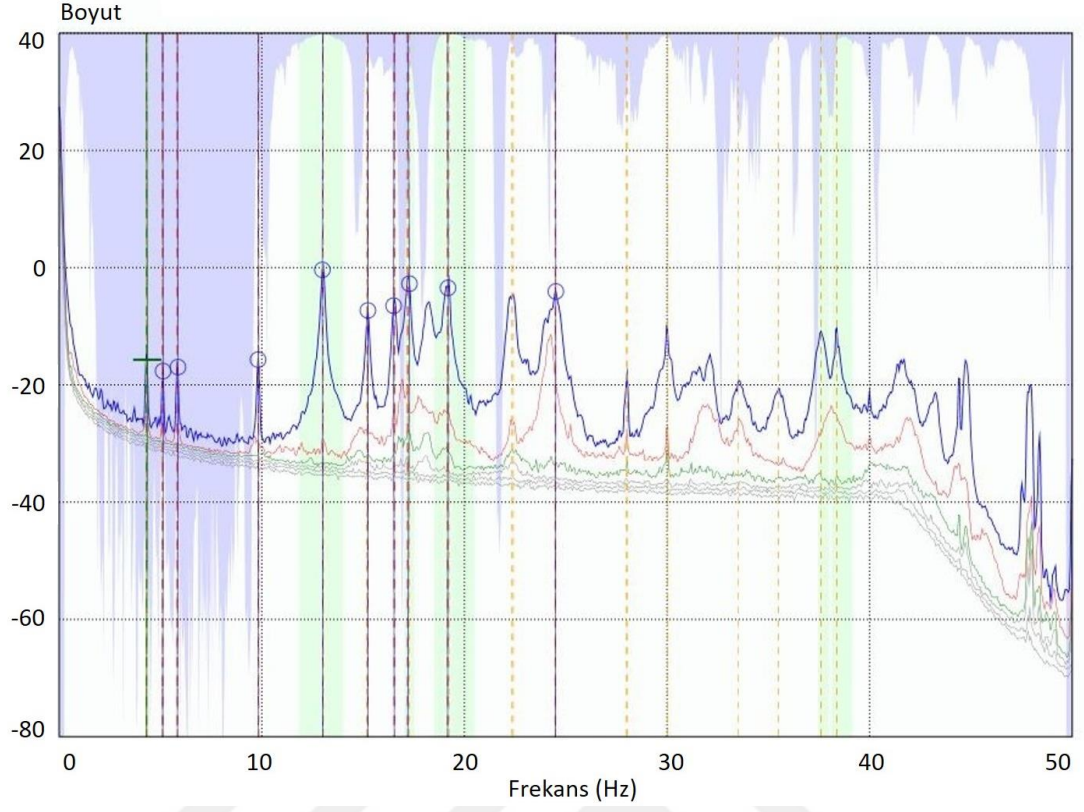


Şekil 3.29 S1 numunesi cephe duvarı üzerine uygulanan ivmeölçer yerleşim planı (ölçüler mm'dir)



Şekil 3.30 S1 numunesi kanat duvarları üzerine uygulanan ivmeölçer yerleşim planı (ölçüler mm'dir)

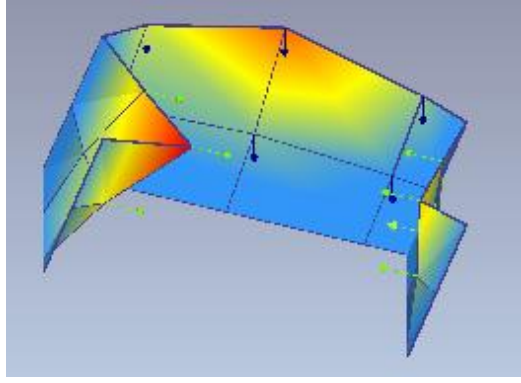
Testler sonunda elde edilen ivme verisi üzerinde operasyonel modal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.1.2’de verilmiştir. Modal parametreler, EFDD yönteminde her iki test setinde elde edilen ivme verilerinin birleştirilmesi ile elde edilmiş olup Şekil 3.31’de spektral matrisin tekil değer ayrışımı sonucunda elde edilen serbest titreşim frekans değerleri gösterilmiştir. Duvarların düzlemdışı doğrultudaki davranışı incelendiğinden, ivmeölçerlerin bu doğrultuda yerleştirilmesi sonucu ilgili doğrultudaki 10 adet mod şekli ve karşılık gelen frekans değerleri elde edilmiştir (Tablo 3.4). Ayrıştırılan mod şekilleri ve oluşturulan sayısal modeldeki karşılıkları ise ilk üç mod için Şekil 3.32’de sunulmuştur. Sayısal modele ait detaylar Bölüm 4.1.2’de model güncelleme çalışmaları kısmında verilmiştir.



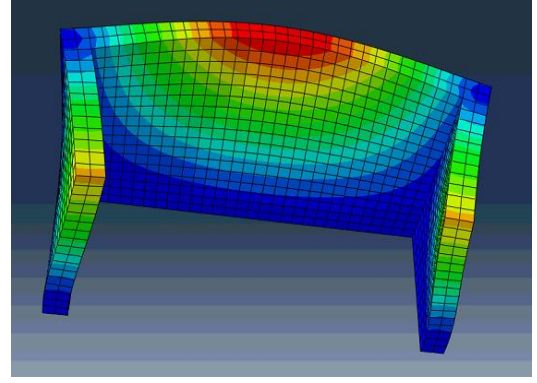
Şekil 3.31 S1 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen tekil değer grafiği

Tablo 3.4 S1 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen frekans, sönüm ve karmaşıklık değerleri

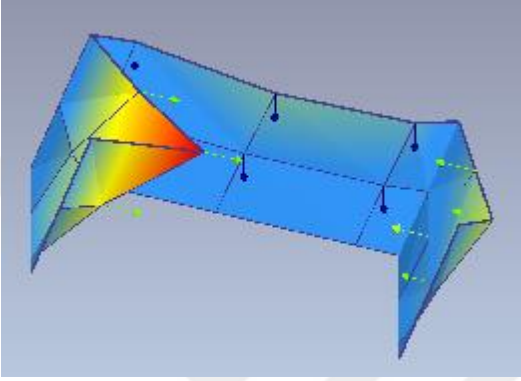
Mod	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	Karmaşıklık (%)
1.	4,297	0,732	0,185
2.	5,078	0,712	0,309
3.	5,859	0,573	0,225
4.	9,826	0,474	0,597
5.	13,016	0,448	0,084
6.	15,228	0,420	1,276
7.	16,537	0,419	2,601
8.	17,201	0,451	1,145
9.	19,172	0,512	0,782
10.	24,488	0,403	1,217



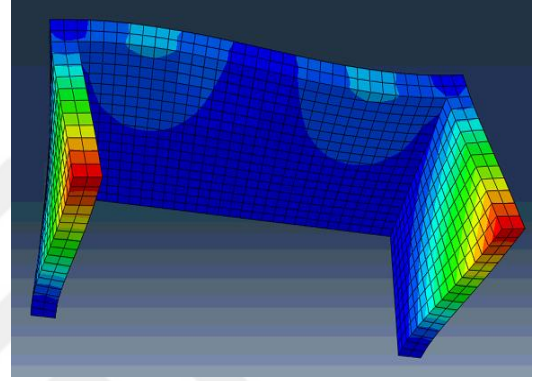
Deneysel 1. mod



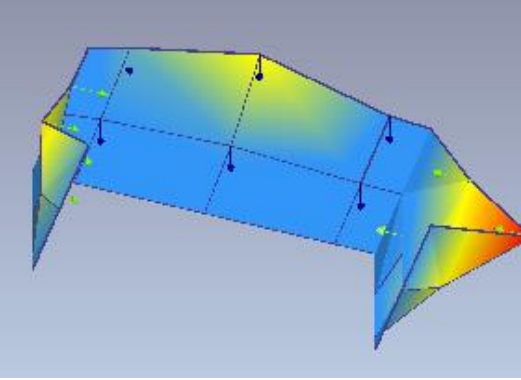
Sayısal 1. mod



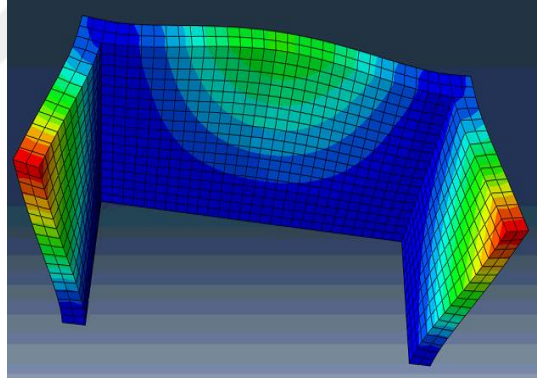
Deneysel 2. mod



Sayısal 2. mod



Deneysel 3. mod



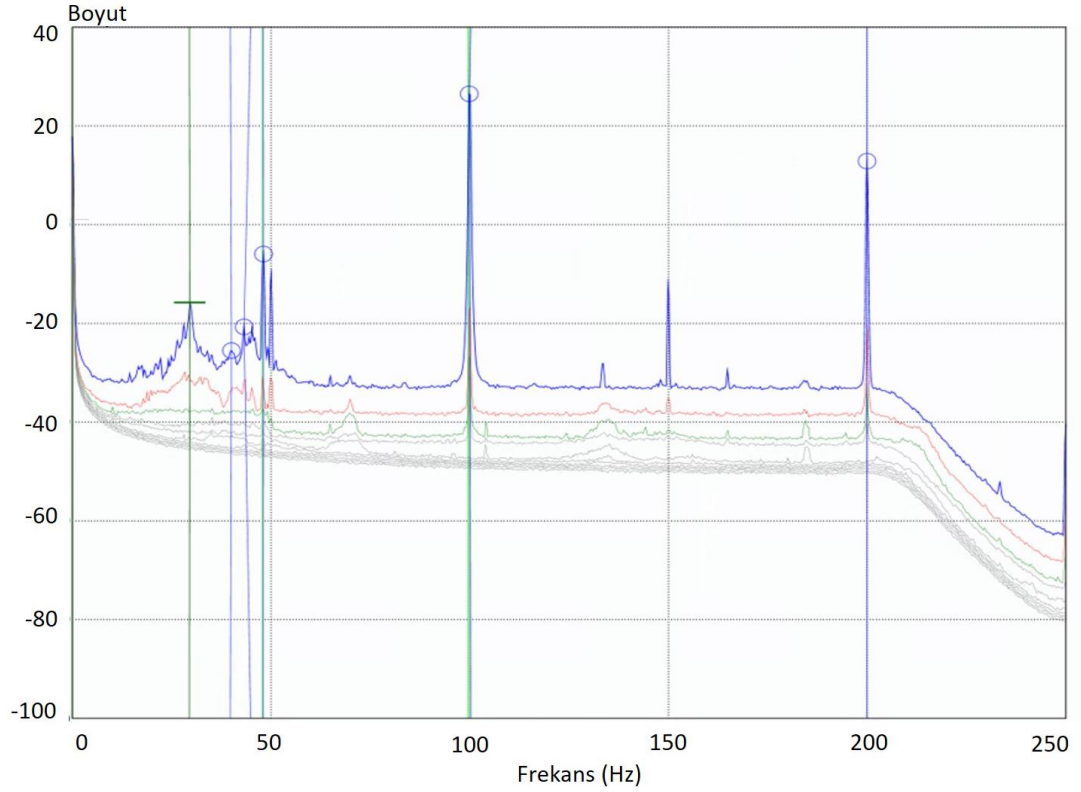
Sayısal 3. mod

Şekil 3.32 S1 numunesi için deneysel ve sayısal ilk üç mod şeklinin karşılaştırılması

S2 numunesi

S1 numunesi üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testi aşamaları ve ivme ölçer yerleşim planına ait detaylar bir önceki alt başlıkta verilmiştir. S1 numunesi ile aynı tipte olan harçlı birleşimli S2 numunesi için de aynı test ve analiz prosedürü uygulanmıştır. Modal parametreler, EFDD yöntemiyle her iki test setinde elde edilen ivme verilerinin birleştirilmesi ile elde edilmiş olup Şekil 3.33’de spektral matrisin

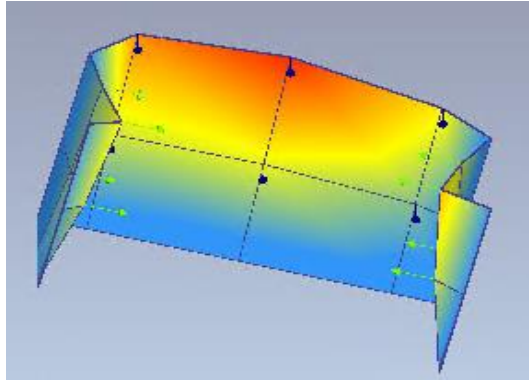
tekil değer ayrışımı sonucunda elde edilen serbest titreşim frekans değerleri gösterilmiştir. Elde edilen modlara ait frekans ve sönüm değerleri Tablo 3.5’de verilmiştir. Bu frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri ve oluşturulan sayısal modeldeki karşılıkları, benzeşim sağlanan iki mod için Şekil 3.34’de sunulmuştur. Sayısal modele ait detaylar Bölüm 4.1.2’de verilmiştir.



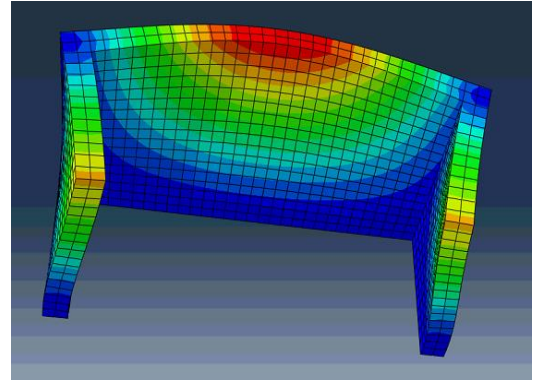
Şekil 3.33 S2 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen tekil değer grafiği

Tablo 3.5 S2 numunesi için EFDD yöntemiyle elde edilen frekans, sönüm ve karmaşıklık değerleri

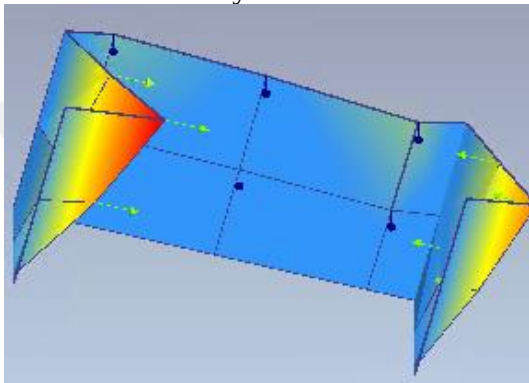
Mod	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	Karmaşıklık (%)
1.	29,381	4,043	0,724
2.	39,756	2,191	13,152
3.	44,813	3,560	2,169
4.	48,041	0,337	4,005
5.	100,241	0,341	3,429
6.	199,937	0,050	1,770



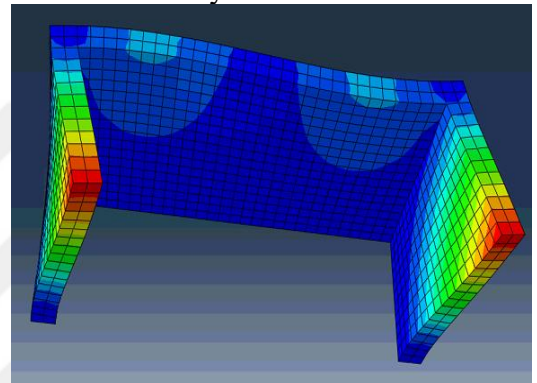
Deneyisel 1. mod



Sayısal 1. mod



Deneyisel 3. mod



Sayısal 2. mod

Şekil 3.34 S2 numunesi için deneyisel ve sayısal olarak benzeştirilen iki mod şeklinin karşılaştırılması

S1 ve S2 laboratuvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri ve operasyonel modal analizler sonucunda S1 numunesi için ilk 10 mod, S2 numunesi için ise ilk 6 mod belirlenmiştir. Bu bölümde karşılaştırması yapılan deneyisel ve sayısal modlar arasındaki uyumluluğu tanımlamak için kullanılan MAC değerleri Bölüm 4.1.2’de verilmiştir.

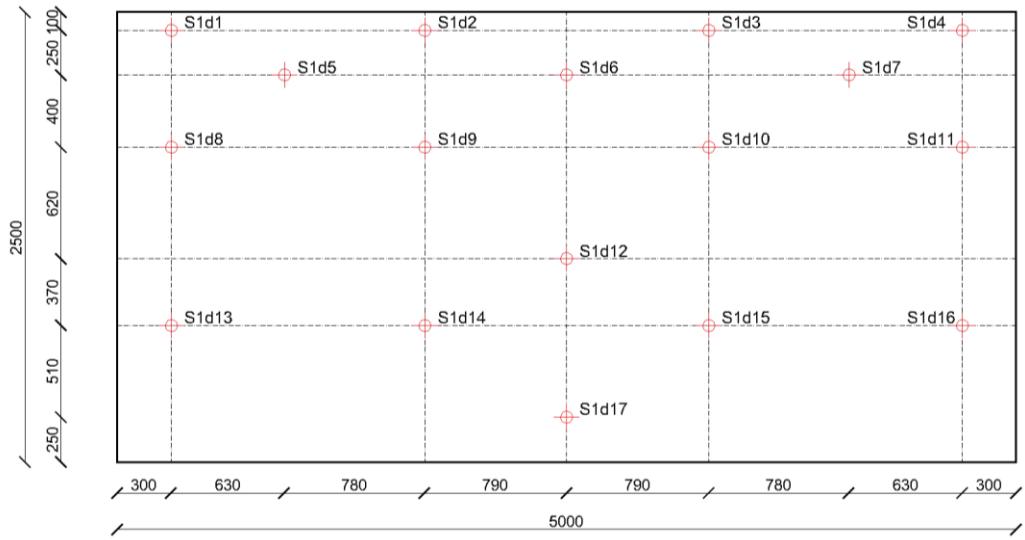
Düşey ve yatay derzleri harçlı olarak imal edilen S2 numunesinin, S1 numunesine kıyasla belirgin rijitlik artışından (ilk üç mod için yaklaşık 50 kat) dolayı ortamsal titreşim testleri ile uyarılabilen mod sayısında bir azalma gerçekleşmiştir (Tablo 3.4 ve Tablo 3.5). Ayrıca, bu rijitlik artışı sebebiyle, elde edilen mod şekillerinin hem gerçek hem de sanal bileşenlerinden kaynaklı olan karmaşıklık değerinde de belirgin bir artış olmaktadır. Sönüm oranının belirlenmesindeki yüksek belirsizliklerden dolayı, hesap sonucu bulunan sönüm değerleri arasında bir kıyaslama yapılmamıştır.

3.2.4 Duvar numuneleri üzerinde yürütülen düzlemdışı yarı-statik testler ve ön sonuçlar

Bu bölümde, gerçekleştirilen iki adet duvar numunesinin düzlemdışı yarı-statik testleri hakkında detay bilgiler ve test sonuçları üzerine değerlendirmeler verilmiştir. Bölüm 3.2.2’de tanımlanan Tip-1 geometrik boyutlarına sahip numunelerden ilki kuru birleşimli S1 numunesi, diğeri ise hem düşey hem de yatay derzleri harçlı olarak imal edilen S2 numunesidir.

S1 numunesi

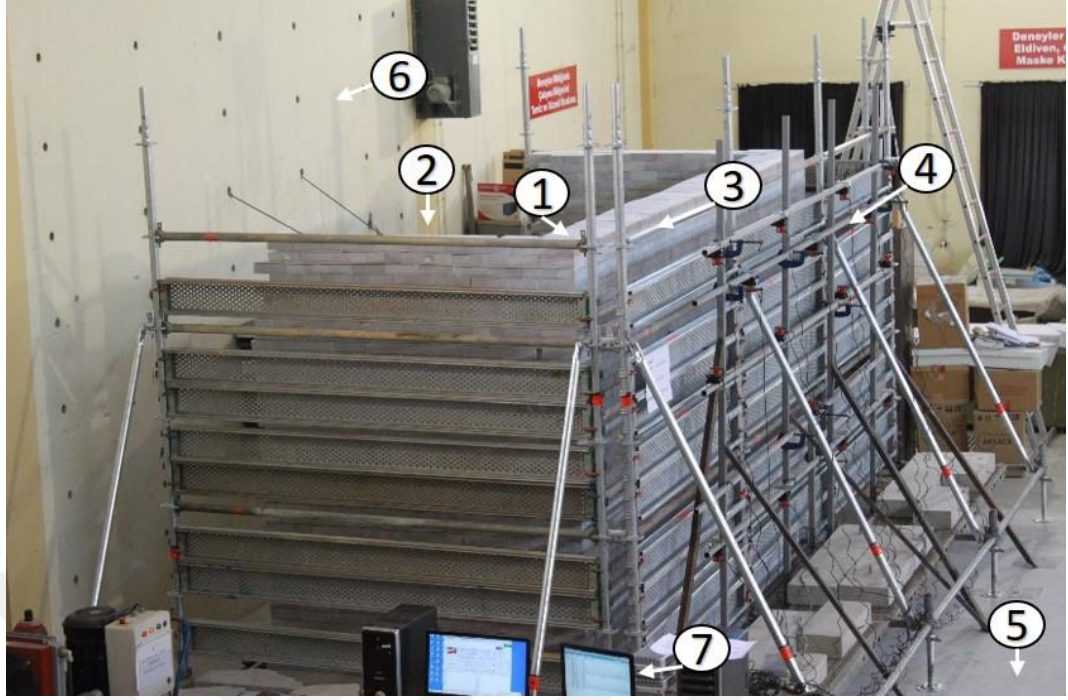
Gerçek hayatta karşılaşılan kuru birleşimli kesme taş yapıları temsil etmesi amacıyla üretilen S1 numunesi, birbirine girişim halinde bulunan kalınlık boyunca üç sıra duvar birimlerinin duvar yüksekliği boyunca şaşırtmalı şekilde yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Testler öncesinde numune çevresine modüler çelik elemanlardan oluşturulan bir koruma iskelesi kurulmuştur. Ayrıca, bu iskeleye temas etmeyecek şekilde konumlandırılmış bir referans çerçeve üzerine, test boyunca numunenin düzlemdışı hareketini inceleyebilmek için toplam 17 adet ipli deplasman ölçer (*stringpot*) yerleştirilmiştir. Düzlemdışı yük altında duvarın mesnet bölgelerine uzak (üst-orta) bölgelerin sergileyeceği deplasmanlar görece yüksek olacağından, sensörler bu bölgelere daha yoğun şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.35). Sensörlerin cephe duvarı üzerindeki yerleşimi Şekil 3.36’da verilmiştir. Deplasman ölçerlerin duvar ile bağlantısı, duvara silikon malzeme kullanılarak yapıştırılan pullar ile sağlanmıştır (Şekil 3.38). Genel test görünümü ve bileşenleri Şekil 3.37’de sunulmuştur.



Şekil 3.35 S1 numunesi deplasman ölçer yerleşim planı (ölçüler mm'dir)



Şekil 3.36 S1 numunesi deplasman ölçer yerleşimi (Kişisel arşiv, 2019)



(1) S1 numunesi, (2) Yükleme sistemi, (3) Koruma iskelesi, (4) Referans çerçeve, (5) Güçlü zemin, (6) Güçlü duvar, (7) Veri toplama sistemi

Şekil 3.37 S1 numunesi düzlemdışı yarı-statik test ortamının genel görünümü (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 3.38 İpli ölçerlerin kullanımına bir örnek (Kişisel arşiv, 2019)

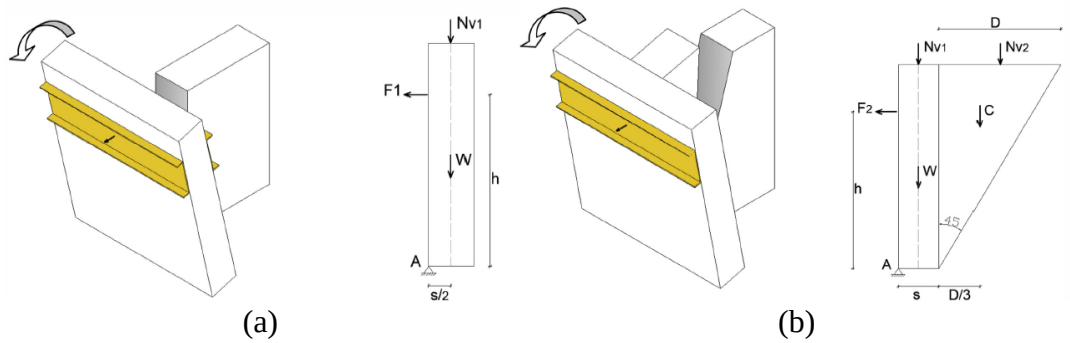
Düzlemdışı yüklerin uygulandığı dört noktada yüklerin, uygun rijitlikte yük dağıtma plakaları (50 x 100 cm) ile geniş alanlara yayılması sağlanmıştır (Şekil 3.39). Yük dağıtma plakalarının test boyunca duvar yüzeyinde sabit kalabilmesi için çevrimsel yük boşaltma sırasında her bir çevrimde en az 200 kgf yük duvar üzerinde bırakılmıştır. Esas alınan mekanizma durumları Şekil 3.40'da ve numunenin cephe duvarı üzerinde seçilen iki noktaya ait (S1d12 orta nokta ve S1d2 tepe noktası)

kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de sunulmuştur. İlk yükleme aşamasında 200 kgf yük değerine kadar ölçülen deplasman değerleri sıfıra çok yakın değerler olduğundan anlamlı olarak elde edilememiş ve grafiklerden çıkarılmıştır. Numunenin (a) 50 mm, (b) 80 mm ve (c) 110 mm tepe ötelenmesine karşılık gelen şekil değiştirmiş hali Şekil 3.43’de verilmiştir. Küçük ötelenme değerlerinde cephe duvarının eğilme davranışı ile cephe duvarı ve kanat duvarlarının kesişim noktalarında ayrılmalar başlamıştır. Yüksek ötelenmelerde ise kanat duvarlarda düşey derzlerde ayrılma ve cephe duvarında yatay derzlerde açılma şeklinde bir hasar profili oluşmuştur.

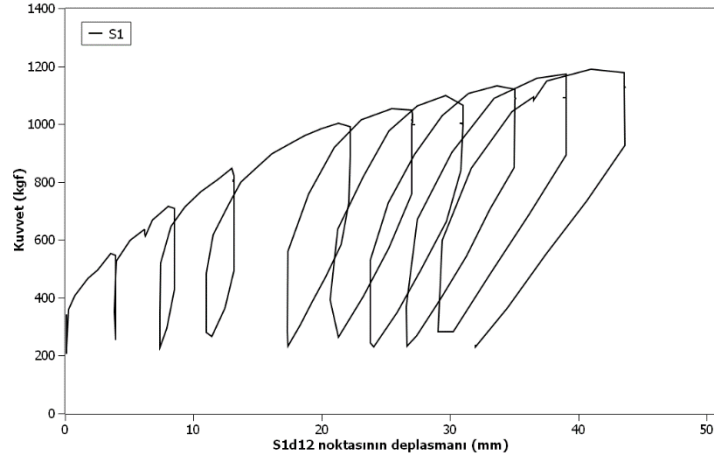


(1) Yükleme sistemi, (2) Yarı rijit yük dağıtma plakaları

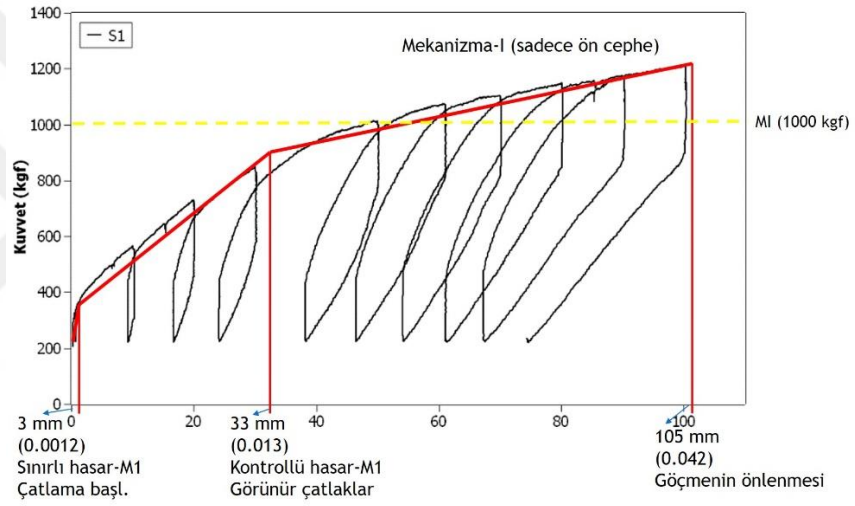
Şekil 3.39 S1 numunesine uygulanan yüklerin yayılması (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 3.40 (a) Mekanizma I (MI) ve Mekanizma II (MII) (Maddaloni ve diğer., 2016)



Şekil 3.41 S1 numunesi cephe duvarı orta noktasının (S1d12 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.42 S1 numunesi cephe duvarı tepe orta noktasının (S1d2 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği ve hasar limitlerinin tayini



(a) 50 mm



(b) 80 mm



(c) 110 mm

Şekil 3.43 S1 numunesinin (a) 50 mm, (b) 80 mm ve (c) 110 mm tepe ötelenmesi anında şekil değiştirmiş hali (Kişisel arşiv, 2019)

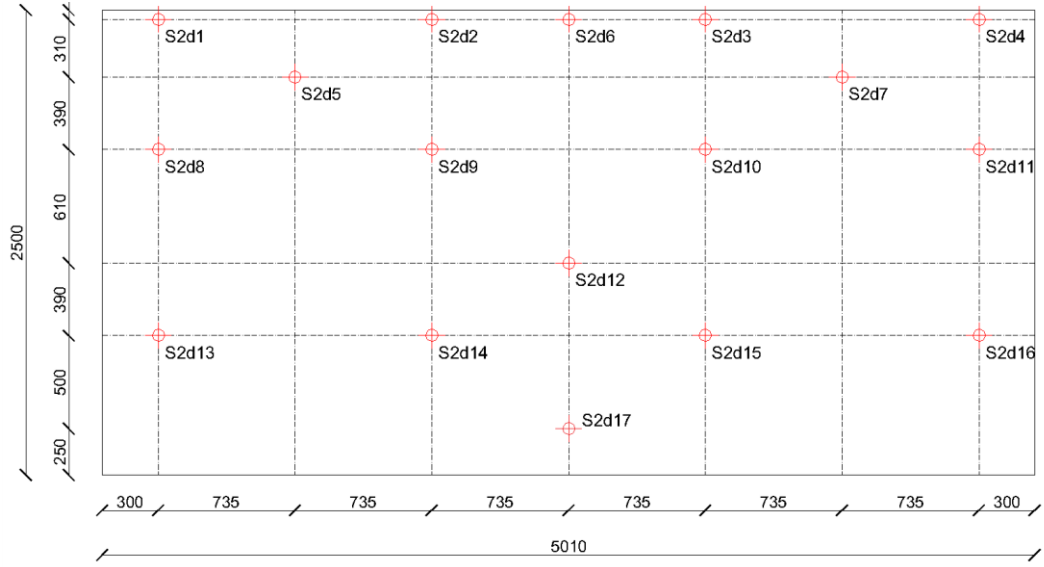
S2 numunesi

Testleri gerçekleştirilen S2 numunesi (şekil 3.44), bir önceki alt başlıkta verilen S1 numunesi ile aynı geometrik ölçüler ve örgü tipine sahip olup tek fark olarak düşey ve yatay derzleri harçlı olarak inşa edilmiştir. Numune aynı test ortamında denenmiştir. Numunede kullanılan harcın karakteristikleri Bölüm 3.1.4’de verilmiştir.



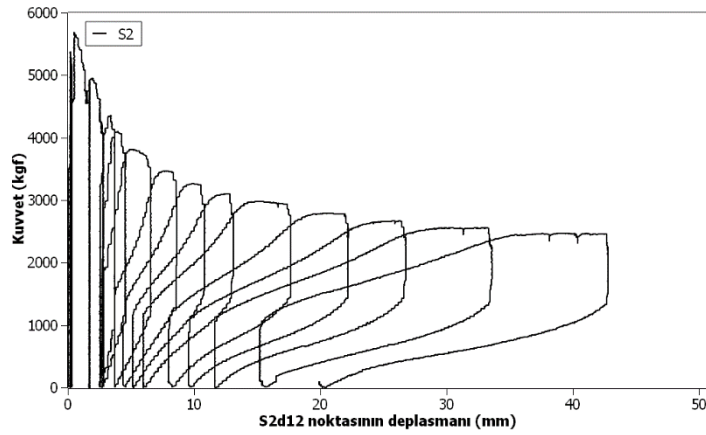
şekil 3.44 S2 numunesi dzlemdiş yarı-statik test ortamının genel görünümü (Kişisel arşiv, 2019)

S1 numunesi için uygulanan deplasman ölçer yerleşim planında ‘d6’ kodlu deplasman ölçer, bu numunede cephe duvarının orta bölümünün en st seviyesine yerleştirilmiştir. Uygulanan deplasman ölçer yerleşim planı şekil 3.45’de verilmiştir.

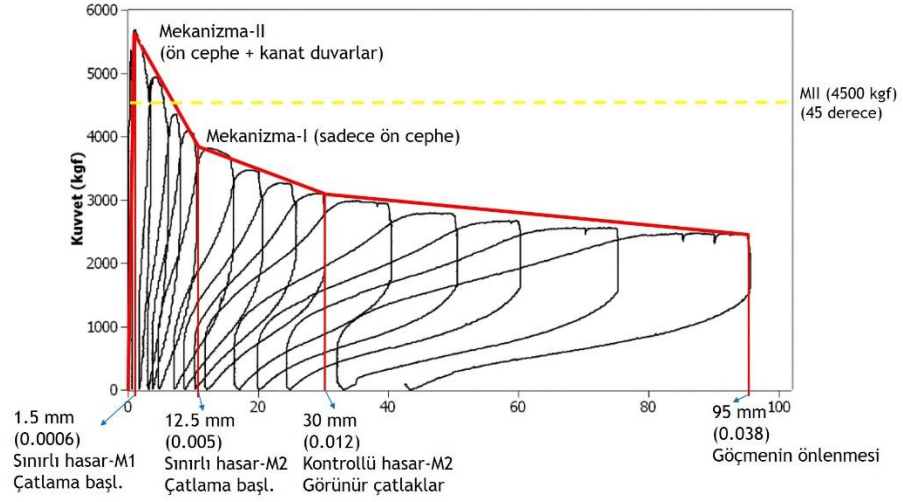


Şekil 3.45 S2 numunesi deplasman ölçer yerleşim planı (ölçüler mm'dir)

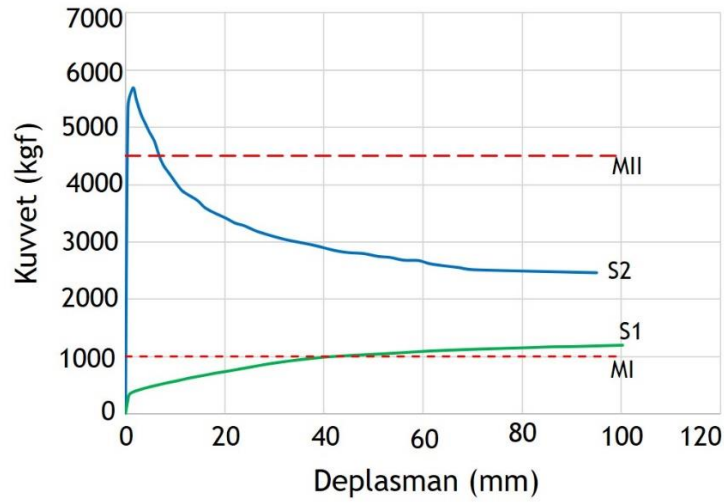
Numunenin cephe duvarı üzerinde seçilen iki noktaya ait (S2d12 orta nokta ve S2d6 tepe noktası) kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de sunulmuştur (Ötelenme oranları parantez içinde verilmiştir). Testi gerçekleştirilen S2 numunesi için hasar mekanizması tanımlamaları ve çatlak profiline ilişkin bulgular Bölüm 4.2.2'de, mezo ölçekli sayısal modelin simülasyonu çalışmaları ile detaylandırılacaktır.



Şekil 3.46 S2 numunesi cephe duvarı orta noktasının (S2d12 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 3.47 S2 numunesi cephe duvarı tepe orta noktasının (S2d6 sensörü) kuvvet-deplasman grafiği ve hasar limitlerinin tayini



Şekil 3.48 S1 ve S2 numuneleri için tepe yükü-tepe deplasmanı zarf eğrileri ve esas alınan mekanizma durumları kıyaslaması

BÖLÜM DÖRT

SAYISAL MODELLEME

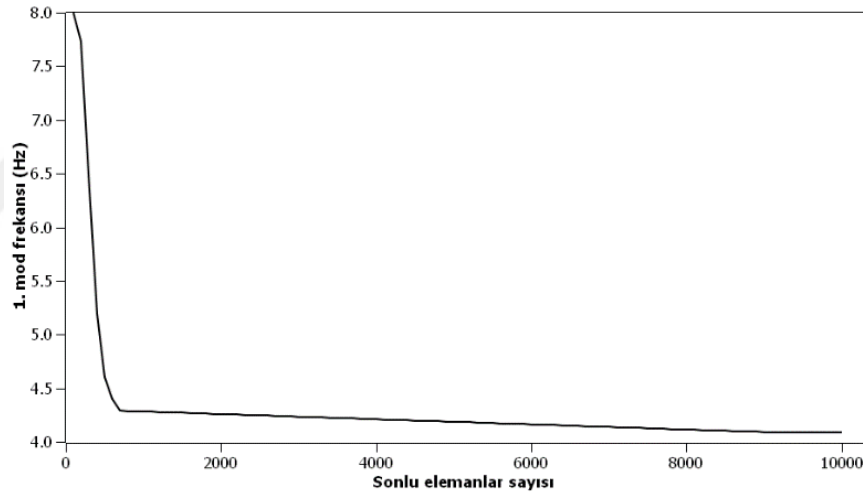
4.1 Operasyonel modal analiz ile model kalibrasyonu

Tarihi yığma yapıları oluşturan duvarların sismik davranışının doğru bir şekilde modellenmesi, karmaşık malzeme davranışı ve yapı elemanlarının sınır koşullarının belirsizliği ile birlikte zorlaşmaktadır. Bu nedenle oluşturulacak sayısal modelin, gerçek yapı üzerinde yürütülecek gözlemsel ve deneysel yöntemler ile kalibre edilmesi gerekmektedir (Gentile ve diğer., 2015; Costa ve diğer., 2016; Mısır ve diğer., 2017). Tez kapsamında incelenen tarihi İsabey Camii yapısının avlu duvarları üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri Bölüm 3.1.2’de verilmiştir. Bu bölümde ise, yapı geometrisi göz önünde bulundurularak oluşturulan sonlu elemanlar modelinin titreşim testi verisi kullanılarak kalibre edilmesi üzerine yürütülen çalışmalar detaylandırılmaktadır.

4.1.1 *İsabey Camii avlu duvarlarının model kalibrasyonu*

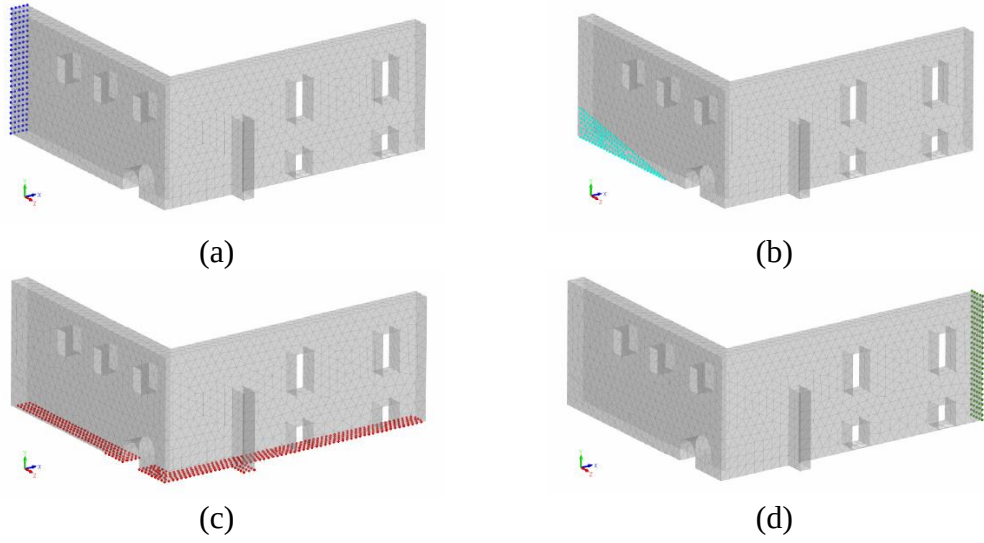
Tarihi İsabey Camii avlu duvarı üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri ve bu test verisi kullanılarak tamamlanan operasyonel modal analiz (OMA) sonuçları Bölüm 3.1.2’de verilmiştir. Bu bölümde, incelenen yapı duvarlarını temsilen kurulan sonlu elemanlar modelinin FEMtools yazılımı (FEMtools, 2017) ile modal kalibrasyonu süreci verilmiştir. Öncelikli olarak yapının ön sayısal modeli makro modelleme tekniği ile ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. Sistemin dinamik özelliklerini temsil edecek oldukça basit bir sayısal model seçmenin, model güncelleme çalışmalarında yakınsama problemlerinin çözümü için önemli olduğu bilinmektedir (Özçelik ve diğer., 2018). Sonlu elemanlar modelinde üç boyutlu ve on noktalı (C3D10) sürekli ortam elemanları kullanılmıştır. Modelin geometrik ölçüleri Şekil 3.3’de verilmiştir. Oluşturulan sayısal modele tanımlanan malzeme parametreleri Bölüm 3.1.5’de verilen Flat-jack testlerine ait sonuçlar ve literatürde var olan benzer yapılar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Başlangıç malzeme parametreleri birim hacim ağırlığı (ρ), elastisite modülü (E) ve

poisson oranı (ν) değerleri sırasıyla 2400 kg/m³, 4535 MPa ve 0,25 olarak tanımlanmıştır. Küçük seçilen sonlu eleman ağı boyutu hatalı ve yetersiz modellere yol açarken, daha büyük seçilen sonlu eleman ağı boyutları kullanılarak oluşturulan modeller oldukça uzun hesaplama süresi ve karmaşıklığa yol açmaktadır. Bu nedenle, modelin optimum sonlu eleman ağı boyutlarını belirlemek önemlidir. Optimum sonlu eleman ağı boyutu ve buna bağlı optimum sonlu elemanlar sayısı, farklı sonlu eleman ağı boyutları için tekrarlanan frekans analizlerini içeren yakınsama analizinden belirlenmektedir. Sonlu eleman sayısı ve 1. mod frekansı arasındaki ilişki Şekil 4.1'de bir yakınsaklık grafiği ile verilmiştir. Burada, optimum sonlu eleman sayısı, frekans değerinin sabit kaldığı ilk noktadan (yatay eğri parçası) 9405 adet olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, ön sayısal model 16356 adet düğüm noktası ve 9405 adet sonlu elemandan oluşmaktadır.



Şekil 4.1 Yığma yapı örneği sayısal modelinin ilk moduna ait yakınsaklık grafiği

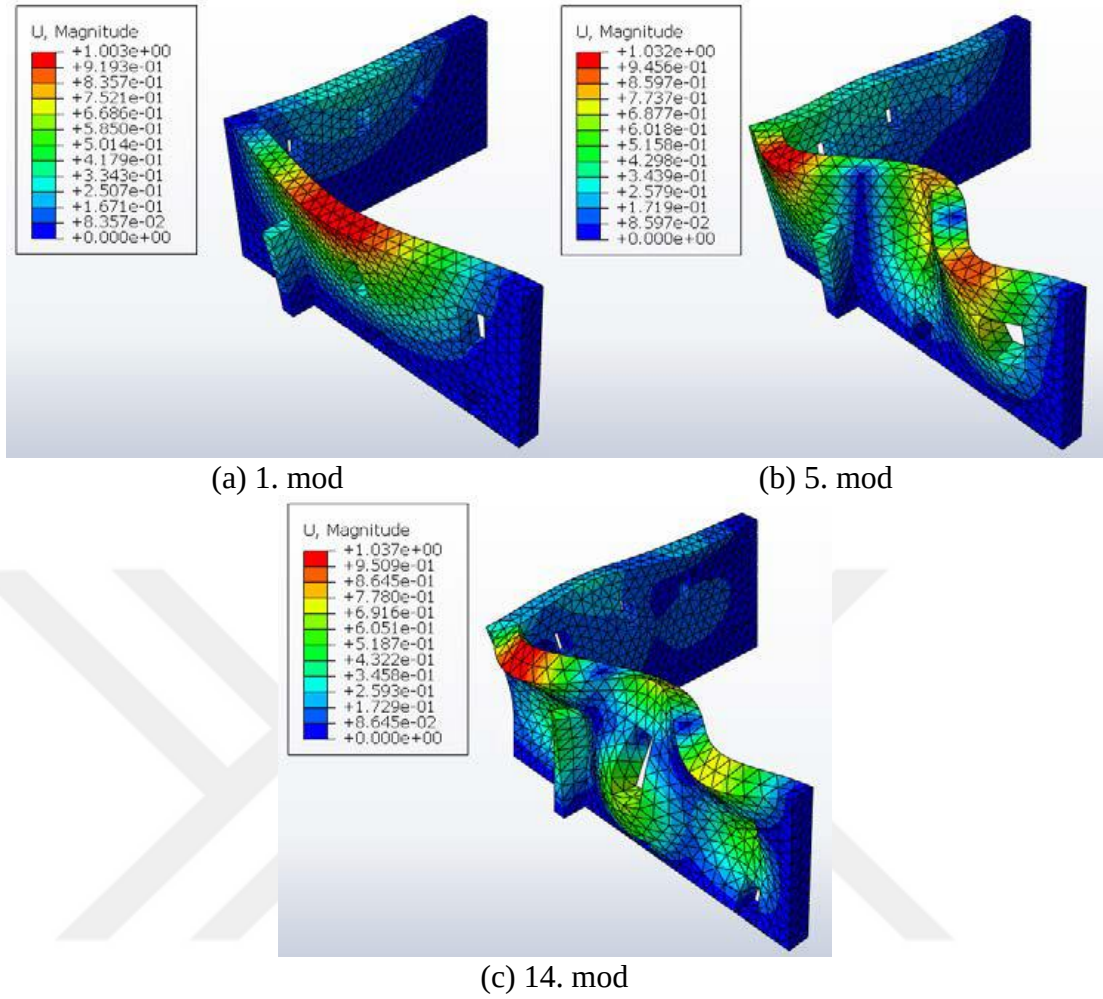
Yapı üzerindeki sınır koşulları, sayısal modele ötelenme serbestliklerinin (-x, -y ve -z) tutulması olarak yansıtılmıştır. Modelin tabanına, yan duvar yüzeylerine ve ayrıca kuzey cephe duvarı yüzeyinde var olan merdiven bölgesine sınır koşulu, ötelenme yayları ile tanımlanmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde uygulanan sınır koşullarının grupları konumlarına göre Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Sınır koşulu grupları (a) SG-1, (b) SG-2, (c) SG-3 ve (d) SG-4

Ön sayısal modelin modal analizi ABAQUS standart modül ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.3'de verilmiştir. Burada, sadece saha ölçümlerinden elde edilen modlara karşılık gelen modlar göz önünde bulundurulmuştur (1., 5. ve 14. mod). 1., 5. ve 14. modların doğal titreşim frekansı değerleri sırasıyla 3,765 Hz, 9,208 Hz ve 19,848 Hz olarak elde edilmiştir. Bütün modların, batı cephesi avlu duvarının düzlem dışı davranışını temsil ettiği belirtilmelidir.

Ön sayısal modelden (ABAQUS) ve deneylerden (ARTEMIS) elde edilen modal parametre sonuçları Tablo 4.1'de karşılaştırılmıştır. Tabloda, iki yöntemle elde edilen mod şekillerinin benzerlik oranı, tablo üzerinde modal güvence kriterleri (MAC) ile gösterilmiştir. (Allemang, 2003). Burada birim değere olan yakınlık daha yüksek benzerliği ifade etmektedir. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin %78'den yüksek MAC değerleri olduğundan oldukça iyi uyduğu söylenebilir. Bununla birlikte, frekans tahminleri için görece yüksek tutarsızlıklar elde edilmiştir (örneğin 3. mod için ~%7 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.



Şekil 4.3 Yığma yapı örneğinin ön sayısal modeline ait mod şekilleri (1., 5. ve 14. mod)

Tablo 4.1 Yığma yapı örneği sayısal ön modelin ve deneysel modların karşılaştırılması

Mod	Sayısal Ön Model	Deneysel	<i>Frek. Fark</i>	<i>MAC</i>
[Say. – Den.]	<i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frekans [Hz]</i>	[%]	[%]
1 - 1	3,765	3,906	-3,61	95,20
5 - 2	9,208	8,960	2,77	82,60
14 - 3	19,848	21,265	-6,66	78,30

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 Birim Hacim Ağırlık (ρ), Elastisite Modülü (E) ve sınır koşulu başlangıç yay rijitlikleri (k) seçilmiştir ve sırasıyla $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ ve $\pm 60\%$

güncelleme limitleri tanımlanmıştır. Güncelleme sonrası elde edilen frekanslar ve MAC değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2 Yığma yapı örneğinin kalibre edilmiş sayısal modelinin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)

Mod [Say. – Den.]	Sayısal Model <i>Frekans [Hz]</i>	Deneysel <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frek. Fark.</i> [%]	MAC [%]
1 – 1	3,765 (3,934)	3,906	-3,61 (0,71)	95,20 (94,90)
5 – 2	9,208 (9,008)	8,960	2,77 (0,53)	82,60 (76,30)
14 – 3	19,848 (21,011)	21,265	-6,66 (-1,19)	78,30 (77,80)

Tablo 4.2’den, güncellenen sonlu elemanlar modelinin doğal frekanslarının (parantez içindeki değerler) deneysel karşılıklarıyla neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Güncelleme işleminden önce ve sonra hesaplanan frekans farkları için önemli gelişmeler gözlenmiştir. Öte yandan, MAC değerlerinde ihmal edilebilir düzeyde düşüşler oluşmuştur. Model güncelleme sonrası elde edilen model parametreleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 Yığma yapı örneğinin ön ve güncel sayısal modeline ait model parametreleri

Model parametresi		Başlangıç	Güncel	Fark (%)
SG-1 [kN/m]	K _x	18000	18313	1,74
	K _z	9000	3951	-56,10
SG-2 [kN/m]	K _x	18000	19487	8,26
	K _z	9000	4418	-50,91
SG-3 [kN/m]	K _x	18000	17222	-4,32
	K _z	18000	23366	29,81
SG-4 [kN/m]	K _x	18000	13129	-27,06
	K _z	18000	23028	27,94
E [MPa]		4535	5177	14,15
ρ [kg/m ³]		2400	2507	4,44

4.1.2 Laboratuvar numunelerinin OMA ile model kalibrasyonu

S1 numunesi

S1 numunesi üzerinde gerçekleştirilen ortamsal titreşim testleri ve bu test verisi üzerinde yürütülen OMA çalışmaları Bölüm 3.2.3’de verilmiştir. İncelenen numunenin sonlu elemanlar modelinin modal kalibrasyonu FEMtools yazılımı (FEMtools, 2017) ile gerçekleştirilmiş ve detayları bu bölümde sunulmuştur. Öncelikle yapının ön sayısal modeli makro modelleme tekniği ile ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında üç boyutlu ve on noktalı (C3D10) sürekli ortam elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. S1 numunesi geometrik özellikleri ile oluşturulan sayısal modelin tabanına ankastre sınır koşulu tanımlanmıştır. Modelde birim hacim ağırlık değeri, numunede harç kullanılmadığı için boşluklu yapı göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Optimizasyon tabanlı kalibrasyon gerçekleştiren FEMtools yazılımı kullanılarak yapılacak model kalibrasyon işlemleri öncesinde, deneysel olarak elde edilen frekans değerleri göz önünde bulundurularak modele tanımlanacak elastisite modülüne karar verilmiştir. Sonuç olarak ön sayısal modele ait başlangıç malzeme parametreleri Birim Hacim Ağırlık (ρ), Elastisite Modülü (E) ve Poisson Oranı (ν) için sırasıyla 2200 kg/m³, 1000 MPa ve 0,25 değerleri tanımlanmıştır. Modelin optimum sonlu eleman ağı boyutunu belirlemek üzere Bölüm 4.1.1’de uygulanan yakınsaklık yöntemi tekrarlanmıştır.

Tablo 4.4 S1 numunesi sayısal ön modelinin ve deney modlarının karşılaştırılması

Mod [Say. – Den.]	Ön Say. Model <i>Frekans [Hz]</i>	Deneysel <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frek. Fark</i> [%]	<i>MAC</i> [%]
1 - 1	9,410	4,297	118,99	91,70
2 - 2	12,126	5,078	138,79	67,70
3 - 3	13,947	5,859	138,04	83,40

Ön sayısal modelden (ABAQUS) ve deneylerden (ARTEMIS) elde edilen modal parametre sonuçlarının karşılaştırılması ilk üç mod için Tablo 4.4’de sunulmuştur. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen 1. ve 3. moda ait mod şekillerinin %83’den

yüksek MAC değerleri olduğundan oldukça iyi uyduğu söylenebilir. Bununla birlikte, frekans tahminleri deneysel sonuçların uzağındadır. Bu açıdan, ön sayısal modelin numunenin dinamik davranışını uygun şekilde temsil etmediği ve belirsiz model parametresi olan elastisite modülünün (E), doğruluğu daha yüksek bir model elde etmek için güncellenmesinin gerekli olduğu görülmektedir.

Ön sayısal modelin kalibrasyonu FEMtools yazılımında *Bayesian* tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Güncelleme sırasında karşılaştırma parametresi olarak serbest titreşim frekansları ve MAC değerleri, güncellenecek model parametresi olarak da sadece elastisite modülü (E) seçilmiş, bu değer için $\pm 100\%$ güncelleme limiti tanımlanmıştır. Güncelleme sonrası elde edilen frekanslar ve MAC değerleri Tablo 4.5’de sunulmuştur.

Tablo 4.5 S1 numunesine ait kalibre edilmiş sayısal modelin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)

Mod [Say. – Den.]	Ön Say. Model <i>Frekans [Hz]</i>	Deneysel <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frek. Fark</i> [%]	MAC [%]
1 - 1	9,410 (4,131)	4,297	118,99 (-3,87)	91,70
2 - 2	12,126 (5,320)	5,078	138,79 (4,75)	67,70
3 - 3	13,947 (6,120)	5,859	138,04 (4,44)	83,40

Tablo 4.5’den, güncellenen sonlu elemanlar modelinin doğal titreşim frekanslarının (parantez içindeki değerler) deneysel karşılıklarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Güncelleme işleminden sonra hesaplanan frekansların deneysel değerlere oldukça yaklaştığı gözlenmiştir. Öte yandan, güncelleme parametresi olarak sadece elastisite modülü (E) tanımlandığından MAC değerlerinde değişme olmamıştır. Model güncelleme sonrası güncelleme parametresi olarak tanımlanan elastisite modülünün (E) yeni değeri 192 MPa olarak elde edilmiştir.

S2 numunesi

S2 numunesi için gerçekleştirilen sayısal model güncelleme çalışmaları, bir önceki alt başlıkta verilen ilkeler gözetilerek tamamlanmıştır. Ön sayısal modelden ve deneylerden elde edilen modal parametre sonuçlarının karşılaştırılması ile güncelleme sonrası elde edilen parametreler benzeştirilen iki mod için Tablo 4.6’da görülmektedir. Model güncelleme sonrası güncelleme parametresi olarak tanımlanan elastisite modülünün (E) yeni değeri 9740 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.6 S2 numunesine ait kalibre edilmiş sayısal modelin ve deneysel modların karşılaştırılması (parantez içindeki değerler güncelleme sonrasında elde edilmiştir)

Mod [Say. – Den.]	Ön Say. Model <i>Frekans [Hz]</i>	Deneysel <i>Frekans [Hz]</i>	<i>Frek. Fark</i> [%]	<i>MAC</i> [%]
1 - 1	9,410 (29,381)	29,381	-67,97 (0,00)	81,30
2 - 3	12,126 (37,837)	44,813	-72,94 (-15,57)	90,50

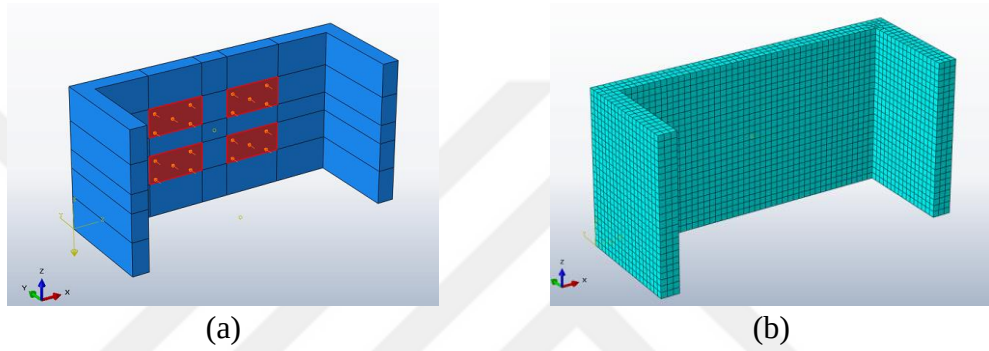
4.2 Düzlemsiz yarı-statik testlerin simülasyonu

4.2.1 Makro ölçekli sonlu elemanlar modeli ile simülasyon

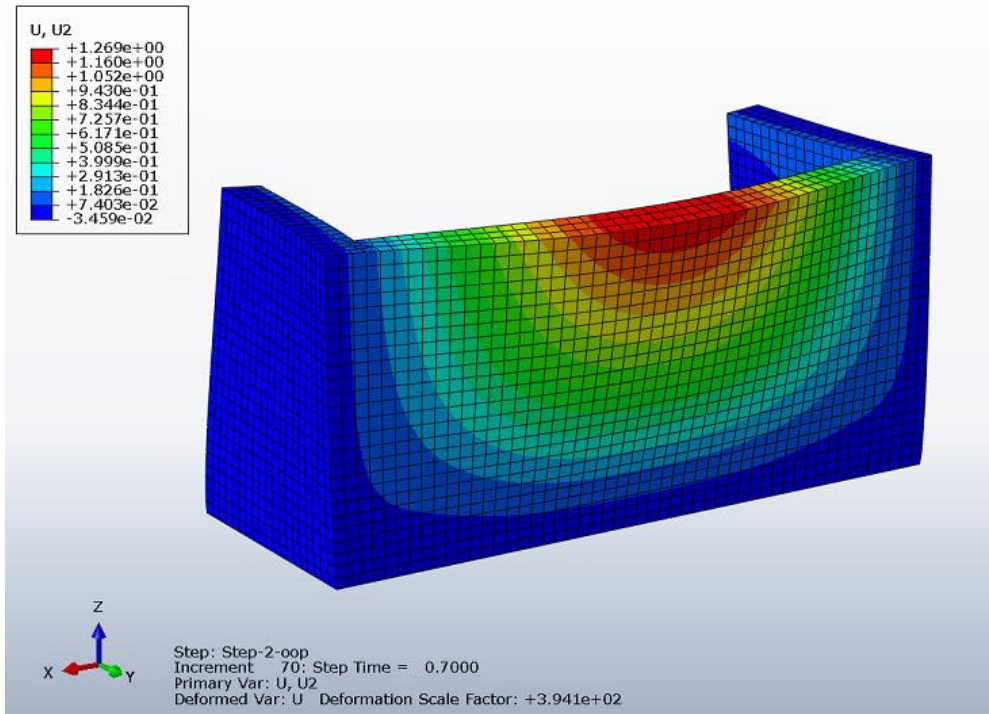
S1 numunesinin simülasyonu

Yarı-statik düzlemsiz yükleme testleri gerçekleştirilen kuru birleşimli S1 numunesinin üç boyutlu makro ölçekli sonlu elemanlar modeli ve bu modele ait elastik parametreler Bölüm 4.1.2’de tanımlanmıştır. Bu bölümde üzerine dört noktadan yarı-statik yükler uygulanan duvar numunesinin elastik tepkisini benzeştirmek için oluşturulan üç boyutlu makro ölçekli sonlu elemanlar modelinin (Şekil 4.4) sonuçları paylaşılmıştır. Bu amaçla, numuneye test aşamasında uygulanan yükler, sonlu elemanlar modeline de artımsal olarak uygulanmış ve referans olarak seçilen iki ölçüm noktasındaki deplasman değerleri sayısal model ve testler için karşılaştırılmıştır. Sayısal modelde 10 cm kübik boyutlarda 6325 adet sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 4.4b). Modelleme sırasında üç boyutlu sekiz düğüm noktalı

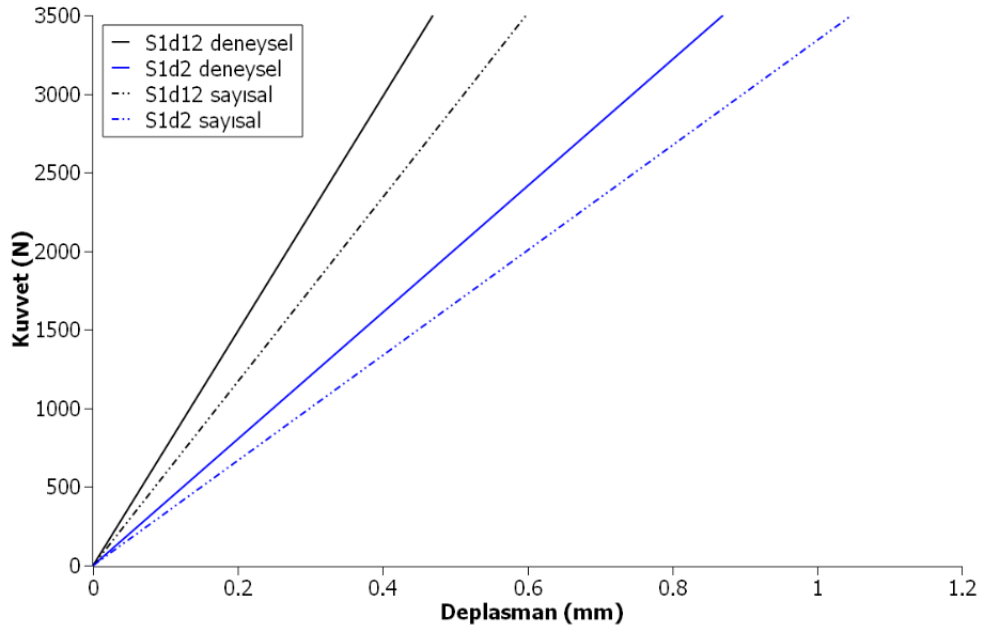
hexahedral C3D8R sürekli ortam elemanları kullanılmış ve oluşturulan model ABAQUS yazılımında standart modül ile analiz edilmiştir. Sayısal analiz sonucu yükleme doğrultusunda elde edilen şekil değiştirmiş hal Şekil 4.5’de, seçilen iki ölçüm noktası için (S1d12 ve S1d2) deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri ile kıyaslanması Şekil 4.6’da sunulmuştur. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen deplasman değerleri arasındaki sayısal fark milimetre mertebesinde olup oldukça düşük olmuştur. Bununla beraber, bu fark yaklaşık %25 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 S1 numunesinin (a) sonlu elemanlar modeli ve (b) sonlu eleman ağı



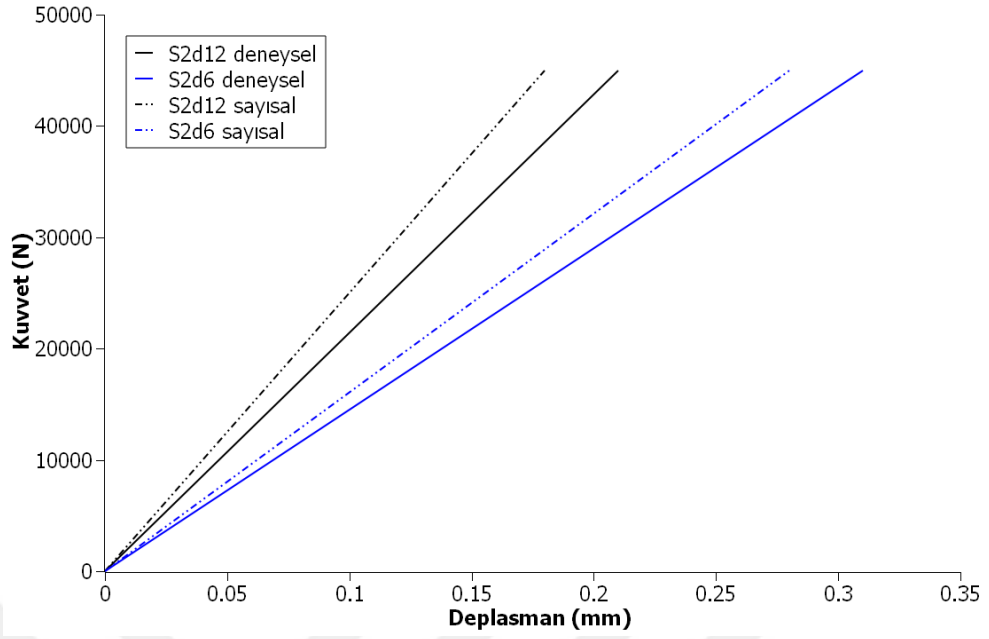
Şekil 4.5 S1 numunesinin makro ölçekli sayısal modelinin analizi sonucu elde edilen yer değiştirme profili



Şekil 4.6 S1 numunesi üzerinde yarı-statik yüklemelerin, seçilen iki ölçüm noktası için deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri ile kıyaslanması

S2 numunesinin simülasyonu

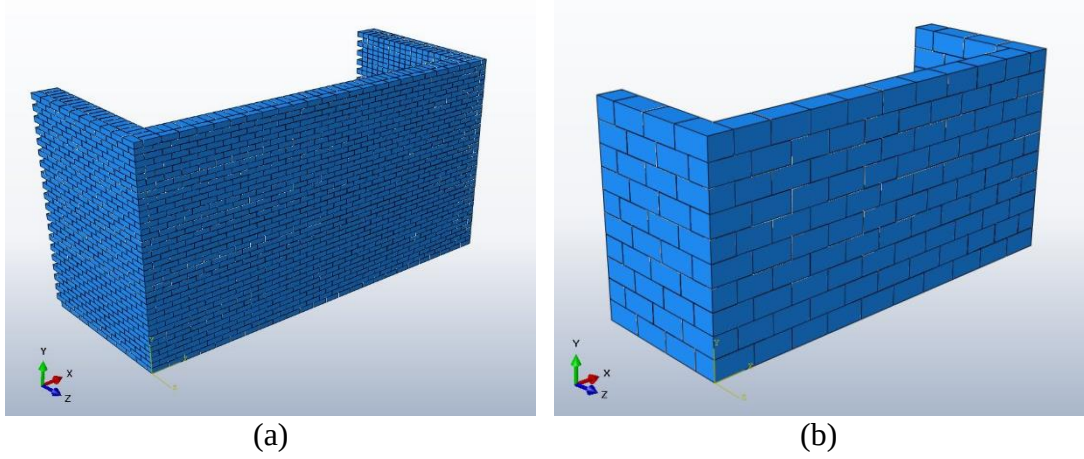
S2 numunesini temsil eden makro ölçekli sonlu elemanlar modelinin simülasyonu, bir üst başlıkta S1 numunesi için izlenen ilkeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. S1 için oluşturulan sayısal model parametrelerinden sadece Elastisite Modülü farklı alınmış olup S2 numunesin için Bölüm 4.1.2’de belirlenen Elastisite Modülü (9740 MPa) değeri kullanılmıştır. Sayısal analiz sonucu seçilen iki ölçüm noktası için (S2d12 ve S2d6) deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri kıyaslanması Şekil 4.7’de sunulmuştur. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen deplasman değerleri arasındaki sayısal fark milimetre mertebesinde olup oldukça düşük olmuştur. Bununla beraber, bu fark yaklaşık %13 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 S2 numunesi üzerinde yarı-statik yüklemelerin, seçilen iki ölçüm noktası için deneysel ve sayısal elastik bölge yer değiştirmeleri ile kıyaslanması

4.2.2 Mezo ölçekli sonlu elemanlar modeli ile simülasyon

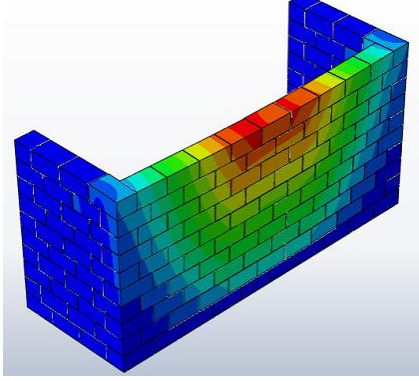
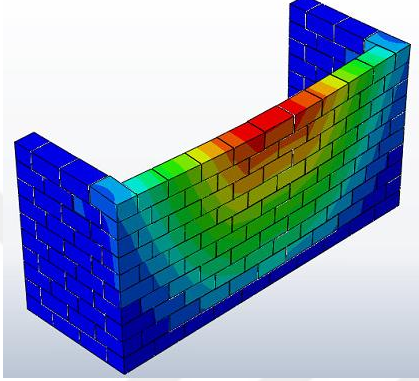
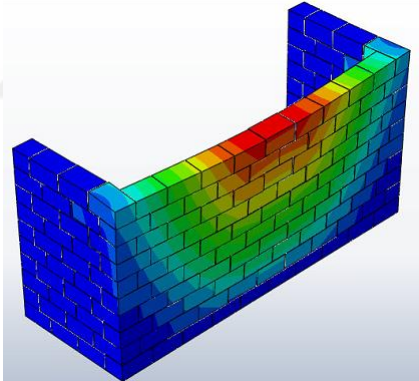
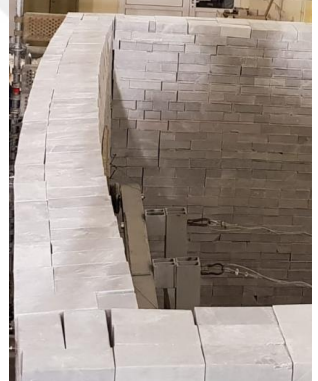
Gerçekleştirilen mezo modelleme çalışmalarında öncelikle numune üzerindeki mermer birimlerin boyutları ve yerleşimi göz önüne alınarak sayısal modeller oluşturulmuştur (Şekil 4.8a). Numunede kullanılan mermer birimleri temsil eden model parçaları (4980 adet) ve bu parçaları birleştiren arayüz tanımlamaları (14930 adet) çok fazla olduğundan bu modellerin analizi işlem yükü nedeniyle tamamlanamamıştır. Bu nedenle numunelerin mezo ölçekli sayısal modeli, düşeyde ve yatayda 10 eşit parçaya ayrılarak daha basit bloklar halinde oluşturulmuştur. Oluşturulan basitleştirilmiş blok-mezo modelinde 175 adet model parçası ve 443 adet arayüz tanımlaması bulunmaktadır (Şekil 4.8b).



Şekil 4.8 (a) S1 numunesi mezo modeli ve (b) basitleştirilmiş blok-mezo modeli

S1 numunesinin simülasyonu

S1 numunesi üzerinde gerçekleştirilen düzlemsiz yarı-statik testler, oluşturulan basitleştirilmiş mezo model ile simüle edilmiş, sayısal modelde 49500 adet üç boyutlu sekiz düğüm noktalı hexahedral (C3D8R) sonlu elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.8b’de verilen modeli oluşturan blok parçaları arasına sürtünme arayüzeyleri tanımlanmış, sürtünme katsayısı ise Bölüm 3.2.1’de sunulan başlangıç kayma dayanımının tayini sırasında elde edilen sonuçlara göre 0,33 olarak atanmıştır. Temel arayüzündeki ötelenmeleri tutulan sayısal model, dört yükleme bölgesinden uygulanan artan kuvvetler altında analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen yer değiştirme profili ve deneysel olarak elde edilen karşılıkları üç farklı ötelenme değeri için Şekil 4.9’da sunulmuştur. Buna göre numune ve sayısal modele ait yer değiştirme profillerinin uyumlu olduğu söylenebilir. Deneylerde maksimum yüke karşılık gelen tepe ötelenmesi değeri (110 mm), sayısal model ile yaklaşık olarak (92 mm) elde edilmiştir.

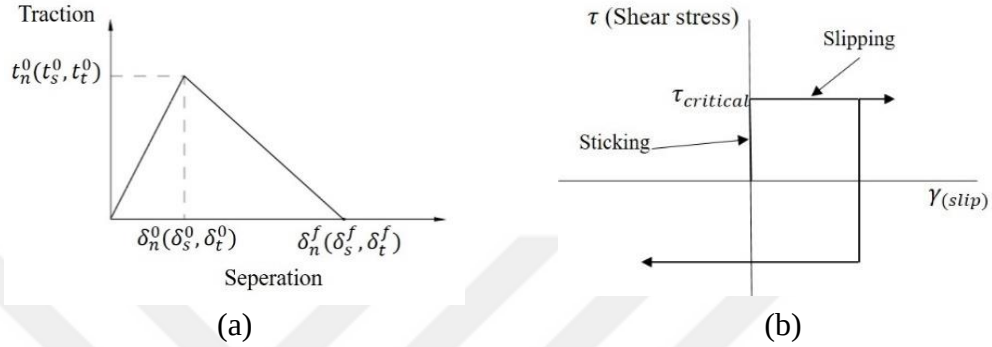
 Sayısal 50 mm ötelenme	 Deneysel 50 mm ötelenme
 Sayısal 80 mm ötelenme	 Deneysel 80 mm ötelenme
 Sayısal 92 mm ötelenme	 Deneysel 110 mm ötelenme

Şekil 4.9 S1 numunesi mezo sonlu elemanlar modeli ve deneysel (Kişisel arşiv, 2019) ötelenmelerinin karşılaştırılması

S2 numunesinin simülasyonu

S2 numunesinin mezo ölçekli simülasyonları, bir önceki alt başlıkta verilen sayısal model üzerinde, harçlı birleşimi temsil edecek *traction-seperation* kontak tanımlamaları eklenerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10a). Yazılımdaki mevcut *traction-seperation* modeli, başlangıçta doğrusal elastik davranışı ve ardından

arayüzde hasarın başlangıcını ve gelişimini temsil etmektedir (Abaqus theory guide, Versiyon, 6.14.). Elastik davranış, normal (K_n) ve teğetsel rijitlik bileşenleri (K_t ve K_s) ile tanımlanmaktadır. Temas halinde olan iki yüzey arasındaki kontakın bozulmasını ve nihayetinde dayanımını yitirmesini simüle etmek için hasar parametreleri de tanımlanmıştır.



Şekil 4.10 Arayüz modeline ait (a) *Traction-separation* ve (b) sürtünme davranışı (Abaqus theory guide, Versiyon, 6.14.)

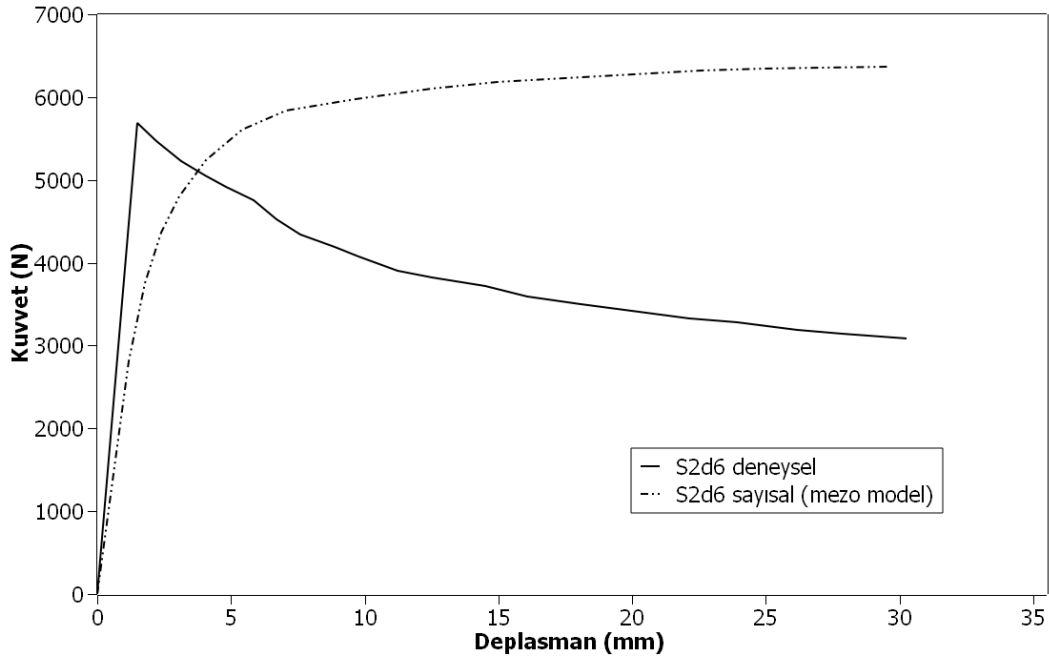
Tablo 4.7 Harçlı birleşim için tanımlanan arayüz parametreleri

Kontak								
Normal davranış	Teğetsel davranış	Kohezyonlu Davranış						
		<i>Traction-separation</i> davranışı Rijitlik katsayıları [N/mm ³]			Hasar			
	Sürtünme katsayısı				Başlangıç [MPa]			Gelişme [mm]
<i>Hard</i> Kontak		K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	Normal	Kayma-1	Kayma-2	Plastik deplasman
	0,33	70	40	40	0,40	0,35	0,35	2

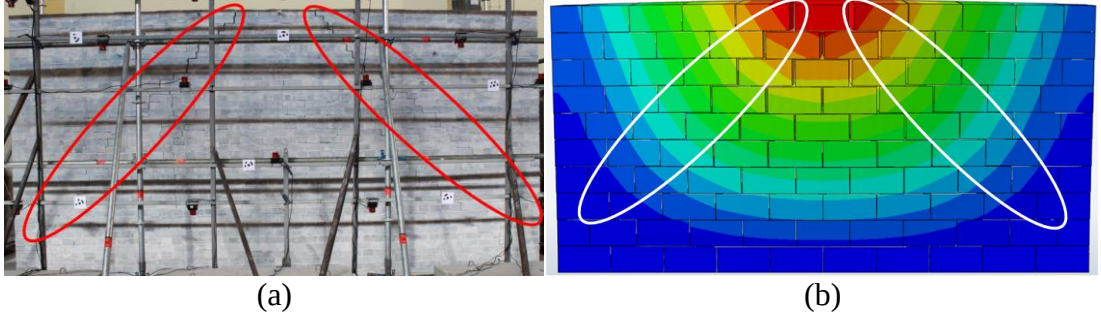
Harçlı birleşim için tanımlanan arayüz parametreleri Tablo 4.7’de verilmiştir. Normal davranış tanımlaması olan *Hard* Kontak, oluşturulan katı elemanların arayüzlerinde penetre olmasını engelleyen bir tanımdır. Teğetsel davranış ile ifade edilen sürtünme katsayısı, kontak dayanımını yitirildikten sonraki davranışı (Şekil 4.10b) simüle etmek için tanımlanmıştır. Arayüz elemanlarının normal (K_n) ve teğetsel (K_t ve K_s) rijitlik katsayıları Dolatshahi ve Aref (2016)’da önerilen aralıkta seçilmiştir. Hasarın başlangıcını temsil eden normal ve kayma doğrultusundaki dayanım parametreleri, Bölüm 3.2.1’de sunulan başlangıç kayma dayanımı tayini

testlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek tanımlanmıştır. Tanımlanan bu değerler Eurocode 6’da verilen $0,1-0,4 \text{ N/mm}^2$ aralığında kalmaktadır (Eurocode, CEN., 2005). Hasarın gelişimini temsil eden plastik deplasman parametresi 2 mm olarak tanımlanmıştır (Bolhassani, Hamid, Lau ve Moon, 2015).

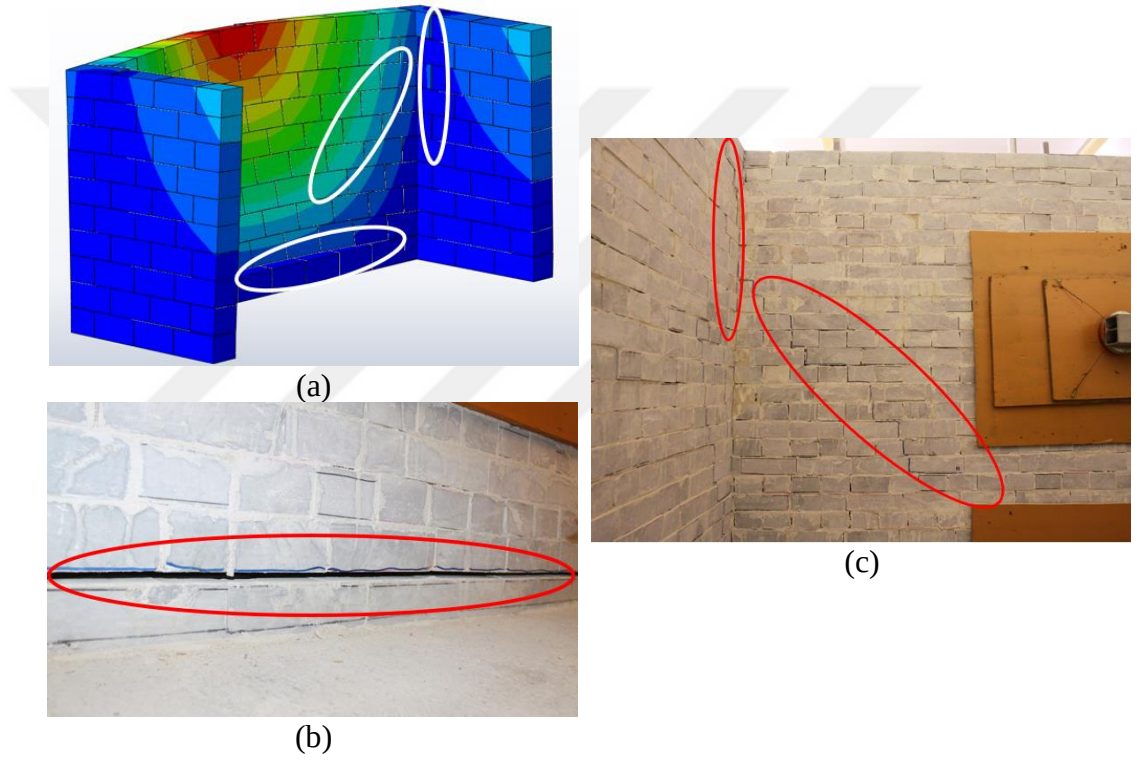
Sayısal model üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda oluşan hasar profilleri ve seçilen bir ölçüm noktası için kuvvet-deplasman grafiği değerlendirilmiştir. Bölüm 3.2.4’de sunulan S2 numunesi cephe duvarı üzerindeki S2d6 noktasının kuvvet-deplasman grafiğinin zarf eğrisi ile sayısal model ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrisinin karşılaştırılması Şekil 4.11’de verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen eğrinin, belirli bir dayanım limitinden sonra ani bir dayanım kaybı ile sürekli azalma gösterdiği, sayısal olarak elde edilen eğride ise bu durumun tam tersi olduğu bulgulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre deneysel ve sayısal davranışın elastik bölgede oldukça yakın davranış gösterdiği, fakat doğrusal olmayan davranışın örtüşmediği söylenebilir. Bununla beraber, sayısal olarak elde edilen hasar profillerinin deneysel olarak elde edilenler ile uyumlu olduğu (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13) görülmüştür.



Şekil 4.11 S2d6 noktasının kuvvet-deplasman grafiğinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması



Şekil 4.12 S2 numunesi cephe duvarı dış yüz hasar profilinin (a) deneysel (Kişisel arşiv, 2019) ve (b) sayısal olarak karşılaştırılması

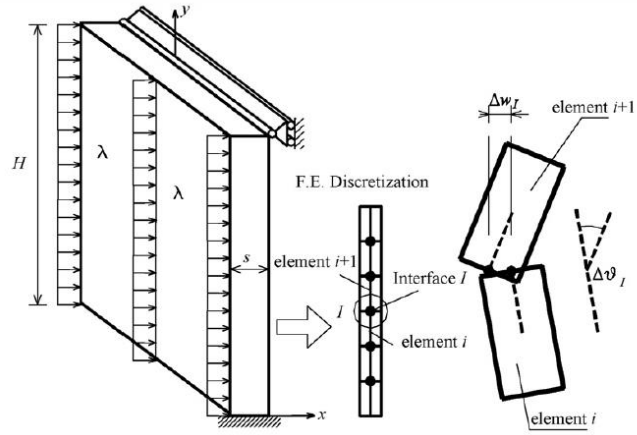


Şekil 4.13 S2 numunesi cephe duvarı ve kanat duvarı kesişim bölgesi iç yüz hasar profilinin (a) sayısal ve (b,c) deneysel (Kişisel arşiv, 2019) olarak karşılaştırılması

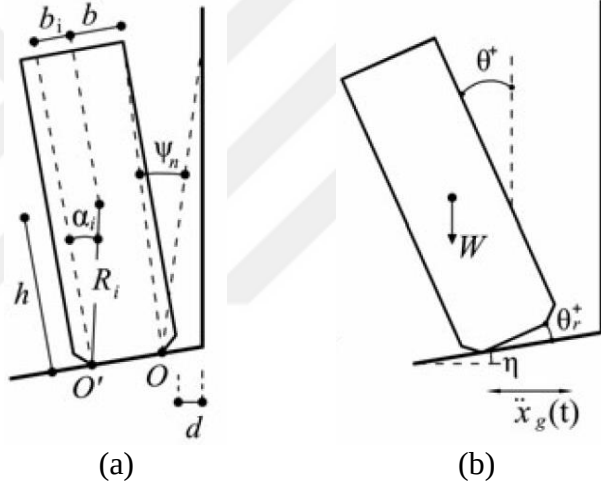
4.3 Tarihi İsabey Camii avlu duvarlarının sismik analizi

4.3.1 Kinematik analiz yöntemi ile yapısal değerlendirme

Tarihi yığma yapıların sismik davranışını değerlendirmek için mekanizma durumlarını esas alan kinematik analiz yöntemi sıklıkla uygulanmaktadır. Bu hesap yönteminde öncelikli olarak yapının muhtemel göçme mekanizmaları ve bu mekanizma durumlarını harekete geçiren yatay kuvvetler belirlenir. Belirlenen kuvvetler, yapının yatay ivme talebi ve kapasitesi ile karşılaştırılmasında kullanılır. Yapının tamamının veya bir bölümünün önceden belirlenen yatay yükler altında performansının belirlenebilmesi için çok sayıda mekanizma durumunun değerlendirilmesi gerekmektedir (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018). Cecchi, Milani ve Tralli (2007), plak teorisini esas alan makro ölçekli hasar arayüzlerinin tanımlandığı düzlemdışı doğrultuda bir kinematik limit analiz modeli sunmuştur. Çalışmada ayrıca düzlemdışı doğrultuda yayılı yükler tanımlanan dikdörtgen plak şeklinde duvar modelinin merkezi açılma mekanizma durumu incelenmiştir (Şekil 4.14). Milano, Mannella, Morisi ve Martinelli (2008), çalışmalarında yığma binalarda meydana gelen deprem hasarlarını göz önünde bulundurarak çeşitli mekanizma durumları tanımlamıştır. 2011 yılında Milani ve Venturini (2011), mevcut tarihi yığma yapıların kırılma eğrisi değerlendirmesi için yeni bir üç boyutlu homojenleştirilmiş kinematik limit analizi yazılımı sunmuştur. Shawa, Felice, Mauro ve Sorrentino (2012), sarsma tablası üzerinde düzlemdışı dinamik testleri tamamlanan U-tipi yığma duvar numunesinin sayısal modelini tek serbestlik dereceli kinematik sallanma mekanizma durumu ile tanımlamıştır (Şekil 4.15).

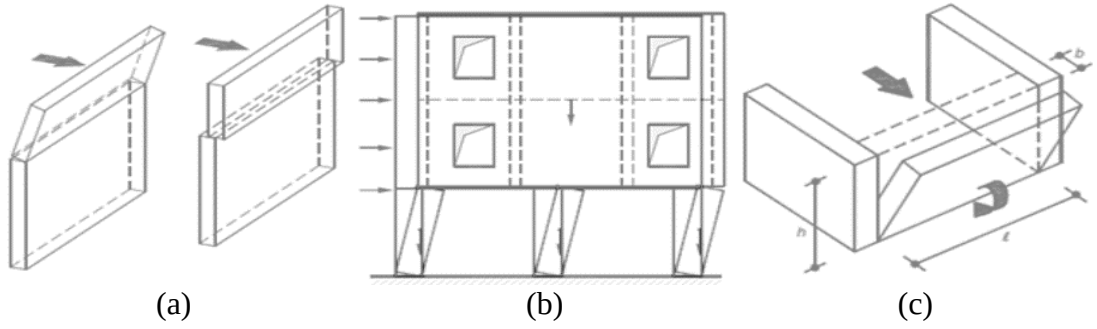


Şekil 4.14 Dikdörtgen plak şeklinde duvar modelinin merkezi açılma mekanizma durumu (Cecchi, Milani ve Tralli, 2007)



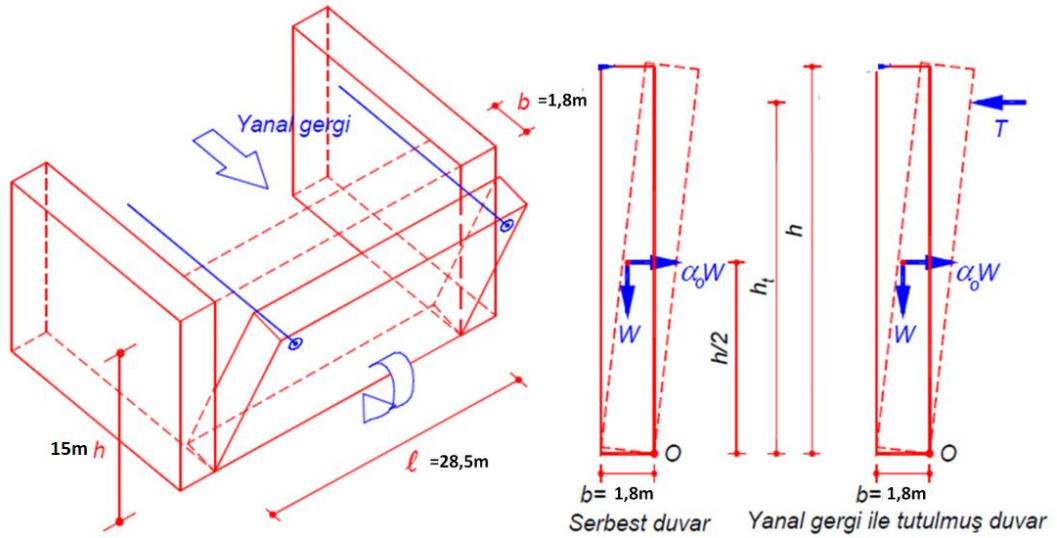
Şekil 4.15 (a) Temeli dönen yığma duvarın hareketi ve (b) hareketin kinematik tanımı (Shawa ve diğer., 2012)

2017 yılında taslağı yayınlanan Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018), tarihi yığma binaların kinematik analizine ilişkin (a) eğilme ve kayma, (b) yumuşak kat ve (c) cephe duvarı güç tükenmesi olmak üzere üç farklı tip mekanizma durumu tanımlanmıştır (Şekil 4.16) ve kinematik hesaba ilişkin uygulamalar verilmiştir.



Şekil 4.16 Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları

Bu bölümde, incelenen tarihi İsabey Camii avlu duvarlarının geometrik özellikleri ve Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) tanımlanan mekanizma durumları ve hesap yöntemi göz önünde bulundurularak incelenen tarihi yığma yapı örneğinin kinematik analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kılavuzda belirtilen cephe duvarının güç tükenmesi mekanizma durumu esas alınmıştır (Şekil 4.16c). Yapı örneğinin geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17 Yapı örneğinin geometrik özellikleri ve esas alınan mekanizma durumu

Hesaplarda yapının birim hacim ağırlığı (ρ) = 2,4 t/m³ olarak alınmıştır. Yapının bulunduğu bölgede en büyük yer ivmesi $a_g = 0,40g$ kabul edilmiştir. Ölçüler Şekil 4.17'den alınarak yapı ağırlığı (W), pencere boşlukları çıkarılarak

hesaplanmıştır. Cephe duvarının esas alınan mekanizma durumuna sebep olan $\alpha_0 W$ atalet kuvvetini oluşturacak α_0 parametresi, tanımlanan devrilme noktası (O) etrafında kuvvetlerin moment dengesi yazılıp 0,120 olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{Wb}{2} - \frac{\alpha_0 Wh}{2} = 0 \Rightarrow \alpha_0 = \left(\frac{Wb}{2}\right) / \left(\frac{hW}{2}\right) \Rightarrow \alpha_0 = \frac{\frac{1697 \cdot 1,8}{2}}{\frac{15 \cdot 1697}{2}} = 0,120$$

Bu mekanizma durumunda etkin olan kütlenin toplam kütleyle oranı ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

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

$$M^* = \left(\frac{Wh}{2}\right)^2 = \left(\frac{1697 \cdot 15}{2}\right)^2 = 162 \cdot 10^6 \text{ t/s}^2$$

$$a_{kapasite}^* = \frac{\alpha_0 W}{M^*} = \frac{\alpha_0 g}{e^*} = \frac{0,120g}{1} = 0,120g$$

İncelenen göçme mekanizmasında duvar, yapının tabanından itibaren devrildiği için;

$$a_{kapasite}^* = 0,120g < \frac{a_g}{R_a} = \frac{0,40}{2} = 0,20g$$

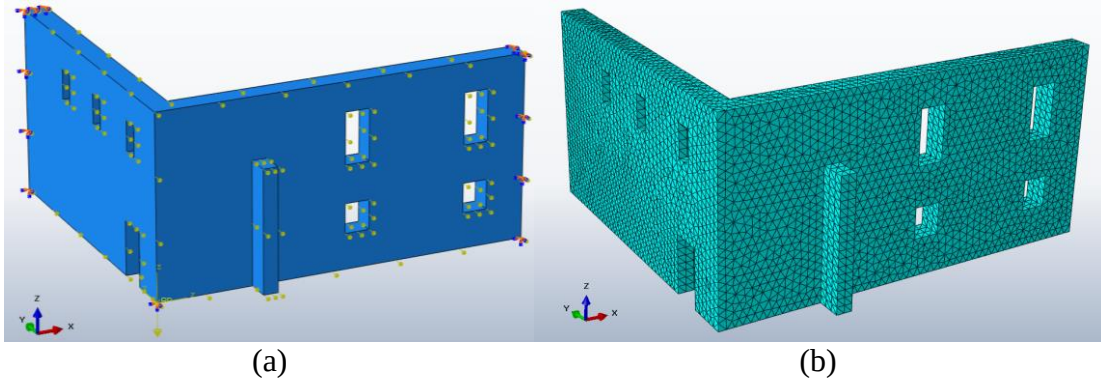
Bu durumda duvarı yerinde tutmak için gerekli toplam gergi kuvveti T , benzer şekilde O noktasına göre denge yazılarak $h_t=14$ m için;

$$\frac{Wb}{2} - \frac{\alpha_0 Wh}{2} + Th_t = 0 \Rightarrow T=72,7 \text{ ton olarak bulunmuştur.}$$

4.3.2 Doğrusal olmayan statik itme analizi

Bu bölümde, tarihi İsabey Camii avlu duvarlarının yatay yükler altında düzlemsel davranışı doğrusal olmayan statik itme analizi ile incelenmiştir. Tarihi yığma yapıların sismik davranışının doğrusal olmayan statik itme analizleri ile incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Peña ve diğer., 2010; Lourenço ve diğer., 2012). Bu analizde yükler, doğrusal olmayan malzeme davranışı tanımlanan sonlu elemanlar modeli üzerine yapının öz ağırlığından kaynaklı düşey kuvvetler ve yer ivmesinden kaynaklı yatay atalet kuvvetleri olarak tanımlanmaktadır. Sayısal analizin ilk adımında model düşey kuvvetler altında analiz edilir. İkinci aşamada düşey kuvvetler altında davranışı elde edilen model üzerine yatay atalet kuvvetleri yapı uzunluğu boyunca ve artımsal şekilde uygulanır.

Sonlu elemanlar modeli



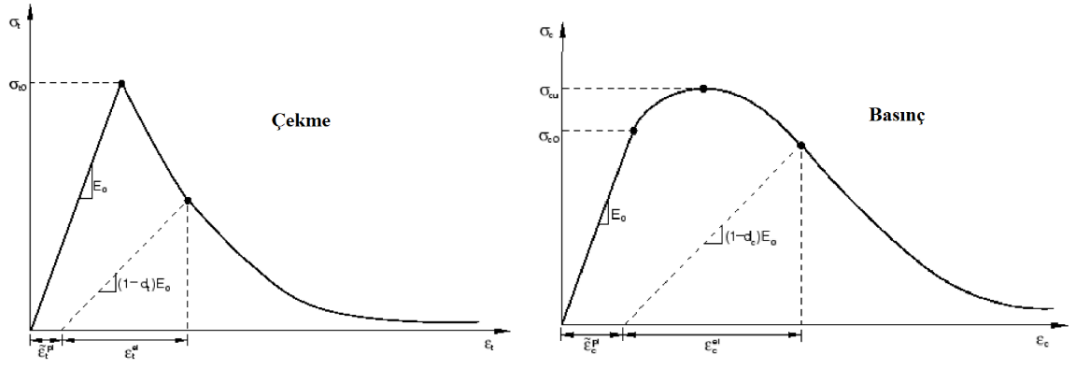
Şekil 4.18 Sayısal model üzerinde (a) sınır şartları ve yükler ve (b) sonlu eleman ağı

Yapı bölümünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ABAQUS sonlu elemanlar yazılımında makro modelleme yöntemi ile oluşturulmuştur (Şekil 4.18). İncelenen duvar bölümlerinin geometrik ölçüleri Şekil 3.3’de verilmiştir. Bölüm 4.1.1’de gerçekleştirilen model kalibrasyon çalışmalarında kullanılan katı modelin aksine burada duvar uzunluğu dış kot referans alınarak oluşturulmuştur. Modelde dört noktalı tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Optimum sonlu eleman ağı boyutunu belirlemek üzere Bölüm 4.1.1’de uygulanan yakınsaklık yöntemi tekrarlanmıştır ve boyutları 40 ila 60 cm arasında değişen 47869 adet sonlu eleman oluşturulmuştur.

İncelenen duvar bölümü üzerine düzlemdışı doğrultuda uygulanacak yatay yükleri belirlemek üzere yapının bulunduğu bölgenin depremselliği Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması üzerinden belirlenmiştir. Bu uygulamaya göre koordinatları bilinen yapının bulunduğu yerde oluşacak en büyük yer ivmesi değeri 0,410 g olarak tespit edilmiştir. Modelin doğrusal olmayan malzeme davranışı *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) ile tanımlanmıştır.

Kullanılan malzeme modeli

CDP malzeme modeli genel olarak beton malzemenin çevrimsel veya dinamik yükler altındaki davranışını temsil etmek üzere oluşturulmuştur (Lubliner, Oliver, Oller ve Oñate, 1989; Lee ve Fenves, 1998). Bununla beraber, tarihi yığma yapıların sismik davranışının modellediği çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Meoni, D'Alessandro, Cavalagli, Gioffré ve Ubertini, 2019; Valente ve Milani, 2019). ABAQUS malzeme kütüphanesinde tanımlı olan CDP malzeme modeli (Abaqus theory guide, Versiyon, 6.14.), plastik-hasar esaslı olup farklı çekme ve basınç dayanımı tanımlamalarını içermektedir (Şekil 4.19). Tek eksenli çekme gerilmeleri altında malzeme, tanımlanan elastisite modülü ile birlikte çekme dayanımı değerine kadar doğrusal bir davranış izlemektedir. Çekme dayanımı değeri mikro çatlakların başladığı noktaya karşılık gelmektedir. Bu değer aşıldıktan sonra malzeme önceden tanımlanmış gerilme-birim deformasyon eğrisini izlemektedir. Tek eksenli basınç gerilmeleri altında ise malzeme basınç dayanımı aşıldıktan sonra önce pekleşme daha sonra yumuşama davranışı sergilemektedir. Basınç ve çekme gerilmelerini oluşturan yükler kaldırıldığında malzemede doğrusal elastik rijitlik azalması meydana gelmektedir.

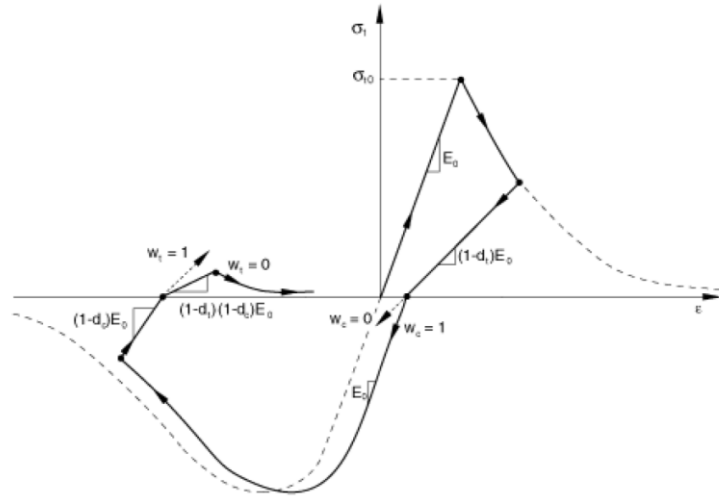


Şekil 4.19 CDP malzeme modeli çekme ve basınç davranışı

Modele tanımlanan malzemenin elastik özellikleri Bölüm 4.1.1’de sunulan model kalibrasyon çalışmalarının sonuçları değerlendirilerek $E=4500$ MPa ve $\rho=2400$ kg/m³ olarak tanımlanmıştır. Plastik davranışına ilişkin parametreler ise Bölüm 3.1.5’de sunulan Flat-jack testleri sonuçları ile literatürde var olan benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Basınç dayanımı 2,30 MPa ve çekme dayanımı 0,23 MPa olarak tanımlanmıştır. CDP malzeme modeli tanımında var olan tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme) davranışı için varsayılan rijitlik yenileme katsayıları ile $w_t=0$ ve $w_c=1$ kullanılmıştır (Şekil 4.20). Malzeme modeline ilişkin tanımlanan diğer parametreler Tablo 4.6’da verilmiştir. Burada ‘genleşim açısı’, kesme gerilmeleri altında bulunan elemanın hacmindeki değişimi ifade eden açıyı; ‘ σ_{b0}/σ_{c0} ’, 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.).

Tablo 4.8 CDP malzeme model parametreleri

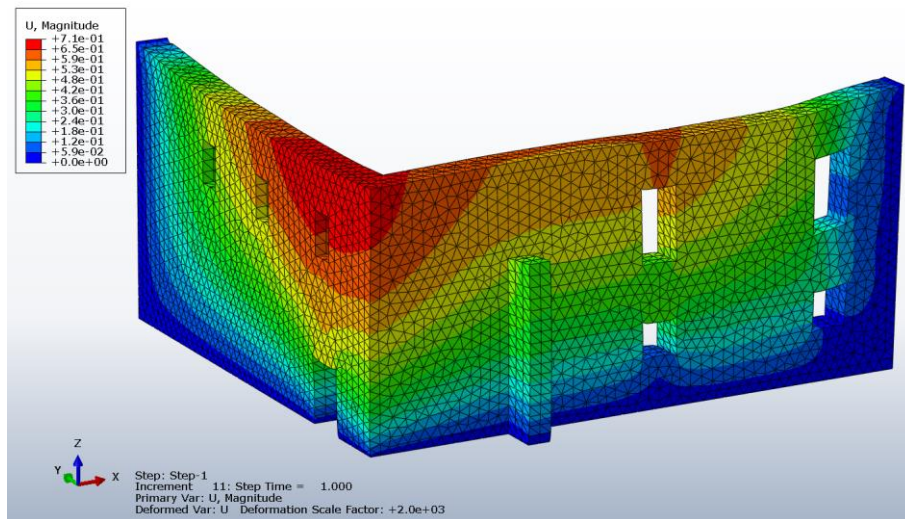
Genleşim açısı	Dış merkezlilik	σ_{b0}/σ_{c0}	K
10°	0,1	1,16	0,666



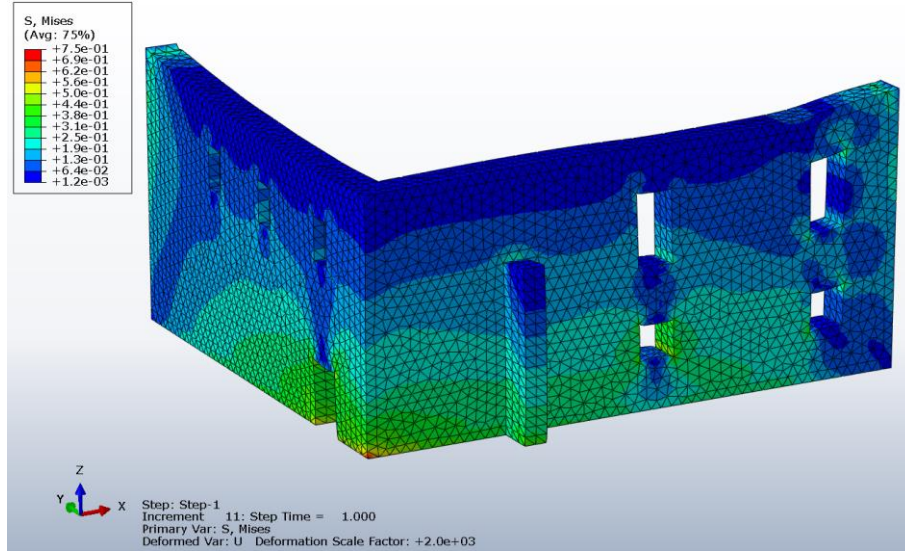
Şekil 4.20 CDP malzeme modeli tek eksenli çevrimsel (çekme-basınç-çekme) davranışı (varsayılan rijitlik artışı katsayıları ile $w_t=0$ ve $w_c=1$)

Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları

Gerçekleştirilen analiz sonucunda öncelikle yapının öz ağırlığından kaynaklanan düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Modelde meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu gerilme dağılımına göre modelde öz yükler altında dayanım limitleri aşılmamıştır. Oluşan davranışı temsil etmek üzere deplasman renklendirmesi de verilmiştir (Şekil 4.21).

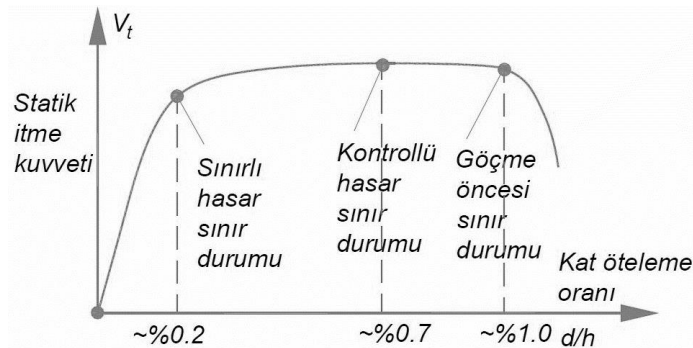


Şekil 4.21 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan deplasman renklendirmesi (mm)

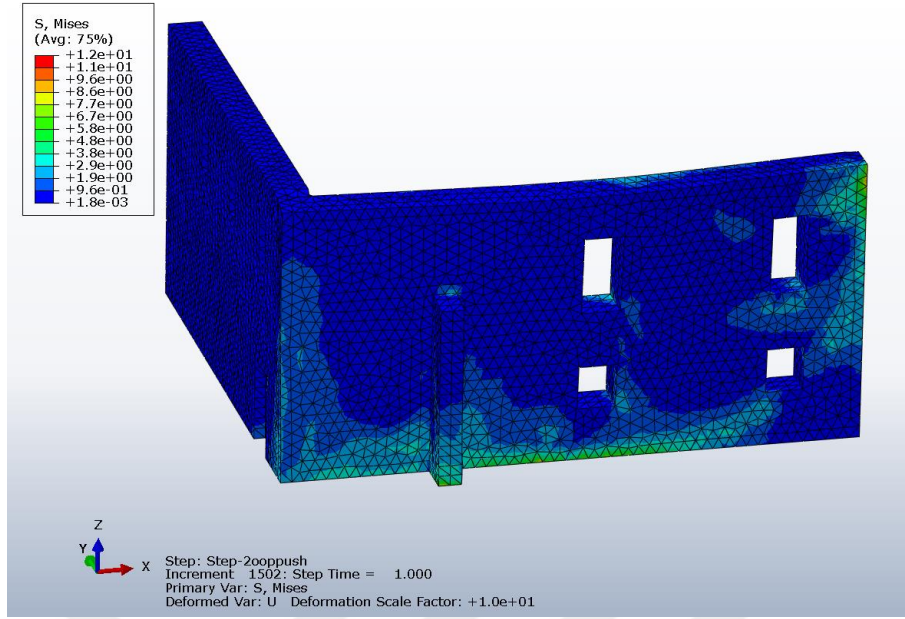


Şekil 4.22 Düşey kuvvetler altında modelde oluşan gerilme renklendirmesi (MPa)

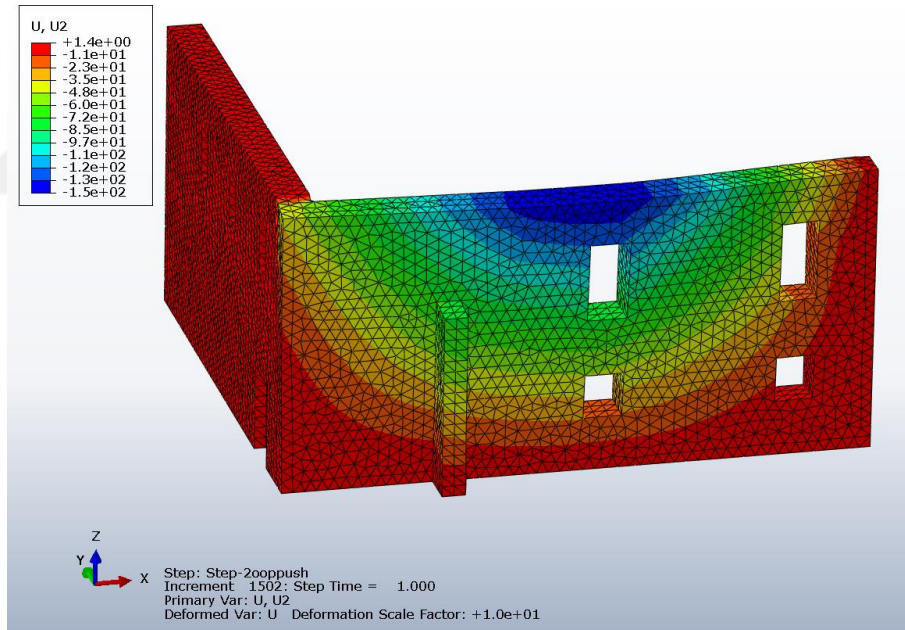
Tanımlanan yatay yükler altında elde edilen gerilme dağılımı ve kuvvet uygulanan doğrultudaki deplasman renklendirmesi Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de verilmiştir. Analiz sonunda yapı ağırlığı ile sayısal modelin tabanında meydana gelen düşey reaksiyon kuvveti ve tabana yakın bölgelerdeki sonlu elemanlarda meydana gelen ilgili gerilme ifadesi tutarlıdır. Yatay kuvvetler altında elde edilen kuvvet-tepe ötelenmesi eğrisi Şekil 4.26’da verilmiştir. Yüksekliği 15 m olan modelin tepe noktasında oluşan en büyük yanal deplasman değeri 150 mm olmuştur. Bu değer 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’na karşılık gelmektedir (Şekil 4.23).



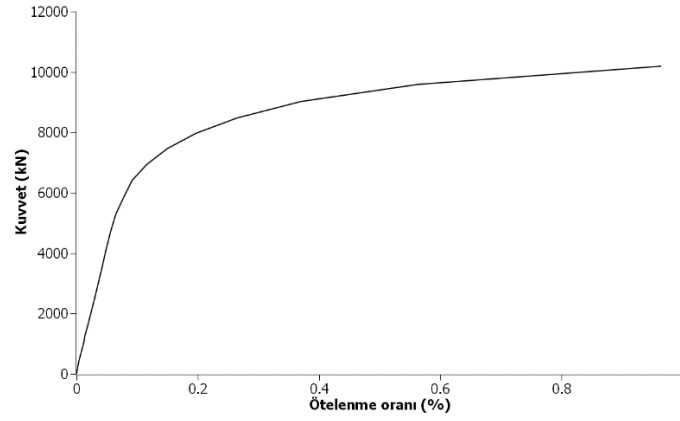
Şekil 4.23 Statik itme eğrisi ve sınır durumları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018)



Şekil 4.24 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan gerilme renklendirmesi (MPa)

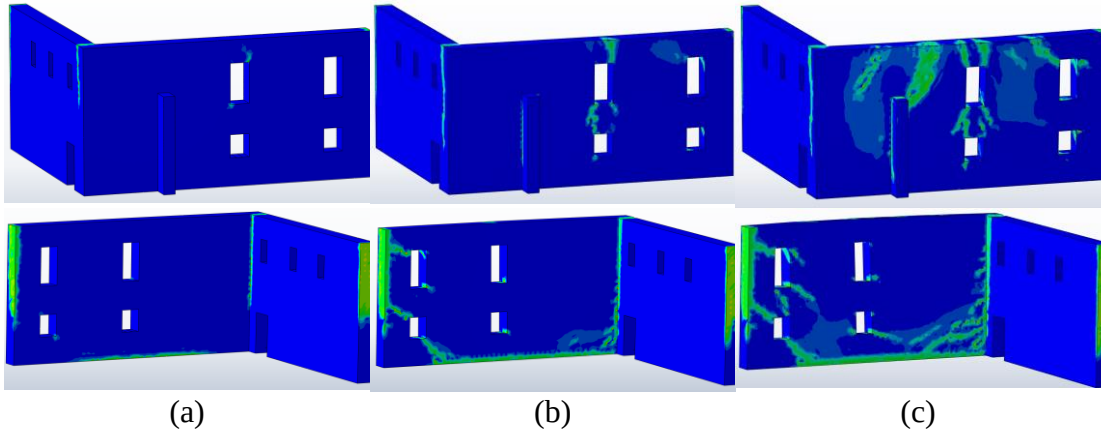


Şekil 4.25 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan deplasman renklendirmesi (mm)



Şekil 4.26 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan Kuvvet (kN)-Tepe ötelenmesi (%) eğrisi

Analiz sonunda oluşan çekme çatlaklarını ifade eden görseller üç aşamalı olarak Şekil 4.27’de verilmiştir. Çatlaklar öncelikli olarak sınır bölgeleri ve birbirini dik kesen iki duvarın birleşme bölgesinde başlayıp düzlemsel doğrultuda kuvvet uygulanan duvar üzerindeki pencere boşluklarında ilerlemiştir.

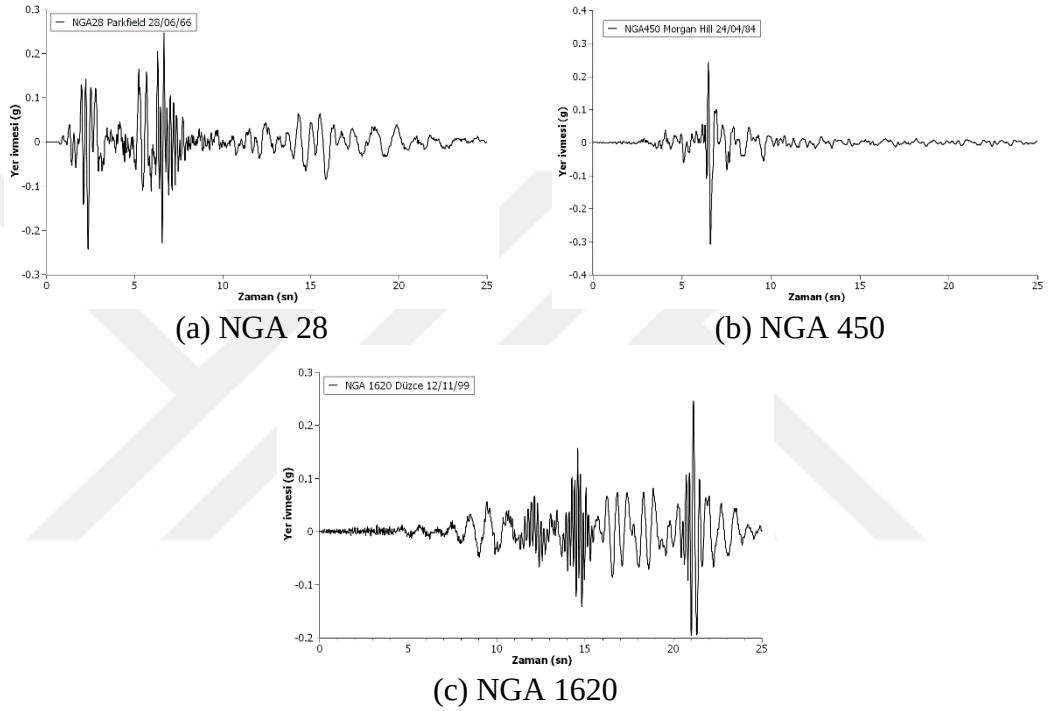


Şekil 4.27 Yatay kuvvetler altında modelde oluşan çekme çatlakları (a) çekme çatlaklarının başlangıcı, (b) gelişmesi, (c) son durumu

4.3.3 Doğrusal olmayan dinamik analiz

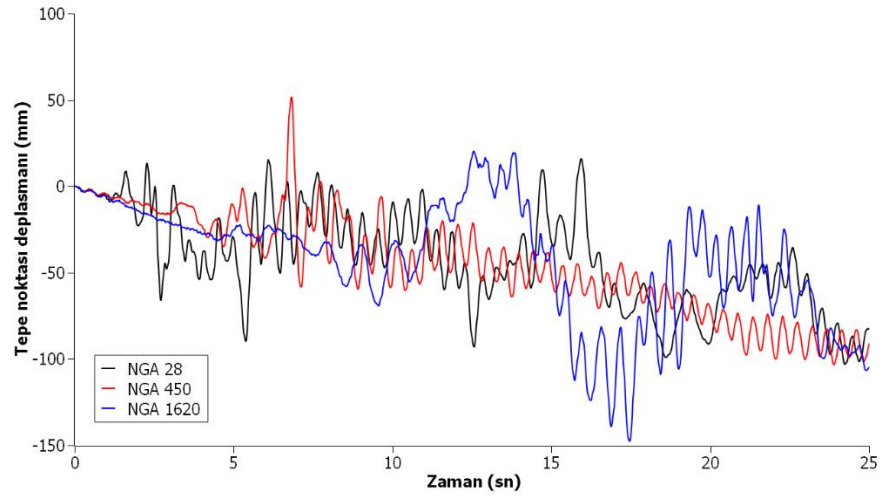
Tarihi yığma yapıların deprem yükleri altında dinamik tepkisinin belirlenmesi için uygulanan zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz örnekleri literatürde mevcuttur (Casarin ve Modena, 2008; Betti ve Vignoli 2011; D’Ambrisi, Mariani ve Mezzi 2012; Valente ve Milani, 2019). Bu analizler, oluşturulan sayısal

modelin tabanına deprem ivmesi kaydı tanımlanarak zaman tanım alanında artımsal olarak gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, tarihi yığma yapı örneğinin incelenen duvar bölümlerinin dinamik tepkisini elde etmek için Bölüm 4.3.2’de oluşturulan model üzerinde bir dizi doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bölgenin depremselliği göz önünde bulundurularak üç farklı ölçeklenmiş ivme kaydı seçilmiştir (Şekil 4.28).

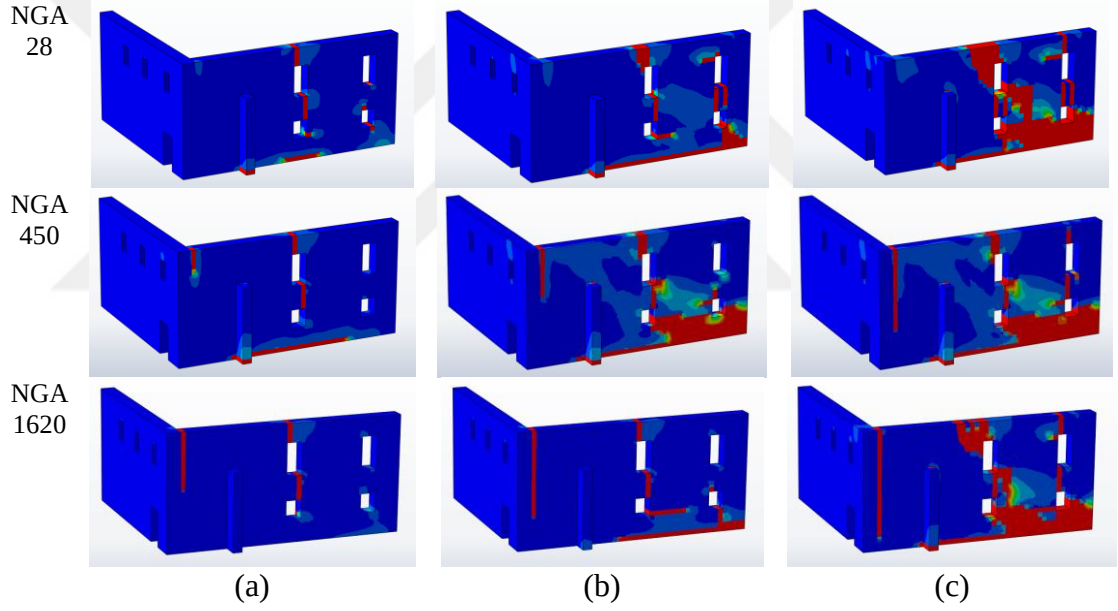


Şekil 4.28 Analizlerde kullanılan deprem kayıtları

Tanımlanan yer ivmesi sonucu elde edilen tepe deplasmanı eğrileri Şekil 4.29’de verilmiştir. Yüksekliği 15 m olan modelin tepe noktasında oluşan en büyük yanal deplasman üç farklı ivme kaydı için sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm olmuştur. Analiz sonunda oluşan çekme çatlaklarını ifade eden görseller farklı ivme kayıtları için üç aşamalı olarak (başlangıç-gelişme ve son durum) Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.29 Farklı deprem kayıtları için zaman-tepe deplasmanı eğrileri



Şekil 4.30 Farklı deprem kayıtları için çatlak gelişimleri (a) çekme çatlaklarının başlangıcı; (b) gelişmesi; (c) son durumu

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez kapsamında, rijit diyafram etkisi oluşturacak döşemelere sahip olmayan ve düzlemdışı doğrultuda desteklenmemiş uzunluğu fazla olan tarihi çok tabakalı kesme taş duvarların düzlemdışı doğrultudaki deprem hasar limitleri araştırılmıştır. Öncelikle yakın dönemde meydana gelen güçlü depremlerin tarihi yığma yapılar üzerindeki etkisi mevcut kaynaklar üzerinden incelenmiştir. Yığma duvarlarda düzlemdışı göçmenin, genellikle yapı elemanlarının dayanım limitlerinden ziyade, stabilite kaybından, duvarlarda rijit diyafram etkisinin olmayışından ve döşeme seviyesindeki bağlantı elemanlarının yetersizliğinden kaynaklandığı birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır. Aynı zamanda bu davranışın çoğunlukla, cephe duvarının düzlemdışı doğrultuda kısmen veya tamamen göçmesiyle sonuçlandığı, hasarın birbirini dik kesen duvarların ayrılması, tek ve çift yönlü eğilme davranışı şeklinde geliştiği ifade edilmiştir. Çok tabakalı duvarlarda ise özellikle tabakaların birbirinden ayrılmasıyla sonuçlanan lokal hasar mekanizmaları bildirilmiştir.

Seçilen tarihi bir yığma yapı örneğinin avlu duvarları üzerinde ortamsal titreşim testleri gerçekleştirilmiş, yapının dinamik karakteristikleri operasyonel modal analizi yöntemi ile tahmin edilmiştir. Duvarların düzlemdışı doğrultudaki 3 adet serbest titreşim modu elde edilmiştir. Testlerde, ortamsal etkiler altında yapıya etkiyen titreşimlerin uyardığı ayırtılabilir modların sırası ile sayısal olarak elde edilen modların sırasının farklı olması operasyonel modal analizlerinde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur (örn: sayısal 14. mod ve deneysel 3. mod). Oluşturulan ön sayısal modelin kalibrasyonu FEMtools yazılımında *Bayesian* tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Güncellemede karşılaştırma parametresi olarak serbest titreşim frekansları ve MAC değerleri, güncellenecek model parametresi olarak da birim hacim ağırlık (ρ), elastisite modülü (E) ve sınır koşulu olarak başlangıç yay rijitlikleri (k) seçilmiştir, sırasıyla $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ ve $\pm 60\%$ güncelleme limitleri tanımlanmıştır. Güncellenen sonlu elemanlar modelinin doğal titreşim frekansları deneysel karşılıklarıyla üst üste gelmiştir. MAC değerlerinde ise ihmal edilebilir düzeyde düşüşler olmuştur. Sonuç

olarak yapının dinamik karakteristiklerini temsil edecek sayısal model elde edilebilmiştir.

Düşey ve yatay derzleri harçlı olarak imal edilen S2 numunesinin, S1 numunesine kıyasla belirgin rijitlik artışından (ilk üç mod için yaklaşık 50 kat) dolayı ortamsal titreşim testleri ile uyarılabilen mod sayısında bir azalma gerçekleşmiştir (Tablo 3.4 ve Tablo 3.5). Ayrıca, bu rijitlik artışı sebebiyle, elde edilen mod şekillerinin hem gerçek hem de sanal bileşenlerinden kaynaklı olan karmaşıklık değerinde de belirgin bir artış olmaktadır. Sönüm oranının belirlenmesindeki yüksek belirsizliklerden dolayı, hesap sonucu bulunan sönüm değerleri arasında bir kıyaslama yapılmamıştır.

Model kalibrasyon işlemleri laboratuvarda oluşturulan numuneler üzerinde de tekrarlanmış, bu çalışmalarda farklı olarak belirsiz malzeme parametresi sadece elastisite modülü olarak alınmıştır. Sonuç olarak laboratuvar numunelerinin dinamik karakterini temsil eden sayısal model parametreleri elde edilebilmiştir. Optimizasyon tabanlı güncelleme gerçekleştiren yazılımlarda başlangıç model parametrelerinin ve güncelleme limitlerinin çözüm üzerindeki etkisi değerlendirilmeli ve tanımlanan farklı güncelleme kriterleri ile farklı sonuçların elde edilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

İncelenen tarihi yığma yapı örneğini oluşturan duvarların tipolojisi endoskopik muayene ile belirlenmiş, duvarların belirli bir seviyeye kadar çift tabakalı, üzerinde ise üç tabakalı (iki yüzü kesme taş, ortası moloz dolgu) bir yapıda olduğu belirlenmiştir. Tarihi harcın içeriği mineralojik-petrografik yöntemler ile belirlenmiştir, harcın belirli oranlarda hidrolik kireç ve agregadan oluştuğu, içerisinde tuğla tozu veya puzolan gibi bileşenlerin olmadığı bulgulanmıştır. Ayrıca incelenen tarihi duvarın üç farklı noktasında Flat-jack testleri gerçekleştirilerek duvarın doğrusal ve doğrusal olmayan mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

Deneyisel çalışmalar ile elde edilen parametreler doğrultusunda ülkemizdeki tarihi yığma binaların yapısal özelliklerini temsil edebilecek nitelikte toplam beş adet laboratuvar numunesinin test edilmesi planlanmıştır. Temel olarak tarihi İsabey

Camii avlu duvarlarındaki ortalama taş boyutları ve harç özellikleri örnek alınarak oluşturulan 1/6 geometrik ölçekli yığma duvar numuneleri üzerinde düzlemdışı yarı-statik testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda S1 ve S2 numunesi için hasar limitleri tayini gerçekleştirilmiştir. Yüksek ötelenme değerlerinde kanat duvarlarında düşey derzlerde ayrılma ve cephe duvarında yatay derzlerde açılma şeklinde hasar profili oluşmuştur. Buna bağlı olarak düşük yükleme seviyelerinde cephe duvarında kemer davranışı oluşurken ileri yükleme adımlarında konsol davranış gözlemlenmiştir. Yük deplasman eğrisinin yatay hale geldiği ve dolayısıyla numunenin güç tükenme anına karşılık gelen göçmenin önlenmesi sınır durumu, kuru birleşimli S1 ve harçlı birleşimli S2 numuneleri için sırası ile %4,2 ve %3,8 olarak elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sayısal modeller üzerinde düzlemdışı yarı-statik laboratuvar testlerinin makro ve mezo ölçekli simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yığma duvarlarda hasarlar kagir birimlerden ziyade bu birimlerin birleşimindeki arayüz bölgelerinde meydana gelmektedir. Bu nedenle, sürekli ortam elemanları ile oluşturulmuş makro ölçekli sonlu elemanlar modelinin, numunenin doğrusal olmayan davranışını sergilemede yetersiz olduğu, bununla birlikte çok küçük deplasmanlara karşılık gelen elastik banttaki davranışını tutarlı bir şekilde temsil edebildiği söylenebilir. Fakat yine de elastik bandı çok küçük olan bu sistemler için, doğrusal malzeme parametreleri ile modellemenin sistemin davranışını doğru bir şekilde yansıtmayacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Gerçekleştirilen mezo modelleme çalışmalarında öncelikle numune üzerindeki mermer birimlerin boyutları ve yerleşimi göz önüne alınarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Fakat kullanılan model parçaları ve bu parçaları birleştiren arayüz tanımlamalarının oldukça fazla oluşu nedeniyle büyük işlem hacmi gerektiren bu modellerin analizleri gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle, düşeyde ve yatayda 10 eşit parçaya ayrılarak bloklar halinde oluşturulan basitleştirilmiş sayısal model, düşük çözünürlükte olmasına rağmen, duvar numunesinin düzlemdışı davranışını oldukça yakın bir şekilde benzeştirebilmiştir.

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2018) verilen kinematik analiz yöntemi ile tarihi yığma yapı örneğinin avlu duvarları yapısal olarak incelenmiştir. Mekanizma durumunu esas alan bu hesap aşamasında kılavuzda belirtilen cephe duvarının güç tükenmesi mekanizma durumu esas alınmıştır. Duvarın tabanındaki bir O noktasından rijit dönmesi kabulünün yapıldığı hesaplarda duvarı yerinde tutmak için gerekli olan toplam gergi kuvveti, gergi çubuklarının tabandan 14 m yükseklikte uygulanacağı durum için 72,7 ton olarak hesaplanmıştır.

Sismik değerlendirmelerin ikinci aşamasında, tarihi yığma yapı örneğinin yatay yükler altında düzlemsel davranışı doğrusal olmayan statik itme analizi ile incelenmiştir. Bu analizde yükler, doğrusal olmayan malzeme davranışı tanımlanan sonlu elemanlar modeli üzerine yapının öz ağırlığından kaynaklı düşey kuvvetler ve yer ivmesinden kaynaklı yatay atalet kuvvetleri olarak tanımlanmıştır. Sayısal analizin ilk adımında model düşey kuvvetler altında analiz edilmiş, ikinci adımında ise düşey kuvvetler altında davranışı elde edilen model üzerine yatay atalet kuvvetleri yapı uzunluğu boyunca ve artımsal şekilde uygulanmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda öncelikle yapının öz ağırlığından kaynaklanan düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu gerilme dağılımına göre modelde öz yükler altında dayanım limitleri aşılmamıştır. Yüksekliği 15 m olan modelin tepe noktasında, yatay kuvvetler altında oluşan en büyük yanal deplasman değeri 150 mm olmuştur. Bu değer 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*'na karşılık gelmektedir. Analiz sonunda modelde oluşan çekme çatlakları üç aşamalı olarak incelenmiştir. Buna göre çatlaklar öncelikli olarak sınır bölgeleri ve birbirini dik kesen iki duvarın birleşme bölgesinde başlayıp düzlemsel doğrultuda kuvvet uygulanan duvar üzerindeki pencere boşluklarında ilerlemiştir.

Sismik değerlendirmelerin son aşamasında, tarihi yığma yapı örneğinin incelenen duvar bölümlerinin dinamik tepkisini elde etmek için, oluşturulan sayısal model üzerinde bir dizi doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Modelin tabanında, bölgenin depremselliği göz önünde

bulundurularak seçilen üç farklı ölçeklenmiş ivme kaydı tanımlanmıştır. Analizler sonucunda oluşan çekme çatlaklarını ifade eden görseller farklı ivme kayıtları için üç aşamalı olarak incelenmiştir. Tanımlanan yer ivmesi sonucu elde edilen deplasmanı eğrileri, yüksekliği 15 m olan modelin tepe noktası için incelenmiştir. Üç farklı ivme kaydı için sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm en büyük yanal deplasman değerleri hesaplanmıştır. Sırasıyla %0,67 ve %1,00'lik ötelenme oranlarına karşılık gelen bu deplasman değerleri, kılavuzda tanımlanan '*Kontrollü hasar sınır durumu*' ve '*Göçme öncesi sınır durumu*'nu temsil etmektedir.



KAYNAKLAR

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.

Altunışık, A. C., Okur, F. Y., Genç, A. F., Günaydın, M. ve Adanur, S. (2018). Automated model updating of historical masonry structures based on ambient vibration measurements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32 (1), 04017126.

Aref, A. J. ve Dolatshahi, K. M. (2013). A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures. *Computers ve Structures*, 120, 9-23.

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

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.

- Bartoli, G., Betti, M. ve Giordano, S. (2013). In situ static and dynamic investigations on the “Torre Grossa” masonry tower. *Engineering Structures*, 52, 718-733.
- 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.
- Benedetti, D., Carydis, P. ve Pezzoli, P. (1998). Shaking table tests on 24 simple masonry buildings. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 27 (1), 67-90.
- Betti, M. ve Vignoli, A. (2011). Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all’Impruneta (Italy). *Construction and Building Materials*, 25 (12), 4308-4324.
- Bolhassani, M., Hamid, A. A., Lau, A. C. ve Moon, F. (2015). Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*, 83, 159-173.
- 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.
- Brincker, R. ve Ventura, C. (2015). *Introduction to operational modal analysis* (1). İngiltere: John Wiley & Sons.
- 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.

- Calvi, G. M. ve Bolognini, D. (2001). Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels. *Journal of Earthquake Engineering*, 5 (2), 153-185.
- Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S. ve Calì, I. (2018). A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches. *Engineering Structures*, 168, 243-256.
- 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.
- Casolo, S. ve Milani, G. (2013). Simplified out-of-plane modelling of three-leaf masonry walls accounting for the material texture. *Construction and Building Materials*, 40, 330-351.
- 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.
- Chan, R. ve Bindiganavile, V. (2010). Toughness of fibre reinforced hydraulic lime mortar. Part-1: Quasi-static response. *Materials and structures*, 43 (10), 1435-1444.
- 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., Arêde, A., Costa, A., Caetano, E., Cunha, Á. ve Magalhães, F. (2015). Updating numerical models of masonry arch bridges by operational modal analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (7), 760-774.

- 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.
- Cundall, PA. (1971). A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. *Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, 1, 2-8.
- Cundall, P.A. ve Hart, R.D. (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, 9 (2), 101-113.
- 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.
- Derakhshan, H., Griffith, M. C. ve Ingham, J. M. (2013). Airbag testing of multi-leaf unreinforced masonry walls subjected to one-way bending. *Engineering Structures*, 57, 512-522.
- Demir, C. (2012). *Seismic behaviour of historical stone masonry multi-leaf walls*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demir, C. ve İlki, A. (2014). Characterization of the materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in Istanbul, Turkey. *Construction and Building Materials*, 64, 398-413.
- 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.

- Dolatshahi, K. M. ve Aref, A. J. (2016). Multi-directional response of unreinforced masonry walls: experimental and computational investigations. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 45 (9), 1427-1449.
- Ercan, E. (2018). Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests. *Construction and Building Materials*, 164, 337-349.
- Ertuğrul, S. K. (1995). *Anadolu'da Aydınoğulları Dönemi Mimarisi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Eurocode, CEN. (2005). 6: Design of masonry structures, Part 1–1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. *European Committee for Standardization, Belgium*.
- FEMtools (2017). *Dynamic Design Solutions*. Leuven, Belgium.
- Ferreira, T. M., Costa, A. A., Arêde, A., Gomes, A. ve Costa, A. (2015). Experimental characterization of the out-of-plane performance of regular stone masonry walls, including test setups and axial load influence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (9), 2667-2692.
- 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.
- Garijo, L., Zhang, X., Ruiz, G., Ortega, J. J. ve Wu, Z. (2018). The effects of dosage and production process on the mechanical and physical properties of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials*, 169, 325-334.

- 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.
- Giaireton, M., Dizhur, D. ve Ingham, J. M. (2016). Dynamic testing of as-built clay brick unreinforced masonry parapets. *Engineering Structures*, 127, 676-685.
- Giordano, A., Mele, E. ve De Luca, A. (2002). Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24 (8), 1057-1069.
- Graziotti, F., Tomassetti, U., Penna, A. ve Magenes, G. (2016). Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls. *Engineering Structures*, 125, 455-470.
- Google Earth, (b.t.). 9 Eylül 2019, <https://earth.google.com/web/>.
- Isfeld, A. ve Shrive, N. (2015). Discrete element modeling of stone masonry walls with varying core conditions: Prince of Wales fort case study. *International Journal of Architectural Heritage*, 9 (5), 564-580.
- 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>.
- Karatzetzou, A., Iliou, K., Pitilakis, D., Lagomarsino, S., Cattari, S., Vitzileou, E., ve diğer. (2014). Numerical investigation on the seismic response of historical masonry structures: linear and non-linear modelling of shaking table tests on a building of URM before strengthening. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 30 Ekim 2019, <https://www.researchgate.net/publication/265178177>.

- Lanas, J., Sirera, R. ve Alvarez, J. I. (2006). Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cement and Concrete Research*, 36 (5), 961-970.
- 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. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Doktora Tezi, Delft University of Technology, Portekiz.
- 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.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. ve Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25 (3), 299-326.
- 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.
- Mallardo, V., Malvezzi, R., Milani, E. ve Milani, G. (2008). Seismic vulnerability of historical masonry buildings: a case study in Ferrara. *Engineering Structures*, 30 (8), 2223-2241.

- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I. ve Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35 (8), 1577-1586.
- 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, 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.
- Mısır, İ.S., Youssouf, İ.B. ve Yücel, G. (2018). Out-of-Plane Damage Limits for the Walls in Historical URM Buildings under Earthquake Actions: A Case Study for Isabey Mosque. *3. International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 30 Ekim 2019, <https://www.researchgate.net/publication/328788913>
- Milani, G., Lourenço, P. ve Tralli, A. (2006). Homogenization approach for the limit analysis of out-of-plane loaded masonry walls. *Journal of Structural Engineering*, 132 (10), 1650-1663.
- Milani, P. L. G. ve Lourenco, P. B. (2007). Modeling masonry with limit analysis finite elements: review, applications and new directions. *The Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 1*, 1-20.
- Milani, G. ve Lourenço, P. B. (2010). A simplified homogenized limit analysis model for randomly assembled blocks out-of-plane loaded. *Computers and Structures*, 88 (11-12), 690-717.

- Milani, G. ve Venturini, G. (2011). Automatic fragility curve evaluation of masonry churches accounting for partial collapses by means of 3D FE homogenized limit analysis. *Computers and Structures*, 89 (17-18), 1628-1648.
- 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.
- Milano, L., Mannella, A., Morisi, C. ve Martinelli, A. (2008). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. *Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni*, 30 Ekim 2019, <http://www.geostrutture.eu/images/download/ministero/reluismeccanismi.pdf>.
- 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*, 30 Ekim 2019, https://www.researchgate.net/profile/Erkan_Durmazgezer/publication/327629783.
- Oliveira, D. V., Lourenço, P. B., Garbin, E., Valluzzi, M. R. ve Modena, C. (2006). Experimental investigation on the structural behaviour and strengthening of three-leaf stone masonry walls. *International Conference on Structural Analysis of Historical Construction*, 1, 817-826.
- Orduña, A. (2017). Non-linear static analysis of rigid block models for structural assessment of ancient masonry constructions. *International Journal of Solids and Structures*, 128, 23-35.

- Peña, F., Lourenço, P. B., Mendes, N. ve Oliveira, D. V. (2010). Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. *Engineering Structures*, 32 (5), 1466-1478.
- Petry, S. ve Beyer, K. (2012). Testing unreinforced masonry structures at reduced scale. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 30 Ekim 2019, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1391.pdf.
- Pinto, A. V., Verzeletti, G., Molina, J., Plumier, C., Vaz, C. T., Carvalho, E. C., ve diğər. (1998). Laboratory tests on a full-scale monument. *11th European Conference on Earthquake Engineering*.
- 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.
- Pulatsu, B., Bretas, E. M. ve Lourenco, P. B. (2016). Discrete element modeling of masonry structures: Validation and application. *Earthquakes and Structures*, 11 (4), 563-582.
- Ramalho, M., Taliercio, 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.
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A. ve Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 (5), 1291-1305.
- RILEM. (2004). Recommendation MDT.D.4: In-situ Stress Tests Based on the Flat Jack. In RILEM TC 177-MDT: Masonry Durability and On-site Testing, Materials and Structures 37, 491–496.

- Russo, S. (2013). Testing and modelling of dynamic out-of-plane behaviour of the historic masonry façade of Palazzo Ducale in Venice, Italy. *Engineering Structures*, 46, 130-139.
- Sayın, E., Yön, B., Calayır, Y. ve Karaton, M. (2013). Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazığ) earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 779-791.
- Senthivel, R. ve Lourenço, P. B. (2009). Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls. *Engineering Structures*, 31 (9), 1930-1943.
- Shawa, O. A., de Felice, G., Mauro, A. ve Sorrentino, L. (2012). Out-of-plane seismic behaviour of rocking masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (5), 949-968.
- Smoljanović, H., Nikolić, Ž. ve Živaljić, N. (2015). A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts. *Engineering Structures*, 90, 117-129.
- SolidWorks. (2014). Dassault Systèmes SolidWorks Corp, USA.
- Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. (2018). 11 Kasım 2019, https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf.
- Tavafi, E., Mohebkah, A. ve Sarhosis, V. (2019). Seismic Behavior of the Cube of Zoroaster Tower Using the Discrete Element Method. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-16.
- Torres, W., Almazán, J. L., Sandoval, C. ve Boroschek, R. (2017). Operational modal analysis and FE model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. *Engineering Structures*, 143, 169-188.

Tran, V. H., Vincens, E., Morel, J. C., Dedecker, F. ve Le, H. H. (2014). 2D-DEM modelling of the formwork removal of a rubble stone masonry bridge. *Engineering Structures*, 75, 448-456.

TS EN 1015-3. (2000). Kagit harcı-Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile).

TS EN 1015-11. (2000). Kagit harcı-Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımı tayini.

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

Valente, M. ve Milani, G. (2016). Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy. *Engineering Structures*, 114, 241-270.

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.